



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO



PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**REDES DEL FLUJO SUB – SUPERFICIAL Y RIESGO GEOHIDROLÓGICO EN
LA BAHÍA SALSIPUEDES, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta:

GABRIEL MORALES CARRANZA

Ensenada, Baja California, México, agosto de 2022.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

REDES DEL FLUJO SUB – SUPERFICIAL Y RIESGO GEOHIDROLÓGICO EN LA BAHÍA SALSIPUEDES, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.

TESIS

Requisito para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTADA POR

GABRIEL MORALES CARRANZA

y aprobada por el siguiente Comité



Dr. Álvaro Alberto López Lambráño
Director de tesis



Dr. Jorge Octavio Mata Ramírez
Co – director



Dr. Mario González Durán
Sinodal



Dr. Efraín Gómez Arias
Sinodal



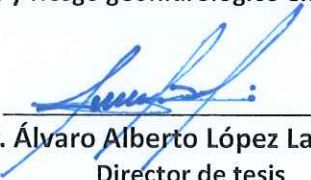
Dra. Ixchel Astrid Camacho Ixta
Sinodal

Ensenada, Baja California, México, agosto de 2022.

Resumen de la tesis que presenta **Gabriel Morales Carranza** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería.

Redes del flujo sub – superficial y riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes, Baja California.

Resumen aprobado por:



Dr. Álvaro Alberto López Lambraño
Director de tesis

Se realiza una recopilación de información piezométrica correspondiente a un periodo de 4 años (2018 – 2021) registrada en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México, una región costera de 35 Km² aproximadamente, que es atravesada por la carretera escénica Tijuana – Ensenada desde el kilómetro 83+000 al 99+000, la cual es conocida por la ocurrencia periódica de fenómenos denominados como deslizamientos de tierras, que son generados principalmente por acción de flujos sub – superficiales. Se utilizan los niveles piezométricos obtenidos de tubos de observación y piezómetros tipo Casagrande, previamente instalados en la zona de estudio por dependencias de gobierno, además de parámetros como la conductividad hidráulica, porosidad efectiva, espesor de saturación y transmisibilidad, de la Bahía Salsipuedes, para determinar el conjunto de redes de flujo en la zona de estudio, el cual da como resultado 36 redes que se encuentran distribuidas en función la densidad de instrumentación colocada en los sitios inestables. Con esta información es posible realizar el cálculo del caudal de agua subterránea y sub – superficial para cada red de flujo mediante el método de superposición difusa ponderada (Fuzzy – WOM) en conjunto con la ecuación de gasto hidráulico de Darcy, obteniendo un modelo e histograma de caudales representativos en la Bahía Salsipuedes, donde el mayor caudal subterráneo se registra en la zona comprendida en el kilómetro 92+500. Enseguida se emplea la metodología de análisis multicriterio en dos ocasiones: la primera, para la obtención del riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes, ponderando y reclasificando modelos en ArcMap 10.3 de ArcGIS correspondientes a los factores amenaza, exposición y vulnerabilidad, haciendo posible la visualización de tres zonas importantes de riesgo geohidrológico como son: el kilómetro 91+500 – 92+000 (parte superior), el kilómetro 93+000 y el kilómetro 94+700 – 95+300. La segunda, tomando como factores la topografía, geología y geohidrología de la zona de estudio para generar un mapeo de la ubicación idónea para la proyección de galerías drenantes que permitan abatir los niveles piezométricos en la Bahía Salsipuedes, estas zonas se localizan entre los kilómetros 92+100 al 93+730. Concluyendo que el sitio en el kilómetro 92+500 que cuenta con los mayores caudales y presencia de riesgo geohidrológico es el ideal para la proyección de una galería drenante haciendo posible el abatimiento del agua subterránea y sub – superficial de la zona y, por lo tanto, evitando deslizamiento de tierras en taludes y en la carretera escénica Tijuana – Ensenada en general.

Palabras clave: Flujo sub – superficial, agua subterránea, caudales, deslizamientos de tierras, superposición difusa ponderada, Darcy, riesgo geohidrológico, amenaza, exposición, vulnerabilidad, galerías drenantes, qanats, análisis multicriterio.

Abstract of the thesis presented by **Gabriel Morales Carranza** as a partial requirement to obtain the Master of Engineering.

Sub-surface flow networks and geohydrological risk in Salsipuedes Bay, Baja California.

Abstract approved by:


Dr. Álvaro Alberto López Lambraño
Thesis director

A compilation of piezometric information corresponding to a period of 4 years (2018 - 2021) was recorded in Salsipuedes Bay, Baja California, Mexico, a coastal region of approximately 35 km², which is crossed by the scenic highway Tijuana - Ensenada from kilometer 83+000 to 99+000, better known for the periodic occurrence of phenomena called landslides, which are generated mainly by the action of sub-surface flows. The piezometric levels obtained from observation tubes and Casagrande type piezometers, previously installed in the study area by government agencies, as well as parameters such as hydraulic conductivity, effective porosity, saturation thickness and transmissibility of the Salsipuedes Bay, are used to determine the set of flow networks in the study area, which results in 36 networks that are distributed according to the density of instrumentation placed in the unstable sites. With this information it is possible to calculate the groundwater and sub-surface water flow for each flow network using the weighted fuzzy superposition method (Fuzzy - WOM) in conjunction with Darcy's hydraulic flow equation, obtaining a model and histogram of representative flows in Salsipuedes Bay, where the highest groundwater flow is recorded in the area at kilometer 92+500. Next, the multicriteria analysis methodology is used on two occasions: first, to obtain the geohydrological risk of Salsipuedes Bay, weighting and reclassifying models in ArcMap 10.3 of ArcGIS corresponding to the threat, exposure and vulnerability factors, making it possible to visualize three important geohydrological risk zones: kilometer 91+500 - 92+000 (upper part), kilometer 93+000 and kilometer 94+700 - 95+300. The second, taking as factors the topography, geology and geohydrology of the study area to generate a mapping of the ideal location for the projection of drainage galleries that allow lowering the piezometric levels in the Salsipuedes Bay, these areas are located between kilometers 92+100 to 93+730. Concluding that the site at kilometer 92+500 that has the highest flows and presence of geohydrological risk is ideal for the projection of a drainage gallery making possible the abatement of groundwater and sub-surface water in the area and, therefore, avoiding landslides on slopes, and on the Tijuana - Ensenada scenic highway in general.

Keywords: Sub-surface flow, groundwater, flow rates, landslides, fuzzy weighted overlay, Darcy, geohydrological risk, hazard, exposure, vulnerability, drainage galleries, qanats, multi-criteria analysis.

DEDICATORIA

A mis padres y hermano,

*Lucía Carranza Agustín,
Gabriel Morales Pimentel y
Arnulfo Morales Carranza.*

Que sin su apoyo no hubiera sido posible este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California por aceptarme nuevamente como parte de su rebaño de cimarrones, así como facilitarme todos los medios necesarios para que mi tránsito en este nivel académico fuera idóneo y confortable; reconociendo principalmente el esfuerzo de docentes y personal administrativo durante una de las épocas más difíciles a nivel mundial como lo fue la pandemia por SARS-CoV-2.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que, con su programa de becas, amparó económicamente mi trayecto en el posgrado, haciendo posible esta investigación.

Al Dr. Álvaro Alberto Lambraño López que, desde el primer acercamiento académico confió en mí para la realización de proyecto. Infinitas gracias por cada consejo brindado, por compartir sus experiencias, por la bondad, paciencia e ímpetu con el que comparte su conocimiento. Siempre estaré agradecido por su tiempo y, sobre todo, por ser un ejemplo académico a seguir.

A mi comité de tesis que, siempre estuvieron presentes con observaciones y consejos para la realización de este documento y que, si son muy cuidadosos al leerlo, verán plasmados una parte de ustedes en él.

Al Ing. Alberto Pelayo Cervantes, por sus consejos, disponibilidad y paciencia, al momento de realizar las visitas de campo, las cuales no hubieran sido posibles sin su ayuda.

A TGC Geotecnia S.A. de C.V. en conjunto con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) y, especialmente al Ing. Miguel Gallardo Contreras, por proporcionarme la mayor parte de la información a tratar en este documento, concerniente a la Bahía Salsipuedes; este proyecto es gracias a su generosidad.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EN ESPAÑOL.....	iii
RESUMEN EN INGLÉS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
TABLA DE CONTENIDO.....	vii
LISTADO DE FIGURAS.....	xi
LISTADO DE TABLAS.....	xvii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Estado del arte	7
1.2.1 Revisión en base de datos bibliográfica	8
1.2.2 Cribado y elegibilidad de las referencias bibliográficas	9
2 DESCRIPCIÓN DEL SITIO	17
2.1 Localización	17
2.2 Características fisiográficas de la Bahía Salsipuedes.....	18
2.2.1 Geología general	18
2.2.2 Geofísica general.....	20
2.2.3 Clima general.....	23
2.2.4 Hidrología general	26
3 JUSTIFICACIÓN	29
3.1 Definición de la problemática	29
4 HIPÓTESIS	33
5 OBJETIVOS	34
5.1 Objetivo general	34
5.2 Objetivos particulares	34
6 MARCO TEÓRICO	35
6.1 Agua subterránea	35
6.1.1 Agua subterránea y sub – superficial	35
6.1.2 Acuíferos.....	35
6.1.3 Tipos de acuíferos	36
6.1.4 Clasificación de acuífero de la Bahía Salsipuedes	37
6.2 Ley de Darcy	38
6.2.1 Parámetros fundamentales.....	38

6.2.2	Ley de Darcy	40
6.2.3	Flujo por Darcy	43
6.2.4	Limitaciones de la Ley de Darcy	44
6.3	Características y tipos de agua en el suelo.....	46
6.3.1	Agua de retención	46
6.3.2	Agua gravítica	47
6.4	Redes de flujo.....	47
6.4.1	Definición	47
6.4.2	Deducción matemática de la red de flujo.	48
6.4.3	Construcción de la red de flujo.	49
6.4.4	Tipos de redes de flujo	50
6.4.5	Cálculo del caudal.....	52
6.5	Validación de resultados	52
6.5.1	Definición	52
6.5.2	Precisión y exactitud	53
6.5.3	Tipos de error	53
6.5.4	Parámetros de validación.....	54
6.5.5	Criterios de evaluación estadística.....	54
6.5.6	Limitaciones y singularidades de RMSE y MAE	56
6.6	Riesgo	56
6.6.1	Inventario	57
6.6.2	Factor amenaza	58
6.6.3	Factor exposición	59
6.6.4	Factor vulnerabilidad	62
6.6.5	Análisis de riesgo.....	62
6.7	Galerías drenantes	63
6.7.1	Obras hidráulicas.....	63
6.7.2	Origen de las galerías drenantes	63
6.7.3	Elementos estructurales en galerías de drenaje	64
6.7.4	Ubicación de galerías en Bahía Salsipuedes.....	68
6.8	Instrumentación piezométrica en la Bahía Salsipuedes.....	70
6.8.1	Tubo de observación	70
6.8.2	Piezómetro tipo Casagrande	71

6.8.3	Diferencia entre nivel freático y nivel piezométrico	73
6.8.4	Medición de instrumentación piezométrica	73
6.9	Sistemas de información geográfica	75
6.9.1	Herramientas de un SIG	76
6.10	Análisis multicriterio.....	86
6.10.1	Principales métodos de análisis multicriterio	87
6.10.2	Reclasificación	88
6.10.3	Álgebra de mapas.....	88
6.10.4	Solución del análisis multicriterio	89
6.11	Modelo conceptual	89
7	METODOLOGÍA.....	92
7.1	Recolección de información	93
7.1.1	Revisión bibliográfica	93
7.1.2	Gestión en dependencia de gobierno	94
7.1.3	Visitas a campo.....	95
7.2	Tratamiento de la información	99
7.2.1	Información piezométrica	100
7.2.2	Información topográfica.....	105
7.2.3	Información geológica	105
7.2.4	Información geohidrológica	111
7.2.5	Información socio – económica y vulnerabilidad.....	114
7.2.6	Inserción de información en ArcMap 10.3	119
7.3	Redes de flujo.....	121
7.3.1	Líneas de flujo	122
7.3.2	Líneas equipotenciales	127
7.3.3	Generación de la red de flujo	134
7.4	Gasto de las redes de flujo	135
7.4.1	Caudales por superposición difusa ponderada.	137
7.4.2	Caudales por método tradicional.....	143
7.4.3	Validación por RMSE	145
7.5	Análisis de riesgo geohidrológico.....	146
7.5.1	Datos de entrada.....	146
7.5.2	Modelos de factores de riesgo.....	147

7.5.3	Condiciones, parámetros o criterios	150
7.5.4	Reclasificación de modelos	151
7.5.5	Álgebra de mapas.....	157
7.6	Análisis multicriterio para ubicación de galerías drenantes	159
7.6.1	Datos de entrada.....	161
7.6.2	Modelos de interpolación	161
7.6.3	Condiciones, parámetros o criterios	165
7.6.4	Reclasificación de modelos	166
7.6.5	Álgebra de mapas.....	171
7.7	Modelo conceptual	173
7.7.1	Selección del sitio	175
7.7.2	Perfil topográfico.....	176
7.7.3	Vaciado de información	177
7.7.4	Modelo conceptual del kilómetro 92+500	181
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES	183
8.1	Metodología PRISMA en geohidrología	183
8.2	Información piezométrica en la Bahía Salsipuedes.....	185
8.3	Redes de flujo en la Bahía Salsipuedes	189
8.4	Modelo de caudales en la Bahía Salsipuedes.....	198
8.5	Riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes.....	203
8.6	Distribución de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes	207
8.6.1	Proyección galería drenante kilómetro 92+500.....	210
8.7	Modelo conceptual del km 92+500.....	212
8.7.1	Modelo conceptual del km 92+500 con galería proyectada	215
9	CONCLUSIONES.....	218
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	222
11	ANEXOS	233

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Vista en Dron de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, a la altura del kilómetro 87+700, (Pelayo C., 2022).....	4
Figura 1.2. Derrumbe km 93+000, diciembre de 2013, (Fernández, 2014).....	6
Figura 1.3. Distribución de deslizamientos de tierra en la Bahía Salsipuedes (1961 – 2020).	7
Figura 1.4. Vista en dron de la carretera escénica, sobre el kilómetro 93+500, (Pelayo C., 2022). ...	7
Figura 1.5. Histograma de relevancia para la investigación, por la metodología <i>PRISMA</i>	9
Figura 1.6. Diagrama <i>PRISMA</i> de la investigación. Modificado de (Moher, Liberati, Tetzlaff, D.G., & Group, 2009).	10
Figura 1.7. Histograma de frecuencias de artículos publicados por país.	11
Figura 1.8. Histograma de frecuencias de artículos por año de publicación.	12
Figura 1.9. Histograma de frecuencias de artículos por editorial de origen.	12
Figura 1.10. Histograma de frecuencias por título de fuente.	13
Figura 1.11. Histograma de frecuencias por metodología de autores.	16
Figura 2.1. Mapa de localización de la Bahía, Salsipuedes, Baja California, México.	17
Figura 2.2. Representación del mapa geológico-minero de Ensenada H11-2.(INEGI, 2003).	19
Figura 2.3. Socavación y erosión marina en taludes escarpados del kilómetro 92+500-700 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, (Pelayo C., 2022).....	20
Figura 2.4. Modelo de velocidad de propagación de onda P en la Bahía Salsipuedes, (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).	22
Figura 2.5. Modelo de velocidad de propagación de onda P en el Km 92+000-500, (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).	23
Figura 2.6. Distribución climatológica de Baja California, México, de acuerdo con la clasificación de Köppen, tomada de (López-Lambraño, Fuentes, López-Ramos, Mata R., & López-Lambraño, 2018).	25
Figura 2.7. Precipitaciones registradas por la estación “CICESE” en el año 2021.	26
Figura 2.8. Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia) de la estación “El farito”, tomado de (TGC & Mendoza, Informe hidrológico Bahía Salsipuedes, 2017).	27
Figura 2.9. Aparición de flujo base en forma de burbujeo submarino en kilómetro 91 y 92.....	28
Figura 3.1. Mapa de ubicación de sitios de inestabilidad en la Bahía Salsipuedes.	30
Figura 3.2. Comparativa anual de niveles piezométricos en <i>PZM-01</i> del kilómetro 93+000.	31
Figura 6.1. Permeámetro de carga constante, tomada de (Sánchez- San Román, 2012).	42
Figura 6.2. Flujo de un líquido a través de un medio poroso en un tubo inclinado, tomada de (Vélez Otálvaro, 2004).	43
Figura 6.3. Representación gráfica de la red de flujo, tomada de (Sowers & Sowers, 1990).....	48
Figura 6.4. Flujo en un medio anisotrópico, tomada de (Sowers & Sowers, 1990).....	51
Figura 6.5. Elementos en exposición de la Bahía Salsipuedes.	61
Figura 6.6. Esquema en planta de galerías en tipo "J".....	65
Figura 6.7. Esquema en perfil de elementos en galerías de sección abovedada.	65
Figura 6.8. Tipos de geometría y secciones en galerías drenantes.	66
Figura 6.9. Portal norte de la galería abovedada en kilómetro 88+000, tomada de (TGC, Gallardo, & Bermúdez, Informe geotécnico Bahía Salsipuedes, 2018).	68
Figura 6.10. Localización de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.	69

Figura 6.11. Diagrama de tubo de observación, tomada de (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).	71
Figura 6.12. Diagrama de piezómetro tipo Casagrande, tomada de (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).	72
Figura 6.13. Interfaz de calculadora ráster o de mapas, tomada de (ESRI, 2022).	89
Figura 7.1. Metodología general de la investigación geohidrológica en la Bahía Salsipuedes.....	92
Figura 7.2. Vista hacia mar de la carretera escénica en el km 95+100, durante la primera visita. ..	96
Figura 7.3. Inclínómetro No. 3 en el kilómetro 95+000, durante la segunda visita.	96
Figura 7.4. Ancas de sujeción en talud de kilómetro 91+450, durante la tercera visita.....	97
Figura 7.5. Medición del tubo de observación 05 del kilómetro 90+000 (cuerpo B), durante la cuarta visita.	97
Figura 7.6. Medición del piezómetro 03 del kilómetro 95+000 (cuerpo A, sobre trinchera), durante la quinta visita.	98
Figura 7.7. Medición del tubo de observación 02 del kilómetro 93+500 (cuerpo B, sobre camino rural), durante la sexta visita.	99
Figura 7.8. Taludes en el kilómetro 92+100 (vista desde cuerpo A), durante la séptima visita.	99
Figura 7.9. Series de tiempo de tubos de observación en el kilómetro 95-96+000.	101
Figura 7.10. Sondeos realizados en la Bahía Salsipuedes, según la técnica de muestreo utilizada.	108
Figura 7.11. Estratigrafía del sondeo WL-01 km 92+000 de los 40 a 80 metros de profundidad, tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).	109
Figura 7.12. Geología general (izquierda) y localización de fallas normales (derecha), en la Bahía Salsipuedes.	111
Figura 7.13. Puntos de control geohidrológicos de la Bahía Salsipuedes.....	112
Figura 7.14. Pérdidas por sistema en la Bahía Salsipuedes.	115
Figura 7.15. Pérdidas por elemento dentro del sistema de obras de estabilidad en la Bahía Salsipuedes.	115
Figura 7.16. Calificación de vulnerabilidad por sistemas en la Bahía Salsipuedes.	116
Figura 7.17. Calificación de vulnerabilidad por elemento de obras de estabilidad en la Bahía Salsipuedes.	116
Figura 7.18. Información de instrumentación piezométrica (izquierda) y puntos de control geohidrológico (derecha) en la Bahía Salsipuedes.....	120
Figura 7.19. Puntos de control socio – económico de la Bahía Salsipuedes.	120
Figura 7.20. Curvas de nivel a cada metro en la Bahía Salsipuedes.	121
Figura 7.21. Metodología particular para generación de redes de flujo.	122
Figura 7.22. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Porosidad).....	123
Figura 7.23. Modelos de interpolación por método IDW para propiedades geohidrológicas: carga hidráulica (superior izquierda), porosidad efectiva (superior derecha), espesor de saturación (inferior izquierda) y transmisibilidad (inferior derecha).....	124
Figura 7.24. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para flujo por Darcy.....	125
Figura 7.25. Líneas de flujo por el método de Darcy en la Bahía Salsipuedes.....	126
Figura 7.26. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (NPM).....	128
Figura 7.27. Modelo de interpolación IDW para niveles piezométricos medios (NPM) en la Bahía Salsipuedes.	128

Figura 7.28. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación Kriging (NPM).....	129
Figura 7.29. Modelo de interpolación Kriging para niveles piezométricos medios (NPM) en la Bahía Salsipuedes.	130
Figura 7.30. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación Spline (NPM).	130
Figura 7.31. Modelo de interpolación Spline para niveles piezométricos medios (NPM) en la Bahía Salsipuedes.	131
Figura 7.32. Relación de valores para modelo de interpolación IDW del cálculo RMSE.	132
Figura 7.33. Relación de valores para modelo de interpolación Kriging del cálculo RMSE.	132
Figura 7.34. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para obtención de contornos en modelo de interpolación (Contour).....	133
Figura 7.35. Líneas equipotenciales (Isolíneas piezométricas) por el método de IDW en la Bahía Salsipuedes.	134
Figura 7.36. Redes de flujo sub – superficial de la Bahía Salsipuedes.	135
Figura 7.37. Metodología particular para el cálculo de caudal de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes.	136
Figura 7.38. Localización de puntos de control piezométrico en la Bahía Salsipuedes.	139
Figura 7.39. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Longitud de canal de flujo).	139
Figura 7.40. Modelos de interpolación por método IDW para propiedades de la red de flujo: longitud de canales de flujo (superior izquierda), conductividad hidráulica (superior derecha), carga hidráulica total (inferior izquierda) y factor de forma (inferior derecha).	140
Figura 7.41. Modelo de interpolación por método IDW para propiedades de la red de flujo: relación de ancho/base de los rectángulos curvilíneos.	141
Figura 7.42. Modelo de gasto (caudal) de la Bahía Salsipuedes, calculado por el método de superposición difusa ponderada (Fuzzy – WOM).	142
Figura 7.43. Isolíneas de gasto a cada 20 m ³ /día, en la Bahía Salsipuedes.	143
Figura 7.44. Relación de valores Qe y Qa de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes en el cálculo RMSE.	145
Figura 7.45. Metodología particular para en análisis del riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes.	146
Figura 7.46. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Costo/Importe).	147
Figura 7.47. Modelos IDW de Importes (Izquierda) y pérdidas (Derecha) por elementos en exposición de la Bahía Salsipuedes.	148
Figura 7.48. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para Distancia euclidiana (Fallas geológicas).	149
Figura 7.49. Modelos de distancia euclidiana en: fallas normales (Izquierda) y carretera escénica Tijuana – Ensenada (Km 83 – 98) correspondiente al derecho de vía (derecha).....	150
Figura 7.50. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para Reclasificación (Modelo NPM).	153
Figura 7.51. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para crear intervalos de reclasificación (Modelo NPM).	153
Figura 7.52. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para reclasificación con valores cambiados (Modelo NPM).....	154
Figura 7.53. Modelos reclasificados para estimación de riesgo geohidrológico, niveles piezométricos medios (superior izquierda), Importes de elementos en exposición (superior derecha), pérdidas (inferior izquierda) y geológico (inferior derecha).....	155

Figura 7.54. Modelos reclasificados para estimación de riesgo geohidrológico, fallas normales (Izquierda) y derecho de vía (derecha).	156
Figura 7.55. Modelo reclasificado para estimación de riesgo geohidrológico (Vulnerabilidad). ...	156
Figura 7.56. Representación gráfica del álgebra de mapas para el riesgo en general.	157
Figura 7.57. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para calculadora de ráster (Riesgo geohidrológico).	158
Figura 7.58. Mapa de riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes, en verde se muestran las zonas de riesgo.	159
Figura 7.59. Metodología particular para en análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.	160
Figura 7.60. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para modelo digital de elevaciones.	162
Figura 7.61. Modelo digital de elevaciones de la Bahía Salsipuedes.	163
Figura 7.62. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Conductividad hidráulica).	164
Figura 7.63. Modelo IDW de conductividad hidráulica de la Bahía Salsipuedes.	165
Figura 7.64. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para Reclasificación (Modelo digital de elevaciones).	168
Figura 7.65. Modelos reclasificados para análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, modelo digital de elevaciones (superior izquierda), geología (superior derecha), fallas geológicas (inferior izquierda) y conductividad hidráulica (inferior derecha).	169
Figura 7.66. Modelos reclasificados para análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, porosidad efectiva (izquierda) y caudales (derecha).	170
Figura 7.67. Modelo reclasificado para análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, modelo de niveles piezométricos medios.	170
Figura 7.68. Representación gráfica del álgebra de mapas para el análisis multicriterio de ubicación de galerías.	171
Figura 7.69. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para calculadora de ráster (Análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes).	172
Figura 7.70. Mapa de zonas de proyección de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes, en azul se muestran las zonas idóneas para generación de proyecto de galerías.	173
Figura 7.71. Metodología particular para en generación de modelo conceptual del sitio de mayor inestabilidad por acción de agua subterránea y sub – superficial en la Bahía Salsipuedes.	174
Figura 7.72. Acercamiento al km 92+500 de la Bahía Salsipuedes, Superposición de isolíneas de gasto/caudal, polígonos de riesgo geohidrológico (verde) y polígonos de análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes (azul).	175
Figura 7.73. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación de formas (Interpolate shape para generación de perfil topográfico).	176
Figura 7.74. Exportación de puntos del gráfico del perfil topográfico.	177
Figura 7.75. Acercamiento a kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes, donde intervienen sondeos, instrumentación y la carretera escénica, el perfil topográfico es el representado por la línea magenta.	178
Figura 7.76. Estratigrafía del sondeo WL – 01 del TO – 02 del kilómetro 92+000 (según nomenclatura TGC) de la Bahía Salsipuedes, de 0 a 40 metros de profundidad, el resto de la estratigrafía en la sección de Anexos.	179

Figura 7.77. Acercamiento al kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes, Isolíneas de caudal (subterráneo).	180
Figura 7.78. Sistema de anclaje en kilómetro 92+500, de la Bahía Salsipuedes, visita de campo No. 7.	181
Figura 7.79. Modelo conceptual kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes.	182
Figura 8.1. Artículos por continente de publicación según la metodología PRISMA.	184
Figura 8.2. Distribución por tipo de instrumentación en la Bahía Salsipuedes.	185
Figura 8.3. Comparativa en niveles piezométricos en kilómetros 92-93+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada en la Bahía Salsipuedes.	186
Figura 8.4. Comparativa anual de nivel freático en TO – 01 km 92+000.	188
Figura 8.5. Comparativa anual de nivel freático en PMZ – 01 km 92+000.	188
Figura 8.6. Comparativa de precipitación – instrumentación para el año 2021 en el kilómetro 92+000.	189
Figura 8.7. Relación entre instrumentación instalada y redes de flujo por sitio en la Bahía Salsipuedes.	192
Figura 8.8. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 84-86, de la Bahía Salsipuedes.	194
Figura 8.9. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 88-90, de la Bahía Salsipuedes.	195
Figura 8.10. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 91-93, de la Bahía Salsipuedes.	196
Figura 8.11. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 94-96, de la Bahía Salsipuedes.	197
Figura 8.12. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 97-98, de la Bahía Salsipuedes.	198
Figura 8.13. Comparativa entre modelo de gastos por WOM y modelo de conductividad hidráulica de la Bahía Salsipuedes.	199
Figura 8.14. Talud del kilómetro 92+450 de la Bahía Salsipuedes, donde se aprecian aluviones sobre una matriz de arenosa compactada (arenisca).	199
Figura 8.15. Comparativa entre modelos de caudales: Q_a (Fuzzy – WOM a la izquierda) y Q_e (estimado a la derecha).	200
Figura 8.16. Comparativa entre caudales Q_e (estimado por fórmula de Darcy) y Q_a (calculado por el método Fuzzy – WOM).	201
Figura 8.17. Relación de valores gasto Q_e y Q_a en la carretera escénica Tijuana – Ensenada (km 83+500 – 99+500) en el cálculo RMSE.	202
Figura 8.18. Modelos por elementos en exposición en la Bahía Salsipuedes de: costos o importes (izquierda) y pérdidas (derecha).	204
Figura 8.19. Comparativa entre pérdidas diarias y calificación de vulnerabilidad por cada elemento en exposición en la Bahía Salsipuedes.	207
Figura 8.20. Acercamiento a zonas de ubicación y proyección de galerías drenantes (km 90 – 94).	209
Figura 8.21. Proyección de galería drenante en el kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes.	212
Figura 8.22. Afloramiento de flujo base en el kilómetro 92+500.	215
Figura 8.23. Modelo conceptual del kilómetro 92+500, tomando en cuenta la proyección de una galería drenante.	217
Figura 11.1. Carta de solicitud de información a SCT-CAPUFE.	233
Figura 11.2. Estratigrafía SMC-1 km 92+000, de 0 a 20 metros de profundidad.	234
Figura 11.3. Estratigrafía SMC-1 km 92+000, de 20 a 37.4 metros de profundidad.	235
Figura 11.4. Estratigrafía WL-1 km 92+000, de 0 a 40 metros de profundidad.	236

Figura 11.5. Estratigrafía WL-1 km 92+000, de 40 a 80 metros de profundidad.....	237
Figura 11.6. Estratigrafía WL-2 km 92+000, de 0 a 40 metros de profundidad.....	238
Figura 11.7. Estratigrafía WL-2 km 92+000, de 40 a 80 metros de profundidad.....	239
Figura 11.8. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 0 a 20 metros de profundidad.....	240
Figura 11.9. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 20 a 40 metros de profundidad.....	241
Figura 11.10. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 40 a 60 metros de profundidad.....	242
Figura 11.11. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 60 a 70 metros de profundidad.....	243
Figura 11.12. Series de tiempo tubos de observación km 84+000.	244
Figura 11.13. Series de tiempo tubos de observación km 86+000.	244
Figura 11.14. Series de tiempo tubos de observación km 88+000.	244
Figura 11.15. Series de tiempo tubos de observación km 90+000.	245
Figura 11.16. Series de tiempo tubos de observación km 91+000.	245
Figura 11.17. Series de tiempo tubos de observación km 92+000.	245
Figura 11.18. Series de tiempo tubos de observación km 93+000.	246
Figura 11.19. Series de tiempo tubos de observación km 93+500.	246
Figura 11.20. Series de tiempo tubos de observación km 94+000.	246
Figura 11.21. Series de tiempo tubos de observación km 95-96+000.....	247
Figura 11.22. Series de tiempo tubos de observación km 98+000.	247
Figura 11.23. Series de tiempo piezómetros km 86+000.	248
Figura 11.24. Series de tiempo piezómetros km 88+000.	248
Figura 11.25. Series de tiempo piezómetros km 90+000.	248
Figura 11.26. Series de tiempo piezómetros km 91+000.	249
Figura 11.27. Series de tiempo piezómetros km 92+000.	249
Figura 11.28. Series de tiempo piezómetros km 93+000.	249
Figura 11.29. Series de tiempo piezómetros km 93+500.	250
Figura 11.30. Series de tiempo piezómetros km 94+000.	250
Figura 11.31. Series de tiempo piezómetros km 95-96+000.	250
Figura 11.32. Series de tiempo piezómetros km 98+000.	251
Figura 11.33. Relación de errores de RMSE para la predicción IDW.	251
Figura 11.34. Relación de errores RMSE para la predicción Kriging.	252
Figura 11.35. Relación de errores RMSE para la predicción de caudal estimado (Qe).....	252
Figura 11.36. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de corte/talud anclaje.	253
Figura 11.37. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de vías terrestres.	253
Figura 11.38. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de obras de drenaje.....	253
Figura 11.39. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de instrumentación.	254

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Distribución de agua en la Tierra, adaptada de (Vélez Otálvaro, 2004).	2
Tabla 1.2. Cronología de deslizamientos en la carretera escénica Tijuana – Ensenada, (SOP, 1975).5	
Tabla 1.3. Elegibilidad de artículos por relevancia en la investigación.....	9
Tabla 2.1. Precipitaciones registradas en la estación “CICESE” en el año 2021, (CICESE, 2022)	26
Tabla 3.1. Lecturas del piezómetro 01 del kilómetro 93+000.	31
Tabla 6.1. Valores de porosidad total y efectiva para diferentes materiales, (Domenico & Schwartz, 1998).	38
Tabla 6.2. Valores estimados de conductividad hidráulica, compendio tomado de (Barbecho C. & Calle O., 2012).	39
Tabla 6.3. Tipos de agua subterránea, (Vélez Otálvaro, 2004).	46
Tabla 6.4. Valores permisibles de RMSE para una capa ráster en SIG, tomada de (López-Lambrano, Apuntes Laboratorio de SIG, 2020).	56
Tabla 6.5. Especies endémicas a rescatar en la Bahía Salsipuedes, tomada de (TGC & Juárez, Manifiesto de impacto ambiental Bahía Salsipuedes, 2016).	60
Tabla 6.6. Escala de vulnerabilidad estructural, tomada de (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).	62
Tabla 6.7. Cantidades de instrumentos piezométricos en la Bahía Salsipuedes, tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).	74
Tabla 7.1. Extracto de la base de datos piezométricos de tubos de observación. Tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).	100
Tabla 7.2. Extracto de la base de datos piezométricos de piezómetros. Tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).	100
Tabla 7.3. Extracto de la base de datos piezométricos de esta investigación.	104
Tabla 7.4. Sondeos realizados en la Bahía Salsipuedes hasta diciembre de 2021.	107
Tabla 7.5. Extracto de la base de datos geohidrológicos de la Bahía Salsipuedes.	113
Tabla 7.6. Extracto de la base de datos socio – económicos y vulnerabilidad de la Bahía Salsipuedes, solo del tipo “Alcantarillas”.	118
Tabla 7.7. Base de datos de puntos de control piezométrico de la Bahía Salsipuedes.	137
Tabla 7.8. Estimación de caudales por ecuación de Darcy.	144
Tabla 7.9. Parámetros de reclasificación de modelos ráster en estimación de riesgo geohidrológico.....	152
Tabla 7.10. Parámetros de reclasificación de modelos ráster de análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.	167
Tabla 8.1. Cuento actual de la instrumentación piezométrica en la Bahía Salsipuedes.....	186
Tabla 8.2. Zonas de ubicación de galerías drenantes en Bahía Salsipuedes.	210
Tabla 11.1. Matriz de evaluación de vulnerabilidad estructural por elementos en exposición en la Bahía Salsipuedes, calificaciones.	255

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El agua siempre está presente en la naturaleza en un movimiento cíclico, y a su vez, pasa por diferentes estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. El agua en estado líquido se encuentra en la atmósfera, mares, ríos, lagos, suelo y subsuelo (Vélez Otálvaro, 2004).

Ahora bien, la hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas, y su relación con el medio ambiente incluyendo a los seres vivos (Chow, 2000).

Ahora bien, la hidrología se puede dividir en varias ramas, entre las más destacadas, la hidrología aplicada o ingeniería hidrológica y la hidrología subterránea o geohidrología; la primera se encarga del diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua; mientras que la segunda es una rama de la hidrología y la geología aplicada, que estudia las aguas subterráneas, en tanto a su origen, circulación, captación, propiedades y su relación con suelos y rocas (Aparicio Mijares, 2012).

La hidrología subterránea, hidrogeología o geohidrología es la ciencia que estudia el origen y formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen, y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado de agregación y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación (Mijailov, 1989).

Dentro de los alcances de la hidrología subterránea están las aguas sub superficiales, que son aquellas que se encuentran a pocos metros de la superficie terrestre, básicamente consideradas parte de las precipitaciones que no se han filtrado hasta el nivel freático que circulan a través de los estratos superiores de una formación a una velocidad muy superior a la normal de la escorrentía subterránea (UNESCO, 2012).

La importancia del agua como recurso indispensable para la vida es innegable (Elvis, Arsène, Théophile, Bruno, & Olivier, 2022), y en el caso de las aguas sub superficial y subterránea es mayor, ya que normalmente son utilizadas para el abastecimiento de agua potable, en diferentes estratos poblacionales; es decir, desde pequeñas viviendas rurales, hasta grandes zonas urbanas; además de proyectos agropecuarios para riego, e industria (Phong, Pham, Trinh, Ly, & et, 2021).

El movimiento y ocurrencia del agua subterránea y sub superficial está ligado a varios factores importantes, tales como, la geomorfología, geología, fallas y fracturas de extensión y profundidad considerables, la porosidad efectiva, el tipo de suelo, las condiciones climáticas y su relación entre ellos mismos (Elvis et al., 2022).

El agua subterránea tiene importancia también como componente esencial del ciclo hidrológico y como reserva fundamental. En una escala global, el 96.965% del agua total es salada y sólo el 3.035% es agua dulce; de esos $41 \times 10^6 \text{ km}^3$ de agua dulce el 73.17% es agua dulce no utilizable y 26.83% agua dulce utilizable. Tomando como 100% la cantidad de agua dulce utilizable que corresponde a $11 \times 10^6 \text{ km}^3$ de agua, el 99% corresponde a agua subterránea y sólo 1% a la proveniente de lagos, ríos, atmósfera y biológica, como se puede observar en la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Distribución de agua en la Tierra, adaptada de (Vélez Otálvaro, 2004).

Tipo de agua	Sobre total de agua en la Tierra		Sobre el total de agua dulce	Sobre total de agua dulce disponible
	km ³ x 10 ⁶	% del total	En % sobre 41 x 10 ⁶ km ³	En % sobre 11 x 10 ⁶ km ³
Agua total	1351.00	100.0000%		
Agua salada	1310.00	96.9652%		
Agua dulce	41.00	3.0348%	100.00%	
Dulce no utilizable	30.00	2.2206%	73.17%	
Dulce utilizable	11.00	0.8142%	26.83%	100.00%
Agua subterránea		0.8061%	26.56%	99.00%
Agua en lagos		0.0045%	0.15%	0.55%
Agua en suelos		0.0016%	0.05%	0.20%
Agua en ríos		0.0008%	0.03%	0.10%
Agua en atmósfera		0.0008%	0.03%	0.10%
Agua biológica		0.0004%	0.01%	0.05%

En el caso del agua dulce subterránea y sub superficial, el 0.30% es económicamente explotable; el resto se encuentra a profundidades mayores a los 800 metros, lo que hace poco viable su extracción para fines prácticos.

Por lo anterior se puede decir que las aguas subterráneas y sub superficiales constituyen un recurso natural de gran importancia para el abastecimiento del líquido vital y en consecuencia el desarrollo humano, específicamente hablando de su abundancia relativa con respecto a las aguas superficiales.

Las interacciones entre la hidrología de superficie y la geohidrología sub superficial componen una red hidrológica compleja, que mantienen el balance dinámico entre los regímenes de agua sobre y debajo de la tierra, (Q. Liu, 2014).

El flujo del agua a través de un suelo saturado se puede representar esquemáticamente con las redes de flujo (Sowers & Sowers, 1990). De esta manera es más sencillo conocer el caudal o gasto hidráulico por aguas subterráneas y sub superficiales; una red de flujo es una cuadrícula formada por líneas equipotenciales (de igual carga hidráulica) y líneas de flujo (líneas perpendiculares a las líneas equipotenciales, por donde fluye el caudal). El mallado resultante, junto con algunas propiedades geológicas, proporciona la información suficiente para la obtención del caudal.

El agua subterránea y subsuperficial presenta algunos aspectos favorables como, la regularidad de los caudales debido a las características de su almacenamiento natural, su protección ante las pérdidas por evaporación, su protección ante la polución superficial en comparación a la que reciben ríos y lagos, y su estrecha relación con las corrientes superficiales (Vélez Otálvaro, 2004).

A su vez, la presencia de agua sub superficial es una amenaza en zonas donde el suelo y las rocas son vulnerables a la interacción con el vital líquido, estas amenazas generan algunos riesgos como pueden ser la licuación de suelos, asentamientos diferenciales y en el peor de los casos, deslizamientos de tierras.

Los deslizamientos de tierra son uno de los fenómenos geológicos más peligrosos que han ocurrido recientemente alrededor del mundo en áreas urbanas (Mohebbi, Nakhaei, & Lak, 2020); y son considerados como unas de las catástrofes naturales más destructivas de la historia; las cuales han tenido una serie de consecuencias devastadoras para un gran número de personas y propiedades; es por ello que la determinación precisa de zonas propensas a los desprendimientos es indispensable, tanto para la protección del medio ambiente, como el salvaguardo de la salud humana (Kutlug & Colkesen, 2021).

Los deslizamientos de tierra son el movimiento de grandes masas de suelo y/o roca, ocasionados por algún factor amenazante, como un sismo, presencia de fallas o fracturas en estratos de suelo inferiores, intemperismo – meteorización, excedencia de cargas muertas y principalmente la presencia de agua sub – superficial (Ayt, y otros, 2020). Un desplazamiento de tierra es un asentamiento o sedimentación gradual hacia debajo de la superficie del suelo, que tiene un vector de desplazamiento horizontal (Mohebbi, Nakhaei, & Lak, 2020).

Una zona donde se puede observar que el agua sub – superficial y su interacción con el suelo provocan deslizamientos de tierra es la carretera escénica Tijuana-Ensenada, principalmente en la zona conocida como la Bahía Salsipuedes.

La carretera escénica Tijuana – Ensenada se planeó como un camino de peaje, cuya finalidad principal había de ser contribuir al desarrollo turístico de la zona, razón por la cual debía satisfacer el requisito de ser un camino escénico corriendo a lo largo de la costa del Océano Pacífico (SOP, 1975). Ver **Figura 1.1**.

La Bahía Salsipuedes es una región geográfica al Noroeste de la ciudad de Ensenada, Baja California, México. Comprende 35 km² de superficie aproximada y es una zona que se caracteriza por la presencia recurrente de fenómenos de deslizamiento de tierras. La Bahía Salsipuedes es cruzada por la carretera escénica Tijuana – Ensenada, desde el kilómetro 84+000 hasta el 99+000. Geográficamente el tramo de 15 kilómetros de carretera dentro de la Bahía está en el paralelo 32° N y en el meridiano 116.8° O, localizado en el extremo noroeste de la península de Baja California.

Desde los primeros estudios geotécnicos realizados, se supo que dentro de la zona donde hoy ocurren los deslizamientos, existían ya otros más antiguos, que por sus características geológicas podrían activarse nuevamente y causar problemas (SOP, 1975).

No obstante, lo anterior y en virtud de las razones que impulsaron a construir el camino, las autoridades que realizaron su planeación, decidieron aceptar los riesgos previstos a sabiendas de hacer en el futuro mayores erogaciones. El aceptar un cambio de ruta no justificaba la construcción del camino pues perdía en parte su atractivo turístico, y por otra parte existía un camino federal en operación, que en aquel entonces era suficiente para las demandas de tránsito (SOP, 1975)

Así pues, en el año de 1961 se pusieron en marcha los primeros estudios, sondeos, y levantamientos para la construcción la carretera escénica Tijuana – Ensenada. Tal como se había previsto, durante esta etapa (estudios y proyecto), se empezaron a manifestar los primeros deslizamientos, específicamente en los kilómetros 93+000, 88+000 y 86+000. Iniciándose entonces las primeras investigaciones tendientes a estudiar su mecanismo (SOP, 1975).



Figura 1.1. Vista en Dron de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, a la altura del kilómetro 87+700, (Pelayo C., 2022).

En el año de 1962, se presentan ligeros agrietamientos en los kilómetros 84+000 y 92+000, cuyo origen se le atribuyen al desplazamiento de la masa de tierra en esos sitios; para el año 1963 se activó una primera masa en el kilómetro 88+000, iniciándose en rigor ese año, las investigaciones correspondientes al mecanismo de falla y deslizamiento de la zona. la exploración en campo de esa zona, consistió en una serie de sondeos e instalación de inclinómetros, con el fin de detectar la profundidad de la superficie de deslizamiento (SOP, 1975).

Estos estudios se llevaron a cabo durante 1964, manifestándose en ese mismo año los deslizamientos en los kilómetros 92+000, 94+000, 95+000 y 98+000. Durante ese mismo año, una serie de deslizamientos ocurrieron en el kilómetro 91+000, cinco (5) para ser exactos, en un lapso menor a 8 meses, fue por ello que, mediante investigaciones realizadas por la extinta Secretaría de Obras Públicas, se determinó que el factor principal de los deslizamientos en esa zona fue la influencia del agua infiltrada por las lluvias estacionales. En el año de 1965, se realizó la construcción de una galería filtrante en el kilómetro 91+000 bajo la superficie de deslizamiento, cuyo principal fin fue la abatir el flujo de agua sub – superficial. Bajando el nivel freático 6 metros durante su primer año de funcionamiento. A partir de su funcionamiento no se registraron mayores deslizamientos hasta la actualidad (SOP, 1975).

En 1966, la falla del kilómetro 86+000 también afectó el camino, debido a un deslizamiento en el contacto de los depósitos de talud con rocas sedimentarias. Un año más tarde en 1967, ocurrieron un par más de deslizamientos (SOP, 1975). Durante ese año se puso en operación la carretera escénica Tijuana – Ensenada, una vía federal de cuota, con una longitud de 95 kilómetros.

Ese mismo año, 1967, el kilómetro 93+000 colapsó súbitamente en el mes de mayo. El deslizamiento arrastró consigo el cuerpo del camino, interrumpiendo por completo la circulación. Ese evento ocurrió mes y medio después de terminada la temporada anual de lluvias. Este mismo patrón de comportamiento se fue observando a través de las décadas, ocurriendo los más importantes en 1983 (este mismo año ocurren movimientos en el kilómetro 92+000), 1995, 1997 y 2013; siendo este el más reciente y de mayor impacto socio – económico.

El 28 de diciembre de 2013, durante la madrugada se presenció un deslizamiento de grandes magnitudes, 300 metros aproximadamente de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, se desplomaron 30 metros de profundidad hacia lado mar (SCT, 2014). Provocando que la comunicación por esta vía quedara suspendida más de un año. Véase la **Figura 1.2**.

Debido a las obras de emergencia y estabilidad que se realizaron, tanto en ese kilómetro, como en otros que presentaban señales de posible deslizamiento en la actualidad (grietas, asentamientos, entre otros) y que desde el inicio de la construcción de la carretera ya presentaban, tales son los casos del kilómetro 88+000, 89-90+000, 94+000, 95-96+000 y 98+000. La cronología de los deslizamientos se puede observar en la **Tabla 1.2**.

Tabla 1.2. Cronología de deslizamientos en la carretera escénica Tijuana – Ensenada, (SOP, 1975).

Año	Ubicación	Observaciones
1961	Km 93+000, 88+000 y 86+000.	Comienzan las primeras manifestaciones de movimientos en esos kilómetros de la carretera escénica.
1962	Km 84+000 y 92+000	Se activan las masas de esos sitios.
1963	Km 88+000	Se activa la primera masa, con un deslizamiento mayor a 1 metro, presencia de grietas en terreno.
1964	Km 91+000, 92+000, 94+000, 95+000 y 98+000	Se activan esos sitios, y se comienzan a realizar trabajos de investigación consistentes en pozos a cielo abierto de 35 metros de profundidad. En el kilómetro 91 hubo 5 deslizamientos en un lapso de 8 meses.
1965	Km 91+000	Falla de ese sitio, la cual consistió en un lento movimiento de la masa del terraplén construido en ese lugar, y del terreno natural ladea abajo, formando un escalón de 1.80 metros de profundidad.
1966	Km 86+000	Se afectó el camino, debido a un deslizamiento en el contactor de los depósitos de talud con las rocas sedimentarias.
1967 (enero)	Km 86+000	Se presentan dos deslizamientos, pero se pone en funcionamiento la carretera escénica Tijuana-Ensenada.
1967 (mayo)	Km 93+000	Colapso del deslizamiento del sitio, arrastró consigo mismo el cuerpo de la carretera escénica, interrumpiendo la circulación por varios días. Ocurrió mes y medio después de terminada la temporada de lluvias.
1976	Km 91+000	Se presenta gran deslizamiento en el sitio. No hay pérdidas humanas, sólo materiales.
1983	Km 92+000 y 93+000	Deslizamientos menores y agrietamientos en carpetas y terraplenes que requieren que se realice la reconstrucción total del tramo.
1995	Km 93+000	Gran deslizamiento en el sitio, hay mayores afectaciones y se impide el tráfico por la zona en un periodo de días.
1997	Km 93+000	Deslizamientos menores y agrietamientos en carpetas y terraplenes que requieren que se realice la reconstrucción total del tramo.
2013 (28 de diciembre)	Km 93+000	Deslizamiento de 30 metros de profundidad y 300 metros de largo en ese sitio. Se canceló el tránsito en la carretera escénica por más de un año.

2015	Km 88+000, km 89+000-90+000.	Se detectan deslizamientos leves y agrietamientos en el sitio.
2016	Km 91+000	Hay desconchamiento de taludes y agrietamientos en carretera por movimiento de tierras menores.
2017	Km 98+000	Se forma escalón en carretera por agrietamientos ocasionados por deslizamiento de masas.
2018	Km 94+000	Deslizamiento leve en el sitio que ocasiona agrietamientos en carpeta de rodamiento y terraplenes.
2019	Km 93+500	Agrietamientos en taludes y zona aledaña.
2020	Km 92+000, Km 95-96+000 y Km 98+000	Agrietamientos en cuerpos A y B de la carretera, aunados a desprendimiento de material en taludes.



Figura 1.2. Derrumbe km 93+000, diciembre de 2013, (Fernández, 2014).

Conociendo la cronología de los deslizamientos ocurridos en un periodo de 60 años aproximadamente, se puede observar que la tendencia de mayor cantidad de deslizamientos se presenta entre los kilómetros 91+000 al 93+000, como se puede observar en la **Figura 1.3**.

En la actualidad la carretera escénica Tijuana – Ensenada, también conocida como *MEX-001D* (SCT, 2014), es una vía federal de cuota, concesionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), al Fondo Nacional de Infraestructura (*FONADIN*) y operada por Caminos y Puentes Federales (*CAPUFE*). Está conformada por dos cuerpos de 11 metros de ancho, es decir cuenta con dos carriles; el cuerpo A con dirección a Ensenada y el cuerpo B con dirección a Tijuana, una distancia al centro de los cuerpos de 20 metros y 8.5 metros de separación, cuyo tránsito diario promedio anual (*TDPA*) es de 6,817 usuarios dentro de la Bahía Salsipuedes (DGST, 2019).

La carretera escénica Tijuana – Ensenada, pasa por los poblados de Playas de Tijuana en el kilómetro 9+700, Playas de Rosarito en el kilómetro 35+430, La Misión en el kilómetro 66+440, hasta llegar a la Bahía Salsipuedes que comprende los kilómetros del 84+000 al 99+000, como se mencionó con anterioridad. En la **Figura 1.4**, se puede observar el kilómetro 93+000-500, en donde se aprecian los

trabajos de estabilización, tales como las bermas en la parte superior derecha de la fotografía y el pedraplén en la parte media izquierda, cercano al mar.

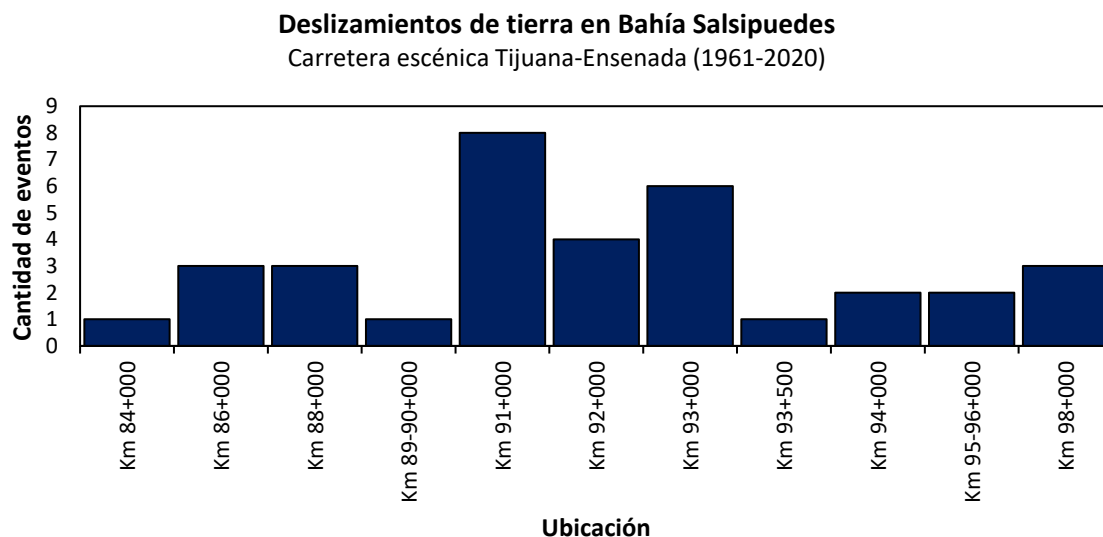


Figura 1.3. Distribución de deslizamientos de tierra en la Bahía Salsipuedes (1961 – 2020).

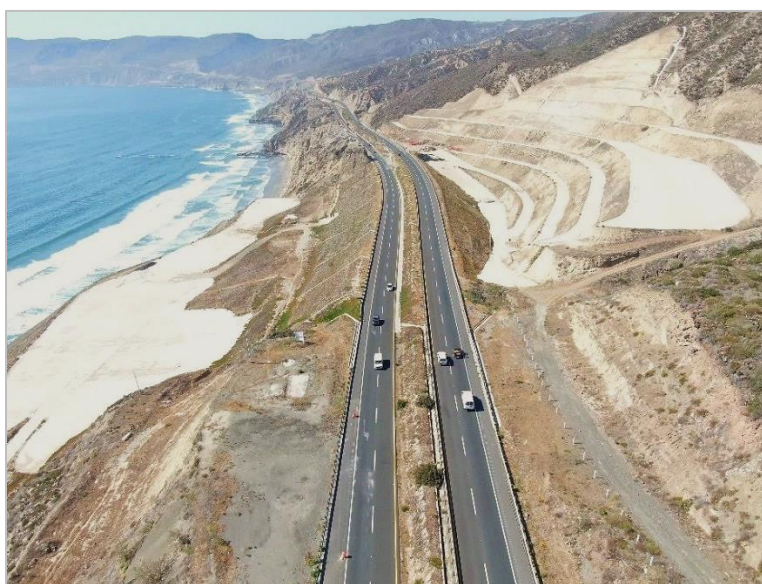


Figura 1.4. Vista en dron de la carretera escénica, sobre el kilómetro 93+500, (Pelayo C., 2022).

1.2 Estado del arte

Los deslizamientos de tierra ocasionados por la presencia de agua sub – superficial son uno de los fenómenos geomorfológicos más importantes que generan pérdidas humanas, ambientales y económicas (Mohebbi, Nakhaei, & Lak, 2020); dichos deslizamientos son una amenaza geológica, geotécnica e hidráulica lenta y a largo plazo (Kutlug & Colkesen, 2021), es por ello la importancia de

conocer en el ámbito global cómo en algunas vías de comunicación alrededor del mundo, se hundén o desplazan a un ritmo anual de centímetros o incluso decímetros (Koutalakis, Tzoraki, Prazioutis, Gkiatas, & Zaimes, 2021).

Como se ha mencionado anteriormente, la presencia de agua subterránea y en especial la sub – superficial, puede provocar deslizamientos de tierra que se definen como el movimiento de las cubiertas de los taludes, en el caso de carreteras, incluyendo el suelo, roca y los materiales orgánicos, bajo la influencia de una fuerza gravitacional hacia debajo de la pendiente (Hung, Leroueil, & Picarelli, 2013), esto es lo que ocurre particularmente en la Bahía Salsipuedes. Aunque en el ámbito urbano se puede definir como desplazamiento de tierras al hundimiento o desplazamientos ocurridos dentro de las zonas urbanas, con aparente deformación del terreno en firmes y sub – rasantes, llegando a dañar edificios o infraestructuras varias (Abidi, Demehati, & El Qandil, 2019).

Además de la presencia de agua subterránea y sub – superficial, otros factores que ocasionan este tipo de fenómenos son la explotación de petróleo y/o gas, la minería, los flujos glaciares cercanos a los polos, zonas volcánicas activas, fallas geológicas, estratos del suelo o geología, sismicidad e hidrología superficial (ríos, lagos, precipitaciones con escorrentía) (Asmael, y otros, 2021).

1.2.1 Revisión en base de datos bibliográfica

Para saber cómo se desarrollan investigaciones similares a la presente en este documento y dar a conocer un bosquejo de los deslizamientos de tierra relacionados con agua subterránea en carreteras alrededor del mundo, se realiza una búsqueda de material de apoyo en la base de datos bibliográficos denominada SCOPUS, la cual es específicamente en idioma inglés, debido a la facilidad de la plataforma (Elsevier, 2022).

La revisión de bibliografía se realiza colocando en el buscador de la base de datos, palabras clave o “**KEYWORDS**”; uniéndolos mediante el operador lógico “**AND**”, es decir, Y en español; dentro de todos los campos “**ALL FIELDS**” y con algunas observaciones más, tales como el año de publicación, artículos **OPEN ACCESS**, área del conocimiento, tipo de documento y lenguaje.

Las palabras clave utilizadas para la búsqueda de información en la base de datos SCOPUS son, “**HYDROGEOLOGY, GROUNDWATER, FLOW, LANDSLIDES, ARCGIS**”, es decir, hidrogeología, agua subterránea, flujo, deslizamiento de tierra y ArcGIS, en su traducción al español; cada uno de las cuales se encuentra unida mediante el conector “**AND**”, ya que con este operador lógico o booleano, se permite localizar documentos que incluyan todos los términos de la cadena de texto (UCM, 2019); el periodo de búsqueda comprende los años de publicación de 2018 a 2022; mientras que las áreas del conocimiento para interés de esta investigación son ciencias ambientales (“**ENVIRONMENTAL SCIENCE**”), Tierra y ciencias planetarias (“**EARTH AND PLANETARY SCIENCES**”), agricultura y ciencias biológicas (“**AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL SCIENCES**”), ingeniería (“**ENGINEERING**”) y energía (“**ENERGY**”). En cuanto al tipo de documento, se buscan artículos y revisiones (“**ARTICLES AND REVIEWS**”), todos en idioma inglés (“**ENGLISH**”).

1.2.2 Cribado y elegibilidad de las referencias bibliográficas

El primer criterio de elegibilidad de la bibliografía es la identificación, la cual se realiza con base en las palabras clave; para el caso de hidrogeología, agua subterránea, flujo, deslizamiento de tierra y ArcGis se tiene un total de 110 registros identificados en la base de datos bibliográficos **SCOPUS**.

El segundo criterio es el cribado para evitar que haya documentos duplicados, además se toma en cuenta que estos sean únicamente archivos "**OPEN ACCESS**"; en este criterio se excluyeron 15 registros, dejando un total de 95 documentos. Dentro de este criterio entra el periodo de publicación, en el que se eligen únicamente documentos o registros entre los años 2018 a 2022; dando un total de 70 registros y excluyendo 25.

El tercer criterio es la elegibilidad misma, para ello se realiza una revisión de los 70 registros y se seleccionan únicamente los que son de interés a la investigación; ya que, en algunas ocasiones, aunque las palabras clave y el área del conocimiento dan indicios de elegibilidad, no son suficientemente afines a los objetivos de la investigación. En este caso particular, se eligieron un total de 38 documentos y se excluyeron 32, como se puede ver en la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3. Elegibilidad de artículos por relevancia en la investigación.

Relevancia en la investigación	Cantidad de Artículos
Importante	38
Menor	25
Nula	7
Total	70

En la **Figura 1.5**, se puede observar que, de los 70 registros o artículos, 38 son de relevancia a la investigación, 25 se encuentran en un estado menor relevancia y 7 de nulo interés para la investigación. La relevancia se toma con base en una lectura rápida del título y resumen ("**ABSTRACT**") de cada una de los documentos seleccionados.

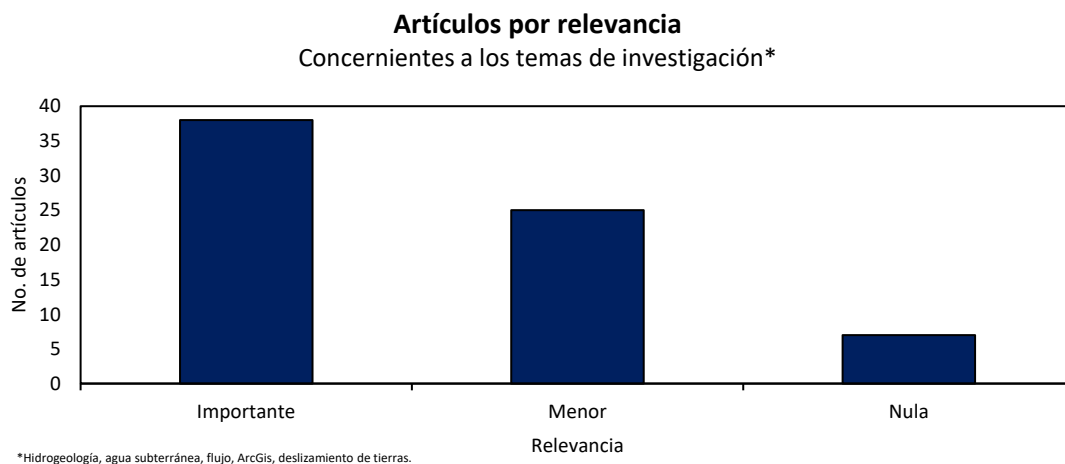


Figura 1.5. Histograma de relevancia para la investigación, por la metodología **PRISMA**.

Todavía dentro del tercer criterio, se eligen solamente los registros que sean del tipo de documento artículo o revisión (“**REVIEW**”), haciendo este nuevo cribado, quedan un total de 34 registros y 4 excluidos.

Por último, el cuarto criterio es la inclusión, donde se seleccionan los registros a utilizar para la revisión, excluyendo los registros cuyo idioma sea diferente al inglés (o español, que es el idioma de esta investigación). Dando como resultado final 33 documentos para la revisión de enfoque global sobre el tema de deslizamientos de tierra ocasionados por agua sub - superficial. En la **Figura 1.6**, se puede observar el desglose de criterios *PRISMA* que se mencionaron en los párrafos anteriores.

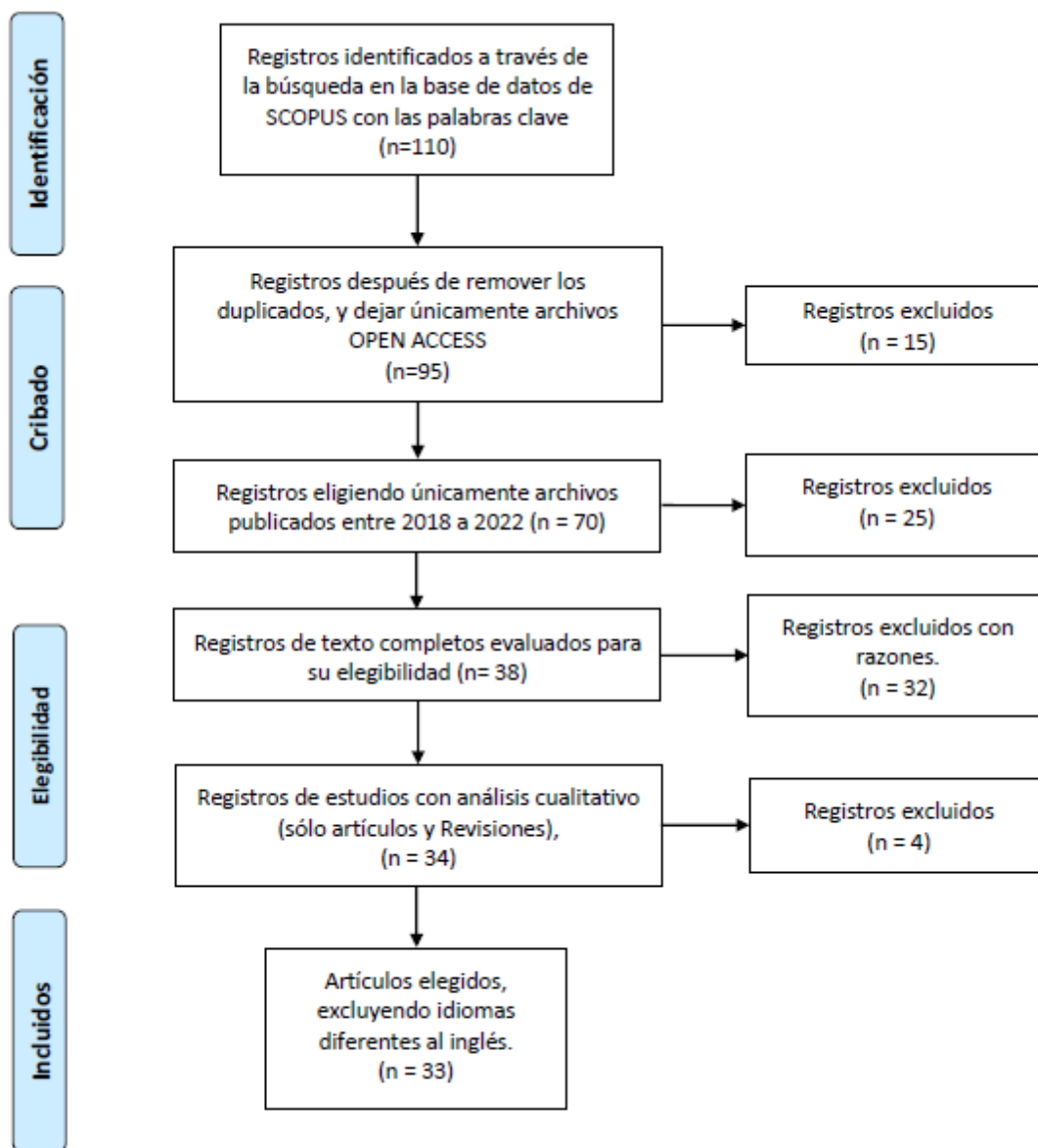


Figura 1.6. Diagrama *PRISMA* de la investigación. Modificado de (Moher, Liberati, Tetzlaff, D.G., & Group, 2009).

La base principal de la revisión es tomada de la metodología *PRISMA* (por sus siglas en inglés, Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta – Analyses, Elementos de información preferidos para las revisiones sistemáticas y los metaanálisis), la cual analiza cada uno de los documentos seleccionados con aspectos importantes como el año de publicación, país de publicación, título del trabajo, autores, resumen, introducción, metodologías utilizadas, resultados obtenidos, conclusiones, entre otros aspectos (Moher, Liberati, Tetzlaff, D.G., & Group, 2009). Todo esto con el fin de obtener un esbozo de la influencia del agua en los movimientos de tierra en vías de comunicación alrededor del mundo, como se ha mencionado con anterioridad.

Tomando como base los 33 artículos seleccionados, se procede a realizar un análisis de las tendencias de los mismos, tomando en cuenta los criterios mencionados anteriormente.

En la **Figura 1.7**, se puede observar el comportamiento de publicación por país, es decir, se precisa que el país que más publica con respecto a los deslizamientos de tierra con afectación con agua sub – superficial es India, seguido de Irán y China; dando a conocer que India tiene ocho (8) artículos referentes al tema de investigación en el periodo de 2018 a 2022, mientras que China, Italia, Marruecos, Nigeria y Vietnam solamente dos (2). Otros países como Argelia, Bélgica, Camerún, Catar, España, Estados Unidos, Francia o Turquía, únicamente publicaron un (1) artículo en este periodo, por otro lado, México no figura en este listado.

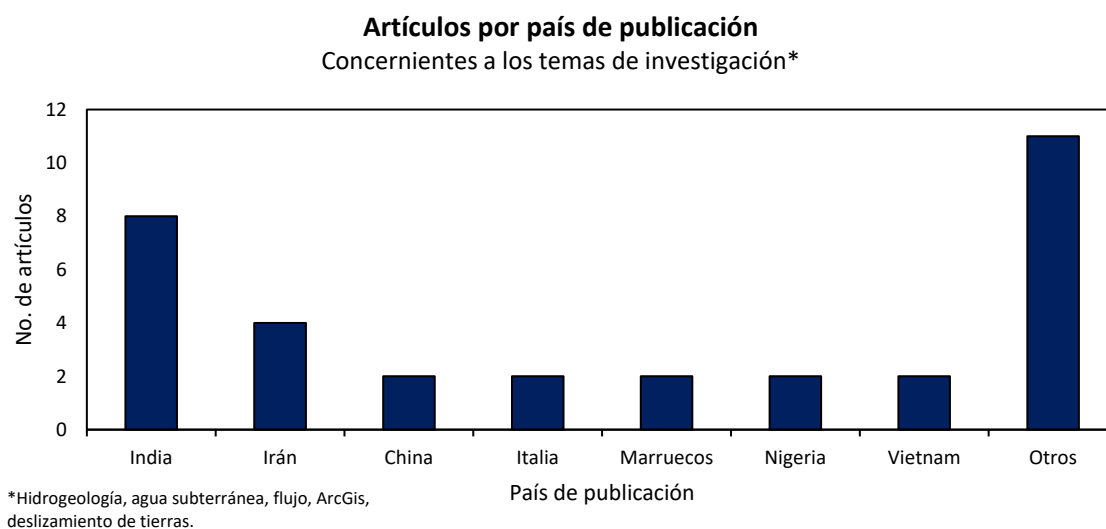


Figura 1.7. Histograma de frecuencias de artículos publicados por país.

En la **Figura 1.8**, se observa que dentro del periodo de cinco (5) años que se estableció para la revisión de bibliografía por la metodología *PRISMA*, el cual comprende desde el año 2018 a 2022, el año donde se realizaron la mayor cantidad de publicaciones fue el 2021, con un total de diez (10) publicaciones durante ese año. En segundo puesto se encuentra el año 2020 con un total de siete (7) publicaciones; enseguida los años 2018 y 2019 con un total de seis (6) publicaciones respectivamente; y por último el año 2022, con cuatro (4) publicaciones hasta la última fecha de revisión en mayo de 2022.

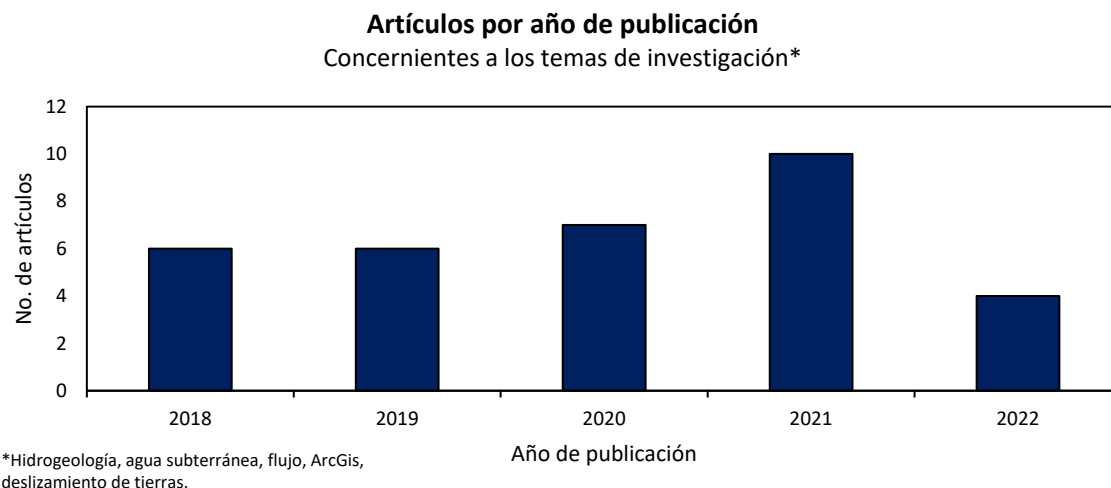


Figura 1.8. Histograma de frecuencias de artículos por año de publicación.

Este gráfico nos indica que debido a los acontecimientos a escala global comprendidos entre el 2020 y 2021, como fue la pandemia por *SARS-CoV-2*, se tuvo mayor disponibilidad para la investigación y gracias a ello se una mayor cantidad de publicaciones y avances en investigación concernientes al desplazamiento de tierra con factor de riesgo de agua subterránea y sub – superficial.

Ahora bien, conforme a las revistas editoras encargadas de publicar artículos concernientes a los temas de interés en esta investigación, la revista que supera la media en publicaciones es Springer con un total de catorce (14) artículos, seguida de la revista Elsevier con ocho (8) artículos, y MDPI (por sus siglas en Inglés Molecular Diversity Preservation International) la cantidad de cuatro (4) artículos, como se puede observar en la **Figura 1.9**.

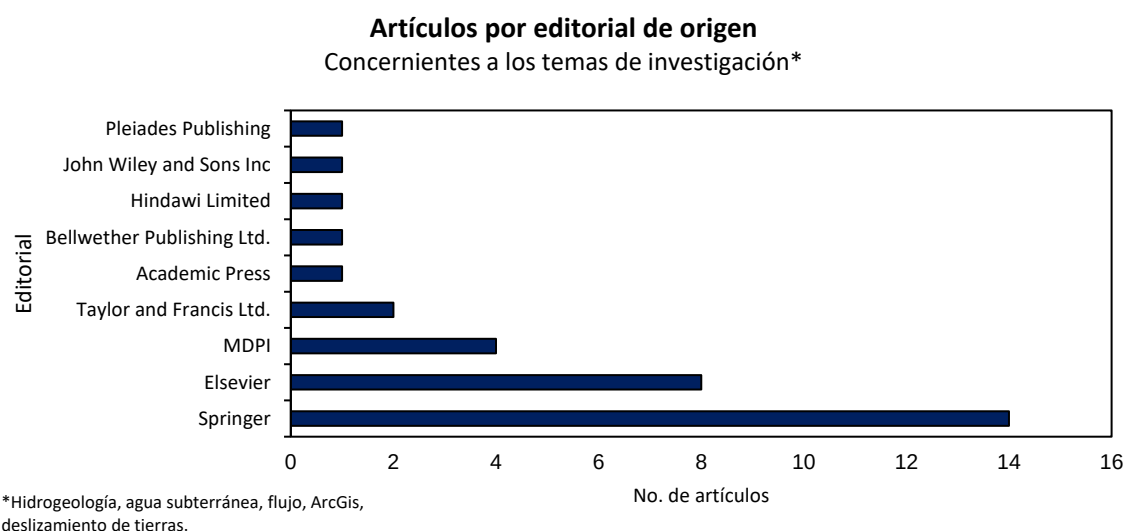


Figura 1.9. Histograma de frecuencias de artículos por editorial de origen.

La categoría Springer además incluye: Springer Verlag, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, Springer Science and Business Media B.V. y Springer International Publishing.

La categoría Elsevier incluye: Elsevier B.V., Elsevier Ltd. Y la categoría MDPI además incluye: MDPI AG.

En la **Figura 1.10**, se puede examinar que el título fuente, es decir, la sección de la revista donde se publica el artículo, la cual tiene el mayor número de publicaciones en el periodo de 2018 a 2022 es la que corresponde a Arabian Journal of Geosciences, con cuatro (4) publicaciones, lo que va de la mano con la idea que el país que más publica sobre deslizamientos de tierra por afectaciones con agua subterránea es India. En segundo puesto se encuentra el Journal of African Earth Sciences con tres (3) publicaciones, seguido por el Environmental Earth Sciences, Geocarto International, Journal of Hydrology y Water (Switzerland), con dos (2) publicaciones cada uno. En la sección de otros, entran aquellos que sólo tuvieron una publicación al respecto, tal como Hydrogeology Journal, Geoscience Frontiers o Water Resources.

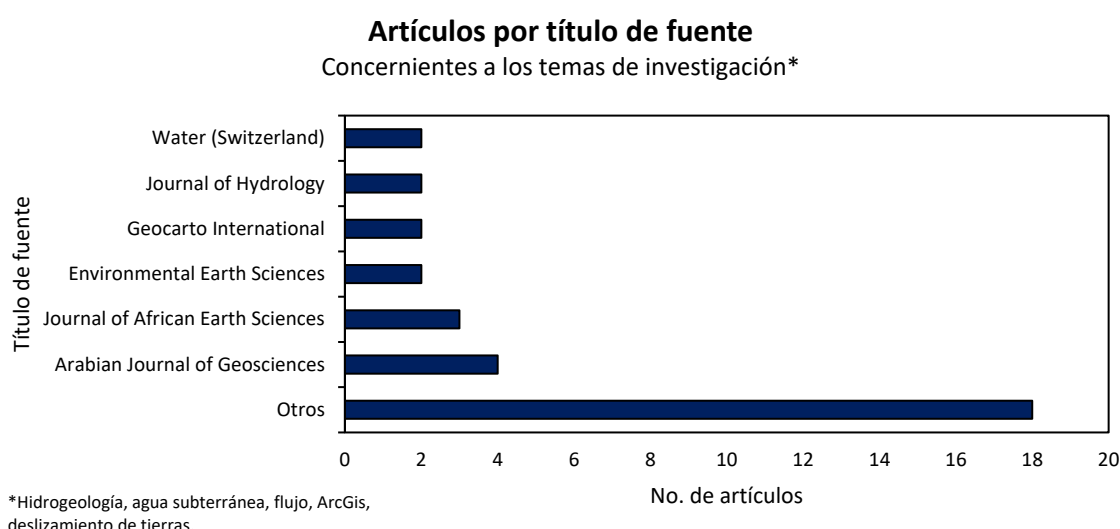


Figura 1.10. Histograma de frecuencias por título de fuente.

Los temas principales en el tratamiento de la información de entrada para la modelación del agua sub – superficial por redes de flujo en casos de deslizamiento de tierras a nivel global, considerando lo mencionado en los treinta y tres (33) artículos seleccionados para la revisión bibliográfica son los que se muestran a continuación:

- 1) Información piezométrica.
- 2) Información topográfica, geodésica o de sistemas de información geográfica.
- 3) Pruebas geotécnicas o de mecánica de suelos.
- 4) Información climatológica.
- 5) Información inclinométrica.
- 6) Información geológica.
- 7) Información sísmica.
- 8) Información antropogénica.
- 9) Información económica.

Los cuales se consideran como factores de peligro o amenaza, en los eventos de deslizamientos de tierra alrededor del mundo (Koutalakis, Tzoraki, Prazioutis, Gkiatas, & Zaimes, 2021).

Si se habla de modelación por medio de programas, algoritmos y metodologías, las principales mencionadas son:

- 1) **MIF**, llamado en inglés “*Multi Influence Factor*”, que significa Método del factor de influencia múltiple, (Rane & Jayaraj, 2022).
- 2) **WofE**, por sus siglas en inglés: “*Weight of Evidence*”, es decir, Método de creencia evidencial, (Rane & Jayaraj, 2022), (Pollicino, y otros, 2021), (Falah & Zeinivand, 2019), (Abidi, Demehati, & El Qandil, 2019).
- 3) **ArcGis, Spatial Analysis, BaDAM Toolbox**, es decir, Métodos híbridos en SIG para agua subterránea, como Análisis espacial y *BaDAM*, (Rane & Jayaraj, 2022), (Onwe, Abraham, Ambrose, & Osike, 2022), (Phong, Pham, Trinh, Ly, & et, 2021), (Asmael, y otros, 2021), (Pollicino, y otros, 2021), (Achite, Tsangaratos, Ilia, & Toubal, 2021), (Arshad, Zhang, Zhang, & Dilawar, 2020), (Bera, Mukhopadhyay, & Barua, 2020), (Thapa, Gupta, Haque, & Kaur, 2020), (Ouedraogo, Defourny, & Vanclooster, 2019), (Ayt, y otros, 2020), (Falah & Zeinivand, 2019), (Gutiérrez, y otros, 2019), (Akinwumiju & Olorunfemi, 2019), (José, Thomas, Prasannakumar, & Reghunath, 2019), (Das, Pardeshi, Kulkarni, & Doke, 2018), (Hou, Wang, & Chen, 2018), (Golkarian & Rahmati, 2018), (Salar, Othman, & Hasan, 2018), (Sakala, Fourie, Gomo, & Coetzee, 2018).
- 4) **InSAR Technology**, del inglés “*Interferometric Synthetic Aperture Radar*”, que significa: Radar de apertura sintética interferométrica, (Cianflone, y otros, 2022).
- 5) **SE, IofE, ME, FR, AHP, RS**, del inglés “*Shannon Entropy, Index of Entropy, Maximum Entropy, Frequency Ratio, Analytical Hierarchy Process and Remote Sensing*”, los cuales son métodos que entran en la clasificación de entropía, ya sea, el método de entropía de Shannon, índice de entropía, máxima entropía, relación de frecuencias y proceso de jerarquía analítica y sensores remotos, (Rane & Jayaraj, 2022), (Elvis, Arsène, Théophile, Bruno, & Olivier, 2022), (Arshad, Zhang, Zhang, & Dilawar, 2020), (Bera, Mukhopadhyay, & Barua, 2020), (Falah & Zeinivand, 2019), (Abidi, Demehati, & El Qandil, 2019), (Chakraborty, Pal, Malik, & Das, 2018), (Hou, Wang, & Chen, 2018), (Golkarian & Rahmati, 2018), (Salar, Othman, & Hasan, 2018).
- 6) **Machine learning techniques ADT, CCF, RF, BRT**, del inglés: “*Advanced Decision Tree, Canonical Correlation Forest, Random Forest, Boosted Regression Tree*”, es decir, son técnicas de aprendizaje automático, como árboles de decisión, bosque de correlación canónica, bosque aleatorio, árbol de regresión impulsado. (Kutlug & Colkesen, 2021), (Phong, Pham, Trinh, Ly, & et, 2021), (Prasad P., 2020), (Band, y otros, 2020), (Ouedraogo, Defourny, & Vanclooster, 2019).
- 7) **MRAB** del inglés: “*Modified Real Ada Boost*”, que se refiere al método de inteligencia artificial modificado de impulso real Ada, (Phong, Pham, Trinh, Ly, & et, 2021).
- 8) **NF, FL, F-ANN, F-GEP** del inglés “*Neuro – Fuzzy, Fuzzy – Logic, Fuzzy Artificial Neural Network, Fuzzy Gene Expression Programming*”, que engloba todos los sistemas difusos, como el sistema neuro-difuso, lógica difusa, red neuronal artificial difusa y programación difusa de la expresión génica, (Gu, Wu, Ji, & Zhu, 2021), (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021), (Mohebbi, Nakhaei, & Lak, 2020), (Sakala, Fourie, Gomo, & Coetzee, 2018).
- 9) **SVI** del inglés “*Mapping Land Subsidence Vulnerability Indices*”, que se refiere al mapeo de índices de vulnerabilidad a la subsidencia del terreno, (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021), (Asmael, y otros, 2021).

- 10) **ALPRIFT Framework** que se refiere al marco de trabajo ALPRIFT, por sus siglas en inglés; Medio acuífero (**A**) – Uso de suelo (**L**) – Bombeo de agua subterránea (**P**) – Recarga (**R**) – Impactos instigados por el espesor del acuífero (**I**) – distancia de las fallas (**F**) – descenso el nivel freático (**T**), (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021). Esta es una de las metodologías más representativas para la realización de la presente investigación, tal como otras que se mencionan a continuación.
- 11) **SGL and SAEM** del inglés “*Spatial Geostatistical Interpolation and Stochastic Approximation of Expectation – Maximization*”, que se refiere a los métodos de interpolación geoestadística y aproximación estocástica de expectativa – maximización, (Mohamed, y otros, 2021), (Pollicino, y otros, 2021), (Akinwumiju & Olorunfemi, 2019).
- 12) **DRASTIC Vulnerability Method** que se refiere al método de vulnerabilidad *DRASTIC*, por sus siglas en inglés; Profundidad del nivel freático (**D**), Recarga (**R**), Medio acuífero (**A**), Medio suelo (**S**), Topografía (**T**), Impacto de la zona vadosa (**I**), Conductividad hidráulica (**C**), (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021). Que junto con la metodología **ALPRIFT** (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021) son la base de esta investigación.
- 13) **WOM** del inglés “*Weighted Overlay Method*”, que se refiere al método de superposición ponderada, (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021), (Thapa, Gupta, Haque, & Kaur, 2020), (Akinwumiju & Olorunfemi, 2019), (Chakraborty, Pal, Malik, & Das, 2018). Que al igual que los métodos **DRASTIC** y **ALPRIFT**, trabajan con capas y ponderaciones, las cuales son indispensables para la realización de esta investigación.
- 14) **MR, CA, MCDA** del inglés “*Multivariable regression, Cluster Analysis, Multi – Criteria Decision Analysis*”, que generalizan los métodos de análisis multicriterio tales como: la regresión multivariable, análisis de clústeres y análisis de decisión multicriterio, (Sheik Mohideen, 2021), (Thapa, Gupta, Haque, & Kaur, 2020), (Ayt, y otros, 2020), (Chakraborty, Pal, Malik, & Das, 2018). Base indispensable de la metodología que se seguirá en la ubicación de galerías drenantes en la sección de *Metodología*.
- 15) **SVM** del inglés “*Support Vector Machines*”, que se refieren a las técnicas de aprendizaje automatizado (machine learning) como máquinas de vectores de apoyo, (Achite, Tsangaratos, Ilia, & Toubal, 2021), (Prasad P., 2020), (Band, y otros, 2020).
- 16) **Baysia-ANN** del inglés “*Bayesian Artificial Neural Network*”, que se refiere a la red neuronal artificial bayesiana, técnica de aprendizaje automatizado (Machine learning), (Band, y otros, 2020).

Como se puede observar en la **Figura 1.11**, la metodología más utilizada en *ArcGIS* con sus métodos híbridos, tales como análisis espacial y *BaDAM*, seguidas por las metodologías basadas en entropías y jerarquías analíticas (*AHP*). Aunque para este caso de investigación, las metodologías a utilizar será una mezcla entre el análisis de decisión multicriterio, unas variaciones de los métodos de vulnerabilidad *DRASTIC* Y *ALPRIFT*, así como regresiones, correlaciones y metodología *Fuzzy* (difusa) y el método de superposición ponderada (*WOM*).

Escudriñando los artículos seleccionados para hacer la revisión del estado del arte se pueden notar algunas similitudes en los aspectos sociales y económicos que tienen como iniciativa de la hipótesis u objetivo de la investigación; el principal en todos los artículos revisados es el agua para uso doméstico, en agricultura e industria (Cianflone, y otros, 2022), (Phong, Pham, Trinh, Ly, & et, 2021) y (Bera, Mukhopadhyay, & Barua, 2020). Algunos autores van con el afán de localizar o zonificar los

sitios de obtención de agua subterránea para uso poblacional doméstico (Arshad, Zhang, Zhang, & Dilawar, 2020) y (Prasad P., 2020); otros más, se enfocan en la extracción de agua subterránea para uso en la agricultura (Das, Pardeshi, Kulkarni, & Doke, 2018); y una pequeña cantidad, en el abastecimiento del agua proveniente de acuíferos para la industria (Rane & Jayaraj, 2022). Ciertas publicaciones mencionan a los fenómenos de desplazamiento de tierras, e indican su relación estrecha con el agua subterránea (Band, y otros, 2020); dentro de esta categoría, algunos incluso mencionan cómo es la planificación urbana y/o de vías de comunicación debido a esta relación agua subterránea – deslizamientos de tierra (Ayt, y otros, 2020), (Mohebbi, Nakhaei, & Lak, 2020).

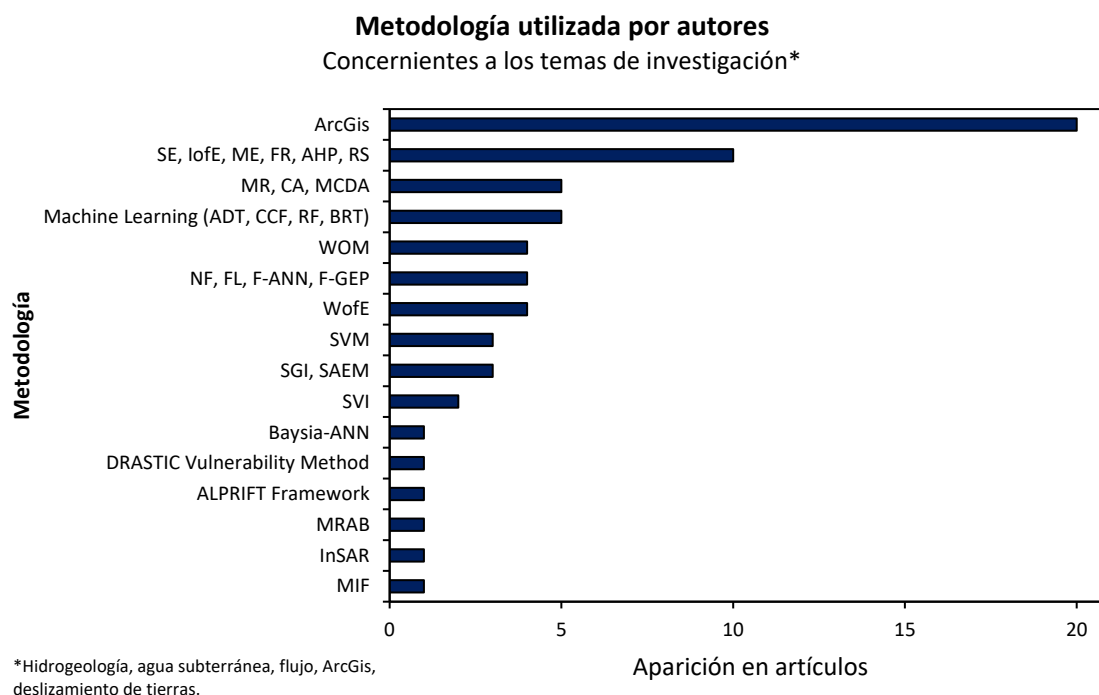


Figura 1.11. Histograma de frecuencias por metodología de autores.

De forma somera, se pueden hacer afirmaciones, tales como: que la mayoría de los países occidentales que publicaron los artículos a revisar, se basan en zonificar zonas vulnerables al agua subterránea y sus afectaciones, mientras que, en países orientales como India, China e Irán sus investigaciones se basan en la búsqueda de zonas con agua subterránea para su abastecimiento doméstico, industrial y en la agricultura (Hou, Wang, & Chen, 2018), (Salar, Othman, & Hasan, 2018), (Falah & Zeinivand, 2019).

Otros artículos buscan métodos de disipación de fenómenos de deslizamiento de tierras, control y prevención de los riesgos geológicos (Ayt, y otros, 2020), minimizar afectaciones urbanas y de vías de comunicación por la presencia excesiva del agua (Mohamed, y otros, 2021), todo esto con la finalidad de tener un desarrollo económico idóneo (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021), y una relación medioambiental sustentable (Prasad P., 2020).

2 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

2.1 Localización

La zona de estudio se denomina, Bahía Salsipuedes; la cual es una región al noroeste del estado de Baja California, localizada en el municipio de Ensenada, específicamente en las coordenadas geográficas 31°56' N (en latitud) y 116°45' O (en longitud), y comprende 35 km² aproximadamente, como se puede ver en la **Figura 2.1**. Toma su nombre al ser una entrada del mar en la tierra que forma una concavidad, es menor a un golfo y mayor que una ensenada (RAE, 2022), es por ello que recibe el denominador de “Bahía”; Salsipuedes es una expresión coloquial adjuntada que denota “Si tienes suerte de salir de ahí”, ya que la zona desde la fundación de la ciudad de Ensenada, ha presentado deslizamientos de tierra, lo que la hacía propensa a accidentes cuando los primeros pobladores de la mancha urbana pasaban por la zona.

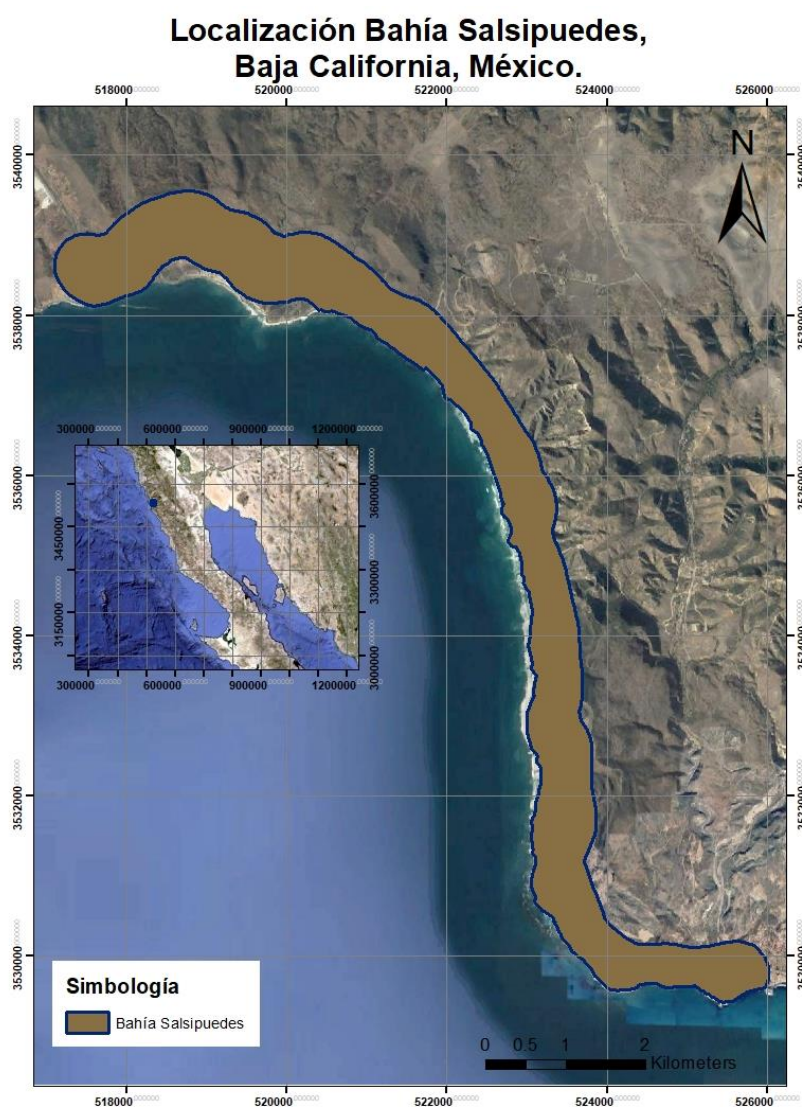


Figura 2.1. Mapa de localización de la Bahía, Salsipuedes, Baja California, México.

Desde sus inicios, la Bahía Salsipuedes se ha caracterizado por la presencia de fallas geológicas regionales activas orientadas de noroeste a sureste (Legg, 1991); además de estas fallas, la estructura geológica del sitio, la sismicidad y la presencia de agua subterránea y/o sub – superficial afectan la estabilidad de la zona, la cual en la mayoría de las veces provocan deslizamiento de tierras.

2.2 Características fisiográficas de la Bahía Salsipuedes

2.2.1 Geología general

Describiendo la geología de la porción norte de la península de Baja California, en la cual se localiza la Bahía Salsipuedes, se puede decir que está formada por rocas ígneas intrusivas, graníticas del Cretácico; es una gran llanura costera, cubierta por rocas sedimentarias y volcánicas (SOP, 1975).

En la superficie existen sedimentos que varían desde el Pleistoceno, de facies costera y continental a placas clásticas marinas del Mioceno, Eoceno, Cretácico, Jurásico, con ausencia marcada de sedimentos oligocénicos (SOP, 1975).

El batolito granítico ocupa gran parte del sitio de estudio donde se presentan rocas metamórficas tal vez del Mesozoico, y existe en la superficie una regular cantidad de aparatos volcánicos y derrames ígneos de rocas ácidas y básicas. Además de encontrarse algunas manchas de rocas metamórficas del Cretácico inferior aún más antiguas (TGC & Moser, Informe geológico Bahía Salsipuedes, 2016).

Siendo un poco más específico, la geología de la zona de estudio basada en la porción de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, la cual atraviesa a la Bahía Salsipuedes, se puede decir que en la parte de mayor elevación existe una meseta constituida por una corriente lávica de espesor variable correspondiente a roca andesítica propia del Cenozoico medio volcánico, que procede tal vez del cono cinerítico comprendido en la zona donde existen tobas pumíticas o pumicitas (SOP, 1975). Subyacente a la zona de mayor elevación se encuentra una zona constituida por suelos limoarenosos que cubren la mayor parte de la superficie de la Bahía Salsipuedes (TGC & Moser, Informe geológico Bahía Salsipuedes, 2016).

La andesita está localizada sobre rocas sedimentarias del rango de lutitas, areniscas y conglomerados; estas formaciones marinas se pueden llegar a ver en algunos cortes naturales cercanos a la costa y en los cortes realizados para la construcción de la vía de comunicación (TGC & Moser, Informe geológico Bahía Salsipuedes, 2016).

La zona cercana al mar, a lo largo de la cual se desarrolló la carretera escénica Tijuana – Ensenada, está integrada geológicamente por depósitos de talud encimados a las rocas sedimentarias marinas, depósitos de productos del intemperismo físico del derrame andesítico, que cubrió la estrecha franja costera, tal como aluviones, arenas, conglomerados y restos de basaltos (INEGI, 2003).

En la **Figura 2.2**, se puede observar la geología básica del sitio proporcionado por INEGI, la cual comprende desde el kilómetro 84+000 al 99+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, con 400 metros hacia cada lado de franja de estudio. En ella se detallan esquemáticamente el tipo de roca localizada en la zona, tales como rocas ígneas (andesitas y basaltos), así como rocas metamórficas (areniscas, conglomerados y aluviales), también se marcan la presencia de fallas geológicas, las cuales pueden ser de tipo normal o fracturas, especialmente se encuentra una falla

normal en la parte sureste de la Bahía Salsipuedes, cercana al poblado de San Miguel, la cual tiene liberación de energía por movimiento de tierras. Esta falla normal se monitorea constantemente por medio de instrumentación inclinométrica y se tienen registros de movimientos entre 2 a 5 mm por mes (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).

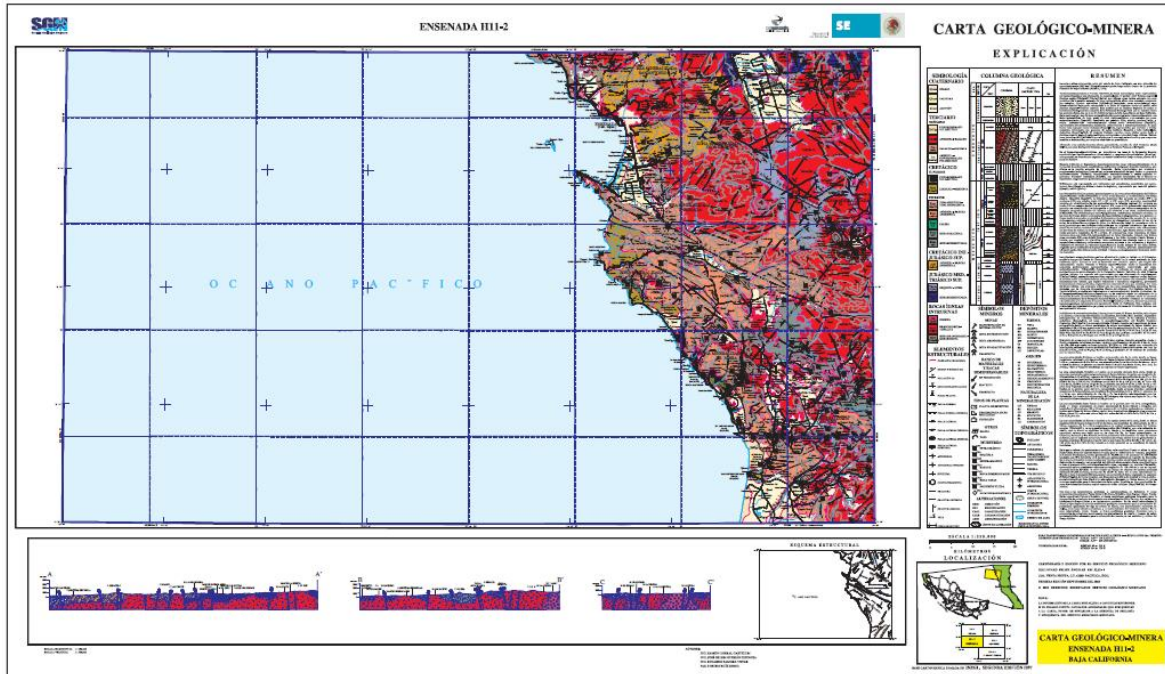


Figura 2.2. Representación del mapa geológico-minero de Ensenada H11-2.(INEGI, 2003).

Los deslizamientos antiguos coinciden en la mayoría de las ocasiones con los deslizamientos actuales, una de estas fallas antes mencionadas es de gran influencia para los deslizamientos de gran magnitud ocurridos entre los kilómetros 93+000 al 96+000. Cabe agregar que a lo largo de toda la carretera escénica Tijuana - Ensenada, la franja costera está sujeta a intensa erosión marina (SOP, 1975).

Los depósitos de talud están constituidos en su mayor parte por fragmentos de roca angulosos, a veces hasta de dos (2) metros de diámetro, empacados en suelos limoarenosos sueltos. Ocasionalmente existen acumulaciones de fragmentos de roca sin matriz fina. El espesor de estos depósitos es muy variable alcanzando hasta treinta y siete (37) metros en los sitios explorados dentro de los kilómetros 92+000 y 95+000 al 96+000; son de alta permeabilidad y el agua de lluvia se infiltra hasta alcanzar las lutitas y areniscas que los subyacen (TGC & Moser, Informe geológico Bahía Salsipuedes, 2016).

A Lo largo de la costa se observan los efectos de la erosión marina, debidos a la socavación continua, provocando fallas, grietas y deslizamientos locales que modifican constantemente el litoral (SOP, 1975), Como se puede ver en la **Figura 2.3**.

En general se puede decir que existe una plataforma continental de materiales ígneos (basaltos y andesitas) de la que arrancan contrafuertes hacia el mar, al modo de los dedos de una mano; en el espacio entre esos contrafuertes, en general formados por materiales sedimentarios (lutitas y

areniscas), se ha ido rellenando a través del tiempo por depósitos de acarreo y piemonte que, al colocarse exclusivamente por efecto de la gravedad, adquirieron una posición final bastante escarpada, cercana a lo que se pudiera llamar el ángulo de reposo de la formación, que naturalmente, no está lejos del equilibrio límite. Como consecuencia de ello, es de imaginar que a lo largo del tiempo ocurrieron muchos deslizamientos en estos depósitos de talud.



Figura 2.3. Socavación y erosión marina en taludes escarpados del kilómetro 92+500-700 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, (Pelayo C., 2022).

2.2.2 Geofísica general

Se han realizado una infinidad de estudios geofísicos dentro de la Bahía Salsipuedes, por lo que se puede decir que se tiene conocimiento de la utilización de la prospección geofísica del sub – suelo utilizando el método sísmico de refracción. Este método arroja modelos de velocidad de propagación de onda P (ondas primarias o longitudinales) en varios tramos de la carretera Escénica Tijuana – Ensenada (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

El sitio explorado cubre diez segmentos o tendidos a lo largo del área comprendida entre el kilómetro 84+000 al 98+000. Con los tendidos geofísicos se conoce la distribución de los materiales en el subsuelo dentro de los primeros 35 metros de profundidad a través de modelos de propagación de Ondas sísmicas Primarias (P), a lo largo de perfiles de interés trazados según el diseño de la exploración (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

Para ello se realizan diez perfiles de longitud variable (uno para cada sitio de inestabilidad en la Bahía Salsipuedes, con longitudes entre los quinientos (500) a ochocientos (800) metros), formados por tendidos continuos de sísmica de Refracción de 55 metros de longitud (12 sensores separados 5 metros) utilizando 7 fuentes: una central y seis en los extremos.

Una vez recolectados los sismogramas se obtienen sus respectivas curvas tiempo-distancia (Domocronas), a partir de las cuales se genera un modelo de velocidad de propagación de Onda P a lo largo del perfil.

El principio básico de los métodos geofísicos de exploración es determinar la distribución de alguna propiedad física en el subsuelo efectuando mediciones desde la superficie. Dichas mediciones pueden ser campos eléctricos, magnéticos, gravitatorios, velocidad de propagación de ondas de sonido, entre otros (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

Los métodos sísmicos miden la velocidad de propagación de ondas de sonido a través del subsuelo generado por alguna fuente (golpe o explosión) en la superficie del terreno, permitiendo caracterizar los distintos materiales a través de esta propiedad (velocidad de propagación de Ondas de sonido) (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

El procesamiento de la información se realiza utilizando el Software denominado *SEISIMAGER2D* versión estándar desarrollado por *Geometrics Inc.*, el cual está formado por dos módulos; el primero denominado *Pickwin* utilizado para procesar los sismogramas y elegir los tiempos de arribos, y así generar las curvas tiempo – distancia de cada uno de los tendidos sísmicos de refracción; el segundo módulo denominado *Plotrefa-2D* sirve para generar los modelos de velocidades de las ondas compresionales a partir de las curvas tiempo-distancia de cada uno de los tendidos o de varios si son colineales (Geometrics, 2022).

Se realiza un procesamiento estándar mediante técnicas de inversión 2D por medio de trazado de rayos y tomografía sísmica, a partir de un modelo inicial y posterior ajuste automático de los datos. El graficado de los modelos de Velocidad en 2D, se realizó mediante el Programa “*Surfer9*”, el cual configura en diversas formas y técnicas datos de diversa índole (Golden, 2022), como se puede ver en la **Figura 2.4** y la **Figura 2.5**.

El equipo utilizado para grabar los datos de campo consiste de un sismógrafo de 12 canales diseñado y construido por la empresa *Geometrics Inc. Modelo ES-3000*. Los Geófonos o sensores de sonido de superficie, marca *OYO GEOSPACE* con una frecuencia de máxima respuesta de 14 Hz. Por último, como fuente sísmica se utilizó un marro de 18 libras (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

De la información procesada e interpretada de las diez líneas de sísmica de refracción realizadas, se genera un perfil general de velocidad de onda P en la Bahía Salsipuedes, configurado dentro del mismo rango de velocidades permitiendo una mejor comparación entre las líneas de sísmica de refracción. Donde se identificaron diversas capas con rangos de velocidad de propagación de onda P diferentes, como se describe a continuación:

Perfil Tendido Bahía Salsipuedes. del Km 84+000 al 98+000, que consta de 10 segmentos se determinaron 3 capas que se describen a continuación.

- **De 600 a 1500 m/s**
 - Rango de velocidades asociado a materiales de brechas volcánicas y depósitos de talud.
- **De 1500 a 2600 m/s**
 - Rango de velocidades asociado a rocas ígneas fracturadas y alteradas.

- De 2700 a 5400 m/s
 - Rango de velocidades asociado a rocas ígneas sanas y compactas.

Presentan un rango de velocidad de onda P entre 200 a 5400 m/s, desde la superficie hasta una profundidad máxima explorada de 45 metros, identificándose los rangos de velocidad descritos anteriormente como se muestra en la **Figura 2.4**, (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

Presenta un espesor máximo de depósitos de talud y brecha volcánica de 30 metros, principalmente al inicio y final de perfil (capa A).

Se presenta una segunda capa (B) con velocidades entre 1500 a 2600 m/seg a lo largo de todo el perfil con un espesor variable en un rango entre 5 a 30 metros, asociada a la presencia de rocas volcánicas fracturadas y alteradas, los mayores espesores se localizan al inicio del perfil.

La tercera capa se identifica a lo largo de todo el perfil con velocidades de 2700 a 5400 m/seg a profundidad variable en un rango entre 8 a 40 metros a partir de la superficie, asociada a la presencia de rocas ígneas sanas y compactas, esta unidad es más somera en la parte media del perfil justo debajo de la zona del muro de contención (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

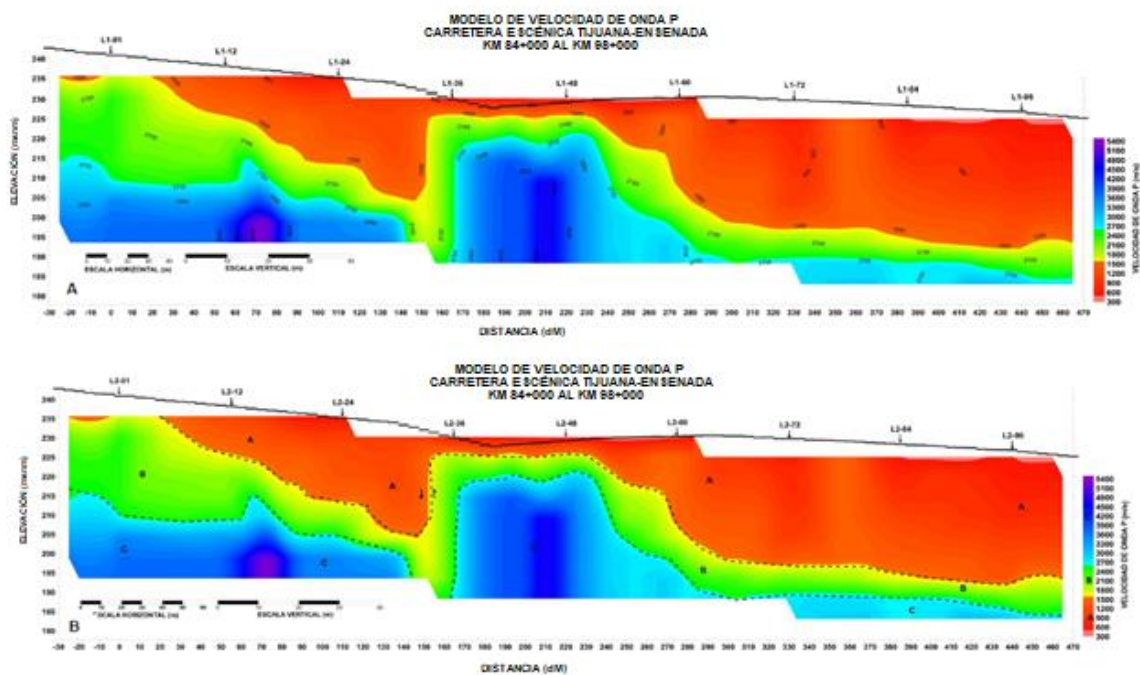


Figura 2.4. Modelo de velocidad de propagación de onda P en la Bahía Salsipuedes, (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

De manera particular se puede observar el perfil del kilómetro 92+000, el cual consiste en un tendido de 500 metros, también de 10 segmentos en 3 capas, como se puede ver en la **Figura 2.5** y que se describen de la siguiente manera:

- **De 200 a 1500 m/s**
 - Rango de velocidades asociado a materiales sedimentarios sueltos constituidos por la cubierta superficial de depósitos aluviales y material de relleno.
- **De 1200 a 2200 m/s**
 - Rango de velocidades asociado a rocas sedimentarias semi – compactas, como lo son las lutitas, limonitas y areniscas), posiblemente fracturadas y alteradas.
- **De 2200 a 4400 m/s**
 - Rango de velocidades asociado a rocas sedimentarias compactas, como lo son los conglomerados, lutitas y areniscas, posiblemente sanas.

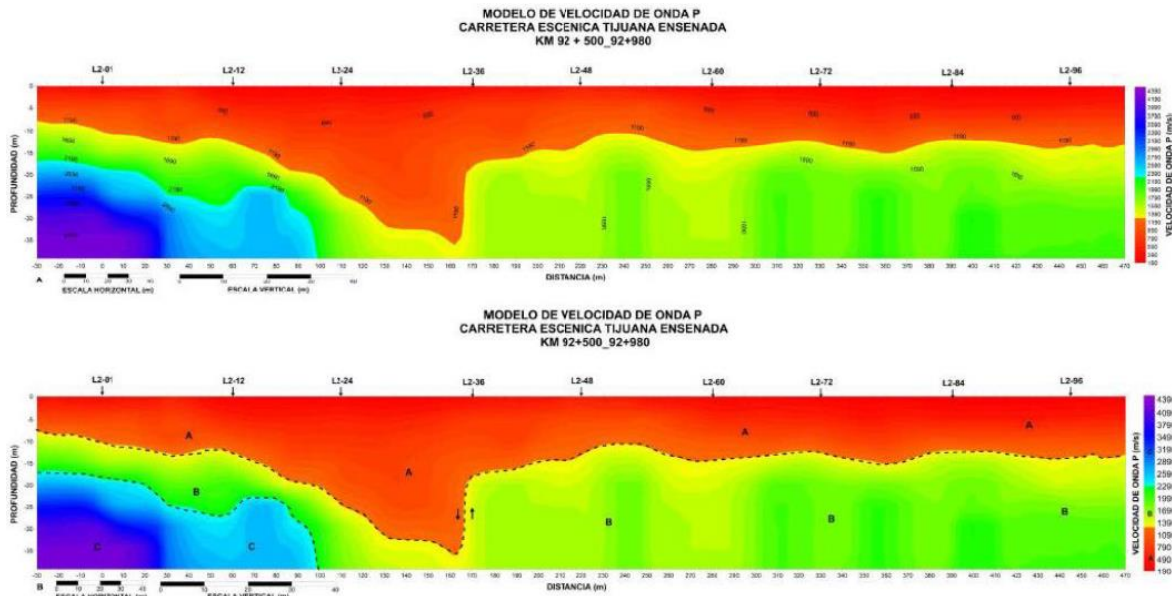


Figura 2.5. Modelo de velocidad de propagación de onda P en el Km 92+000-500, (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).

Como se puede observar en la **Figura 2.5**, la zona superior está constituida por aluviales empacados en arenas, es decir, material conglomerado redondeado en una matriz de material suelto, esta situación genera inestabilidad en la zona, y grandes infiltraciones al subsuelo, además de derrumbes y deslaves, por lo que en la actualidad en la zona se está haciendo un proyecto de anclaje de los taludes escarpados en la zona, lo cual tiene como idea principal, evitar deslaves y generar contención del material. Véase sección de *Metodología, Resultados y discusiones*.

2.2.3 Clima general

La clasificación de Köppen fue elaborada basándose en la relación empírica entre el clima y la vegetación (Carrillo Yee, 2015); esta clasificación provee una forma eficiente de describir condiciones climáticas definidas por múltiples variables, por lo que se ha aceptado y utilizado ampliamente desde su elaboración (Chen & Weiteng Chen, 2013).

La clasificación de Köppen se basa en una subdivisión de las zonas climáticas del mundo en **seis (6)** grupos principales, los cuales se representan por las letras mayúsculas **A, B, C, D, E y H**.

- A.** Climas tropicales lluviosos.
- B.** Climas secos.
- C.** Climas templados húmedos.
- D.** Climas templados de invierno frío.
- E.** Climas polares.
- H.** Climas de montaña.

Además, cada grupo tiene una subdivisión asignándosele una segunda letra (f, s, w y m).

- f.** Lluvioso todo el año, ausencia de periodo seco.
- s.** Presencia de estación seca en verano.
- w.** Estación seca en invierno.
- m.** Precipitación de tipo monzónico.

Para matizar el régimen térmico se utiliza una tercera letra que puede ser a, b, c, d, h y k.

- a.** Temperatura media del mes más cálido mayor a 22°C.
- b.** Temperatura media del mes más cálido menor a 22°C.
- c.** Menos de cuatro (4) meses tienen temperatura media mayor a 10°C.
- d.** El mes más frío está debajo de los -38°C.
- h.** Temperatura media anual mayor a 18°C.
- k.** Temperatura media anual menor a 18°C.

Finalmente se asigna una cuarta letra referente al comportamiento de la precipitación.

- x.** Precipitaciones ocurren durante todo el año.
- h.** Precipitaciones ocurren principalmente en invierno.

La península de Baja California, tiene una distribución climatológica según la clasificación de Köppen, como se puede ver en la **Figura 2.6**, en la cual se puede notar que el clima predominante en la Bahía Salsipuedes, es el ubicado en la zona Noroeste del mapa, correspondiente a la costa, el cual se denomina **BSks**, Clima frío semiárido mediterráneo con temporada de lluvias invernales.

Lo que nos indica que la Bahía Salsipuedes tiene un clima mediterráneo seco, con precipitaciones escasas que se concentran en los meses más fríos, en los cuales la temperatura promedio es de 13°C y en inviernos puede llegar a helar (Navarro-Olache, y otros, 2021).

En contraparte, los meses más cálidos, los cuales son de julio a septiembre son también los más secos, y presentan una temperatura media de 22°C. Por su ubicación costera, el sitio tiene un clima afectado por la corriente fría de California y por el hecho de que la temperatura oceánica alcanza sus máximos niveles estivales en agosto y septiembre, por este hecho es que al final del verano y principio del otoño se encuentra la época más cálida de la zona (Navarro-Olache, y otros, 2021).

Los vientos de Santa Ana son los responsables de elevar las temperaturas en cualquier época del año, cuando la dirección del viento cambia y trae aire caliente del interior hacia la costa (Navarro-Olache, y otros, 2021).

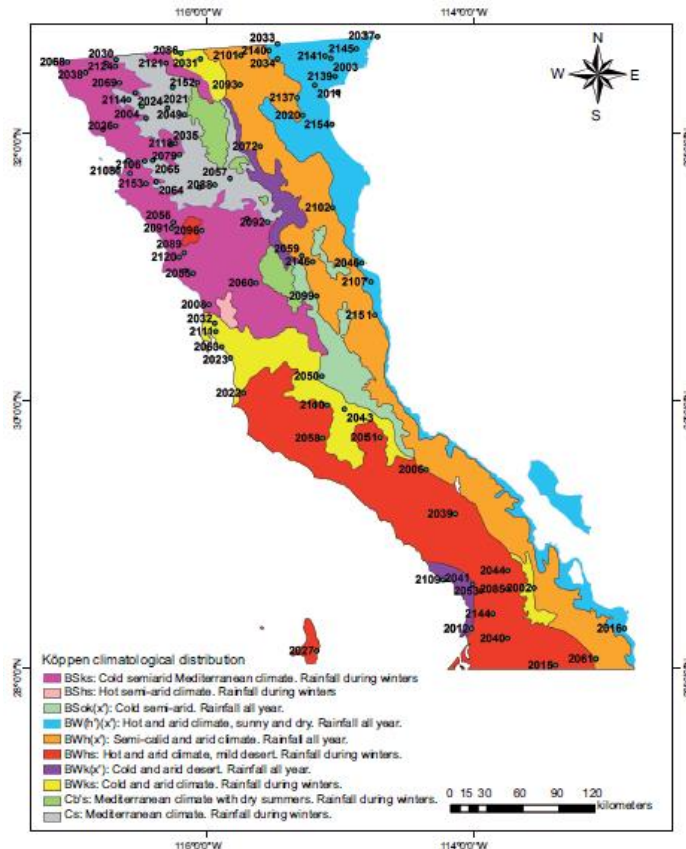


Figura 2.6. Distribución climatológica de Baja California, México, de acuerdo con la clasificación de Köppen, tomada de (López-Lambrano, Fuentes, López-Ramos, Mata R., & López-Lambrano, 2018).

Como se mencionó, las lluvias o precipitaciones en la zona son escasas, y para su registro se utilizan estaciones climatológicas y pluviométricas especialmente, en las que se registran las precipitaciones diarias en un lapso de tiempo determinado, las estaciones a las cuales se le atribuyen mejores registros a lo largo del tiempo son la estación “**CICESE**” y “**El farito**”, (CICESE, 2022).

La precipitación media anual de la región fluctúa entre los 100 y 200 mm, siendo los meses de mayores precipitaciones enero, marzo y octubre. El ciclo de lluvias comienza en esta región más o menos en noviembre, terminando en los meses de marzo o abril. Esto se pueden apreciar en la **Tabla 2.1** y en la **Figura 2.7**.

Las precipitaciones pluviales mantienen una línea de escurrimiento con gradiente hacia el mar que satura las lutitas y, en algunos casos, el contacto de estas con los depósitos de talud. La infiltración es mayor en los bancos de préstamo explotados precisamente en el sitio de cada falla, para construir los terraplenes localizados a un lado de la carretera escénica Tijuana-Ensenada, como por ejemplo en el kilómetro 98+000.

Tabla 2.1. Precipitaciones registradas en la estación “CICESE” en el año 2021, (CICESE, 2022)

Precipitación (mm)							
Año	Mes	Total	Máximo observado por día	Fecha	Días de lluvia sobre		
					0.20 mm	2 mm	20 mm
2021	Enero	57.1	20.8	29	11.0	6.0	1.0
2021	Febrero	5.1	1.8	12	6.0	0.0	0.0
2021	Marzo	32.3	9.1	3	11.0	6.0	0.0
2021	Abril	3.3	1.5	27	4.0	0.0	0.0
2021	Mayo	0.8	0.8	2	1.0	0.0	0.0
2021	Junio	0.0	0	1	0.0	0.0	0.0
2021	Julio	2.8	2.8	17	1.0	1.0	0.0
2021	Agosto	4.1	3.3	20	2.0	1.0	0.0
2021	Septiembre	0.3	0.3	21	1.0	0.0	0.0
2021	Octubre	8.6	4.3	4	3.0	2.0	0.0
2021	Noviembre	0.3	0.3	30	1.0	0.0	0.0
2021	Diciembre	0.3	0.3	1	1.0	0.0	0.0
		114.8	20.8	Enero	42	16	1

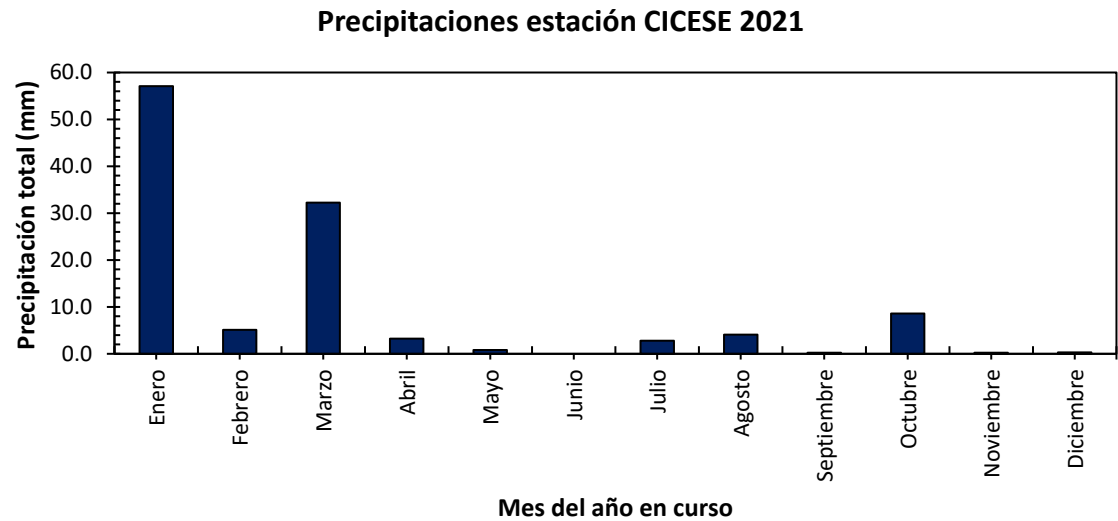


Figura 2.7. Precipitaciones registradas por la estación “CICESE” en el año 2021.

2.2.4 Hidrología general

La Bahía Salsipuedes se encuentra en la región hidrológica Baja California noreste (Ensenada) con clave RH01. El sistema de microcuencas a tratar está dentro de la cuenca R. Tijuana – A. de Maneadero. La cual tiene un área total de 7915.43 Km² y 453.64 Km de perímetro (CONAGUA, 2022).

El coeficiente de compacidad de la cuenca R. Tijuana – A. de Maneadero es de 2.0897, con una pendiente de corriente principal de 2.314% y densidad de drenaje de 2.95, con un total de descargas

de 56, área de 756.63 km² y perímetro de 203.84 Km. Es un tipo de cuenca Exorreica, ya que descarga al mar, el coeficiente de escurrimiento es de 0 a 0.5%, según el sistema SIATL de INEGI, para representación de cuencas hidrográficas (CONAGUA, 2022).

En cuanto a la vegetación general del sitio, es el matorral rosetófilo costero, con grupo de vegetación Matorral Xerófilo y vegetación secundaria del tipo Arbustiva (INEGI, Carta Uso de Suelo y Vegetación, 2015).

Las curvas **IDF** (*Intensidad – Duración – Frecuencia*) es una relación matemática, generalmente empírica, entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa (Témez, 1978). La probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones intensas puede caracterizarse mediante períodos de retorno, obtenidos a partir de la inversa de la frecuencia acumulada. Para la estación climatológica “**El farito**”, localizada aproximadamente entre los kilómetros 92+000 al 95+000 de la carretera escénica Tijuana-Ensenada.

Las curvas **IDF** son las que se muestran en la **Figura 2.8**, puesto que con ellas se podrán obtener las precipitaciones para los diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años), con la finalidad de modelar la cuenca con el método del hidrograma unitario de la **SCS** (usando la precipitación en la hora determinada, el número de curva, las áreas y los tiempos de concentración) (TGC & Mendoza, Informe hidrológico Bahía Salsipuedes, 2017).

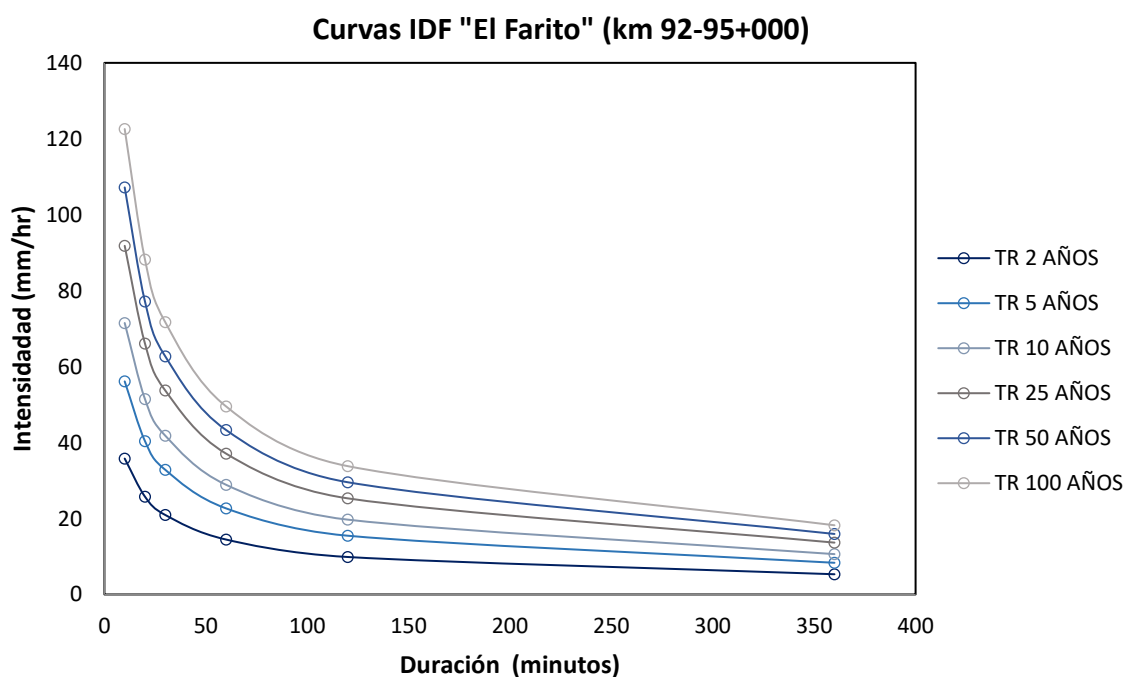


Figura 2.8. Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia) de la estación “*El farito*”, tomado de (TGC & Mendoza, Informe hidrológico Bahía Salsipuedes, 2017).

Conociendo las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia de la zona de estudio, se puede tener la precipitación temporal en dicha zona, entrando a la curva de diferente periodo de retorno con el valor del tiempo de concentración de la cuenca deseada.

Ahora bien, teniendo esos valores de precipitación se conoce que el gasto aproximado de desembocadura en la Bahía Salsipuedes hacia el mar es de $240 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente, para un periodo de retorno de 50 años con una precipitación máxima de 110 mm/hr según la **Figura 2.8** para un coeficiente de escurrimiento de 0.22 por el tipo de vegetación de la zona y un área aproximada de la Bahía Salsipuedes de 35 km^2 .

El gasto o caudal que desemboca al mar a causa de los escurrimientos provocados por las lluvias invernales en la zona es solo un porcentaje del total del agua precipitada, el resto se infiltra o percola por grietas, fallas, y el material mismo que, por la geología de la zona, permite el flujo del agua hasta estratos inferiores; este flujo de agua subterránea se le conoce como flujo base (Témez, 1978), y muchas veces desemboca en el mar mediante burbujeo submarino. En la **Figura 2.9**, se observa que en la parte media derecha marcada con un óvalo café, es la zona donde se presenta el burbujeo en el kilómetro 92+550, el ascenso del agua provoca que las partículas de arena y fondo marino se dispersen en el agua creando una mezcla coloidal que tiene un ligero tono café en el mar.

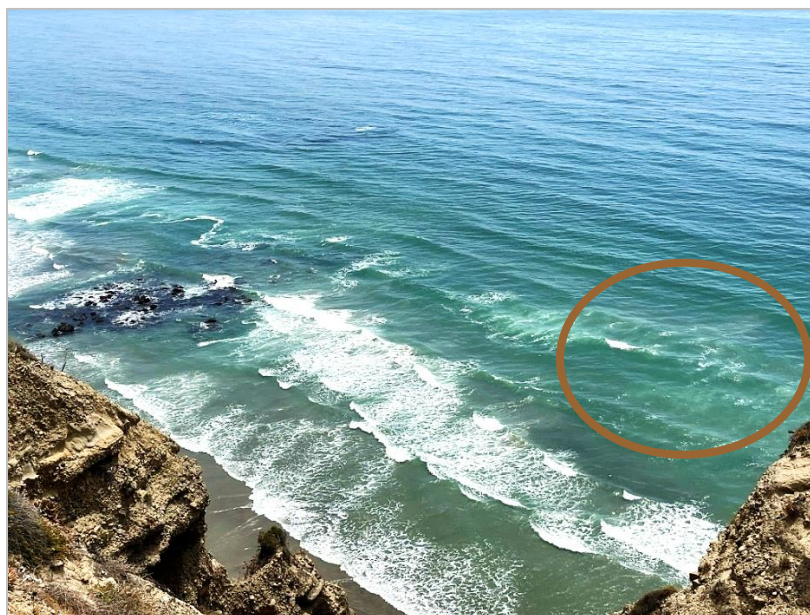


Figura 2.9. Aparición de flujo base en forma de burbujeo submarino en kilómetro 91 y 92.

Históricamente la formación de areniscas marinas Rosario, se caracteriza gracias a su naturaleza granular de cuarzos finos, derivados de los granitos en el centro de la península, por su buena permeabilidad, también conocidos como aluviones. Este tipo de roca conduce las escasas lluvias ($15\text{-}26\text{cm/año}$) infiltradas al mar a través de sus estratos. Agréguese a este mecanismo hidrológico, que aprovecha lo que se define como permeabilidad primaria y horizontal, la permeabilidad secundaria, en su mayoría vertical, dictada por fracturas tectónicas y vulcano – tectónicas, entonces al llover intensamente, se produce por infiltración rápida en estas fracturas una presión hidrostática lateral súbita llamada, cuña hidráulica (TGC & Mendoza, Informe hidrológico Bahía Salsipuedes, 2017).

3 JUSTIFICACIÓN

3.1 Definición de la problemática

El agua es uno de los factores más importantes en la resistencia, compresibilidad y cambio en el volumen del suelo (Toledo, Morán, & Campos, 2012), es por ello que depreciarla en las obras de ingeniería civil es un error indiscutible.

Uno de los motivos principales para la realización de esta investigación es que, en la actualidad, y específicamente en el periodo comprendido entre 2018 a 2022, como se mostró en la metodología *PRISMA* de la sección de *Antecedentes*, México no ha tenido contribuciones registradas en publicaciones científicas con respecto a temas de agua subterránea y sub – superficial, y su relación con la geología. Por lo que las investigaciones geohidrológicas en México se remontan varias décadas atrás, y si se trata de la Bahía Salsipuedes, se tiene que ir hasta la década de los años setenta para tener un bosquejo del comportamiento geohidrológico de la zona, que se muestra en el libro “*Deslizamientos de la autopista Tijuana – Ensenada*” de la Secretaría de Obras Públicas (SOP, 1975).

Cuando fueron realizadas las primeras exploraciones en la Bahía Salsipuedes durante la década de los sesenta (de 1960 a 1967), se tuvo una idea más clara de la influencia que ejerce el agua en los deslizamientos de tierra, y en la estabilidad de la bahía en general (SOP, 1975). Los pozos a cielo abierto, tubos de observación y piezómetros tipo Casagrande revelaron la existencia de un nivel de agua bien definido y estabilizado arriba de la superficie de deslizamiento de cada uno de los sitios inestables (TGC, Gallardo, & Bermúdez, Informe geotécnico Bahía Salsipuedes, 2018).

Los sitios considerados inestables en la Bahía Salsipuedes, corresponden a kilometrajes dentro de la carretera escénica Tijuana - Ensenada, que como se mencionó en capítulos anteriores, es una vía de comunicación que atraviesa la bahía desde el kilómetro 83+000 al 99+000, a la altura de la caseta de cobro a la entrada de la delegación San Miguel, Ensenada, Baja California, México. Los once (11) sitios inestables son llamados así, porque son las zonas donde cronológicamente han ocurrido más eventos de deslizamiento de tierra (TGC, Gallardo, & Bermúdez, Informe geotécnico Bahía Salsipuedes, 2018), véase la **Figura 3.1**.

En casos como los kilómetros 89-90+000 y 95-96+000, se unieron los kilómetros subsecuentes, ya que se comportaban de la misma manera sus masas de tierra, geológicamente hablando, en caso contrario el kilómetro 93+000 y 93+500, se dividieron en dos zonas inestables, ya que cada una actúa de manera independiente, aunque se encuentren en el mismo kilometraje.

Desde el inicio de las exploraciones, y como se mencionó en párrafos anteriores, en cada sitio o zona de inestabilidad se han colocado una gran cantidad de instrumentos piezométricos y de monitoreo inclinométrico, con el fin de conocer las características hidráulicas de cada uno de los sitios inestables y sus desplazamientos con respecto al tiempo; es por ello que hasta el día de hoy se siguen instalando instrumentos como piezómetros tipo Casagrande, tubos de observación, e inclinómetros.

Desafortunadamente, aunque la instalación de tubos de observación y piezómetros Casagrande se extensa a lo largo de la Bahía Salsipuedes, véase **Figura 7.18** en la sección de *Metodología*; su monitoreo es mensual y constante, la información recolectada en esas mediciones no es utilizada para fines de diseño de obras de drenaje o hidráulicas en general.

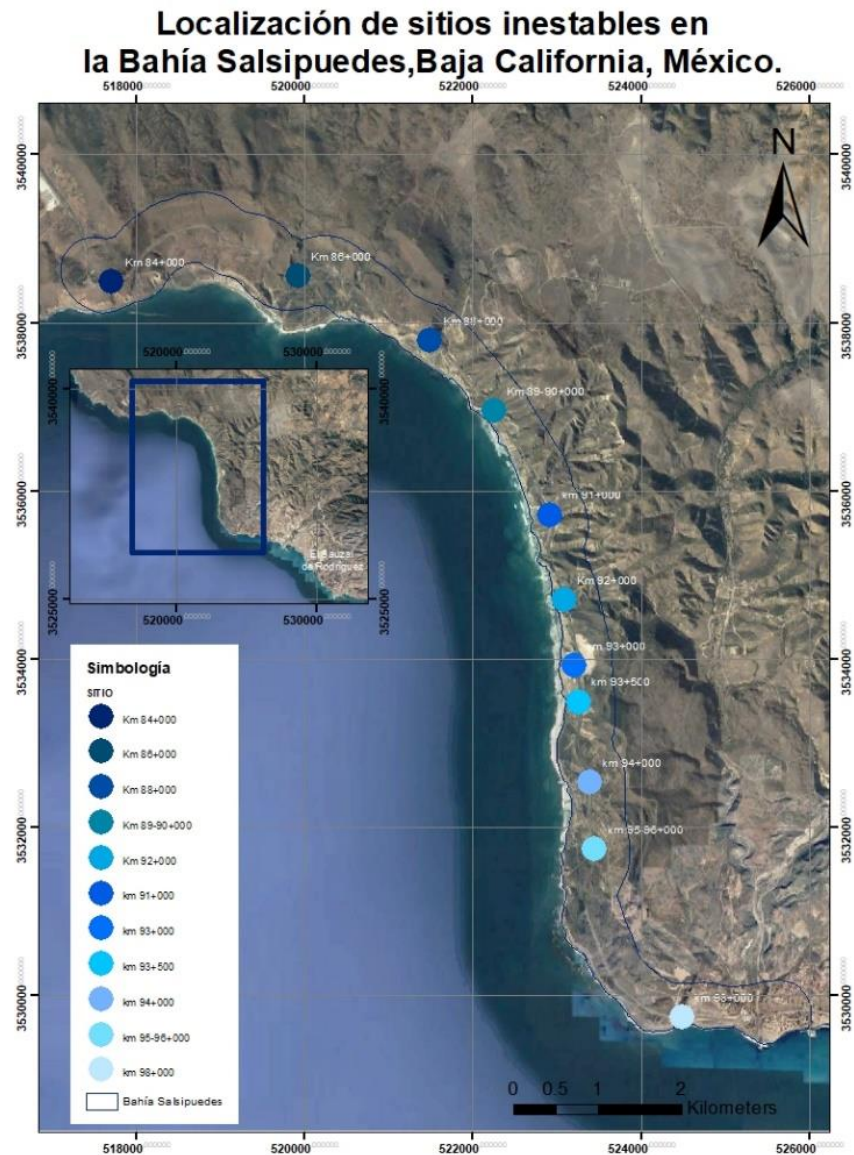


Figura 3.1. Mapa de ubicación de sitios de inestabilidad en la Bahía Salsipuedes.

Desde la década de los sesenta, cuando se comenzó a construir la carretera escénica Tijuana – Ensenada en la Bahía Salsipuedes, se les ha restado importancia a las lecturas arrojadas por esos instrumentos piezométricos. El tratamiento que se le da a la información obtenida de la instrumentación colocada en la Bahía Salsipuedes simplemente es para saber cuándo abatir el caudal captado en los pozos en los kilómetros 89+000, 91+000 y 95+000 por medio de estaciones de bombeo, y darse una burda idea que la presencia de agua afecta unos meses después de la temporada de lluvias invernales, con lo cual termina el uso de esas mediciones y se archivan. Ejemplo de las lecturas de un instrumento piezométrico son las que se presentan en la **Tabla 3.1**, que corresponden a un piezómetro tipo Casagrande instalado en el kilómetro 93+000, con una profundidad de instalación de 70 metros aproximadamente y un nivel piezométrico medio de 64.891 mca.

Tabla 3.1. Lecturas del piezómetro 01 del kilómetro 93+000.

	Nivel piezométrico (mca)			
	2018	2019	2020	2021
Enero	64.98	65.01	65.04	65.05
Febrero	65.1	65.15	65.2	65.18
Marzo	65.18	65.28	65.38	65.23
Abril	65.02	65.06	65.1	65.12
Mayo	64.81	65.11	65.41	64.98
Junio	64.8	64.87	64.94	64.87
Julio	64.77	64.81	64.85	64.81
Agosto	64.58	64.61	64.64	64.79
Septiembre	64.51	64.58	64.65	64.82
Octubre	64.48	64.54	64.6	64.87
Noviembre	64.54	64.59	64.65	64.92
Diciembre	64.71	64.77	64.83	64.96

Con base en las lecturas anteriores, se realiza el gráfico de la **Figura 3.2**, en el cual se puede observar que la presencia de agua sub – superficial por medio de la lectura del nivel piezométrico del instrumento oscila entre los 65.41 y 68.48 mca (metros columna de agua) en un periodo de 4 años, de 2018 a 2021, teniendo la lectura más alta en mayo de 2020 y la más baja en octubre de 2018, dando una desviación estándar de 0.2407 mca. El gráfico indica claramente que la presencia de agua sub – superficial se ve acrecentada en los meses posteriores a las lluvias invernales, es decir marzo, abril y mayo, esto se debe al tiempo de concentración que se necesita para que el agua superficial de los escurrimientos ocasionados por las precipitaciones, se infiltren al subsuelo.

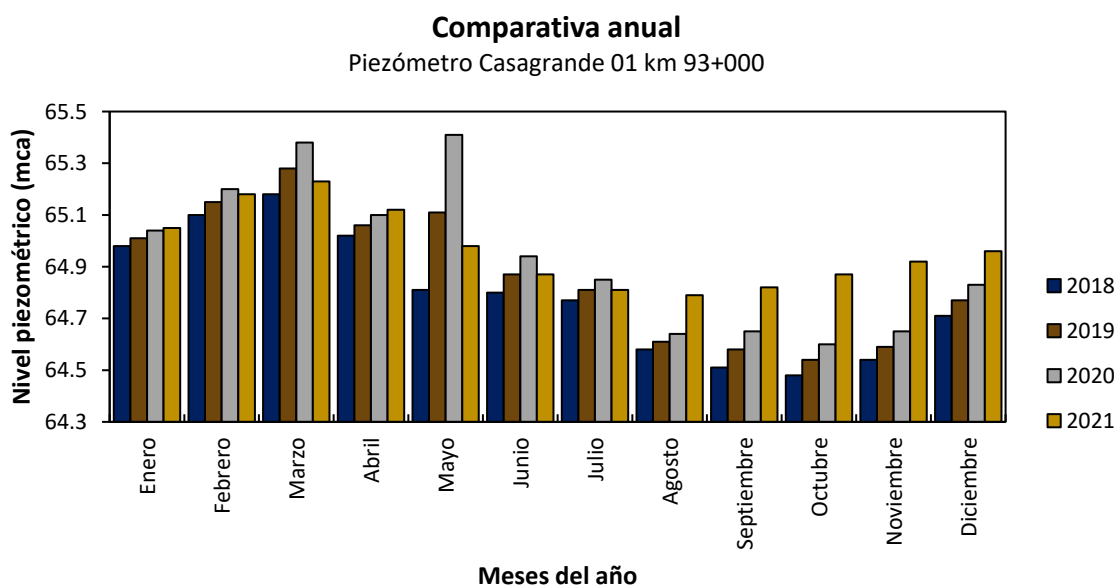


Figura 3.2. Comparativa anual de niveles piezométricos en PZM-01 del kilómetro 93+000.

En los primeros estudios hidrológicos, geológicos, geotécnicos e hidráulicos (SOP-SCT) que se llevaron a cabo en la Bahía Salsipuedes, se dijo que la presión del agua, es decir, hidrostática era relativamente pequeña, por lo que no se le dio más importancia y se despreció casi en su totalidad en los cálculos para el diseño de las obras de la carretera escénica Tijuana – Ensenada. Haciendo presente únicamente los caudales provenientes de la hidrología superficial, para el cálculo de las obras de drenaje e hidráulicas, (SOP, 1975). Las galerías drenantes instaladas en esos tiempos como la galería del kilómetro 88+000 y 91+000, fueron diseñadas tomando como base la geología de la zona y las pocas lecturas o registros de los inclinómetros, piezómetros y tubos de observación instalados.

Actualmente, se sabe que el agua es uno de los principales factores amenazantes para que ocurra el fenómeno geológico de deslizamiento de tierras; los cuales suceden en los once sitios inestables activos de la Bahía Salsipuedes. La amenaza es latente, pero normalmente se presentan afectaciones que se podrían evitar si se les diera un tratamiento más adecuado a los datos arrojados por la instrumentación colocada.

Es poco probable que se tomen en cuenta la totalidad de estos registros o base de datos, en los diseños o proyectos que hace la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, ya que la mayoría de las ocasiones, estos datos son utilizados únicamente como informativos o para dar un bosquejo general de la situación en un sitio inestable, pero no se les da un tratamiento estadístico, conceptual, objetivo y ponderado que permitan conocer más allá de la situación intrínseca de la Bahía Salsipuedes, haciendo casi imposible que una zonificación adecuada de los sitios inestables, por dar un ejemplo.

En general, la presencia de agua subterránea y sub – superficial, provocada por las precipitaciones de la temporada invernal; la geología inestable de la Bahía Salsipuedes; y un tratamiento deficiente de la información piezométrica mensual, por parte de la dependencia de gobierno; son una serie de factores alarmantes que deben ser tomados en cuenta para realizar una estimación del flujo sub – superficial y subterráneo. Tales factores, afectan los sitios nombrados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes como inestables. Con esa estimación, se podrán realizar las modificaciones y diseños hidráulicos necesarios con los que los proyectos ingenieriles de la carretera escénica Tijuana – Ensenada sean más económicos, eficientes y con una mayor vida útil.

4 HIPÓTESIS

Las hipótesis planteadas dentro de la presente investigación, engloban varias afirmaciones derivadas de cuestionamientos cimentados en el conocimiento actual de la Bahía Salsipuedes, estas hipótesis son tres principales, las cuales se mencionan a continuación:

- I. A partir de la información piezométrica, proveniente de la instrumentación colocada en la Bahía Salsipuedes; y la información geohidrológica del sitio; es posible generar una red de flujo, de la cual se pueden estimar caudales para el diseño idóneo de obras hidráulicas en la carretera escénica Tijuana – Ensenada.
- II. Considerando como factor de amenaza los niveles piezométricos observados en la zona de estudio; como factor de exposición el costo y pérdidas de cada uno de los elementos construidos; y como factor vulnerable, la geología del sitio, el derecho de vía del tramo carretero y la calificación de vulnerabilidad de los elementos en exposición; es posible estimar el riesgo geohidrológico para evitar deslizamientos de tierra en la carretera escénica Tijuana – Ensenada.
- III. Es posible realizar un análisis multicriterio en función de la topografía, geología y geohidrología de la zona de estudio, que permita ubicar los sitios apropiados para proyectar galerías drenantes que mitiguen la presencia de flujos sub – superficiales y subterráneos, garantizando la estabilidad de la carretera.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Estimar la red de los flujos sub – superficiales y el riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes permitiendo la ubicación de galerías drenantes para mitigar los deslizamientos de tierra en la carretera escénica Tijuana – Ensenada.

5.2 Objetivos particulares

Para llevar a cabo el objetivo general de esta investigación es necesario realizar una serie de pasos basados en la metodología general del proyecto, es por ello que del objetivo principal se desprenden una serie de objetivos particulares, los cuales tienen la finalidad de complementarlo. Los objetivos particulares son los que se enlistan a continuación:

- I. Recolectar la información de niveles piezométricos, topográfica, geológica, geohidrológica y socio – económica, para realización de información georreferenciada en la zona de estudio.
- II. Obtener la red de flujos sub – superficiales, considerando las isolíneas de flujo e isolíneas piezométricas, permitiendo la visualización de las trayectorias de los flujos sub – superficiales en la Bahía Salsipuedes.
- III. Aplicar el método de superposición ponderada considerando las variables de la conductividad hidráulica, transmisividad, porosidad efectiva, espesor de saturación, carga hidráulica y factores de forma de la red de flujos, permitiendo la estimación de los caudales sub – superficiales en la Bahía Salsipuedes.
- IV. Plantear un modelo de riesgo geohidrológico en la carretera escénica Tijuana - Ensenada, evaluando la amenaza, exposición y vulnerabilidad, permitiendo la localización de los sitios que presentan mayor riesgo de deslizamiento de tierras por acción de los flujos sub – superficiales.
- V. Realizar un análisis multicriterio considerando la información topográfica, geológica y geohidrológica, para la proyección de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 Agua subterránea

6.1.1 Agua subterránea y sub – superficial

El agua es uno de los factores más importantes en la resistencia, compresibilidad y cambios en el volumen del suelo (Sowers & Sowers, 1990). Aunque el agua está presente en todos los suelos, el término agua subterránea está reservado para una masa continua de agua bajo la tierra que llena los poros o vacíos del suelo y que puede moverse libremente por efectos de la gravedad. En cuanto al término agua sub – superficial, se refiere prácticamente a la misma situación que el agua subterránea, solo que, a diferencia del último, que se encuentra a grandes profundidades; el agua sub – superficial se encuentra en niveles más someros, es decir, a pocos metros de profundidad tomando como referencia la superficie o nivel de terreno natural (Sowers & Sowers, 1990).

El agua subterránea y sub – superficial no es una masa de agua estática con la superficie a nivel; por el contrario, es una corriente que se mueve con una superficie en pendiente que toma muchas formas, que dependen de la estructura de los suelos y rocas por los cuales fluye (Sanders, 1998).

6.1.2 Acuíferos

Los acuíferos son estratos de suelo y roca, relativamente permeables, que contienen agua subterránea y sub – superficial. Estos son similares a los depósitos de los lagos y los cauces de los ríos que contienen agua superficial. El acuífero más conocido es un estrato de suelo relativamente permeable, en el que el nivel del agua subterránea sube y baja con el estado atmosférico y con el bombeo. El nivel freático se inclina en la misma dirección que la superficie del terreno, pero la pendiente es más suave y uniforme. En los suelos formados por estratos alternados de suelos permeables e impermeables, la disposición del agua subterránea se hace más compleja (Sowers & Sowers, 1990).

Para considerar una formación como acuífera es necesario que se presenten dos condiciones: una formación geohidrológica permeable o embalse y la presencia de agua subterránea y/o sub – superficial (Vélez Otálvaro, 2004).

La liberación de agua del acuífero se debe a la acción de la gravedad (acuífero libre) o a la descompresión (acuífero confinado). Las dos condiciones están en interacción permanente. Desde un punto de vista geohidrológico, se pueden definir dos grandes clases de rocas de acuerdo a su comportamiento hidrológico.

- I. Rocas porosas o con intersticios, caracterizadas por estar formadas por granos de formas y dimensiones muy diversas, que dejan entre ellos vacíos de muy pequeñas dimensiones llamados poros. Estos poros pueden ser ocupados por fluidos, es decir, líquidos o gases.
- II. Rocas fisuradas que son rocas compactas cuyos vacíos más importantes son esencialmente fisuras o grietas abiertas. También se les llama rocas fracturadas.
- III. Rocas intermedias, las cuales presentan características intermedias entre los dos tipos de rocas anteriores, como lo son ciertos tipos de rocas calcáreas.

Es decir, que las rocas contienen en general un porcentaje de vacíos que pueden ser ocupados por agua, aire o vapor de agua. La existencia de dichos vacíos constituye lo que se denomina porosidad.

Además de la existencia de los poros, es necesario considerar la interconexión que existe entre ellos y que es lo que permite que la circulación del agua ocurra, a este fenómeno se le conoce como permeabilidad o conductividad hidráulica.

Estos dos grandes tipos de vacíos permiten diferenciar la existencia de acuíferos en dos tipos de rocas, desde un punto de vista geohidrológico: en las rocas no consolidadas y en las rocas compactas fisuradas (Vélez Otálvaro, 2004).

6.1.3 Tipos de acuíferos

Como se ha señalado anteriormente, las dos características importantes geológicas desde un punto de vista geohidrológico son la porosidad, la cual está ligada a la capacidad de almacenamiento de agua en las rocas; y la permeabilidad, que es la habilidad de las mismas de dejar circular dicha agua bajo la acción de la gravedad (Freeze & Cherry, 1979).

De esta manera, las diversas formaciones geológicas presentan distintas características en cuanto a su porosidad y a su permeabilidad o conductividad hidráulica. Es así como unas tendrán una porosidad relativamente alta y a su vez permiten un fácil movimiento del agua, como es el caso de los aluviones y arenas, por mencionar algunos ejemplos. Otras presentarán una alta porosidad, pudiendo por consiguiente almacenar considerables cantidades de agua, pero sin permitir el fácil desplazamiento de la misma, como es el caso de la mayoría de las arcillas y limos. Finalmente, habrá otras formaciones que no pueden ni almacenar ni transmitir el agua como lo son ciertas rocas metamórficas no fracturadas (Vélez Otálvaro, 2004).

Es de suma importancia señalar, que no se debe hablar de formaciones absolutamente impermeables. Se trata siempre de un concepto relativo, de la mayor o menor capacidad de la formación de permitir el movimiento de agua, pues en unas formaciones el agua puede desplazarse bajo la acción de la gravedad a velocidades mayores que en otras.

De acuerdo con lo anterior, es posible clasificar a los acuíferos de la siguiente manera (Bear, 1979):

- I. **Acuicludos**, son formaciones que almacenan el agua, a veces en proporciones altas, pero que no la transmiten en cantidades apreciables.
- II. **Acuitardos**, son formaciones que almacenan el agua pero que sólo permiten el flujo de la misma en forma muy lenta, en comparación con los acuíferos acuicludos. Estas formaciones pueden tener una gran importancia cuando se estudia el movimiento del agua a nivel regional, ya que sobre áreas relativamente grandes pueden transmitir grandes cantidades de agua a pesar de la baja velocidad del flujo. Así, pueden permitir el paso de agua de un acuífero a otro cuando estos se encuentran separados por un acuitardo. Este fenómeno reviste particular importancia cuando se estudian casos de contaminación de las aguas subterráneas.
- III. **Acuífugos**, son formaciones impermeables que no almacenan ni transmiten el agua.

Los acuíferos pueden clasificarse también de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada por ellos, condiciones que varían según la posición estratigráfica de la formación. De esta manera, puede hablarse de los siguientes tipos.

- I. **Acuíferos libres o no confinados**; son aquellos que presentan una superficie libre de agua que está en contacto directo con la atmósfera, sometida por consiguiente a la presión atmosférica. Dicha superficie se denomina superficie freática o tabla de agua.
- II. **Acuíferos cautivos, confinados o artesianos**; en estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica y son formaciones permeables que son limitadas por capas impermeables. En este caso la formación se encuentra completamente saturada. Aquí no existe una superficie libre del agua, pero si se puede hablar de una superficie piezométrica la cual es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua del acuífero.
- III. **Acuíferos semi – confinados**; son acuíferos que se encuentran completamente saturados de agua, y están limitados ya sea por su base, por el techo o por ambos; por una capa o formación semipermeable (acuitardo). Esta situación permite que haya un flujo entre acuíferos que se encuentren separados por el acuitardo, flujo que puede efectuarse en dirección de la diferencia de niveles piezométricos existente entre los mismos.

6.1.4 Clasificación de acuífero de la Bahía Salsipuedes

Para considerar una formación como acuífera es necesario que se presenten dos condiciones; la primera es que debe existir una formación geohidrológica permeable o embalse y la segunda es la presencia de agua subterránea. El término de agua subterránea, designa toda el agua contenida o circulante en el embalse subterráneo.

Basándose en las dos condiciones anteriormente mencionadas, la zona denominada Bahía Salsipuedes no puede considerarse un acuífero como tal, ya que la mayoría del agua subterránea es sub – superficial, y por consiguiente que no se infiltra a través de los estratos o formaciones a grandes profundidades, en las que se podría establecer un embalse.

Si bien la Bahía Salsipuedes no es un acuífero como tal, presenta algunas similitudes con acuíferos como es el caso de los acuífugos y los semi – confinados a nivel sub – superficial.

En la Bahía Salsipuedes se pueden encontrar zonas que actúan como acuífugo, en una escala sub – superficial, ya que no almacenan agua, debido a que la mayoría del agua sub – superficial emana por burbujeos en la zona costa a través de grietas y/o fisuras en el lecho marino, como ocurren de los kilómetros 91+000 al 92+500, como se puede ver en **Figura 2.9**. Al agua que sale por este tipo de manantial submarino se le conoce como flujo base.

De igual forma, en la Bahía Salsipuedes se pueden encontrar zonas que actúan como un acuífero semi – confinado, es decir, zonas saturadas (en este caso, sub – superficialmente), limitadas por su base semipermeable y que no permiten el flujo al mar, ocasionando sobresaturación de la zona y colapsos en deslizamientos de tierras, como es el caso del kilómetro 93+000. Ver **Figura 1.2**.

Por lo que es común decir que la Bahía Salsipuedes no es un acuífero, pero si cuenta con encharcamientos sub – superficiales o bolsones hidráulicos que actúan como micro – acuíferos, los cuales actúan como depósitos de las redes de flujo de la zona de estudio y están localizados principalmente en rocas con porosidades efectivas elevadas con profundidades no mayores a los 70 metros desde el nivel de terreno natural, o bien, a no más de 10 metros de profundidad, si se toma como referencia el nivel del mar.

6.2 Ley de Darcy

6.2.1 Parámetros fundamentales

6.2.1.1 La porosidad

La porosidad es una medida del espacio intersticial de una roca y, por consiguiente, de la cantidad de fluido que el medio puede almacenar. En general se distinguen dos tipos de porosidad (Vélez Otálvaro, 2004).

1. La porosidad total o verdadera (n) que se define como la relación entre el volumen de los vacíos (V_v) y el volumen total de la roca (V), expresado en porcentaje (%).

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1)$$

2. La porosidad efectiva o eficaz (n_e) que se define como la relación entre el volumen de agua gravítica (V_{ag}) y el volumen total (V), expresada en porcentaje (%). Esta representa un porcentaje, en general bajo, de la porosidad total (Vélez Otálvaro, 2004).

$$n_e = \frac{V_{ag}}{V} \quad (2)$$

En la geohidrología se utilizan algunos valores numéricos ya establecidos para la porosidad efectiva, dependiendo el tipo de roca. Estos valores se pueden observar en la **Tabla 6.1**.

Tabla 6.1. Valores de porosidad total y efectiva para diferentes materiales, (Domenico & Schwartz, 1998).

Material (Roca)	Porosidad total % (m)	Porosidad efectiva % (m)
Andesitas	1.0 - 5.0	0.015
Basaltos densos	0.1 - 1.0	0.02 - 2.0
Basaltos vacuolares	5.0 - 50.0	1.0 - 10.0
Basaltos fracturados	1.0 - 10.0	0.0005 - 0.01
Metamórficas sin fracturar	0.01 - 1.0	0.005
Metamórficas fracturadas	1.0 - 10.0	0.0005 - 0.01
Areniscas - Conglomerados	1.0 - 25.0	0.1 - 15.0
Areniscas	5.0 - 35.0	0.5 - 10.0
Arcillas	40.0 - 60.0	0.0 - 5.0
Arenas finas o limosas	20.0 - 50.0	10.0 - 28.0
Arenas gruesas o bien seleccionadas	20.0 - 50.0	20.0 - 35.0
Gravas	25.0 - 40.0	13.0 - 26.0
Aluviones	20.0 - 40.0	0.15 - 21.0

Un parámetro importante en cuestión de determinación de un acuífero es la porosidad (n); esta se puede definir como aquella relación que mide el volumen relativo de poros o vacíos en una formación geológica cualquiera.

La parte más importante desde el punto de vista geohidrológico es la porosidad efectiva o eficaz (ne), que es aquella que mide la cantidad de agua que el acuífero puede liberar por acción de la gravedad, es decir, es el agua útil o realmente explotable.

6.2.1.2 La permeabilidad o conductividad hidráulica.

La permeabilidad, también conocida como conductividad hidráulica, es la aptitud del medio para permitir el flujo del agua bajo el efecto de un gradiente hidráulico (diferencia de potencial hidrostático), por unidad de longitud. Para dar una medida mecánica de la permeabilidad se ha definido el coeficiente de permeabilidad de Darcy (K), que es el volumen de agua gravítica que circula durante una unidad de tiempo, bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico, a través de una sección de área unitaria perpendicular a la dirección del flujo y a una temperatura de 20 grados centígrados.

Tabla 6.2. Valores estimados de conductividad hidráulica, compendio tomado de (Barbecho C. & Calle O., 2012).

Material (Roca)	Valores estimados de conductividad hidráulica (m/día)				
	Domenico	Smith	Freeze	Fetter	Sanders
Grava	25 - 2500	100 - 100000	100 - 1000000	10 - 1000	
Grava con arena	0.1 - 500				
Aluvial	0.01	0.1 - 1	0.001 - 0.01	0.01	0.01
Arena gruesa	0.1 - 500				1 - 100
Arena media	0.1 - 50	0.01 - 1000	1 - 1000	1 - 100	
Arena fina	0.02 - 20			0.01 - 1	
Arena arcillosa		0.0001 - 1	0.01 - 100	0.001 - 0.1	0.01 - 1
Areniscas	0.00003 - 0.5	0.00001 - 1	0.00001 - 1		
Arenisca - Conglomerado	0.0003 - 0.0001	0.0008	0.0008 - 0.0006	0.0007 - 0.001	0.0008
Basalto inalterado	0.0001	0.000001 - 0.001	0.0001	0.0001	0.000001 - 0.001
Basalto fracturado		10 - 1000			0.1 - 100000
Basalto permeable	0.03 - 2000		0.02 - 1000		
Andesita	0.00001	0.0000001	0.00001	0.00001	0.00001 - 0.00001

El coeficiente de permeabilidad tiene dimensiones de una velocidad (L/T), (Custodio & Llamas, 1983). Si se tiene que:

$$V = Ki \quad (3)$$

En donde, V es la velocidad de flujo e i es el gradiente hidráulico. Se observa que K tiene las unidades de una velocidad ya que i es un parámetro sin unidades. Pero este coeficiente mide una propiedad, en términos macroscópicos, como es el flujo de un fluido a través de un medio poroso. No sólo está condicionado por las características del medio (porosidad, geometría de los granos, etc.), sino también por ciertas características propias del fluido mismo como son su peso específico y su

viscosidad. Esta es la razón por la cual se ha desarrollado una expresión para el coeficiente de permeabilidad K , que tiene en cuenta estos factores. La expresión de dicho coeficiente es:

$$K = K_0 \frac{\gamma}{\mu} \quad (4)$$

En donde, K_0 es la llamada permeabilidad intrínseca o geométrica, y es un parámetro característico del medio poroso; γ es el peso específico del fluido; y μ es la viscosidad dinámica del mismo.

En la actualidad se usan valores numéricos del coeficiente de permeabilidad para cada tipo de roca, los cuales pueden variar un poco entre autores debido al cálculo por diferentes factores, tales como la profundidad de la que se extrajo la muestra de roca, la temperatura, la viscosidad, errores en el permeámetro, entre otros. Como se puede observar en la **Tabla 6.2**.

6.2.1.3 La transmisividad.

La transmisividad o transmisibilidad (T), si se considera un acuífero cuya zona saturada tiene una altura b , la transmisividad se define como el volumen de agua por unidad de tiempo (o caudal), que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y de altura b , bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico y a una temperatura de 20 grados centígrados (Sanders, 1998).

De acuerdo con esta definición y con la definición de coeficiente de permeabilidad, se puede decir que:

$$T = Kb \quad (5)$$

Siendo K el coeficiente de permeabilidad del material y b el espesor de saturación de la roca.

Es así que la transmisividad tiene dimensiones (L^2/T). Cuando se perfora un pozo en un acuífero, la transmisividad es un parámetro que da una idea de la productividad del acuífero, es decir, de la capacidad del mismo para permitir la extracción de agua en el pozo (Vélez Otálvaro, 2004).

6.2.1.4 Coeficiente de almacenamiento.

En los acuíferos libres, el agua que se extrae a través de un pozo proviene esencialmente de agua liberada por efecto de la gravedad. En los acuíferos cautivos, los cuales se encuentran completamente saturados y bajo otras condiciones de presión, el agua se libera debido a fenómenos de elasticidad que operan tanto sobre el material sólido o armazón del acuífero como sobre la misma agua (Vélez Otálvaro, 2004).

El coeficiente de almacenamiento (S), se define como el volumen de agua que es liberado por un prisma del acuífero de sección unitaria y de altura igual a la parte saturada del mismo, cuando se produce un cambio unitario del nivel piezométrico (Sánchez- San Román, 2012).

El coeficiente de almacenamiento es un número adimensional y es mucho mayor en los acuíferos libres que en los acuíferos confinados; ya que para los primeros está su valor numérico entre 0.20 y 0.30; mientras que, para los últimos, entre 0.0001 y 0.001 (Sánchez- San Román, 2012).

6.2.2 Ley de Darcy

El caudal de agua o gasto es definido como el volumen de agua que fluye en la unidad de tiempo en una geometría dada (Domenico & Schwartz, 1998). El caudal que atraviesa un área determinada de

suelo transversal a la dirección del movimiento es denominado caudal unitario, descarga específica o flujo volumétrico (Sanders, 1998).

El francés Henry Darcy en el siglo XIX estudió en forma experimental el flujo de agua a través de un medio poroso, y estableció la ley que se conoce con el nombre de Ley de Darcy. Dicha ley se base en las siguientes hipótesis que condicionan la validez de su ley (Vélez Otálvaro, 2004).

- I. **Medio continuo**, es decir que los poros vacíos estén intercomunicados. En este sentido, los medios kársticos no se pueden considerar como medios continuos.
- II. **Medio isotrópico**, en otros términos, nos dice que es un medio en el cual sus propiedades físicas son independientes de la dirección en que se midan.
- III. **Medio homogéneo**, lo que significa que sus características físicas no varían de un punto a otro.
- IV. Flujo de agua en **régimen laminar**, es decir que el movimiento del fluido es ordenado, estratificado y suave.
- V. Medio completamente saturado, es decir, que los poros del medio deben estar colmado de agua.

Todas estas hipótesis toman validez únicamente si el medio poroso está completamente saturado, es decir, cuando todos sus poros están llenos de fluido (líquido o gas). En el caso de la Bahía Salsipuedes, esta condición ocurre una vez terminada la temporada de lluvias invernales, aproximadamente durante los meses de marzo, abril y mayo, véanse las secciones de *Descripción del sitio y Justificación*.

Cuando el medio no está saturado, no aplican las hipótesis mencionadas por Darcy y por lo tanto su fórmula para el cálculo de flujo queda invalidada para ese medio. En estos casos particulares y siguiendo la ecuación general de transferencia de Darcy:

$$\nabla \cdot [\rho_w K \nabla H] + \rho_w w = \frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} \quad (6)$$

Dando por sentado que el medio no está completamente saturado se utiliza la ecuación de Richards. Esta ecuación introduce el concepto de capacidad específica, que se define como la pendiente de la curva de retención.

$$C(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (7)$$

Esta capacidad específica permite obtener una ecuación de transferencia en la que la presión es la variable dependiente. Esta ecuación es conocida como la **ecuación de Richards** (Fuentes & Rendón, 2012), y se define como:

$$\nabla \cdot [K(\psi) \nabla(\psi)] + \frac{dK}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} + w = C(\psi) = \frac{d\psi}{dt} \quad (8)$$

Donde el primer miembro de la ecuación (8) representa los efectos de la presión, es decir queda en función del potencial de presión expresado como una altura de columna de agua (ψ); y el segundo

término representa los efectos de la gravitación, es decir, queda en función de una aceleración, por ende, en función del tiempo (Fuentes & Rendón, 2012).

En el caso particular de la Bahía Salsipuedes, se tomará como base principal la ley de Darcy y se supondrá un medio completamente saturado, aunque se sepa claramente que esto ocurre únicamente en algunos periodos determinados del año.

Siguiendo, Darcy realizó experimentos en cilindros verticales de 2.50 metros de altura por 0.35 metros de diámetro interior, llenos de arena con una porosidad total del 38%, a los que llamó permeámetros de carga constante, como se puede ver en la **Figura 6.1**.

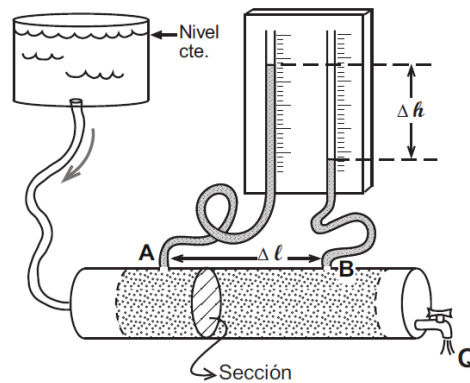


Figura 6.1. Permeámetro de carga constante, tomada de (Sánchez- San Román, 2012).

Es así como Darcy demostró que el caudal (Q) es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud del lecho de arena y proporcional al área de la sección y a un coeficiente que depende de las características del material. De esta manera estableció que:

$$Q = \frac{KA(h_1 - h_2)}{l} \quad (9)$$

En donde K es la conductividad hidráulica con unidades (L/T), Q es el caudal en m^3/s , h_1 y h_2 son las cargas hidráulicas en metros columna de agua, A es el área de la sección en m^2 y l la longitud del lecho de arena en metros.

Ahora bien, si en lugar de considerar el tubo vertical, se le da una cierta inclinación, como se puede ver en la **Figura 6.2**, se tiene que:

$$h_1 = Z_1 \frac{\rho_1}{\gamma} \quad h_2 = Z_2 \frac{\rho_2}{\gamma} \quad \Delta h = h_1 - h_2 \quad (10)$$

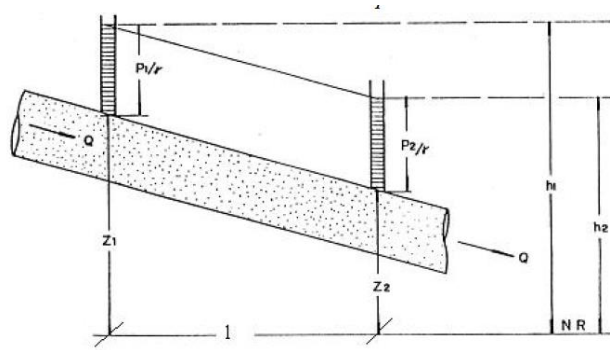


Figura 6.2. Flujo de un líquido a través de un medio poroso en un tubo inclinado, tomada de (Vélez Otálvaro, 2004).

Ahora $\Delta h/l$ no es otra cosa que la pendiente de la línea de carga, o sea la pérdida de carga por unidad de longitud del lecho filtrante, la cual se llama gradiente hidráulico. Este gradiente se puede simbolizar mediante la letra i , entonces:

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (11)$$

En este caso, la expresión Q queda de la siguiente manera:

$$Q = K A i \quad (12)$$

Esa misma fórmula puede reinterpretarse de la siguiente manera:

$$V = \frac{Q}{A} = K i \quad (13)$$

La expresión Q/A recibe el nombre de velocidad de flujo o velocidad de Darcy, y queda simbolizada por V .

Si se tiene en cuenta que el agua en un medio poroso se mueve a velocidades variables según el tamaño y orientación de los poros, es claro que esta velocidad de flujo no coincide, a una escala microscópica, con la velocidad real del agua a través de los poros del mismo. No obstante, lo anterior, para el estudio de las características hidráulicas del flujo a través de un medio poroso se utiliza la velocidad de Darcy.

En general, la ley de Darcy se puede enunciar como “El caudal que atraviesa un medio poroso es linealmente proporcional al gradiente hidráulico, con una constante de proporcionalidad característica del material que atraviesa” (Sánchez- San Román, 2012).

6.2.3 Flujo por Darcy

Con frecuencia un medio estratificado, el flujo por Darcy se le llama a aquél que se produce a través de varias capas, dentro de una misma formación; para aplicar la Ley de Darcy en este tipo de situaciones se hacen algunas consideraciones, tales como dar por sentado el hecho de que el flujo es paralelo a los contactos entre las capas o que el flujo es perpendicular a las capas. En ambos casos se supone que las capas son homogéneas e isotropas (Vélez Otálvaro, 2004).

En estos casos, la conductividad hidráulica se considera equivalente en todas las capas, es decir, un valor global que se puede asignar al conjunto de capas consideradas como una unidad (Fetter, 2001).

Si el flujo es paralelo a las capas la conductividad hidráulica equivalente se puede calcular de la siguiente manera:

$$K_h = \frac{\sum K_i b_i}{B} \quad (14)$$

Siendo, K_h la conductividad hidráulica horizontal equivalente, K_i la conductividad hidráulica de cada una de las capas, b_i es el espesor de cada una de las capas saturadas, B es el espesor total o suma de todos los espesores (Fetter, 2001).

Teniendo en cuenta que la transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica con el espesor de saturación, en este caso la transmisividad equivalente del conjunto es igual a la suma de las transmisividades de todas las capas (Freeze & Cherry, 1979).

Si el flujo es perpendicular a las capas, la conductividad hidráulica equivalente se puede calcular de la siguiente manera:

$$K_v = \frac{B}{\sum \frac{b_i}{K_i}} \quad (15)$$

Siendo K_v la conductividad hidráulica vertical equivalente, K_i la conductividad hidráulica de cada una de las capas, b_i el espesor de cada una de las capas y B el espesor total, o suma de todos los espesores.

En algunas ocasiones es necesario describir el medio permeable en tres dimensiones, agregando una conductividad hidráulica más en el eje Z, pero generalmente no se dispone de un conocimiento del medio poroso lo suficientemente bien para poder especificar el valor de la conductividad hidráulica en las tres dimensiones del espacio: X, Y, Z; por ello, con frecuencia se debe limitar a asignar a una formación geológica un valor de conductividad hidráulica suponiéndolo válido para cualquier dirección, es decir, considerándolo como medio isótropo (Vélez Otálvaro, 2004).

6.2.4 Limitaciones de la Ley de Darcy

La Ley de Darcy establece una relación lineal entre la velocidad y el gradiente hidráulico del tipo $V = Ki$ y es válida para un régimen de flujo laminar y en un medio isotrópico y homogéneo. Puede decirse que, en la generalidad de los casos, el flujo del agua subterránea cumple con esta ley, aun cuando a veces se presentan ciertas condiciones, particularmente referidas al número de Reynolds que original separaciones con respecto a ella, (Vélez Otálvaro, 2004).

En pocas palabras, la Ley de Darcy no puede cumplirse por las siguientes razones:

- I. La constante de proporcionalidad K , es decir, la conductividad hidráulica, “no es propia y característica del medio poroso”, sino que también depende del fluido, (Sánchez- San Román, 2012).

Si se toma en cuenta que la conductividad hidráulica está en función de la conductividad hidráulica intrínseca (que solo depende del medio poroso), el peso específico del fluido (que depende de la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad) y la viscosidad dinámica del fluido (que depende de la viscosidad cinemática y la densidad del fluido), se podría reformular de la siguiente manera:

$$K = k \frac{g}{\nu} \quad (16)$$

Dando como resultado, una conductividad hidráulica dependiendo de la conductividad intrínseca del medio poroso, la aceleración de la gravedad y la viscosidad cinemática del fluido, lo que diría que intervienen ya dos factores, el fluido y el medio poroso, y no únicamente el medio poroso, como para que sea válida la Ley de Darcy (Sánchez- San Román, 2012).

En el caso de aguas subterráneas, la variación correspondiente al fluido en una región determinada, es despreciable, por lo que a efectos prácticos se asume que la K de Darcy, conductividad hidráulica es una característica del medio poroso. Cuestión que no sucede en casos como la geología del petróleo o en el flujo de contaminantes, donde se estudian fluidos de diferentes características cuyas propiedades físicas como la viscosidad, varían con la temperatura.

II. La relación entre el caudal y el gradiente hidráulico “no es lineal” en algunas circunstancias (Sánchez- San Román, 2012).

Esto puede suceder cuando el valor de la conductividad hidráulica es muy bajo o cuando las velocidades del flujo son muy altas.

En el primer caso si se aplica la Ley de Darcy para calcular el flujo en una formación, el caudal que se obtendría sería muy bajo, pero en realidad sería nulo. No habría circulación de agua si no se aplican unos gradientes muy elevados (Smith & Weathcraft, 1993).

En el segundo caso, si el agua circula a gran velocidad, el caudal es directamente proporcional a la sección y al gradiente, pero no linealmente proporcional, sino que la función sería potencial (Smith & Weathcraft, 1993).

Para poder estudiar este límite de validez de la Ley de Darcy se aplica el número de Reynolds. Este coeficiente se creó para canales abiertos y tuberías, y en general valores altos indican un régimen turbulento y valores bajos indican régimen laminar. Para medios porosos se aplica la fórmula utilizada para canales o tubos, pero sustituyendo el diámetro de la conducción por el diámetro medio de los granos del medio poroso y utilizando la velocidad de Darcy (no la velocidad real o lineal media) (Sánchez- San Román, 2012).

$$RE = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{V d}{\nu} \quad (17)$$

Donde RE es el número de Reynolds (adimensional), ρ es la densidad del fluido (en kg/m^3), V es la velocidad de Darcy (en m/s), d es el diámetro medio de los granos (en metros), μ es la viscosidad dinámica (en $\text{kg/(m}^2\cdot\text{s)}$) y ν es la viscosidad cinemática en (en m^2/s).

Es imposible conocer el grado de turbulencia del flujo a través de un medio poroso, pero experimentalmente se ha observado que deja de cumplirse la Ley de Darcy cuando número de Reynolds alcanza un valor que varía entre 1 y 10.

En el flujo subterráneo las velocidades son muy lentas, los valores de número de Reynolds muy bajos, y prácticamente siempre la relación es lineal, salvo en las proximidades de algunas captaciones bombeando caudales elevados (Smith & Weathcraft, 1993).

6.3 Características y tipos de agua en el suelo

El agua que se va a analizar es toda aquella que se presenta en el suelo, cualquiera que sea su tipo y profundidad. Cantidades importantes de agua son retenidas en la superficie de los granos o contra las paredes de las microfisuras por efecto de interacciones agua – roca, mediante fuerzas de atracción molecular y tensión superficial, que se presentan debido a la estructura bipolar de la molécula de agua. La clasificación de los tipos de agua presentes en el suelo se presenta conforme a los niveles de energía crecientes, que se requieren para su extracción; tal como, la fuerza de gravedad, la fuerza centrífuga, el calor, entre otros. Las fuerzas que ligan las moléculas entre sí, son funciones de las características de los campos que existen: campo de gravedad, campo eléctrico, etcétera (Vélez Otálvaro, 2004).

Por lo que, un medio poroso puede entonces contener agua de dos tipos diferentes: el agua de retención y el agua gravítica.

Esta clasificación se sustenta en las distintas fuerzas a que se pueden ver afectadas las moléculas de agua presentes en los medios porosos. Desde un punto de vista geohidrológico esta diferencia es fundamental ya que no toda el agua que hay en los vacíos de una formación determinada es utilizable en forma efectiva, situación que está ligada al concepto de porosidad efectiva. En la **Tabla 6.3**, se puede observar la clasificación de los diferentes tipos de aguas subterráneas según los medios y la energía necesaria para su extracción (Vélez Otálvaro, 2004).

Tabla 6.3. Tipos de agua subterránea, (Vélez Otálvaro, 2004).

Tipos de agua subterránea			Medios de extracción	Fuerzas ejercidas
Agua disponible	Agua gravitacional		Goteo secado a 108°C	Gravedad/Calor
Agua no disponible	Agua de retención	Agua pelicular	Centrífuga	Atracción molecular
		Agua de absorción	Vacío	

6.3.1 Agua de retención

Una molécula de agua está polarizada eléctricamente, se comporta como un dipolo. Los granos que conforman las rocas también tienen una carga eléctrica natural, sea positiva o negativa. A causa de estos dos fenómenos se observan dos consecuencias principales:

- I. Hay fuerzas de atracción eléctrica entre los granos del suelo y las moléculas de agua.
- II. Hay igualmente efectos de atracción molecular entre las moléculas mismas de agua.

Estos dos tipos de atracción dan lugar de igual forma a dos clases de agua que, considerados en conjunto, conforman lo que se llama el agua de retención; las cuales son el agua higroscópica y el agua pelicular (Sanders, 1998).

El agua higroscópica es también llamada agua de absorción y es la que impregna directamente a las partículas del suelo. Solo puede extraerse por medio de la evaporación y no por medios mecánicos. El agua pelicular por su lado, es aquella que se presenta rodeando los granos del suelo y su agua higroscópica y formando una delgada película de espesor variable que no se desplaza bajo la acción de la gravedad. Esta agua sólo puede extraerse en el laboratorio sometiendo la muestra de suelo a ultra – centrifugación (Sowers & Sowers, 1990).

La cantidad de agua pelicular que las rocas pueden contener, varía desde 40 – 45% para las arcillas y hasta 1.5 – 3% para las arenas (Vélez Otálvaro, 2004).

En forma general, se puede decir que el agua de retención no es un agua útil desde el punto de vista geohidrológico, ni tampoco para su aprovechamiento por parte de las plantas de extracción, ya que las fuerzas de retención son superiores a las fuerzas de succión de las raíces.

6.3.2 Agua gravítica

El resto de agua que llena los poros de una formación geológica y que está sometida a las fuerzas de la gravedad recibe el nombre de agua gravítica, denominada también agua libre o agua de percolación y la única que puede extraerse directamente del suelo por procedimientos mecánicos (Vélez Otálvaro, 2004). Es pues el agua útil desde un punto de vista geohidrológico y constituye el agua subterránea y sub – superficial propiamente dicha. Su circulación se hace por efecto de las diferencias de gradientes hidráulicos. Así, las reservas útiles de un acuífero están condicionadas por la porosidad efectiva y esta a su vez tiene como factor principal la granulometría del material (Sanders, 1998).

6.4 Redes de flujo

6.4.1 Definición

El flujo del agua a través de un suelo saturado se puede representar esquemáticamente por líneas de flujo, que son los caminos que toman las partículas de agua en movimiento. El agua puede seguir el camino más corto entre un punto y otro, pero al mismo tiempo, los cambios de dirección los hace solamente por curvas suaves. Las líneas de flujo son, por lo tanto, líneas curvas que tienen algún paralelismo, como un manojo de bandas de goma ligeramente estiradas que se extendieran del punto de mayor carga al de menor carga. En muchos casos estas curvas son segmentos de elipses o de parábolas (Sowers & Sowers, 1990).

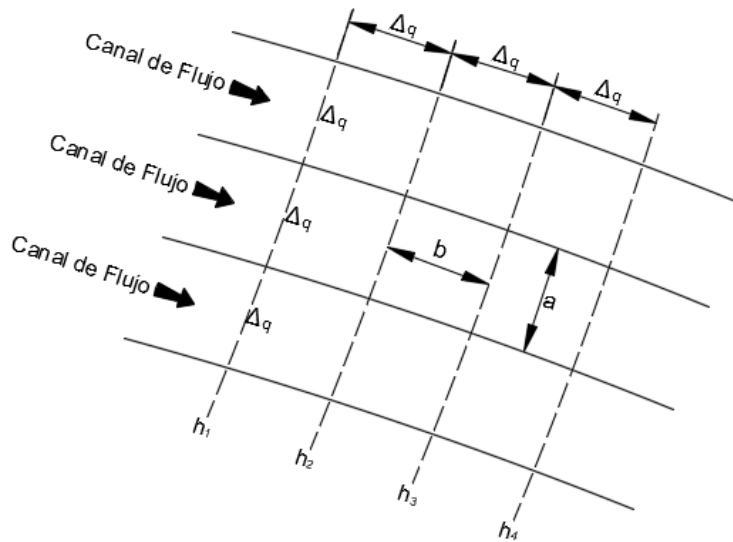


Figura 6.3. Representación gráfica de la red de flujo, tomada de (Sowers & Sowers, 1990).

Las diferentes cantidades de energía o carga se pueden representar por las denominadas líneas equipotenciales, que son líneas en las cuales todos los puntos tienen igual carga hidráulica. Las líneas equipotenciales son como curvas de nivel de igual energía; las líneas de flujo las cortan en ángulo recto, ya que el agua se mueve de los niveles de mayor energía a los de menor energía, siguiendo los caminos de gradientes de máxima energía (Sowers & Sowers, 1990).

El esquema de las líneas de flujo y las líneas equipotenciales se denomina red de flujo, y es un instrumento poderoso para la solución de los problemas de filtraciones de agua, véase la **Figura 6.3**.

6.4.2 Deducción matemática de la red de flujo.

La deducción de la expresión matemática de la red de flujo está basada en que el suelo está saturado, que el volumen de agua en los poros permanece constante durante el flujo y que el coeficiente de permeabilidad es el mismo en todos los puntos y en cualquier dirección en cualquier punto, como se menciona en los parámetros de la Ley de Darcy (Sowers & Sowers, 1990).

La ecuación básica del flujo, la ley de Darcy, descompone en las componentes x y y:

$$q_x = ki_x A_x \quad (18)$$

$$q_y = ki_y A_y \quad (19)$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{dh}{dL} \quad (20)$$

La velocidad de filtración v es la cantidad de flujo o gasto dividida con el área de flujo y las ecuaciones se pueden escribir así:

$$v = \frac{q}{A} \quad (21)$$

$$v_x = k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (22)$$

$$v_y = k \frac{\partial h}{\partial y} \quad (23)$$

El flujo a través de un elemento pequeño de suelo que tenga dimensiones dx , dy y 1 , se puede expresar como:

Entrada:

$$v_x dy + v_y dx \quad (24)$$

Salida:

$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dx \quad (25)$$

Si el volumen de agua en los poros permanece constante, la cantidad de flujo que entra es igual a la que sale, de esta manera, si se igualan las dos expresiones anteriores y se simplifican, se tiene que:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (26)$$

Esta es la ecuación de física matemática de Laplace que indica la pérdida de energía en un medio resistivo. Esta ecuación representa dos grupos de líneas cada uno de los cuales contiene un número infinito de curvas paralelas, las cuales se intersecan en ángulo recto. Las líneas equipotenciales forman un grupo y las líneas de flujo otro, y el conjunto es lo que forma la red de flujo (Sowers & Sowers, 1990).

6.4.3 Construcción de la red de flujo.

La red de flujo en dos dimensiones es una representación muy útil del modelo de filtraciones a través de presas, muros de sostenimiento y del comportamiento general de formaciones de roca. Desafortunadamente la ecuación de Laplace es matemáticamente integrable sólo en condiciones muy simples, por lo que en la práctica es necesario emplear otros métodos para obtener la red de flujo (Vélez Otálvaro, 2004).

El procedimiento gráfico de Forcheimer es simple y aplicable a cualquier problema de flujo uniforme en dos dimensiones (Sowers & Sowers, 1990). El espacio entre cualquier par de líneas de flujo se le llama canal de flujo. Si un cierto número de canales de flujo (N_f), se selecciona de manera que el gasto a través de uno (Δq), sea el mismo (Bear, 1979), se tiene que:

$$\Delta q = \frac{q}{N_f} \quad (27)$$

La pérdida de carga entre cualquier par de líneas equipotenciales es la caída equipotencial ($\Delta h'$). Si se selecciona un cierto número de caídas equipotenciales (N_c), de manera que todas sean iguales, se tiene que:

$$\Delta h' = \frac{\Delta h}{N_c} \quad (28)$$

El ancho de cualquiera de los elementos de esa red de flujo es a y la distancia entre las líneas equipotenciales es b , como se indica en la **Figura 6.3**. El gradiente y el gasto están dados por:

$$i = \frac{\Delta h'}{b} = \frac{\Delta h/N_c}{b} \quad (29)$$

$$\Delta q = k \left(\frac{\Delta h/N_c}{b} \right) a \quad (30)$$

El gasto total de la red, cuya tercera dimensión es igual a 1, se expresa, por lo tanto:

$$q = \Delta q N_f = k \Delta h \left(\frac{b}{a} \right) \frac{N_f}{N_c} \quad (31)$$

La razón $\left(\frac{a}{b}\right)$, está fijada por la razón $\left(\frac{N_f}{N_c}\right)$, y es la misma a través de toda la red. Si se seleccionan N_f y N_c de manera que $a = b$, se forma lo que se llama red cuadrada, es decir porque todas las intersecciones entre los lados son en ángulo recto, y el largo y el ancho promedios son iguales. Debe entenderse, que el término cuadrado se usa en un sentido meramente descriptivo, ya que todos los lados de la red no son necesariamente iguales y raramente son líneas rectas (Bear, 1979).

El trazado de una red de flujo incluye los siguientes pasos, (Harr, 1962):

- I. Dibujar los límites del dominio.
- II. Fijar tentativamente 3 o 4 líneas de flujo. La distancia a través de líneas de flujo adyacentes se incrementa en la dirección de la línea de mayor grado de curvatura (línea menos curva).
- III. Trazar tentativamente equipotenciales, formando ángulos rectos.
- IV. Ajustar.
- V. Comprobar la bondad del ajuste al trazar las líneas diagonales de los cuadrados se obtienen también curvas suaves, formando una nueva red.

6.4.4 Tipos de redes de flujo

Las redes de flujo pueden ser de varios tipos, dependiendo de la configuración y el número de zonas de suelo o roca a través de las cuales el drenaje ocurre (Bear, 1979). Una primera división puede ser la siguiente:

- I. El flujo es confinado dentro de los límites de saturación conocidos y el nivel freático es conocido también.
- II. El flujo no es confinado, el nivel freático no es conocido.

Una segunda división puede ser hecha si hay permeabilidad o conductividad hidráulica, o si hay dos o más permeabilidades. Esta clasificación da cuatro posibles condiciones de flujo (Bear, 1979).

- I. Flujo confinado en secciones con una permeabilidad K . Como el que se presenta bajo una tablaestaca y una presa de concreto.
- II. Flujo confinado en secciones con dos o más permeabilidades K_1 y K_2 . Como el que se puede presentar en una presa de tierra.
- III. Flujo no confinado con una permeabilidad K .

IV. Flujo no confinado con dos o más permeabilidades K_1 y K_2 .

En las últimas dos divisiones, se dice que el medio es anisotrópico, es decir, se supone que se tienen dos o más estratos de espesores iguales, pero con diferentes permeabilidades, siendo $K_1 > K_2$, el ancho de los canales en el primer estrato deberá reducirse, proporcionalmente al valor de la permeabilidad, para conservar constantes los caudales. El flujo se comporta de forma similar a los rayos de luz cuando pasan de un medio a otro, refractándose. Sin embargo, la ley que gobierna esta refracción, sigue una relación de tangentes y no de senos (Sowers & Sowers, 1990). Ver la **Figura 6.4**.

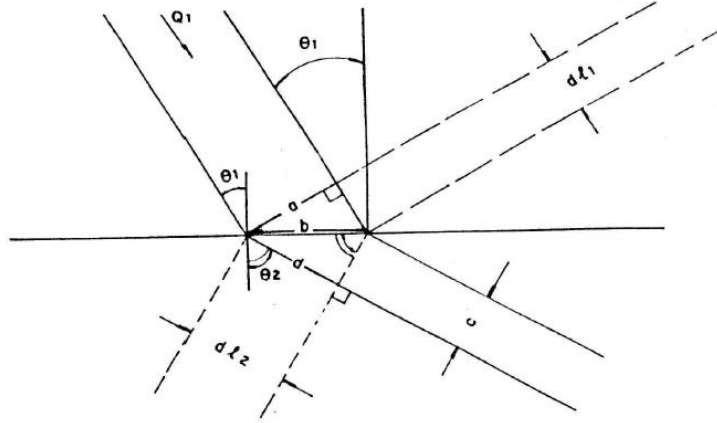


Figura 6.4. Flujo en un medio anisotrópico, tomada de (Sowers & Sowers, 1990).

$$K_1 a \frac{dh_1}{dl_1} = K_2 c \frac{dh_2}{dl_2} \quad (32)$$

En ambos medios las líneas equipotenciales sucesivas están separadas una misma cantidad, lo que implica que la caída equipotencial general sea igual a las caídas equipotenciales en los puntos 1 y 2. Dando origen a la ecuación de ley de las tangentes, que gobierna la refracción del agua subterránea en la frontera de un medio heterogéneo (Sowers & Sowers, 1990), la cual se puede ver a continuación:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} \quad (33)$$

Lo anterior quiere decir que en el estrato más permeable se tendrán rectángulos (menor sección para el mismo caudal) alargados en la dirección del flujo, y en el estrato menos permeable se tendrán cuadrados. Podría usarse el siguiente criterio práctico:

$$\frac{d}{c} = \frac{K_2}{K_1} \quad (34)$$

Donde $K_2 > K_1$. Si en la zona con permeabilidad K_1 las figuras son cuadrados, en la zona con permeabilidad K_2 , deben ser rectángulos elongados con una relación longitud/ancho (c/d).

6.4.5 Cálculo del caudal

Al trazar cualquier red de flujo se dibujan las líneas equipotenciales de tal manera que Δh sea la misma y que el Δq entre dos líneas de flujo sea el mismo. Es por ello que se tiene que:

$$\Delta q = k \left(\frac{\Delta h}{b} \right) a \quad (35)$$

Ahora bien, si N_f es el número de canales de la red de flujo y N_c es igual al número de caídas de potencial, entonces:

$$\Delta q = \frac{q}{N_f} \quad (36)$$

$$\Delta h = \frac{h}{N_c} \quad (37)$$

Donde q es el caudal unitario total y h es igual a la carga total. Por el gasto de una red de flujo donde la relación $\left(\frac{a}{b} \right)$ no es constante, es decir, los rectángulos curvilíneos no forman un cuadrado en la red; y el factor de forma $\left(\frac{N_f}{N_c} \right)$ es diferente de 1, es decir, los canales de la red no es igual número de caídas de potencial (Vélez Otálvaro, 2004), se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Q = KhL \frac{N_f}{N_c} \frac{a}{b} \quad (38)$$

Donde Q es el gasto total de la red de flujo en $\text{m}^3/\text{día}$, K es la conductividad hidráulica del medio en $\text{m}/\text{día}$, h es la carga hidráulica en metros columna de agua (mca), N_f es el número de canales de flujo que es adimensional, N_c es el número de caídas de potencial que es adimensional, a es el ancho del rectángulo curvilíneo en metros y b es la base del rectángulo curvilíneo en metros (Bear, 1979).

6.5 Validación de resultados

6.5.1 Definición

Un paso primordial en una investigación es la validación y verificación de los resultados obtenidos, las cuales son una serie de pasos o actividades indispensables en la investigación, que aseguran que el resultado obtenido sea de claro, preciso, de calidad y con una repercusión positiva (Gorgij, Kisi, Moayeri, & Moghaddam, 2018).

Para poder realizar una validación se requiere conocer el error intrínseco en el modelo, mapa o parámetro a medir, ya sea en un modelo digital de elevaciones, una medición de distancias, una serie de datos interpolados, o un modelo matemático en general. Para ello, se sabe que un error es aquella diferencia en entre un valor verdadero y un valor medido, o sea, la diferencia entre el valor de referencia y el valor medido, puesto que el valor real nunca se conoce, es por ello que el error siempre debe estimarse, y puede hacerse mediante la siguiente expresión, (Keyence, 2018).

$$Error = (Valor_{medido} - Valor_{verdadero}) \quad (39)$$

La realidad es que en cualquier actividad científica o técnica es inevitable la existencia de errores, ya que es muy complicado obtener el valor verdadero sin importar cuán precisa sea la medición, es por ello que es inevitable que haya cierta incertidumbre en el valor medido.

Es poco racional, pensar que no hay errores en una medición, cualquiera sea el tipo; lo más razonable es tratar de estimar la magnitud de los errores cometidos, conocerlos, y escudriñarlos para no necesitar mayores precisiones en los resultados, que realmente no puedan ofrecer.

6.5.2 Precisión y exactitud

Antes de realizar cualquier tipo de cálculo de los errores en un modelo, mapa o sistema, es necesario conocer la diferencia entre los conceptos de precisión y exactitud. La precisión es el detalle con el que un instrumento o procedimiento puede medir una variable mientras que la exactitud es lo que se acerca esta medición al valor real (Alonso Sarría, 2006). En los sistemas de información geográfica, el concepto de precisión se relaciona con el de resolución en formato ráster.

Anteriormente los errores necesitaban de la utilización computadoras con precisión finita para manejar un espacio que se considera isotrópico y homogéneo, en otras palabras, un medio continuo. Los errores en las operaciones con decimales, afectaban los resultados, es por ello que se recomendaba utilizar siempre números enteros. Por ejemplo, en las coordenadas X e Y las cuales se expresaban en metros y nunca en kilómetros; los valores de altitud en metros; la precipitación en milímetros enteros; entre otros ejemplos, en los que se decía que no debían incluir decimales. Pero conforme ha avanzado la tecnología, esta es una recomendación casi caduca, ya que, en la actualidad, las computadoras son capaces de realizar la mayor cantidad de operaciones con cualquiera que sea el número de decimales en las variables de estudio (Alonso Sarría, 2006).

Los métodos de generalización pueden crear datos que comprometen significativamente la fiabilidad de los modelos hidrológicos (Choudhry & Morad, 1998) de igual manera en mapas y otros sistemas.

Sacrificar el tiempo de procesamiento de datos y el tamaño de los mismos para conseguir una exactitud aceptable y verificable es lo idóneo (Alonso Sarría, 2006).

6.5.3 Tipos de error

En función del factor que genera el error, estos se pueden clasificar en tres tipos: sistémicos, aleatorios y por negligencia, tales factores deben ser considerados cuidadosamente para prevenir la presencia de errores, (Keyence, 2018).

- I. Errores sistémicos. Son aquellos en el que el valor medido está sesgado debido a una causa específica. En estos principalmente se engloban los errores instrumentales, los cuales pueden ser propios del instrumento, o de una manera específica de medición.
- II. Errores aleatorios. Este tipo de error es causado por circunstancias azarosas durante el proceso de medición, las cuales pueden ser causadas por un agente perturbador, como el clima, la presencia o falta de energía eléctrica, e incluso la falta de conexión a internet.
- III. Errores por negligencia. Estos errores son causados por la inexperiencia u operaciones incorrectas realizadas por el personal que realiza la medición.

La presencia de uno o varios tipos de error dentro de una medición de variables puede ocasionar que el modelo matemático, procedimiento o resultados generales se vean afectados en calidad, eficiencia y confiabilidad.

6.5.4 Parámetros de validación.

Para verificar la calidad de un mapa interpolado debe utilizarse un conjunto de validación formado por una serie de puntos de muestreo, de los que por tanto se conoce el valor real, en los que se va a hacer una estimación de dicho valor real, sin utilizar por supuesto el valor medido de ellos. La diferencia entre el valor medido y el estimado es el error de estimación en ese punto, como se mencionó anteriormente. De esta manera a cada punto de validación se asigna un error. El conjunto de los errores debe tener las siguientes características:

- I. Media de errores y media de errores al cuadrado próxima a cero.
- II. Los valores de error deben ser independientes de su localización en el espacio y no estar auto – correlacionados.
- III. La función de distribución de los errores debe aproximarse a la distribución normal.

La dificultad resulta cuando en muchos de los casos se dispone de pocos puntos de muestreo, por lo que no es conveniente reservar algunos de ellos como puntos de validación. Ante esta situación, la solución es el procedimiento de validación cruzada; el cual consiste en la estimación del valor de la variable Z, con el procedimiento de interpolación que quiere validarse. En cada uno de los puntos del muestreo, aunque sin incluir dicho punto de muestreo. De esta manera se conoce para cada punto el valor real y estimado de forma que puede llevarse a cabo el análisis estadístico de errores (Alonso Sarría, 2006).

6.5.5 Criterios de evaluación estadística.

Como herramienta de evaluación del rendimiento de los modelos, se pueden aplicar criterios de evaluación estadística habituales, tal como, R cuadrada (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE), error medio absoluto (MAE) (Gorgij, Kisi, Moayeri, & Moghaddam, 2018). En esta investigación se utilizarán los anteriormente mencionados.

6.5.5.1 R – cuadrada

La R – cuadrada (R^2) es un valor que indica la bondad o la aptitud del modelo, a menudo se utiliza con fines descriptivos y muestra que también las variables independientes seleccionadas explican la variabilidad en sus variables dependientes. R cuadrada se define mediante la siguiente fórmula:

$$R^2 = \frac{\sum(X_2 - X_1)^2}{\sum(X_2 - X_1)^2} \quad (40)$$

Donde X_1 es el valor real u observado y X_2 es el valor calculado o estimado.

R – cuadrada tiene la propiedad útil de que su escala es intuitiva, es decir, tiene un valor de 0 a 1 (cero a uno), con 0 (cero) indicando que el modelo no mejora la predicción sobre el modelo medio y 1 (uno) indica una predicción perfecta. La mejora en el modelo de regresión da como resultado aumentos proporcionales en R – cuadrada (Martínez Heras, 2020).

Una de las dificultades de $R - cuadrada$ es que solo se puede aumentar a medida que se agregan predictores al modelo de regresión. Este aumento es artificial cuando los predictores no mejoran el ajuste del modelo. Incorporar grados de libertad al modelo hará que aumente la $R - cuadrada$, y siempre se deberá usar en modelos con más de una variable de predicción.

6.5.5.2 Raíz del error cuadrático medio

Ahora bien, La raíz del error cuadrático medio o RMSE, por sus siglas en inglés (Root Mean Squared Error), es una medida de desempeño cuantitativa utilizada para evaluar métodos de pronóstico, métodos de interpolación, métodos de dispersión de datos y modelos de regresión en general (Gorgij, Kisi, Moayeri, & Moghaddam, 2018). La raíz del error cuadrático medio es la métrica más utilizada para los modelos de regresión e interpolación, y es una de las estadísticas más utilizadas en los sistemas de información geográfica (Alonso Sarriá, 2006); representa la raíz cuadrada de la distancia cuadrada promedio entre el valor real y el valor estimado, y es representado por la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_2 - X_1)^2}{n}} \quad (41)$$

Donde X_1 es el valor real u observado, X_2 es el valor calculado o estimado y n es el número de muestras o puntos de control estadístico.

La $RMSE$ indica el ajuste absoluto del modelo a los datos, cuan cerca están los puntos de datos observados de los valores calculados o estimados del modelo. La raíz del error cuadrático medio es una medida absoluta de ajuste (Martínez Heras, 2020). Los valores más bajos de $RMSE$ indican un mejor ajuste. $RMSE$ es una buena medida de la precisión con el que el modelo predice la respuesta, y es el criterio más importante para ajustar si el propósito principal del modelo es la predicción.

6.5.5.3 Error medio absoluto

Por otro lado, El error medio absoluto, es el promedio de la diferencia absoluta entre el valor observado y el valor calculado o estimado. El error absoluto medio o MAE es un puntaje lineal, lo que manifiesta que todas las diferencias individuales se ponderan por igual en el promedio. Entonces, si se tiene una diferencia entre 10 y 0, esta será el doble de la diferencia entre 5 y 0 (Martínez Heras, 2020).

Como se mencionó anteriormente su relación con el $RMSE$ es indiscutible, ya que se requiere calcular el MAE primero para poder obtener el $RMSE$ (Gorgij, Kisi, Moayeri, & Moghaddam, 2018). El error medio absoluto se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_2 - X_1|}{n} \quad (42)$$

Donde X_1 es el valor real u observado, X_2 es el valor calculado o estimado y n es el número de muestras o puntos de control estadístico.

6.5.6 Limitaciones y singularidades de RMSE y MAE

Cada una de las medidas anteriormente descritas son meramente promedios o raíces cuadradas de ese promedio de las realizaciones de los errores de un modelo. el error es una variable aleatoria numérica y no se puede captar todo el comportamiento de una variable aleatoria con una sola agregación de observaciones, este error es una variable muy sesgada, lo que significa que en la mayoría de los casos el error puede ser muy pequeño (Martínez Heras, 2020).

En comparación con el error medio absoluto (MAE), la raíz del error cuadrático medio amplifica y penalizar con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud.

Tabla 6.4. Valores permisibles de RMSE para una capa ráster en SIG, tomada de (López-Lambraño, Apuntes Laboratorio de SIG, 2020).

Escala	Relación	RMSE aceptable
1:250,000	250,000/1,750	143
1:50,000	50,000/1,750	26

Ahora bien, a fin de englobar lo mencionado en la última sección de validación y criterios de evaluación estadística, es necesario conocer la raíz del error cuadrático medio para realizar la validación de modelos digitales en los diferentes sistemas de información geográfica, como lo dice la **Tabla 6.4**, no se deberán aceptar raíces del error cuadrático medio mayores a un metro (1 m) por cada 1,750 unidades equivalentes para escalas, y en el caso de esta investigación, no se deberán aceptar valores de *RMSE* mayores a 26 unidades, ya que se trabaja bajo una escala menor a 1:50,000; que engloba fácilmente una mediana cuenca como es el caso de la Bahía Salsipuedes.

6.6 Riesgo

El riesgo comúnmente es confundido como peligro; si bien, coloquialmente hablando se puede tomar que el riesgo es sinónimo de peligro o exposición, y se define como la contingencia o proximidad de un daño (RAE, Real Academia Española, 2021), eso no engloba técnicamente el significado real de riesgo.

El riesgo, técnicamente hablando, se puede definir como la probabilidad de daños o pérdida sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador (SEDATU, 2018); es decir, el riesgo es la suma algebraica de un factor amenaza o agente perturbador, un factor de exposición y el factor vulnerabilidad. El riesgo técnico se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$R = A(P) + E + V \quad (43)$$

Donde *R* es el riesgo, *A* es la amenaza, *P* es el peligro y *V* es la vulnerabilidad. Cada uno de los factores en esta estimación de riesgo son adimensionales, ya que la suma algebraica es con base a unidades binarias 0 y 1, donde 0 significa que no aplica el factor y 1 si aplica. Si la suma da 3 (tres) significa que el riesgo es inminente o altamente perjudicial, si la sumatoria da 0 (cero), significa que no hay riesgo en la zona determinada.

Definiendo cada uno de los factores o parámetros que se toman en cuenta para la estimación del riesgo, se puede decir que la **amenaza** es el evento físico potencialmente perjudicial, natural o derivado de la actividad humana, que puede causar pérdida de vidas o lesiones, daños materiales, degradación ambiental o grave perturbación de la vida social y/o económica (SEDATU, 2018). Las amenazas incluyen condiciones latentes susceptibles de materializarse en el futuro, y pueden tener diferentes orígenes como:

- I. **Naturales:** como lo son del tipo geológico, hidrológico, geohidrológico, meteorológico o sísmico.
- II. **Antropogénicos:** como lo son del tipo químico, físicos (estructuras, obras civiles, entre otros), físico – químico, tecnológico, industrial, sanitario, ecológico – ambiental, socio – organizativo o económico.

Ahora bien, dentro de la ecuación (43), el factor amenaza se puede considerar como equivalente de *peligro*, este se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo y en un sitio determinado (SEDATU, 2018).

En cuanto al factor **exposición**, se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentren en el sitio y que son factibles a ser dañados, por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero (SEDATU, 2018).

Por último, el factor **vulnerabilidad**, se le considera vulnerabilidad a la susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un fenómeno perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales (SEDATU, 2018).

La Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, también conocida como la **SEDATU** por sus siglas, dictó en el Diario Oficial de la Federación de la Secretaría de Gobernación en el año 2016 (DOF, 2016), que la metodología para realizar un análisis de riesgo por deslizamiento de tierras o inestabilidad de lateras o taludes con el fin de localizar una zona o área de riesgo será la siguiente:

- I. Realizar un inventario de casos documentados de deslizamientos representativos de la zona.
- II. Consideración de amenazas o factores de peligro.
- III. Realización de inventario de elementos en exposición.
- IV. Llenado de matriz de vulnerabilidad.
- V. Análisis de riesgo y determinación de área de afectación.

6.6.1 Inventario

En la **Tabla 1.2**, de la sección de *Antecedentes* se puede observar una secuencia cronológica de los eventos de deslizamiento de tierras ocurridos en la Carretera Escénica Tijuana – Ensenada, desde su concepción en los años sesenta, hasta el año 2020; los últimos dos años la carretera ha tenido constante supervisión y no ha presentado deslizamientos, simplemente ligeros agrietamientos en taludes y la carretera misma.

En la **Figura 1.3**, también de la sección de *Antecedentes*, se puede observar que los sitios donde se encuentra la mayor concentración de deslizamientos con base a la frecuencia de ocurrencia están localizados entre los kilómetros 91+000 y 93+000. Como se observa en la **Tabla 1.2**, la mayoría de

los deslizamientos del kilómetro 91+000 ocurrieron en la década de los sesenta, mientras que en los kilómetros 92+000 y 93+000 su ocurrencia ha sido periódica a lo largo de las décadas.

Actualmente el sitio de consideración es el km 92+000, ya que los sitios del km 91+000 y km 93+000 ya fueron estabilizados, el primero en la década de los setenta con la construcción de una galería drenante tipo *J* o *L*, y el segundo con la construcción de una galería drenante en tipo herradura.

6.6.2 Factor amenaza

Como se pudo mencionar en las secciones anteriores de esta investigación, el evento de ocurrencia o fenómeno natural a evitar son los deslizamientos de tierras, este queda definido entonces como el movimiento de capas o masas de terreno por alguna acción o factor externo (H. Moreno, 2006). La recurrencia o periodos de retorno de este evento nos da un peligro latente, el cual está directamente relacionado con varios factores, en el caso de la Bahía Salsipuedes, esos factores son:

- I. **Geología del sitio**, presencia de aluviales, areniscas, lutitas fracturadas y conglomerados empacados en arena, además de las fallas geológicas y grietas localizadas en la Bahía Salsipuedes.
- II. **Hidrología superficial** temporal, es decir, la ocasionada por la época de lluvias en este caso invernales; el mal encausamiento de escurrimientos, ocasionando encharcamientos en zonas que permiten la filtración a estratos inferiores; presencia de azolves en obras hidráulicas superficiales, tales como: cunetas, contracunetas, lavaderos, alcantarillas, cajas disipadoras, entre otros.
- III. **Geohidrología**, la interacción agua – suelo, mencionada en secciones anteriores de esta investigación, la porosidad, conductividad hidráulica, transmisibilidad y otros factores propios de las rocas que afectan directamente al movimiento de tierras.
- IV. **Climatología**, ya que la presencia de agua es ocasionada por las lluvias invernales, y esta agua meteórica es el principal agente perturbador en las cuestiones hidrológicas y geohidrológicas.
- V. **Sismicidad**, ya que al encontrarse en una zona de alta manifestación sísmica (R. Ortega, 2015), los movimientos ocasionados por la fricción entre placas, generan una reacción superficial en la Bahía Salsipuedes, propiciando la generación de grietas que permiten la percolación de agua meteórica a estratos inferiores provocando inestabilidad hidráulica; además un movimiento brusco generado por un sismo, libera energía que se dirige directamente a las zonas inestables, haciendo que la fricción por el ángulo de reposo de los materiales en las laderas no sea suficiente y estos colapsen provocando también deslizamiento de tierras.
- VI. **Antropogénicos**, esto significa que la acción humana como la construcción de obras civiles, tales como, vías terrestres, obras de estabilización, obras hidráulicas; asentamientos poblacionales; tránsito en la autopista, entre otros, generan variaciones en las cargas vivas y muertas soportadas por el suelo o masa de tierra en general, que ocasionan a su vez desplazamientos de la misma (H. Moreno, 2006).

Como se menciona anteriormente, la amenaza principal es el fenómeno natural de desplazamiento de tierras, y el factor amenaza que coincide en todos los factores posibles para que suceda este fenómeno es el agua, y su relación principal con el suelo – roca.

Como se mencionó en la sección de *Antecedentes*, la relación entre el agua superficial, sub – superficial y subterránea mantienen un balance dinámico entre los regímenes de agua sobre y debajo de la tierra (Q. Liu, 2014), por lo tanto, el agua es uno de los factores más importantes en la resistencia, compresibilidad y cambios en el volumen del suelo (Toledo, Morán, & Campos, 2012).

En este caso de investigación, el agua subterránea y sub – superficial está monitoreada por instrumentación piezométrica colocada en la Bahía Salsipuedes, a lo largo de los diferentes sitios considerados como inestables. Por lo tanto, el factor amenaza en esta investigación es el agua subterránea y sub – superficial, representada por los niveles piezométricos de la instrumentación colocada para monitoreo en la Bahía Salsipuedes.

6.6.3 Factor exposición

Si se habla de los elementos que se encuentran en exposición se puede decir que son aquellos que pueden ser afectados de manera inmediata en caso de que ocurra un evento de deslizamiento de tierras, ocasionado por la amenaza del agua subterránea y sub – superficial (H. Moreno, 2006) y (SEDATU, 2018).

El conjunto de elementos expuestos o tipos de elementos expuestos se agrupan en sistemas, y a su vez, el conjunto de sistemas se considera como concepto general, por ejemplo, el sistema o concepto general “*Corte/Talud anclaje*” se compone de elementos en exposición como: taludes, mallas triple torsión, malla fibra de coco, trabes de concreto armado, anclas de sujeción y drenes de penetración. En el caso del sistema “*Vías terrestres*”, se compone de carpeta asfáltica, base hidráulica, subrasante, caminos de terracería o rurales, puentes y señalamiento vertical y horizontal.

Los elementos en exposición de la Bahía Salsipuedes por lo tanto están divididos en siete sistemas los cuales son:

- I. Corte o talud/anclaje
- II. Vías terrestres
- III. Obras de estabilidad
- IV. Obras de drenaje
- V. Instrumentación
- VI. Construcciones varias
- VII. Seres vivos.

Cada uno de ellos, está conformado de varios elementos como pueden ser: taludes, mallas triple torsión, malla fibra de coco, trabes de concreto armado, anclas de sujeción, drenes de penetración, carpeta asfáltica, base hidráulica, subrasante, camino rural o de terracería, puentes, señalamiento o dispositivos de seguridad, bermas, pedraplenes, sobreanchos, galerías drenantes o filtrantes, zanjas drenantes, pozos, trincheras, cunetas, contracunetas, lavaderos, bordillos, alcantarillas, cajas reguladoras, inclinómetros, piezómetros, tubos de observación, casas móviles, oficinas, almacenes de construcción, caseta de cobro, el restaurante cuatro cuatros, construcciones varias, flora endémica y fauna endémica.

En cuanto a la flora y fauna endémica, se puede apreciar la **Tabla 6.5**, en la que se enlistan las principales especies endémicas de la Bahía Salsipuedes y el porcentaje de rescate que se requiere

para mantener en un equilibrio sistémico en el medio ambiente (TGC & Juárez, Manifiesto de impacto ambiental Bahía Salsipuedes, 2016).

Se tiene un total de 7 (siete) sistemas de exposición, con 35 tipos de elementos expuestos aproximadamente que a su vez se pueden compactar en 17 elementos principales (ya que en taludes se unen los tipos de malla, o bien, en caminos, se unen las capas de subrasante, carpeta, etc), que se mencionaron anteriormente, de los cuales se verán sus detalles económicos en la sección de *Metodología*. Cabe mencionar que por cada tipo de elemento hay más de un elemento, conformando una matriz de 282 elementos en exposición aproximadamente.

Tabla 6.5. Especies endémicas a rescatar en la Bahía Salsipuedes, tomada de (TGC & Juárez, Manifiesto de impacto ambiental Bahía Salsipuedes, 2016).

Especie	% a rescatar
Agave shawii spp. Shawii	100
Mammillaria dioica	100
Encelia californica	30
Opuntia cholla	60
Viguiera laciniata	20
Simmondsia chinensis (juvenil)	60
Mentha spicata	60
Proboscidea sp.	10
Eriogonum fasciculatum	20
Celtis iguanae	20
Opuntia sp.	40
Bergerocactus emoryi	100
Aesculus parryi	60
Arctostaphylus torrentosa	50
Platanus racemosa	20
Malosma laurina	30
Quercus sp.	20
Quercus agrifolia	20
Salix lasiolepis	100
Heteromeles arbutifolia	20
Rhus integrifolia	20
Simmondsia chinensis (adulto)	20
Geococcyx californianus	100
Vulpes macrotis	100
Crotalus enyo	100

Para cada elemento en exposición hay un importe, ya que la mayoría de las veces el factor exposición se traduce a dinero. Dichos importes para los 282 elementos en exposición fueron calculados con base en una cantidad unitaria y un costo unitario, proporcionados por la empresa

TGC Geotecnia S.A. de C.V. Los importes resultantes generarán una pérdida, la cual es directamente proporcional a la cantidad de usuarios que utilicen o transiten por la Bahía Salsipuedes.

Entonces las pérdidas quedan definidas como el valor monetario resultante del cociente entre el importe del elemento en exposición y la cantidad de usuarios del mismo, como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{I}{TDPA} \quad (44)$$

Donde el I es el importe sin IVA, es decir, aquel que se obtiene de la multiplicación de la cantidad unitaria para cada elemento en exposición con el precio unitario del mismo, normalmente su unidad son Pesos Mexicanos (M.N.); $TDPA$ es el número de usuarios afectados y normalmente se utiliza el tránsito diario promedio anual, que según el manual de carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para el año 2019, en el tramo “Plaza de cobro Ensenada” en el kilómetro 98+600 fue de 6,817 usuarios (SCT, Datos viales, 2019); de los cuales 86.30% corresponden a vehículos tipo A, 1.80% a vehículos tipo B, 11.90% a vehículos tipo C, 0.10% a vehículos tipo K’ y 0.50% a vehículos tipo D.

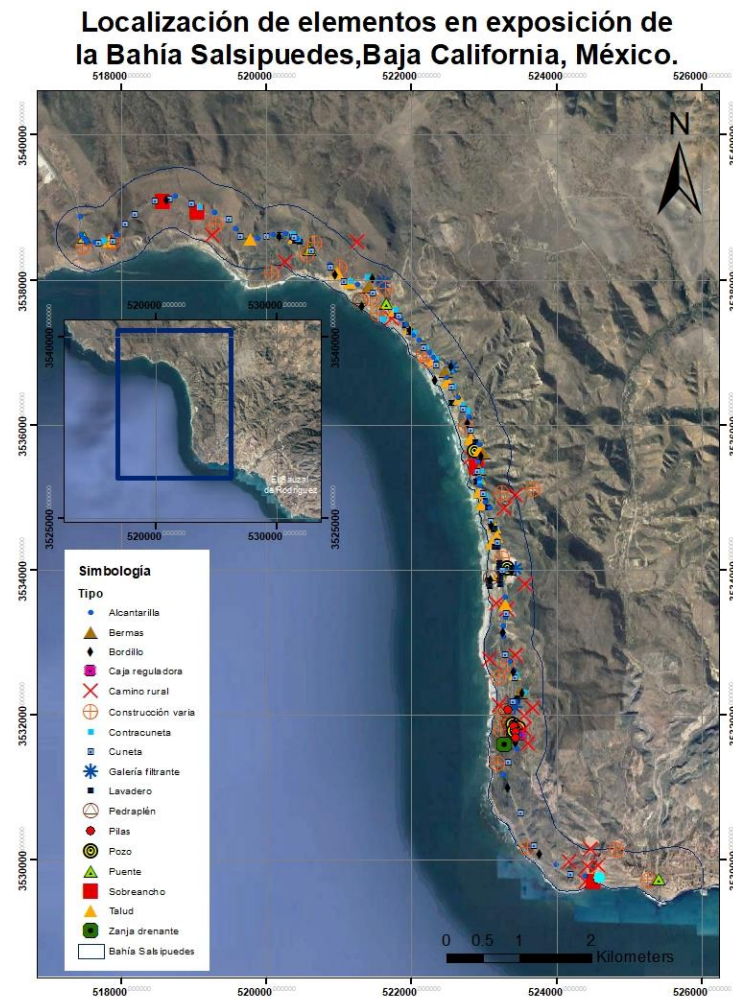


Figura 6.5. Elementos en exposición de la Bahía Salsipuedes.

En la sección de *Metodología* se presentan más parámetros representativos de los elementos en exposición, tales como: unidades, cantidades, importes y pérdidas correspondientes para cada uno de ellos.

6.6.4 Factor vulnerabilidad

Como se mencionó con anterioridad, los elementos expuestos están sujetos a una vulnerabilidad constante, la cual es la susceptibilidad o propensión de un agente expuesto a sufrir daños ante la presencia de un fenómeno perturbador (SEDATU, 2018). Ante esa premisa, los elementos en exposición sujetos a esa susceptibilidad son los que se definieron en la sección anterior.

Para realizar una evaluación de la vulnerabilidad de un elemento se requiere hacer una matriz de vulnerabilidad, la cual es un conjunto de vectores para un evento de intensidad creciente, cuyas probabilidades de daño están relacionadas a una escala de percepción visual dadas las amenazas o peligros actuantes en cada elemento expuesto (CEPIS, 2011).

En este caso de investigación, la matriz de vulnerabilidad está en relación a los posibles daños estructurales creados en los elementos en exposición del fenómeno de deslizamiento de tierras ocasionado por la presencia de agua subterránea y sub – superficial.

La escala utilizada por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Caminos y Puentes Federales y *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*, como sub – contratista, es numérica y tiene valores de 0 (cero) a 4 (cuatro). Donde el valor cero se dará al elemento que no aplique daños estructurales y siendo el máximo valor cuatro, cuando el daño estructural sea grave o inminente. En la **Tabla 6.6** se puede observar la escala señalada anteriormente.

Tabla 6.6. Escala de vulnerabilidad estructural, tomada de (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).

no aplica	Buen Estado / No se aprecia daño	Daño Ligero	Daño Medio	Daño Grave
0	1	2	3	4

Conociendo la escala, se procede a llenar la matriz de vulnerabilidad estructural con base a la información de los elementos en exposición, la cual puede consistir en tablas de relación de daños presentes en las estructuras previamente establecidas por una dependencia de gobierno u órgano regulador; de igual forma se puede hacer una inspección visual de los elementos en exposición en visitas de campo, en las que se levanten agrietamientos, desplomes, azolves, desconche, corrosión, entre otros factores de vulnerabilidad, con el fin de completar la matriz de vulnerabilidad estructural y tener una visualización global de la situación vulnerable en el sitio de estudio.

6.6.5 Análisis de riesgo

El análisis del riesgo, por lo tanto, sigue la ecuación (43) que indica la suma de los factores amenaza, exposición y vulnerabilidad para determinar zonas donde ocurra un evento que pueda generar una catástrofe o desastre natural. Esto queda determinado para una región o zona específica y basándose en el comportamiento histórico de esta región. Las metodologías para realizar un análisis de riesgo son variadas, siendo las principales por métodos estadísticos o deterministas. Pero en este

proyecto se sigue una metodología que mezcla ambos aspectos, dando como resultado un **análisis multicriterio**, el cual será descrito en secciones posteriores.

En la sección de *Metodología* se encuentra la matriz de vulnerabilidad formada para la Bahía Salsipuedes, y se realiza la suma de todos los factores de riesgo, conociendo de esta manera las zonas donde se presenta el riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes; además, en la sección de *Resultados* se presenta el mapa de riesgo geohidrológico generado, con análisis y discusiones al respecto.

6.7 Galerías drenantes

6.7.1 Obras hidráulicas

Una parte importante en el cálculo, manejo, explotación y encause de caudales superficiales, subterráneos y sub – superficiales, es la determinación de ubicación, diseño y construcción de obras hidráulicas que permitan un comportamiento hidráulico adecuado y eficiente de las zonas donde se establezcan (SAJA, 2019).

Las obras hidráulicas son aquellas obras de ingeniería civil que constituyen sistemas cuya finalidad es controlar el flujo de agua para su posterior aprovechamiento, ya sea para abastecimiento agrícola, industrial o poblacional. También se le considera obra hidráulica a aquella construcción que además de controlar el agua para su aprovechamiento, controla el agua para evitar amenazas que ocasionen desastres naturales como inundaciones, deslizamiento de tierras, socavaciones, deslaves, derrumbes, entre otros (SAJA, 2019).

Las obras hidráulicas se dividen en varios tipos de infraestructuras o construcciones, entre los que destacan canales, presas, estaciones de bombeo, redes de abastecimiento de agua potable, sistemas de drenaje (alcantarillas, cunetas, lavaderos), esclusas, recintos portuarios, dársenas, sistemas de riego, galerías drenantes, pozos, lumbreras, zanjas drenantes, entre otros.

En esta investigación, es de gran interés el estudio de un tipo de obra hidráulica relacionada específicamente con el agua subterránea y sub – superficial; y que su disposición en la Bahía Salsipuedes es primordial, tal es el caso de las **galerías drenantes**.

6.7.2 Origen de las galerías drenantes

Entre las obras hidráulicas existen sistemas de captación de recursos hídricos que por su antigüedad, concepción técnica y arquitectura son particularmente excepcionales, tal es el caso de las galerías drenantes (Ballesteros Navarro, Antequera F., González R., & Martos R., 2020).

Las galerías drenantes, también conocidas como galerías filtrantes, galerías de drenaje o qanats, según su acepción más internacional, son elementos de captación de agua consideradas unas de las técnicas de control y aprovechamiento de agua subterránea y sub – superficial más antiguas, ya que su utilización se remonta a la civilización mesopotámica (Ballesteros Navarro, Antequera F., González R., & Martos R., 2020).

Una galería drenante es una perforación horizontal excavada en el subsuelo que genera unidades identificadas de agua subterránea (Ballesteros Navarro, Antequera F., González R., & Martos R., 2020). Una definición más actualizada de galería drenante menciona que es un túnel excavado

mediante máquinas perforadoras mecánicas de frente pleno, en donde el cabezal giratorio de la máquina tritura la roca por acción mecánica. Las galerías filtrantes tienen secciones permeables donde se colocan drenes de penetración transversal para liberar presión de poro (drenaje de agua) del suelo o roca (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017).

Las galerías drenantes al ser túneles horizontales con drenes que permiten liberar presiones hidrostáticas, deben tener una ligera pendiente encausada hacia la salida de la misma, son creadas para captar y conducir flujos subterráneos y sub – superficiales, a partir de diferentes geoformas, como valles o cursos fluviales (López F., 2022).

El nombre más común que se les da en la bibliografía internacional a las galerías drenantes es el de *qanats*, aunque tienen otros nombres dependiendo el espacio geográfico; por ejemplo, en Argelia se les conoce como *foggara*, en Irán como *karez*, en Marruecos como *khettara* y *puquio* en Perú (Ballesteros Navarro, Antequera F., González R., & Martos R., 2020).

La técnica de construcción de galerías drenantes tuvo su origen en la zona caucásico – persa, entre los actuales países de Armenia, Irán y sudoeste asiático, aproximadamente hace más de 3,000 años. En la actualidad son numerosos los estudios de los *qanats* iraníes, lugar en el que, como se comentó, es probable donde surgió esta técnica de control y aprovechamiento de los recursos hídricos, donde existen unos 34,000 *qanats* según estimaciones (Barceló, 1983).

6.7.3 Elementos estructurales en galerías de drenaje

El sistema de captación de las galerías drenantes tiene una mayor complejidad que otra forma de obtención de agua a causa de sus particulares características constructivas y de las dificultades que plantea su diseño; desde la ubicación por cuestiones geológicas, hidrológicas, hidráulicas, e incluso topográficas. La construcción de una galería drenante supone conocimiento de técnicas que permitan obtener el agua subterránea mediante la fuerza de gravedad. En su diseño y ejecución, la determinación de la pendiente para conseguir el afloramiento del recurso hídrico a la superficie es el principal factor, por lo que los procedimientos y los instrumentos de nivelación, junto con la experiencia del ingeniero proyectista y constructor, son fundamentales para que la excavación tenga éxito (Lictevout, y otros, 2020).

Los elementos fundamentales de las galerías drenantes son:

- I. El túnel horizontal, mediante el que se accede al nivel freático y permite drenar el agua al exterior.
- II. Los drenes transversales o drenes de penetración, son conductos verticales espaciados en forma axial o abanico tomando como referencia la sección del túnel y espaciados a lo largo del túnel según sea el estrato filtrante. Son los encargados de captar el agua subterránea y sub – superficial de los estratos saturados, liberando la presión de poro.
- III. La bocatoma o bocamina, que es el lugar por donde el caudal aflora o es captado, que puede o no permitir el acceso al interior de la galería drenante.
- IV. Portal, que es la entrada o salida de la galería drenante, normalmente da paso a la bocatoma.

En la **Figura 6.6** y la **Figura 6.7** se pueden localizar las partes de una galería sencilla con geometría en “J” y de sección abovedada.

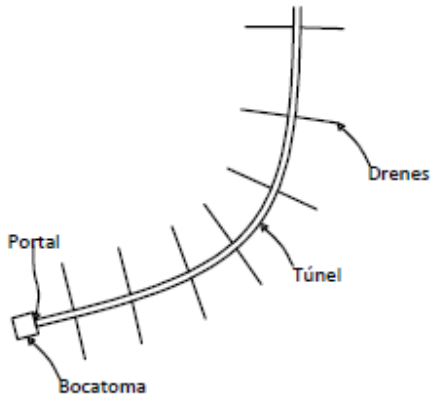


Figura 6.6. Esquema en planta de galerías en tipo "J".

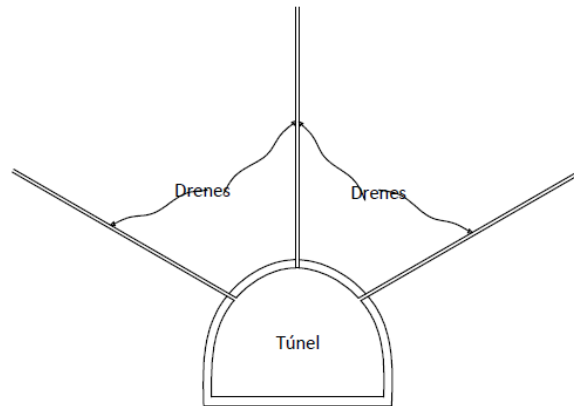


Figura 6.7. Esquema en perfil de elementos en galerías de sección abovedada.

El primer paso para la construcción de una galería drenante es la elección del sitio donde localizarlo, para ello se debe tener en cuenta aspectos como la geología, la hidrología, geohidrología y topografía.

En el aspecto topográfico, se indica que las galerías drenantes se deben construir en zonas de baja elevación sobre el nivel del mar, esto con el fin de asegurar la presencia de agua subterránea y evitar accidentes topográficos, es ideal que se localicen en zonas de poca altitud o valles, con elevaciones menores a los 100 msnm (Yuxiang, Yongjun, Wei, Min, & Yang, 2020).

En el sentido geológico, las galerías drenantes se deben construir en sitios donde prevalezcan rocas no consolidadas, como aluviales, lutitas o areniscas. Además, una galería no debe estar cerca de zonas de fallas normales o fracturas, se recomienda estar 200 metros de distancia mínima de esos accidentes geológicos (Fansa Saleh, Pérez C., Hermosilla P., & Iranzo G., 2021).

Por último, en el aspecto geohidrológico, las galerías drenantes se deben localizar en zonas donde haya un medio poroso, tales como rocas no consolidadas, con porosidades efectivas entre 0.15 y 0.10% y permeabilidades altas, es decir, entre 0.01 a 0.0008 m/día (Lictevout, y otros, 2020). Además, la zona debe tener registro de caudales subterráneos de medios a elevados, con aproximadamente 20 m³/día; y niveles piezométricos de más de 20 mca, (Lictevout, y otros, 2020).

Una vez ubicado el sitio, se requiere diseñar la estructura conforme a su geometría y sección. Con geometría se refiere a la forma en planta que tendrá la galería drenante, las cuales dependen de la localización del caudal que se quiera abatir, y la geología del sitio. Entre las principales geometrías se encuentran:

- I. Tipo herradura (arco)
- II. Tipo "J" o media herradura (semi – arco)
- III. Tipo "Y"
- IV. Tipo "L" o media "Y"

Por su sección, las galerías se pueden definir en varios tipos como, galería abovedada, circular o cilíndrica, rectangular; o se sección compuesta, con más de una de las secciones anteriormente mencionadas. En la **Figura 6.8**, se muestran los diferentes tipos de geometrías y secciones.

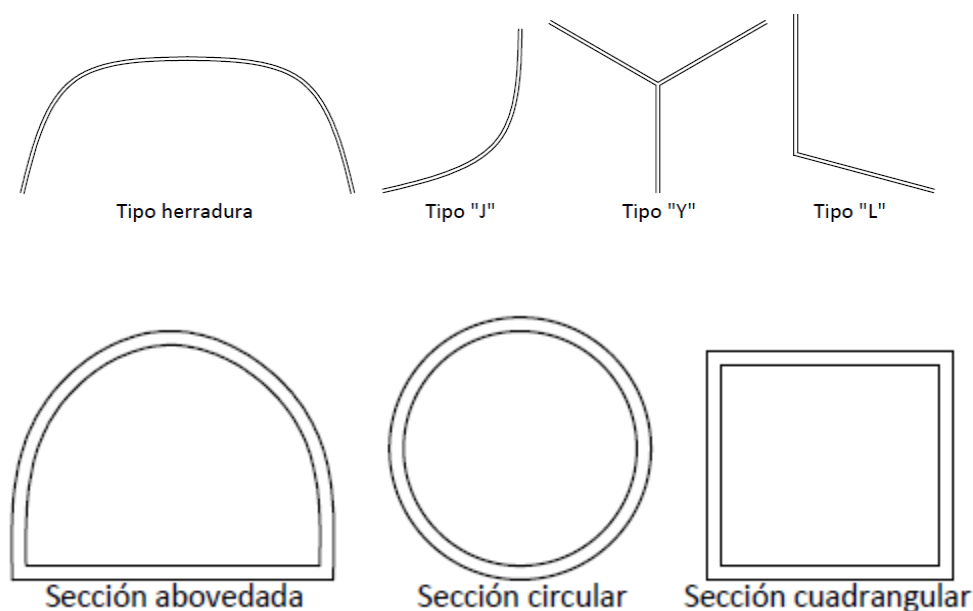


Figura 6.8. Tipos de geometría y secciones en galerías drenantes.

Una vez seleccionado el sitio, la geometría y sección de la galería, se hace el diseño estructural de la misma, utilizando los parámetros y metodologías de la geotecnia moderna para soportar los esfuerzos a los que estará sometida la estructura, tanto esfuerzos hidrostáticos, como los referentes a las cargas del material o medio que la rodea.

Terminado el proceso de proyección, sigue la construcción; para ello se comienza la excavación del túnel utilizando la maquinaria correspondiente para dicha labor, en los casos más comunes se utilizan máquinas perforadoras mecánicas de frente pleno. La excavación se realiza mediante la trituración de la roca por acción mecánica de un cabezal giratorio equipado con cortadores de alta resistencia al desgaste y el impulso de sistemas hidráulicos que se apoyan directamente sobre las paredes de la cavidad, o bien, en el sistema de soporte que es colocado por el propio equipo (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017).

Durante el proceso de excavación se debe asegurar aireación por sistemas de ventilación capaces de inyectar la cantidad de aire fresco suficiente de acuerdo al tipo de equipo que se utilice, con los dispositivos necesarios (ductos) para conducir el aire desde 15 metros fuera de la boca del túnel hasta el frente de excavación (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017).

De igual manera, debe haber equipo de transporte de material proveniente de la excavación, mediante vehículos, vagones, bandas, o ductos, de acuerdo al tipo de material extraído y las dimensiones del túnel; este equipo de transporte deberá tener una capacidad compatible con la velocidad de excavación (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017).

La excavación será guiada con equipo topográfico que medirá los niveles para mantener la pendiente, además de contar con sistemas de seguridad, iluminación, instalaciones eléctricas y drenaje.

Dependiendo el factor RMR (Rock Mass Rating), se realiza el avance de una excavación de túneles, en este caso de las galerías drenantes, esta clasificación geomecánica de Bieniawski es una suma algebraica de valores en parámetros de la roca, tales como esfuerzo de la roca intacta en el frente de excavación, el valor RQD que indica la calidad del núcleo de roca, el espaciamiento entre las diaclasas, continuidad entre diaclasas, y presencia de agua subterránea (Bhawani & Goel, 2011).

La escala RMR va de 0 a 100, donde los valores entre 0 – 20 es muy pobre, 21 – 40 es pobre, 41 – 60 es promedio, 61 – 80 es bueno y de 81 – 100 es muy bueno. Siendo los valores entre 60 – 100 que se buscan para seguir avanzando la excavación (Bhawani & Goel, 2011).

Si los valores de RMR son menores a 60, se necesitan colocar apoyos o soportes en claros de 3 a 5 metros entre los mismos a lo largo del túnel.

Mientras se avanza en la excavación es necesario colocar un recubrimiento primario en las paredes del túnel, que normalmente es de madera, para después colocar un recubrimiento secundario a base de concreto reforzado. Aunque en algunas ocasiones simplemente se coloca primero el armado de acero con cimbra, para después hacer el colado del concreto.

Una vez terminado el túnel, incluyendo excavación y recubrimientos. Se realiza la perforación para los drenes transversales en forma axial a la sección. Dichas perforaciones serán orificios de 10 centímetros de diámetro, y de 10 a 15 metros de longitud. Para después en esos hoyos colocar una tubería de PVC ranurada que permita captar el agua de los estratos saturados.

Por último, se hacen las actividades correspondientes al portal de la galería, es decir, la entrada o salida del *qanat*, que pueden ser desde una estructura con alerones de concreto armado y visera, hasta una puerta de herrería, con taludes de concreto lanzado, como se pueden observar en la **Figura 6.9**.

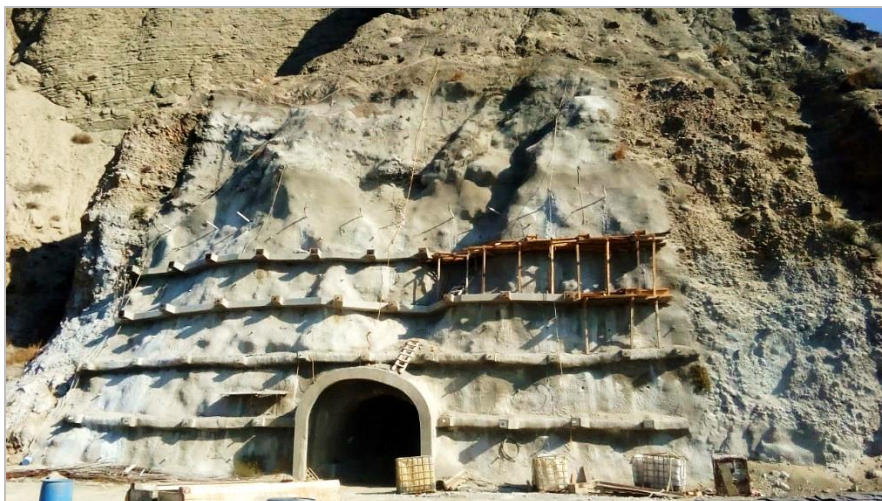


Figura 6.9. Portal norte de la galería abovedada en kilómetro 88+000, tomada de (TGC, Gallardo, & Bermúdez, Informe geotécnico Bahía Salsipuedes, 2018).

6.7.4 Ubicación de galerías en Bahía Salsipuedes

A lo largo de la historia de la carretera escénica Tijuana – Ensenada que atraviesa la Bahía Salsipuedes, se han construido varias galerías drenantes con el fin de mitigar las presiones de poro provocadas por la presencia de agua subterránea.

La primer galería en ser construida fue la localizada en el km 91+000, después de los eventos de deslizamientos constantes en ese sitio durante los años sesenta y setenta, se decidió realizar la construcción de una galería tipo “J” de sección mixta, al inicio una sección cuadrangular de mampostería de aproximadamente 2 metros de alto por 1.5 metros de ancho con una longitud 50 metros y en la curvatura se hizo un cambio a sección circular de tubería de acero corrugado de 1.80 metros de diámetro hasta finalizar 170 metros después (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).

La segunda galería en construirse fue la localizada en el kilómetro 93+000, después de los acontecimientos catastróficos del 28 de diciembre de 2013; esta galería es de concreto reforzado con arcos de concreto armado y drenes a cada 10 metros; tiene forma de herradura, sección abovedada y una longitud de más de un kilómetro, sus dimensiones en sección son las más grandes de todas las galerías en la Bahía Salsipuedes con 5 metros de altura y 7 metros de ancho (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).

Una vez establecidos los once sitios de inestabilidad por *SCT-CAPUFE*, se propusieron realizar 3 galerías más, la primera ubicada en el kilómetro 88+000, la segunda en el kilómetro 89 – 90+000 y la tercera en el kilómetro 94+000.

La galería del kilómetro 88+000 es de sección mixta y geometría de herradura. Empieza en el portal norte con una sección aboveda de 3 metros de altura por 2.50 metros de ancho, realizada de concreto armado con arcos; sigue con esa configuración aproximadamente 400 metros y luego cambia a una sección circular de 1.80 metros de diámetro de recubrimiento primario de madera, secundario de concreto lanzado y anillos de perfil “H” de acero (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).

La galería del kilómetro 89 – 90+000, tiene una sección abovedada de 3 metros de altura y 3.5 metros de ancho, realizada de concreto armado con arcos, y geometría en herradura; su longitud aproximada desde el portal norte a su salida en el portal sur es de 830 metros (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).

Por último, la galería del kilómetro 94+000 tiene una sección igualmente abovedada de 4 metros de altura y 6 metros de ancho, su configuración es de concreto armado con arcos, y en su punto de inflexión se encuentra doblemente reforzado. La geometría de esta galería es en forma “Y”, con una longitud total aproximada de 420 metros (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).

En la **Figura 6.10**, se puede ver la localización de cada una de las galerías anteriormente mencionadas, las coordenadas de ubicación están tomadas en el centroide de cada una de las geometrías de las galerías presentes en la Bahía Salsipuedes.

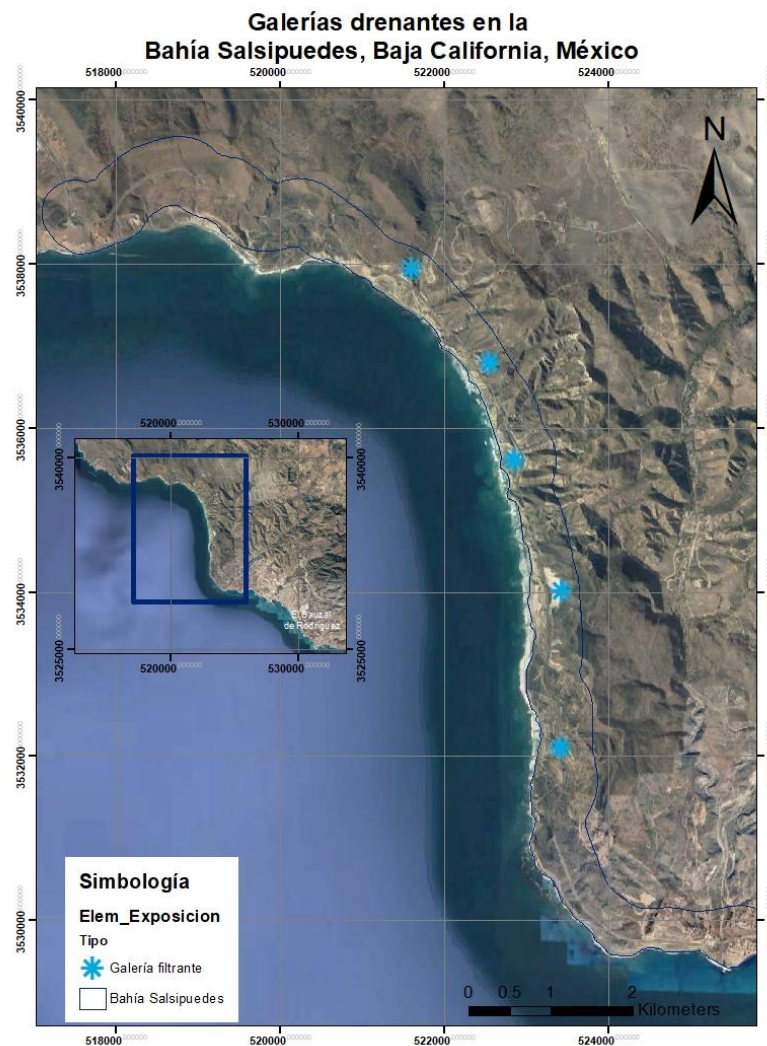


Figura 6.10. Localización de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.

6.8 Instrumentación piezométrica en la Bahía Salsipuedes

La Bahía Salsipuedes desde la construcción de la carretera escénica Tijuana – Ensenada en los años sesenta, ha sido monitoreada periódicamente por diferentes organismos federales y privados. Dichos organismos, principalmente la extinta *Secretaría de Obras Públicas* (SOP, 1975) y ahora denominada *Secretaría de Comunicaciones y Transportes* (SCT P. T., 2014), mediante empresas subcontratistas se han encargado de instalar diferentes tipos de instrumentación para realizar monitoreos mensuales y anuales que permitan conocer el comportamiento topográfico, geotécnico, geológico, hidrológico y geohidrológico de la zona, tales como: puntos de control topográficos, inclinómetros, estaciones climatológicas, piezómetros o tubos de observación.

De igual manera, a lo largo de 60 años de la existencia de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, se han realizado un sinnúmero de sondeos y muestreos previos a la instalación de la instrumentación, anteriormente mencionada. Un sondeo geotécnico es aquel procedimiento mediante el cual se pueden extraer muestras del suelo de la zona de estudio y con ellas realizar pruebas para conocer las propiedades geotécnicas del material extraído. Los sondeos pueden ser del tipo *wire – line* (extracción de núcleos), *SPT* (sondeos de penetración estándar, por sus siglas en inglés), *SAC* (sondeo de avance controlado), phicómetro, entre otros.

El tipo, profundidad y ubicación del sondeo se elige según la zona de interés, ya sea porque en ese lugar se instalará un instrumento de medición, o porque se realizará un proyecto de estabilización que requiera específicamente una profundidad o tipo de extracción de muestra. En la sección de *Metodología* puede observar un mapa con la distribución de los sondeos realizados en la Bahía Salsipuedes.

Una vez realizado el sondeo del que se extrajeron muestras del suelo o material, se deja una perforación, la cual es utilizada muy comúnmente para la instalación de algún tipo de instrumentación; ya sea instrumentación inclinométrica que mide desplazamientos de masas de tierra, o instrumentación piezométrica.

Se le conoce como instrumentación piezométrica a cualquier aparato, equipo o herramienta que sea instalada para la medición de niveles piezométricos y/o freáticos ocasionados por flujos subterráneos y sub – superficiales en masas de tierra o entre estratos de formaciones geológicas, dando un monitoreo periódico de la situación geohidrológica de una zona determinada.

En el caso particular de esta investigación se le da mayor importancia a la instrumentación piezométrica, ya que es la que se encarga de medir los niveles de agua subterránea en la Bahía Salsipuedes, y por lo tanto la instrumentación de más interés en el presente caso de estudio.

De los muchos tipos de instrumentación piezométrica conocidos en la actualidad, los que principalmente se utilizan en la Bahía Salsipuedes son los tubos de observación y piezómetros tipo Casagrande.

6.8.1 Tubo de observación

El tubo de observación es aquel instrumento piezométrico que se instala para conocer la posición del nivel freático y sus variaciones con el tiempo en un suelo. Para su instalación se requiere realizar

una perforación de 5 a 10 centímetros de diámetro a una profundidad de 1 metro por debajo del nivel freático (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

La perforación se utiliza como sondeo previo y se hace con ayuda de una máquina perforadora, principalmente las del tipo *Long Year* o *Berettas* y utilizando brocas tricónicas con puntas de carburo de tungsteno y barras de perforación tipo *BW*.

Una vez terminada la perforación se introduce el tubo de observación que puede ser de PVC, donde la parte inferior del tramo 1.50 metros es tubo con ranuras horizontales de 1 milímetro de espesor, cubierto con geotextil que no permita que el suelo entre al tubo. Los costados de la perforación se rellenan con arena sílica o arena media y un metro antes de terminar el relleno se coloca grava de bentonita. El tubo de observación debe sobresalir de la superficie y protegerse por lo menos con un tapón, pero de preferencia se debe colocar un registro de protección y una etiqueta con nombre, coordenadas de ubicación y profundidad del instrumento. En la **Figura 6.11** se observa un diagrama tipo de un tubo de observación.

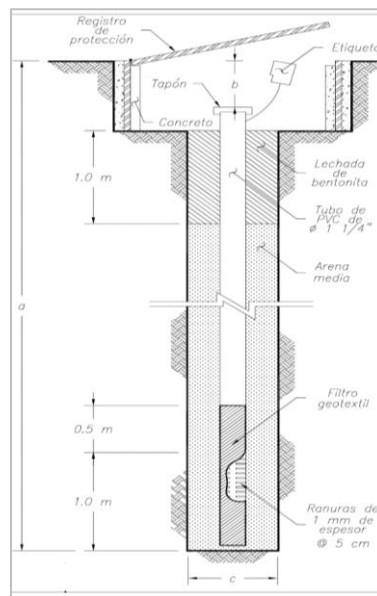


Figura 6.11. Diagrama de tubo de observación, tomada de (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

6.8.2 Piezómetro tipo Casagrande

El piezómetro tipo Casagrande es un dispositivo que mide la presión del agua o presión de poro en distintos estratos del suelo a las profundidades que se encuentren (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012). Este dispositivo tiene en la parte inferior un bulbo denominado *bulbo Casagrande* en honor a su inventor *Arthur Casagrande* que junto con *Karl Von Terzaghi* se les considera padres de la mecánica de suelos actual (ASCE, 2022), es por ello que tanto el bulbo y el este tipo de piezómetro tienen ese nombre.

El bulbo de Casagrande es permeable, es decir, permite que el agua del sub – suelo fluya al interior del tubo y ascienda hasta que se estabilice al nivel equivalente de la presión a la que está sujeta el

agua del suelo a esa profundidad (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

Al igual que con el tubo de observación, el piezómetro tipo Casagrande requiere una perforación para su instalación, la cual debe ser de 5 a 10 centímetros de diámetro y tener una profundidad de 60 centímetros dentro del estrato permeable. La perforación se debe hacer con una máquina tipo *Long Year* o *Beretta*, barras tipo BW y brocas tricónicas con puntas de carburo de tungsteno (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012). El fluido de perforación deberá ser sin aditivos y con agua limpia.

Para la instalación del piezómetro se coloca un ademe metálico NW de diámetro 2 5/8 de pulgada y se hace circular agua limpia hasta que retorne con un mínimo de material de suspensión.

Se prepara el bulbo Casagrande y la tubería, la cual deber ser de PVC de ½ o ¾ de pulgada de diámetro y conectada al elemento poroso (bulbo). Este extremo se lleva al fondo de la perforación amarrado con una cuerda de polipropileno y el otro extremo se deja al ras de la boca de perforación (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

Una vez que el bulbo esté por debajo del nivel freático se debe llenar la tubería con agua, para evitar que se obture la celda permeable o bulbo Casagrande. Enseguida se extrae el ademe 30 centímetros y se vacía arena bien graduada en la perforación controlando su volumen; se continúa realizando ese procedimiento hasta un metro antes de llenar la perforación. Después se coloca una capa de bentonita granular el metro restante de perforación, haciendo una especie de sello permeable. Se extrae el ademe completamente y se coloca un sello cementante de lechada (bentonita, cemento y agua) en el espacio entre el tubo y las paredes de la perforación donde se encontraba el ademe (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

Finalmente se coloca un tapón al piezómetro y un registro de protección, además de etiqueta con nombre, coordenadas y profundidad, para su posterior monitoreo. En la **Figura 6.12** se observa un diagrama tipo de un piezómetro Casagrande.

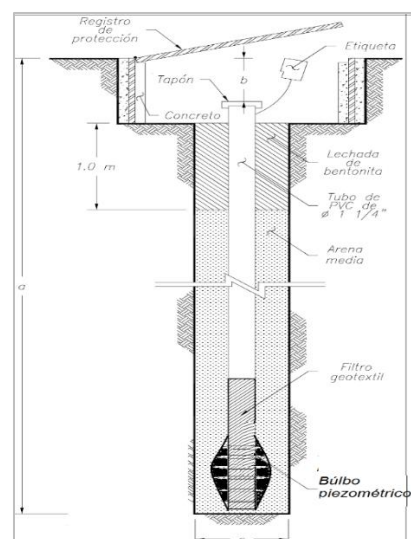


Figura 6.12. Diagrama de piezómetro tipo Casagrande, tomada de (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

6.8.3 Diferencia entre nivel freático y nivel piezométrico

La energía que posee una partícula de agua está en tres formas: la energía potencial, debida a su altura; la energía de presión, debida a la presión (atmosférica principalmente); y la energía cinética, debida a su velocidad (la velocidad del agua que fluye a través de los suelos es tan baja, que la energía cinética es prácticamente cero). La energía del agua se expresa corrientemente como carga, y es una dimensión lineal, en metros, en realidad metros columna de agua. Como la energía es relativa, la carga debe referirse siempre a un punto fijo, generalmente un plano de referencia arbitrario. La carga que posee el agua en los suelos se manifiesta por la altura (h), a la cual asciende el agua en un pequeño tubo, con relación al plano de referencia. Esta altura a que el agua asciende se llama a menudo nivel piezométrico, superficie piezométrica o freática y es una medida de toda la energía que tiene el agua (Sowers & Sowers, 1990).

El nivel piezométrico, por lo tanto, corresponde a la altura que alcanza el agua por acción de la presión existente sobre un punto específico del suelo saturado, por lo que cada punto tiene un nivel piezométrico propio y diferente (Vélez Otálvaro, 2004).

El nivel freático es la superficie superior de una masa de agua subterránea. Se define como el nivel de agua en un agujero abierto en el terreno, y es el nivel al cual la presión es cero (Sowers & Sowers, 1990).

La elevación del nivel freático en un punto no es constante. La corriente de agua se abastece por infiltración desde la superficie del terreno, y esta agua se pierde por evaporación, y por filtración hacia los escurrimientos, embalses y el océano. Cuando la cantidad de agua que entra es superior a la que se pierde, como sucede en la temporada de lluvias; el nivel freático sube. Cuando la entrada disminuye en tiempo seco, o cuando la pérdida aumenta por bombeos para abastecimiento, drenaje por drenes o alguna otra obra de captación como galerías, pozos, trincheras, entre otros; el nivel freático baja (Vélez Otálvaro, 2004).

En general, se entiende por nivel freático, a la altura física que tiene una columna de agua, y nivel piezométrico, como la altura o nivel que tendría el agua si se dejara subir o bajar. En casos de pozos que llevan abandonados un tiempo considerable, el nivel freático se considera igual que el nivel piezométrico. Por lo que es importante saber diferenciar lo que mide un piezómetro a un tubo de observación, en el caso particular de esta investigación, ambos fueron considerados en metros columna de agua y promediados en una base de datos, la cual se mencionará en la sección de *Metodología*.

6.8.4 Medición de instrumentación piezométrica

Tanto para los tubos de observación, como los piezómetros tipo Casagrande se sigue el mismo procedimiento de medición. Este consiste en la determinar la altura que alcanza el nivel del agua dentro del instrumento piezométrico, ya sea tubo o piezómetro, utilizando una sonda eléctrica con punta hidrofóbica que se introduce por el interior de la tubería vertical.

Una vez instalado el instrumento piezométrico, ya sea tubo de observación o piezómetro tipo Casagrande, se deja estabilizar su nivel de agua durante quince días, para después de transcurrido ese tiempo realizar la primer lectura o medición. La cual será una lectura base, para después realizar mediciones mensuales, quincenales o semanales.

La sonda eléctrica está integrada por un cable dúplex flexible y medidor de resistencia (óhmetro), la punta del cable lleva una boquilla de plástico que impide que los dos alambres conductores puedan tener contacto con la pared del interior de la tubería. El cable de la sonda tiene un lastre metálico para tensarlo y asegurarse de la precisión de la medición.

Al tocar los conductores la superficie del agua cierra el circuito y el óhmetro lo registra emitiendo un sonido, se mide la longitud del cable ingresado hasta que sonó la sonda y se apunta en bitácora. La precisión de la medición de la sonda es de ± 1 centímetro de columna de agua.

Se obtiene la altura del nivel del agua dentro del tubo, que equivale a la presión que tienen el agua en el suelo a la profundidad del bulbo (en el caso de los piezómetros), o la presión del agua en el suelo a la profundidad equilibrada encima del tubo ranurado (en el caso de los tubos de observación). Así pues, la altura del agua será igual a la diferencia entre la profundidad del bulbo o tubo ranurado y la profundidad del nivel de agua dentro del tubo.

Tabla 6.7. Cantidades de instrumentos piezométricos en la Bahía Salsipuedes, tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).

Sitio	Cantidad de tubos de observación	Cantidad de piezómetros Casagrande	Total, de instrumentos
Km 84+000	2.00	0.00	2.00
Km 86+000	2.00	3.00	5.00
Km 88+000	7.00	3.00	10.00
Km 89-90+000	7.00	6.00	13.00
Km 91+000	8.00	4.00	12.00
Km 92+000	3.00	1.00	4.00
Km 93+000	2.00	1.00	3.00
Km 93+500	2.00	3.00	5.00
Km 94+000	9.00	6.00	15.00
Km 95-96+000	19.00	4.00	23.00
Km 98+000	1.00	8.00	9.00

En la **Tabla 6.7** se observan la cantidad de tubos de observación y piezómetros que hay en cada kilómetro de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, dentro de la Bahía Salsipuedes. Se puede ver que la mayor concentración de tubos de observación se localiza en el kilómetro 95-96+000, mientras que la mayor concentración de piezómetros está en el kilómetro 98+000. Esto se debe a que en los últimos 5 años esos sitios han sido los de principal interés de estabilización por parte de la SCT y CAPUFE. Hay un total de 101 instrumentos piezométricos instalados en la Bahía Salsipuedes, de los cuales 90 están en buenas condiciones de monitoreo y 11 se encuentran en desuso.

Las mediciones o monitoreo se realizan mínimo una vez al mes en la instrumentación piezométrica colocada en la Bahía Salsipuedes, en ocasiones especiales, como casos de lluvias extremas o deslizamientos inesperados, la dependencia de gobierno solicita realizar mediciones extemporáneas; en otras ocasiones, las mediciones pueden ser semanales o quincenales, como se

mencionó anteriormente. La distribución de los 90 instrumentos piezométricos de la Bahía Salsipuedes se puede ver en la sección de *Metodología*.

6.9 Sistemas de información geográfica

Un sistema de información geográfica o también conocido por sus siglas como *SIG* o *GIS* (por sus siglas en inglés, Geographic Information System), es un marco de trabajo cuya principal finalidad es la de reunir, gestionar y analizar datos; el cual está estrechamente relacionado a la ciencia geográfica (Aeroterra, 2020).

En general, un sistema de información (*SI*) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas, es decir, programas, que permiten realizar análisis con objetivos concretos dentro de una organización. Un SIG por lo tanto es un caso particular de un sistema de información en el que los datos aparecen georreferenciados, es decir, incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado, resultado de una proyección cartográfica, generalmente *UTM*, (Alonso Sarría, 2006).

Un SIG analiza la ubicación espacial y organiza capas de información para su visualización, utilizando mapas y escenas 3D, con esta capacidad, un SIG puede revelar el conocimiento más profundo escondido en los datos, ya sean en forma de patrones, relaciones o situaciones, ayudando a los usuarios a tomar decisiones más eficientes (Aeroterra, 2020).

Cuando se habla de sistemas de información geográfica, se puede considerar que está constituido por cuatro elementos (Alonso Sarría, 2006):

- I. **Bases de datos**, las cuales pueden ser espaciales o temáticas; las bases de datos espaciales se codifican mediante modelos de datos específicos; y las bases de datos temáticas se vinculan a datos cartográficos que permiten asignar a cada punto, línea o área del territorio valores temáticos.
- II. **Programas**, que permiten manejar las bases de datos de forma útil para diversos propósitos de investigación, docencia o gestión. Los programas son muy variados y los constituyen una serie de herramientas de programación que les permite representar de forma clara el espacio y los fenómenos ubicados en él; entre los más populares se encuentran *IDRISI*, *ArcInfo*, *GRASS*, *Erdas*, *ArcGIS*, *QGIS*, entre otros.
- III. **Usuarios**, son quienes demandan la información espacial y toman las decisiones en función de su representación en el SIG. Suelen necesitar una interfaz sencilla (de usuario) para enmascarar la complejidad del sistema debido a la falta de conocimientos informáticos, como es el caso del *ArcView* que es menos potente que la interfaz *ArcInfo*.
- IV. **Administradores del sistema**, que son encargados de resolver los requerimientos de los usuarios utilizando de manera correcta las herramientas disponibles, o bien, produciendo nuevas herramientas dentro de los programas.

Normalmente un SIG sigue cuatro pasos para su funcionamiento, el primero es la entrada de datos, dichos datos se integran en capas que utilizan una ubicación espacial; el segundo es la proyección de mapas con ayuda de las herramientas del programa mismo, los mapas son el contenedor geográfico para las capas de datos; el tercero es el análisis espacial de la información obtenida en los mapas generados para realizar evaluaciones en términos de adecuación y capacidad, predecir,

estimar, interpretar y comprender la situación espacial; por último, el cuarto paso es la generación de aplicaciones, ya sea una aplicación específica ante una problemática, es decir generar una alternativa de solución, o bien, hacer una aplicación para dispositivos en las que se puedan visualizar los resultados y análisis, y estén al alcance de cualquier usuario (Aeroterra, 2020).

6.9.1 Herramientas de un SIG

Como se mencionó en secciones anteriores, las herramientas son los procedimientos, técnicas, y métodos matemáticos necesarios para realizar una representación gráfica de los datos proporcionados por el usuario al programa. En este caso el programa que comprende un sistema de información geográfica es el denominado *Arcmap 10.3 de ArcGIS*. Las herramientas utilizadas para la generación de modelos geoestadísticos en esta investigación fueron diversas, desde la creación de modelos digitales de elevaciones, pasando por modelos de interpolación, hasta llegar a metodologías más complejas como modelos de flujo por la ecuación de Darcy, superposición difusa ponderada, álgebra de mapas, modelos de distancia euclidiana, entre otros.

Es por ello que se encuentra de suma importancia conocer sobre lo que implica cada una de las herramientas dentro de un programa de sistemas de información geográfica.

6.9.1.1 Modelo digital de elevaciones (DEM o MDE)

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializado (ESRI, 2022).

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud, es decir, valores submétricos (ESRI, 2022).

6.9.1.2 Métodos de interpolación

Los métodos de interpolación en los sistemas de información geográfica permiten predecir valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra (ESRI, 2022). Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de diferentes tipos de datos de un punto geográfico, tales como: elevaciones, niveles piezométricos, importes o pérdidas económicas, permeabilidades, porosidades efectivas, entre otros (Mitas & Mitasova, 1988). Los métodos de interpolación disponibles como herramientas en los principales programas de sistemas de información geográfica son los que se mencionan a continuación.

6.9.1.2.1 IDW

La herramienta de ponderación de distancia inversa o también llamada **IDW**, por sus siglas en inglés (Inverse Distance Weighting), es un método de interpolación multivariable determinista que se basa en un número conocido de datos en puntos geográficos. Estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de

procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio (Watson & Philip, 1985).

El valor de salida para una celda que utilizar la distancia inversa ponderada o *IDW*, se limita al rango de valores utilizados para la interpolación. Dado que la *IDW* es un promedio de distancia ponderada, el promedio no puede ser mayor que la entrada máxima o inferior que la entrada mínima. Por lo tanto, no puede crear crestas o valles si estos extremos aún no se han muestreado (Watson & Philip, 1985).

Los mejores resultados de la *IDW* se obtienen cuando la muestra es lo suficientemente densa respecto de la variación local que intenta simular. Si la muestra de los puntos de entrada es dispersa o dispareja, los resultados pueden no representar en forma suficiente la superficie deseada (Watson & Philip, 1985).

La interpolación por *IDW* se puede definir mediante valores numéricos o por bases de datos de un ráster existente. Si el tamaño de celda no se ha especificado para ese ráster se deriva del entorno tamaño de celda que si se haya especificado. Algunas bases de datos de entrada pueden tener puntos con las mismas coordenadas *X*, *Y*. Si los valores de los puntos de una ubicación común son los mismos, se consideran duplicados y no afectan a la salida. Si los valores son diferentes, se consideran puntos coincidentes (Philip & Watson, 1982).

Para delimitar la proyección de la interpolación *IDW* se utilizan las entidades barreras, que son polilíneas que interrumpen la continuidad de la superficie. Estas entidades no tienen valores *Z*, y sirven como límite del conjunto seleccionado dentro de ellas como puntos muestra de entrada para interpolar los valores *Z* de salida. Las barreras tienen un límite de 45 millones de puntos de entrada, si se llegase a sobrepasar esa cantidad es probable que falle el resultado. Para evitar esa clase de errores es dividir el área de estudio en varias partes y que en esas partes no exista una superposición de bordes o barreras (Philip & Watson, 1982).

Para el cálculo del método de interpolación *IDW* se necesitan las siguientes variables (Philip & Watson, 1982):

- I. Entidades de puntos de entrada, que contienen los valores en *Z* que se interpolarán en un ráster de superficie.
- II. Campo de valores *Z*, que contiene un valor de interés (altura, porosidad, precipitación, nivel piezométrico, etc).
- III. Tamaño de celda de salida, se indica dependiendo la escala a la que se trabajará la zona de estudio.
- IV. Potencia, que indica el exponente de distancia, el cual controla la significancia de los puntos circundantes sobre el valor interpolado; debe ser un valor real mayor que cero, cuyo valor predeterminado es 2. Una potencia mayor tiene como resultado una influencia menor de los puntos lejanos.
- V. Radio de búsqueda, que define cuáles de los puntos de entrada se utilizarán para interpolar el valor para cada celda ráster de salida, y puede ser variable o fijo, dependiendo de la cantidad de puntos que se quieran en ese radio, o bien, la distancia máxima del radio.
- VI. Barreras, que son entidades polilíneas que se utilizan como corte o límite en la búsqueda de puntos de muestra de entrada.

Como resultado de la operación por el método *IDW*, habrá un ráster de salida que indica la superficie interpolada y siempre es un ráster de punto flotante.

La línea de programación en *Python* que se utiliza dentro del programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* como base es la siguiente:

```
IDW(in_point_features,Z_field,{cell_size},{power},{search_radius},{in_barrier_polyline_features}) (45)
```

Donde:

in_point_features son las entidades de puntos de entrada, *Z_field* es el campo de valores *Z*, *cell_size* es el tamaño de celda, *power* es el exponente de distancia, *search_radius* es el radio de búsqueda y *in_barrier_polyline_features* son las entidades de barrera en polilíneas (ESRI, 2022).

Como ejemplificación se tiene que:

```
Out_IDW = IDW("Basedatospzm","nivel_pzm",{50},{2},{RadiusVariable (5,90)},{polígono_referencia}) (46)
```

Donde, las entidades de puntos de entrada se llaman "*Basedatospzm*", la variable en *z* es "*nivel_pzm*", con un tamaño de celda de 50, una potencia de 2 y un radio variable de 5 puntos para 90 puntos de la base de datos, con una barrera denominada "*polígono_referencia*" la cual es una línea.

6.9.1.2.2 Kriging

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores *Z*. Aún más que con otros métodos de interpolación, se debe realizar una investigación profunda del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores *Z* antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida (Oliver & Webster, 1990).

A diferencia del método *IDW* y *Spline* que son métodos determinísticos, basados en valores medidos y fórmulas matemáticas específicas, el método de *Kriging* es un método geoestadístico, que se basa en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Es por ello que las técnicas de estadística además de producir una predicción, proporcionan medidas de certeza o precisión de las predicciones (Royle, Clausen, & Frederiksen, 1981).

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta *Kriging* ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación. El método de *Kriging* es un proceso que consta de varios pasos, como el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y la exploración de la superficie de varianza. Este método es el más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o a la distancia correlacionada especialmente en los datos, se utiliza a menudo en la geología, geotecnia y geohidrología (Oliver & Webster, 1990).

El método de *Kriging* es similar al *IDW* en que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La ecuación general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de datos, como se presenta a continuación:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (47)$$

Donde, $Z(S_i)$ es el valor medido en la ubicación N_i , λ_i es un peso desconocido para el valor medido en la ubicación N_i , S_0 es la ubicación de la predicción y N es el número de valores medidos.

En *IDW*, el peso λ_i depende únicamente de la distancia a la ubicación de la predicción, mientras que en el método *Kriging*, las ponderaciones están basadas no sólo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos (Royle, Clausen, & Frederiksen, 1981).

Para ello se requiere realizar dos tareas previas, primero descubrir las reglas de dependencia y segundo realizar las predicciones. La primera parte consiste en la creación de variogramas o semivariogramas, las cuales son funciones que describen la semivarianza de un grupo de muestras a una distancia; además de las funciones de covarianza para calcular los valores de dependencia estadística, denominada autocorrelación espacial, que dependen del modelo de autocorrelación; en la segunda parte se prevé los valores desconocidos, es decir, se hace una predicción (Royle, Clausen, & Frederiksen, 1981).

Al igual que en el método *IDW*, para el cálculo del método de interpolación *Kriging* se necesitan las siguientes variables (Philip & Watson, 1982):

- I. Entidades de puntos de entrada, que contienen los valores en Z que se interpolarán en un ráster de superficie.
- II. Campo de valores Z , que contiene un valor de interés (altura, porosidad, precipitación, nivel piezométrico, etc.).
- III. Propiedades del semivariograma, que puede ser esférico, circular, exponencial, gaussiano o lineal, dentro del modelo *Kriging* ordinario; y lineales o cuadráticos para el modelo *Kriging* universal.
- IV. Tamaño de celda de salida, se indica dependiendo la escala a la que se trabajará la zona de estudio.
- V. Radio de búsqueda, que define cuáles de los puntos de entrada se utilizarán para interpolar el valor para cada celda ráster de salida, y puede ser variable o fijo, dependiendo de la cantidad de puntos que se quieran en ese radio, o bien, la distancia máxima del radio.
- VI. Ráster de predicción de la varianza de salida, en el que cada celda contiene los valores de varianza previstos para esa ubicación.

Como resultado de la operación por el método *Kriging*, habrá un ráster de salida que indica la superficie interpolada y siempre es un ráster de punto flotante.

La línea de programación en *Python* que se utiliza dentro del programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* como base es la siguiente:

$$\text{Kriging}(\text{in_point_features}, \text{Z_field}, \text{semiVariogram_props}, \{\text{cell_size}\}, \{\text{search_radius}\}, \{\text{out_variance_prediction_raster}\}) \quad (48)$$

Donde:

in_point_features son las entidades de puntos de entrada, *Z_field* es el campo de valores Z, *semiVariogram_props* indica el modelo *Kriging* que se utilizará, *cell_size* es el tamaño de celda, *search_radius* es el radio de búsqueda y *out_variance_prediction_raster* es el ráster de salida opcional en el que cada celda contiene los valores de varianza previstos para esa ubicación (ESRI, 2022).

El semivariograma por *Kriging* puede ser ordinario o universal, en ambos casos siguen un código de la siguiente forma:

$$\text{KrigingModel}(\{\text{semivariogramType}\}, \{\text{lagSize}\}, \{\text{majorRange}\}, \{\text{partialSill}\}, \{\text{nugget}\}) \quad (49)$$

Donde *semivariogramType* significa el tipo de semivariograma a utilizar, el cual puede ser esférico, circular, exponencial, gaussiano o lineal para los modelos ordinarios; y *lineardrift* o *quadraticdrift* para los universales. *lagSize* es el tamaño de celda ráster de salida, *majorRange* es la distancia más allá de la cual hay poca o ninguna correlación, *partialSill* es la diferencia entre el nugget y la meseta, mientras que *nugget* es el error y la variación a escala fina (Royle, Clausen, & Frederiksen, 1981).

Como ejemplificación se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{Out_Krig} \\ = \text{Kriging}(\text{"Basedatospzm"}, \text{"nivel_pzm"}, \text{KrigingModelOrdinary}(\text{"CIRCULAR"}, 50, 500, 450, 0) \{50\}, \text{RadiusFixed}(500, 1)) \end{aligned} \quad (50)$$

Donde, las entidades de puntos de entrada se llaman "*Basedatospzm*", la variable en z es "*nivel_pzm*", con un modelo ordinario circular, tamaño de celda de 50, con *majorRange* de 500, *partialSill* de 450 y *nugget* de 0; un radio de 500 puntos para 1 de la base de datos.

6.9.1.2.3 Spline

La herramienta *Spline* utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (Franke, 1982).

Conceptualmente, los puntos de muestra extruden hasta la altura de su magnitud. El método *Spline* crea una superficie curvada que atraviesa todos los puntos de entrada y minimiza a la vez la curvatura total de esa superficie. Ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos de entrada más cercanos mientras pasa a través de los puntos de muestra. Este método es mejor para generar superficies que varían levemente, como la elevación, niveles piezométricos o concentraciones de contaminación subterráneas (Franke, 1982).

Hay dos tipos de *Spline*, el regularizado y el de tensión. El tipo regularizado crea una superficie suave que cambia gradualmente con valores que pueden estar fuera del rango de datos de la muestra. El tipo de tensión controla la rigidez de la superficie en función del carácter del fenómeno modelado. Crea una superficie menos suave con valores que están más restringidos por el rango de datos de la muestra (Mitas & Mitsova, 1988).

En ambos tipos de *Spline* se integra el parámetro *peso* que especifica el peso adjunto a los términos de la primera y tercera derivada de la superficie durante la minimización de la curvatura (primera

para tipo tensión y tercera para regularizado). Los valores introducidos deben ser iguales o mayores que cero, entre los más comunes están 0, 0.001, 0.01, 0.1 y 0.5 (Mitas & Mitsova, 1988).

También el número de puntos de una muestra es un parámetro de importancia, ya que identifica el número de puntos utilizables para el cálculo de cada celda interpolada. Cuantos más puntos de entrada se especifique, mayor será la influencia de los puntos distantes sobre cada celda y más suave será la superficie de salida. Cuanto más grande sea el número de puntos, más tiempo llevará procesar el ráster de salida (Mitas & Mitsova, 1988).

El algoritmo que utiliza la herramienta *Spline* se basa en la siguiente fórmula para la interpolación de la superficie:

$$S(X, Y) = T(X, Y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (51)$$

Donde j es el punto o celda específica, N es el número de puntos, λ_j son los coeficientes hallados mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales, r_j es la distancia desde el punto (X, Y) al punto j , $T(X, Y)$ se refiere al modelo de tensión y $R(r)$ se refiere al modelo regularizado (Franke, 1982).

Para el cálculo del método de interpolación *Spline* se necesitan las siguientes variables (Philip & Watson, 1982):

- I. Entidades de puntos de entrada, que contienen los valores en Z que se interpolarán en un ráster de superficie.
- II. Campo de valores Z , que contiene un valor de interés (altura, porosidad, precipitación, nivel piezométrico, etc).
- III. Tamaño de celda de salida, se indica dependiendo la escala a la que se trabajará la zona de estudio.
- IV. Tipo de *Spline*, el cual puede ser regularizado que produce una superficie lisa y terceros derivados, o de tensión que ajusta rigidez del interpolante de acuerdo con el carácter del fenómeno modelado.
- V. Peso, que afecta el carácter de la interpolación de superficie, cuando se usa regularizado el peso lo definen las terceras derivadas de la superficie, mientras que en tensión son las primeras derivadas. El valor predeterminado es de 0.1.
- VI. Número de puntos, que es la cantidad de puntos utilizados por región para la aproximación local.

Como resultado de la operación por el método *Spline*, habrá un ráster de salida que indica la superficie interpolada y siempre es un ráster de punto flotante.

La línea de programación en *Python* que se utiliza dentro del programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* como base es la siguiente:

$$Spline(in_point_features, Z_field, \{cell_size\}, \{Spline\ type\}, \{weight\}, \{number\ points\}) \quad (52)$$

Donde:

in_point_features son las entidades de puntos de entrada, *Z_field* es el campo de valores *Z*, *cell_size* es el tamaño de celda, *spline_type* es el tipo de método (regularizado o tensión), *weight* es el peso y *number_points* es el número de puntos de la muestra (ESRI, 2022).

Como ejemplificación se tiene que:

$$\text{Out_Spline} = \text{Spline}(\text{"Basedatospzm"}, \text{"nivel_pzm"}, \{50\}, \text{"REGULARIZED"}, 0.1, 90) \quad (53)$$

Donde, las entidades de puntos de entrada se llaman *"Basedatospzm"*, la variable en *z* es *"nivel_pzm"*, con un tamaño de celda de 50, el tipo de *Spline* *"Regularizado"* un peso de 0.1 y un número de puntos igual a 90.

6.9.1.3 Superposición difusa ponderada

La herramienta de superposición difusa (ponderada), *Fuzzy Overlay* (por su nombre en inglés en el programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*) o *WOM* (por sus siglas en inglés *"Weighted Overlay Method"*), permite analizar la posibilidad de que un fenómeno pertenezca a varios conjuntos en un análisis de superposición multicriterio. La superposición difusa no solo determina a qué conjuntos puede pertenecer un fenómeno, sino que también analiza las relaciones entre pertenencias de los diversos conjuntos (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021).

Se recomienda utilizar la herramienta de superposición a rásteres con valores binarios, es decir, con valores de 0 y 1. Aunque es factible que los valores de las celdas de los rásteres que se utilicen para este método puedan ser números reales, con lo que abre la posibilidad de realizar operaciones aritméticas básicas dentro de un mapa (Thapa, Gupta, Haque, & Kaur, 2020).

El tipo de superposición enumera los métodos disponibles para combinar los datos en función del análisis de la teoría de conjuntos. Cada método permite explorar la pertenencia de cada celda según los diversos criterios de entrada. Cada uno de los métodos disponibles proporcionan un aspecto diferente de la pertenencia de cada celda a los diversos criterios de entrada (Chakraborty, Pal, Malik, & Das, 2018).

Los tipos de superposición o métodos disponibles para la combinación de datos son los que se muestran a continuación (Chakraborty, Pal, Malik, & Das, 2018):

- I. **And Fuzzy** ("Y" Difusa), este tipo de superposición devuelve el valor mínimo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando se desea identificar el mínimo denominador común para la pertenencia de todos los criterios de entrada.
- II. **Or Fuzzy** ("O" Difusa), este tipo de superposición devuelve el valor máximo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando se desea identificar los valores de pertenencia máximos para cualquiera de los criterios de entrada.
- III. **Product Fuzzy** (Producto difuso), este tipo de superposición multiplica para cada celda, cada uno de los valores difusos por todos los criterios de entrada. El producto resultante será menor que cualquiera de las entradas y cuando la entrada pertenece a varios conjuntos, el valor puede ser muy bajo.

- IV. **Sum Fuzzy** (Suma difusa), este tipo de superposición suma los valores difusos de cada conjunto al que pertenece la ubicación de la celda. La suma resultante es una función de combinación lineal creciente que está basada en el número de criterios introducidos en el análisis.
- V. **Gamma Fuzzy** (Gamma difusa), este tipo de superposición es un producto algebraico del producto difuso y la suma difusa, ambos resultados elevados a la potencia de gamma. Si el valor de gamma es 1, la salida es la misma que la suma difusa; si el valor de gamma es 0, la salida es la misma que el producto difuso. La gamma difusa establece las relaciones entre los diversos criterios de entrada y no devuelve simplemente el valor de un solo conjunto de pertenencia como lo hacen *Or Fuzzy* y *And Fuzzy*.

Para el cálculo del método de superposición difusa se necesitan las siguientes variables (Thapa, Gupta, Haque, & Kaur, 2020):

- I. Rásteres de entrada, que es la lista de rásteres de pertenencia de entrada que se combinará en la superposición.
- II. Tipo de superposición, que es especificar el método de superposición utilizado para combinar dos datos de pertenencia o más, los cuales pueden ser del tipo “AND, OR, PRODUCT, SUM, GAMMA”.
- III. “Gamma”, que es el valor gamma que se va a utilizar en el método, este valor es opcional y no en todos los tipos se utiliza, es decir, sólo está disponible cuando el tipo de superposición se establece en “GAMMA”, el valor predeterminado es de 0.9.

Como resultado de la operación por el método de superposición difusa, habrá un ráster de salida que es el resultado de aplicar el operador difuso y en la mayoría de las bases tendrá un valor entre 0 y 1, de utilizarse una reclasificación de valores o utilizando los tipos “AND, OR Y GAMMA”; pero puede tener resultados de punto flotante cuando se utilicen rásteres no reclasificados y usando el tipo de superposición “PRODUCT y SUM”.

La línea de programación en Python que se utiliza dentro del programa ArcMap 10.3 de ArcGIS como base es la siguiente:

`FuzzyOverlay(in_rasters,{overlay_type},{gamma})` (54)

Donde:

In_rasters son la lista de rásteres de entrada, *overlay_type* es el tipo de superposición y *gamma* es el valor de gamma entre 0 y 1 (ESRI, 2022).

Como ejemplificación se tiene que:

`Out_FuzzyOverlay = FuzzyOverlay(["conductividad_hid", "carga_hid", "longitud", "canales", "caídas", "ancho_curv", "base_curv"], "PRODUCT")` (55)

Donde, la lista de rásteres de entrada quedan entre corchetes, el tipo de superposición es “PRODUCT”, y gamma es nula ya que no se utiliza ese método.

6.9.1.4 Flujo por Darcy

La herramienta de Flujo Darcy se utiliza para realizar un modelado rudimentario de advección – dispersión de los componentes en agua subterránea. Esta metodología modela un flujo siguiendo

los parámetros de la Ley de Darcy, es decir, siendo un flujo en estado continuo, laminar, en un medio isotrópico y homogéneo (Vélez Otálvaro, 2004), donde el inicio es independiente de la profundidad.

Como se mencionó en secciones anteriores, la Ley de Darcy establece que el flujo se calcula a partir de la conductividad hidráulica y el gradiente de carga hidráulica, tomando en cuenta que el medio está saturado y es homogéneo, isotrópico, con porosidades efectivas elevadas (Bear, 1979).

Para el cálculo del flujo Darcy en un programa de Sistema de Información Geográfica como es *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* es necesario tener en cuenta que la herramienta de flujo Darcy produce un ráster de volumen de salida, y sobre todo las líneas de flujo que indican por donde se mueve la partícula de agua en el medio saturado (ESRI, 2022).

Para el cálculo de flujo por Darcy se requiere de la entrada de varios rásteres al programa, los cuales son (ESRI, 2022):

- I. Ráster de nivel piezométrico o carga hidráulica del agua subterránea de entrada, donde cada valor de celda representa una elevación piezométrica del agua subterránea en esa ubicación.
- II. Ráster de la formación de porosidad efectiva de entrada, donde cada valor de celda representa la formación de porosidad efectiva en esa ubicación.
- III. Ráster de espesor de saturación de entrada, donde cada valor de celda representa el grosor saturado en esa ubicación, dicho valor se interpreta desde las propiedades geológicas del acuífero, es decir, mediante sus estratigrafías.
- IV. Ráster de transmisividad de formación de entrada, donde cada valor de celda representa la formación de transmisividad en esa ubicación, los valores de transmisividad se obtienen previamente en la base de datos, multiplicando la conductividad hidráulica y el espesor de saturación.
- V. Ráster de dirección de salida, el cual es opcional, donde cada celda representa la dirección del vector de velocidad de filtración.
- VI. Ráster de magnitud de salida, el cual es opcional, donde cada valor de celda representa la magnitud del vector de velocidad de filtración.

Como resultado de la operación de la herramienta de flujo Darcy habrá un valor de retorno, que será el ráster del balance del volumen de agua subterránea residual de salida, indicando su dirección o líneas de flujo. El ráster residual del balance tiene valores que se representan en cada celda (Tauxe, 1994).

La línea de programación en *Python* que se utiliza dentro del programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* como base es la siguiente:

```
DarcyFlow(in_head_raster,in_porosity_raster,in_thickness_raster,in_transmissivity_raster,{out_direction_raster},  
{out_magnitude_raster})
```

 (56)

Donde:

In_head_raster es el ráster del nivel piezométrico, *in_porosity_raster* es el ráster de porosidad efectiva, *in_thickness_raster* es el ráster para el espesor de saturación, *in_transmissivity_raster* corresponde al ráster de transmisividad o trasmisibilidad, *out_direction_raster* es el ráster de

dirección de salida de flujos y *out_magnitude_raster* representa el ráster de salida de magnitud del vector de velocidad del flujo; los últimos dos son opcionales (ESRI, 2022).

Como ejemplificación se tiene que:

$$\begin{aligned} & \text{Out_DarcyFlow} \\ &= \text{DarcyFlow}(\text{"carga_hid"}, \text{"porosidad_efectiva"}, \text{"espesor_saturacion"}, \text{"transmisibilidad"}) \end{aligned} \quad (57)$$

Donde, *"carga_hid"* es el ráster del nivel piezométrico, *"porosidad_efectiva"* es el ráster de la porosidad efectiva, *"espesor_saturación"* representa el ráster del espesor de saturación y *"Transmisibilidad"* es el ráster correspondiente a la transmisibilidad del medio.

6.9.1.5 Distancia euclidiana

La distancia euclidiana es aquella distancia ordinaria que se encuentra entre dos puntos en un espacio euclídeo, es decir, que cumple con los axiomas de Euclides de la geometría, principalmente el que dice que dados dos puntos se pueden trazar una recta que los une. La distancia euclidiana se deduce a partir del teorema de Pitágoras (Trèves, 1995).

En el programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* que es un Sistema de Información Geográfica, hay herramientas para el cálculo de la distancia euclidiana, en estos parámetros la distancia euclidiana se refiere al espacio desde cada celda del ráster hasta el origen más cercano. Sus usos más comunes son para conocer distancias en poblaciones en un mapa, hacer contornos de zonas de inundación a las márgenes de un río, o bien, para marcar el derecho de vía en las carreteras o vías de comunicación.

La distancia euclidiana se calcula desde el centro de la celda de origen hasta el centro de cada una de las celdas circundantes. El algoritmo euclidiano dice que, para cada celda, la distancia a cada celda de origen se determina al calcular la hipotenusa con coordenadas *"X máxima"* y *"Y máxima"*. Este cálculo deriva la verdadera distancia euclidiana, en vez de la distancia de la celda. Se determina la distancia más corta a un origen, y si es menor que la distancia máxima especificada, el valor se asigna a la ubicación de la celda en el ráster de salida (ESRI, 2022).

Para el cálculo de la distancia euclidiana dentro del programa se requiere de la entrada de algunos elementos, los cuales son (ESRI, 2022):

- I. Ráster o datos de origen de entidad de entrada, las cuales son ubicaciones de origen, en casos particulares pueden ser puntos como pozos, o instrumentación; líneas como fallas geológicas o carreteras; o áreas, como colonias en una población.
- II. Distancia máxima, es el umbral que los valores de distancia acumulada no pueden superar, que es hasta el borde del ráster de salida.
- III. Tamaño de la celda de salida, que representa el tamaño de la celda del ráster de salida que se va a crear, ese valor se define previamente con la escala a la que se está trabajando el modelo o mapa.
- IV. Ráster de dirección de salida, que contiene la dirección calculada en grados, a la que cada centro de celda se encuentra del centro de la celda de origen más próximo (es un ráster opcional), el rango es desde los 0° hasta los 360°.
- V. Método de distancia, que especifica si la distancia se va a calcular basándose en un método planar (cálculo de distancia en un sistema cartesiano o de dos dimensiones, que es la opción

predeterminada) o en un método geodésico (el cálculo se realiza en el elipsoide, por lo que los datos no cambian, aunque varíe la proyección).

- VI. Datos de barrera de entidad, el cual es un ráster que definen las barreras, normalmente es el polígono de referencia, o fronteras.
- VII. Ráster de dirección hacia atrás, el cual es el ráster de dirección euclidiana hacia atrás de la salida, esta dirección toma la ruta más corta y evita barreras, los valores van desde 0° a 360° y es opcional.

Como resultado de la operación de la herramienta de distancia euclidiana se tiene el ráster de distancia euclidiana de salida, el ráster de distancia identifica para cada celda, la distancia euclidiana hasta la celda de origen más próxima; este ráster de salida es de tipo de punto flotante.

La línea de programación en *Python* que se utiliza dentro del programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* como base es la siguiente:

```
EucDistance(in_source_data,{maximum_distance},{cell_size},{out_direction_raster},{distance_method},  
{in_barrier_data},{out_back_direction_raster}) (58)
```

Donde:

In_source_data es el elemento origen de entrada, *máximum_distance* es el umbral de valores de distancia acumulada que no pueden superar, *cell_size* es el tamaño de la celda de salida, *out_direction_raster* es el ráster de salida de dirección euclidiana, *distance_method* es el método a utilizar (“PLANAR” o “GEODESIC”), *in_barrier_data* es el dataset que define las barreras y *out_back_direction_raster* es el ráster que representa la dirección euclidiana hacia atrás de salida (ESRI, 2022).

Como ejemplificación se tiene que:

```
Out_EucDistance = EucDistance (“carretera”,200,25,“PLANAR”,“Poligono_referencia”) (59)
```

Donde, “carretera” es el ráster del elemento origen que en este caso es una carretera, con un valor de máxima distancia de 200 metros, un tamaño de celda de 25 unidades, mientras que el método a utilizar es “PLANAR” y como barrera se toma “Polígono_referencia”.

El conjunto de herramientas dentro de la paquetería del programa de Sistemas de Información Geográfica conocido como *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*, provee los algoritmos necesarios para la realización idónea de modelos de interpolación lineal, determinación de derechos de vía, superposiciones ponderadas para análisis de redes de flujo, análisis de riesgo, análisis, álgebra de mapas y análisis multicriterio en general.

6.10 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es aquel que se utiliza para emitir un juicio comparativo entre proyectos, modelos, o medidas heterogéneas, es decir, que no tienen una relación directa como tal (Taboada, Ordóñez, Bustó, & Martínez-Alegría, 2000).

El método del análisis multicriterio pertenece a la teoría de la decisión, fundamentada en la lógica según la cual una decisión es la elección entre varias alternativas. Estas alternativas pueden ser acciones o hipótesis sobre un fenómeno u objeto a incluir en un conjunto (López Lambraño, 2006).

Las bases para evaluar una decisión son los criterios, un criterio según su definición es un principio o norma según el cual se puede conocer la verdad, tomar una determinación u opinar o juzgar sobre un tema determinado (RAE, Real Academia Española, 2020).

En un análisis multicriterio intervienen más de dos criterios para tomar una decisión ante una problemática o modelación. Estos criterios pueden ser de dos tipos: factores y restricciones (López Lambraño, 2006).

- I. Un factor es un criterio que realza o reduce la viabilidad de una alternativa específica y se expresa en una escala continua.
- II. Una restricción es un criterio de exclusión que permite limitar las alternativas bajo consideración y adopta únicamente dos valores, los cuales son: (0 y 1) o (SI/NO).

A los criterios determinados se les aplica una regla de decisión, que es el proceso por el cual dos criterios son seleccionados y combinados para conseguir una evaluación determinada (López Lambraño, 2006).

6.10.1 Principales métodos de análisis multicriterio

Existen varios métodos de análisis multicriterio, pero los más destacables para el riesgo geohidrológico o vulnerabilidad por agua subterránea y la determinación de agua subterránea son el método *DRASTIC* y *ALPRIFT*, respectivamente.

El método ***DRASTIC*** toma su nombre por sus siglas en inglés (*Depth – Recharge – Aquifer – Soil – Topography – Impact – Conductivity*), y es uno de los métodos más citados alrededor del mundo para la zonificación o mapeo de zonas con vulnerabilidad de agua subterránea. El método *DRASTIC* toma en cuenta siete criterios para crear un mapa de vulnerabilidad de agua subterránea, estos factores son: la profundidad del nivel freático, la red de flujo de agua subterránea, el medio acuífero, el medio poroso o suelo, la pendiente del terreno, el impacto de la zona vadosa y las conductividades hidráulicas (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021).

El método *DRASTIC* (y todos los métodos basados en índices o criterios) clasifica cada criterio y aplica calificaciones específicas para cada categoría. También asigna ponderaciones estándar para cada factor. Enseguida suma todas las clases ponderadas o reclasificadas para producir el índice de vulnerabilidad final (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021).

El método *ALPRIFT* toma su nombre por sus siglas en inglés (*Aquifer – Land – Pumping – Recharge – Impacts – Fault – Table*), este método es muy parecido al anterior, con la diferencia que este se enfoca en el cálculo del agua subterránea, mientras que el *DRASTIC* indica las vulnerabilidades. En el método *ALPRIFT* intervienen siete criterios para crear un mapa de presencia de agua subterránea, estos criterios son: El medio acuífero, el uso de suelo, el bombeo de agua subterránea, la recarga del acuífero, los impactos instigados por el espesor de saturación, la distancia de las fallas geológicas y el nivel freático del acuífero (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021).

El método *ALPRIFT* también es un sistema de calificación de criterios, en el cual las variaciones locales de cada uno de los criterios de los rásteres que intervienen tienen un peso o valor cualitativo y/o cuantitativo asignado (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021).

Las clasificaciones de los parámetros o criterios y las ponderaciones asignadas o reclasificadas pueden variar de un estudio a otro, ya que no existen reglas claras para la selección de la clasificación y las ponderaciones. La clasificación de los criterios puede afectar significativamente el ráster resultante (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021).

6.10.2 Reclasificación

Las reglas de decisión deben estructurarse en el contexto del objetivo específico perseguido, que en el caso de esta investigación son la determinación de zonas de riesgo geohidrológico, y zonas de ubicación de galerías drenantes.

Una vez verificados los datos de entrada al modelo, en cualquiera que sea el caso de aplicación, es decir, sea el método *DRASTIC*, *ALP RIFT* u otro, se evalúa cada criterio concerniente al mismo, para después crear los mapas en formato ráster, con los cuales se determinan los objetivos previstos para el análisis multicriterio.

Para ello es necesario hacer una reclasificación de las variables de los rústeres creados, con base a los criterios seleccionados. A cada celda del ráster se le asigna un valor de salida de 0 ó 1 basado en los criterios técnicos, si el criterio cumple el valor de salida asignado es 1, y en caso contrario su valor asignado es 0 (López Lambraño, 2006).

6.10.3 Álgebra de mapas

El álgebra de mapas incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas ráster de entrada para producir una o varias capas ráster de salida. Por operador se entiende un algoritmo que realiza una misma operación en todas las celdas de una capa ráster. Cada capa ráster es una matriz de números y la operación se realiza para todos los números de la matriz, por tanto, para todas las celdillas de la capa ráster. Sin embargo, aunque ambas operan sobre matrices, el álgebra de mapas tiene poco más que ver con el concepto matemático de álgebra matricial (Alonso Sarría, 2006).

El álgebra de mapas permite tener acceso a herramientas, operadores, funciones y clases de análisis espacial a través del álgebra. En su forma más básica, se especifica un ráster de salida a la izquierda de un signo igual (=) y las herramientas, operaciones y sus parámetros a la derecha (ESRI, 2022).

El álgebra de mapas puede ejecutar declaraciones simples, pero la potencia del lenguaje es evidente al crear declaraciones y modelos complejos. En los Sistemas de Información Geográfica existen tres maneras de utilizar álgebra de mapas:

- I. La herramienta calculadora ráster o calculadora de mapas.
- II. La ventana de *Python*.
- III. Su entorno de desarrollo integrado *Python*.

El que se utiliza para fines de esta investigación es la calculadora de mapas o ráster, esta herramienta ejecuta las expresiones del álgebra de mapas, es decir operadores de suma, resta, multiplicación, división e incluso booleanos (*AND*, *OR*, *NOT*). La herramienta tiene una interfaz de calculadora fácil de utilizar desde la cual se crean la mayoría de las declaraciones del álgebra de mapas simplemente al hacer clic en los botones. La calculadora ráster no se ha diseñado para

reemplazar a otras herramientas de análisis espacial como la superposición difusa, entre otros. En la **Figura 6.13**, se observa la interfaz de la calculadora de mapas en *ArcMap 10.3*.

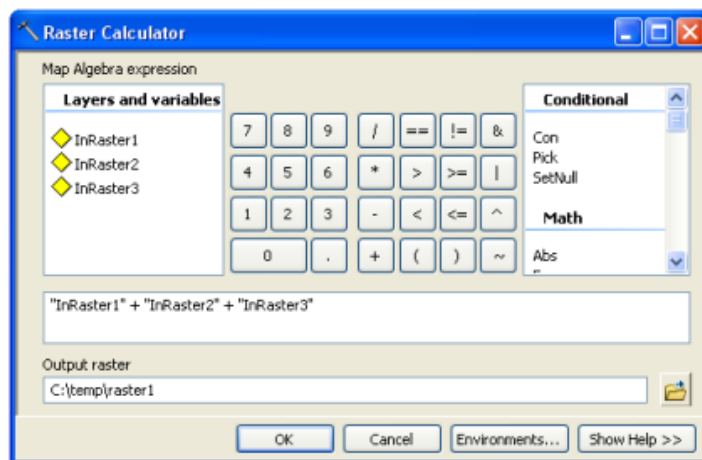


Figura 6.13. Interfaz de calculadora ráster o de mapas, tomada de (ESRI, 2022).

6.10.4 Solución del análisis multicriterio

Una vez concluida las reclasificaciones de las capas, mapas o rásteres para cada uno de los criterios técnicos seleccionados, se combinan utilizando el operador multiplicación o el booleano “AND”, con la ayuda de la herramienta calculadora de mapas o ráster, mencionada anteriormente (López Lambráño, 2006). Al realizar el álgebra de mapas con la calculadora ráster, se obtiene un mapa final o resultante del análisis multicriterio, en el cual se muestra la combinación de factores que intervienen en el análisis, permitiendo localizar, por ejemplo, la vulnerabilidad por agua subterránea del método *DRASTIC*, la determinación general de agua subterránea en el caso del método *ALPRIFT*, o bien, las zonas de riesgo geohidrológico y ubicación de galerías drenantes, como es el caso de esta investigación.

6.11 Modelo conceptual

Un modelo conceptual es una representación gráfica y esquemática del mejor conocimiento actualizado de las partes que conforman un sistema. Se realiza entrelazando los conceptos que se utilizan dentro de ese sistema único, para ayudar al usuario del modelo a conocer, comprender o simular un tema específico y su relación con los demás en el modelo (Fernandes, Cruz, Figueira, & Prada, 2020).

Los modelos conceptuales pueden ser de cualquier campo de la ciencia, ya sean exactas o sociales, es decir, pueden desarrollarse desde sistemas de relación de identidad, epistemológicos, metafísicos; hasta modelos conceptuales físicos, matemáticos, geológicos o geotérmicos (Fernandes, Cruz, Figueira, & Prada, 2020).

Un modelo conceptual geológico-hidrológico necesita principalmente tres aportes de datos para poder realizarse, los primeros son los estudios preliminares, enseguida la exploración y por último realización de sondeos (Alonso Sarría, 2006).

- I. **Estudios preliminares.** - Los estudios preliminares pueden ser de diversos tipos, pero normalmente se opta por realizar la secuencia mencionada:
 - a) Información no geológica.
 - b) Gestión de impacto ambiental.
 - c) Colección de base de datos.
 - d) Revisión de literatura.
 - e) Imágenes por satélite
- II. **Exploración.** - En el caso de la exploración se prefiere buscar datos sobre:
 - a) Actividad volcánica, sísmica o geotérmica.
 - b) Topografía.
 - c) Geología.
 - d) Geoquímica.
 - e) Geofísica.
 - f) Hidrología
 - g) Geohidrología
 - h) Entre otros
- III. **Sondeos.** - Por último, la fase de sondeos, en la que el objetivo de realizar sondeos es definir las condiciones geológicas del sitio con sus perfiles estratigráficos, así como las propiedades físico-mecánicas del suelo y todas las características del mismo, necesarias para los cálculos y la propuesta de proyectos correspondientes, además de prevenir las posibles variaciones que introducirán en el terreno las obras propuestas. La fase de sondeos engloba una secuencia de campo que se debe realizar, la cual consiste en:
 - a) Sondeos con extracción de núcleos.
 - b) Wire – line.
 - c) SPT.
 - d) Avance controlado.
 - e) Pruebas de laboratorio.
 - f) Pruebas de humedad.
 - g) Compresión simple.
 - h) Compresión triaxial
 - i) Mediciones de instrumentación
 - j) Presión en piezómetros
 - k) Nivel freático en tubos de observación
 - l) Desplazamientos en inclinómetros
 - m) Datos hidráulicos en estaciones climatológicas
 - n) Registro geofísico

En la realización de un modelo conceptual geohidrológico, no siempre es común contar con la totalidad de la información mencionada anteriormente, pero es indispensable tener al menos información geológica, hidrológica, geofísica, geotécnica y geohidrológica para poder representar de manera adecuada el comportamiento geohidrológico del sitio de estudio.

Para la conformación del modelo conceptual del sitio de riesgo geohidrológico la Bahía Salsipuedes, se toman en cuenta diversos conceptos que intervienen en el sistema, como son la topografía, la geología del sitio, la geofísica, los datos geotécnicos, los sondeos con estratigrafías, la correlación

de los sondeos con la instrumentación para obtener los datos piezométricos de cada instrumento de monitoreo, la hidrología, así como la geohidrología del lugar, siendo este último el principal rubro de alimentación del modelo.

7 METODOLOGÍA

La metodología se puede definir como el conjunto de procedimientos ordenados que sigue una investigación científica con el fin de alcanzar uno o varios objetivos (RAE, Real Academia Española, 2019); estos objetivos pueden ser desde la comprobación de hipótesis, hasta la generación de leyes que rigen un comportamiento o fenómeno físico.

En esta investigación, la metodología a realizar es una serie de pasos que nos lleva a calcular o modelar el comportamiento geohidrológico general de la Bahía Salsipuedes; los principales patrones de comportamiento geohidrológico que se necesitan analizar quedan por sentado en los objetivos particulares y general de esta investigación. Una manera de esbozar la metodología que se lleva a cabo en esta investigación geohidrológica de la Bahía Salsipuedes se puede observar en la **Figura 7.1**

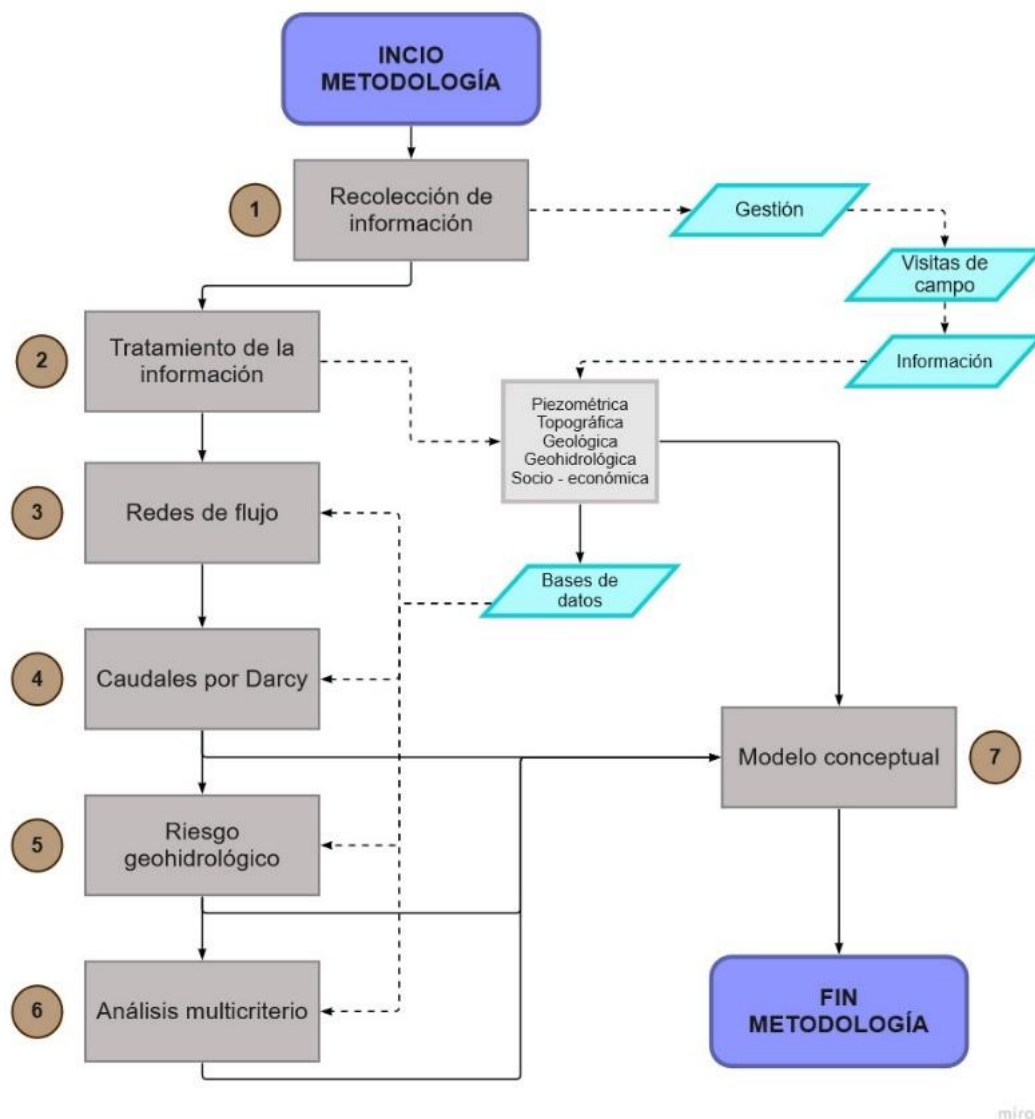


Figura 7.1. Metodología general de la investigación geohidrológica en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede ver en la **Figura 7.1**, el primer paso a seguir en esta metodología general de esta investigación es la recolección de la información; una vez teniendo la información necesaria se hace un procesamiento para la obtención de una base de datos de cada uno de los rubros de interés, es decir, bases de datos piezométricos, geohidrológicos y socioeconómicos; y tratamiento en un programa de SIG (en este caso *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*), para la información topográfica y geológica.

Enseguida, con los datos provenientes de la información recabada se proceden a realizar las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes, con las cuales será posible generar un cálculo de los caudales por la Ley de Darcy. Teniendo los caudales es factible generar un modelo de riesgo geohidrológico de la zona, para después hacer un análisis multicriterio que permita localizar las obras hidráulicas que permitan abatir los flujos sub – superficiales de la zona, en este caso se utilizarán criterios para la localización de galerías drenantes.

Por último, teniendo la información piezométrica, topográfica, geológica, hidrológica, geofísica, caudales, localización de zonas de riesgo geohidrológico y ubicación de galerías, se procede a realizar un modelo conceptual que establezca una relación de cada una de las variables que rigen el comportamiento geohidrológico de la zona de mayor riesgo en la Bahía Salsipuedes.

7.1 Recolección de información

La recolección de información consiste en la obtención de datos piezométricos, topográficos, geológicos, geofísicos, hidrológicos, geotécnicos, socio – económicos, ambientales, climatológicos, entre otros. Esta información puede obtenerse por diferentes medios, el primero es la revisión de bibliografía y bases de datos académicas; el segundo es por gestiones gubernamentales que permitan acceso a la información de la zona de estudio; y el tercero, es por realización de propias visitas de campo para medición en instrumentación, levantamiento topográfico de elementos en exposición y toma de fotografías de la zona de estudio a manera de evidencia.

7.1.1 Revisión bibliográfica

Como se puede ver en la sección de “*Estado del arte*” de este documento, se hizo una revisión en la base de datos bibliográficos *SCOPUS*, con la finalidad de obtener una mejor perspectiva de la situación actual concerniente a investigaciones de flujo de aguas subterráneas, sub – superficiales y deslizamiento de tierras en carreteras. La revisión se hizo tomando en cuenta la información generada en los últimos 5 años, es decir, de 2018 a 2022. Estas investigaciones dejó como resultado el conocimiento de algunas metodologías que se toman como base para la realización de esta investigación; tales son, el método de superposición difusa ponderada conocida como *Fuzzy – WOM* por sus siglas en inglés (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021), (Thapa, Gupta, Haque, & Kaur, 2020), con el que se pretende calcular el caudal por Darcy, así como los análisis multicriterio denominados *ALPRIFT* (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021) y *DRASTIC* (Baalousha, Tawabini, & Seers, 2021), con los que se da una idea básica para la obtención del riesgo geohidrológico y ubicación de galerías drenantes en zonas de caudales elevados.

La siguiente parte de la revisión de la bibliografía se realizó en literatura de tópicos relacionados con la investigación, es decir, agua subterránea y redes de flujo; esta búsqueda de información queda plasmada en el *Marco teórico* de este documento, en esa sección también se pueden observar parámetros, criterios, metodologías e ideas para resolver los objetivos de la investigación, tales

como, valores de conductividad hidráulica, porosidad efectiva, transmisibilidad, geología de rocas y fallas, parámetros para el análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, datos de evaluación de riesgo, entre otros factores.

También se hizo revisiones en páginas de internet de dependencias gubernamentales, tal es el caso de *INEGI* (INEGI, Mapa geológico Ensenada, B.C., 2003), de la cual se extrajeron formatos “*shape*” de la geología del sitio, así como las fallas geológicas presentes en la zona; además, se hizo una revisión de la normativa *SCT* (*SCT*, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017), de la que se obtuvieron parámetros o criterios para la construcción de galerías drenantes, que se utilizarán en el análisis multicriterio, así como datos sobre los elementos en exposición, escalas de vulnerabilidad y *TDPA* (*SCT*, Datos viales, 2019) para el análisis de pérdidas.

7.1.2 Gestión en dependencia de gobierno

La gestión o solicitud de información se hizo a la dependencia de gobierno, en este caso, es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (*SCT*) y Caminos y Puentes Federales (*CAPUFE*), que a su vez tienen sub – contratada a la empresa *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* para el monitoreo de la instrumentación piezométrica de la Bahía Salsipuedes.

Se elaboró una carta de solicitud de información piezométrica de un periodo mayor a 12 meses dirigida al Ing. Julio César Inzunza Castro, subgerente técnico de la coordinación regional I Tijuana de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (*CAPUFE*) con fecha de entrega el día 27 de enero de 2021.

La carta de solicitud pide de la manera más atenta la proporción de un listado de la instrumentación colocada en la Bahía Salsipuedes (tanto tubos de observación, como piezómetros tipo Casagrande), así como las mediciones del monitoreo piezométrico realizado por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*, y las plantas de ubicación de dichos elementos. El mínimo de mediciones mencionado en la carta fue de 12 meses, pero de manera verbal se solicitó que, de ser posible, este periodo se ampliara a más años de mediciones. Se adjunta la carta en la sección de *Anexos*.

Se asistió el 27 de enero de 2021 a las 9:45 horas a la Delegación regional I ubicada en carretera Tijuana – Ensenada km 9+890, No. 1356, Playas, Jardines Playas de Tijuana, Tijuana, Baja California, México; en donde se entregó la solicitud antes mencionada. Tres días después se tuvo respuesta afirmativa por vía telefónica por parte de la dependencia de gobierno, en donde se expuso que la información iba a ser proporcionada por el Ing. Miguel Gallardo Contreras, representante legal de *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*

El día lunes 1 de febrero de 2021, el personal del Ing. Gallardo Contreras proporcionó la siguiente información.

- Listado de instrumentación piezométrica instalada en la Bahía Salsipuedes, con un total de 101 instrumentos.
- Listado de sondeos en la Bahía Salsipuedes.
- Estratigrafías de algunos sondeos de la Bahía Salsipuedes.
- 3 plantas de ubicación de instrumentación en formato *DWG* de *AutoCAD*, con curvas de nivel a cada metro, comprendiendo la primera planta el kilómetro 84 al 87, la segunda planta del kilómetro 88 al 93 y la tercera planta del kilómetro 94 al 99.

- Las mediciones piezométricas de los 101 instrumentos, con datos desde enero de 2018 hasta enero de 2021 (el resto de los datos de 2021 se fueron anexando en solicitudes posteriores o visitas de campo).
- Informes geotécnico general de la Bahía Salsipuedes de los kilómetros 84+000 al 98+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (TGC, Gallardo, & Bermúdez, Informe geotécnico Bahía Salsipuedes, 2018).
- Informe hidrológico del kilómetro 94+000 al 98+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (TGC & Mendoza, Informe hidrológico Bahía Salsipuedes, 2017).
- Informe geofísico general de la Bahía Salsipuedes del kilómetro 84+000 al 98+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (TGC & Santoyo V., Informe geofísico Bahía Salsipuedes, 2017).
- Informe geológico general de la Bahía Salsipuedes del kilómetro 84+000 al 98+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (TGC & Moser, Informe geológico Bahía Salsipuedes, 2016).
- Informe de impacto ambiental del kilómetro 88-89+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (TGC & Juárez, Manifiesto de impacto ambiental Bahía Salsipuedes, 2016).
- Informes de monitoreo de los kilómetros 84 al 98 (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).
- Tablas de inspección visual de obras menores y puentes en la carretera escénica Tijuana – Ensenada (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018).
- Catálogos de conceptos y presupuestos base de proyectos de estabilización de los kilómetros 86, 88, 90, 93, 94, 95-96 y 98.

La información antes mencionada fue recibida en las oficinas de *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* sucursal Ensenada, localizadas en calle Río Blanco No. 417, Colonia Valle Dorado, Ensenada, Baja California, México; por medio de un disco duro externo de capacidad de 1 TB de memoria.

De esta información proporcionada se pudieron obtener datos piezométricos, geológicos, geofísicos, hidrológicos, climatológicos, geotécnicos, de exposición, de vulnerabilidad, e incluso evidencia fotográfica de algunos años atrás.

7.1.3 Visitas a campo

Una vez teniendo la información proporcionada por la dependencia de gobierno, y la información proveniente de la bibliografía se procede a la realización de visitas de campo.

Las visitas de campo son aquellas en las que la persona interesada, técnico, investigador o personal capacitado, va al sitio de estudio para hacer una revisión del estado actual de la zona.

Los objetivos principales de las visitas a campo en la Bahía Salsipuedes fueron realizar las mediciones del monitoreo mensual a la instrumentación piezométrica para completar los datos del año 2021; así como tomar evidencia fotográfica de los elementos en exposición en la zona de estudio, la cual sirve para evaluar la vulnerabilidad de cada elemento en la Bahía Salsipuedes; y, por último, localización de puntos de control geohidrológicos, con ayuda de un *GPS Garmin* de error de 3 metros.

Se hicieron un total de 7 visitas de campo a lo largo de la investigación, es decir desde la entrada a posgrado en agosto de 2020 hasta la finalización del cuarto semestre en junio de 2022.

La primera visita de campo fue para reconocimiento y localización de la instrumentación colocada en la Bahía Salsipuedes, se llevó a cabo el día 23 de septiembre de 2020, con una duración de 4 horas. En esta visita se hizo un recorrido en solitario (sin presencia de la dependencia de gobierno o sus sub – contratistas) por la carretera escénica Tijuana – Ensenada desde el kilómetro 98+600 a la altura de la caseta de cobro en San Miguel hasta el mirador del kilómetro 84+000, ida y vuelta.

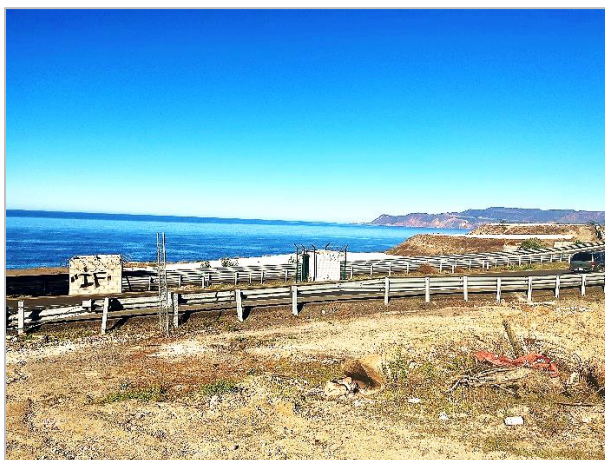


Figura 7.2. Vista hacia mar de la carretera escénica en el km 95+100, durante la primera visita.

La segunda visita de campo se realizó el 15 de febrero de 2021, con una duración de 6 horas. En esta visita se hizo la localización y revisión de cada uno de los instrumentos piezométricos instalados para corroborar su buen funcionamiento, o en dado caso descartarlos en las mediciones de monitoreo futuras. Se pudo observar que, de los 101 elementos instalados en la Bahía Salsipuedes, 11 de ellos se encuentran azolvados, fallados o colapsados, lo que hace imposible su medición; es por ello, que se toma de ahora en adelante un total de 90 instrumentos piezométricos en la Bahía Salsipuedes.



Figura 7.3. Inclinómetro No. 3 en el kilómetro 95+000, durante la segunda visita.

La tercera visita se llevó a cabo el día 21 de abril de 2021, con una duración de 6 horas. En esta visita se hizo una revisión de los elementos en exposición ante riesgo geohidrológico y de deslizamiento de tierras, ubicando un total de 282 elementos en exposición, divididos en 17 tipos de elementos y 7 sistemas (se incluye también el sistema denominado “*Seres vivos*”). Esto con la finalidad de dar una calificación de vulnerabilidad para el análisis de riesgo.



Figura 7.4. Anclas de sujeción en talud de kilómetro 91+450, durante la tercera visita.

La cuarta visita se realizó el día 09 de septiembre de 2021 con una duración de 8 horas, en la cual se midieron los niveles piezométricos de los 90 instrumentos instalados en la Bahía Salsipuedes con ayuda de la sonda eléctrica – hidrofóbica. Esta visita fue guiada por el Ing. Alberto Pelayo Cervantes de TGC Geotecnia S.A. de C.V., y tuvo como finalidad hacer el monitoreo mensual de la instrumentación piezométrica, así como la toma de evidencia fotográfica para los reportes generados por la dependencia de gobierno. La información recopilada en cada instrumento fue levantada con ayuda del Ing. Pelayo y enviada para adjuntar a la base de datos de esta investigación, así como las mediciones de los meses de febrero a agosto de 2021.



Figura 7.5. Medición del tubo de observación 05 del kilómetro 90+000 (cuerpo B), durante la cuarta visita.

La quinta visita se realizó el día 10 de octubre de 2021 con una duración de 9 horas, de igual manera que en la cuarta visita, se midieron los niveles piezométricos de los 90 instrumentos instalados en la Bahía Salsipuedes con ayuda de la sonda eléctrica – hidrofóbica. Esta visita fue guiada por el Ing. Alberto Pelayo Cervantes de TGC Geotecnia S.A. de C.V., y tuvo como finalidad hacer el monitoreo mensual de la instrumentación piezométrica, así como la toma de evidencia fotográfica para los reportes generados por la dependencia de gobierno. La información recopilada en cada instrumento fue levantada con ayuda del Ing. Pelayo y enviada para adjuntar a la base de datos de esta investigación.



Figura 7.6. Medición del piezómetro 03 del kilómetro 95+000 (cuerpo A, sobre trinchera), durante la quinta visita.

La sexta visita se realizó el 15 de diciembre de 2021 con una duración de 8 horas, al igual que las dos visitas anteriores, se midieron los niveles piezométricos de los 90 instrumentos instalados en la Bahía Salsipuedes con ayuda de la sonda eléctrica – hidrofóbica. De la misma manera que en las dos visitas anteriores, esta fue guiada por el Ing. Alberto Pelayo Cervantes de TGC Geotecnia S.A. de C.V., y tuvo como finalidad realizar el monitoreo de la instrumentación, la toma de evidencia fotográfica y la revisión de los elementos en exposición para actualizar posibles daños y modificar la calificación en la escala de vulnerabilidad. La información resultante del monitoreo piezométrico mensual se adjuntó a la base de datos piezométricos para el mes de diciembre, además el Ing. Pelayo envió información del mes de noviembre de 2021, con lo que se completó la base de datos piezométricos a utilizar. Con base a las observaciones en los elementos en exposición, se realizaron modificaciones en la matriz de vulnerabilidad o base de datos de riesgo geohidrológico.

La séptima y última visita se llevó a cabo el 16 de mayo de 2022, con una duración de 3 horas, en la que se realizó un recorrido por el kilómetro 92 para tomar evidencia del estado actual de los taludes a pie de carretera, las obras de estabilización realizadas hasta la fecha, y la visualización del flujo base que emana de manera submarina en la costa. Se tomó evidencia fotográfica que se adjunta en la sección en diferentes secciones de este documento, como en *Resultados y discusiones*.

La información anteriormente mencionada fue revisada, separada y seleccionada, para su uso posterior, ya sea en la generación de bases de datos, como es el caso de la información piezométrica o geohidrológica; o bien, en la generación de modelos como es el caso de la información topográfica

y geológica. Toda esta recopilación de información hace posible la realización de esta investigación con los datos suficientes para sustentarla.



Figura 7.7. Medición del tubo de observación 02 del kilómetro 93+500 (cuerpo B, sobre camino rural), durante la sexta visita.



Figura 7.8. Taludes en el kilómetro 92+100 (vista desde cuerpo A), durante la séptima visita.

7.2 Tratamiento de la información

El tratamiento de la información consiste en la lectura, revisión, análisis y procesamiento de los datos proporcionados por la bibliografía, dependencias de gobierno y visitas de campo durante el proceso de recopilación de la información. Estos datos recopilados se estudian con el fin de encontrar algún comportamiento y se separan en bases de datos o bien en modelos digitales (mapas) que permitan ejercer un uso eficiente de los mismos. La información en esta sección se divide en piezométrica, topográfica, geológica, geohidrológica y socio – económica. La información climatológica, hidrológica y geofísica, se utilizó directamente en la sección de *Descripción del sitio*, en cuanto a la demás información proporcionada, quedó evidenciada en la sección de *Marco teórico*.

7.2.1 Información piezométrica

La información piezométrica comprende el monitoreo mensual de los niveles freáticos y piezométricos de los tubos de observación y piezómetros tipo Casagrande, respectivamente. Esta información fue proporcionada por *TGC Geotecnia, S.A. de C.V.* mediante *SCT-CAPUFE*. La información proporcionada corresponde a dos hojas de cálculo en *Excel*, la primera con la lista de tubos de observación y mediciones desde enero de 2018 a diciembre de 2021; y la segunda con la lista de piezómetros tipo Casagrande y sus mediciones de enero de 2018 a diciembre de 2021. Por lo que se puede decir que el periodo de estudio de los datos tiene una amplitud de 4 años. En la **Tabla 7.1** y la **Tabla 7.2** se presentan extractos de la base de datos generales de información piezométrica.

Tabla 7.1. Extracto de la base de datos piezométricos de tubos de observación. Tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).

Año	Mes	TO_05_88	TO_06_88	TO_07_88
2018	Enero	23.21	97.85	96.58
2018	Febrero	23.58	98.54	97.85
2018	Marzo	24.12	97.52	96.71
2018	Abril	23.89	96.48	95.88
2018	Mayo	23.52	96.32	95.74
2018	Junio	22.98	95.87	95.71
2018	Julio	22.96	95.35	95.63
2018	Agosto	22.92	94.25	95.53
2018	Septiembre	22.93	95.89	95.12
2018	Octubre	22.92	96.11	95.18
2018	Noviembre	22.92	96.15	95.58
2018	Diciembre	22.98	96.58	95.79

Tabla 7.2. Extracto de la base de datos piezométricos de piezómetros. Tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).

Año	Mes	PZM_04_94	PZM_05_94	PZM_06_94
2018	Enero	40.11	57.18	90.12
2018	Febrero	40.28	56.98	90.18
2018	Marzo	40.14	55.78	90.35
2018	Abril	40.08	54.87	90.24
2018	Mayo	39.98	53.96	90.09
2018	Junio	39.85	54.01	89.98
2018	Julio	41.80	53.91	89.91
2018	Agosto	40.37	53.82	89.82
2018	Septiembre	41.17	53.78	89.78
2018	Octubre	40.03	53.83	89.84
2018	Noviembre	40.06	53.89	89.96
2018	Diciembre	39.99	53.95	90.03

Como se puede observar en las tablas anteriores, correspondientes a extractos de la base de datos proporcionada, las características para la tabla de tubos de observación y piezómetros es similar, es decir, en ambas tablas la primera columna corresponde al año en el que se tomó la medición, la segunda columna corresponde al mes de medición o monitoreo, y a partir de la tercera columna se enlistan los instrumentos, ya sean tubos de observación o piezómetros con una nomenclatura que sigue la forma “TO_05_88” o “PZM_04_94”, donde “TO” se refiere a tubo de observación; “PZM” se refiere a piezómetro tipo Casagrande; “05” “04” significa la numeración asignada a ese instrumento, ya que en cada sitio inestable o kilómetro se encuentran varios instrumentos del mismo tipo; y “88” o “94” se refiere al sitio inestable o kilómetro de ubicación.

Las mediciones mensuales para cada instrumento, es decir, las mediciones de tubos de observación y piezómetros, toman como unidad de medida los metros columna de agua (*mca*) en general, aunque los datos de tubos de observación también podrían representarse como metros sobre nivel del mar (*msnm*).

Conociendo las características de la base de datos, mencionadas anteriormente, se procede a realizar series de tiempo de las mediciones con respecto al periodo de 4 años de monitoreo registrado. Las series de tiempo son creadas para cada uno de los kilómetros o sitios de inestabilidad en la Bahía Salsipuedes, los cuales son los kilómetros 84+000, 86+000, 88+000, 89-90+000, 91+000, 92+000, 93+000, 93+500, 94+000, 95-96+000 y 98+000, como se mencionaron en secciones anteriores. A manera representativa se presentan las series de tiempo de los tubos de observación del kilómetro 95 – 96+000 en la **Figura 7.9**.

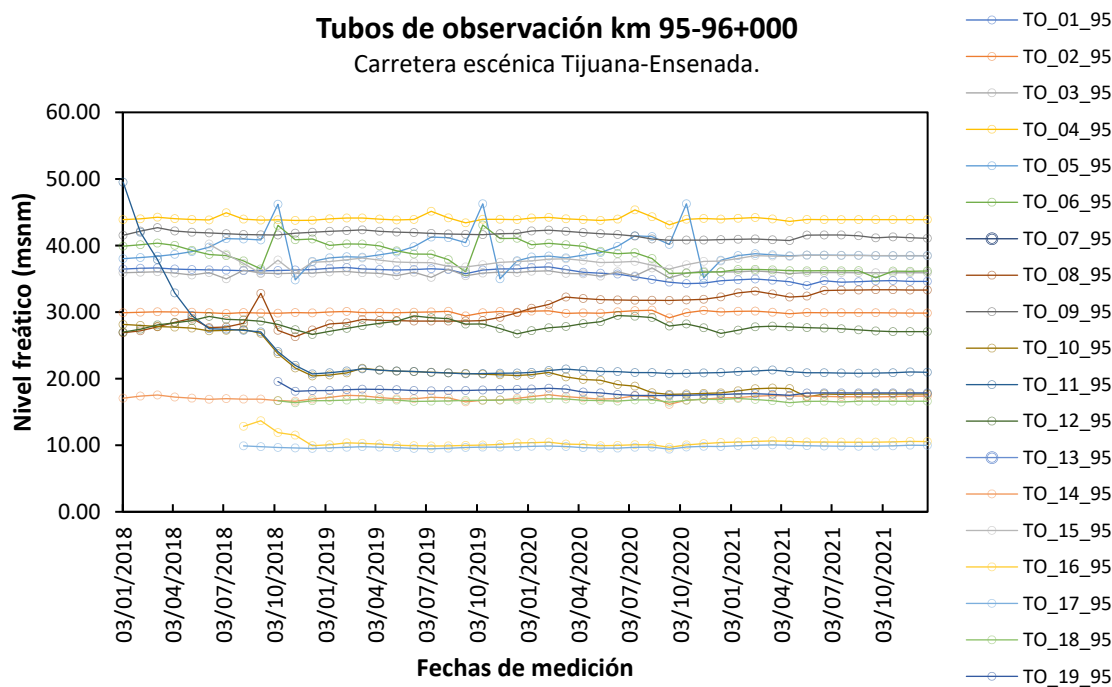


Figura 7.9. Series de tiempo de tubos de observación en el kilómetro 95-96+000.

Como se puede observar en la **Figura 7.9**, hay un total de 19 tubos de observación en el sitio inestable del kilómetro 95 – 96+000, de los cuales el tubo 07 y 13 presentaron fallas y no tienen registros, es decir, esos dos instrumentos son parte de los 11 instrumentos descartados que se mencionaron en secciones anteriores. Los 17 tubos de observación restantes presentan datos, de esos 17 tubos, 11 tienen datos desde enero de 2018 hasta diciembre de 2021 y 6 de ellos a partir de junio – octubre de 2018 a diciembre de 2021, estos son los de nomenclatura TO_15 al TO_19, es decir, los últimos instalados en ese kilómetro.

El comportamiento de las series de tiempo es variado, en la mayoría de los casos y principalmente en el TO_05 se puede observar un comportamiento cíclico con picos o altos niveles piezométricos en temporadas invernales (desde octubre a febrero), lo cual corresponde a la temporada de lluvias estacionarias de la zona (lluvias invernales); como se mencionó en el capítulo de *Descripción del sitio*, el ciclo de lluvias comienza en noviembre y termina en marzo o abril, por lo que el nivel piezométrico y el nivel freático en las series de tiempo aparece un poco desfasado entre el fin de la época de lluvias y el aminoramiento de los niveles subterráneos, dando un tiempo de concentración de 3 meses aproximados para que se muestren los primeros resultados de las lluvias en el agua sub – superficial.

En otros casos, como es el TO_11, presenta comportamientos únicos con altos niveles piezométricos durante el primer año posterior a su instalación, para después tener un comportamiento desacelerado y mantener niveles prácticamente invariables durante tres años, justo cuando encontró su equilibrio freático. El resto de gráficos de series de tiempo de todos los sitios inestables, tanto de tubos de observación, como de piezómetros tipo Casagrande, se encuentran en la sección de *Anexos*.

Conociendo el comportamiento de los datos, y sabiendo que hay una compensación de flujos subterráneos por los picos de grandes niveles piezométricos en temporada invernal y valles por disminución de niveles piezométricos en temporada de verano, se obtiene un promedio del nivel piezométrico para cada uno de los 90 instrumentos instalados en la Bahía Salsipuedes, a este valor se le conocerá de ahora en adelante como *NPM*, que significa “*Nivel piezométrico medio*”.

El NPM es un promedio y como tal, se obtiene de la suma de cada nivel piezométrico medido mensualmente durante el periodo de 4 años comprendido desde enero de 2018 hasta diciembre de 2021. En algunos casos como los tubos de observación 15 al 19 del kilómetro 95 – 96+000, el tubo 01 del kilómetro 98+000, así como la totalidad de piezómetros de los kilómetros 95 – 96+000 y 98+000; sólo se toman en cuenta para la obtención de este promedio, las mediciones desde que se instaló el instrumento, es decir, desde su primera medición (las cuales varían entre mayo – octubre de 2018), hasta diciembre de 2021.

Como se mencionó anteriormente la nomenclatura que manejaba la SCT – CAPUFE, para la instrumentación piezométrica era TO o PZM, seguido del número de instalación y ubicación. Pero en algunas ocasiones, se les asignaban más variables como “PGI” o “TGC” refiriéndose a la empresa que se había encargado de su instalación, para después comenzar un nuevo número de instalación; por ejemplo, en el kilómetro 95 – 96+000, los últimos instrumentos instalados llevan el nombre de PGI_TO_01_95 hasta PGI_TO_04_95, y en realidad se tratan de los instrumentos TO_16 al TO_19 cronológicamente hablando, es por ello que como parte de un tratamiento a la base de datos, se

optó por cambiar esos nombres y continuar con una numeración cronológica y del tipo “TO_01_95”, que se había venido manejando.

Ahora bien, teniendo el *NPM* y la nomenclatura corregida, además de otros datos como las coordenadas *UTM*, profundidad del instrumento, tipo de instrumento, entre otras; es posible crear una base de datos piezométricos, uniendo la información de tubos de observación y piezómetros tipo Casagrande. En la **Tabla 7.3**, se muestra un extracto de la base de datos piezométricos creada para esta investigación.

Esta base de datos piezométricos tiene en la primera columna la nomenclatura actual del instrumento, seguido de la nomenclatura SCT, el sondeo previo en ese instrumento, la abreviación de la nomenclatura actualizada, el tipo de instrumento, la ubicación conforme al cadenamiento de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, las coordenadas X, Y, Z en *UTM*, la profundidad del instrumento, y lo más importante el valor de *NPM* en metros columna de agua.

La base de datos piezométricos de la investigación contiene el nivel piezométrico medio de cada uno de los instrumentos funcionales (90 en total), es decir, engloba tanto tubos de observación como piezómetros tipo Casagrande.

Tabla 7.3. Extracto de la base de datos piezométricos de esta investigación.

Instrumento (nomenclatura actual)	Instrumento (nomenclatura SCT)	Sondeo correspondiente al instrumento	Abreviación (de nomenclatura actual)	Ubicación conforme cadenamiento CETE* (Km)	Coordenada UTM* en X	Coordenada UTM* en Y	Coordenada UTM* en Z	Profundidad del instrumento (m)	Nivel piezométrico medio general "NPM" (mca)
TO 01 84+000	TO 01 84+000	LIM-PHI-01	TO_01	84.00	518136.00	3538900.00	228.00	101.00	151.439
TO 02 84+000	TO 02 84+000	SAC-01	TO_02	84.00	518230.00	3538923.00	215.00	61.00	0.000
TO 01 86+000	TO 01 86+000	WL-02	TO_01	86.00	519701.00	3538563.00	149.00	88.00	73.229
TO 02 86+000	TO 02 86+000	S/R*	TO_02	86.00	520097.00	3538599.00	130.00	53.00	95.487
PZM 01 86+000	PZM 01 86+000	SMC-01	PZM_01	86.00	519893.00	3538586.00	140.00	40.00	102.633
PZM 02 86+000	PZM 02 86+000	S/R*	PZM_02	86.00	520102.00	3538604.00	130.00	48.00	86.759
PZM 03 86+000	PZM 03 86+000	S/R*	PZM_03	86.00	520101.00	3538598.00	130.00	38.00	93.246
TO 01 88+000	TO 01 88+000	LIM-01	TO_01	88.00	521339.00	3537755.00	84.00	72.00	84.761
TO 02 88+000	TO 02 88+000	S/R*	TO_02	88.00	521337.00	3537759.00	88.00	27.00	90.156
TO 03 88+000	TO 03 88+000	SM-02	TO_03	88.00	521340.00	3537765.00	40.00	40.00	6.036
TO 04 88+000	TO 04 88+000	WL-10	TO_04	88.00	521609.00	3537675.00	51.00	45.00	10.759
TO 05 88+000	TO 05 88+000	WLG-02	TO_05	88.00	521599.00	3537779.00	85.00	63.00	25.909
TO 06 88+000	TO 06 88+000	WLG-04	TO_06	88.00	521280.00	3537859.00	96.00	90.00	96.744
TO 07 88+000	TO 07 88+000	WLG-03	TO_07	88.00	521288.60	3537876.45	95.00	95.00	95.919
PZM 01 88+000	PZM 01 88+000	S/R*	PZM_01	88.00	521231.79	3537860.84	84.00	25.00	85.342
PZM 02 88+000	PZM 02 88+000	SM-01	PZM_02	88.00	521270.00	3537922.00	101.00	30.00	0.000
PZM 03 88+000	PZM 03 88+000	S/R*	PZM_03	88.00	521273.00	3537929.00	104.00	70.00	105.452

7.2.2 Información topográfica

Como se mencionó en la *Recopilación de la información*, la topografía de la Bahía Salsipuedes fue proporcionada por parte de *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* por medio de *SCT – CAPUFE*. La topografía proporcionada consta de 3 archivos en formato *DWG* para *AutoCAD*, cada archivo tiene la siguiente nomenclatura:

- I. TOPOGRAFÍA KM 84-87.dwg
- II. TOPOGRAFÍA KM 88-93.dwg
- III. TOPOGRAFÍA KM 94-99.dwg

Como el nombre de cada uno lo dice, la topografía comprende los tramos del kilómetro 84+000 al 88+000, para el primer archivo; en el segundo está la topografía desde el kilómetro 88+000 al 94+000; y el último del kilómetro 94+000 al 99+000.

Dentro de cada archivo hay curvas de nivel a cada metro, donde la cota máxima es de 430 msnm y la mínima es de -2 msnm; los archivos en formato *DWG* además cuentan con otros “*layers*” o capas que designan derechos de vía, la carretera escénica, instrumentos piezométricos, construcciones varias, entre otros.

Ya que sólo se necesitan las curvas de nivel se procede a realizar una copia donde se unan únicamente los tres segmentos de curvas de nivel y se depure de las demás capas mostradas. A este nuevo archivo se le denominó “*TOPO BH CORRECCIÓN.dwg*”, llamado así porque corresponde a la topografía (*curvas de nivel*) corregidas de la Bahía Salsipuedes (*BH*). Esta topografía comprende desde el kilómetro 84+000 hasta el kilómetro 99+000, y solamente muestra las curvas de nivel a cada metro, las cuales serán utilizadas después para la elaboración del modelo digital de elevaciones en *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*.

Del contorno de las curvas de nivel proporcionadas por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* se obtiene una línea límite o de contorno que toma el nombre de polígono de referencia. Esta línea se toma de ahora en adelante como la frontera o límite de la Bahía Salsipuedes con el exterior, y es la que comprende un área aproximada de 35 kilómetros cuadrados, mencionada en la *Descripción del sitio e Introducción*.

Dentro de la topografía, también se encuentra delimitada la franja de derecho de vía que tiene la carretera escénica Tijuana – Ensenada, de 300 metros hacia cada lado del eje de la misma.

7.2.3 Información geológica

La información geológica proviene de varias fuentes de información, la primera y más importante es proporcionada por la literatura de la extinta Secretaría de Obras Públicas (SOP, 1975), ya que en el libro “Deslizamientos en la autopista Tijuana – Ensenada” de 1975, se desglosa detalladamente la geología de la Bahía Salsipuedes, así como su comportamiento ante diferentes agentes perturbadores o amenazas, como son las lluvias estacionales, sismicidad, e incluso el peso propio de las diferentes obras construidas en la zona.

La segunda fuente de información son los estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos, así como los sondeos con estratigrafías, proporcionados por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*, los cuales fueron realizados por orden de la *SCT – CAPUFE*.

La tercera y última fuente de información, es la página de internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), de donde se extrajeron los archivos en formato “*shape*” o *shp*, de la geología de la zona, así como la presencia de las fallas geológicas.

La información geológica proveniente de la *SOP* (1975), fue integrada en las secciones de *Antecedentes*, *Estado del arte*, *Descripción del sitio* y *Justificación*. Mientras que la información geológica cuya fuente es *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*, además de estar en la sección de *Descripción del sitio*, se encuentra representada por las estratigrafías de los sondeos realizados en la zona de estudio. Dichas estratigrafías y sondeos se utilizarán para la realización del modelo conceptual del sitio de riesgo geohidrológico, así como en los análisis multicriterio.

En la Bahía Salsipuedes se han realizado un gran número de sondeos, y estos se pueden dividir a su vez en diferentes tipos. Entre los que principalmente destacan el tipo *Wire – line*, para perforación de suelos rocosos con extracción de núcleos de muestra; el *SPT* o sondeo de penetración estándar, principalmente realizado en suelos sueltos, como arenas o arcillas fracturadas; y el *SAC* o sondeo de avance controlado, que se realiza en principalmente en conglomerados y de los cuales no se extrae muestra.

Aunque también se pueden presentar casos donde se hagan sondeos mixtos, es decir, una mezcla de alguno de los tres anteriores; o bien, sondeos tipo *foralim* que es una variante del avance controlado, donde se utiliza el equipo *LIM* que mide la energía necesaria para perforar suelos duros (Santoyo V. & Hinojosa, Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico, 2012).

Según la información proporcionada (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021), los sondeos de los que se tienen registro en la actualidad, es decir, los que cuentan con estratigrafías son los que se muestran en la **Tabla 7.4**. Los sondeos más profundos se encuentran en los primeros kilómetros de la Bahía Salsipuedes, es decir, en el kilómetro 84+000, 86+000, 88+000 y 89 – 90+000, siendo el más profundo el denominado LIM-PHI-01 del kilómetro 84+000 con una profundidad de 101 metros, este sondeo es del tipo FORALIM.

Además, la tabla proporciona información como el tipo de instrumentación que se colocó en el barreno realizado para el sondeo dado, así como coordenadas UTM con las cuales se puede plasmar la ubicación exacta del sondeo mediante un sistema de información geográfica, es por ello que en la **Figura 7.10**, se plasman los sondeos de la Bahía Salsipuedes, según el tipo de técnica utilizada.

Según la **Figura 7.10**, se puede observar que dentro de los kilómetros 88+000 y 89 – 90+000, el principal tipo de sondeo realizado es el *wire line*, mientras que los sondeos mixtos predominan a partir del kilómetro 94+000, hasta llegar al kilómetro 98+000.

Cada sondeo tiene una estratigrafía que nos indica los tipos de rocas en las diferentes profundidades, diferenciando así los estratos, de ahí su nombre. A manera de ejemplo se puede ver la estratigrafía del sondeo denominado WL-01 del kilómetro 92+000 en la **Figura 7.11**, este sondeo fue realizado con el método *Wire line*. Algunas otras estratigrafías se encuentran en la sección de *Anexos*.

Tabla 7.4. Sondeos realizados en la Bahía Salsipuedes hasta diciembre de 2021.

Sondeo	Ubicación conforme cadenamiento CETE* (Km)	Tipo de sondeo	Instrumento colocado (Abrev.)	Coordenada UTM* en X	Coordenada UTM* en Y	Profundidad del instrumento (m)
LIM-PHI-01	84.00	Lim-Phicómetro	TO_01	518136.00	3538900.00	101.00
SAC-01	84.00	Avace controlado	TO_02	518230.00	3538923.00	61.00
WL-02	86.00	Wire line	TO_01	519701.00	3538563.00	88.00
SMC-01	86.00	Mixto	PZM_01	519893.00	3538586.00	40.00
LIM-01	88.00	Lim-Phicómetro	TO_01	521339.00	3537755.00	72.00
SM-02	88.00	Mixto	TO_03	521340.00	3537765.00	40.00
WL-10	88.00	Wire line	TO_04	521609.00	3537675.00	45.00
WLG-02	88.00	Wire line	TO_05	521599.00	3537779.00	63.00
WLG-04	88.00	Wire line	TO_06	521280.00	3537859.00	90.00
WLG-03	88.00	Wire line	TO_07	521288.60	3537876.45	95.00
SM-01	88.00	Mixto	PZM_02	521270.00	3537922.00	30.00
WLG-01	90.00	Wire line	TO_03	522451.00	3536729.00	33.00
WLG-03	90.00	Wire line	TO_04	522468.00	3536731.00	60.00
WLG-02	90.00	Wire line	TO_05	522475.00	3536732.00	50.00
WLG-04	90.00	Wire line	TO_06	522501.00	3536533.00	70.00
WLG-05	90.00	Wire line	TO_07	522508.00	3536824.00	90.00
WL-02	90.00	Wire line	PZM_01	522445.00	3536710.00	41.00
WL-01	90.00	Wire line	PZM_03	522450.00	3536882.00	60.00
S-01	91.00	Penetración Standard	TO_01	522757.00	3535585.00	40.00
S-08	91.00	Penetración Standard	TO_02	522854.00	3535618.00	64.00
S-02	91.00	Penetración Standard	PZM_03	522855.00	3535618.00	43.00
WL-02	92.00	Wire line	TO_01	523153.00	3534547.00	60.00
WL-01	92.00	Wire line	TO_02	523131.00	3534467.00	61.00
PHI-01	92.00	Lim-Phicómetro	TO_03	523173.00	3534262.00	40.00
WL-03	93.50	Wire line	TO_02	523322.00	3533512.00	71.00
WL-02	93.50	Wire line	PZM_02	523196.00	3533432.00	40.50
LIM-01	93.50	Lim-Phicómetro	PZM_03	523322.00	3533507.00	46.00
SMC-01	94.00	Mixto	TO_02	523363.00	3532078.00	45.00
SMC-02	94.00	Mixto	TO_03	523348.00	3532188.00	45.00
SMC-03	94.00	Mixto	TO_04	523436.00	3532162.00	30.00
SMC-04	94.00	Mixto	TO_05	523291.00	3532101.00	41.00
SC-05	94.00	Avace controlado	TO_06	523224.00	3532083.00	22.00
SC-09	94.00	Avace controlado	TO_07	523296.00	3531971.00	30.00
SM-12	94.00	Mixto	PZM_01	523381.00	3532443.00	40.00

SM-13	94.00	Mixto	PZM_02	523385.00	3532370.00	16.00
SM-14	94.00	Mixto	PZM_05	523527.00	3532485.00	60.00
SM-05	94.00	Mixto	PZM_06	523532.00	3532486.00	35.00
SMC-03	95.00	Mixto	TO_07	523498.00	3531601.00	48.00
SMC-04	95.00	Mixto	TO_10	523413.00	3531871.00	60.00
SC-07	95.00	Avace controlado	TO_13	523397.00	3531695.00	30.00
SM-03	95.00	Mixto	TO_14	523283.00	3531280.00	24.00
SM-05	95.00	Mixto	TO_15	523504.00	3531690.00	30.00
ST-04	95.00	Penetración Standard	PZM_04	523532.00	3531801.00	35.00
SM-02	98.00	Mixto	PZM_01	524751.00	3529736.00	45.00
SM-03	98.00	Mixto	PZM_02	524321.00	3529737.00	32.00
SM-02	98.00	Mixto	PZM_04	524586.00	3529732.00	31.00
WL-01	98.00	Wire line	PZM_06	524714.00	3529777.00	17.00

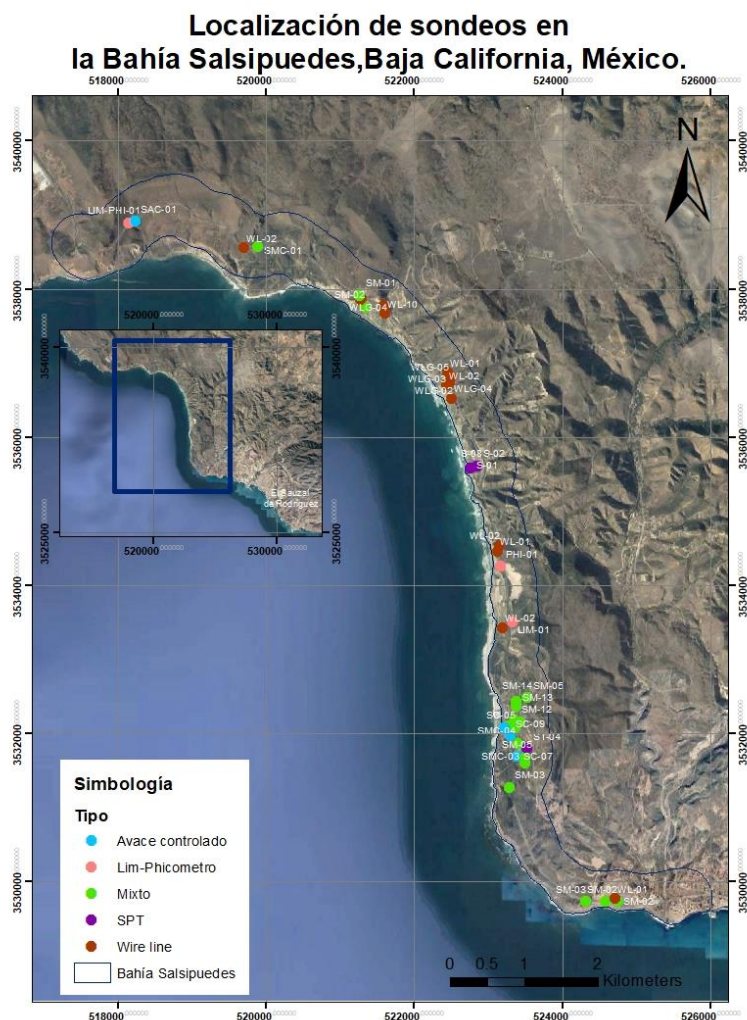


Figura 7.10. Sondeos realizados en la Bahía Salsipuedes, según la técnica de muestreo utilizada.

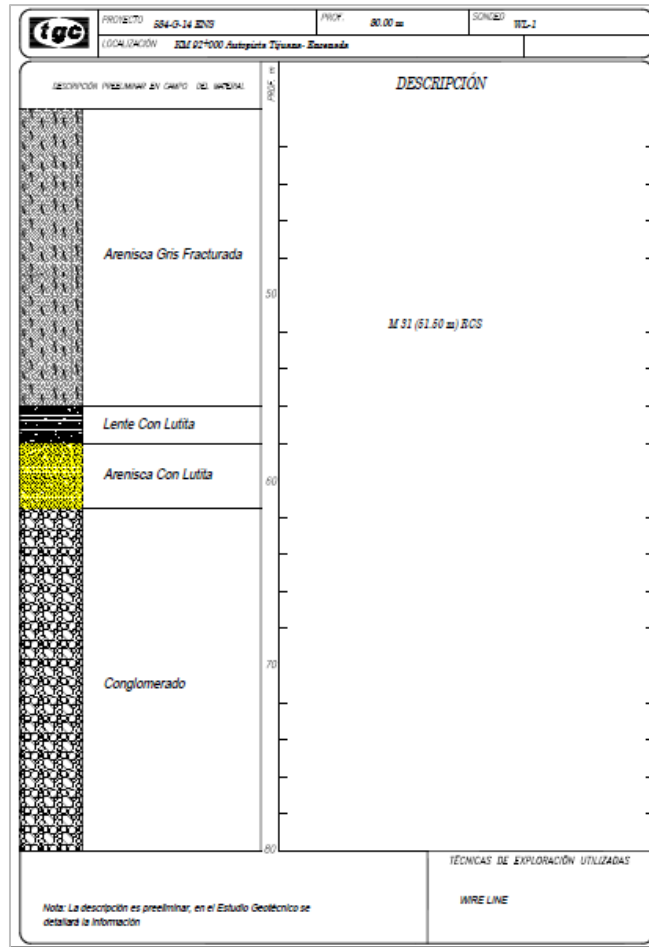


Figura 7.11. Estratigrafía del sondeo WL-01 km 92+000 de los 40 a 80 metros de profundidad, tomada de (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).

La información geológica proporcionada (TGC & Moser, Informe geológico Bahía Salsipuedes, 2016), permite conocer específicamente los estratos de roca a lo largo de la Bahía Salsipuedes, ya que cuenta con una numerosa cantidad de sondeos bien distribuidos a lo largo de la misma; en cada sitio inestable se realizaron como mínimo 2 (dos) sondeos, que con la extracción de muestras y pruebas geotécnicas de laboratorio dan a conocer el estado de la roca extraída.

La relación de contenido de humedad en cada estrato de roca posibilita saber el espesor de saturación a lo largo de la Bahía Salsipuedes, este factor se verá a más detalle en el inciso de *Información geohidrológica*.

Además de la información geológica brindada por la dependencia de gobierno a través de *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*, se realizó la búsqueda de la carta geológica del sitio por medio del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (*INEGI*). Para ello se accedió al sitio web de *INEGI*, dentro de la página se da clic en la pestaña denominada “Temas”, enseguida se selecciona la opción de “Geografía y medio ambiente”, para después elegir “Geología”; se abrirá una ventana nueva en donde se selecciona la opción “descarga”, en esa pestaña se selecciona la entidad federativa “Baja California”, así como la escala “1:250,000” (la que tiene mejor resolución, ya que no había mapas escala 1:50,000 que contuvieran la zona de estudio; además la escala 1:250,000 es la única que

cuenta con formato digital según INEGI) y la edición “todas”. El resultado arroja como mapa a descargar el archivo en formato “PDF” denominado “Carta geológico – minera Ensenada H11 – 2” (INEGI, Mapa geológico Ensenada, B.C., 2003), que se muestra en la **Figura 2.2** de la sección de *Descripción del sitio*.

Además del archivo en “PDF” se descarga una carpeta comprimida que contiene un conjunto de archivos “Shape” (puntos, líneas y polígonos, que forman la geología de rocas y fallas geológicas) y metadatos (que son el conjunto de datos geológicos vectoriales, coordenadas, datum, entre otros).

Se abre el programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*, y se da la información de los metadatos, correspondientes al datum y proyección UTM, con la finalidad de que al abrir las capas en formato “Shape” queden georreferenciadas. Se elige como sistema coordinado el denominado “WGS 1984 UTM Zone 11N”, al ser mostrado en los metadatos y mencionado en la sección de *Sistema de coordenadas* del *Marco teórico*. Con la herramienta “Add data” se adjuntan todas las capas shape, es decir, tanto puntos, líneas y polígonos que representan la geología de rocas (los diferentes tipos de rocas comprendidos en la zona H11 – 2) y fallas geológicas (fallas normales, por desplazamiento e inversas) de la zona, como resultado de esa acción aparece en pantalla la información geológica de la zona comprendida en la carta geológico – minera Ensenada H11 – 2.

Como se muestra en la **Figura 2.2**, la geología y fallas aparecen en la zona comprendida H11 – 2 de INEGI, en una escala de 1:250,000, y la Bahía Salsipuedes, aunque se encuentra dentro de esa zona, es menor en extensión que la comprendida por la H11 – 2. Es por ello que se utiliza dentro de *ArcMap 10.3* el comando “Extract by mask”, para esto se toma un polígono de referencia comprendido por la topografía de la Bahía Salsipuedes proporcionada por TGC Geotecnia, S.A. de C.V., se selecciona la capa Shape de la geología de rocas y el polígono de referencia que actúa como límites de corte de la capa, se procesa y el resultado es la geología de rocas de la Bahía Salsipuedes únicamente, y no de la totalidad de la zona H11 – 2 de INEGI. En la **Figura 7.12** se muestra la geología de rocas resultante de la Bahía Salsipuedes.

Se realiza el mismo procedimiento de “Extract by mask”, tomando el mismo polígono de referencia, pero ahora seleccionando la capa de fallas geológicas, se procesa y como resultado se obtiene una capa shape para las fallas geológicas, las cuales comprenden únicamente las fallas normales, que son las que se encuentran en la Bahía Salsipuedes, como se puede mostrar en la **Figura 7.12**.

Las capas en formato shape para la geología de rocas y fallas geológicas cuentan con una tabla de atributos cada una, las cuales muestran datos como el tipo de roca, área parcial para el tipo de roca, número de identificación, tipo de falla geológica, longitud de falla, entre otros, pero la mayoría de esos factores o atributos se descartan al realizar los recortes, y los de interés como es el tipo de roca se adjunta directamente a la base de datos geohidrológicos que se mencionará más adelante.

Las capas resultantes de geología de rocas y fallas geológicas de la Bahía Salsipuedes se encuentran en formato shape, pero para hacer los procedimientos en las siguientes metodologías particulares se requiere su transformación a formato ráster del cual se habló en el *Marco teórico*, para ello se utiliza el comando “Feature to raster” que se encuentra dentro de “Conversion tools”. Se da clic en el comando y aparece una ventana donde se elige la capa shape y el campo (field) que se quiere rasterizar, se hacen dos procedimientos uno para la geología de rocas y otro para las fallas

geológicas, al final quedan dos mapas iguales a los mencionados en la **Figura 7.12**, pero ahora en se encuentran en formato ráster.

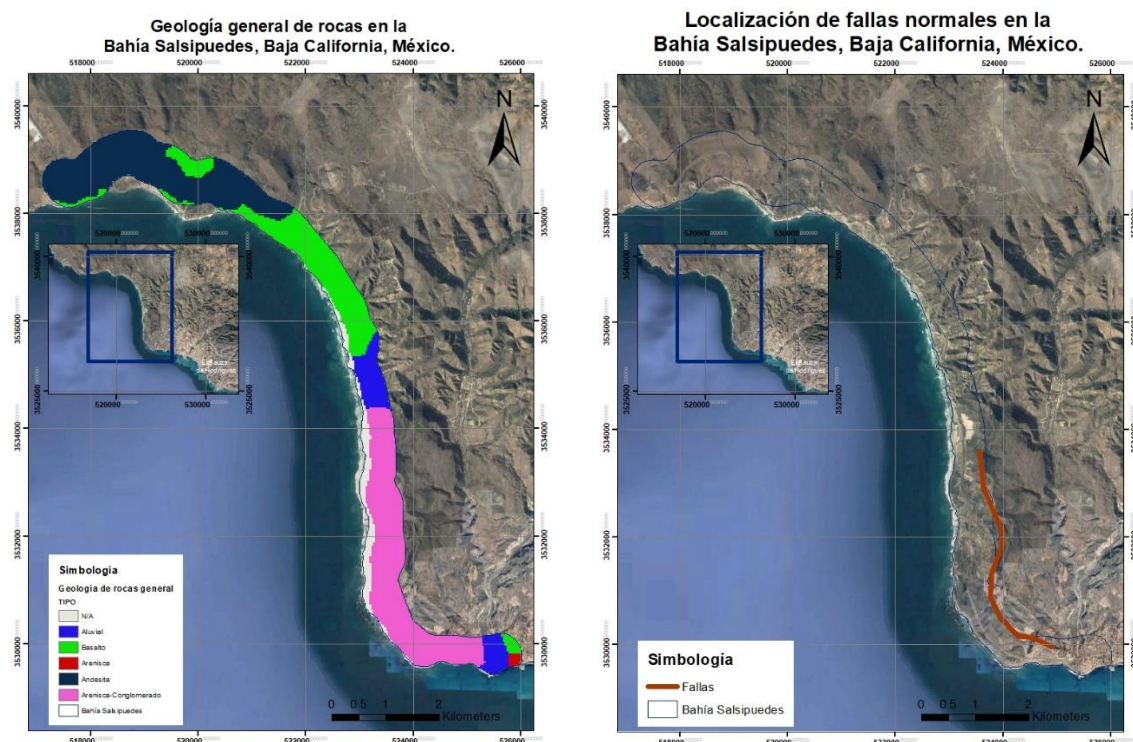


Figura 7.12. Geología general (izquierda) y localización de fallas normales (derecha), en la Bahía Salsipuedes.

Como se muestra en la geología de la **Figura 7.12**, se encuentran los principales tipos de roca localizados en la Bahía Salsipuedes son: aluviales en la zona comprendida en los kilómetros 92+000 y 98+000, basaltos en la parte alta del kilómetro 86+000 y a lo largo de los kilómetros 88 – 90+000, areniscas en el kilómetro 98 – 99+000, andesitas desde el kilómetro 83+000 hasta el 87+000, y una mezcla de areniscas con conglomerados desde el kilómetro 93+500 hasta el kilómetro 98+000; estos tipos de roca se adjuntan a la base de datos geohidrológicos, como se mencionó en párrafos anteriores.

7.2.4 Información geohidrológica

La información geohidrológica comprende todo aquel dato relacionado con el comportamiento geológico e hidráulico de la zona de estudio, es decir, desde el tipo de roca hasta la transmisibilidad, pasando por la conductividad hidráulica, espesor de saturación y la porosidad efectiva, conceptos descritos previamente en la sección de *Marco teórico*.

La información geohidrológica se obtuvo mediante la revisión bibliográfica en diferentes medios, tanto en capítulos de libros (Sowers & Sowers, 1990), (Vélez Otálvaro, 2004), (Bear, 1979), (Fuentes & Rendón, 2012), (Custodio & Llamas, 1983) y (Freeze & Cherry, 1979), como artículos (Garfi, y otros, 2022), (Gorgij, Kisi, Moayeri, & Moghaddam, 2018), (Luijendijk, 2022) y (Tang, Zhang, & Li, 2022), además de tesis (Barbecho C. & Calle O., 2012).

Para generar una base de datos se realizó primero la localización de puntos de control geohidrológico distribuidos arbitrariamente a lo largo y ancho de la Bahía Salsipuedes; estos puntos

control se colocaron en cada instrumento piezométrico instalado, ya sean piezómetros o tubos de observación, por lo que da un total de 90 puntos de control geohidrológico, de los cuales se tienen valores específicos según su ubicación.

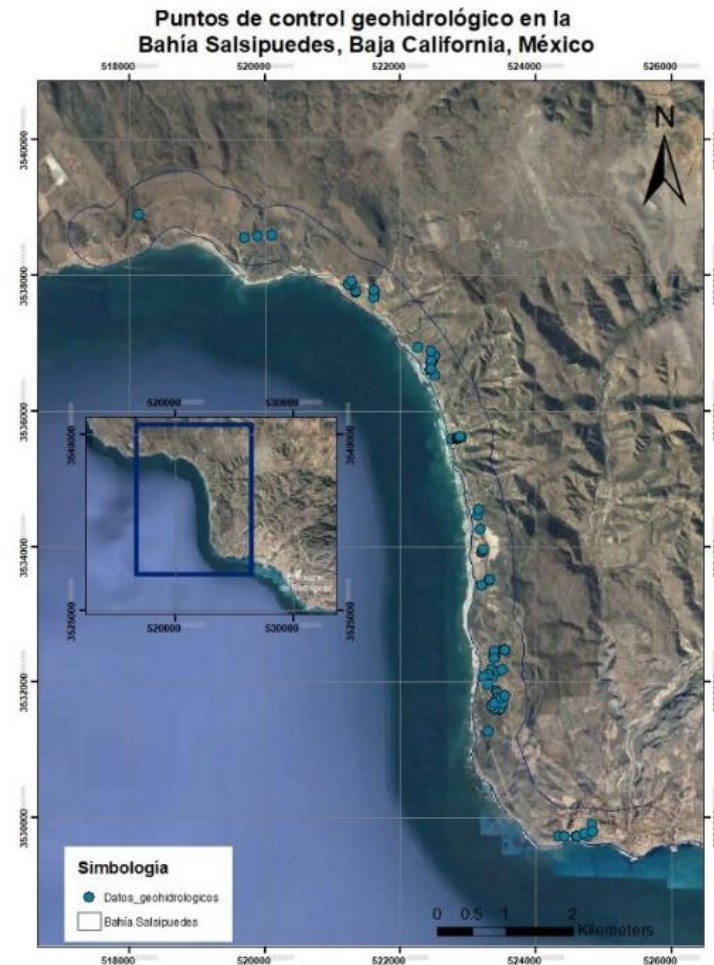


Figura 7.13. Puntos de control geohidrológicos de la Bahía Salsipuedes.

En la **Figura 7.13**, se observa la distribución de los puntos de control geohidrológico en la Bahía Salsipuedes, donde se puede ver que la mayor concentración está localizada entre los kilómetros 94+000 al 96+000; esto se debe a que esa zona es la que cuenta con más instrumentación piezométrica instalada.

Una vez teniendo la ubicación de los puntos de control, es sencillo saber sobre qué tipo de roca están colocados, haciendo una superposición de los mapas de la **Figura 7.12** y la **Figura 7.13**. Teniendo el tipo de roca, se hace una relación de este con los parámetros geohidrológicos encontrados en la literatura (libros, artículos y tesis) y se obtienen los valores de porosidad efectiva y conductividad hidráulica o permeabilidad; después se obtiene el espesor de saturación, basándose en la localización del nivel freático en cada instrumento piezométrico y la estratigrafía del sondeo ubicado en ese mismo sitio (sondeo realizado previamente a la instalación del instrumento, como se mencionó en la sección de *Información geológica*); por último, se realiza el producto de la conductividad hidráulica y el espesor de saturación, siguiendo la ecuación (5) para obtener la

transmisibilidad hidráulica. Este procedimiento se hace para cada uno de los 90 puntos de control geohidrológicos, dando como resultado la base de datos geohidrológicos, de la cual se observa un extracto en la **Tabla 7.5**.

Tabla 7.5. Extracto de la base de datos geohidrológicos de la Bahía Salsipuedes.

Instrumento	Profundidad (m)	Nivel piezométrico medio general "NPM", (mca).	Tipo de roca (Sondeo)	Porosidad efectiva "Θe" (%)	Espesor saturado "b" (m)	Conductividad hidráulica "K" (m/día)	Transmisibilidad "T" (m ² /día)
TO 01 84+000	101.00	151.439	Andesita	0.015	1.570	0.00001	0.00002
TO 01 86+000	88.00	73.229	Andesita	0.015	5.708	0.00001	0.00006
TO 02 86+000	53.00	95.487	Andesita	0.015	6.703	0.00001	0.00007
PZM 01 86+000	40.00	102.623	Andesita	0.015	6.179	0.00001	0.00006
PZM 02 86+000	48.00	86.759	Andesita	0.015	6.703	0.00001	0.00007
PZM 03 86+000	38.00	93.246	Andesita	0.015	6.703	0.00001	0.00007
TO 01 88+000	72.00	84.761	Basalto	0.020	9.113	0.00010	0.00091
TO 02 88+000	27.00	90.156	Basalto	0.020	8.903	0.00010	0.00089
TO 03 88+000	40.00	6.036	Basalto	0.020	11.418	0.00010	0.00114
TO 04 88+000	45.00	10.759	Basalto	0.020	10.842	0.00010	0.00108
TO 05 88+000	63.00	25.909	Basalto	0.020	9.060	0.00010	0.00091
TO 06 88+000	90.00	96.744	Basalto	0.020	8.485	0.00010	0.00085
TO 07 88+000	95.00	95.919	Basalto	0.020	8.537	0.00010	0.00085
PZM 01 88+000	25.00	85.342	Basalto	0.020	9.113	0.00010	0.00091
PZM 03 88+000	70.00	105.452	Andesita	0.015	8.066	0.00001	0.00008

Como se puede ver en la **Tabla 7.5**, cada punto de control corresponde a un instrumento piezométrico con localización en coordenadas *UTM*, además de marcar la profundidad del instrumento y nivel piezométrico que se relacionan directamente con el espesor de saturación; también, se observa la clase y tipo de roca, lo que hace posible determinar la porosidad efectiva y conductividad hidráulica; por último, conocer la transmisibilidad para el punto especificado.

Los valores de porosidad efectiva son de 0.15 %, 0.10 % para aluviales y areniscas – conglomerados, respectivamente; mientras que para las andesitas son de 0.015 % y 0.020 % para los basaltos. En cuanto a la conductividad hidráulica los valores son 0.01 m/d para aluviales, 0.0008 m/d para areniscas – conglomerados, 0.0001 m/d para basaltos y 0.00001 m/d para andesitas. Los espesores de saturación a lo largo de la Bahía Salsipuedes rondan entre 1.57 – 12.78 metros; dando como resultado transmisibilidades en un rango de 0.000015 – 0.10108 m²/d.

Esta base de datos se utilizará adelante para la realización de los modelos de interpolación para las redes de flujo, cálculo de caudal, superposición ponderada de riesgo y análisis multicriterio.

7.2.5 Información socio – económica y vulnerabilidad

La información socio – económica perteneciente a la Bahía Salsipuedes corresponde a toda aquella información necesaria para la realización del análisis de riesgo geohidrológico, que se relaciona específicamente en importes de los elementos en exposición, así como datos de tránsito diario promedio anual (TDPA) para cálculo de pérdidas, y calificaciones de vulnerabilidad de los elementos.

Para la conformación de la base de datos socio – económicos primero se hace un listado de los elementos en exposición, los cuales se pueden agrupar en 17 (diecisiete) tipos de elementos. Estos son los siguientes: alcantarillas, bermas, bordillos, cajas reguladoras, caminos rurales, construcciones varias, contracunetas, cunetas, galerías drenantes o filtrantes, lavaderos, pedraplenes, pilas, pozos, puentes, sobreanchos, taludes y zanjas drenantes; los cuales quedan definidos en la sección de *Factor exposición – Riesgo*, del *Marco teórico*.

Una vez denominado cada tipo de elemento se realiza una búsqueda en campo de los elementos en exposición. Como se detalló en la sección de *Visitas de campo*, se realizaron dos visitas a la Bahía Salsipuedes especialmente para la localización, levantamiento y valoración de los elementos en exposición de la zona, una de ellas el 21 de abril de 2021 y otra el 15 de diciembre de 2021, en la primera se localizaron cada uno de los elementos en exposición y se levantaron sus coordenadas en UTM, así como dimensiones y el cadenamamiento de la carretera escénica Tijuana – Ensenada en el que se encuentra dicho elemento. En la visita de diciembre se tomó evidencia fotográfica para evaluar la calificación de vulnerabilidad estructural del elemento.

El siguiente paso es conocer el importe o costo de cada uno de los elementos en exposición, para ello se utiliza la información de catálogos de conceptos y presupuestos base proporcionados por TGC Geotecnia S.A. de C.V., donde se encuentra el precio unitario para cada concepto (elemento en exposición) de los proyectos de la Bahía Salsipuedes. Teniendo el precio unitario por elemento, así como sus dimensiones (obtenidas en las visitas de campo), es posible generar el importe, el cual es el producto de la cantidad con el precio unitario, como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$I = Cant \times P.U. \quad (60)$$

Donde *I* es el importe sin IVA, *Cant* es la cantidad obtenida de las dimensiones y puede tener unidades lineales, de área, volumen o pieza, y *P.U.* es el precio unitario el cual tiene unidades de pesos mexicanos (*Mxn*) por unidad.

Una vez calculado el importe se procede a realizar la estimación de las pérdidas por cada elemento en exposición, las cuales se calculan con la ecuación (44) de la sección de *Factor exposición – Riesgo* en el *Marco teórico*. Donde los factores que intervienen son el importe sin IVA y el tránsito diario promedio anual (TDPA), el cual es de 6,817 usuarios para el tramo denominado “*Plaza de cobro Ensenada*” en el año 2019 (SCT, Datos viales, 2019), el cual es el más representativo.



Figura 7.14. Pérdidas por sistema en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede observar en el gráfico de la **Figura 7.14**, el sistema que representa mayores pérdidas para la Bahía Salsipuedes, por sus altos importes en la construcción el representado por las obras de estabilidad, con aproximadamente \$1'270,000.00 pesos M.N. de pérdida por día. En la **Figura 7.15**, se desglosan las pérdidas en ese sistema.

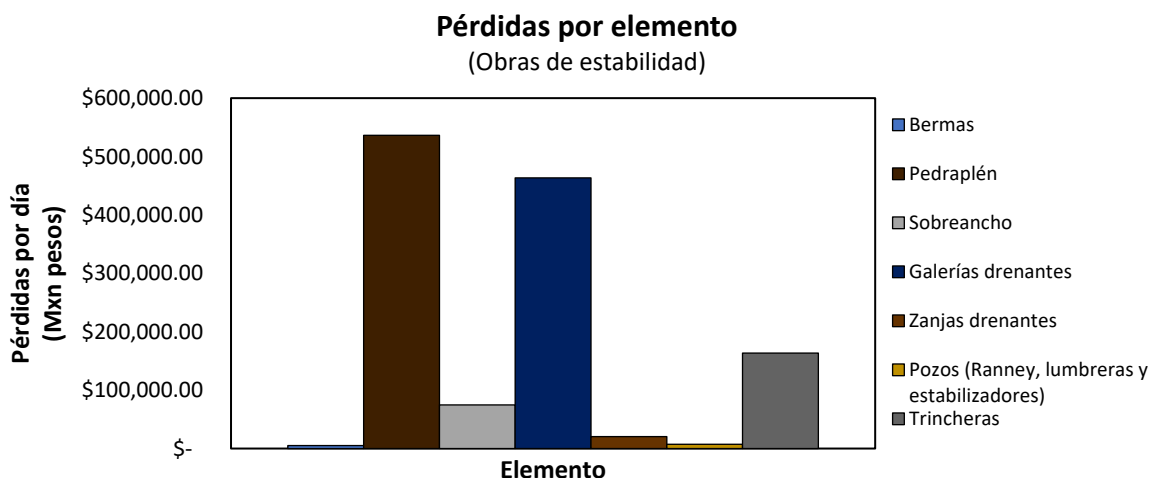


Figura 7.15. Pérdidas por elemento dentro del sistema de obras de estabilidad en la Bahía Salsipuedes.

En el gráfico de la **Figura 7.15**, se observa que las mayores pérdidas diarias monetarias ocurren en pedraplenes, galerías drenantes y trincheras, con valores rondando entre los \$530,000.00 pesos M.N. para pedraplenes, \$460,000.00 pesos M.N. para galerías drenantes y \$160,000.00 pesos M.N. para trincheras estabilizadoras.

Después del cálculo de pérdidas se realiza la valoración de los elementos en exposición en una matriz de vulnerabilidad estructural, la cual tiene calificaciones en una escala de 0 a 4, donde 0 es un valor asignado cuando no presenta daños o no aplica calificación en ese tipo de elemento, y 4 es la calificación cuando presenta daños graves, como se muestra en la sección *Factor vulnerabilidad – Riesgo del Marco teórico*.

Los rubros estructurales a evaluar en cada elemento de la matriz de vulnerabilidad son: desconchamiento o desprendimiento, desplome, socavación, flechas o deformación, corrosión, agrietamientos, daño por impacto, estado de drenaje, elemento faltante en la estructura y estructura interior expuesta.

Los elementos se dividen en 7 sistemas los cuales son: Corte/Talud anclaje, Vías terrestres, Obras de estabilidad, Obras de drenaje, instrumentación, construcciones varias y seres vivos; y a su vez, en 35 elementos totales, los cuales se definieron en la sección de *Factor exposición – Riesgo* en el *Marco teórico*.

Después con base en la evidencia fotográfica proveniente de las visitas, así como las observaciones realizadas en cada una de las visitas de campo mencionadas, se le da una calificación a cada elemento de todos los sistemas en los diferentes rubros estructurales de la matriz, dando como resultado la matriz de vulnerabilidad estructural de la Bahía Salsipuedes, la cual se puede consultar a detalle en la sección de *Anexos*. De esa matriz de vulnerabilidad se puede extraer información de interés, como la siguiente figura.

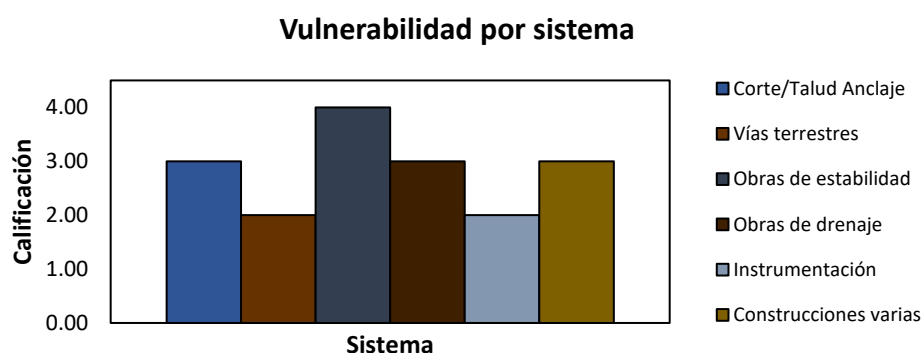


Figura 7.16. Calificación de vulnerabilidad por sistemas en la Bahía Salsipuedes.

Como se observa en la **Figura 7.16**, las obras de estabilidad son las que tienen la calificación de vulnerabilidad más elevada, con un valor de 4, mientras que las vías terrestres y la instrumentación mantienen las calificaciones menores, con un valor de 2 en la escala.

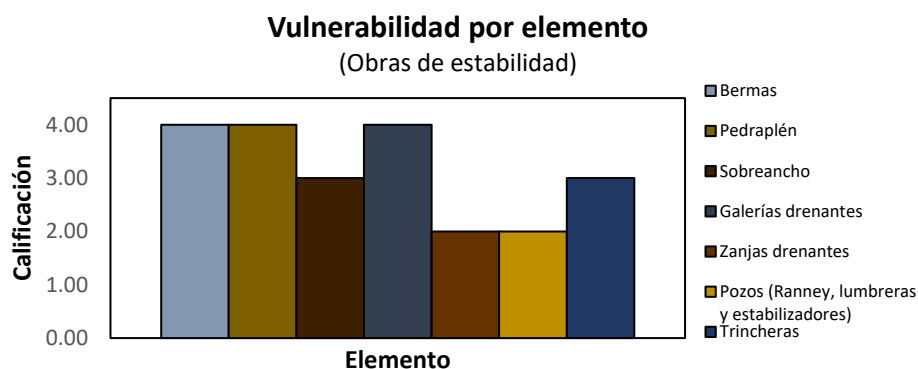


Figura 7.17. Calificación de vulnerabilidad por elemento de obras de estabilidad en la Bahía Salsipuedes.

Como se presenta en el gráfico de la **Figura 7.17**, dentro del sistema de obras de estabilidad que es el más vulnerable según el gráfico de la **Figura 7.16**, se encuentran las bermas, pedraplenes, sobreanchos, galerías drenantes, zanjas drenantes, pozos y trincheras, de los cuales las bermas, pedraplenes y galerías drenantes tienen la calificación de 4 en escala de vulnerabilidad y las zanjas drenantes y pozos la calificación menor, es decir, 2 en escala.

Una vez calculadas la vulnerabilidad, pérdidas, importes, y enlistados la totalidad de elementos en exposición dentro de la Bahía Salsipuedes, es posible generar la base de datos socio – económicos y vulnerabilidad, para la estimación del riesgo geohidrológico.

La **Tabla 7.6** es un extracto de la base de datos socio – económicos y de vulnerabilidad de la Bahía Salsipuedes, es decir, solo muestra una parte de los elementos contemplados, en el caso de este extracto se muestran únicamente las primeras 19 alcantarillas de la base de datos.

La primera columna indica el nombre del elemento en exposición, la segunda columna el tipo de elemento (de los 17 disponibles), la tercera columna marca el cadenamiento con respecto a la carretera escénica Tijuana – Ensenada en kilómetros, las siguientes dos columnas indican las coordenadas X, Y en UTM, la sexta y séptima columnas indican las dimensiones de los elementos en metros (largo y ancho), la octava columna marca la calificación de vulnerabilidad dada a ese elemento con base en la matriz de vulnerabilidad estructural, la novena columna indica el importe sin IVA para el elemento dado y la última columna da las pérdidas monetarias diarias. La base de datos está conformada por un total de 282 elementos en exposición divididos en 17 tipos, los cuales se mencionaron en párrafos anteriores.

De la base de datos socio – económicos y vulnerabilidad es posible crear los modelos de interpolación de exposición y vulnerabilidad necesarios para el cálculo del riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes.

Tabla 7.6. Extracto de la base de datos socio – económicos y vulnerabilidad de la Bahía Salsipuedes, solo del tipo “Alcantarillas”.

Nombre del elemento en exposición	Cadenamiento (km)	Coordenadas		Dimensiones		Vulnerabilidad	Observaciones		
		X	Y	Largo (m)	Ancho (m)		Importe	Pérdida	
Alcantarilla 83+590	83.59	517420.00	3538880.00	35.85	2.50	3.00	\$ 973,919.01	\$ 142.87	
Alcantarilla 83+900	83.90	517437.00	3538629.00	17.40	2.60	3.00	\$ 472,697.09	\$ 69.34	
Alcantarilla 83+950	83.95	517477.00	3538576.00	32.90	2.60	3.00	\$ 893,777.84	\$ 131.11	
Alcantarilla 83+990	83.99	517504.01	3538550.05	14.90	2.60	3.00	\$ 404,780.85	\$ 59.38	
Alcantarilla 84+000	84.00	517516.00	3538539.00	46.28	2.00	3.00	\$ 1,257,265.61	\$ 184.43	
Alcantarilla 84+055 (84+100)	84.06	517627.00	3538532.00	46.25	2.00	3.00	\$ 1,256,450.61	\$ 184.31	
Alcantarilla 84+440	84.44	517934.00	3538626.00	33.00	2.50	3.00	\$ 896,494.49	\$ 131.51	
Alcantarilla 84+815	84.82	518175.00	3538923.00	38.50	3.40	3.00	\$ 1,045,910.24	\$ 153.43	
Alcantarilla 85+145	85.15	518439.00	3539087.00	44.30	4.00	3.00	\$ 1,203,475.94	\$ 176.54	
Alcantarilla 85+500	85.50	518742.00	3539165.00	38.80	4.50	3.00	\$ 1,054,060.19	\$ 154.62	
Alcantarilla 85+750	85.75	518969.00	3539072.00	36.30	2.00	3.00	\$ 986,143.94	\$ 144.66	
Alcantarilla 86+100	86.10	519273.00	3538932.00	36.20	2.00	3.00	\$ 983,427.29	\$ 144.26	
Alcantarilla 86+390	86.39	519575.00	3538715.00	42.60	2.60	3.00	\$ 1,157,292.89	\$ 169.77	
Alcantarilla 86+770	86.77	519875.00	3538579.94	34.90	3.40	3.00	\$ 948,110.84	\$ 139.08	
Alcantarilla 86+990	86.99	520081.00	3538627.00	45.60	2.50	3.00	\$ 1,238,792.39	\$ 181.72	
Alcantarilla 87+150	87.15	520252.00	3538646.00	42.50	2.00	3.00	\$ 1,154,576.24	\$ 169.37	
Alcantarilla 87+325	87.33	520416.00	3538573.00	76.00	3.00	3.00	\$ 2,064,653.98	\$ 302.87	
Alcantarilla 87+600	87.60	520626.00	3538422.00	32.90	3.00	3.00	\$ 893,777.84	\$ 131.11	
Alcantarilla 87+890	87.89	520871.00	3538221.00	33.00	3.00	3.00	\$ 896,494.49	\$ 131.51	

7.2.6 Inserción de información en ArcMap 10.3

Una vez teniendo la información piezométrica, topográfica, geológica, geohidrológica y socio – económica, es necesario adjuntar cada una de las bases de datos o información en formato *shape* al programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*.

En el caso de las bases de datos en tablas, estas deben estar guardadas en formato Excel 1997 – 2003 (.xls) para su correcta adición al programa *ArcMap 10.3*, tales son los casos de las bases de datos piezométricas, geohidrológicas y socio – económicas.

Para la información topográfica, las curvas de nivel a cada metro deben estar polilíneas, sin información traslapada y en formato *AutoCAD 2010 (.DWG)*; en caso de haber curvas encimadas marcará un error el programa *ArcMap 10.3*, para evitarlo es necesario hacer una depuración en el archivo de *AutoCAD*, se seleccionan la totalidad de las curvas y se escribe en la barra de comandos la acción “*OVERKILL*”, se da clic y el comando se encargará de eliminar todas aquellas líneas o capas encimadas; después se elige el comando “*PURGE ALL*”, que limpiará el archivo de curvas de nivel.

En el caso de la información geológica, esta deberá tener un formato *shape (.shp)*, compatible con *ArcMap 10.3*, se adjuntarán líneas, puntos y polígonos o áreas en general, que abarcan el territorio H11 – 2 denominado por *INEGI*.

Para adjuntar cualquier tipo de información, ya sean base de datos en *Excel*, planos en *AutoCAD* o archivos *shape*, primero se requiere seleccionar el sistema de coordenadas. Para ello se abre *ArcMap 10.3* y se da clic derecho en la pantalla, aparecerá una ventana de la cual se seleccionará la opción “*data frame properties*”, enseguida se abrirá una nueva ventana de la que se elige la pestaña “*Coordinate system*” para después elegir la opción “*WGS 1984 UTM Zone 11 N*”, se acepta oprimiendo el botón “*OK*”.

Habiendo realizado la ubicación en el sistema de coordenadas se procede a adjuntar la información proveniente de bases de datos como es el caso de la información piezométrica (instrumentación), geohidrológica y socio – económica. En todos los casos se utiliza el comando “*Add data*”, se abre una ventana donde se busca la carpeta donde se encuentra la información y se da clic en el archivo seleccionado, se abre el archivo y se escoge la “*hoja*” en la que se encuentra la información y se adjunta oprimiendo el botón de “*OK*”. Enseguida se definen las coordenadas *XY* para que aparezcan visualmente los puntos dentro de la interfaz del programa, con el comando “*Display XY data*”, para después exportar los puntos creados en formato *shape* con la opción “*Export data*”, se elige la carpeta en la que se guardarán los archivos *shape* resultantes. Los puntos de las bases de datos quedarán expuestos como se muestran en la **Figura 7.18** y la **Figura 7.19**.

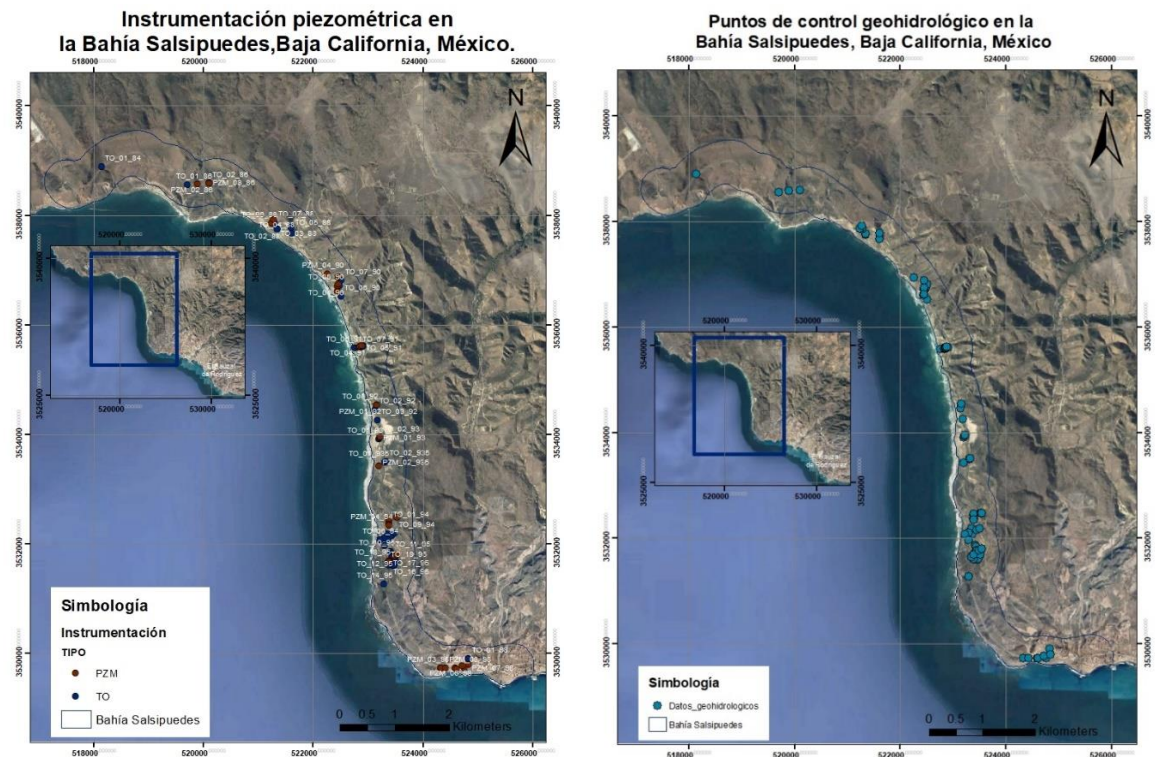


Figura 7.18. Información de instrumentación piezométrica (izquierda) y puntos de control geohidrológico (derecha) en la Bahía Salsipuedes.

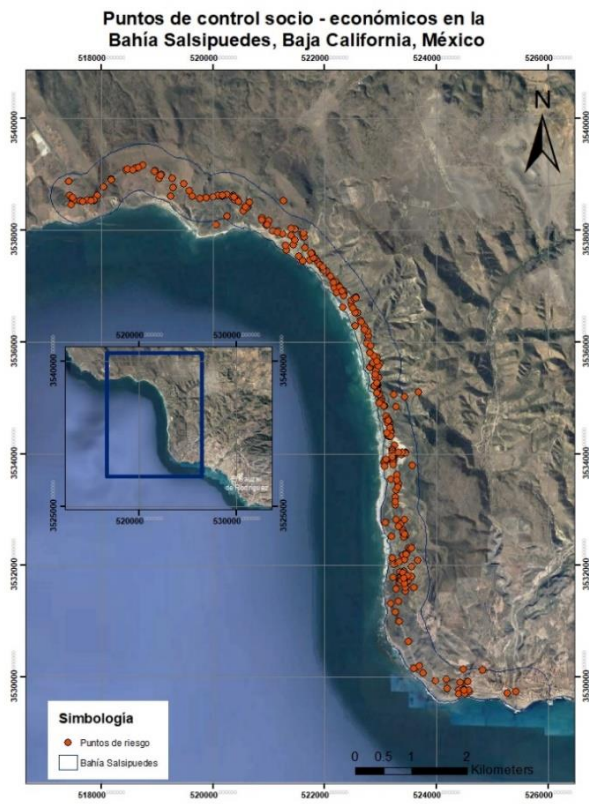


Figura 7.19. Puntos de control socio – económico de la Bahía Salsipuedes.

Enseguida se procede a adjuntar la información topográfica correspondiente a las curvas de nivel a cada metro en formato (.DWG) de AutoCAD, como en el caso anterior, se utiliza el comando “Add data” y se elige el archivo DWG guardado en documentos, en la carpeta destinada a la topografía, después se abre la ventana donde se selecciona adjuntar únicamente la información del archivo que esté en formato de polilínea, se oprime “Ok”, aparecerán las curvas de nivel en la interfaz de ArcMap 10.3, enseguida se exportan esas curvas para hacerlas formato *shape*, para ello es necesario utilizar el comando “Export data”, se elige la carpeta donde se guardará el *shape* resultante y se procede a su visualización final, como se muestra en la **Figura 7.20**.

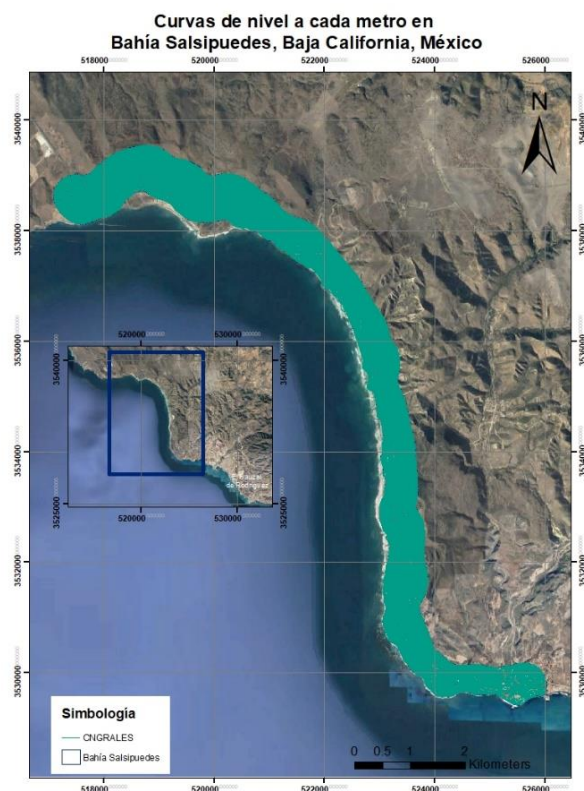


Figura 7.20. Curvas de nivel a cada metro en la Bahía Salsipuedes.

Como se mencionó en el apartado de *Información geológica*, se siguió el mismo procedimiento para la inserción de los datos geológicos que en los casos anteriores, es decir, utilizando el comando “Add data”. El resultado se puede observar en la **Figura 7.12**, correspondiente a la geología de la Bahía Salsipuedes y a las fallas geológicas de la misma zona de estudio.

7.3 Redes de flujo

Una vez concluidos los pasos de recolección y tratamiento de la información, además de la adición de esa información al programa ArcMap 10.3, se continua con el paso 3 de la metodología general de esta investigación, el cual es la determinación de las redes del flujo sub – superficial de la Bahía Salsipuedes. Para ello es necesario seguir una metodología particular, basada en ley de Darcy y el método gráfico de Forchheimer (Vélez Otálvaro, 2004), la cual se puede apreciar en la **Figura 7.21**.

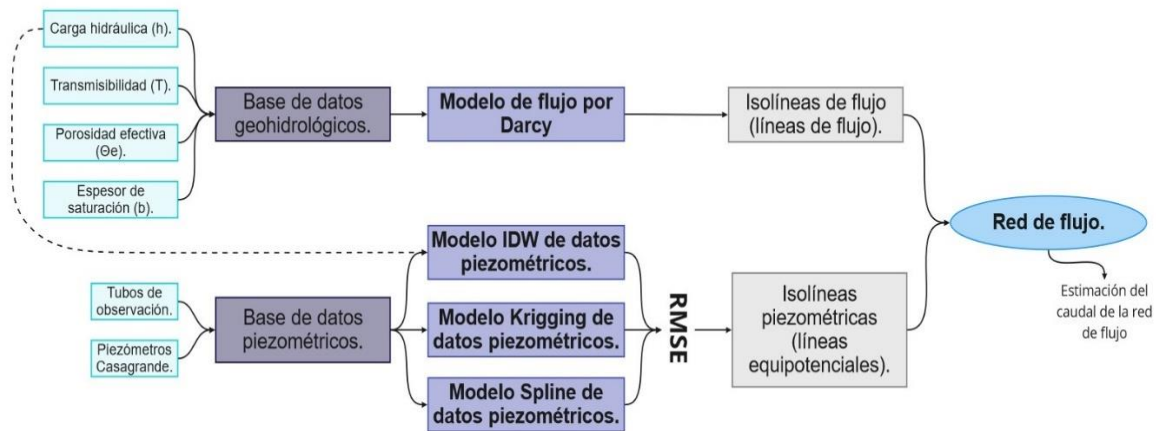


Figura 7.21. Metodología particular para generación de redes de flujo.

La metodología particular para la generación de las redes de flujo en la Bahía Salsipuedes se puede dividir en dos partes, la primera es la que corresponde a la generación de las isolíneas de flujo o líneas de flujo, y la segunda, la que se refiere a la generación de las isolíneas piezométricas o líneas equipotenciales. Como se aprecia en la **Figura 7.21**, para la generación de las líneas de flujo es necesario realizar el modelo de flujo por Darcy, mientras que para obtener las líneas equipotenciales es necesario realizar una validación entre 3 tipos de modelos de interpolación y obtener los contornos del modelo más preciso.

7.3.1 Líneas de flujo

El modelo de flujo por Darcy en *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* se obtiene mediante la ponderación de capas en formato ráster, como se vio en la sección de *Marco teórico* estas capas deben ser: de nivel piezométrico o carga hidráulica (*NPM*), de porosidad efectiva, de espesor de saturación, de transmisibilidad, de dirección de flujo y de magnitud de salida, siendo las últimas dos opcionales. Por lo que para la determinación del flujo por Darcy en la Bahía Salsipuedes se utilizarán únicamente las 4 primeras mencionadas.

De la base de datos geohidrológicos se obtienen los valores de carga hidráulica (*NPM*), transmisibilidad, porosidad efectiva y espesor de saturación con la finalidad de obtener modelos de interpolación para la zona de estudio en cada uno de los rubros mencionados.

Los modelos de interpolación en este caso se realizan por el método de ponderación de distancia inversa (*IDW*) que como se vio en la sección de *Marco teórico*, es el método determinista por excelencia para la realización de interpolaciones basadas en valores, medidas y fórmulas matemáticas; que a diferencia del método de *Kriging* o *Spline*, no necesita información geoespacial para correr el modelo.

El primer paso para la generación de un modelo *IDW* es ubicar la barra de herramientas y seleccionar el paquete denominado "*Spatial Analyst Tools*", se abre una lista de opciones, de entre las cuales se debe elegir "*Interpolation*" seguido de "*IDW*", que se refiere al método de interpolación a utilizar, se da clic y se abre la siguiente ventana:

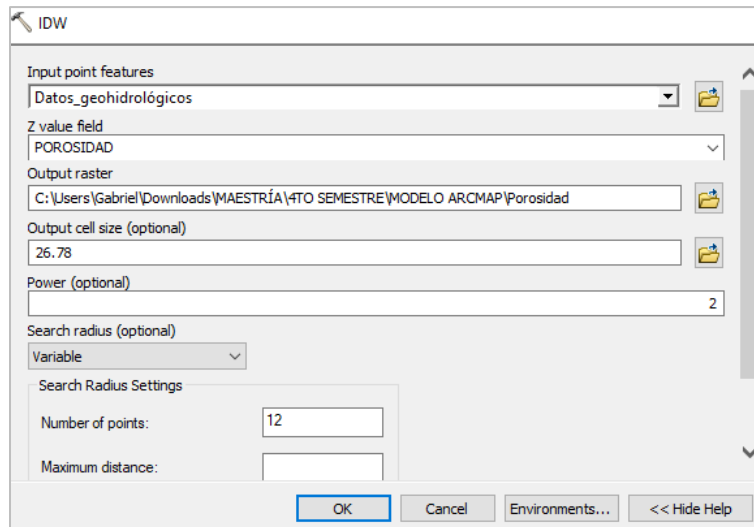


Figura 7.22. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Porosidad).

La interfaz del programa solicita la capa de puntos de control de la base de datos geohidrológicos, después el valor en Z que se requiere interpolar, en el caso de la **Figura 7.22**, se especifica la porosidad (en realidad porosidad efectiva), enseguida se elige la carpeta donde se guardará el modelo de interpolación de salida en formato ráster, tomando un tamaño de celda de entre 20 a 30 unidades para una mejor resolución con la escala del mapa (se toma 26.78 para el caso de la porosidad efectiva), con una potencia de 2 y un radio variable.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

El resultado del procesamiento es la interpolación de la información proveniente de la nube de puntos de control geohidrológicos correspondiente a la porosidad efectiva. El mismo procedimiento se sigue para la obtención de los modelos *IDW*, únicamente cambiando el campo de valor Z (“*Z value field*”) por los valores de nivel piezométrico medio o carga hidráulica (*NPM*), espesor de saturación y transmisibilidad. Los modelos de interpolación resultantes se pueden observar en la **Figura 7.23**.

En la parte superior izquierda de la **Figura 7.23**, se observa el modelo de carga hidráulica donde la mayor concentración del nivel piezométrico medio se encuentra al noroeste de la Bahía Salsipuedes, específicamente dentro del sitio denominado kilómetro 84+000, mientras que la zona donde se encuentran los menores niveles piezométricos está al sureste en el kilómetro 98+000.

En cuanto a la porosidad efectiva, el modelo ubicado en la parte superior derecha de la **Figura 7.23**, muestra que los valores más elevados se localizan en el kilómetro 92 – 93+000, y con tendencias medias – altas hasta el kilómetro 98+000, mientras que al norte pasa lo contrario.

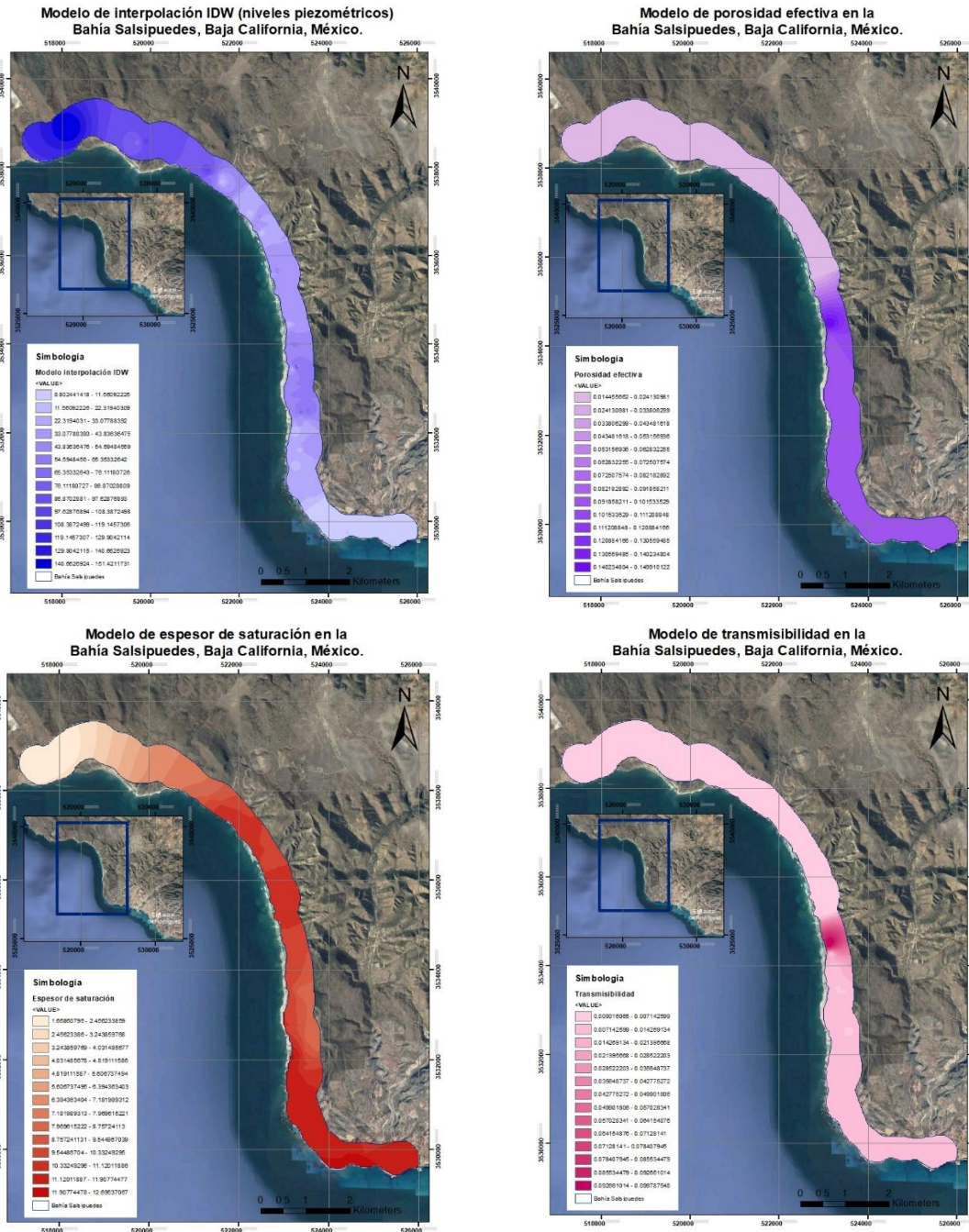


Figura 7.23. Modelos de interpolación por método IDW para propiedades geohidrológicas: carga hidráulica (superior izquierda), porosidad efectiva (superior derecha), espesor de saturación (inferior izquierda) y transmisibilidad (inferior derecha).

Sabiendo que los espesores de saturación se basan en las estratigrafías y pruebas de contenido de humedad de los sondeos realizados en la zona, se puede observar que siguen una tendencia parecida a las dos propiedades geohidrológicas anteriores, como lo muestra la parte inferior izquierda de la **Figura 7.23**.

Por último, en la parte inferior derecha de la **Figura 7.23** se observa que la transmisibilidad se concentra específicamente en la zona comprendida entre los kilómetros 92 – 93+000, lo que indica que la porosidad efectiva y la permeabilidad de las rocas ubicadas específicamente en esa zona influyen de manera directa, y no depende tan estrechamente del espesor de saturación.

Teniendo en formato ráster los modelos de interpolación correspondientes a carga hidráulica, porosidad efectiva, espesor de saturación y transmisibilidad, se procede a realizar la determinación de las líneas de flujo por el método de Darcy, para ello se accede a la caja de herramientas de ArcMap 10.3 de ArcGIS, después se da clic en la pestaña “*Spatial Analyst Tools*” seguido de la opción “*Groundwater*” y “*Darcy Flow*”.

Se abre la ventana de trabajo en la que se adjuntan las capas ráster de carga hidráulica, porosidad efectiva, espesor de saturación y transmisibilidad, como se muestra en la **Figura 7.24**.

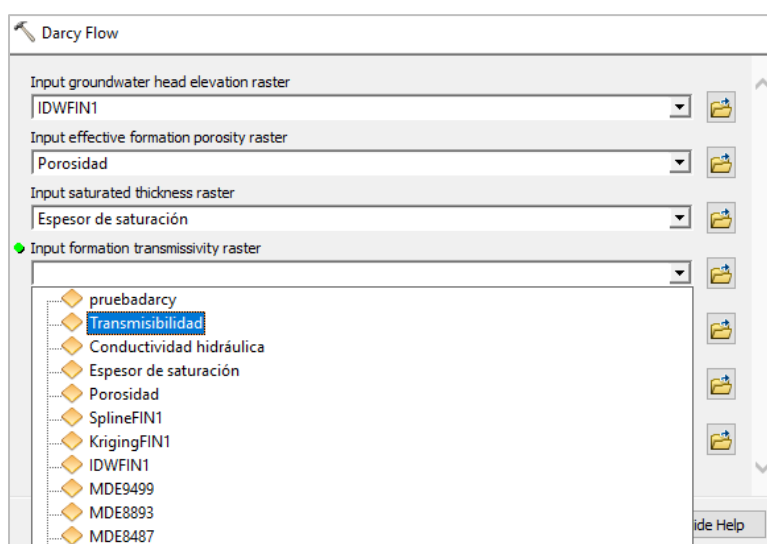


Figura 7.24. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para flujo por Darcy.

Después de anexar las cuatro capas ráster básicas requeridas para la realización del modelo de flujo por Darcy, se accede a la pestaña “*Environments*” donde se elige el polígono de referencia de la Bahía Salsipuedes (contorno de topografía) para las opciones de extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”). Se aceptan todas las instancias y como resultado se tiene el modelo de líneas de flujo por el método de Darcy, como se muestra en la **Figura 7.25**.

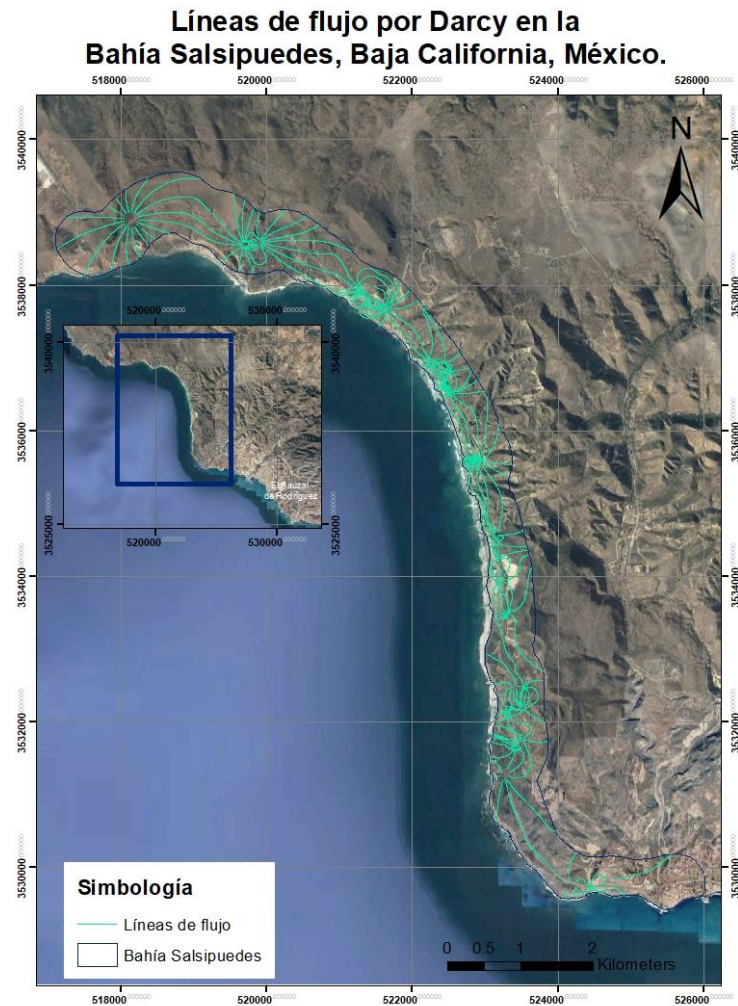


Figura 7.25. Líneas de flujo por el método de Darcy en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede observar en la **Figura 7.25**, las líneas de flujo parten de varios centros, cada centro corresponde a una concentración de puntos de control geohidrológico – piezométrico, es decir, se tienen un total de 90 puntos de control piezométricos y geohidrológicos, pero esos se concentran a su vez en 36 conglomeraciones, distribuidas en los 11 sitios de inestabilidad.

Cada conglomeración o concentración tiene entre 2 – 6 puntos de control involucrados; el algoritmo de programación en Python dentro de *ArcMap 10.3* para la estimación del flujo por Darcy indica las líneas de salida en cada concentración, siendo la mínima de 6 y la máxima de 17 líneas de flujo para el caso de la Bahía Salsipuedes, estas líneas de flujo dependen únicamente de las propiedades geohidrológicas de las rocas del sitio. Por el ejemplo, en la Figura X se aprecia claramente que la mayor concentración de líneas de flujo están entre los kilómetros 88+000 al 95+000, siendo el kilómetro 98+000 donde se encuentran las menores concentraciones de líneas de flujo y el kilómetro 83+000 donde están más espaciadas.

7.3.2 Líneas equipotenciales

Para la elaboración de las líneas equipotenciales o isolíneas piezométricas (líneas que marcan igualdad en valor de carga hidráulica o piezométrica) es necesario seguir la metodología particular que se marca en la **Figura 7.21**.

Teniendo la base de datos piezométricos conformada por los valores de nivel piezométrico medio (*NPM*) de tubos de observación y piezómetros tipo Casagrande, se procede a realizar un conjunto de modelos de interpolación que permitan conocer la distribución general del *NPM* a lo largo y ancho de la Bahía Salsipuedes.

Así pues, el primer paso después de tener la base de datos piezométricos es obtener los modelos de interpolación en formato ráster, para ello se utilizan tres diferentes métodos; el primero es el método *IDW*, seguido por el método de *Kriging* y, por último, el método *Spline*. Las interpolaciones en todos los métodos serán para el mismo tipo de dato, es decir, el nivel piezométrico medio (*NPM*) de los instrumentos.

Para realizar las interpolaciones, como se mencionó en el apartado anterior cuando se obtuvo el modelo de interpolación *IDW* de carga hidráulica, es necesario acceder a la caja de herramientas de *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*. Después seleccionar la pestaña de “*Spatial Analyst Tools*” y dentro de esta elegir la opción “*Interpolation*”.

En la sección “*Interpolation*” se despliegan todos los métodos disponibles en la herramienta de interpolación de *ArcMap 10.3*, los cuales son los siguientes: “*IDW*”, “*Kriging*”, “*Natural Neighbor*”, “*Spline*”, “*Spline with Barriers*”, “*Topo to Raster*”, “*Topo to Raster by File*” y “*Trend*”. De todas estas opciones solo se eligen tres: *IDW*, *Kriging* y *Spline*.

Para el modelo de interpolación de nivel piezométrico medio (*NPM*) por el método de *IDW* se selección esta opción dentro de “*Interpolation*”, así pues, aparece una ventana en la que se solicita la capa de puntos con el atributo a interpolar, también solicita elegir la variable a interpolar, es decir el campo de valor *Z* (“*Z value field*”), que para este caso es el nivel piezométrico medio (*NPM*). Después se elige la carpeta en la que se guarda el formato ráster de salida, tomando un tamaño de celda de entre 20 a 30 unidades para una mejor resolución con la escala del mapa (en estos casos se toma 26.78 unidades ya que es el que mejor se ajusta a la escala manejada en el mapa de la Bahía Salsipuedes), también se elige una potencia de 2 y radio variable; como se puede ver en la **Figura 7.26**.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

Se aceptan todas las condiciones oprimiendo “*Ok*” y aparece en pantalla el modelo de interpolación por el método *IDW* para los niveles piezométricos medios (*NPM*) de la instrumentación de la Bahía Salsipuedes, el cual se observa en la **Figura 7.27**.

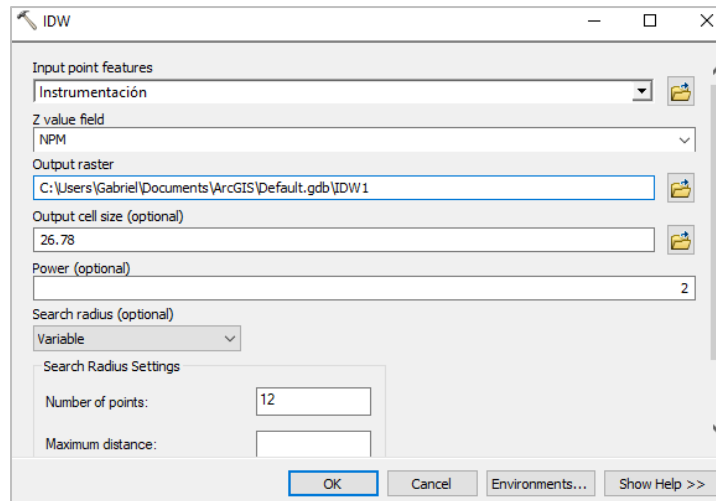


Figura 7.26. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (NPM).

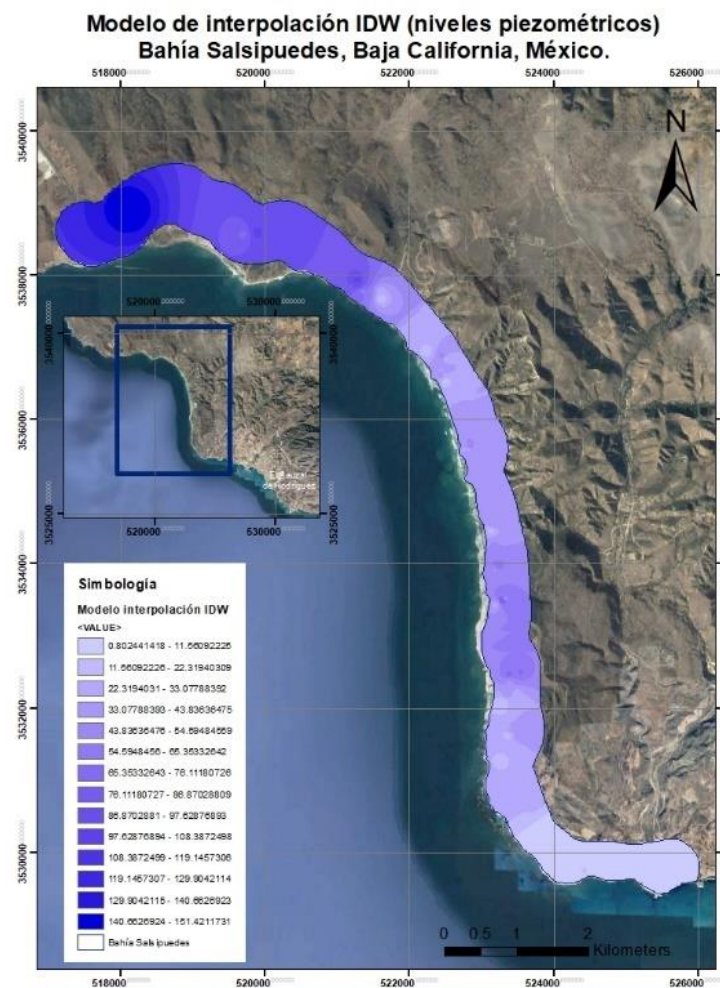


Figura 7.27. Modelo de interpolación IDW para niveles piezométricos medios (NPM) en la Bahía Salsipuedes.

El siguiente modelo de interpolación de los niveles piezométricos medios (*NPM*) es por el método de Kriging, para esto se accede nuevamente a la pestaña “*Interpolation*” y se selecciona la opción “*Kriging*”. Aparece una ventana en la que se solicita la nube de puntos a interpolar, el valor en Z que corresponde al nivel piezométrico medio (*NPM*), además de elegir la carpeta destino donde se guarda el formato ráster resultante, también se asigna el método de Kriging ordinario, con el modelo del semivariograma esférico (“*Spherical*”), se debe elegir un tamaño de celda entre 20 a 30 unidades (26.78 unidades en este caso para ajustarlo a la escala que se maneja el mapa), así como un radio de búsqueda variable y un número de 12 puntos a interpolar en dicho radio variable. Tal como se muestra en la **Figura 7.28**.

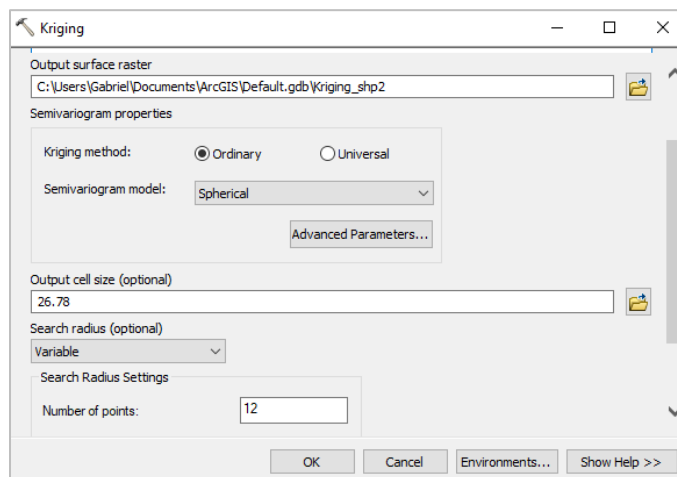


Figura 7.28. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación Kriging (*NPM*).

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

Se aceptan todas las condiciones oprimiendo “*Ok*” y aparece en pantalla el modelo de interpolación por el método Kriging para los niveles piezométricos medios (*NPM*) de la instrumentación de la Bahía Salsipuedes, el cual se observa en la **Figura 7.29**.

El último modelo de interpolación de los niveles piezométricos medios (*NPM*) es por el método de Spline, para esto se accede a la pestaña “*Interpolation*” y se elige la opción “*Spline*”. Aparece una ventana en la que se solicita los la nube de puntos a interpolar, de la que se elige el valor en Z correspondiente al nivel piezométrico medio (*NPM*). Enseguida se elige la carpeta en la que se guarda el formato ráster resultante. También se elige un tamaño de celda de entre 30 a 40 unidades debido a la escala del mapa (en este caso particular se utilizó una celda de 35.709 unidades por la escala), con un tipo de Spline regularizado (“*Regularized*”), un peso de celda de 0.1 definido por las terceras derivadas en superficie y 12 como número de puntos dentro de la región de aproximación local. Tal como se muestra en la **Figura 7.30**.

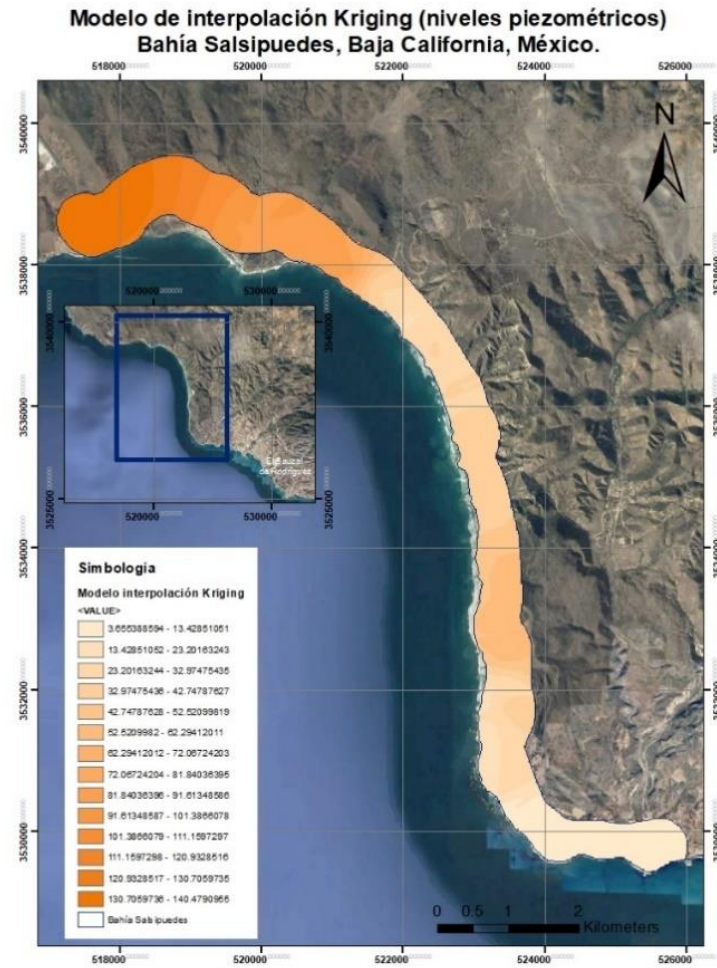


Figura 7.29. Modelo de interpolación Kriging para niveles piezométricos medios (NPM) en la Bahía Salsipuedes.

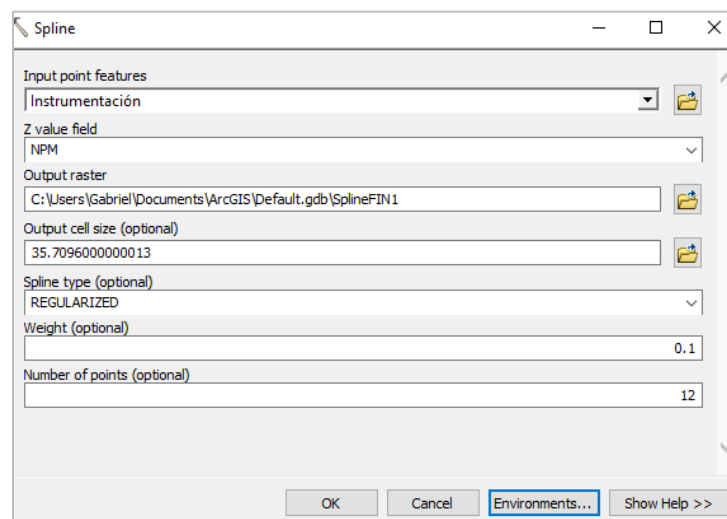


Figura 7.30. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación Spline (NPM).

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

Se aceptan todas las condiciones oprimiendo “*Ok*” y aparece en pantalla el modelo de interpolación por el método Spline para los niveles piezométricos medios (NPM) de la instrumentación de la Bahía Salsipuedes, el cual se observa en la **Figura 7.31**.

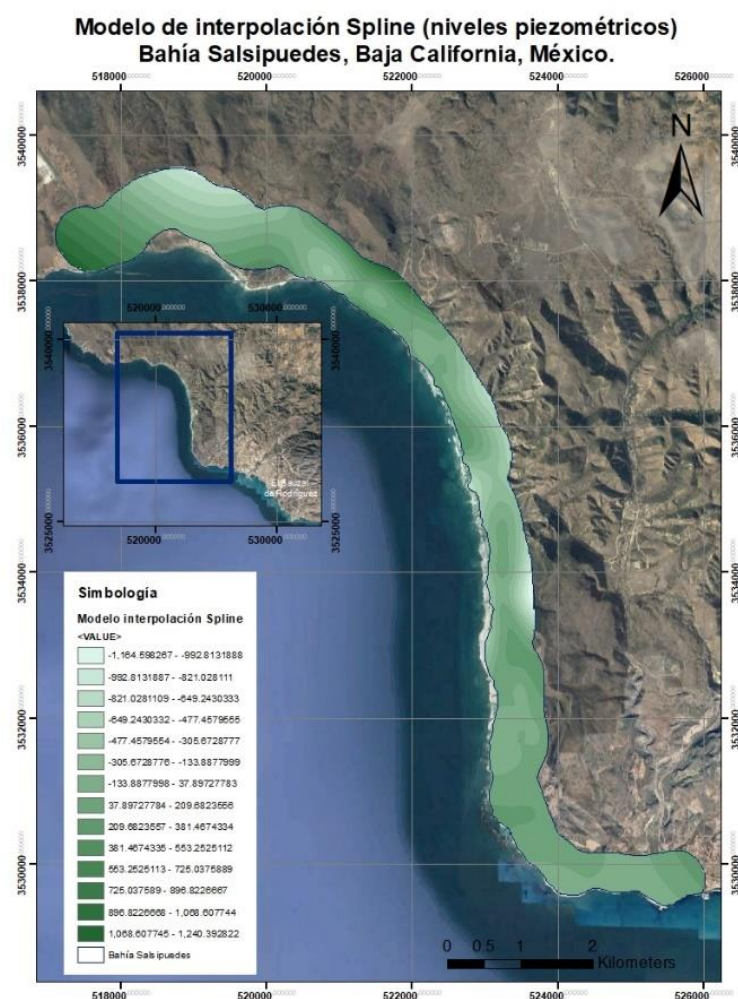


Figura 7.31. Modelo de interpolación Spline para niveles piezométricos medios (NPM) en la Bahía Salsipuedes.

El siguiente paso es hacer una evaluación visual y comparar los tres métodos de interpolación, para descartar el modelo de interpolación con menor precisión general. Para ello se superponen las tres capas ráster en ArcMap 10.3, correspondientes a la **Figura 7.27**, la **Figura 7.29** y la **Figura 7.31**.

Realizando esa revisión general se puede notar que el modelo de interpolación correspondiente al método de *Spline*, es el que más discrepa con los resultados, ya que los valores obtenidos en esa interpolación manejan una escala por encima de los valores previstos en los puntos de control

piezométrico. Siendo 1,240 mca los valores máximos interpolados en el método de *Spline*, mientras que en *IDW* rondan en 150 mca y en *Kriging* 140 mca. Por lo tanto, el primer modelo descartado es el generado por el método de *Spline*.

Habiendo eliminado un modelo, se realiza una validación de los dos modelos restantes con ayuda de la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*), para ello se sigue el procedimiento descrito en la sección de *Marco teórico* mediante el uso de la ecuación (41).

Para el modelo de interpolación de los niveles piezométricos medios por el método *IDW* se tiene que el valor de *RMSE* es de 22.447 (en unidades piezométricas, metros columna de agua); mientras que para el modelo por el método de *Kriging* el *RMSE* es igual a 23.955 (unidades piezométricas, metros columna de agua), en ambos casos menores a 26 unidades, requeridas para una escala 1:50,000 según la **Tabla 6.4**. En la **Figura 7.32** y la **Figura 7.33**, se observan unos gráficos de relación entre valores observados y calculados para los diferentes métodos de interpolación.

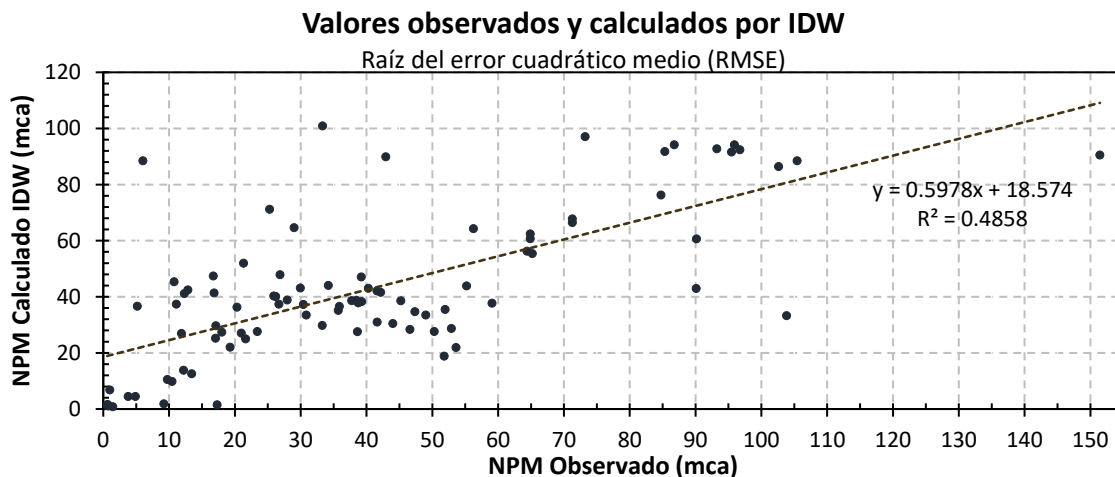


Figura 7.32. Relación de valores para modelo de interpolación IDW del cálculo RMSE.

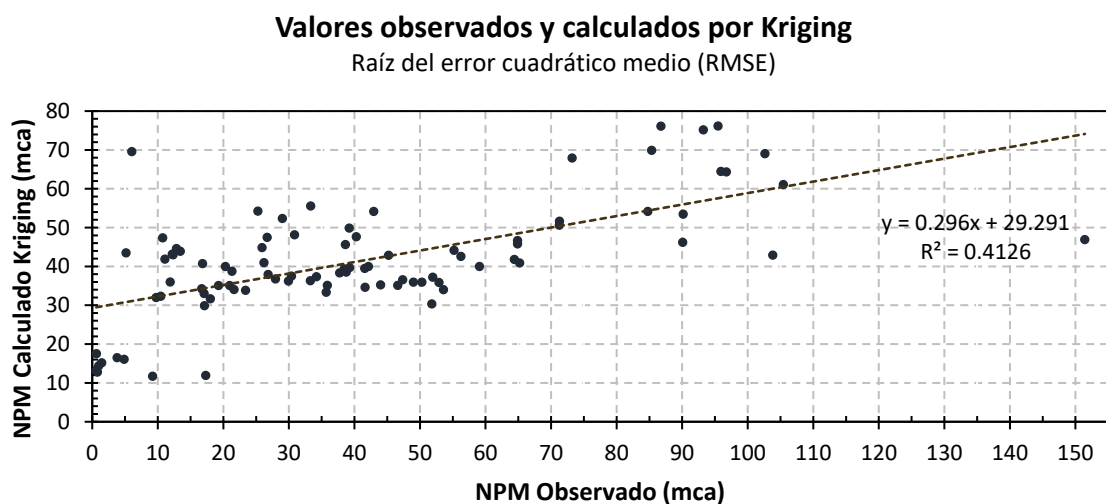


Figura 7.33. Relación de valores para modelo de interpolación Kriging del cálculo RMSE.

Como se puede ver en la **Figura 7.32**, correspondiente al modelo por *IDW*, la relación entre los valores observados (eje x) y calculados (eje y) de los niveles piezométricos medios de los 90 puntos de control se encuentran dispersos, con una tendencia a concéntrica en los valores con 20 a 50 mca, dando una R^2 de 0.4858; mientras que para la **Figura 7.33**, correspondiente al modelo por *Kriging*, los valores observados y calculados se encuentran más dispersos que los anteriores, y su concentración entre 20 a 50 mca se encuentra más abierta, con una R^2 de 0.4126. Por lo anterior se puede decir que el mejor ajuste de la recta es otorgado al modelo creado con el método *IDW*, ya que su nube de datos está más compacta a la recta.

Los resultados de *RMSE* para ambos modelos de interpolación se encuentran por debajo de las 26 unidades, que para la escala de 1:50,000 (que maneja el mapa de la Bahía Salsipuedes) es el máximo aceptable. Es por ello que el modelo de niveles piezométricos medios más preciso es el correspondiente al *RMSE* menor, el cual es de 22.447 unidades piezométricas (mca) para el realizado por el método *IDW*.

El penúltimo paso después de haber seleccionado el modelo de interpolación de niveles piezométricos medios más preciso es obtener las isolíneas piezométricas de dicho modelo, también denominadas líneas equipotenciales. Para ello es necesario acceder a la caja de herramientas de *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*, en la pestaña de “*Spatial Analyst Tools*”, seleccionar la opción “*Surface*” seguida de “*Contour*”. Enseguida se abrirá una ventana como la que aparece en la **Figura 7.34**.

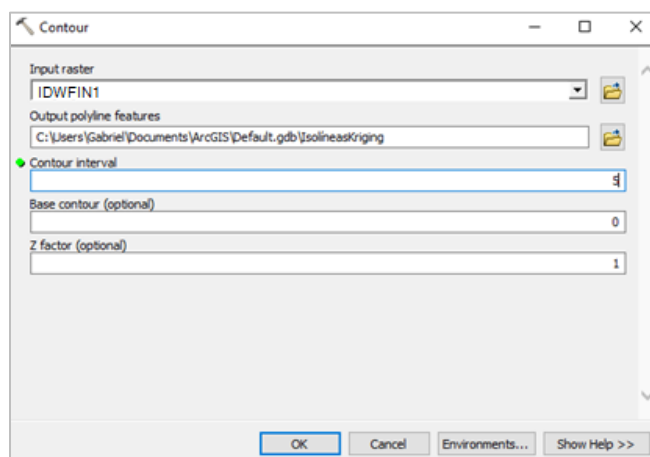


Figura 7.34. Interfaz en *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* para obtención de contornos en modelo de interpolación (*Contour*).

En la **Figura 7.34**, se puede observar la ventana emergente que solicita la capa ráster de la cual se quieren obtener los contornos o isolíneas, en este caso es el modelo generado con el método *IDW*, también se indica la carpeta en la que se guarda la capa de polilíneas generadas. Además, se especifica que las isolíneas o contornos sean a cada 5 mca (“*Contour interval*”), con una base de contorno igual a 0 (cero) y un factor Z de 1. El resultado es la generación de las líneas equipotenciales correspondientes al nivel piezométrico medio de la Bahía Salsipuedes, que se pueden observar en la **Figura 7.35**.

Isolíneas piezométricas por método IDW en Bahía Salsipuedes, Baja California, México.

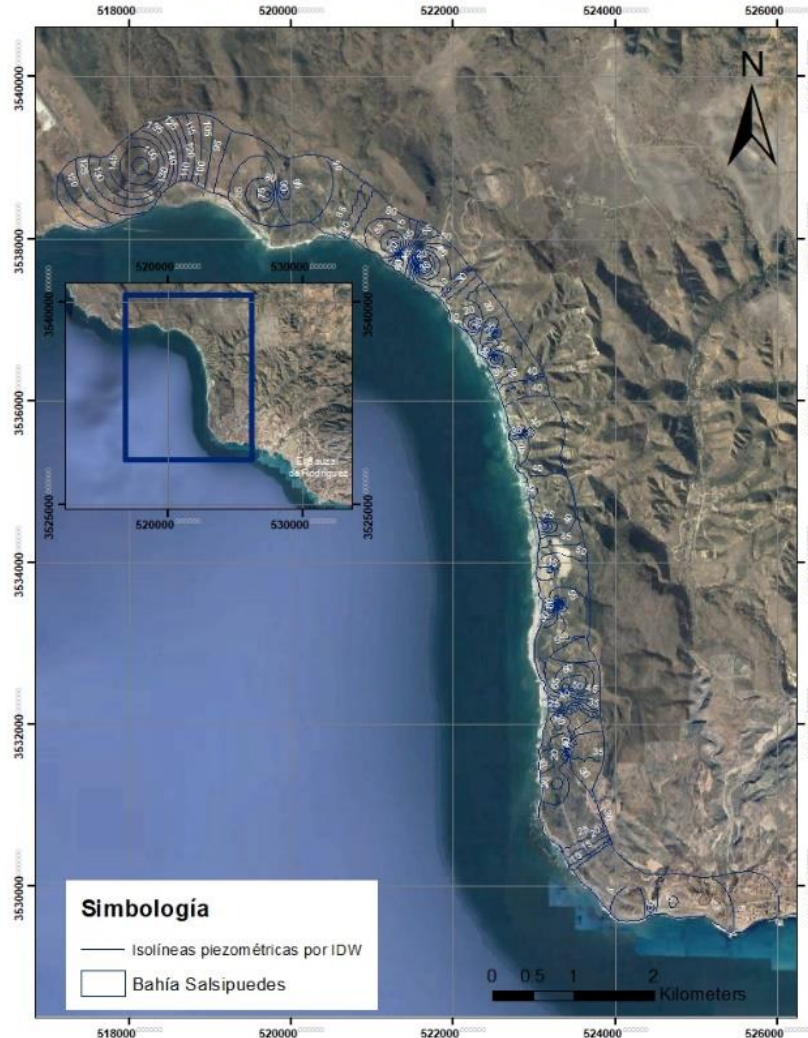


Figura 7.35. Líneas equipotenciales (Isolíneas piezométricas) por el método de IDW en la Bahía Salsipuedes.

7.3.3 Generación de la red de flujo

El último paso de la metodología particular de la generación de las redes de flujo sub – superficial de la Bahía Salsipuedes es la unión de las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, para ello dentro de la interfaz del programa ArcMap 10.3 de ArcGIS se activan ambas capas y se traslapan, permitiendo observar cómo se entrelazan perpendicularmente las líneas de flujo a las equipotenciales. Haciendo que la dirección del flujo sea hacia las concentraciones piezométricas marcadas por la instrumentación. El mapa generado de las redes de flujo sub – superficial de la Bahía Salsipuedes es el que se muestra en la **Figura 7.36**. Más adelante en la sección de *Resultados y discusiones*, se genera un breve análisis del mismo.

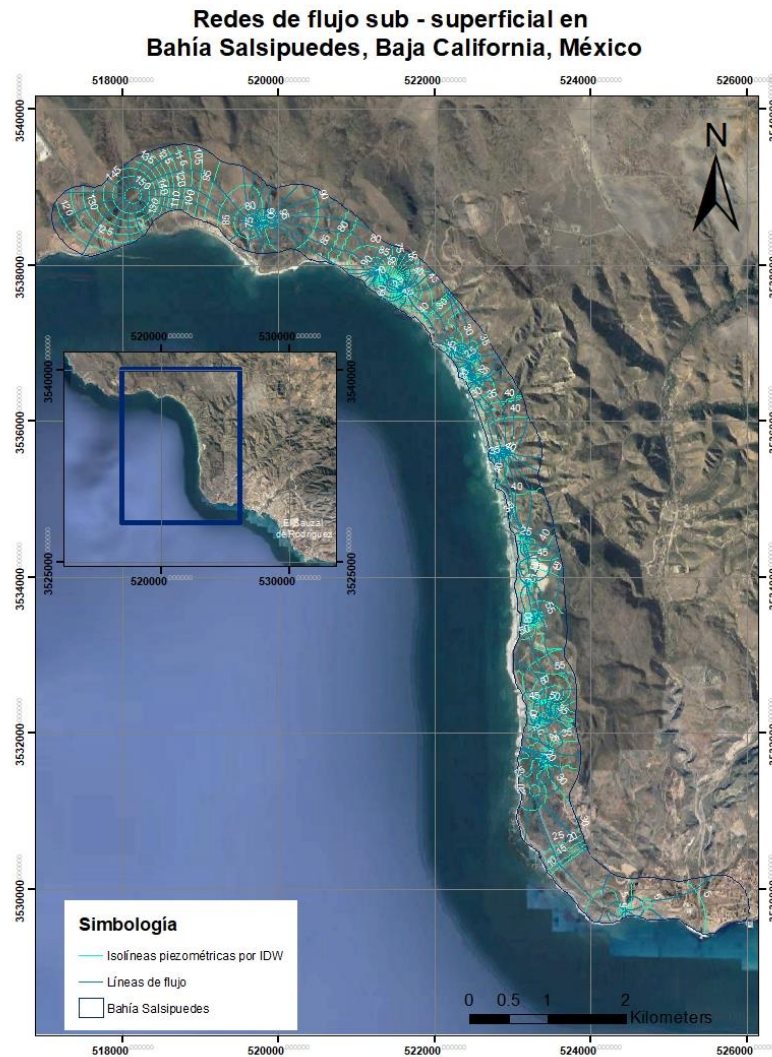


Figura 7.36. Redes de flujo sub – superficial de la Bahía Salsipuedes.

7.4 Gasto de las redes de flujo

El gasto o caudal hidráulico de una red de flujo se puede calcular por diferentes metodologías y autores, en este caso particular se opta por utilizar la ecuación de Darcy, que se definió en la sección de *Marco teórico*. La ecuación de Darcy estima el gasto o caudal que fluye a través de un medio poroso saturado por una red de flujo y, por lo tanto, depende directamente las características geohidrológicas de la roca (medio poroso) y la geometría de la red.

Como se mencionó anteriormente, las redes de flujo al no ser cuadradas perfectamente es necesario aplicar un factor de forma de la red, así como la relación entre ancho y base de los cuadrados curvilíneos, es por ello que para calcular o estimar el gasto promedio que fluye a través de la red de flujo del medio poroso en la Bahía Salsipuedes es necesario utilizar la ecuación (38), mostrada a continuación y mencionada en la sección de *Marco teórico*.

De esta ecuación se entiende que el gasto o caudal total de una red de flujo está representado por la letra Q y se mide en m^3/s , la conductividad hidráulica es la correspondiente al medio poroso o

roca y se mide en m/día, la carga hidráulica h es la diferencia de niveles piezométricos medios (NPM) dando origen a lo que se denomina gradiente hidráulico y se mide en mca, N_f es el número de canales de flujo (adimensional), N_c es el número de caídas de potencial (adimensional) y su relación da origen a un factor de forma de la red de flujo, en cuanto a la relación de ancho y base los rectángulos curvilíneos de la red de flujo son representados por a y b respectivamente.

Definidos cada uno de los elementos de la ecuación, es necesario seguir una metodología particular para estimar el caudal de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes, esta se muestra en la **Figura 7.37**.

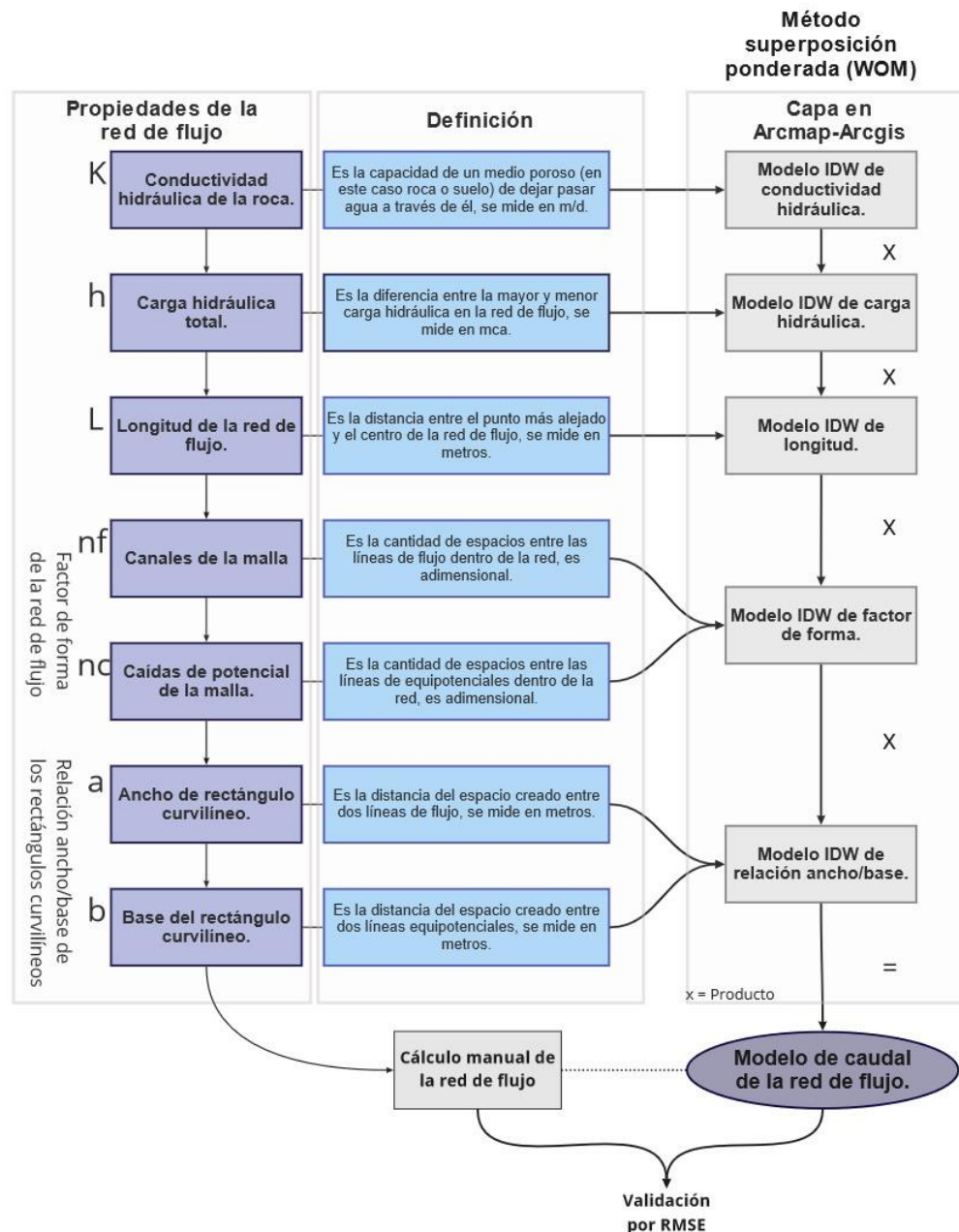


Figura 7.37. Metodología particular para el cálculo de caudal de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes.

7.4.1 Caudales por superposición difusa ponderada.

Según la metodología particular de la **Figura 7.37**, el primer paso es obtener cada una de las propiedades de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes, para eso es necesario realizar una base de datos complementaria llamada puntos de control piezométrico.

Como se puede ver en la **Figura 7.36**, hay un total de 36 redes de flujo a lo largo de la Bahía Salsipuedes, por lo que es necesario realizar 36 puntos de control piezométrico para esas redes, cada punto de control tendrá la información general de la red de flujo atribuida, la cual corresponde a el número de canales de flujo, las caídas de potencial, el ancho de canal de flujo, la base de la caída de potencial, el largo de canal de flujo, la carga piezométrica mayor y menor en la red de flujo, así como la diferencia de carga piezométrica o gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica de la roca sobre la cual se encuentra el punto de control.

Se colocan puntos de control, llamados puntos de control piezométrico (PCP) numerándolos del 1 al 36 (uno para cada red de flujo), donde el *PCP-01* está ubicado en el kilómetro 83+000 y el *PCP-36* en el kilómetro 98+000, seguido de esto se obtienen sus coordenadas.

La obtención de los datos geométricos de la red de flujo se hace gráficamente con ayuda de la herramienta “*Measure*” dentro de la interfaz de *ArcMap 10.3*, mientras que la conductividad hidráulica es atribuida directamente de la base de datos geohidrológicos.

Se mide cada rectángulo curvilíneo dentro de las 36 redes de flujo, así como longitudes de los canales de flujo (espacio entre dos líneas de flujo) y los gradientes hidráulicos (diferencia de carga piezométrica media entre la entrada y salida de la red). Con esta información recopilada se genera la base de datos, las unidades de medida de cada elemento de la base de datos se encuentran en piezas (*Nf*, *Nc*) metros (*a*, *b* y *L*), metros columna de agua (*hi*, *hf* y *h*) y metros/día (*K*). En la **Tabla 7.7** se presenta la base de datos generada para los puntos de control piezométrico.

Tabla 7.7. Base de datos de puntos de control piezométrico de la Bahía Salsipuedes.

Punto de control piezométrico (PCP)	Coordenadas		Red de flujo				
	X	Y	Largo de canal de flujo "L" (m)	Diferencia de cargas "h" (mca)	Conductividad hidráulica "K" (m/día)	Nf/Nc	a/b
PCP-1	518130.424	3538900.972	974.83	50.00	0.00001	1.70	2.38
PCP-2	519692.949	3538562.400	822.01	25.00	0.00001	3.40	1.23
PCP-3	519894.375	3538586.639	1008.17	20.00	0.00001	4.00	0.32
PCP-4	521274.143	3537940.223	388.33	20.00	0.00001	3.75	0.97
PCP-5	521361.722	3537773.943	217.04	20.00	0.00010	3.00	1.44
PCP-6	521612.305	3537672.463	514.30	45.00	0.00010	1.78	1.63
PCP-7	522246.928	3536938.977	570.13	20.00	0.00010	3.50	1.03
PCP-8	522444.961	3536889.199	600.42	15.00	0.00010	4.67	0.90
PCP-9	522502.816	3536834.219	261.25	20.00	0.00010	2.50	1.05
PCP-10	522441.635	3536764.096	154.08	10.00	0.00010	7.00	0.49
PCP-11	522429.770	3536618.990	122.66	15.00	0.00010	4.67	1.16
PCP-12	522503.914	3536529.315	353.88	25.00	0.00010	2.80	1.11

PCP-13	522901.103	3535619.666	859.87	15.00	0.00010	4.67	0.67
PCP-14	522857.337	3535622.885	616.70	15.00	0.00010	4.33	1.00
PCP-15	522822.656	3535581.958	534.17	20.00	0.00010	3.50	0.65
PCP-16	522751.499	3535582.222	375.30	10.00	0.00010	7.50	0.98
PCP-17	523158.002	3534567.006	699.94	5.00	0.01000	12.00	1.04
PCP-18	523127.002	3534457.957	399.97	20.00	0.01000	2.75	1.40
PCP-19	523178.691	3534254.965	157.39	10.00	0.00080	3.50	0.54
PCP-20	523222.911	3533963.363	534.49	10.00	0.00080	4.00	1.15
PCP-21	523181.870	3533905.388	125.62	10.00	0.00080	3.50	0.45
PCP-22	523324.601	3533513.611	782.76	35.00	0.00080	1.00	0.87
PCP-23	523288.042	3533484.496	537.70	30.00	0.00080	1.33	2.65
PCP-24	523188.961	3533427.824	463.96	25.00	0.00080	1.40	3.31
PCP-25	523540.591	3532480.387	540.68	15.00	0.00080	2.67	1.22
PCP-26	523382.416	3532469.904	455.08	20.00	0.00080	1.75	2.42
PCP-27	523501.292	3532190.701	391.23	20.00	0.00080	2.75	1.54
PCP-28	523359.079	3532192.311	94.82	20.00	0.00080	1.75	2.38
PCP-29	523287.583	3532093.327	222.71	10.00	0.00080	5.00	2.56
PCP-30	523501.658	3531769.902	486.92	10.00	0.00080	4.00	0.69
PCP-31	523397.163	3531692.663	316.20	15.00	0.00080	2.33	2.69
PCP-32	523387.559	3531617.479	327.94	15.00	0.00080	2.33	0.83
PCP-33	523276.675	3531269.946	701.85	10.00	0.00080	4.00	1.17
PCP-34	524161.916	3529741.221	732.73	20.00	0.00080	1.75	1.24
PCP-35	524428.071	3529732.403	408.43	10.00	0.00080	3.00	1.70
PCP-36	524710.078	3529809.588	1246.29	5.00	0.00080	7.00	0.85

Esa base de datos se adjunta con el comando “*Add data*” a *ArcMap 10.3*, se crea la capa de puntos en formato ráster como se hizo en la sección de *Inserción de información* de este mismo apartado, con lo cual quedaría una distribución de puntos de control piezométrico como se muestra en la **Figura 7.38**.

Teniendo en la interfaz de *ArcMap 10.3* los puntos de control piezométricos con atributos correspondientes a las 36 redes de flujo de la Bahía Salsipuedes, el siguiente paso de la metodología particular es generar cada uno de los modelos de interpolación por el método *IDW* en formato ráster, que permitan estimar el gasto o caudal en la zona de estudio. Según la **Figura 7.37**, estos modelos son: el modelo de conductividad hidráulica, el modelo de carga hidráulica total, el modelo de longitudes de canal de flujo, el modelo de factor de forma y el modelo de relación ancho/base de los rectángulos curvilíneos.

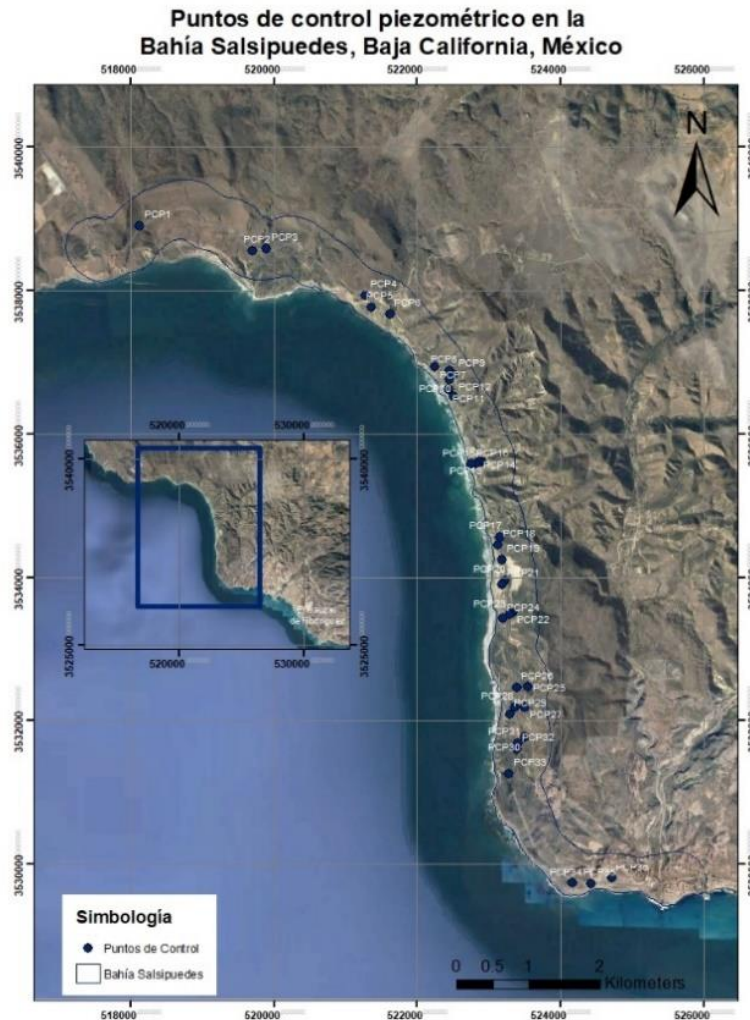


Figura 7.38. Localización de puntos de control piezométrico en la Bahía Salsipuedes.

Para la generación de los modelos de interpolación por *IDW*, se accede a la barra de herramientas y se selecciona la opción de “*Spatial Analyst Tools*”, se abre un listado del que se escoge “*Interpolation*” seguido de “*IDW*”, con lo que aparece la siguiente ventana emergente:

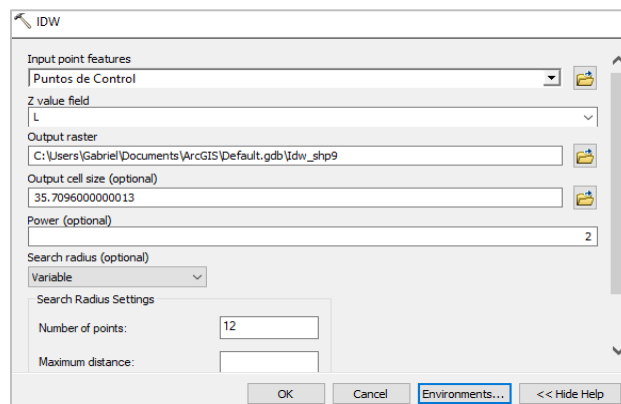


Figura 7.39. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Longitud de canal de flujo).

El mismo procedimiento se sigue para la obtención de los modelos *IDW*, únicamente cambiando el campo de valor *Z* ("*Z value field*") por los valores de longitudes medias de canales, conductividad hidráulica, carga hidráulica total, factor de forma y relación ancho/base. Los modelos de interpolación resultantes se pueden observar en la **Figura 7.40** y la **Figura 7.41**.

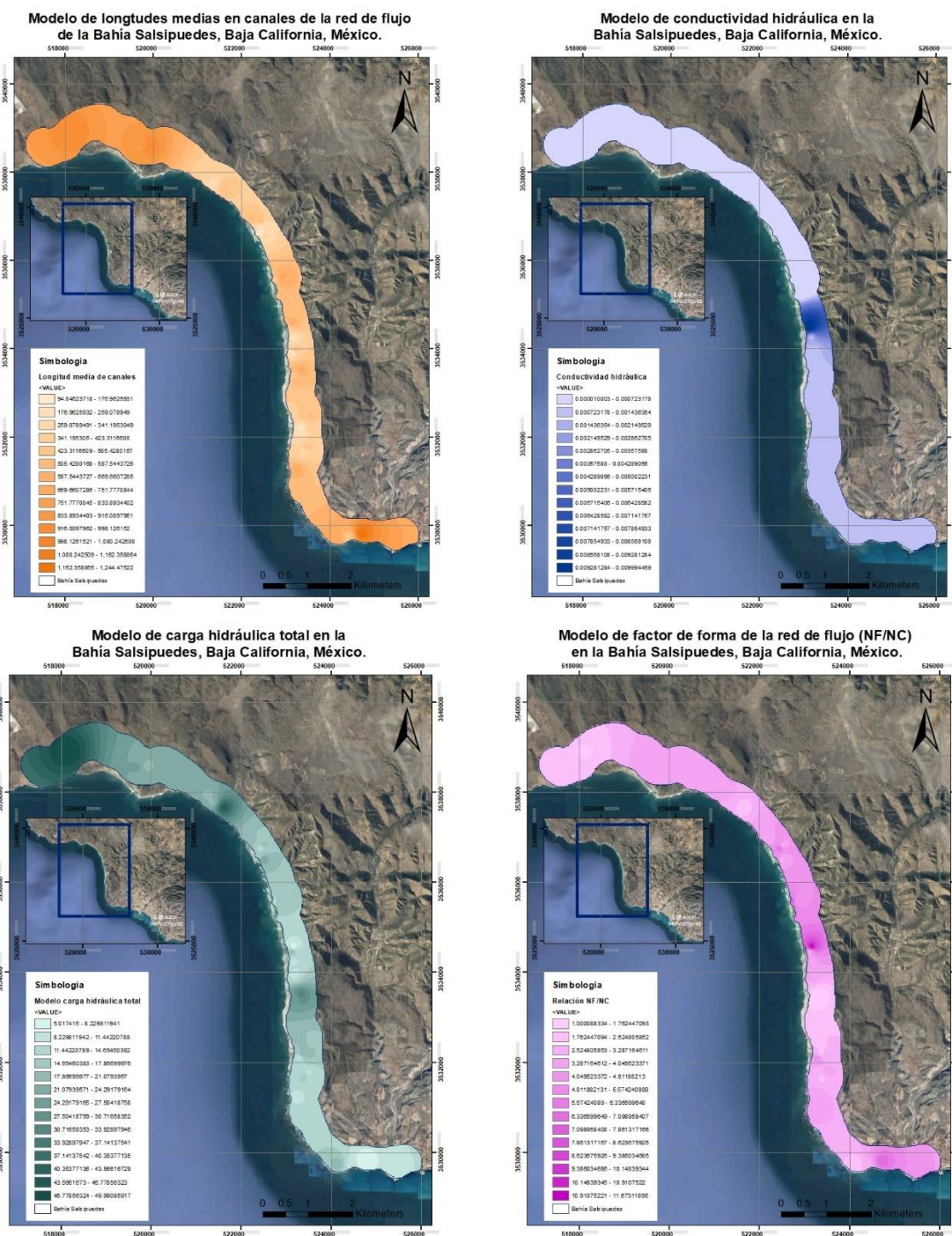


Figura 7.40. Modelos de interpolación por método *IDW* para propiedades de la red de flujo: longitud de canales de flujo (superior izquierda), conductividad hidráulica (superior derecha), carga hidráulica total (inferior izquierda) y factor de forma (inferior derecha).

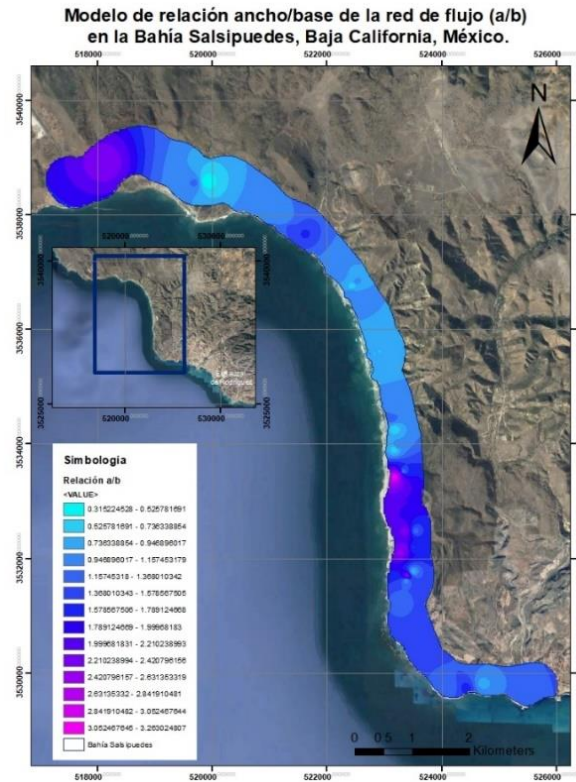


Figura 7.41. Modelo de interpolación por método IDW para propiedades de la red de flujo: relación de ancho/base de los rectángulos curvilíneos.

El siguiente paso es realizar el método de superposición difusa (ponderada) o *Fuzzy – WOM* (por sus siglas en inglés) con la finalidad de obtener del modelo de caudales de la Bahía Salsipuedes. El método de superposición difusa (ponderada) se encarga de sobreponer capas en formato ráster las cuales tienen un valor en atributos por celda, cada celda de la capa contiene un valor el cual puede ser sumado, restado, multiplicado o dividido entre una o varias capas, este método en *ArcMap 10.3* se puede ejercer con la pestaña “*Overlay*”.

La razón por la cual se elige el método de superposición ponderada a diferencia del análisis multicriterio normal, es debido a que cada capa contiene celdas cuyos valores son números reales, los cuales deben ser multiplicados entre sí. Mientras que, para realizar un análisis multicriterio, es necesario reclasificar los valores en números reales, por un código binario, es decir, valores de celda con 0 y 1, donde 0 es un valor nulo y 1 es un valor real.

Para realizar la superposición es necesario acceder a la caja de herramientas de *ArcMap 10.3*, abrir la pestaña de “*Spatial Analyst Tools*” y seleccionar el apartado de “*Overlay*”, enseguida elegir la opción “*Fuzzy Overlay*”, que sigue la metodología de superposición difusa (ponderada) mencionada en la sección de *Estado del arte* y *Marco Teórico*.

En la interfaz del programa para “*Fuzzy Overlay*” se seleccionan las 5 (cinco) capas ráster que intervienen en la estimación del caudal por medio de la fórmula de Darcy, es decir, los modelos de conductividad hidráulica, carga hidráulica total, longitud media de los canales de flujo, factor de forma de la red de flujo y relación ancho/base de rectángulos curvilíneos de la red. En la sección

“*Overlay Type*”, se selecciona la opción “*Product*” que va indicar que todas las celdas superpuestas se multiplicarán entre sí.

El resultado del procesamiento es el modelo de caudales de la Bahía Salsipuedes proveniente de la nube de puntos de control piezométrico mediante el método de superposición difusa ponderada (*Fuzzy – WOM*). El modelo resultante se puede observar en la **Figura 7.42**.

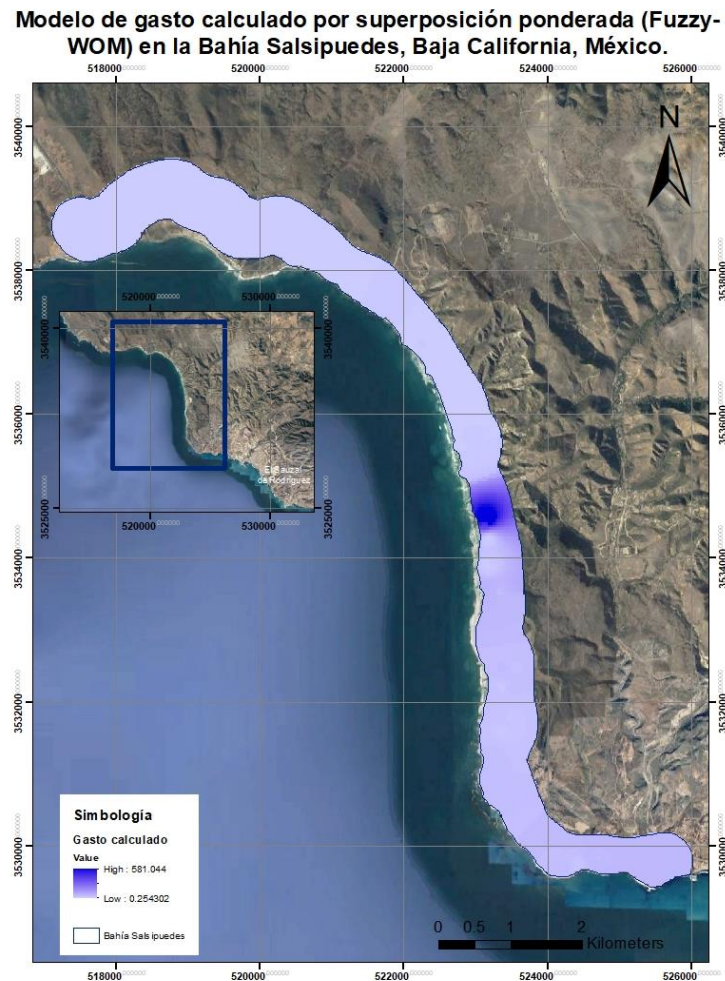


Figura 7.42. Modelo de gasto (caudal) de la Bahía Salsipuedes, calculado por el método de superposición difusa ponderada (*Fuzzy – WOM*).

Teniendo el modelo de caudales se pueden generar isolíneas de caudal (gasto), las cuales son aquellas líneas que unen puntos de la misma magnitud de caudal; para ello se accede a la paquetería “*Surface*” de la caja de herramientas y se selecciona el comando “*Contour*”. Se elige la capa correspondiente al modelo de caudales y se elige una separación entre isolíneas a cada 20 m³/día. Para dar formato y poner etiquetas se accede con clic derecho a “*Properties*” de la capa de isolíneas de caudal (gasto) generadas. En la **Figura 7.43**, se muestra la capa de isolíneas resultante.

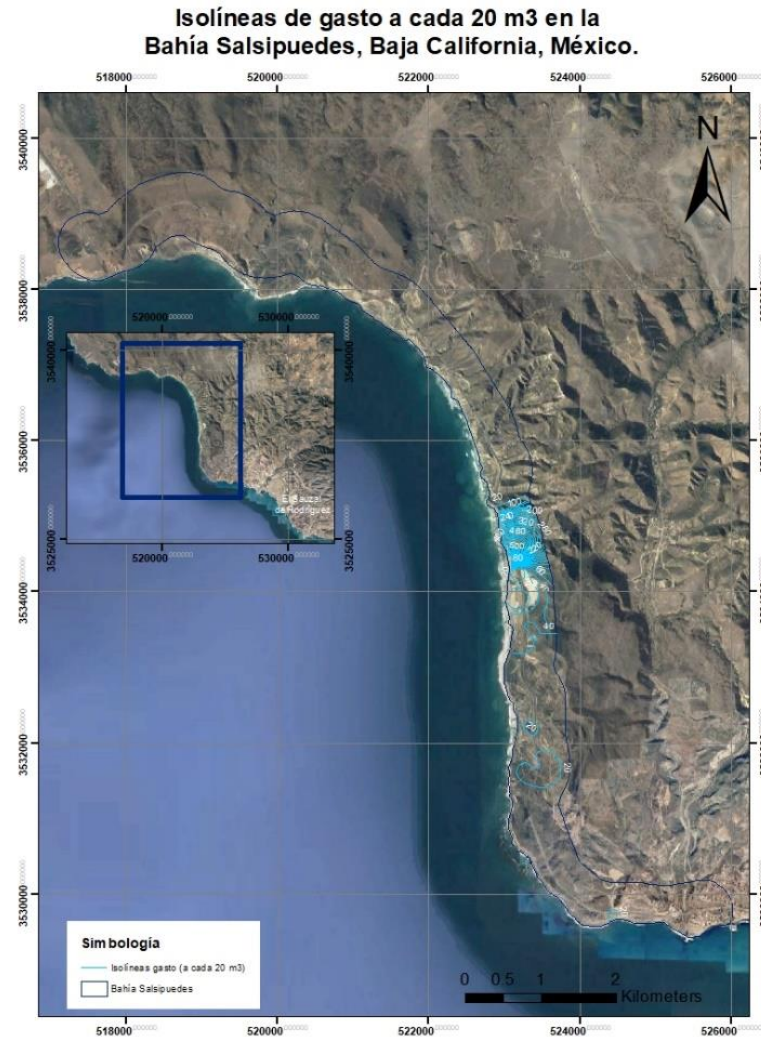


Figura 7.43. Islíneas de gasto a cada 20 m³/día, en la Bahía Salsipuedes.

7.4.2 Caudales por método tradicional

De manera alterna y simultánea se puede realizar el cálculo del caudal en las 36 redes de flujo, por medio de la ecuación (38), es decir, desde la tabla de la base de datos de puntos de control piezométrico **Tabla 7.3**, se puede programar la ecuación de Darcy y obtener el caudal (gasto) para el punto de control piezométrico, dado que las propiedades de dicho punto son con base a la totalidad de la red de flujo a la que pertenece. Es así como la **Tabla 7.8**, multiplica las columnas “*L*”, “*h*”, “*K*” “*N_f/N_c*” y “*a/b*”, dando como resultado un caudal estimado, denominado “*Q_e*” en m³/día.

Tabla 7.8. Estimación de caudales por ecuación de Darcy.

Red de flujo							
Punto de control piezométrico (PCP)	Largo de canal de flujo "L" (m)	Diferencia de cargas "h" (mca)	Conductividad hidráulica "K" (m/día)	Nf/Nc	a/b	Gasto estimado "Qe" (m³/día)	Gasto ArcMap "Qa" (m³/día)
PCP-1	974.83	50.00	0.00001	1.70	2.38	1.97	2.01
PCP-2	822.01	25.00	0.00001	3.40	1.23	0.86	0.86
PCP-3	1008.17	20.00	0.00001	4.00	0.32	0.25	0.28
PCP-4	388.33	20.00	0.00001	3.75	0.97	0.28	1.50
PCP-5	217.04	20.00	0.00010	3.00	1.44	1.87	1.95
PCP-6	514.30	45.00	0.00010	1.78	1.63	6.71	6.49
PCP-7	570.13	20.00	0.00010	3.50	1.03	4.11	3.99
PCP-8	600.42	15.00	0.00010	4.67	0.90	3.78	3.74
PCP-9	261.25	20.00	0.00010	2.50	1.05	1.37	1.97
PCP-10	154.08	10.00	0.00010	7.00	0.49	0.52	1.06
PCP-11	122.66	15.00	0.00010	4.67	1.16	1.00	1.30
PCP-12	353.88	25.00	0.00010	2.80	1.11	2.76	2.70
PCP-13	859.87	15.00	0.00010	4.67	0.67	4.03	4.14
PCP-14	616.70	15.00	0.00010	4.33	1.00	4.02	3.97
PCP-15	534.17	20.00	0.00010	3.50	0.65	2.42	2.58
PCP-16	375.30	10.00	0.00010	7.50	0.98	2.77	2.80
PCP-17	699.94	5.00	0.01000	12.00	1.04	436.08	439.14
PCP-18	399.97	20.00	0.01000	2.75	1.40	306.88	316.83
PCP-19	157.39	10.00	0.00080	3.50	0.54	2.38	4.69
PCP-20	534.49	10.00	0.00080	4.00	1.15	19.62	19.03
PCP-21	125.62	10.00	0.00080	3.50	0.45	1.57	2.13
PCP-22	782.76	35.00	0.00080	1.00	0.87	19.04	18.31
PCP-23	537.70	30.00	0.00080	1.33	2.65	45.61	45.43
PCP-24	463.96	25.00	0.00080	1.40	3.31	42.96	42.82
PCP-25	540.68	15.00	0.00080	2.67	1.22	21.13	22.68
PCP-26	455.08	20.00	0.00080	1.75	2.42	30.90	30.37
PCP-27	391.23	20.00	0.00080	2.75	1.54	26.54	27.52
PCP-28	94.82	20.00	0.00080	1.75	2.38	6.31	7.27
PCP-29	222.71	10.00	0.00080	5.00	2.56	22.79	22.28
PCP-30	486.92	10.00	0.00080	4.00	0.69	10.70	10.91
PCP-31	316.20	15.00	0.00080	2.33	2.69	23.82	23.19
PCP-32	327.94	15.00	0.00080	2.33	0.83	7.58	8.96
PCP-33	701.85	10.00	0.00080	4.00	1.17	26.23	26.13
PCP-34	732.73	20.00	0.00080	1.75	1.24	25.54	26.13
PCP-35	408.43	10.00	0.00080	3.00	1.70	16.62	17.35
PCP-36	1246.29	5.00	0.00080	7.00	0.85	29.50	30.99
Total						1160.55	1183.49

Como se observa en la **Tabla 7.8**, si se comparan el caudal total estimado con la ecuación de Darcy “ Q_e ”, contra el caudal total calculado por el modelo *Fuzzy – WOM* de *ArcMap 10.3* “ Q_a ” en la Bahía Salsipuedes, hay una diferencia de 22.94 m³/día, por ello que es necesario realizar una validación, lo que nos lleva al último paso de la metodología particular de cálculo de caudales en las redes de flujo.

7.4.3 Validación por RMSE

La validación de los resultados arrojados por el modelo de caudales estimado en el programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* con la herramienta de superposición difusa ponderada (“*Fuzzy Overlay*”), se realiza mediante el procedimiento de la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) con la ecuación (41) mencionada en la sección de *Marco teórico* y en el apartado *Líneas equipotenciales* de la sección de *Metodología*.

Se calcula el *RMSE* comparando el caudal estimado mediante la ecuación de Darcy “ Q_e ” y el caudal cuantificado mediante el método de superposición difusa ponderada de *ArcMap* “ Q_a ”. El valor correspondiente a la raíz del error cuadrático medio para los caudales de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes es de 1.882 unidades (en este caso m³/día), según la **Tabla 6.4**, para modelos con escalas aproximadas de 1:50,000, el valor máximo permisible para *RMSE* es de 26 unidades, por lo que se puede inferir que el modelo generado por el programa *ArcMap 10.3* y su herramienta “*Fuzzy Overlay*” tiene una relación muy precisa con los valores estimados con la ecuación de Darcy. Esta relación se puede ver en la **Figura 7.44**, donde los valores estimados (“ Q_e ”) y calculados (“ Q_a ”) siguen un patrón prácticamente lineal ascendente, con un valor de R^2 de 0.9998.

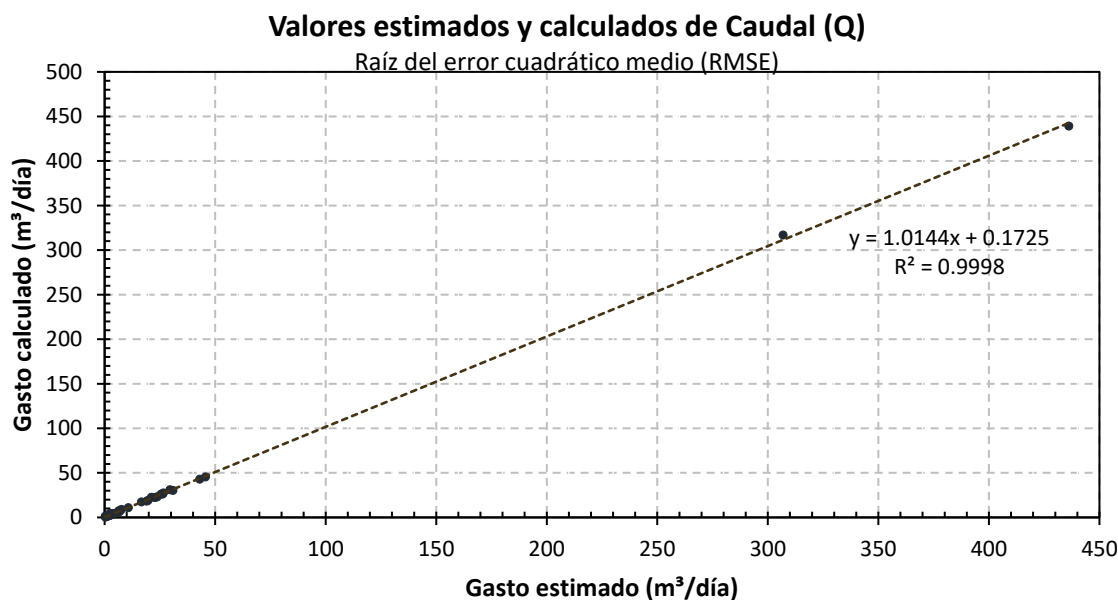


Figura 7.44. Relación de valores Q_e y Q_a de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes en el cálculo *RMSE*.

7.5 Análisis de riesgo geohidrológico

Continuando con la metodología general de esta investigación, el quinto paso a realizar es el análisis de riesgo geohidrológico, para lo cual es necesario definir una metodología particular. Este procedimiento se presenta en la **Figura 7.45**.

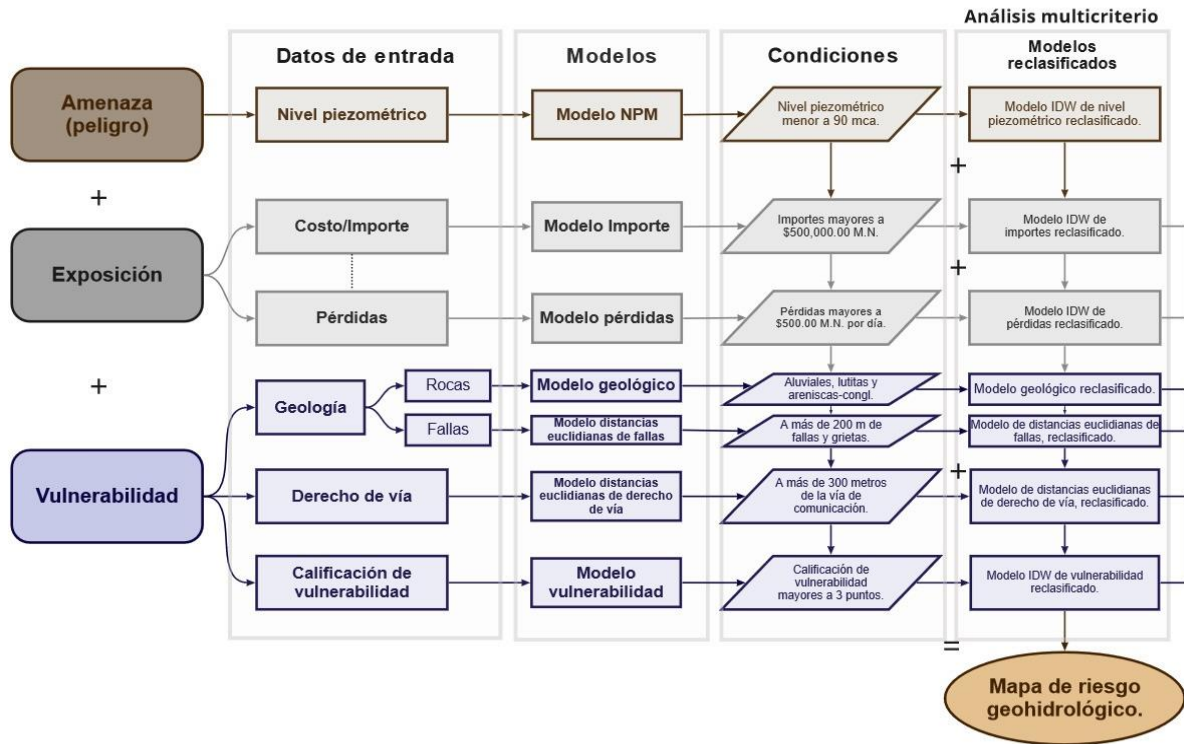


Figura 7.45. Metodología particular para en análisis del riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes.

Como se observa en la **Figura 7.45**, y claramente se menciona en la sección de *Riesgo* en el *Marco teórico*, el riesgo es la suma de tres factores: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Se entiende como amenaza a un evento físico perjudicial; la exposición por otro lado son los elementos (personas, bienes o sistemas) que pueden ser amenazados; mientras que la vulnerabilidad es la susceptibilidad de un elemento en exposición a sufrir un daño o pérdida (SEDATU, 2018).

7.5.1 Datos de entrada

Traduciendo los conceptos anteriores a la problemática actual en la Bahía Salsipuedes, se dice que el factor amenaza son los deslizamientos de tierra ocasionados principalmente por la acción del flujo de agua subterránea y sub – superficial, es decir el principal dato amenazante de entrada son los niveles piezométricos de la Bahía Salsipuedes.

El factor exposición queda representado por cada uno de los elementos que pueden ser afectados y están presentes en la Bahía Salsipuedes, los cuales básicamente se traducen a dinero, es decir, importes y pérdidas. Dichos valores están adjuntos en la base de datos socio – económicos.

El factor vulnerabilidad se define en tres aspectos principales: la geología del sitio representada por el tipo de roca y fallas en la Bahía Salsipuedes; el derecho de vía de la carretera escénica Tijuana –

Ensenada que corresponde a una franja de 300 metros de ancho sobre la cual tiene propiedad la Federación; y la calificación de vulnerabilidad estructural de los elementos en exposición.

7.5.2 Modelos de factores de riesgo

Teniendo definidos cada uno de los factores dentro de la ecuación (43) correspondiente al cálculo de riesgo, y por consiguiente los datos de entrada al sistema provenientes de las bases de datos, es posible generar los modelos en capas ráster para realizar el análisis multicriterio y álgebra de mapas.

Como factor de amenaza, con los datos de niveles piezométricos medios (*NPM*) de toda la instrumentación colocada en la Bahía Salsipuedes (tubos de observación y piezómetros), se genera un modelo de interpolación con el método *IDW*, correspondiente al nivel piezométrico medio de la zona de estudio, dicho modelo ya se creó en la metodología particular de *Redes de flujo*, por lo que se toma directamente la **Figura 7.27**.

Como factor exposición se generan dos modelos de interpolación por el método *IDW*, el primero correspondiente a los importes o costos atribuidos a cada elemento en exposición, y el segundo propio de las pérdidas monetarias diarias de esos mismos elementos. Para esto se siguen los mismos pasos que se han utilizado en secciones anteriores, es decir, se accede a la caja de herramientas de *ArcMap 10.3* y se elige la opción de “*Spatial Analyst Tools*”, después se escoge la pestaña de “*Interpolation*”, seguida de “*IDW*”. Se abrirá la siguiente ventana:

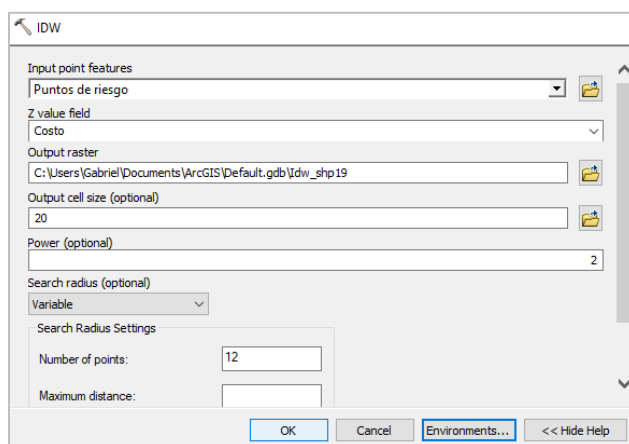


Figura 7.46. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Costo/Importe).

La interfaz del programa solicita la capa de puntos de control de riesgo, correspondiente a la base de datos socio – económica. Enseguida se elige el valor en Z que se requiere interpolar (“*Z value field*”), en el caso de la **Figura 7.46**, se especifica el costo o importe de la capa de puntos de los elementos en exposición; después se escoge la carpeta donde se guardará el modelo de interpolación de salida en formato ráster, tomando un tamaño de celda de entre 20 a 30 unidades para una mejor resolución con la escala del mapa (se toma 20 unidades para el modelo de costo/importe, así como para el de pérdidas), con una potencia de 2 y un radio variable.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

El resultado del procesamiento es la interpolación de la información proveniente de la nube de puntos de control socio – económicos de los elementos en exposición correspondiente al importe o costo. El mismo procedimiento se sigue para la obtención del modelo IDW de pérdidas, únicamente cambiando el campo de valor Z (“Z value field”) por los valores de pérdidas de la base de datos socio – económicos. Los modelos de interpolación resultantes se pueden observar en la **Figura 7.47**.

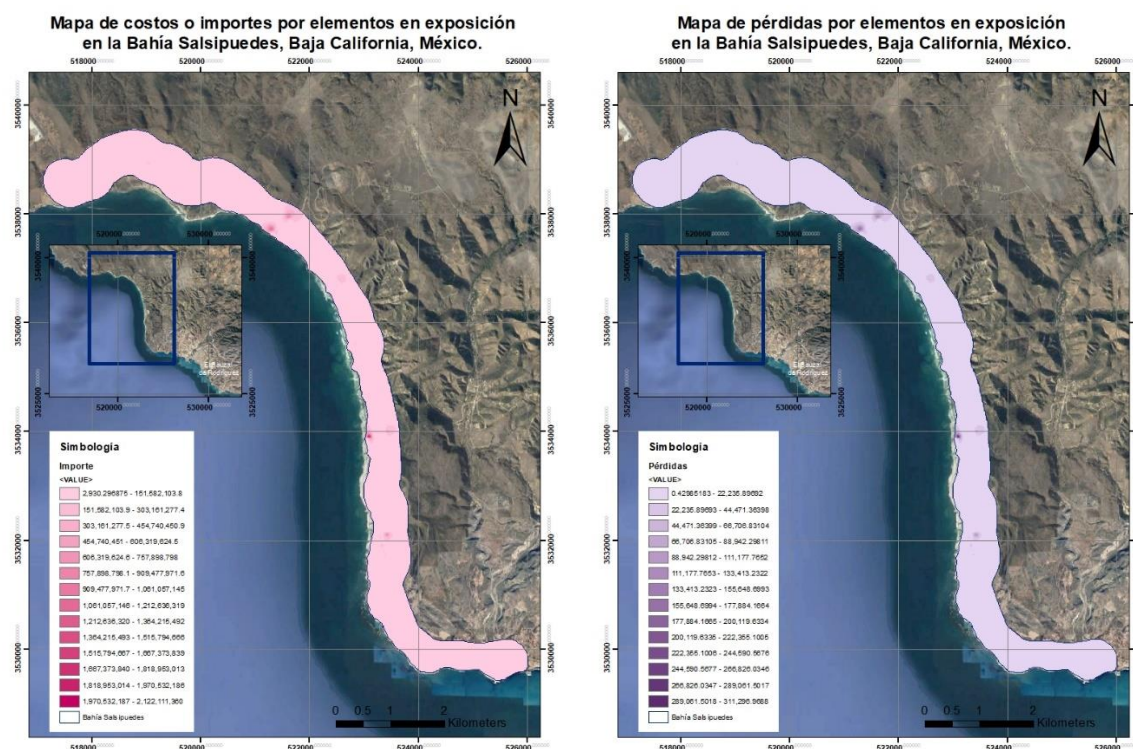


Figura 7.47. Modelos IDW de Importes (Izquierda) y pérdidas (Derecha) por elementos en exposición de la Bahía Salsipuedes.

A continuación, se generan los modelos pertenecientes al factor vulnerabilidad, los primeros son propios de la geología del sitio. El modelo geológico fue generado por *INEGI* y simplemente acotado a la zona de estudio como se pudo ver en la sección de *Tratamiento de la información – Información geológica*; en cuanto al modelo de fallas, se toman en cuenta las fallas localizadas en la Bahía Salsipuedes y es por ello que se usan directamente los modelos de la **Figura 7.12**. Del modelo de fallas geológicas (normales) se obtiene un modelo de distancia euclidiana de las mismas, con la finalidad de delimitar la zona de posible riesgo ante la presencia de estos accidentes geológicos. Para ello es necesario acceder a la caja de herramientas de *ArcMap 10.3*, seleccionar la pestaña de “*Spatial Analyst Tools*”, seguida de la opción “*Distance*” de la cual se escoge “*Euclidean distance*”. Se abre la siguiente ventana:

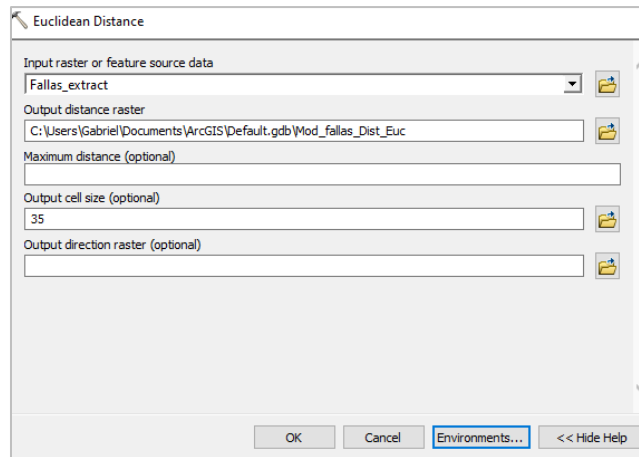


Figura 7.48. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para Distancia euclidiana (Fallas geológicas).

La interfaz del programa solicita la capa ráster correspondiente al modelo de fallas geológicas de la Bahía Salsipuedes, seguido de la carpeta en donde se va a guardar el modelo de distancias euclidianas generado. También se puede colocar la distancia máxima de la que se quiere el modelo, pero en este caso los límites del modelo es el polígono de referencia de la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía). Se añade un tamaño de celda de salida de 35 unidades (para estar conforme a la escala del mapa o modelo original) y por último en la sección de “*Environments*” se coloca el límite mencionado correspondiente al polígono de referencia en las opciones de extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”).

El resultado del procesamiento es la generación de un modelo de distancias euclidianas proveniente de la capa ráster de fallas geológicas, el cual se muestra en la **Figura 7.49**.

Teniendo los modelos pertenecientes a la geología del sitio, el siguiente paso es generar el correspondiente al derecho de vía, para ello se localiza la carretera escénica Tijuana – Ensenada en el archivo de *AutoCAD* proporcionado por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* y se adjunta como polilínea al programa *ArcMap 10.3* con el comando “*Add data*”. A continuación, se realiza un modelo de distancia euclidiana para marcar el derecho de vía en una capa ráster, para esto se sigue el mismo procedimiento que en la obtención del modelo de distancia euclidiana de fallas, dando un valor de 35 unidades al tamaño de celda y poniendo como extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), el polígono de referencia de la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía). El resultado se observa en la **Figura 7.49**.

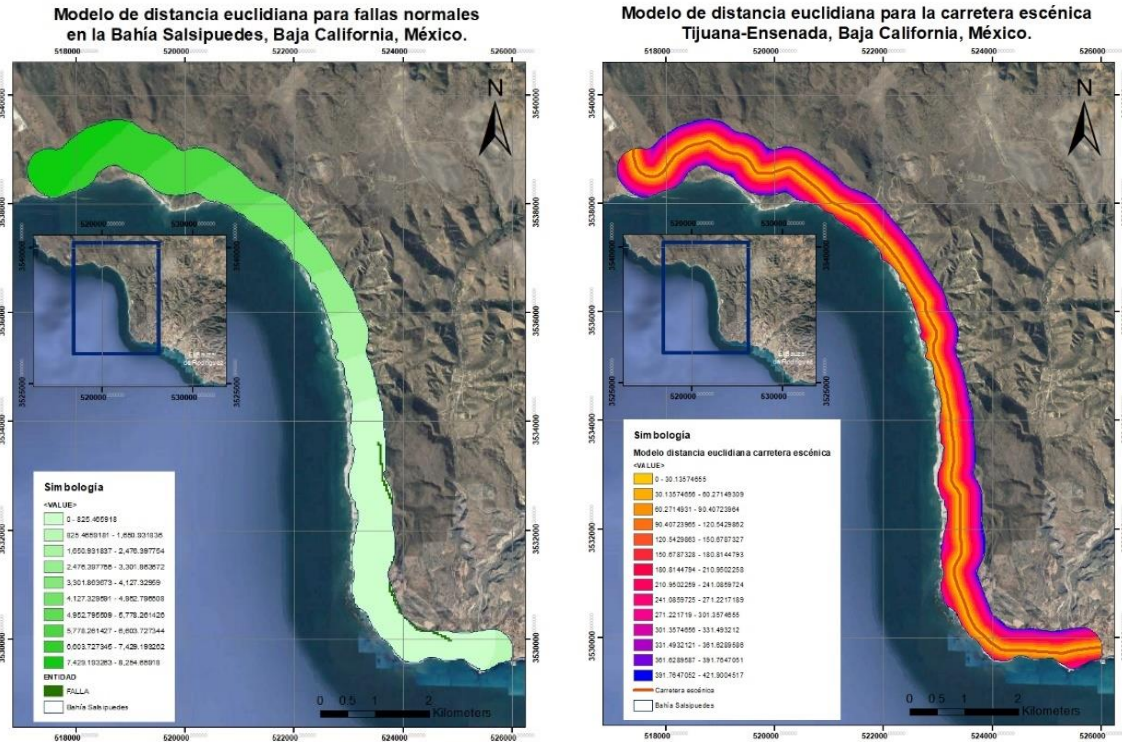


Figura 7.49. Modelos de distancia euclidiana en: fallas normales (Izquierda) y carretera escénica Tijuana – Ensenada (Km 83 – 98) correspondiente al derecho de vía (derecha).

7.5.3 Condiciones, parámetros o criterios

El tercer paso dentro de la metodología particular es definir con base en la búsqueda bibliográfica los parámetros, criterios o condiciones en los que se dice que una zona está en peligro, cabe mencionar que peligro no es sinónimo de riesgo, ya que este se define como la probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador y guarda relación directa con la amenaza; mientras que el riesgo es la suma del peligro o amenaza y los factores de exposición y vulnerabilidad, como se muestra en la **Figura 7.45**.

Es por ello que se realiza una búsqueda de información concerniente a las condiciones, parámetros o criterios en los que un elemento en exposición se encuentra ante un peligro o amenaza inminente, en este estudio la amenaza es que ocurra un evento de deslizamiento de tierras por acción del flujo del agua subterránea y/o sub – superficial. Las condiciones o parámetros encontrados en la literatura, se utilizarán para hacer la reclasificación de los modelos generados en el apartado anterior.

Empezando por el criterio del factor amenaza, según algunos autores (Abidi, Demehati, & El Qandil, 2019) y (Koutalakis, Tzoraki, Prazioutis, Gkiatas, & Zaimes, 2021), mencionan que los deslizamientos de tierras por acción de la presencia de flujo de agua subterránea y/o superficial se presentan principalmente en zonas donde los niveles piezométricos se encuentran en un rango menor a los 90 metros columna de agua.

Ahora bien, si se toman en cuenta las aportaciones por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la normativa de carreteras respecto al factor exposición (SCT, Normativa para la

infraestructura del transporte, 2017), esta alude que importes mayores a \$500,000 Pesos M.N. en elementos constructivos y/o pérdidas de más de \$500.00 pesos M.N. diarios por elemento constructivo, ocasionan inestabilidad en el flujo económico de la población sobre la cual se encuentra la carretera o vía de comunicación.

Por otro lado, el factor vulnerabilidad en el artículo “*The varnes classification of landslide types, an update*” (Hung, Leroueil, & Picarelli, 2013) menciona que los deslizamientos de tierra ocurren principalmente en zonas con presencia de fallas geológicas o cercanas a ellas en aproximadamente 200 metros, también mencionan que los deslizamientos la mayoría de las ocasiones se presentan en taludes o cortes correspondientes a rocas sedimentarias fracturadas y/o alteradas, como son areniscas, conglomerados, aluviales y lutitas.

El siguiente criterio es el correspondiente al derecho de vía, según la normativa de SCT (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017) y lo pactado con los ejidatarios de la Bahía Salsipuedes el derecho de vía es una franja de 300 metros de ancho donde se pueden realizar cualquier actividad de estabilización (construcción) de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, específicamente en la Bahía Salsipuedes es ese ancho, con una longitud aproximada de 11 kilómetros.

El último criterio es el correspondiente a la calificación de vulnerabilidad, donde la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y Caminos y Puentes Federales, tanto en su normativa (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017), como en formatos de inspección visual de obras menores (TGC & Zazueta R., Informe visual de puentes y estructuras, 2018), mencionan que una calificación mayor o igual a 3 en la escala de vulnerabilidad representa un daño inminente en la estructura del elemento en exposición.

Tomando lo anterior, se generan los parámetros, condiciones o criterios en los que se evalúan los factores que conforman al riesgo geohidrológico, dichos criterios se muestran como condiciones dentro del diagrama de flujo de la metodología particular del riesgo geohidrológico que se observa en la **Figura 7.45**.

7.5.4 Reclasificación de modelos

El penúltimo paso de la metodología particular para la generación del mapa de riesgo geohidrológico es hacer la reclasificación de los modelos digitales generados para cada uno de los factores que intervienen en el riesgo.

La reclasificación consiste en dar valores binarios de 0 y 1 a cada una de las celdas dentro de los modelos generados por factor de riesgo, es decir a los modelos de NPM, importe, pérdidas, geológico, distancia euclidiana de fallas y derecho de vía, y de vulnerabilidad. Cada condición o criterio se desarrolla en rangos tabulados correspondientes a los valores anteriores (números reales) a los cuales se les asigna uno nuevo (binario), donde el valor es 0 (cero) si el criterio corresponde a una situación de *NEGATIVA (NO)*, y el valor es 1 (uno) si el criterio corresponde a una situación de *POSITIVA (SI)*. En **Tabla 7.9**, se muestran los criterios, escalas de valores anteriores y las escalas de nuevos valores de reclasificación, correspondientes a cada criterio o parámetro del riesgo geohidrológico.

Tabla 7.9. Parámetros de reclasificación de modelos ráster en estimación de riesgo geohidrológico.

Nivel piezométrico medio		Costo/Importe	
Valores anteriores (mca)	Valores nuevos (binarios)	Valores anteriores (MXN)	Valores nuevos (binarios)
0 - 30	1	0 - 50,000	0
30 - 60	1	50,000 - 500,000	0
60 - 90	1	500,000 - 50'000,000	1
90 - 120	0	50'000,000 - 1,000'000,000	1
120 - 160	0	1,000'000,000 - 2,200'000,000	1
> 160	Sin datos	> 2,200'000,000	Sin datos
Pérdidas		Geología	
Valores anteriores (MXM)	Valores nuevos (binarios)	Valores anteriores (Tipo roca)	Valores nuevos (binarios)
0 - 100	0	N/A	0
100 - 500	0	Aluvial	1
500 - 15,000	1	Basalto	0
15,000 - 150,000	1	Arenisca	1
150,000 - 350,000	1	Andesita	0
> 350,000	Sin datos	Arenisca - Conglomerado	1
Fallas geológicas		Derecho de vía	
Valores anteriores (m)	Valores nuevos (binarios)	Valores anteriores (m)	Valores nuevos (binarios)
0 - 100	0	0 - 50	1
20 - 100	0	50 - 100	1
200 - 1000	1	100 - 200	1
1000 - 5000	1	200 - 300	1
5000 - 9000	1	300 - 500	0
> 9000	Sin datos	> 500	Sin datos
Calificación Vulnerabilidad			
Valores anteriores (Calif.)	Valores nuevos (binarios)		
0 - 1	0		
1 - 2	0		
2 - 3	0		
3 - 4	1		
4 - 5	1		
> 5	Sin datos		

Teniendo los parámetros, condiciones o criterios de reclasificación mencionados anteriormente en **Tabla 7.9**, el siguiente paso es ir al programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* donde se encuentran los modelos para el análisis de riesgo geohidrológico, los cuales no están reclasificados. Se accede a la caja de herramientas y después a la pestaña “*Spatial Analyst Tools*” para después seleccionar la opción “*Reclass*” y dentro de esta elegir “*Reclassify*”. Se abre la siguiente ventana emergente:

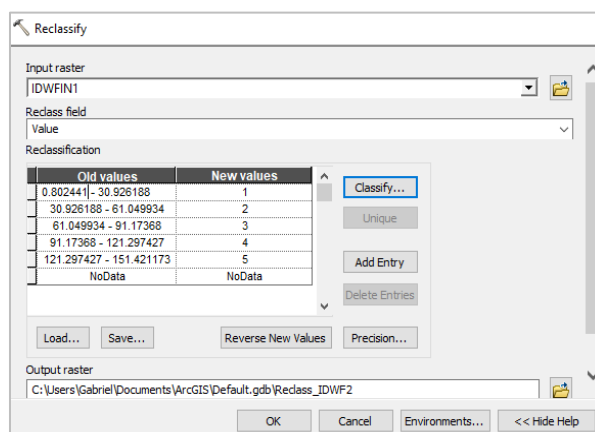


Figura 7.50. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para Reclasificación (Modelo NPM).

Como se observa en la **Figura 7.50**, el primer paso dentro de la ventana de reclasificación es seleccionar el modelo en formato ráster que se quiere reclasificar, en este caso es el modelo *NPM* (de niveles piezométricos medios en *IDW*), enseguida se escoge el atributo que se desea cambiar, en este caso el valor que corresponde al nivel piezométrico, que está guardado en la columna “*Value*”.

Enseguida se eligen el número de rangos o intervalos a reclasificar, dando clic en “*Classify*”, donde se abrirá una nueva ventana emergente, como la que se muestra a continuación:

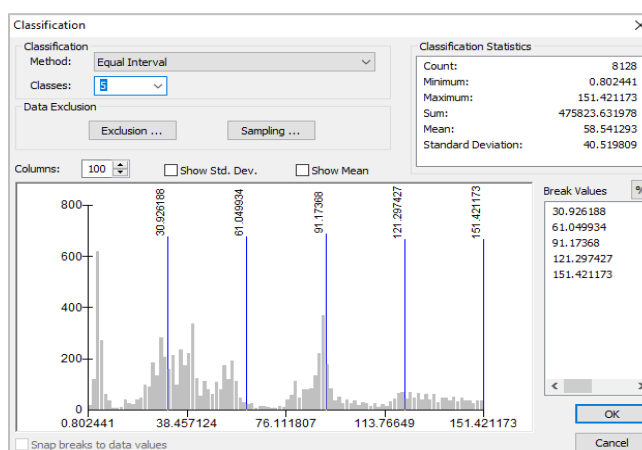


Figura 7.51. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para crear intervalos de reclasificación (Modelo NPM).

Dentro de la ventana “*Classify*” aparecen datos estadísticos de clasificación, correspondientes a los valores “*Values*” dentro del modelo ráster (en este caso de *NPM*), tales como mínimos, máximos, sumatorias, promedios y desviación estándar. El primer paso dentro de esta segunda ventana emergente es elegir el método de clasificación, que para todos los casos de este procedimiento será

el método de intervalos iguales “*Equal Interval*”, con un número de clases de 5 (Cinco); se oprime aceptar (u “*Ok*”) y se regresa a la primera ventana **Figura 7.51**.

Dentro de la ventana de reclasificación se cambian manualmente los valores de ambas columnas (“*Old values*” y “*New values*”) conforme los valores que aparecen en la **Tabla 7.9**, para cada rubro representativo, en este caso con los valores correspondientes a los niveles piezométricos, quedando de la siguiente manera:

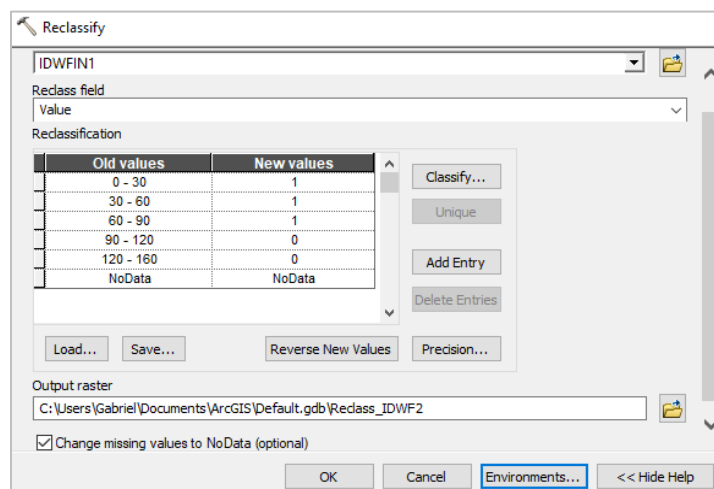


Figura 7.52. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para reclasificación con valores cambiados (Modelo NPM).

El siguiente paso es elegir la carpeta de guardado del archivo en formato ráster reclasificado, correspondiente al modelo de niveles piezométricos medios (NPM). También se debe seleccionar la casilla con la leyenda “*Cambiar los valores faltantes con NO DATA*”.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

El resultado del procesamiento es la reclasificación de la información de la capa ráster del modelo NPM. La misma metodología se sigue para la reclasificación de todos los modelos restantes (importes, pérdidas, geológico, fallas geológicas, derecho de vía y vulnerabilidad), únicamente cambiando el campo de reclasificación (“*Value*”) y la tabla de reclasificación de la interfaz de *ArcMap 10.3* por los valores proporcionados en la **Tabla 7.9**, manteniendo los 5 intervalos. Los modelos reclasificados resultantes se pueden observar en la **Figura 7.53**, la **Figura 7.54** y la **Figura 7.55**.

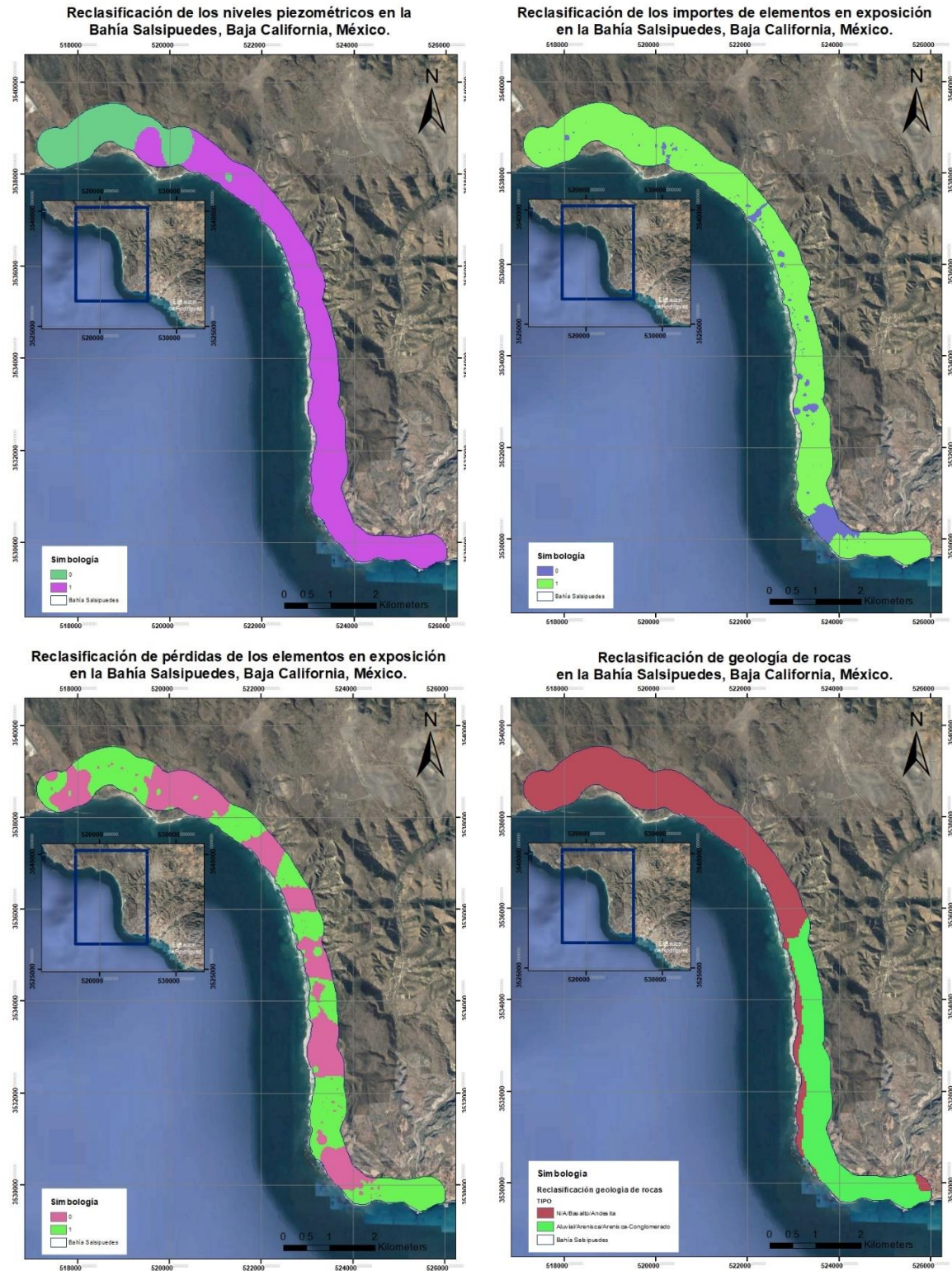
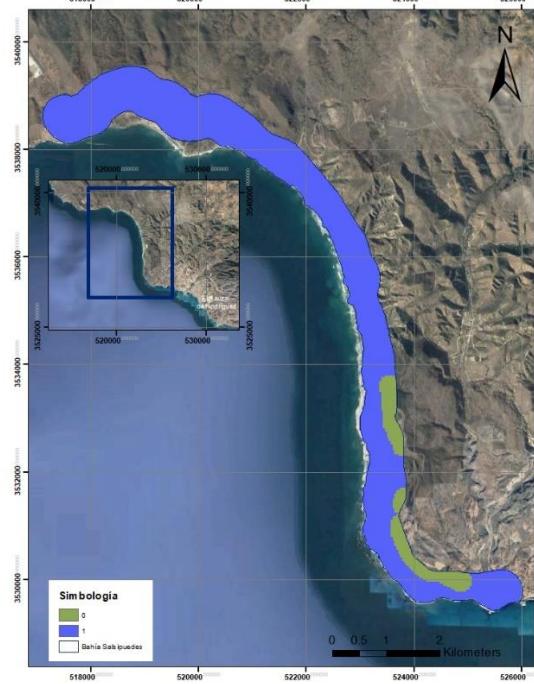


Figura 7.53. Modelos reclasificados para estimación de riesgo geohidrológico, niveles piezométricos medios (superior izquierda), Importes de elementos en exposición (superior derecha), pérdidas (inferior izquierda) y geológico (inferior derecha).

Reclasificación de modelo de fallas normales (distancia euclidiana)
en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México.



Reclasificación de derecho de vía (distancia euclidiana) de la
carretera escénica Tijuana-Ensenada, Baja California, México.

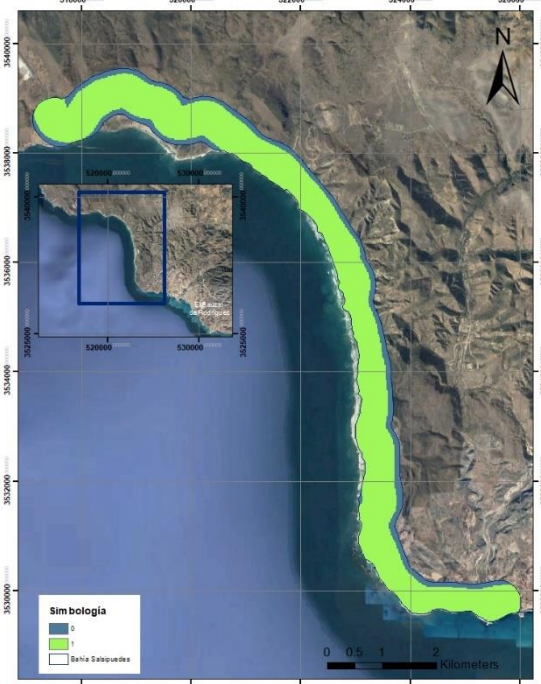


Figura 7.54. Modelos reclasificados para estimación de riesgo geohidrológico, fallas normales (Izquierda) y derecho de vía (derecha).

Reclasificación de la calificación de vulnerabilidad
en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México.

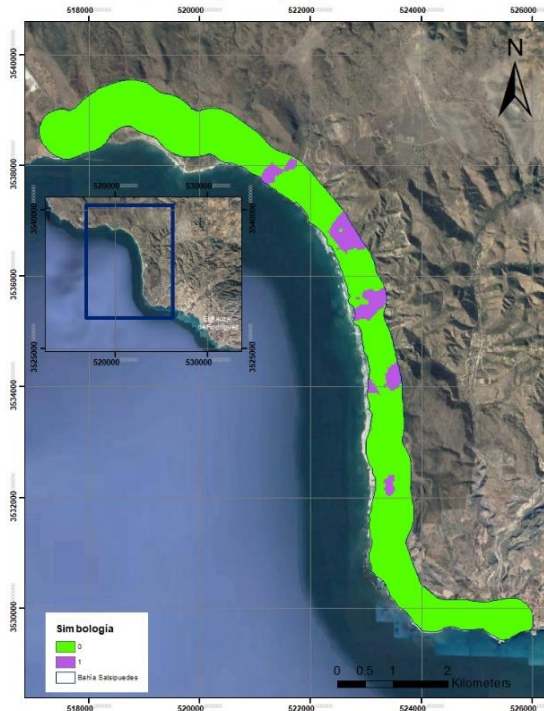


Figura 7.55. Modelo reclasificado para estimación de riesgo geohidrológico (Vulnerabilidad).

7.5.5 Álgebra de mapas

El último paso de la metodología particular para la estimación del riesgo geohidrológico es realizar un análisis multicriterio superponiendo todas las capas reclasificadas de los factores de riesgo (Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad, siete capas en total), con ayuda del álgebra de mapas, es decir de la calculadora de mapas, herramienta de *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*.

Se hace la multiplicación de cada valor de celda de cada una de las capas involucradas, siendo estos valores números binarios (0 y 1); si el producto final es igual a 1, se sombrea la celda dando lugar a una zona de riesgo geohidrológico, si el producto es 0, se deja en blanco o sin sombreado. A manera de ejemplo se presenta la **Figura 7.56**.

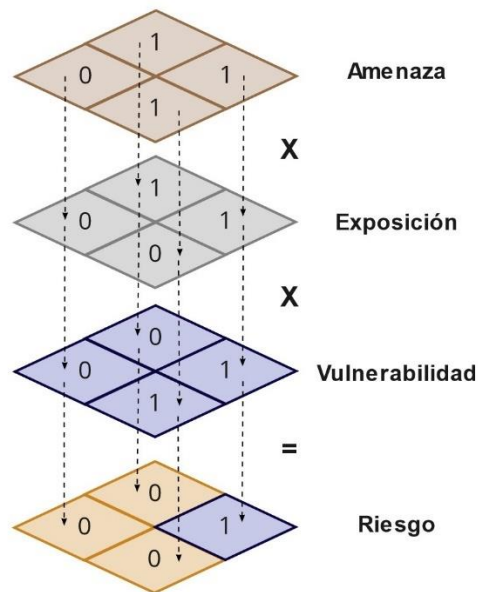


Figura 7.56. Representación gráfica del álgebra de mapas para el riesgo en general.

Como se puede ver en la **Figura 7.56**, cada capa (modelo en formato ráster perteneciente a un factor de riesgo) cuenta con valores 0 y 1, correspondientes a las reclasificaciones por los criterios. Si se superponen todas las capas y se multiplican los valores de las celdas superpuestas, el resultado es un producto *POSITIVO/AFIRMATIVO* si la multiplicación da 1 (hay riesgo geohidrológico); o un producto *NEGATIVO* si la multiplicación da 0 (no hay riesgo geohidrológico).

La forma de acceder a la calculadora de mapas y realizar el análisis multicriterio en *ArcMap 10.3* es ingresando a la caja de herramientas y a la pestaña de “*Spatial Analyst Tools*”, seguido de “*Map algebra*” y “*Raster calculator*”. Aparecerá una ventana como la que se presenta a continuación:

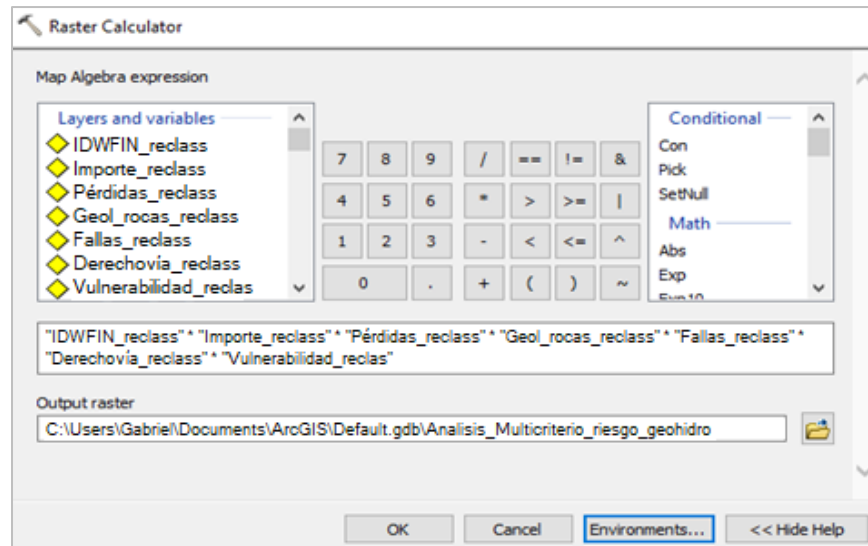


Figura 7.57. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para calculadora de ráster (Riesgo geohidrológico).

Dentro de la ventana que se muestra en la **Figura 7.57**, se encuentra la sección “*Map algebra expression*” donde se localizan las capas o modelos ráster disponibles a utilizar en la calculadora; mientras que el resto de la pantalla cuenta con un tablero digital con números y operadores algebraicos.

En el recuadro de la parte inferior se hace clic para ir escribiendo las capas ráster a utilizar en la ecuación de riesgo, que como se puede ver en la **Figura 7.45**, es la suma de 7 capas: *NPM*, *Importe*, *Pérdidas*, *Geológico*, *Fallas geológicas*, *Derecho de vía* y *Vulnerabilidad*. Todas las capas se pueden adjuntar buscándolas en “*Map algebra expression*” y dando doble clic en ellas. Se coloca inmediatamente entre comillas y se separan utilizando el operador “*”; que, si bien en teoría la expresión de riesgo dice que es la suma de todos los factores, en la práctica es la superposición de los mismos, es decir, haciendo una multiplicación o producto. El siguiente paso es elegir la carpeta de guardado del archivo en formato ráster resultado del algebra de mapas.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

El resultado del procesamiento es una capa ráster donde se muestran en zonas sombreadas los sitios donde el producto de la multiplicación de todas las capas es igual a 1, dando a conocer las zonas de riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes. La cual se muestra en la **Figura 7.58**.

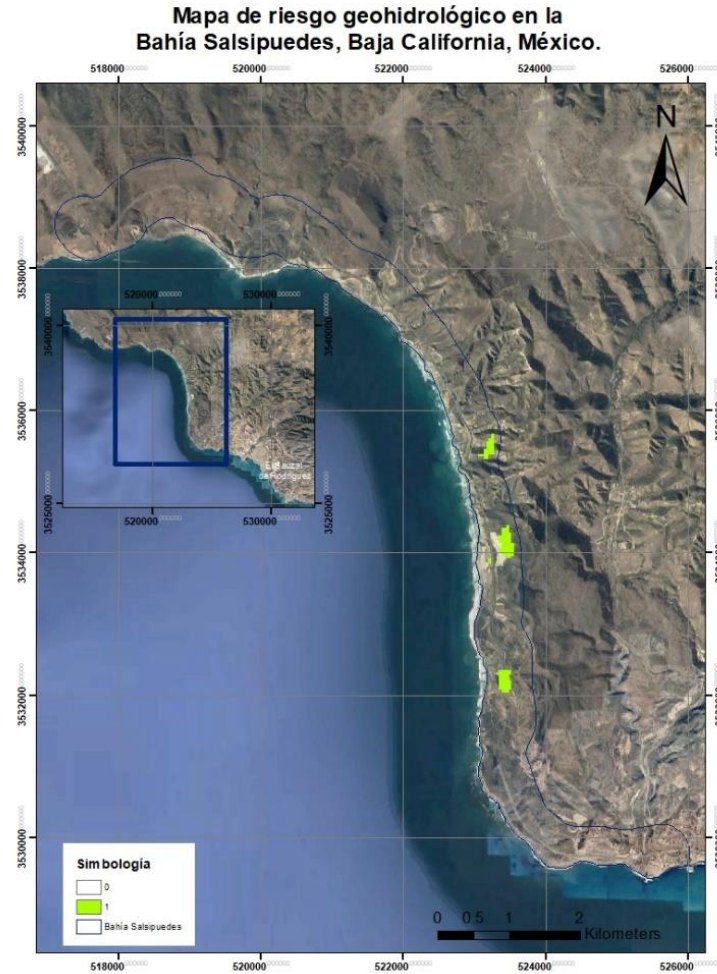


Figura 7.58. Mapa de riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes, en verde se muestran las zonas de riesgo.

7.6 Análisis multicriterio para ubicación de galerías drenantes

El penúltimo y sexto paso de la metodología general de esta investigación, es la realización de un análisis multicriterio para determinar los sitios en los que es necesaria la construcción de una obra hidráulica que permita aliviar el flujo de agua subterránea y/o sub – superficial. Estas obras hidráulicas y de drenaje pueden ser de varios tipos, como lo son pozos, zanjas drenantes, alcantarillas, pero en esta investigación se proponen las galerías drenantes, mencionadas en la sección de *Marco teórico*.

Las galerías drenantes son túneles a profundidades considerables con drenes ranurados que permiten captar el agua de estratos subterráneos o de bases de grandes taludes, cerros e incluso montañas (Ballesteros Navarro, Antequera F., González R., & Martos R., 2020). Para definir la localización de los posibles sitios donde es necesaria la construcción de una galería drenante en la Bahía Salsipuedes es necesario definir una metodología particular. Dicho procedimiento se presenta en la **Figura 7.59**, mostrada a continuación.

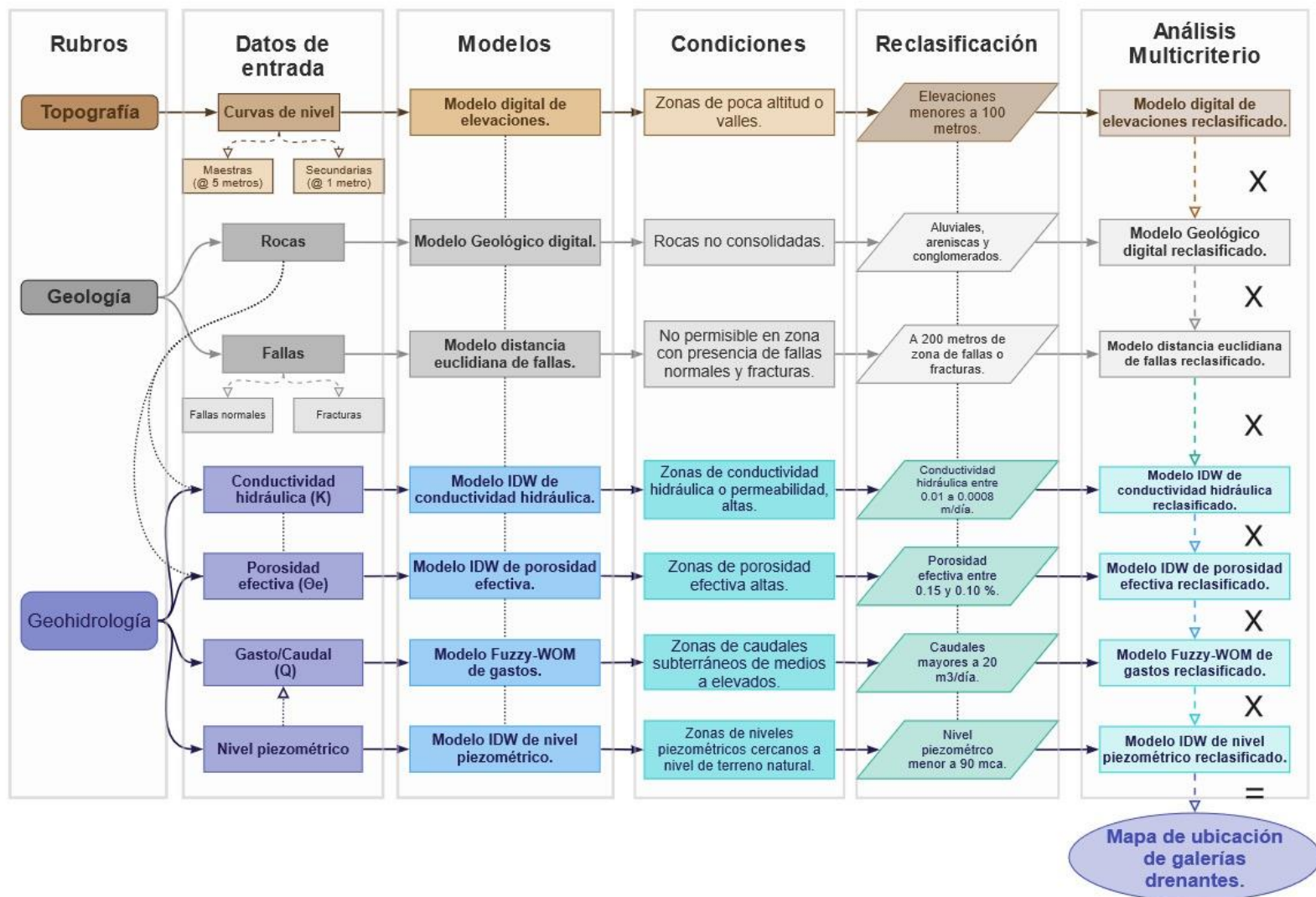


Figura 7.59. Metodología particular para en análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede ver en la **Figura 7.59**, para la realización del análisis multicriterio que permita ubicar las zonas donde es necesaria la construcción de galerías drenantes es necesaria la participación de tres rubros importantes: la topografía, la geología y la geohidrología. La metodología particular descrita en el diagrama de flujo indica que son necesarios 5 pasos para generar el mapa de ubicación de galerías, el primer paso es definir los datos de entrada, el siguiente es generar los modelos en formato ráster, después conocer las condiciones, parámetros o criterios necesarios para que se pueda ejecutar un proyecto de galerías drenantes, enseguida hay una reclasificación de los valores con base en los criterios seleccionados y por último se realiza el análisis multicriterio con ayuda del álgebra de mapas.

7.6.1 Datos de entrada

Como se mencionó anteriormente, son tres rubros de interés para que se pueda generar un análisis multicriterio de ubicación de zonas factibles para la construcción de galerías drenantes. El primero tiene que ver con la topografía, esta queda representada con la *Información topográfica* proporcionada por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.*, correspondiente a curvas de nivel a cada metro en un área de 35 kilómetros cuadrados, que comprende la Bahía Salsipuedes.

El siguiente rubro es la geología del sitio, representada por el tipo de roca y las fallas geológicas en la Bahía Salsipuedes. Dicha información es obtenida por los sondeos realizados por la dependencia de gobierno y modelos GIS generados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (*INEGI*), que se pueden visualizar en la sección de *Información geológica*.

El último rubro de interés está representado por la geohidrología del sitio, los datos necesarios para definir el comportamiento geohidrológico de la zona de estudio se encuentran en la base de datos del mismo nombre (base de datos geohidrológicos – puntos de control geohidrológicos), dichos valores corresponden a propiedades tales como: la conductividad hidráulica, la porosidad efectiva, el gasto o caudal y el nivel piezométrico.

7.6.2 Modelos de interpolación

Habiendo definido cada factor dentro del diagrama de flujo de la **Figura 7.59**, y, por lo tanto, los datos de entrada al sistema provenientes de las bases de datos, es posible generar los modelos en capas ráster que permitan realizar el análisis multicriterio y álgebra de mapas para determinar la ubicación de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.

El primer modelo de entrada al sistema generado en el diagrama de flujo de la metodología particular para el análisis multicriterio de ubicación de galerías es el correspondiente a la topografía del sitio, teniendo las curvas de nivel en polilíneas y ya importadas de *AutoCAD* a *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* es posible generar un modelo digital de elevaciones de la Bahía Salsipuedes (*MDE*). Para ello es necesario acceder a la caja de herramientas y directamente a la pestaña “*Spatial Analyst Tools*”, seguido de “*Interpolation*” y dentro de esa pestaña elegir la opción “*Topo to raster*”, de la que se abre la siguiente ventana:

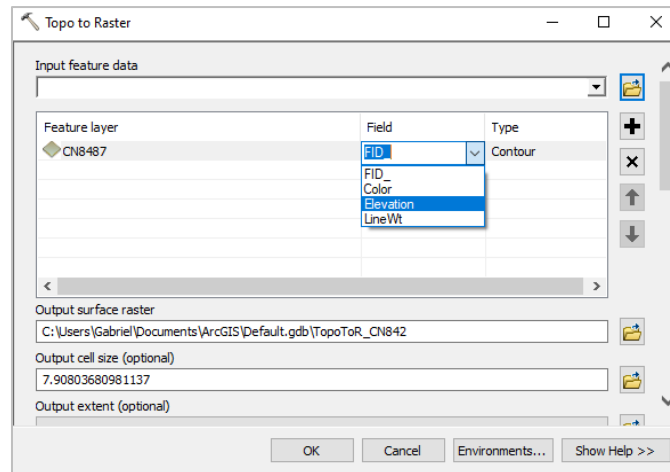


Figura 7.60. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para modelo digital de elevaciones.

Como se puede observar en la **Figura 7.60**, en la pestaña que indica *“Input feature data”* se selecciona la capa correspondiente a las curvas de nivel a cada metro, importadas de *AutoCAD*, que se muestran en la **Figura 7.20**. Habiendo seleccionado la capa, dentro de la columna *“Field”* se elige la opción *“Elevation”* para que el valor representado en el modelo corresponda a las elevaciones del terreno. En la columna *“Type”* se elige *“Contour”*.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de *“Environments”* en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (*“Processing extent”*) y máscara del análisis ráster (*“Raster analysis mask”*), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

Por último, se elige la carpeta en la que se guardará la capa resultante, y se elige un tamaño arbitrario de celda de salida entre 5 a 30 unidades (en este caso unidades en metros), dicho tamaño corresponde a una escala 1:50,000 aceptable, en este caso particular se elige un tamaño de 7.90 unidades. Se aceptan todas las demás variables opcionales y se oprime *“OK”*.

El resultado es el modelo digital de elevaciones de la Bahía Salsipuedes, donde se notan zonas elevadas máximas de 430 msnm y zonas en -2.40 msnm, véase la **Figura 7.61**.

Al modelo digital de elevaciones se le puede dar formato seleccionando la capa y dando clic derecho, enseguida se escoge la opción de *“Properties”*. Se abre una ventana emergente en la que se puede seleccionar la pestaña *“Symbolology”* y dentro de la misma seleccionar el número de clases o intervalos del modelo digital de elevaciones y escala de colores.

A continuación, se generan los modelos pertenecientes al rubro de geología, los primeros son propios de la geología del sitio. El modelo geológico fue generado por INEGI y simplemente acotado a la zona de estudio como se pudo ver en la sección de *Tratamiento de la información – Información geológica*, por lo que se usa directamente el modelo geológico de la **Figura 7.12**.

En cuanto al modelo de fallas geológicas, corresponde al modelo de distancia euclidiana de fallas, la falla principal en la Bahía Salsipuedes es una localizada al sureste del polígono de referencia creado por la topografía, esta falla corresponde al tipo de falla normal y de ella se obtuvo el modelo de

distancia euclidiana para la estimación de riesgo geohidrológico, por lo que ese modelo es el que se utiliza directamente en este nuevo procedimiento, véase **Figura 7.49**.

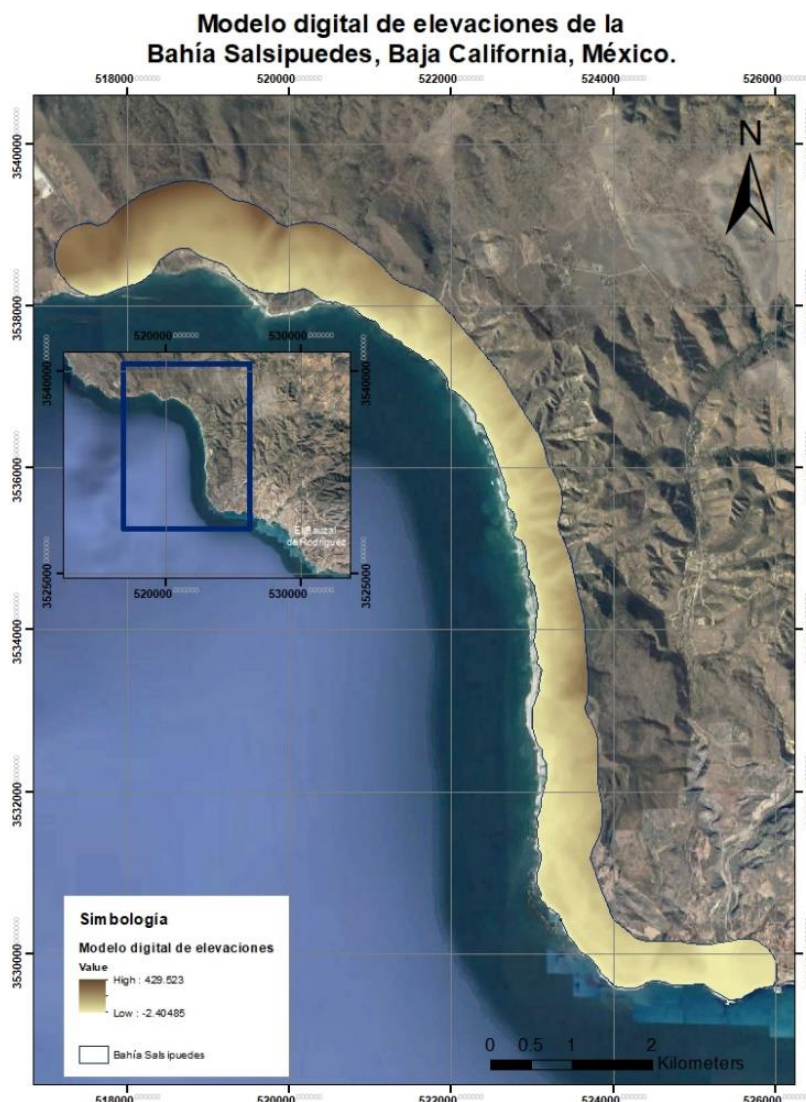


Figura 7.61. Modelo digital de elevaciones de la Bahía Salsipuedes.

El siguiente rubro corresponde a la geohidrología del sitio, la primera propiedad geohidrológica que se define como variable de entrada es la conductividad hidráulica, como en las metodologías particulares anteriores (generación de redes de flujo, cálculo de caudales en redes de flujo y riesgo geohidrológico) no se ha requerido modelar esa variable, es necesario realizar un modelo de interpolación por el método *IDW*, que permita mapear esta propiedad geohidrológica de las rocas del sitio a través de la base de datos y puntos de control geohidrológico. Para esto se siguen los mismos pasos que se han utilizado en secciones anteriores, es decir, se accede a la caja de herramientas de ArcMap 10.3 y se elige la opción de "*Spatial Analyst Tools*", después se escoge la pestaña de "*Interpolation*", seguida de "*IDW*". Se abrirá la siguiente ventana:

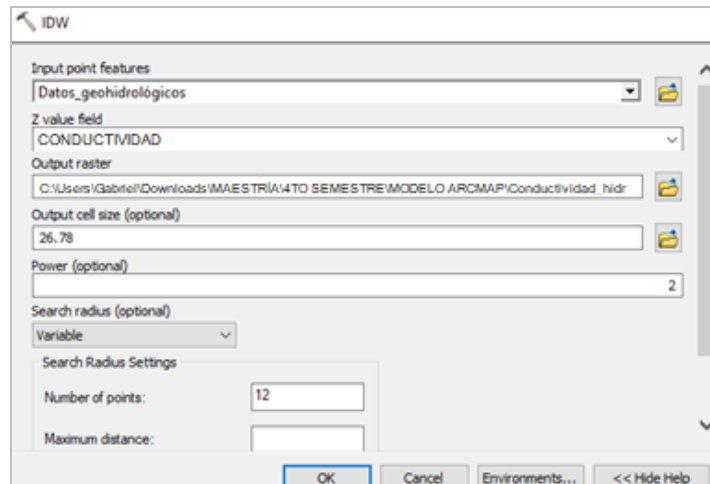


Figura 7.62. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para interpolación IDW (Conductividad hidráulica).

La interfaz del programa solicita la capa de puntos de control geohidrológicos, correspondiente a la base de datos geohidrológica. Enseguida se elige el valor en Z que se requiere interpolar (*"Z value field"*), en el caso de la **Figura 7.62**, se especifica el valor correspondiente a la columna de conductividad hidráulica de la capa de puntos de control geohidrológico; después se escoge la carpeta donde se guardará el modelo de interpolación de salida en formato ráster, tomando un tamaño de celda de entre 20 a 30 unidades para una mejor resolución con la escala del mapa (en este caso se toma un tamaño de 26.78), con una potencia de 2 y un radio variable.

Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de *"Environments"* en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (*"Processing extent"*) y máscara del análisis ráster (*"Raster analysis mask"*), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

El resultado del procesamiento es la interpolación de la conductividad hidráulica proveniente de la nube de puntos de control geohidrológico de la Bahía Salsipuedes. El modelo de interpolación resultante se puede observar en la siguiente **Figura 7.63**.

Del resto de las propiedades geohidrológicas ya cuenta con modelos realizados, por ejemplo, la porosidad efectiva (ver **Figura 7.23**) que se utilizó en el modelo de flujo por Darcy es la misma que se utilizará en este análisis multicriterio, así como el modelo de niveles piezométricos medios "NPM" (ver **Figura 7.23**) que se utilizó para determinar las líneas equipotenciales de las redes de flujo y para el análisis de riesgo geohidrológico. En el caso del caudal, se utiliza el modelo de caudales obtenidos en la metodología de superposición difusa ponderada de secciones anteriores (ver **Figura 7.42**).

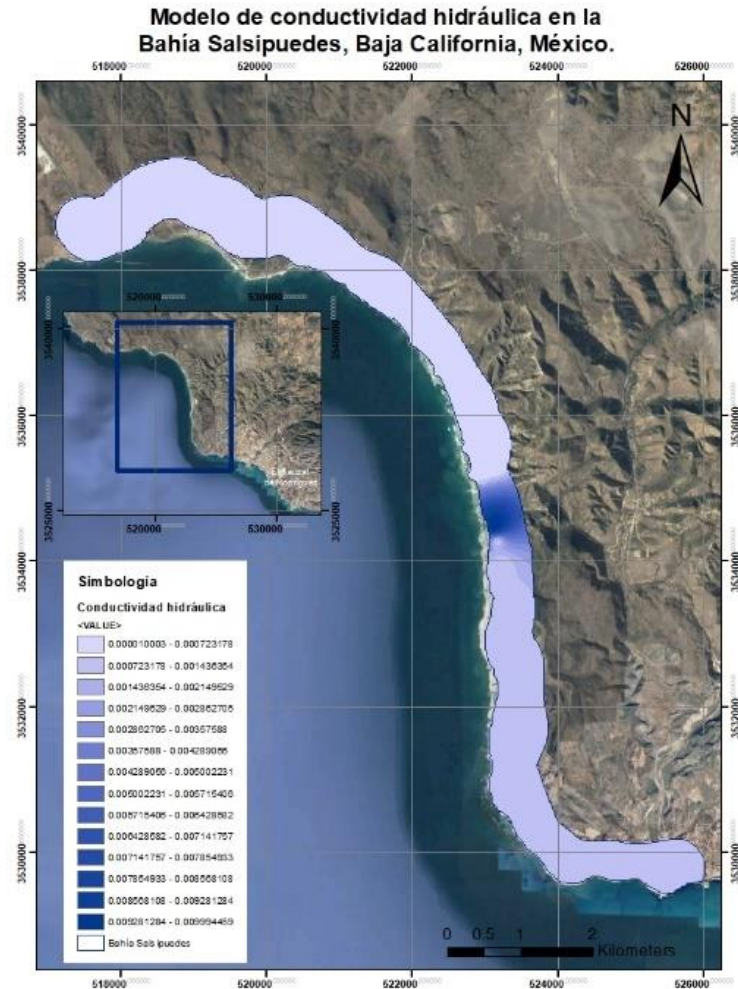


Figura 7.63. Modelo IDW de conductividad hidráulica de la Bahía Salsipuedes.

7.6.3 Condiciones, parámetros o criterios

El tercer paso dentro de la metodología particular para la ubicación de galerías drenantes es definir los parámetros, criterios o condiciones en los que se dice que es viable la construcción o proyección de una galería drenante en un sitio determinado. Para ello es necesario realizar una búsqueda y revisión bibliográfica de información concerniente a la proyección de galerías drenantes, especialmente de sus especificaciones y requerimientos para localización de las mismas.

Esta información se obtuvo de la búsqueda de artículos en la plataforma *Scopus* (Elsevier, 2022), de normativa en la página oficial de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017), y de proyectos proporcionados por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* (TGC, Gallardo, & Bermúdez, Informe geotécnico Bahía Salsipuedes, 2018). Las condiciones o parámetros encontrados en las fuentes anteriores, se utilizarán para hacer la reclasificación de los modelos generados en el apartado previo.

Empezando por el criterio del rubro de la topografía en la proyección de galerías drenantes, según algunos autores (Ballesteros Navarro, Antequera F., González R., & Martos R., 2020), (Fansa Saleh,

Pérez C., Hermosilla P., & Iranzo G., 2021) y (Barceló, 1983), mencionan que las galerías filtrantes o drenantes se deberían proyectar en zonas de valles, de poca altitud con respecto al nivel del mar o en pie de taludes, montañas, en pocas palabras las galerías deberían proyectarse en zonas de elevaciones menores a los 100 msnm.

En cuanto al rubro geológico, como se pudo observar en la metodología particular de *Riesgo geohidrológico*, algunos autores (Crook, Tripathi, & Jones, 2020) concuerdan con lo dicho en el artículo “*The varnes classification of landslide types, an update*” (Hung, Leroueil, & Picarelli, 2013), donde se menciona que los deslizamientos de tierra ocurren principalmente en zonas con presencia de fallas geológicas o cercanas a ellas en aproximadamente 200 metros, y también que los deslizamientos la mayoría de las ocasiones se presentan en taludes o cortes correspondientes a rocas sedimentarias fracturadas y/o alteradas, como son areniscas, conglomerados, aluviales y lutitas. Crook, Tripathi y Jones además de estar de acuerdo con esas afirmaciones, dicen que en zonas donde las rocas tengan menor compactación, sean alteradas o fracturadas es ideal la construcción de túneles destinados a galerías drenantes por su fácil excavación y captura de agua, teniendo extremo cuidado en la etapa de excavación revisando el factor *RMR* principalmente. Es por ello que para la proyección de galerías drenantes es idóneo la presencia de rocas como aluviales, areniscas y conglomerados, y estar a una distancia mínima de 200 metros de una falla geológica (ya sea normal o fractura).

Por último, en el rubro correspondiente a la información geohidrológica se toman en cuenta las aportaciones por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la normativa de carreteras respecto a obras de drenaje, galerías drenantes y túneles (SCT, Normativa para la infraestructura del transporte, 2017), donde se indica que los caudales subterráneos mínimos para que un proyecto de galerías drenantes sea factible deben ser mayores a 20 metros cúbicos por día y los niveles piezométricos menores a 90 metros columna de agua.

Otros autores como (Fetter, 2001) y (Lictevout, y otros, 2020) también señalan que dentro de los factores geohidrológicos indispensables para la ubicación de zonas donde se deben construir galerías drenantes están la conductividad hidráulica y la porosidad efectiva, la primera variable debe oscilar entre los 0.01 y 0.0008 metros por día, mientras que la porosidad efectiva debe considerarse en un rango entre el 0.15 y 0.10 por ciento.

7.6.4 Reclasificación de modelos

La reclasificación consiste en dar valores binarios de 0 y 1 a cada una de las celdas dentro de los modelos generados por rubro de interés, es decir al modelo digital de elevaciones, a los modelos geológico y de fallas geológicas, también a los modelos de conductividad hidráulica, porosidad efectiva, caudales y nivel piezométrico medio. Cada condición o criterio se desarrolla en rangos tabulados correspondientes a los valores anteriores (números reales) a los cuales se les asigna uno nuevo (binario), donde el valor es 0 (cero) si el criterio corresponde a una situación de *NEGATIVA (NO)*, y el valor es 1 (uno) si el criterio corresponde a una situación de *POSITIVA (SI)*. En **Tabla 7.10** se muestran los criterios, escalas de valores anteriores y las escalas de nuevos valores de reclasificación, correspondientes a cada criterio o parámetro del análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes.

Tabla 7.10. Parámetros de reclasificación de modelos ráster de análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes.

Topografía		Geología	
Valores anteriores (msnm)	Valores nuevos (binarios)	Valores anteriores (Tipo roca)	Valores nuevos (binarios)
-10 - 50	1	N/A	0
50 - 100	1	Aluvial	1
100 - 150	0	Basalto	0
150 - 200	0	Arenisca	1
200 - 500	0	Andesita	0
>500	Sin datos	Arenisca - Conglomerado	1
Fallas geológicas		Conductividad hidráulica	
Valores anteriores (m)	Valores nuevos (binarios)	Valores anteriores (m/d)	Valores nuevos (binarios)
0 - 100	0	0.00001 - 0.0008	0
20 - 100	0	0.0008 - 0.001	1
200 - 1000	1	0.001 - 0.005	1
1000 - 5000	1	0.005 - 0.008	1
5000 - 9000	1	0.008 - 0.01	1
> 9000	Sin datos	> 0.01	Sin datos
Porosidad efectiva		Caudal o Gasto	
Valores anteriores (%)	Valores nuevos (binarios)	Valores anteriores (m³/d)	Valores nuevos (binarios)
0.01 - 0.03	0	0 - 20	0
0.03 - 0.06	0	20 - 100	1
0.06 - 0.09	0	100 - 200	1
0.09 - 0.1	0	200 - 300	1
0.1 - 0.15	1	300 - 600	1
> 0.15	Sin datos	> 600	Sin datos
Nivel piezométrico medio			
Valores anteriores (mca)	Valores nuevos (binarios)		
0 - 30	1		
30 - 60	1		
60 - 90	1		
90 - 120	0		
120 - 160	0		
> 160	Sin datos		

Teniendo los parámetros, condiciones o criterios de reclasificación mencionados anteriormente en **Tabla 7.10**, el siguiente paso es ir al programa *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* donde se encuentran los modelos para el análisis multicriterio, los cuales no están reclasificados. Se accede a la caja de herramientas y después a la pestaña “*Spatial Analyst Tools*” para después seleccionar la opción “*Reclass*” y dentro de esta elegir “*Reclassify*”. Se abre la siguiente ventana emergente:

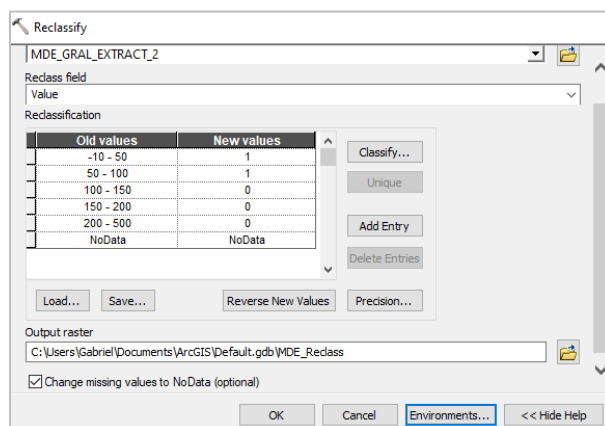


Figura 7.64. Interfaz en *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* para Reclasificación (Modelo digital de elevaciones).

Como se observa en la **Figura 7.64**, el primer paso dentro de la ventana de reclasificación es seleccionar el modelo en formato ráster que se quiere reclasificar, en este caso es el modelo digital de elevaciones (perteneciente al rubro de la topografía), enseguida se escoge el atributo que se desea cambiar, en este caso el valor que corresponde al valor de elevación (Z), que está guardado en la columna “*Value*”.

Enseguida se eligen el número de rangos o intervalos a reclasificar, dando clic en “*Classify*”, donde aparece el método de clasificación, que para todos los casos de este procedimiento será el método de intervalos iguales “*Equal Interval*”, con un número de clases de 5 (Cinco).

Dentro de la ventana de reclasificación se cambian manualmente los valores de ambas columnas (“*Old values*” y “*New values*”) conforme los valores que aparecen en las **Tabla 7.10**, para cada rubro representativo, en este caso con los valores correspondientes a la topografía del modelo digital de elevaciones.

El siguiente paso es elegir la carpeta de guardado del archivo en formato ráster reclasificado, correspondiente al modelo digital de elevaciones (rubro de topografía). También se debe seleccionar la casilla con la leyenda “*Cambiar los valores faltantes con NO DATA*”.

El resultado del procesamiento es la reclasificación de la información de la capa ráster del modelo digital de elevaciones. La misma metodología se sigue para la reclasificación de todos los modelos restantes (geológico, distancia euclidiana de fallas geológicas, conductividad hidráulica, porosidad efectiva, caudales por superposición difusa ponderada y niveles piezométricos medios), únicamente cambiando el campo de reclasificación (“*Value*”) y la tabla de reclasificación de la interfaz de *ArcMap 10.3* por los valores proporcionados en la **Tabla 7.10**, manteniendo los 5 intervalos. Los modelos reclasificados resultantes se pueden observar en la **Figura 7.65**, la **Figura 7.66**, y la **Figura 7.67**.

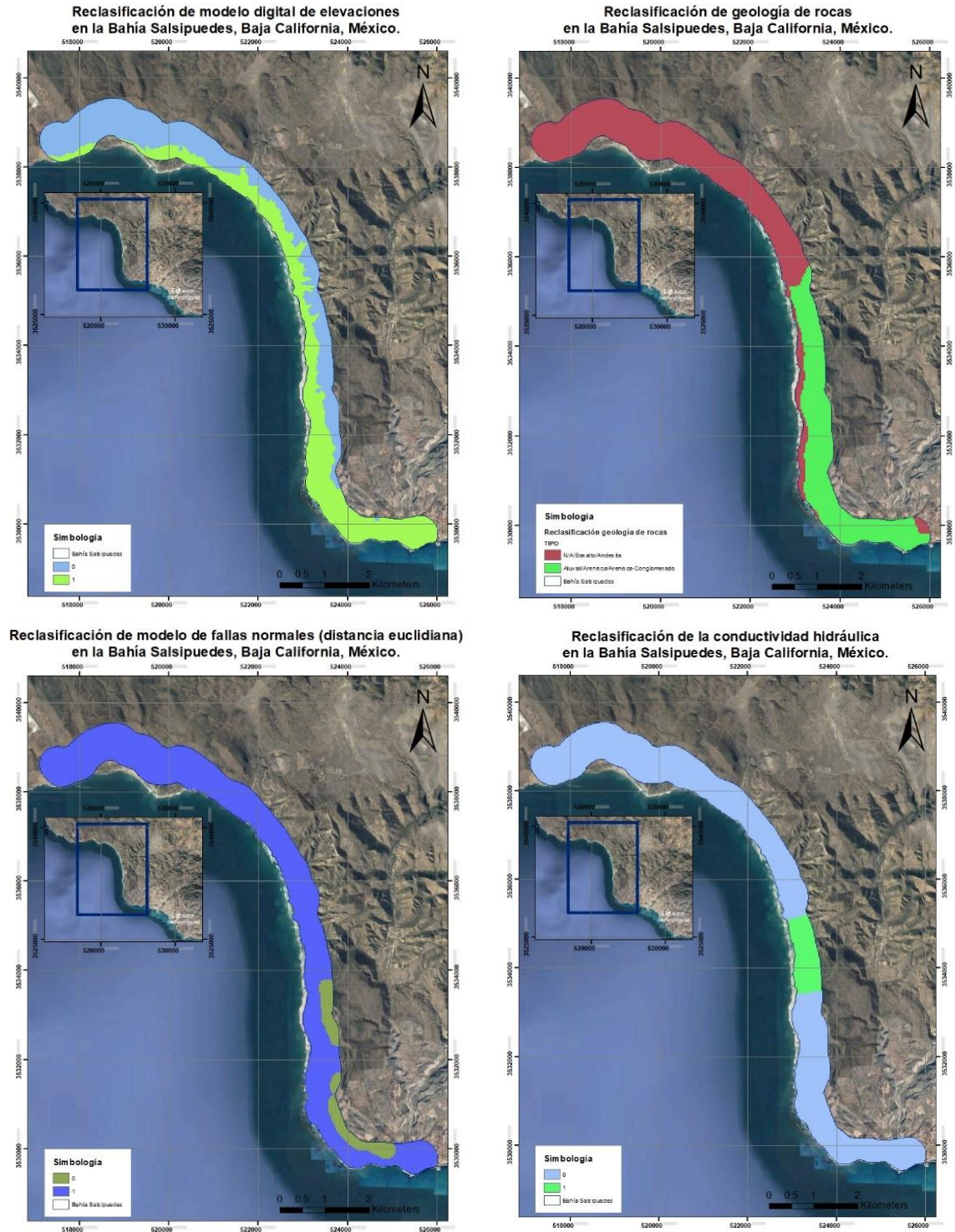


Figura 7.65. Modelos reclasificados para análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, modelo digital de elevaciones (superior izquierda), geología (superior derecha), fallas geológicas (inferior izquierda) y conductividad hidráulica (inferior derecha).

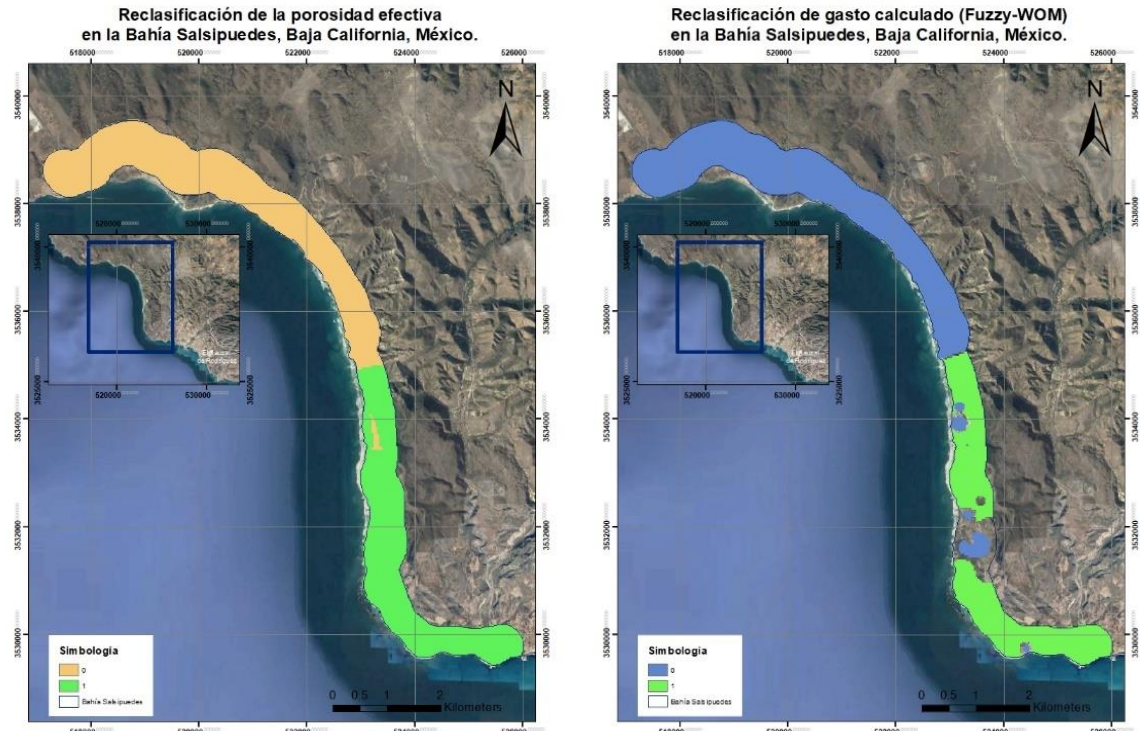


Figura 7.66. Modelos reclasificados para análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, porosidad efectiva (izquierda) y caudales (derecha).

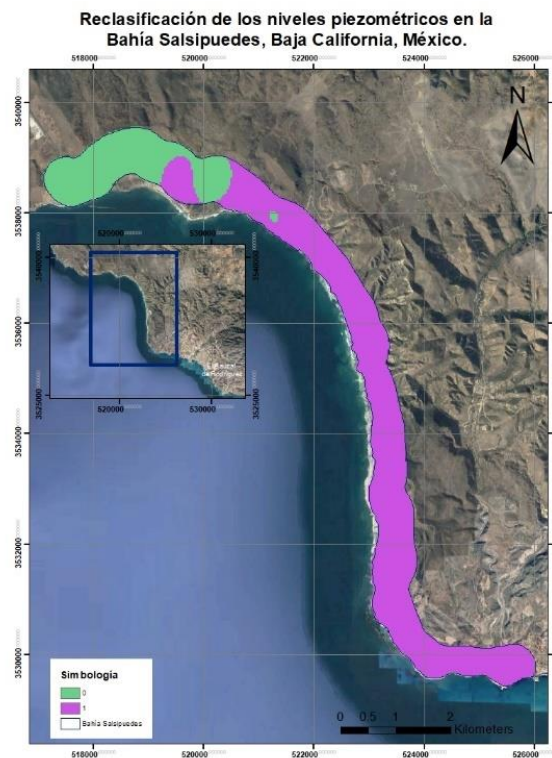


Figura 7.67. Modelo reclasificado para análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes, modelo de niveles piezométricos medios

7.6.5 Álgebra de mapas

El último paso de la metodología particular para el análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes es realizar álgebra de mapas superponiendo todas las capas reclasificadas de los rubros de interés (topografía, geología y geohidrología, siete capas en total), con ayuda de la calculadora de ráster, herramienta de *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*.

Se ejecuta una multiplicación de los valores en cada una de las celdas que contiene cada capa ráster involucrada; los valores de las celdas al haber sido reclasificados son números binarios (0 y 1); si el producto final es igual a 1, se sombrea la celda dando lugar a una zona de ubicación de galerías drenantes, por el contrario, si el producto es 0, se deja en blanco o sin sombreado, dando a entender que en esa zona no es necesaria la proyección de una galería drenante. A manera de ejemplo se presenta la **Figura 7.68**.

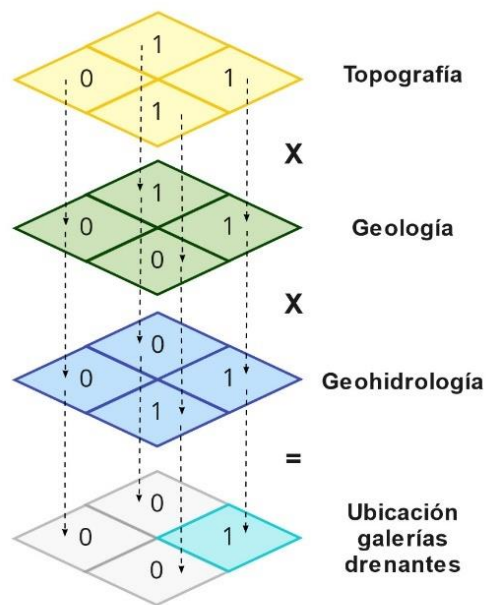


Figura 7.68. Representación gráfica del álgebra de mapas para el análisis multicriterio de ubicación de galerías.

Como se puede ver en la **Figura 7.68**, cada capa (modelo en formato ráster perteneciente a un rubro del análisis multicriterio, son siete capas en total) cuenta con valores 0 y 1, correspondientes a las reclasificaciones por los criterios. Si se superponen todas las capas y se multiplican los valores de las celdas superpuestas, el resultado es un producto *POSITIVO/AFIRMATIVO* si la multiplicación da 1, es decir, que es una zona para proyección de galerías drenantes y se sombrea; por otro lado, si el producto es *NEGATIVO*, o sea que la multiplicación da 0, quiere decir que no es necesaria la proyección de galerías drenantes en esa zona y por lo tanto no se sombrea.

La forma de acceder a la calculadora ráster y realizar el análisis multicriterio en *ArcMap 10.3* es ingresando a la caja de herramientas y a la pestaña de “*Spatial Analyst Tools*”, seguido de “*Map algebra*” y “*Raster calculator*”. Aparecerá una ventana como la que se presenta a continuación:

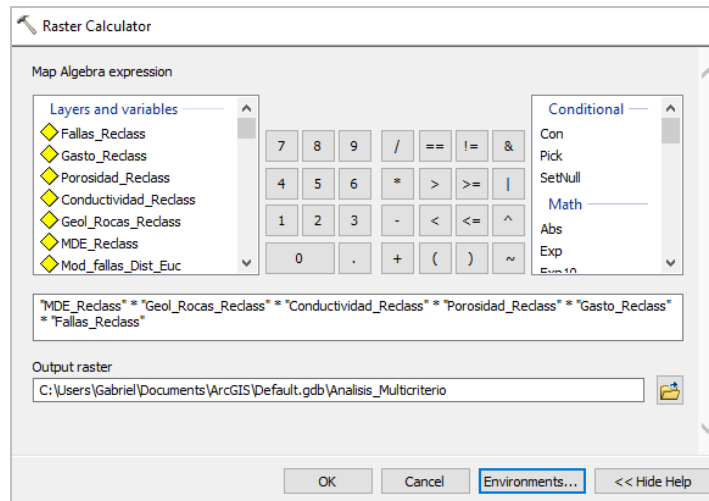


Figura 7.69. Interfaz en ArcMap 10.3 de ArcGIS para calculadora de ráster (Análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes).

Dentro de la ventana emergente de la **Figura 7.69**, se encuentra la sección denominada “*Map algebra expression*” en donde las capas o modelos ráster se enlistan en disponibilidad para utilizarse en la calculadora; mientras que el resto de la pantalla cuenta con un tablero digital con números y operadores algebraicos.

En el recuadro de la parte inferior se hace clic para escribir las capas ráster a utilizar, o bien, desde “*Map algebra expression*” se puede dar doble clic a cada capa ráster para irse adjuntando al recuadro. Se colocan las capas ráster entre comillas y se separan utilizando el operador “*”; que denota multiplicación entre las capas, como lo indica la **Figura 7.59**, si bien en teoría el análisis multicriterio se basa en sumatoria de criterios, en este caso lo ideal es generar un producto de las capas, ya que sustituye a la operación que realizaría el booleano “AND”, donde si hay una celda negativa (con valor 0) en una serie de celdas positivas (con valor 1), ésta celda negativa anula a las demás, dando un producto final negativo (con valor 0).

El siguiente paso es elegir la carpeta de guardado del archivo en formato ráster generado por el algebra de mapas. Además de los datos mencionados, se da clic en el botón de “*Environments*” en el que se selecciona el polígono de referencia que es la Bahía Salsipuedes (obtenido del contorno de la topografía), para las opciones de: extensión del procesamiento (“*Processing extent*”) y máscara del análisis ráster (“*Raster analysis mask*”), con la finalidad de limitar el modelo a esa zona específica.

El resultado del procesamiento es una capa ráster donde se muestran en zonas sombreadas los sitios donde el producto de la multiplicación de todas las capas es igual a 1, es decir un valor **POSITIVO/AFIRMATIVO** que indica qué zonas son factibles para la proyección y construcción de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes, a fin de disminuir los flujos de agua subterránea y sub – superficial de la zona. El mapa generado se muestra en la **Figura 7.70**.

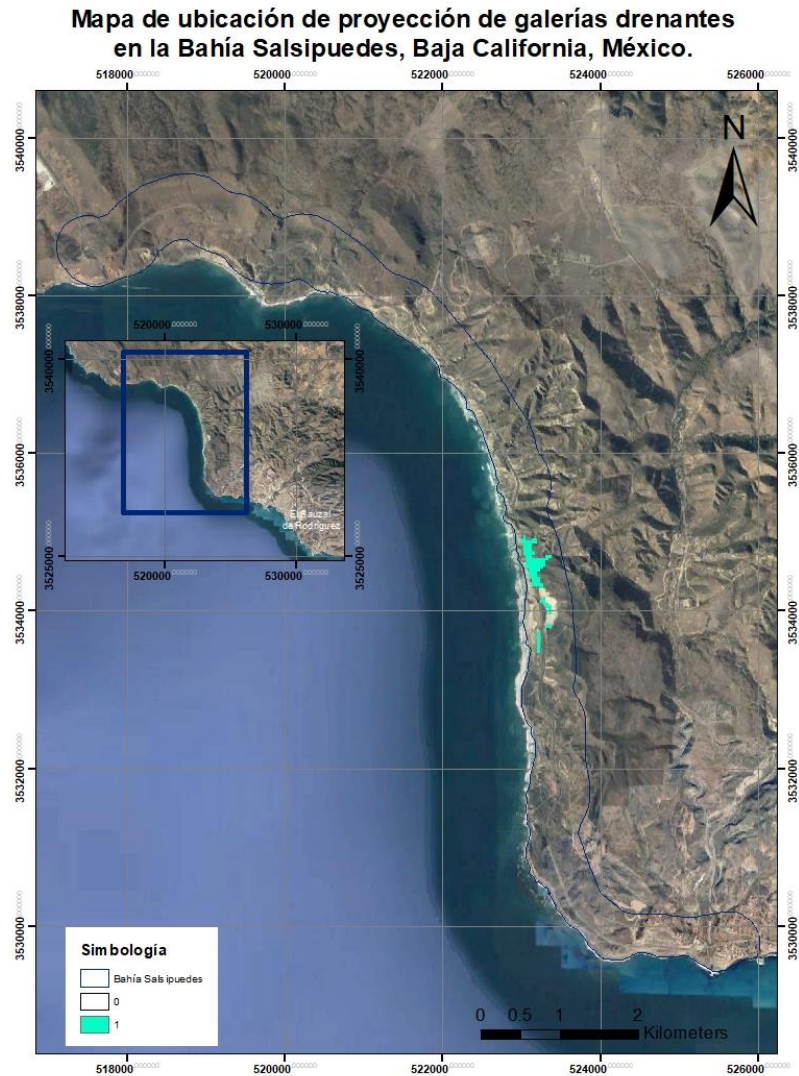


Figura 7.70. Mapa de zonas de proyección de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes, en azul se muestran las zonas idóneas para generación de proyecto de galerías.

7.7 Modelo conceptual

El último paso de la metodología general de esta investigación, es el generar un modelo conceptual del sitio de mayor inestabilidad de la Bahía Salsipuedes, con ayuda de la información generada a lo largo de la metodología, es decir, se requiere de la intervención de la información de redes de flujo, caudales, y rubros del análisis multicriterio para la ubicación de galerías drenantes como son la topografía, geología, geohidrología, e incluso la geofísica (mencionada en la sección de *Descripción del sitio*) de la zona de estudio.

El objetivo principal de realizar un modelo conceptual de un sitio específico de la Bahía Salsipuedes, en este caso el de mayor inestabilidad por acción de agua subterránea y sub – superficial, es el de esquematizar de una forma clara y sencilla el comportamiento conjugado de las diferentes ramas de las ciencias de la Tierra, en ese sitio en específico. Para realizar este último paso es necesario seguir la metodología particular de modelo conceptual que se presenta en la **Figura 7.71**.

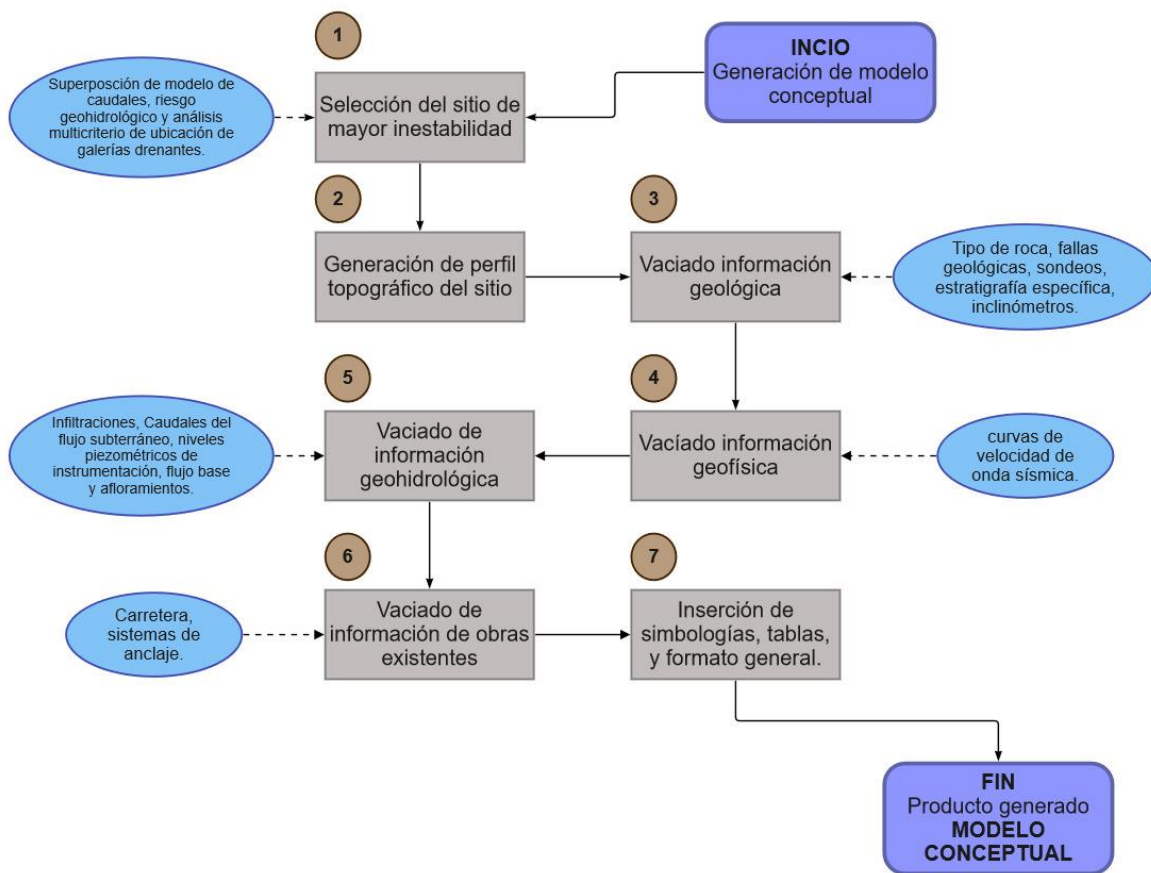


Figura 7.71. Metodología particular para en generación de modelo conceptual del sitio de mayor inestabilidad por acción de agua subterránea y sub – superficial en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede ver en la **Figura 7.71**, la metodología particular para hacer un modelo conceptual del sitio de mayor inestabilidad por acción de agua subterránea y sub – superficial en la Bahía Salsipuedes consta de siete pasos, los cuales se pueden dividir a su vez en 3 partes.

La primera parte corresponde a los puntos 1 y 2 del diagrama de flujo de la **Figura 7.71**, es decir, localizar el sitio de mayor inestabilidad en la topografía de la zona de estudio, para después trazar un eje perpendicular a ese sitio y se obtenga un perfil topográfico del mismo.

La segunda parte atañe a los puntos 3 al 6 de la metodología de la **Figura 7.71**, la cual consta del vaciado de la información recolectada de bibliografía, estudios y visitas a campo, esta información se conoce comúnmente con la denominación “3G”, debido a que corresponde a la geología, geofísica y geohidrología del sitio. Además de la información 3G, se adjunta información real de obras existentes, tales como la carretera escénica Tijuana – Ensenada, el sistema de anclaje presente en el sitio (km 92+000), entre otras.

La última parte consta de dar formato de salida al modelo conceptual, otorgando la simbología necesaria para su entendimiento, escalas, tablas de especificaciones, cuadrícula del perfil, entre otros. El resultado es el modelo conceptual del sitio seleccionado, el cual funciona como un esquema representativo para comprender de manera gráfica la problemática y comportamiento de la zona.

7.7.1 Selección del sitio

La selección del sitio sobre el que se genera el modelo conceptual de una zona de estudio puede tener muchas metodologías, criterios o parámetros de selección. En el caso particular de esta investigación, se basa en los resultados obtenidos dentro de las metodologías particulares de *Modelo de caudales*, *Riesgo geohidrológico* y *Análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes*. Es decir que la superposición o suma de esos tres factores, determina el sitio de mayor inestabilidad por acción de agua subterránea de la Bahía Salsipuedes, véase la **Figura 7.72**.

**Acercamiento al kilómetro 92+500 (Caudal/Riesgo/Multicriterio)
de la Bahía Salsipuedes, Baja California, México**

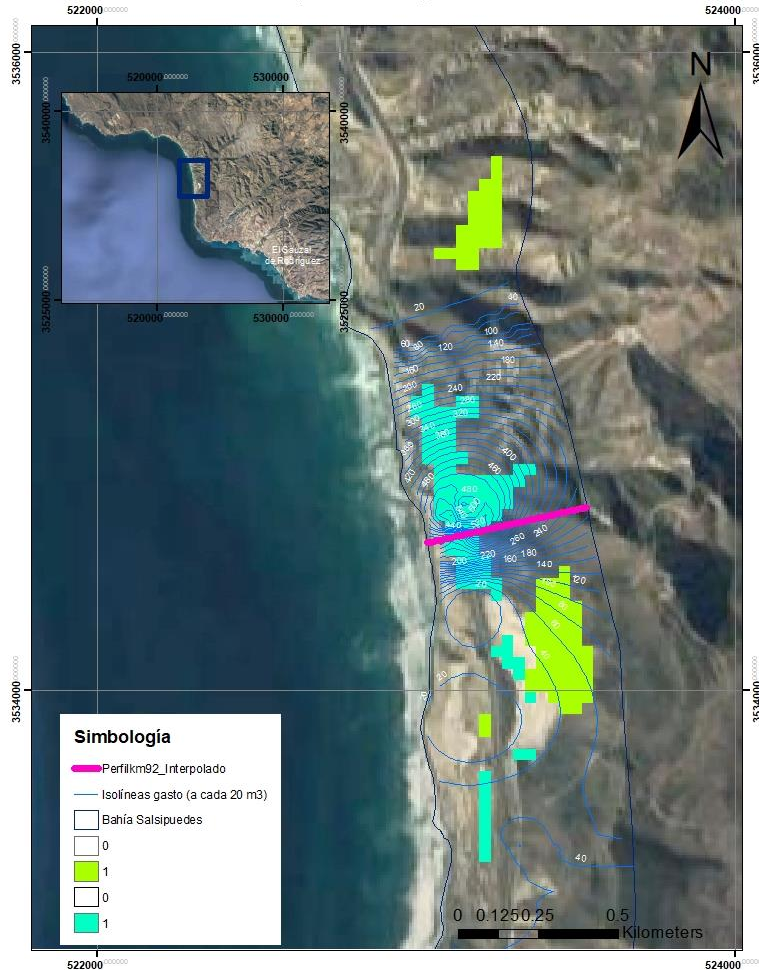


Figura 7.72. Acercamiento al km 92+500 de la Bahía Salsipuedes, Superposición de isótopos de gasto/caudal, polígonos de riesgo geohidrológico (verde) y polígonos de análisis multicriterio de ubicación de galerías drenantes (azul).

Como se observa en la **Figura 7.72**, la zona donde hay una mayor concentración de isótopos de gasto o caudal (líneas a cada 20 metros cúbicos por día), con zonas de riesgo geohidrológico cercanas (polígonos en verde) y zonas donde se es necesaria la construcción de galerías drenantes o incluso ya hay presencia de una (kilómetro 93+000), es el sitio correspondiente al localizado en el kilómetro 92+500 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada. Es por ello que el kilómetro 92+500

es el seleccionado como el sitio de mayor inestabilidad por acción de aguas subterráneas y sub – superficiales en la Bahía Salsipuedes y en el que se dibuja una sección o eje del que se debe obtener el perfil topográfico para la realización del modelo conceptual (el eje del perfil generado es la línea que aparece en color magenta).

7.7.2 Perfil topográfico

Para la generación del perfil topográfico se debe tener una sección o eje en planta, como la línea ubicada en el kilómetro 92+500 que se observa en la **Figura 7.72** (línea color magenta). Una vez dibujada esa línea y guardada en formato *shape* en el modelo de *ArcMap 10.3* de *ArcGIS*, se abre la caja de herramientas y se escoge la opción “*3D Analyst Tools*”, seguido de “*Functional shape*” y después “*Interpolate shape*”. Se abre la siguiente ventana:

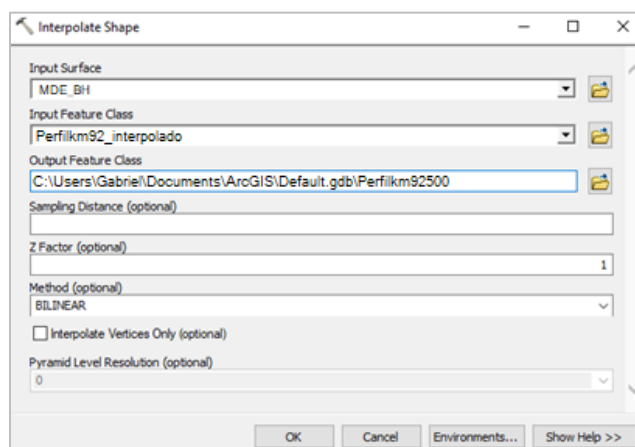


Figura 7.73. Interfaz en *ArcMap 10.3* de *ArcGIS* para interpolación de formas (*Interpolate shape* para generación de perfil topográfico).

Como se aprecia en la **Figura 7.73**, aparece una ventana que solicita ingresar el modelo digital de elevaciones correspondiente a la Bahía Salsipuedes en el recuadro “*Input Surface*”, tal es el caso del modelo generado en la **Figura 7.61**, cuya etiqueta es “*MDE_BH*”. Después se adjunta la línea, sección o perfil del que se quiere hacer la interpolación en el recuadro “*Input feature class*” para obtener los valores del perfil topográfico, en este caso corresponde a la etiqueta “*Perfilkm9_interpolado*”. Se elige la carpeta de guardado, un factor Z de 1 y el método bilinear, en la pestaña de “*Environments*” se puede agregar el polígono de referencia como “*Processing extent*” y “*Raster analysis mask*”.

El resultado es un nuevo perfil (línea interpolada), la cual se selecciona con la herramienta “*Select features*” y de la cual se puede obtener la gráfica de perfil (“*Profile graph*”) con la barra de herramientas “*3D Analyst*” que se ubica en la parte superior derecha de la interfaz de *ArcMap 10.3*.

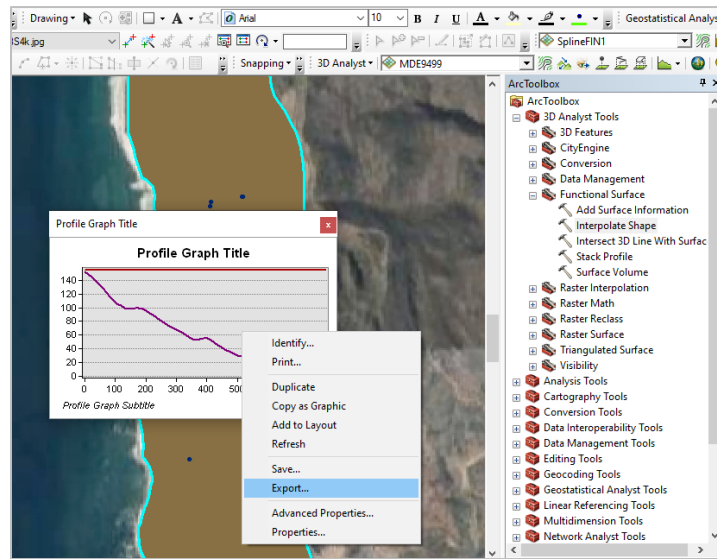


Figura 7.74. Exportación de puntos del gráfico del perfil topográfico.

El siguiente paso es dentro de la gráfica del perfil topográfico, dar clic derecho y seleccionar la opción “Export”, se abre una ventana que permite seleccionar y copiar los puntos XY del perfil, donde el valor de X es el correspondiente a la distancia longitudinal del perfil y el valor Y corresponde a la elevación. Esos valores se pegan con el comando “Polyline” en *AutoCAD* (se utilizó versión 2021, pero funciona a partir de la versión 2004 de *AutoCAD*) para poder comenzar a trabajar con el perfil topográfico para el vaciado de información y generación del modelo conceptual.

7.7.3 Vaciado de información

La información que se debe vaciar en el perfil topográfico generado en el punto anterior es la correspondiente a la conocida como 3G, es decir, la geología, la geofísica y geohidrología de la zona de estudio. Por lo tanto, comprende desde sondeos, estratigrafías, inclinómetros y desplazamiento de estratos, tipo de rocas en los estratos, fallas locales, curvas o isolíneas de velocidad de onda sísmica; hasta escurrimientos, infiltraciones, isolíneas de caudales, instrumentación piezométrica, niveles piezométricos, flujo base y afloramientos.

Además de la información 3G, también es necesario adjuntar información correspondiente a los elementos en exposición de la zona, tales son los sistemas de anclaje, la carretera escénica y los mencionados como instrumentación.

Para ello es de suma utilidad conocer en planta la información que interviene en el perfil, es por eso que se genera un mapeo general de la principal información que interviene en el kilómetro 92+500, como se puede ver en la **Figura 7.75**.

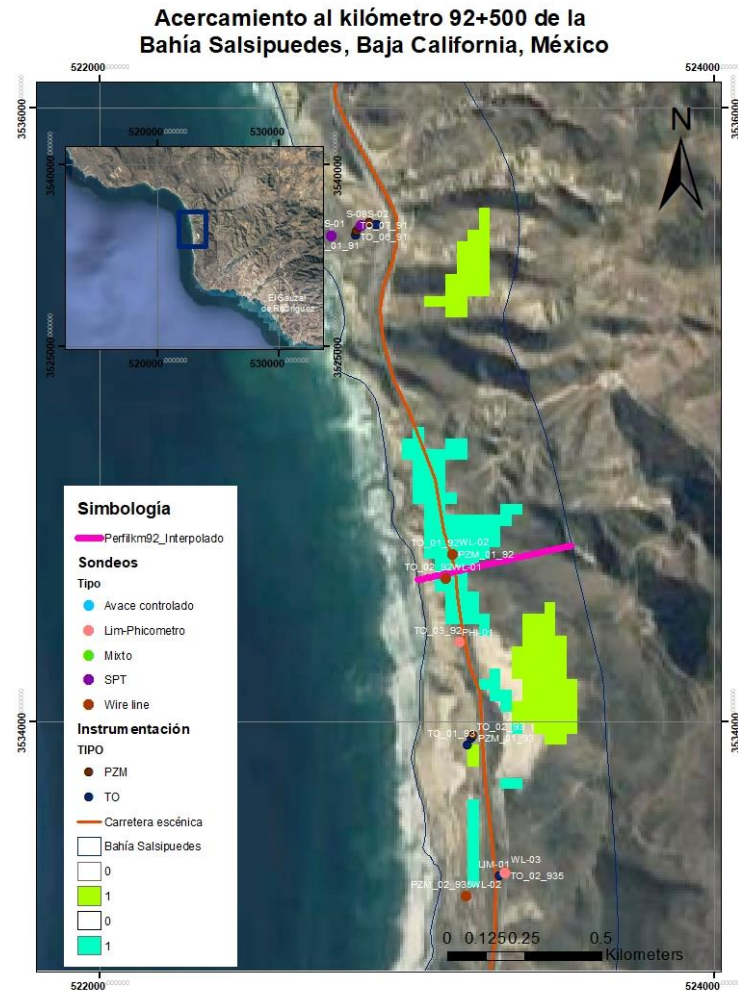


Figura 7.75. Acercamiento a kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes, donde intervienen sondeos, instrumentación y la carretera escénica, el perfil topográfico es el representado por la línea magenta.

Como se puede observar en la **Figura 7.75**, el perfil topográfico está muy cercano a los tubos de observación 01 y 02, los cuales se relacionan directamente a los sondeos WL-02 (del TO – 01) y WL-01 (TO – 02). Teniendo como referencia la instrumentación (TO – 01 y TO – 02), así como los sondeos relacionados a los mismos (WL – 02 y WL – 01), se pueden obtener los niveles piezométricos de cada instrumento y las estratigrafías de cada sondeo. Para el TO – 01 de 60 metros de longitud se tiene un nivel piezométrico de 41.61 mca, en cuanto al TO – 02 de 61 metros de longitud, maneja un nivel piezométrico de 12.86 mca, esta información se puede ir graficando en el perfil topográfico de AutoCAD 2021 de manera manual con el comando “Polyline” y generando acotaciones.

Ahora bien, las estratigrafías de los sondeos se obtienen de la información proporcionada por TGC Geotecnia S.A. de C.V., como se puede observar en la **Figura 7.76**.

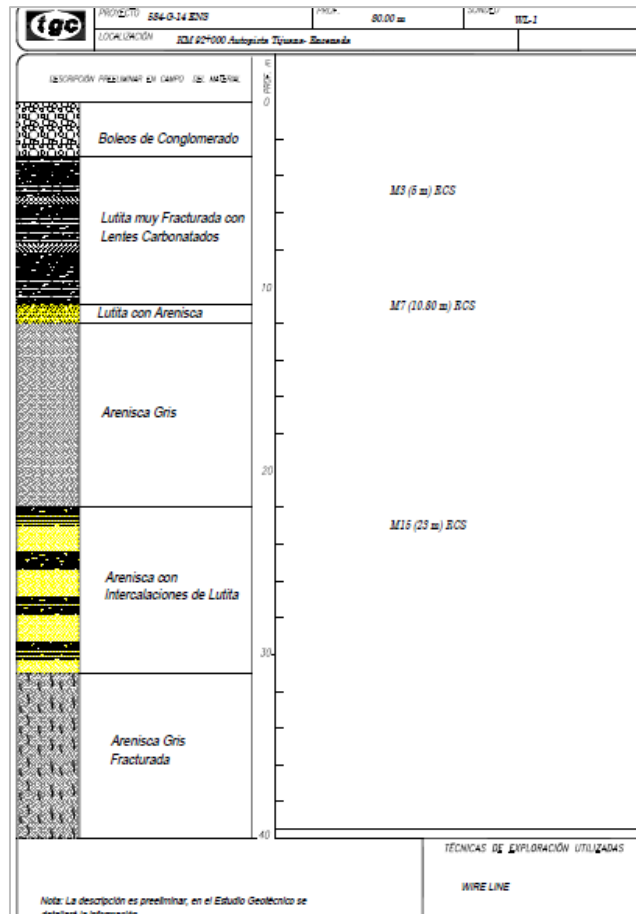


Figura 7.76. Estratigrafía del sondeo WL – 01 del TO – 02 del kilómetro 92+000 (según nomenclatura TGC) de la Bahía Salsipuedes, de 0 a 40 metros de profundidad, el resto de la estratigrafía en la sección de Anexos.

Como se puede observar en parte de la estratigrafía del sondeo WL 01 del kilómetro 92+000, correspondiente al TO – 02, tiene una profundidad de 80 metros, en la **Figura 7.76** solo se muestran los primeros 40 metros de sondeo, los cuales consisten básicamente de boleos o aluviales, seguidos de capas de lutitas muy fracturadas e intercalaciones de arenisca café y gris muy fracturadas. El sondeo WL – 02 de 87 metros de profundidad correspondiente al TO – 01 tiene una composición muy similar (véase la estratigrafía en *Anexos*). Esos mismos rangos y estratos se dibujan con el comando “polyline” y se rellenan con “Hatch” semi sólidos en *AutoCAD 2021*.

De manera alterna se agrega la estratigrafía completa del WL -01 del kilómetro 92+000 al modelo conceptual en la parte izquierda del mismo, con la finalidad de especificar cada estrato geológico y contemplarlo en forma de acercamiento específico escalado y reglado.

La información inclinométrica proviene del inclinómetro 04 del kilómetro 92+000, correspondiente al sondeo WL – 04 del mismo sitio, esta información fue proporcionada por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* en sus informes de monitoreo, específicamente el del kilómetro 92 (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021), el cual menciona que el inclinómetro 04 del km 92+000 tiene un desplazamiento mensual promedio de 3.43 milímetros. Esta información se adjunta con el comando “Polyline”.

Después de adjuntar la información geológica, se requiere agregar las isolíneas o curvas de velocidad de onda sísmica provenientes del modelo geofísico de la **Figura 2.5**, de la sección *Descripción del sitio – Geofísica*. Para ello se realiza una superposición del perfil del modelo geofísico con el perfil topográfico del kilómetro 92+500 y se van trazando las isolíneas con ayuda del comando “*Spline*” de *AutoCAD 2021*, el cual genera líneas curvadas semejantes a las curvas de las ondas sísmicas del modelo geofísico, como se observan las isolíneas de onda sísmica van desde rangos de los 490 m/s hasta los 4,400 m/s en estratos de conglomerados.

Enseguida se agrega la información geohidrológica, la cual se basa en las isolíneas de caudales subterráneos generadas en la sección de *Modelo de caudales* de la *Metodología*. Como se observa en la **Figura 7.77**, las isolíneas de caudales van desde los 240 m³/d hasta los 520 m³/d. Estas líneas se dibujan paralelas a los estratos geológicos con ayuda del comando “*Spline*” de *AutoCAD 2021*.



Figura 7.77. Acercamiento al kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes, Isolíneas de caudal (subterráneo).

La demás información geohidrológica proviene directamente de la sección Descripción del sitio – Hidrología, donde se denotan los principales escurrimientos y se menciona la presencia de un flujo base aflorando en el kilómetro 92+000-500 en la zona costa.

El siguiente paso es colocar la información extra o información varia de obras existentes, como es la localización de la carretera escénica, que básicamente queda dibujada en el perfil por la topografía del sitio y que sólo se marca con ayuda de “*Polyline*”.

Además, de la información de estudios y proyectos proporcionados por *TGC Geotecnia S.A. de C.V.* se obtienen datos de un sistema de estabilización del kilómetro 92+500 por medio de anclas de 35

metros de longitud con 30 toneladas de tensión. Las anclas están distribuidas en tres secciones de 50 metros, 100 metros y 150 metros de longitud paralela a la carretera escénica, y distribuidas en tres bolillos en 7 hileras superiores y 6 hileras inferiores. En la **Figura 7.78** se puede observar la construcción actual de dicho sistema de anclaje en el kilómetro 92.



Figura 7.78. Sistema de anclaje en kilómetro 92+500, de la Bahía Salsipuedes, visita de campo No. 7.

La representación gráfica del sistema de anclaje en el perfil del modelo conceptual se hizo con ayuda de los comandos “line”, “Hatch” y “Rectangle” de AutoCAD 2021.

7.7.4 Modelo conceptual del kilómetro 92+500

Después del agregado de la información, es necesario dar formato de salida al modelo conceptual, para ello, los estratos geológicos, isolíneas de ondas sísmicas, de caudales, nivel piezométrico, entre otras, deben quedar enmarcados en una cuadrícula que permita escalar el modelo. El eje X corresponde a la distancia y la distancia de espaciamiento es a cada 100 metros, mientras que el eje Y corresponde a la elevación y su espaciamiento es a cada 50 metros, lo que genera una cuadrícula con marco (utilizando los comandos “Line” y “Rectangle” de AutoCAD 2021).

También se agregan los títulos de escala y de los ejes del perfil o modelo conceptual, así como un recuadro de simbología y una tabla que contiene parámetros mecánicos y geohidrológicos de los estratos del modelo conceptual por tipo de roca, dichos parámetros son la carga máxima a compresión (c en ton/m^2), el ángulo de fricción de la roca (ϕ en $^\circ$), el peso específico de la roca (γ en ton/m^3), la velocidad de onda P (m/s), la porosidad efectiva (Θ_e en $\%$) y la conductividad hidráulica (K en m/d).

El resultado es el modelo conceptual del kilómetro 92+500 de la carretera Tijuana – Ensenada en la Bahía Salsipuedes, correspondiente al sitio de mayor inestabilidad por acción de agua subterránea y sub – superficial, el cual se puede ver en la **Figura 7.79**, en la sección de *Resultados y Discusiones* se hace un análisis del mismo.

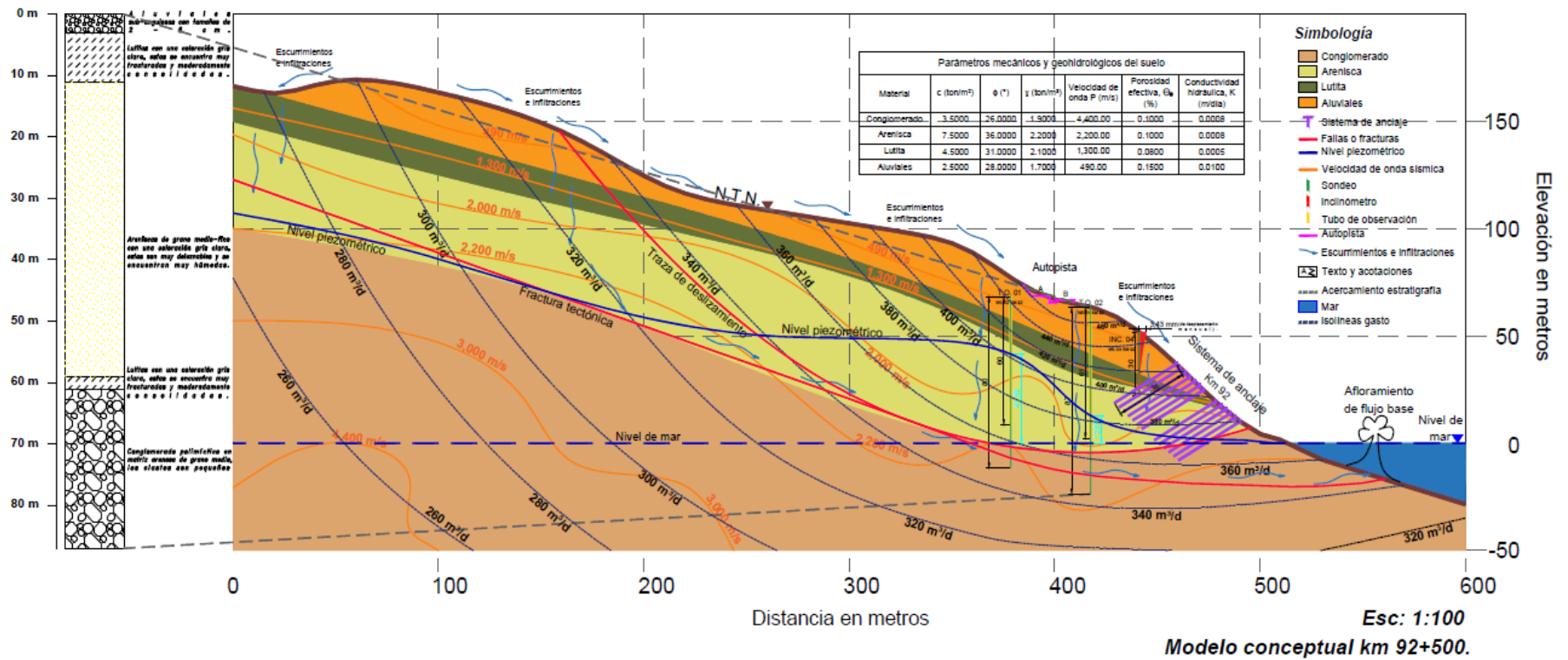


Figura 7.79. Modelo conceptual kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes.

8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en diferentes secciones anteriores, como por ejemplo en *Antecedentes* donde se plasmó la metodología *PRISMA*, o bien, en la sección anterior, es decir, la *Metodología* general de esta investigación, en la que se desglosan en metodologías particulares la recolección de información piezométrica, la construcción de redes de flujo, la obtención de caudales de esas redes generadas, así como análisis multicriterio para estimación de riesgo geohidrológico o localización de posibles zonas donde se pueden construir galerías drenantes; así como la unión de todos esos factores para conformar un modelo conceptual que ejemplifique el comportamiento de la zona de mayor riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes. En los siguientes apartados se desglosarán los resultados obtenidos de esas metodologías y algunas discusiones sobre dichos productos.

8.1 Metodología PRISMA en geohidrología

El primer punto a tratar en los resultados y discusiones es el que se presentó en la sección de *Antecedentes* de este documento. En dicha sección se desarrolló la metodología *PRISMA* (por sus siglas en inglés, *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta – Analyses*, Elementos de información preferidos para las revisiones sistemáticas y los metaanálisis) con la finalidad de tener un bosquejo del estado del arte, es decir, tener una idea las publicaciones científicas que se hacen con respecto a los temas de esta investigación, los cuales tratan del agua subterránea y sub – superficial, las carreteras, redes de flujo, deslizamiento de tierras y geohidrología en general.

Los resultados de la metodología *PRISMA* arrojaron que el país que más hace publicaciones sobre los temas de esta investigación es India con un total de 8 artículos en un período de casi 5 años (desde 2018 hasta el año en curso, 2022). Quedando en segundo lugar de ese ranking de publicaciones, Irán con 4 publicaciones en el mismo período. El tercer lugar lo comparten 5 países con 2 publicaciones cada uno, lo notable es que de esos 5 países en tercer lugar 2 son del continente asiático (China y Vietnam), mientras que el resto pertenecen a Europa (Italia) y África (Marruecos y Nigeria). Véase la **Figura 1.7**.

Lo que se manifiesta en el párrafo anterior es que, entre los siete países con más publicaciones conforme a la temática de esta investigación en un periodo de casi 5 años, cuatro de ellos son de origen asiático, es decir un 57.14% de ese top mundial; ahora bien, si se revisan la totalidad de 33 artículos que fueron contemplados por la metodología *PRISMA* de esta investigación, se muestra que veinte de ellos son de origen asiático, siete de origen africano, cinco europeos y solamente una publicación americana, la cual es de origen estadounidense, dejando claramente a México fuera de esta revisión bibliográfica, sin ningún aporte literario. Como se puede ver en la **Figura 8.1**.

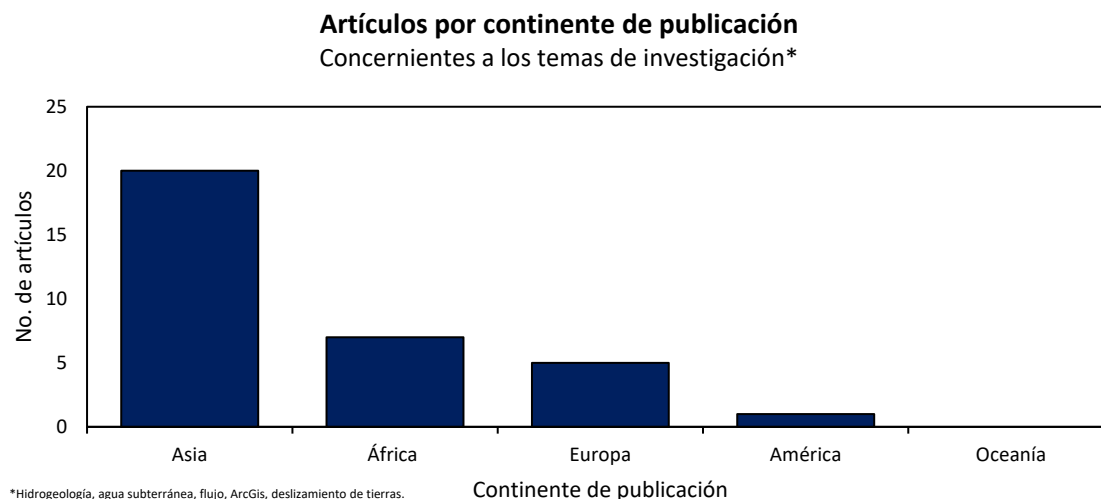


Figura 8.1. Artículos por continente de publicación según la metodología PRISMA.

Cada una de las publicaciones de los países asiáticos u orientales (India, Irán, China, Vietnam, Catar, Irak, Singapur y Turquía), manejan temas hídricos, pero con un enfoque en el abastecimiento del agua a la población, industria y agricultura (Phong, Pham, Trinh, Ly, & et, 2021), en crecimiento poblacional y necesidad del agua (Rane & Jayaraj, 2022), extracción de agua poblacional (Das, Pardeshi, Kulkarni, & Doke, 2018), uso indebido del agua y explotación (Gharekhani, Nadiri, Khatibi, & Sadeghfam, 2021), zonificación para uso (Falah & Zeinivand, 2019), (Hou, Wang, & Chen, 2018), entre otros.

En cambio, en países occidentales, tanto europeos como americanos, los enfoques en la investigación es el control del agua en la prevención de afectaciones o desastres naturales como es el caso de los deslizamientos de tierra (Kutlug & Colkesen, 2021), afectación del agua subterránea en las comunicaciones y transportes (Mohamed, y otros, 2021), contaminación de mantos acuíferos (Asmael, y otros, 2021), y búsqueda del recurso hídrico subterráneo (Ouedraogo, Defourny, & Vanclooster, 2019).

En pocas palabras, los países orientales que son los que más publican sobre la relación del agua subterránea y la geología, se enfocan más en el uso del agua de este origen, mientras que los países occidentales publican en menor medida al respecto y cuando lo hacen es con el fin de generar prevención de riesgo por amenazas de origen geohidrológico.

Este comportamiento se puede deber específicamente al tipo de clima que rige en los países que publican artículos científicos concernientes al tema de esta investigación. Si bien, los países orientales específicamente India, Irán, China y Vietnam son los que más publican sobre aprovechamiento del agua subterránea, es porque esos países se encuentran en climas tropicales que según Köppen (Carrillo Yee, 2015) tienen lluvias monzónicas, que provocan la saturación de sus suelos, en la mayoría costeros de areniscas y conglomerados, haciendo que el recurso hídrico subterráneo sea abundante.

Mientras que países occidentales como Bélgica, Francia, España, Italia e incluso Estados Unidos, se encuentran en climas templados mediterráneos con estaciones de lluvias muy marcadas en invierno

o verano, que hacen que el recurso hídrico sólo se presente en breves temporadas y en ocasiones causando desastres naturales como deslizamiento de tierras o inundaciones, y por lo tanto sea escaso y con mayor necesidad de regulación. Es por ello que sus publicaciones se enfocan más en el control del agua subterránea y prevención de riesgo por ese origen.

Aunado a las observaciones generadas en los párrafos anteriores, la realización de la metodología PRISMA, también deja al descubierto un amplio hueco en el que no ha estado presente la investigación geohidrológica general mexicana, ya que al menos en los últimos cinco años no ha habido publicaciones científicas al respecto, y la más cercana se remonta a finales de los años noventa y principios del nuevo siglo (XXI); la suma de estos factores hace de gran importancia desarrollar la investigación de este documento para generar un avance geohidrológico en la región noroeste de México y el país en general.

8.2 Información piezométrica en la Bahía Salsipuedes

Como se ha mencionado en un sinfín de ocasiones en este documento, la información piezométrica es aquella que arrojan los instrumentos de monitoreo tales como: los piezómetros tipo Casagrande y los tubos de observación. En la Bahía Salsipuedes se encuentran un total de 101 instrumentos instalados, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

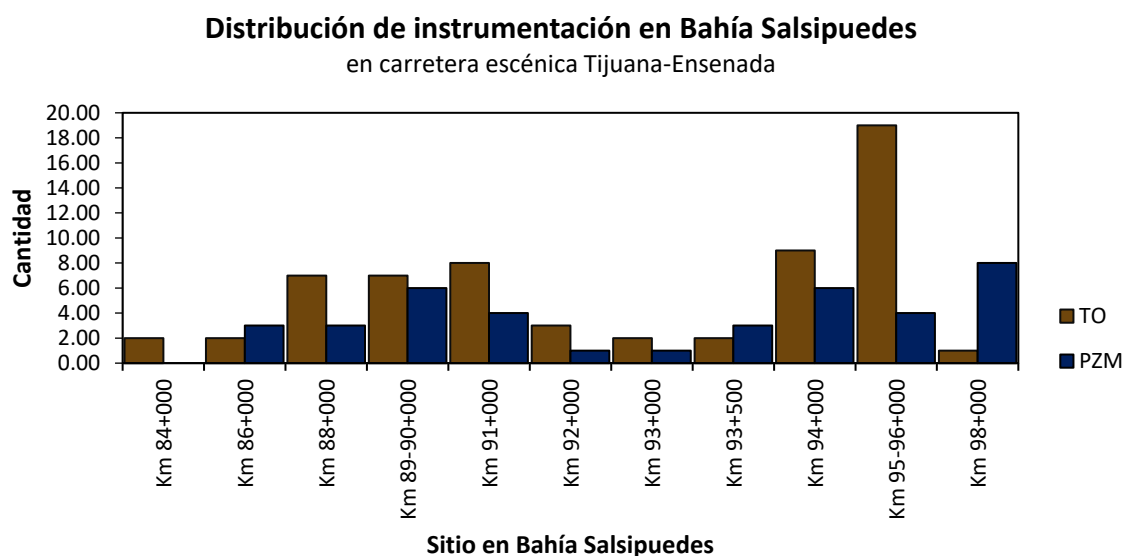


Figura 8.2. Distribución por tipo de instrumentación en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede observar en la **Figura 8.2**, la mayor cantidad de instrumentos están instalados en el kilómetro 95+000, que por las obras que se estuvieron realizando (pozos estabilizadores, sobreanchos, pilas, trincheras, zanjas drenantes, bermas, entre otros) durante los años 2016 a 2020 fue necesario su monitoreo y sobre – instalación de aparatos piezométricos. Ahora bien, aunque 101 instrumentos se encuentran instalados, once de ellos presentan fallas, fracturas, e incluso taponeo, es por ello que en la actualidad solamente 90 instrumentos son los que se monitorean constantemente, especialmente desde el año 2018 hasta la fecha, quedando el conteo como el que se muestra en la **Tabla 8.1**.

Tabla 8.1. Conteo actual de la instrumentación piezométrica en la Bahía Salsipuedes.

	Tubos de observación	Piezómetros Casagrande	General
Funcional	56	34	90
No funcional	6	5	11
Total	62	39	101

Como se menciona en la *Metodología*, para el desarrollo de las redes de flujo y el resto de las metodologías particulares seriadas a ella, es necesario la utilización de la información piezométrica, en este caso de los 90 instrumentos funcionales, donde 56 unidades corresponden a tubos de observación y 34 a piezómetros tipo Casagrande, distribuidos en los 11 (once) sitios inestables de la Bahía Salsipuedes.

Si bien el sitio más instrumentado es el kilómetro 95+000, los demás kilómetros, aunque se encuentren menos instrumentados, presentan comportamientos piezométricos similares, especialmente entre sitios con geologías parecidas. Como son los casos de los kilómetros 84+000 y 86+000; los kilómetros 88+000 y 89-90+000; los kilómetros 91+000, 92+000, 93+000 y 93+500; o bien, el caso del kilómetro 94+000 y 95-96+000. Dejando fuera únicamente al kilómetro 98+000. A manera de ejemplo se presentan las lecturas de niveles piezométricos en los piezómetros 01 en los kilómetros 92+000 y 93+000 en la **Figura 8.3**.

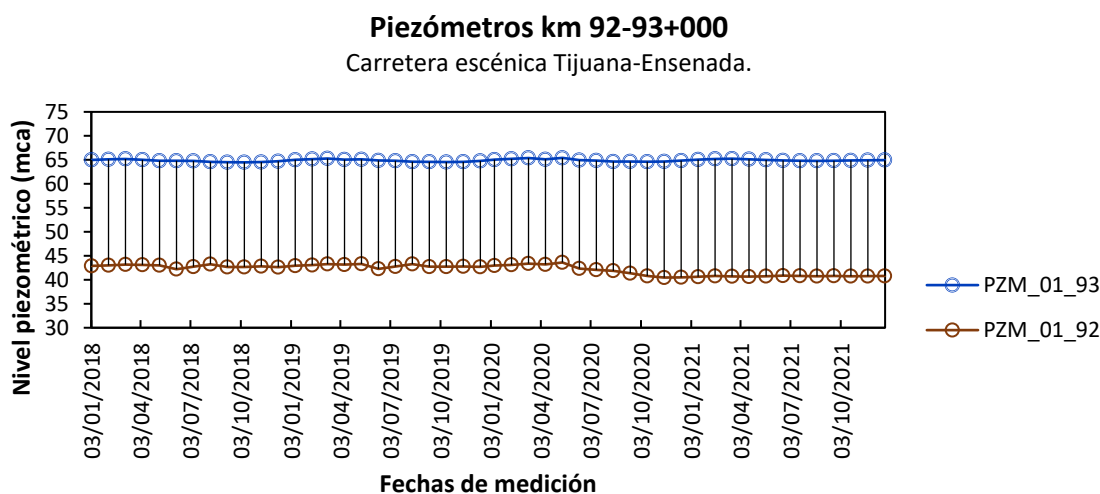


Figura 8.3. Comparativa en niveles piezométricos en kilómetros 92-93+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada en la Bahía Salsipuedes.

Como se puede ver claramente, aunque los niveles piezométricos están desfasados aproximadamente 20 metros columna de agua entre el kilómetro 92+000 y 93+000, al tener una geología similar, conformada principalmente por areniscas y conglomerados, el comportamiento geohidrológico es parecido y constante, con cierta tendencia cíclica a aumentar los niveles en

periodos después de la temporada de lluvias (meses invernales) y bajar los niveles piezométricos en temporada de sequía. Lo que es claro, es el hecho que el suelo se encuentra saturado todo el año, manteniendo niveles no menores a los 40.46 mca en el kilómetro 92+000 y 64.48 mca en el kilómetro 93+000.

El resto de las tablas de series de tiempo de tubos de observación y piezómetros para cada sitio de inestabilidad se pueden ver en la sección de *Anexos*, donde se pueden notar las similitudes ejemplificadas de la **Figura 8.3**, para los diferentes sitios de inestabilidad agrupados por su geología.

El principal hallazgo en la valoración de la información piezométrica arrojada por los instrumentos instalados en la Bahía Salsipuedes es que la Bahía está saturada todo el año independientemente del sitio de inestabilidad, ya que en los instrumentos funcionales siempre se presenta un registro de nivel piezométrico (medición con sonda hidrofóbica) en el monitoreo mensual, aunque sea menor o mayor para cada sitio inestable. Por ejemplo, la medición menor en tubos de observación se encuentra en el *TO 01* del kilómetro 98+000 con 2.22 mca, mientras que la medición mayor para tubos de observación se encuentra en el kilómetro 84+000 en el *TO 01* con 157.47 mca. En el caso de los piezómetros tipo Casagrande, la menor medición se encuentra en el *PZM 01* del kilómetro 98+000 con 3.32 mca debajo del nivel del mar, mientras que la mayor medición está en el *PZM 03* del kilómetro 88+000 con 106.41 mca.

La información anterior se ve representada en el modelo *IDW* de niveles piezométricos de la Bahía Salsipuedes que se observa en la **Figura 7.27**. Donde se demuestra que las zonas con niveles piezométricos mayores son zonas en la Bahía Salsipuedes en las cuales las elevaciones topográficas son mayores, mientras que las zonas en “valle” o con elevación topográfica menor, es decir cercanas al nivel del mar, tienen niveles piezométricos menores. Esta afirmación no refuta el hecho de que las formaciones rocosas de la Bahía Salsipuedes se encuentren saturadas todo el año, al contrario, si se toma en cuenta el comportamiento de los instrumentos piezométricos con el monitoreo mensual y la generación de las series de tiempo para cada sitio inestable, se puede decir que la Bahía Salsipuedes se encuentra saturada todo el año, y el aumento o disminución de sus niveles piezométricos recae en la temporada de lluvias invernales y la temporada de sequía.

Para ejemplificar se puede hacer la comparativa anual de los niveles piezométricos en el tubo de observación 01 y el piezómetro 01 del kilómetro 92+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (Bahía Salsipuedes) en la **Figura 8.4** y la **Figura 8.5**.

En ambas Figuras, se puede notar que los niveles piezométricos (o freáticos sea el caso), tienen un comportamiento disperso y brusco durante los años 2018, 2019 y 2020, pero que guardan cierta ciclicidad con picos o elevaciones en temporadas posteriores a las lluvias invernales (abril y mayo) y bajos bruscos cuando comienza el verano o temporada de sequía (en junio y julio). La instalación de estos dos instrumentos se remonta a finales de 2017, por lo que es comprensible que durante sus primeros años sus niveles freáticos oscilaran bruscamente hasta llegar a un equilibrio hidráulico durante el año 2021, donde el monitoreo arrojó mediciones de niveles piezométricos con cambios menos pronunciados, que varían entre los 0.22 y 0.37 mca, que a diferencia de años atrás era cada de 2 mca. Si bien las variaciones de nivel fueron en un rango menor, se siguió observando el comportamiento cíclico de niveles altos en meses invernales y bajos en meses de verano durante el año 2021; que, si se compara con las precipitaciones registradas por la estación climatológica CICESE de ese mismo año, se obtiene el gráfico de la **Figura 8.6**.

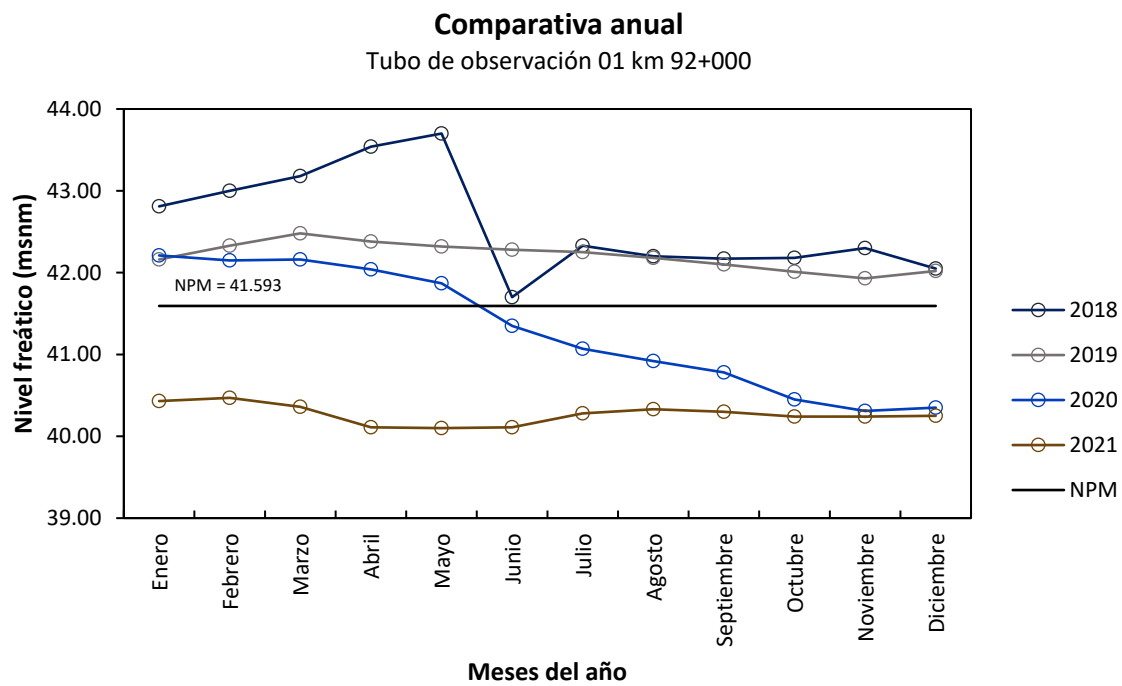


Figura 8.4. Comparativa anual de nivel freático en TO – 01 km 92+000.

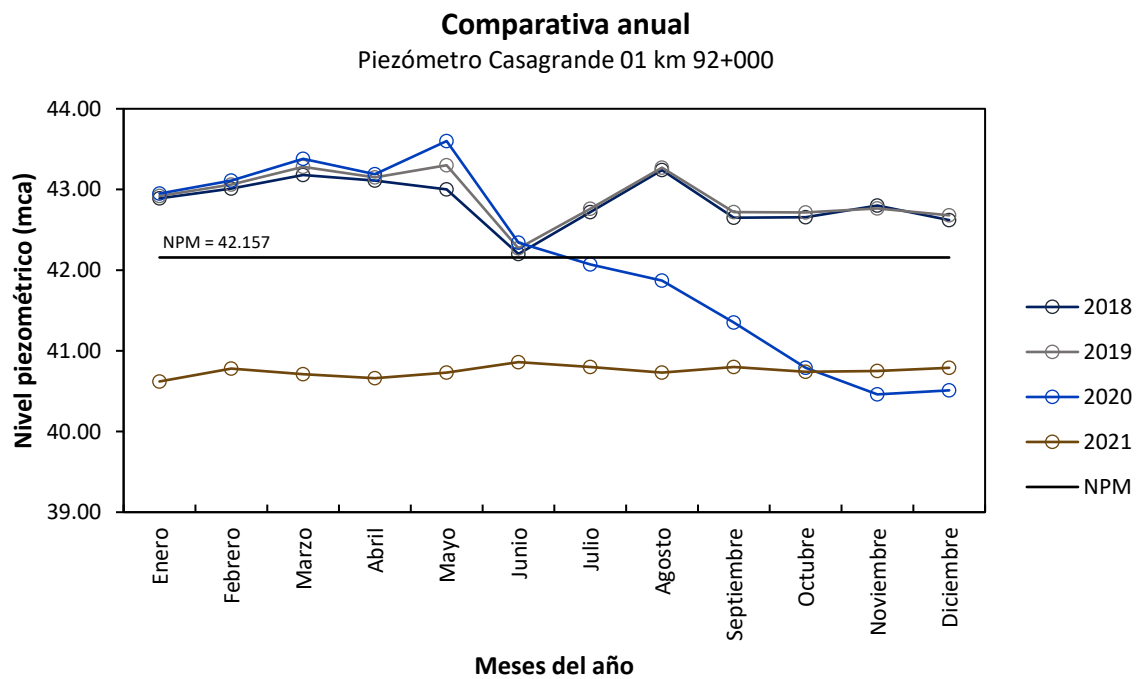


Figura 8.5. Comparativa anual de nivel freático en PMZ – 01 km 92+000.

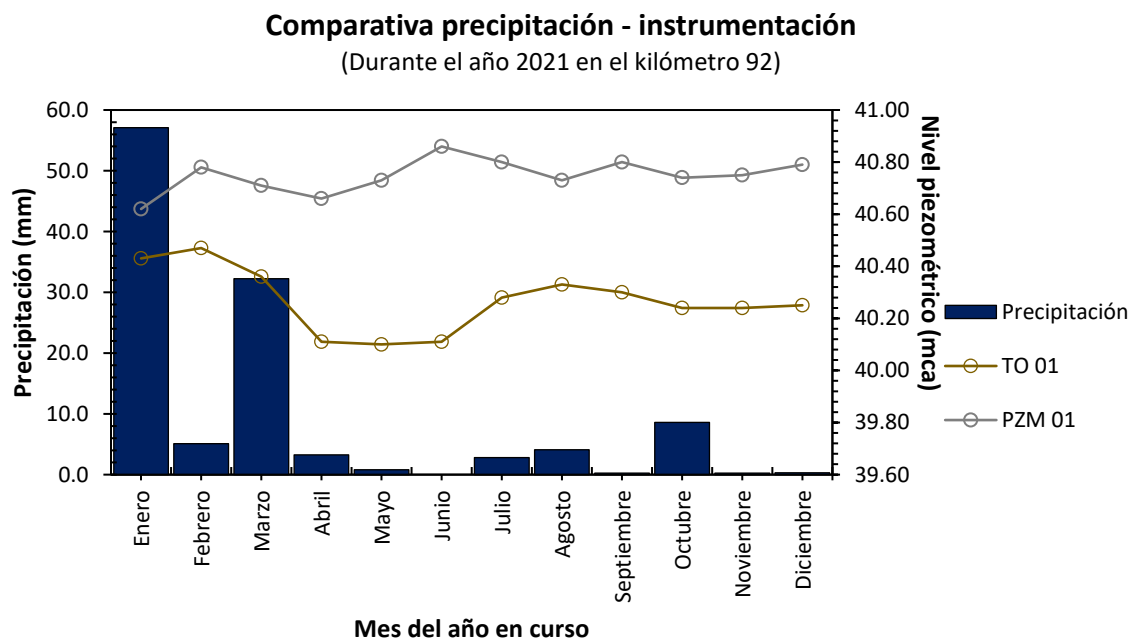


Figura 8.6. Comparativa de precipitación – instrumentación para el año 2021 en el kilómetro 92+000.

Como se observa en el gráfico de la **Figura 8.6**, la superposición del hietograma de precipitaciones de la estación climatológica *CICESE* correspondiente al año 2021 (*CICESE*, 2022), con las mediciones de nivel piezométrico para los instrumentos *TO 01* y *PZM 01* del kilómetro 92+000 de ese mismo año, muestran que las grandes precipitaciones de enero, febrero y marzo se infiltraron por los estratos de areniscas y conglomerados correspondientes a la geología del kilómetro 92+000 en un lapso de 3 a 4 meses, permitiendo elevar los niveles piezométricos a partir del mes de mayo y hasta julio donde empezó un decaimiento, debido a la temporada de sequías en verano. Cabe mencionar que las mediciones altas de niveles piezométricos del primer trimestre de 2021 corresponden a la temporada de lluvias invernales que comenzó desde finales de octubre de 2020. El último trimestre de 2021 se presenta pequeño repunte en las precipitaciones durante el mes de octubre, lo que permite que las curvas o series de tiempo de cada instrumento se mantengan en un nivel piezométrico elevado, independiente de la temporada de sequías de verano.

Por lo que se puede decir que la temporada de lluvias invernales debidas al clima *BSks*, denominado frío semiárido mediterráneo, afectan directamente al comportamiento geohidrológico de la Bahía Salsipuedes en cuanto a sus niveles piezométricos y su variación respecto a los meses del año, pero el hecho de que las formaciones rocosas permanezcan saturadas durante todo el año, se le adjudica únicamente al tipo de roca y sus propiedades geohidrológicas, como la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica, las cuales se mencionarán en los siguientes resultados.

8.3 Redes de flujo en la Bahía Salsipuedes

La formación de las redes de flujo en la Bahía Salsipuedes se basó en diferentes aspectos geohidrológicos, tales como la porosidad efectiva de la formación rocosa, el espesor de saturación de la roca base, la conductividad hidráulica y por lo tanto la transmisibilidad hidráulica de esa

formación rocosa, además de los niveles piezométricos (en esta investigación el nivel piezométrico medio *NPM*) registrados por la instrumentación colocada en la zona de estudio.

Para la obtención de las líneas equipotenciales se utilizaron los valores del nivel piezométrico medio de la instrumentación en instalada en la Bahía Salsipuedes, correspondiente a los 90 instrumentos funcionales (56 tubos de observación y 34 piezómetros). Cuando se refiere al nivel piezométrico medio se dice que es el promedio de todas las mediciones mensuales dentro del periodo comprendido de enero de 2018 hasta diciembre de 2021.

Se hicieron tres modelos de interpolación, el primero por el método *IDW*, el segundo por el método de *Kriging* y el tercero por el método *Spline*. El último modelo se descartó automáticamente al generar curvas que se desfasaban en los rangos de nivel piezométrico con respecto a los otros dos métodos, las mediciones de este iban desde valores negativos hasta los 1,240 mca, los cuales correspondían a valores extrapolados que no manifestaban el comportamiento piezométrico de la zona, ni hacía relación a las elevaciones topográficas del polígono de referencia generado para la Bahía Salsipuedes, por lo que se puede decir que este método es el menos indicado para la interpolación piezométrica en la zona de estudio.

De los dos modelos de interpolación (por los métodos *IDW* y *Kriging*) se realizó un análisis por raíz del error cuadrático medio, donde el *RMSE* para el modelo de interpolación por *IDW* fue el que mantenía una mejor precisión con respecto a las celdas de salida del modelo (ver **Figura 7.27**) correspondientes a la escala manejada de 1:50,000 con un valor de 22.447 unidades mca, ver en *Metodología – Redes de flujo – líneas equipotenciales*.

La precisión del modelo generado por el método *IDW* o método de distancias inversas ponderadas, en este caso particular, se debe a que la densidad de puntos (90 puntos provenientes a la instrumentación colocada en la zona de estudio) es correcta, es decir que a lo largo de la Bahía Salsipuedes en los 11 sitios inestables hay al menos 2 instrumentos que hacen que la nube de puntos de control no se encuentra dispersa, provocando que haya una distribución adecuada de datos a lo largo del polígono de referencia y permitiendo que el valor ponderado en relación con la distancia de vecindad de puntos sea idónea para interpolación. Por otro lado, en el método de *Kriging* no solo hay implicación de distancia entre vecindad de puntos, sino también en la elevación de los puntos interpolados y otros datos geoestadísticos, que, aunque hacen más exacto el cálculo de interpolación, no lo hacen preciso.

Del modelo *IDW* de niveles piezométricos medios se obtuvieron los contornos y como resultado se tienen las líneas equipotenciales a cada 5 mca de la Bahía Salsipuedes, con valores piezométricos hasta un máximo de 150 mca en el kilómetro 84+000.

Para la obtención de las líneas de flujo se utilizó el método de flujo Darcy de la paquetería de herramientas para agua subterránea de *ArcMap 10.3*, que solicitaba como requisitos las capas ráster de porosidad efectiva, espesor de saturación, transmisibilidad y carga hidráulica (nivel piezométrico medio).

Los valores de porosidad efectiva, espesor de saturación y transmisibilidad se obtuvieron de la base de datos geohidrológicos, generada por puntos de control. Los valores de porosidad efectiva, conductividad hidráulica, entre otros, están relacionados directamente con la geología de rocas de donde se encontraba cada punto de control.

Como se puede ver en la **Figura 7.23**, en el modelo de porosidad efectiva, las zonas donde los valores son elevados (denotados con un color morado más intenso) corresponden a zonas donde se encuentran materiales como aluviales, areniscas y conglomerados; mientras que en zonas con valores de porosidad efectiva menores (denotados con un color lila o morado claro) corresponden a materiales rocosos tales como andesitas y basaltos, caracterizados por ser rocas muy compactas con grandes índices de dureza, por lo tanto menos porosas.

También en la **Figura 7.23**, se observa el modelo de espesor de saturación en el que se nota la contrariedad con el modelo de niveles piezométricos medios. En el primer caso, se observa que los espesores de saturación son menores al noroeste de la Bahía Salsipuedes, es decir, en los sitios comprendidos desde el kilómetro 83+000 hasta el kilómetro 86-87+000 aproximadamente, en un rango de 1 a 4 metros de espesor; y conforme aumenta el cadenamiento de la carretera escénica Tijuana – Ensenada hacia el sureste de la Bahía (kilómetro 88+000 a 98+000), también lo hacen los valores de los espesores de saturación, coloreados en un rojo más intenso en el mapa, en rangos de los 5 a los 12 metros de espesor.

En el segundo caso, correspondiente a los niveles piezométricos, pasa lo contrario; los valores mayores en un rango de 80 a 150 mca corresponden a la zona noroeste de la Bahía Salsipuedes (kilómetro 83+000 al 86-87+000), mientras que los valores menores en un rango de 0 a 79 mca se encuentran en la zona media y sureste de la Bahía (kilómetro 88+000 al 98+000).

La relación de la contrariedad entre los valores de espesor de saturación y nivel piezométrico, también recae en la geología de rocas de la Bahía Salsipuedes, ya que mientras al noroeste de la Bahía predominan las andesitas y basaltos, en la parte media y sureste se encuentran aluviales, areniscas y conglomerados.

En la zona donde están las andesitas y basaltos los espesores de saturación son menores debido a la poca porosidad efectiva y conductividad hidráulica de la roca, eso hace que el nivel piezométrico sea más somero y por lo tanto debido a la topografía de la zona, sea mayor. En zonas donde hay aluviales, areniscas y conglomerados, los espesores de saturación son mayores debido a su porosidad efectiva y conductividad hidráulica mayor y por lo tanto los niveles piezométricos son más profundos, es decir, cercanos al nivel del mar y por lo tanto menores en valor absoluto.

El último modelo requerido para determinar el flujo por Darcy fue el de transmisibilidad hidráulica, que se obtuvo de la multiplicación del espesor de saturación con la conductividad hidráulica. El resultado también se aprecia en la **Figura 7.23**, que es prácticamente igual al modelo de conductividad hidráulica (ver **Figura 7.63**), donde la región media comprendida a finales del kilómetro 91+800, que continúa en el kilómetro 92+000 y termina a principios del kilómetro 93+100 es donde se encuentran los valores más elevados de transmisibilidad con un rango de 0.08 a 0.1 m²/d. los valores más bajos corresponden a las zonas aledañas al noroeste y sureste de la Bahía, las cuales son las zonas de menor conductividad hidráulica.

Por lo que se puede decir que el espesor de saturación no influyó tanto en la transmisibilidad, a diferencia de la conductividad hidráulica, la cual hizo que el comportamiento de la transmisibilidad fuera prácticamente el mismo a ella. Aquí la geología también es el principal factor, ya que los aluviales localizados en la zona media de la Bahía Salsipuedes, son los que tienen el valor de conductividad hidráulica más elevado de la zona de estudio, con 0.01 m/d.

El resultado del método por Darcy da las líneas de flujo que marcan la dirección en la que se mueve el agua a través de los estratos de suelo (o roca). La superposición de las líneas equipotenciales de los niveles piezométricos medios de la Bahía Salsipuedes y las líneas de flujo obtenidas por el método de Darcy, genera una malla donde las líneas equipotenciales (de igual carga hidráulica) se cruzan perpendicularmente con las líneas de flujo, como se puede ver en el mapa de redes de flujo de la Bahía Salsipuedes de la **Figura 7.36**.

En el mapa de redes de flujo, se puede observar que hay un total de 36 redes de flujo entrelazadas en la Bahía Salsipuedes, donde la mayor concentración de redes se encuentra en los kilómetros 88-89+000, 90+000, 94+000 y 95-96+000 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada. Mientras que, en los extremos de la Bahía, correspondientes a las zonas noroeste y sureste la concentración es menor.

Las concentraciones de redes de flujo en ciertos puntos de la Bahía Salsipuedes están estrechamente ligadas a la presencia de datos piezométricos densos en esas zonas, si bien el modelo de interpolación de niveles piezométricos hizo una homogenización de los datos y su densidad, las curvas de contorno que dan las líneas equipotenciales se vieron influenciadas por la densidad de instrumentación en esos sitios específicos.

Si se comparan los sitios con más instrumentación instalada del gráfico de distribución de instrumentación de la Bahía Salsipuedes de la **Figura 8.2**, con los sitios donde hay más concentración de redes de flujo, se obtiene el gráfico de la siguiente Figura.

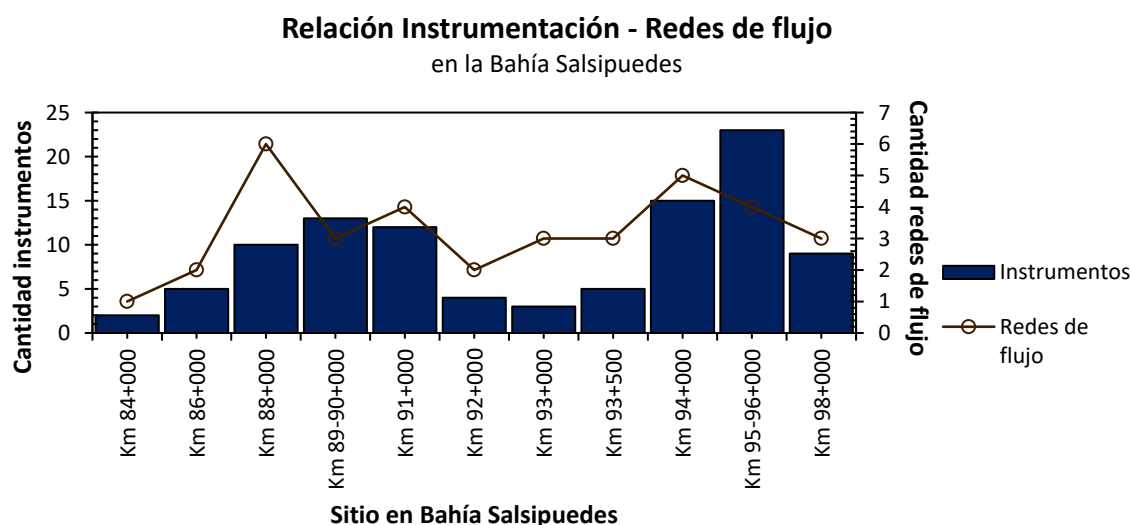


Figura 8.7. Relación entre instrumentación instalada y redes de flujo por sitio en la Bahía Salsipuedes.

En el gráfico de la **Figura 8.7**, se puede notar que hay una clara relación entre la distribución de instrumentación y las redes de flujo generadas, ya que en las zonas medias de la Bahía Salsipuedes (entre los kilómetros 88+000 al 95-96+000) hay mayor concentración de instrumentación piezométrica instalada y es donde se encuentran más redes de flujo, a diferencia de las zonas extremas, donde hay poca instrumentación y pocas redes de flujo; es decir, que la relación entre distribución o densidad de instrumentación y las redes de flujo es un hecho; y dentro de las redes

de flujo el factor principalmente afectado por la densidad de instrumentación es la concentración de las líneas equipotenciales.

Ahora bien, los canales de cada red de flujo no están relacionados con la densidad o distribución espacial de la instrumentación piezométrica, como con las líneas equipotenciales. Las líneas de flujo y por ende los canales generados por ellas, están estrechamente relacionados por la geología y topografía del sitio.

Según el modelo digital de elevaciones de la **Figura 7.61**, las zonas más elevadas de la Bahía Salsipuedes se encuentran alejadas del borde costero y tentativamente al noroeste del polígono de referencia alcanzando alturas de hasta 430 metros sobre el nivel del mar; mientras que las zonas menos elevadas se encuentran al sureste, donde sus elevaciones máximas alcanzan los 100 metros sobre el nivel del mar.

Ahora bien, las zonas de elevaciones mayores al noroeste de la Bahía corresponden a lugares donde se localizan rocas ígneas, tales como andesitas y basaltos; mientras que en zonas de baja elevación que están en el sureste de la Bahía corresponden a rocas sedimentarias como lo son las areniscas, conglomerados e incluso los aluviones.

El conjunto de esos dos factores, y en general del comportamiento geohidrológico de las rocas que se encuentran en cada zona específica de la Bahía Salsipuedes, hacen que se generen más canales de flujo en zonas donde hay más elevación, menor espesor de saturación, pequeños índices de porosidad efectiva y elevada conductividad hidráulica, al igual que la transmisibilidad. Por lo contrario, la menor cantidad de canales de flujo se adjudica a zonas poco elevadas, con mayor espesor de saturación, mayor índice de porosidad efectiva y menor conductividad hidráulica, al igual que menor transmisibilidad.

Si se hacen acercamientos de cada zona de la Bahía Salsipuedes se pueden observar la geometría de las redes de flujo. En el caso de la zona noroeste de la Bahía, que comprende del kilómetro 84+000 al 86+000 aproximadamente y se observa en la **Figura 8.8**, se puede notar que existen 4 redes de flujo entrelazadas por medio de las líneas de flujo, las cuales llegan al centro de cada red formando 17 canales en cada una de las redes. La geometría simétrica y tentativamente circular con rectángulos muy parecidos en la red más cercana al kilómetro 84+000 (parte izquierda de la **Figura 8.8**), se debe a que las líneas equipotenciales hicieron una interpolación prácticamente lineal al no contar con tanta instrumentación piezométrica instalada en esa zona (sólo 2 instrumentos); lo que va cambiando cuando hay más instrumentos colocados en la zona, haciendo que los círculos concéntricos de las líneas equipotenciales se tornen más elípticos u ovalados.



Figura 8.8. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 84-86, de la Bahía Salsipuedes.

El agua captada o acumulada se encuentra prácticamente en la zona más céntrica de cada red de flujo, y a una profundidad que alcanza el espesor de saturación, es decir el tope del nivel freático; lo que permite que se genere una especie de reservorio o acuífero de menor escala en esa micro – zona, permitiendo la posibilidad de extraer el líquido mediante algún tipo de pozo de bombeo (Pozo Ranney, lumbreras, entre otros) o bien, mediante galerías drenantes como se verá posteriormente.

En la zona comprendida entre los kilómetros 88+000 al 90+000 de la **Figura 8.9**, se puede observar un acercamiento a las redes de flujo de esa parte de la Bahía Salsipuedes, las cuales cumplen con las observaciones generales hechas para la zona de los kilómetros 84-86. Donde se puede ver que, por la densidad de instrumentación, las interpolaciones generaron líneas equipotenciales no tan circulares y concéntricas, sino más bien, ovaladas, alargadas y en ocasiones zigzagueantes. También se puede notar que en la zona donde hay cauces de escurrimientos superficiales, las líneas equipotenciales siguen una recta prácticamente paralela a esos escurrimientos, véase la zona cercana al kilómetro 88+800.

Las líneas de flujo unen todas las redes, las cuales en esa zona son aproximadamente 9 en total. Estas líneas de flujo van disminuyendo al cambiar el tipo de material, mientras sale de la zona de andesitas y basaltos, y se acerca a la zona de areniscas, los canales de flujo van de 17 a 12, haciendo

**Acercamiento a redes de flujo km 88-90
en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México**

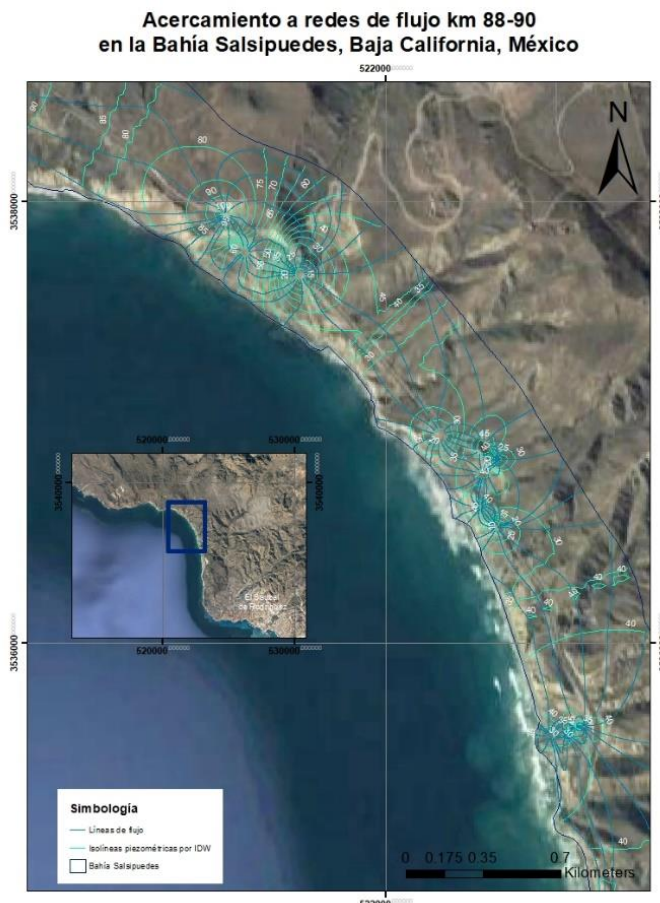


Figura 8.9. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 88-90, de la Bahía Salsipuedes.

En el caso comprendido entre el kilómetro 91+000 al 93+500 de la **Figura 8.10**, se observa que la densidad de redes de flujo disminuye debido a la poca instrumentación piezométrica instalada en esa zona, debido a eso también se nota que las líneas equipotenciales siguen geometrías irregulares y que tienden a seguir patrones de cauces superficiales, lo cual no es de extrañar, ya que los escurrimientos superficiales son las principales fuentes de entrada de agua sub – superficial a la Bahía Salsipuedes, y son las zonas que se encuentran más saturadas por la infiltración. Las líneas de flujo generan canales que van de los 14 a los 8 por red de flujo, con un total de 12 redes de flujo en esa zona comprendida entre los kilómetros 91+000 – 95+000. Los canales de flujo disminuyen en número y se ensanchan debido a su relación estrecha con la conductividad hidráulica de la zona y transmisibilidad.

Las principales concentraciones de redes de flujo se encuentran en la zona del kilómetro 91+600, donde se localiza la galería drenante de ese kilómetro; así como en el kilómetro 92+500 donde los aluviones empacados en arena predominan en la geología y la concentración de flujo está cercana a la playa; también en el kilómetro 93+000 hay una pequeña concentración de redes de flujo, pero es mayor en el kilómetro 93+500, cercanas a la carretera escénica Tijuana – Ensenada.

**Acercamiento a redes de flujo km 91-93
en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México**

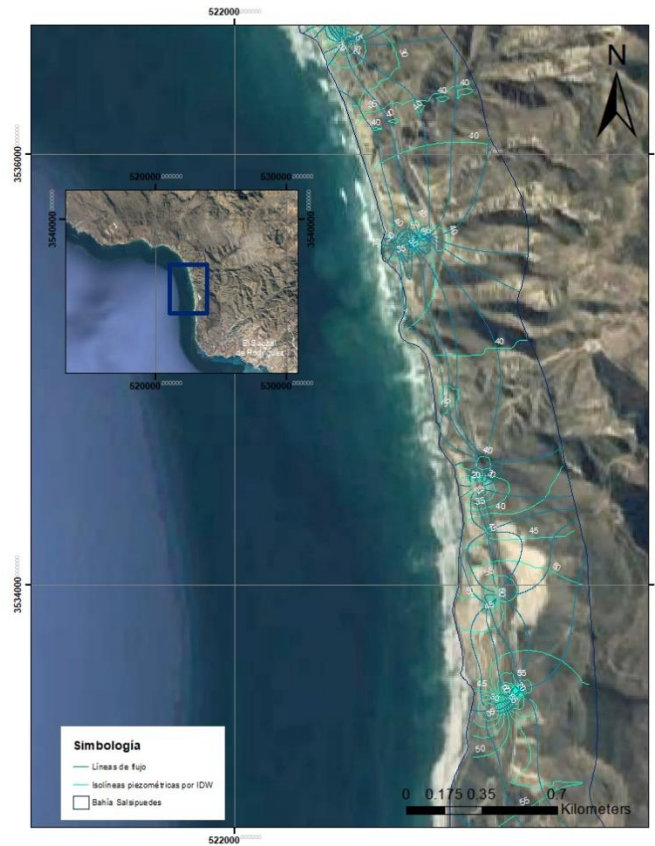


Figura 8.10. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 91-93, de la Bahía Salsipuedes.

Para el caso de las redes de flujo comprendidas entre los kilómetros 94+000 al 96+500, de la **Figura 8.11**, se puede observar que si bien hay una densidad elevada de redes de flujo (9 en total) parecida a la del tramo anterior (Kilómetro 91+000 – 93+500), la cantidad de canales de flujo es menor. Esto se debe a que hay más instrumentos piezométricos instalados en la zona que permiten generar líneas equipotenciales más precisas y de geometrías más particulares, siguiendo en ocasiones patrones de escurrimientos superficiales; pero, el cambio de geología a rocas metamórficas como areniscas y conglomerados, hacen que las propiedades geohidrológicas cambien y por lo tanto las líneas de flujo, haciendo que de 12 canales de flujo aproximadamente, desciendan a 6 ó 7 canales por red.

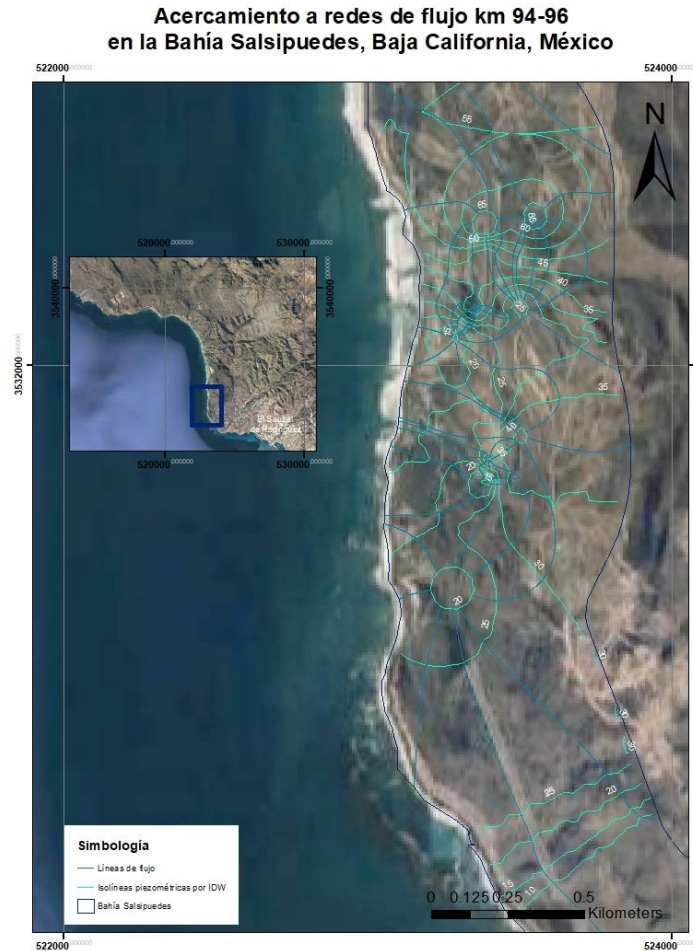


Figura 8.11. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 94-96, de la Bahía Salsipuedes.

Por último, el caso de las redes de flujo de la zona comprendida entre los kilómetros 97+000 al 98+500 (casi llegando al 99+000, sólo que se nombra hasta el kilómetro 98+000 por costumbre de nombrar únicamente el sitio de inestabilidad) de la **Figura 8.12**, se puede notar que la presencia de líneas equipotenciales es escasa, haciendo posible la generación únicamente de 3 redes de flujo entrelazadas por medio de las líneas de flujo.

La poca densidad de líneas equipotenciales se debe a la dispersión entre los instrumentos piezométricos instalados y a los bajos niveles piezométricos registrados en la zona. Mientras que la disminución de canales de flujo a aproximadamente 6 canales por red, es atribuida a las propiedades geohidrológicas de las rocas de la zona (areniscas y conglomerados principalmente).

Como en todos los tramos anteriores, el agua es reservada en pequeños acuíferos que se localizan en los centros de las redes de flujo y estos se encuentran precisamente cercanos a la carretera escénica Tijuana – Ensenada. Es por ello que el cálculo de caudales o gastos hidráulicos además de realizarse en la totalidad de la Bahía Salsipuedes, es de suma importancia estimarlo a lo largo de la autopista desde el kilómetro 83+500 en la entrada de la Bahía Salsipuedes hasta el 99+500 localizado en la caseta de cobro a la salida de la misma. Este procedimiento se podrá ver en el siguiente apartado.

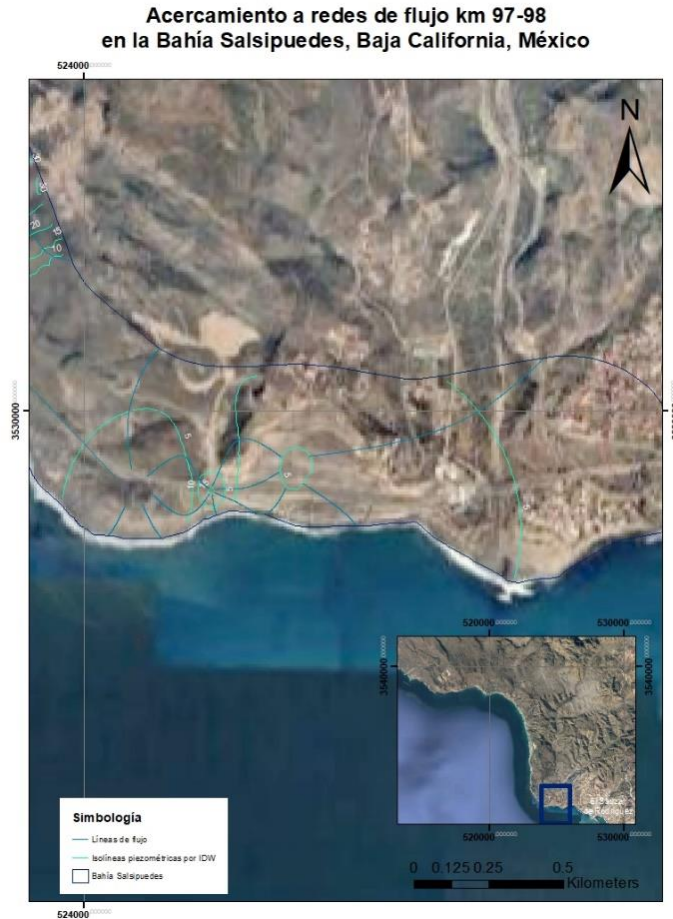


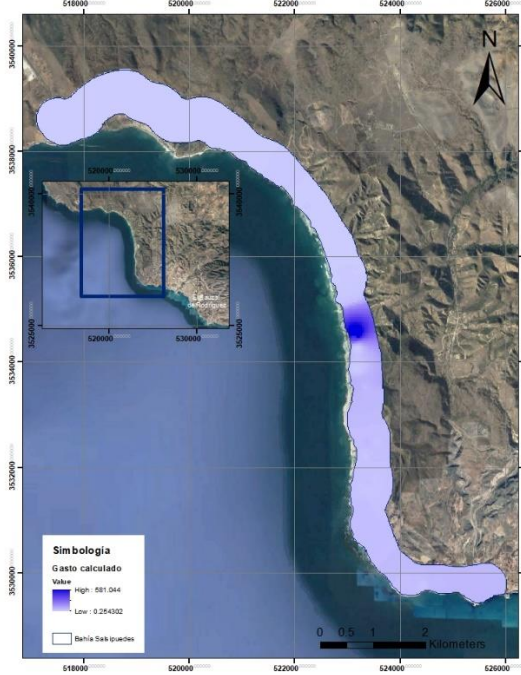
Figura 8.12. Acercamiento a redes de flujo en los kilómetros 97-98, de la Bahía Salsipuedes.

8.4 Modelo de caudales en la Bahía Salsipuedes

Para la generación del modelo de caudales es necesario calcular el gasto hidráulico en toda la Bahía Salsipuedes con ayuda del método de superposición difusa ponderada y la ecuación de Darcy para la estimación de caudal en las redes de flujo. Como se pudo observar en la sección de *Metodología – Gasto de las redes de flujo* de este documento, para el cálculo del caudal en la Bahía Salsipuedes se utilizaron modelos de interpolación que mostraban el factor de forma o geometría de la red de flujo (N_f/N_c), el factor de ancho – base de los rectángulos curvilíneos de cada malla (a/b), así como la conductividad hidráulica (K), la longitud del canal del flujo (L) y la carga hidráulica (h), las cuales son variables pertenecientes a la ecuación de Darcy.

En el modelo de caudales de la Bahía Salsipuedes (véase **Figura 7.42**), la mayor concentración de gastos o caudales subterráneos están localizados dentro del kilómetro 92+500 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, con un radio aproximado de 1 kilómetro. Este comportamiento se le atribuye directamente a la conductividad hidráulica, ya que el modelo de caudales generado por el método de superposición difusa ponderada (*WOM* por sus siglas en inglés) siguen el mismo patrón de interpolación que la conductividad hidráulica de la Bahía Salsipuedes. Como se puede apreciar en la siguiente comparación.

Modelo de gasto calculado por superposición ponderada (Fuzzy-WOM) en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México.



Modelo de conductividad hidráulica en la Bahía Salsipuedes, Baja California, México.

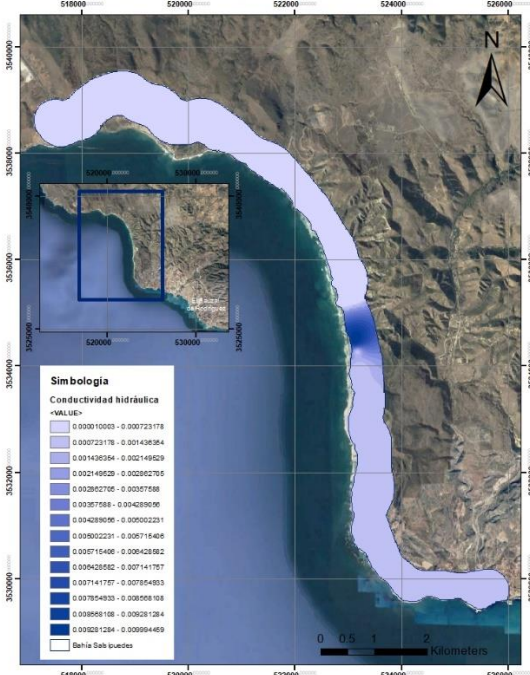


Figura 8.13. Comparativa entre modelo de gastos por WOM y modelo de conductividad hidráulica de la Bahía Salsipuedes.

Como se puede apreciar en la **Figura 8.13**, ambos modelos tienen la misma concentración de valores elevados en la zona correspondiente al kilómetro 92+500; la razón principal de que ambos modelos (caudales y conductividad hidráulica) sigan ese comportamiento, nuevamente es por la geología del sitio. En el kilómetro 92+500 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, el principal material rocoso que se encuentra son boleos empacados en arena como se les llama ingenierilmente, que no es otra cosa, sino que aluviones en una matriz de arena compactada, además de una base de areniscas y conglomerados en esa zona, véase la **Figura 8.14**.



Figura 8.14. Talud del kilómetro 92+450 de la Bahía Salsipuedes, donde se aprecian aluviones sobre una matriz de arenosa compactada (arenisca).

En el caso de los aluviales, estas son las rocas con la mayor conductividad hidráulica de la Bahía Salsipuedes con 0.01 m/d de conductividad, mientras que rocas como las andesitas tienen valores muy bajos de alrededor 0.00001 m/d.

Esos factores, aunados a las longitudes de los canales de flujo, y a la geometría general de las redes de flujo de esa zona específica, que como se vio en el apartado anterior toman dicha forma por variables como los espesores de saturación y la porosidad efectiva de la roca, hacen que, en conjunto, el sitio donde se concentre la mayor cantidad de flujo subterráneo dentro de la Bahía Salsipuedes sea el kilómetro 92+500 carretera escénica Tijuana – Ensenada.

Si se observa con detenimiento la **Figura 7.43**, el kilómetro 92+500 tiene una concentración de gasto hidráulico en la zona cercana a la costa, ese gasto actualmente no es extraído por una obra de captación hidráulica, ya sea galería drenante, pozo o zanja drenante. Por lo que el caudal diario que ronda los 500 m³/d, es desechado poco a poco por medio de grietas y un efecto llamado *afloramiento del flujo base*, hacia el mar, situación que se verá más adelante en el apartado de *Modelo conceptual del km 92+500*.

Ahora bien, aparte de la modelación por el método de superposición difusa ponderada, se realizó una estimación del gasto hidráulico o caudal específicamente el usando de la ecuación (38) del método de Darcy, la cual arrojó un modelo prácticamente igual al realizado por el método *Fuzzy – WOM*, como se puede ver en la siguiente comparativa.

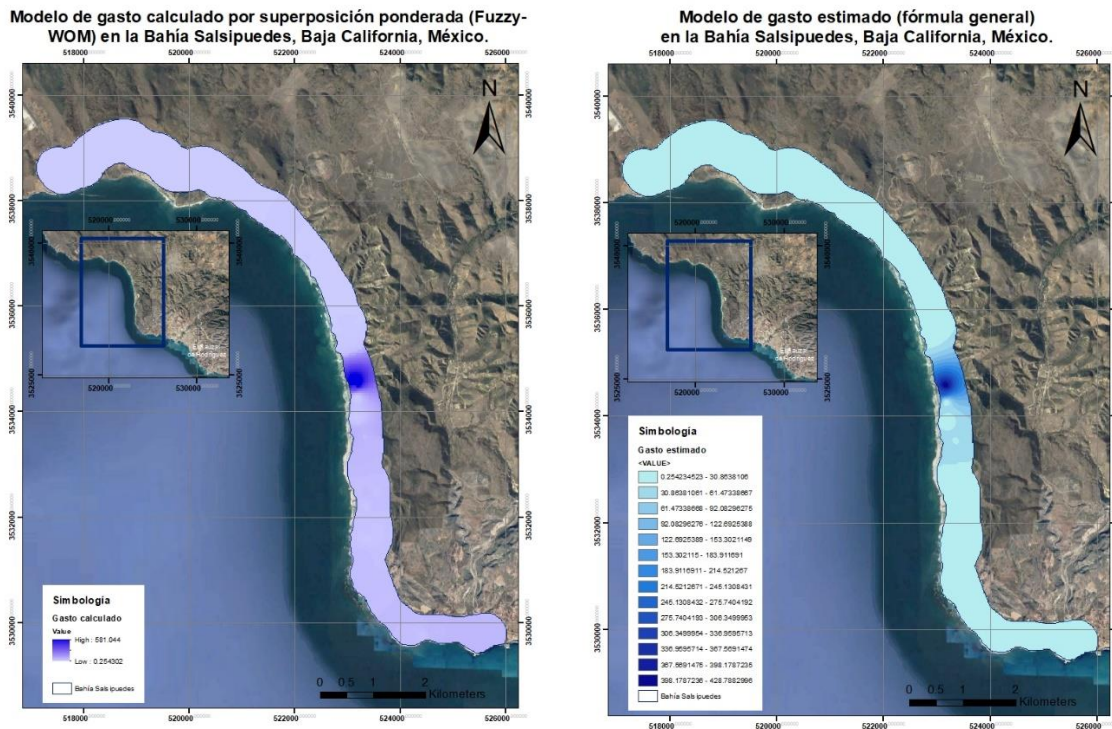


Figura 8.15. Comparativa entre modelos de caudales: Q_a (Fuzzy – WOM a la izquierda) y Q_e (estimado a la derecha).

Como se puede notar en la comparación de la **Figura 8.15**, tanto el modelo calculado por la superposición difusa ponderada (*Fuzzy – WOM*), como el estimado por la fórmula general de Darcy,

arrojan la misma concentración de valores de gasto hidráulico en el kilómetro 92+500, lo que nos dice ambos modelos son congruentes con el comportamiento geohidrológico de la Bahía.

La diferencia entre ambos modelos está solamente en la precisión de los caudales, ya que, en el modelo estimado únicamente por la fórmula de Darcy, los valores de caudal en varios puntos de control, tienden a ser menores que los valores calculados con el método *Fuzzy – WOM*.

Tomando en cuenta la propuesta del último párrafo del apartado anterior (*Resultados y discusiones – Redes de flujo en la Bahía Salsipuedes*), si se elige como eje de proyecto la carretera escénica Tijuana – Ensenada desde el kilómetro 83+500 hasta el kilómetro 99+500, es posible obtener un perfil donde se comparen los gastos hidráulicos calculados por el método *Fuzzy – WOM* (Qa) y los obtenidos por la fórmula general de Darcy (Qe), como se puede observar en la **Figura 8.16**.

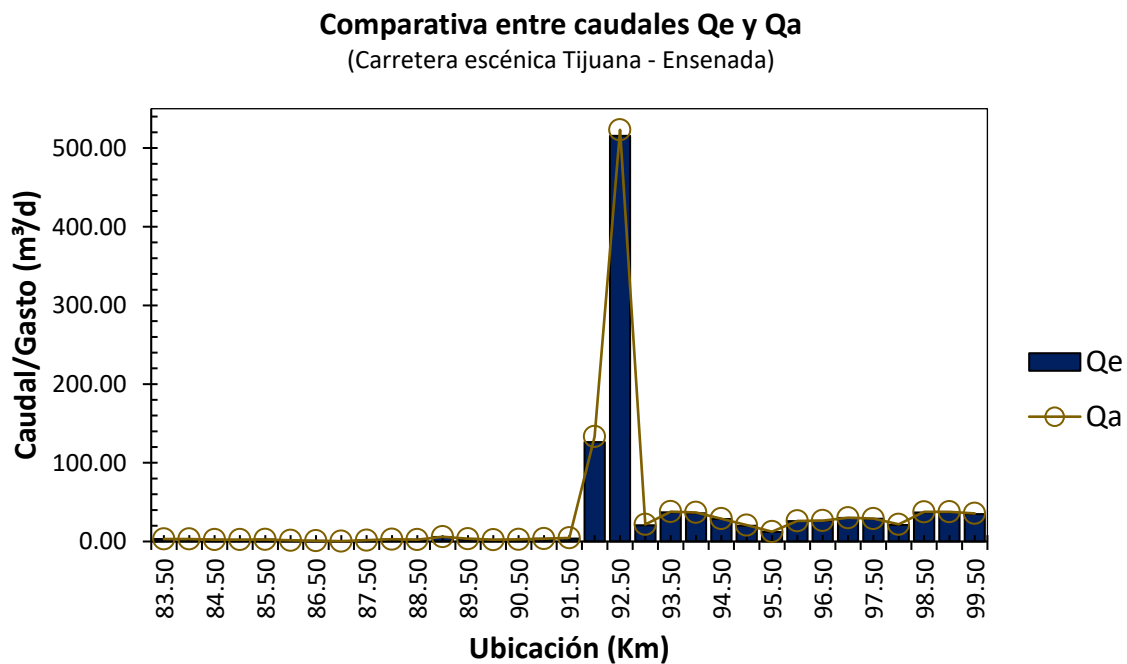


Figura 8.16. Comparativa entre caudales Qe (estimado por fórmula de Darcy) y Qa (calculado por el método Fuzzy – WOM).

Como se puede apreciar en la **Figura 8.16**, los caudales o gastos hidráulicos representados por las barras azules (histograma) son las correspondientes al caudal estimado por la fórmula de Darcy, que tienden a ser ligeramente menores a los calculados por el método de superposición difusa ponderada (*Fuzzy – WOM*, por sus siglas en inglés), representado por la línea y marcadores café (serie).

El gráfico de la **Figura 8.16**, nos corrobora lo mostrado en los mapas de la comparativa de gastos en la **Figura 8.15**, la serie y el histograma demuestra que a partir del kilómetro 92+000 y hasta el kilómetro 93+000, se encuentra la zona de radio de 1 kilómetro, donde se registran los caudales más elevados en la Bahía Salsipuedes, con picos máximos de más de 500 m^3/d en el kilómetro 92+500, específicamente 515.45 m^3/d para el gasto calculado manualmente por la fórmula de Darcy (Qe) y 523.13 m^3/d para el gasto calculado por *Fuzzy – WOM* (Qa).

En la región sureste de la Bahía, es decir a partir del kilómetro 93+500, los valores de gasto hidráulico son medianamente elevados y oscilan entre los 20 a 38 m³/d, con notables bajas en zonas donde se han realizado trabajos de estabilización y por lo tanto hay presencia de obras hidráulicas de control y captación, tales son los casos de las galerías drenantes en los kilómetros 88+000, 90+000, 91+000, 93+000 y 94+000, así como pozos y zanjas drenantes.

La precisión entre ambos modelos de caudales (Q_e y Q_a), es elevadamente aceptable, ya que cuenta con un valor de $RMSE$ de 1.882 m³/d, como se puede ver en el cálculo en la sección de *Metodología – Gasto de las redes de flujo – Validación por RMSE*. Donde el comportamiento de los errores entre ambos modelos tiene una distribución perfectamente lineal con un R^2 de 0.9998.

Pero el cálculo de ese valor de raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) es para ambos modelos de caudales, tomando como base los gastos estimados específicamente en el centro de las 36 redes de flujo, es decir, en los puntos de control piezométrico (PCP); y el perfil de comparativa generado en la **Figura 8.16**, es para el eje de la carretera escénica Tijuana – Ensenada desde el kilómetro 83+500 hasta el kilómetro 99+500; es por ello, que se vuelve a calcular el valor de $RMSE$, con el fin de corroborar la veracidad de ambos modelos de caudales, específicamente para validar el modelo generado con el método de superposición difusa ponderada (*Fuzzy – WOM*). Tomando en cuenta las interpolaciones al centro de la carretera escénica.

El resultado del cálculo de $RMSE$ para los gastos Q_e (estimado manualmente por la fórmula de Darcy) y Q_a (calculado mediante el método *Fuzzy – WOM*) a lo largo de la carretera escénica Tijuana – Ensenada desde el kilómetro 83+500 hasta el 99+500, da un valor de 1.882 m³/d, que es el mismo valor que para el $RMSE$ calculado para cada uno de los puntos de control piezométricos al centro de las 36 redes de flujo de la Bahía Salsipuedes. Lo que indica el que modelo por el método *Fuzzy – WOM* es correcto. De igual manera, si se grafican los valores de gastos Q_e contra Q_a , a lo largo de la carretera escénica (km 83+500 – 99+500), se obtiene la gráfica de distribución prácticamente lineal con un R^2 de 0.9999, que indica que la recta se ajusta casi perfectamente con un error mínimo en ambos modelos, marcando una precisión elevada. Véase **Figura 8.17**.

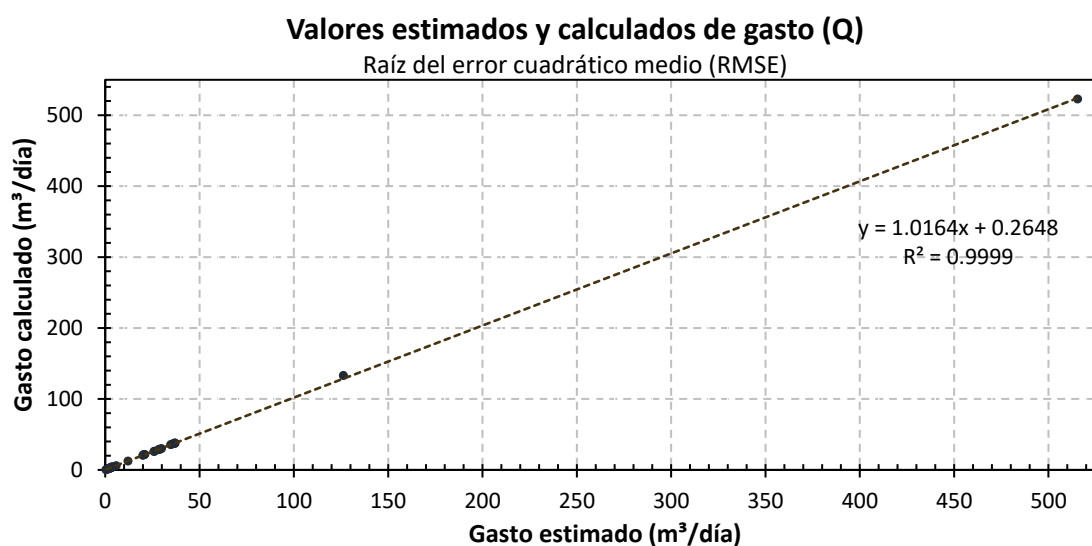


Figura 8.17. Relación de valores gasto Q_e y Q_a en la carretera escénica Tijuana – Ensenada (km 83+500 – 99+500) en el cálculo $RMSE$.

8.5 Riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes

Para la determinación del riesgo geohidrológico de la Bahía Salsipuedes fue necesario hacer la valoración de tres variables indispensables en el cálculo de cualquier tipo de riesgo, las cuales son: amenaza, exposición y vulnerabilidad.

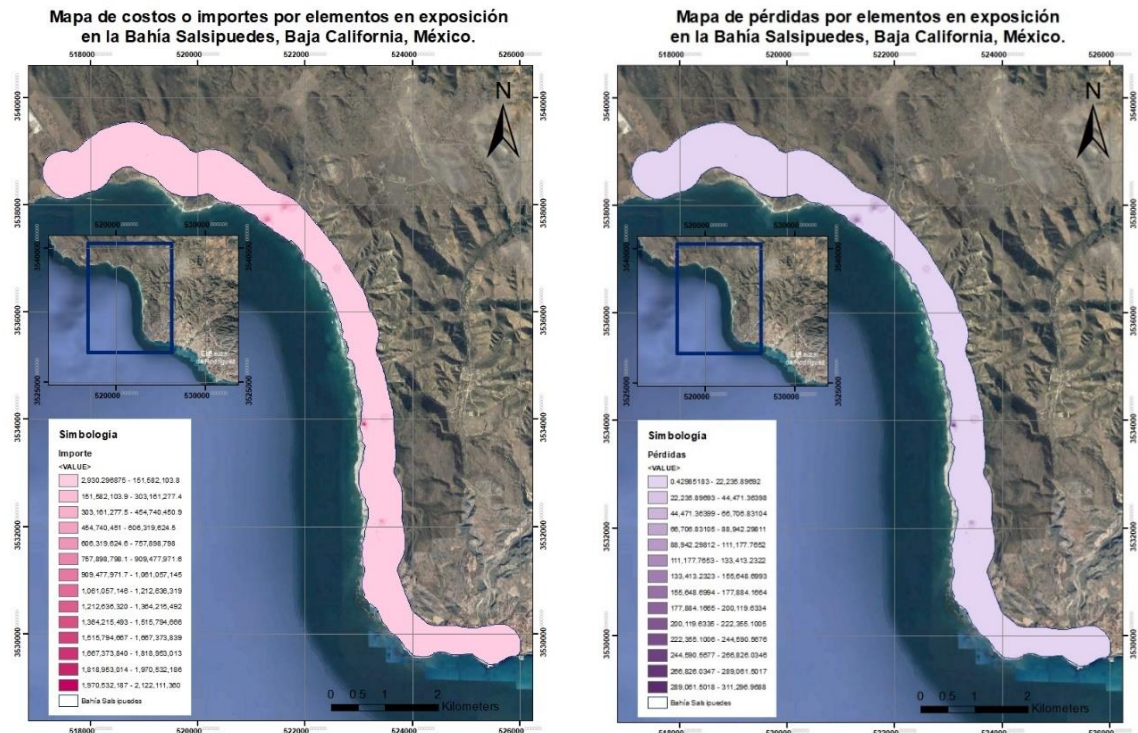
El factor amenaza en el riesgo geohidrológico es la probabilidad de desplazamiento de tierras por acción de agua subterránea y queda representado principalmente por el modelo *IDW* de niveles piezométricos medios, que como se puede ver en la **Figura 7.27**, es más elevado (zonas denotadas en azul oscuro) en sitios donde predominan las rocas con porosidades efectivas menores, es decir al noroeste de la bahía, donde se encuentran las andesitas y basaltos. Mientras que, en zonas más permeables, al sureste, los niveles piezométricos son menores debido a la presencia de areniscas y conglomerados.

El modelo de niveles piezométricos medios por el método *IDW*, se reclasifica con base en el criterio que indica que las zonas de mayor amenaza son aquellas con niveles piezométricos menores a los 90 mca, quedando el modelo reclasificado como el que se muestra en la **Figura 7.53**, de la sección *Metodología – Análisis de riesgo geohidrológico – Reclasificación de modelos*. En dicha Figura se observa que efectivamente las zonas correspondientes a los niveles piezométricos más elevados quedan descartadas del análisis multicriterio, dejando aproximadamente disponible a utilizar en el análisis la zona desde el kilómetro 87+000 hasta el 99+000 en cadenamiento de la carretera escénica.

El factor exposición se representa por todos los elementos construidos en la Bahía Salsipuedes que pueden sufrir un daño o pérdida por acción de la amenaza. La exposición, por lo tanto, se evalúa en dos aspectos, importe o costo y pérdida (por cada elemento en exposición). El modelo de costo o importe de cada elemento en exposición está muy disperso a lo largo de la Bahía Salsipuedes.

Como se observa en la **Figura 8.18**, en el mapa de importes, la mayor parte de la superficie comprendida por la Bahía Salsipuedes no cuenta con suficientes elementos en exposición, ya que el modelo indica en tonalidades rosa claro las zonas con importes menores a los \$10,000.00 pesos mexicanos (M.N.), y, por lo tanto, denotar que esas zonas cuentan con pocos elementos que generen un importe mayor a esa cantidad. También se destacan zonas o puntos en tonalidades rosa oscuro, que corresponden directamente a los sitios que se consideran inestables por parte de la SCT y CAPUFE, donde se han hecho proyectos de emergencia técnica previamente, construyendo una serie de elementos estructurales e hidráulicos que permiten mantener controlados geotécnica e hidráulicamente esos lugares, tales como: bermas, galerías drenantes, pedraplenes, sobreanchos, trincheras y pozos estabilizadores; en los sitios del kilómetro 88+000, 89-90+000, 91+000, 93+000 y 94+000.

Ahora bien, si se habla de pérdidas, se puede ver la **Figura 8.18**, siguen un comportamiento similar al de los importes, es decir, ubicando las zonas de pérdidas elevadas (denotadas en puntos con tonalidades morado oscuro en la **Figura 8.18** parte derecha), donde se han realizado previamente proyectos de emergencia técnica para estabilización del sitio, con presencia de pedraplenes, galerías drenantes, bermas, trincheras o pozos, que son los elementos más costosos y generando pérdidas mayores, tales sitios son los ubicados en los kilómetros 88+000, 89-90+000, 91+000, 93+000 y 94+000, que coinciden con los de importes mayores.



Además, en la geología se toman en cuenta la zona de fallas normales y fracturas, es por ello que existe un modelo de fallas geológicas reclasificadas donde el criterio es que las zonas cercanas a las fallas o a no más de 200 metros de distancia son consideradas como zonas vulnerables, es por ello que se denota la zona superior comprendida en el kilómetro 98-99+000 como vulnerable, como se puede ver en la **Figura 7.54** (parte izquierda), de la sección *Metodología – Analisis de riesgo geohidrológico – Reclasificación de modelos*.

En el caso del derecho de vía, se reclasifica mediante el criterio de que es zona vulnerable aquella que se encuentre a una distancia menor a 300 metros del eje de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, lo que marca en tonalidad verde toda aquella zona vulnerable desde el kilómetro 83+000 hasta el 99+000, como se puede observar en la **Figura 7.54** (parte derecha), de la sección *Metodología – Analisis de riesgo geohidrológico – Reclasificación de modelos*.

En cuanto al factor de calificación de vulnerabilidad, este es un valor que se da en una escala de 0 a 4, donde 4 representa un daño irreparable en el elemento en exposición. Las calificaciones de vulnerabilidad mayores a 3 son las que se consideran para reclasificación, lo que da el modelo de vulnerabilidad reclasificado que aparece en la **Figura 7.55**, de la sección *Metodología – Analisis de riesgo geohidrológico – Reclasificación de modelos*. Este modelo indica que las zonas más vulnerables (denotadas en color morado) corresponden también a las zonas donde se realizaron previamente proyectos de emergencia técnica, con la presencia de los elementos en exposición con importes y pérdidas mayores (bermas, galerías drenantes, pedraplenes, trincheras o pozos), los cuales corresponden a los sitios de los kilómetros 88+000, 89-90+000, 91+000, 93+000 y 94+000.

El producto del análisis multicriterio, es decir, la multiplicación de los tres factores de riesgo (niveles piezométricos, importes, pérdidas, geología de rocas, fallas geológicas, derecho de vía y calificación de vulnerabilidad), hace posible la visualización de los sitios con riesgo de la Bahía Salsipuedes, véase la **Figura 7.58**. En dicho mapa, se denota que los sitios de mayor riesgo geohidrológico se encuentran marcados en color verde y son los correspondientes a los kilómetros 91+500 – 92+000 (parte superior), 93+000 y 94+700 – 95+300.

En el caso del sitio de riesgo geohidrológico marcado entre los kilómetros 91+500 – 92+000, se puede observar que se encuentra alejado de la playa, carretera escénica y prácticamente en la parte superior de la bahía, casi llegando la meseta que se forma en los cerros que rodean la zona de estudio. Esa zona se marcó como de alto riesgo geohidrológico porque el conjunto de sus factores así lo determinó, es decir, tiene un nivel piezométrico menor a 90 mca, se encuentra sobre rocas aluviales, areniscas y conglomerados, alejado de la carretera y fallas geológicas, además de que sus elementos en exposición tienen grandes importes, pérdidas y calificaciones de vulnerabilidad. El principal elemento en exposición en esa zona es el restaurante “Cuatro Cuatros” que se cataloga como construcción varia.

Esta zona comprendida entre el kilómetro 91+500 hasta el kilómetro 92+800 no cuenta con proyectos previos de emergencia técnica, y actualmente la SCT y CAPUFE están trabajando en la construcción de anclas de sujeción en los taludes escarpados que permitan contener el movimiento de tierras hacia lado mar, permitiendo una estabilidad momentánea. Lo cual no parece la mejor solución, ya que la tensión ejercida por cada ancla, si bien estabiliza el suelo, no alivia el flujo de agua subterránea y sub – superficial, que a la larga generarán nuevos empujes hidrostáticos y deslizamiento de tierras.

Para el caso de la zona de riesgo geohidrológico del kilómetro 93+000, se sombrea en verde (véase **Figura 7.58**) prácticamente la zona donde se encuentran las bermas, galería drenante y pedraplén de ese kilómetro, es decir, donde ya se realizaron trabajos de estabilización debido al derrumbe del 28 de diciembre de 2013.

El factor de relevancia en esta zona son las pérdidas diarias que pueden ocurrir si este sitio volviera a colapsar, teniendo pérdidas de hasta \$372,460.40 pesos mexicanos al día (M.N./día) en el caso del pedraplén ubicado en esa zona, o de \$110,624.65 pesos mexicanos al día (M.N./día) para la galería drenante; siendo ambos elementos en exposición de los más costosos en la Bahía Salsipuedes, estando el pedraplén en primer lugar con un costo (importe) aproximado de \$2,539'062,500.00 pesos mexicanos (M.N.) y la galería drenante en cuarto lugar con un costo de \$754'128,233.20 pesos mexicanos (M.N.); el segundo y tercer lugar corresponden a la galería y el pedraplén del kilómetro 88+600-650 con un costo de \$840'335,014.90 pesos mexicanos (M.N.) y \$1,117'187,500.00 pesos mexicanos (M.N.) respectivamente.

Para el caso de la zona de riesgo geohidrológico del kilómetro 94+700 – 95+300, ocurre algo similar a la del kilómetro 93+000, ya que en este sitio también se hizo previamente un proyecto de emergencia técnica que incluye la construcción de bermas, tres trincheras y una galería drenante en geometría “Y”.

El factor de relevancia, o lo que propició que se marcara esta zona gracias al análisis multicriterio del álgebra de mapas de *ArcMap 10.3* fueron también las pérdidas diarias por elemento en exposición, teniendo este kilómetro o sitio inestable una pérdida máxima de \$109,455.70 pesos mexicanos al día (M.N./día), correspondiente al quinto elemento en exposición más costoso de la Bahía Salsipuedes, la galería drenante en geometría “Y” con un costo (importe) de \$746'159,539.10 pesos mexicanos (M.N.); además de pérdidas diarias entre \$30,000.00 a \$40,000.00 pesos mexicanos (M.N.) correspondientes a las tres trincheras estabilizadoras de ese sitio.

Si se realiza una comparativa entre las pérdidas diarias por elemento en exposición y su calificación de vulnerabilidad estructural, tomando como eje principal la ubicación de los elementos con respecto al cadenamiento de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (desde el kilómetro 83+590 donde se encuentra la primera alcantarilla hasta el kilómetro 99+100 en el que se localiza el puente “El Carmen”), se puede obtener la gráfica de la **Figura 8.19**.

En la **Figura 8.19**, se puede observar que las principales pérdidas (histogramas azules) corresponden a los picos más altos en la serie de calificaciones de vulnerabilidad (línea café), es decir, que las pérdidas y vulnerabilidad tienen una relación, mientras las calificaciones de vulnerabilidad sean mayores a 3 en escala, los elementos en exposición tienen pérdidas mayores a \$30,000.00 pesos mexicanos (M.N.).

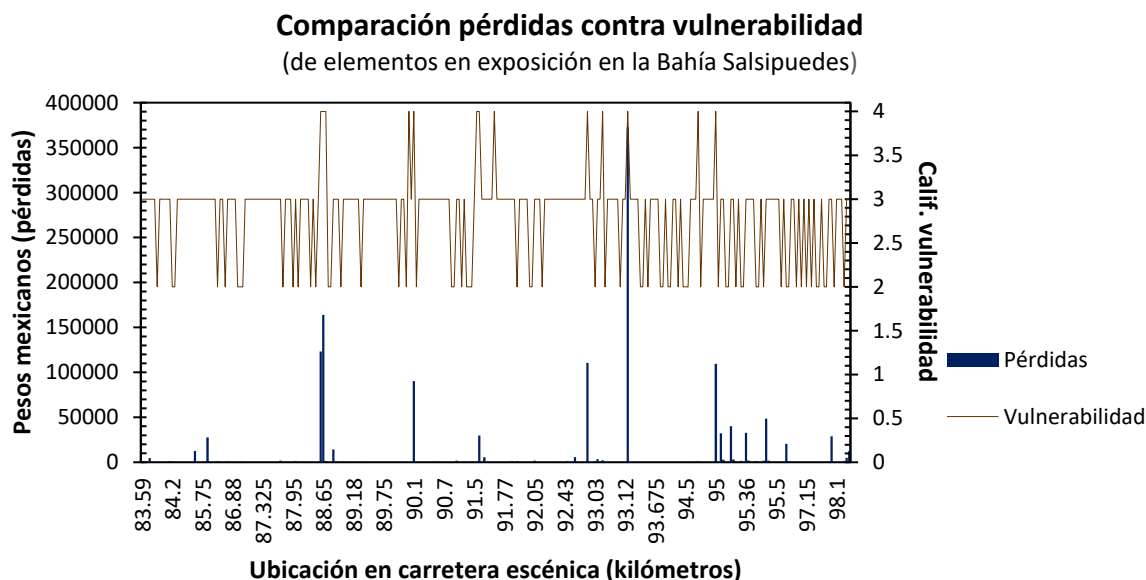


Figura 8.19. Comparativa entre pérdidas diarias y calificación de vulnerabilidad por cada elemento en exposición en la Bahía Salsipuedes.

La relación pérdidas – vulnerabilidad es de suma importancia al momento de determinar los sitios de riesgo, dando como resultado el kilómetro 88+600, 90+100, 91+500, 93+000-120, 94+700 – 95+300, si se aplicaran únicamente estos dos factores. Pero la geología y niveles piezométricos juegan un papel determinante, de ahí el nombre de riesgo geohidrológico, ya que por estos factores (geológico e hidráulico) se descartan sitios como los kilómetros 88+600 y 90+100, que por estar sobre zonas de materiales como andesitas o basaltos, con altos niveles piezométricos, o incluso una combinación de ambos escenarios, no fueron consideradas zonas de riesgo geohidrológico; dando origen únicamente a las zonas comprendidas en el kilómetro 91+500 – 92+000, 93+000 y 94+700 – 95+300.

8.6 Distribución de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes

Para llevar a cabo la distribución idónea de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes, se utiliza nuevamente un análisis multicriterio que permita multiplicar factores entre capas de información. Dichas capas de información en formato ráster corresponden a tres rubros de interés para la proyección de una galería drenante, los cuales son: la topografía, la geología y la geohidrología.

En el aspecto topográfico, el modelo digital de elevaciones es la principal y única fuente de información para el análisis multicriterio, como se mencionó en la sección de *Metodología – Análisis multicriterio para ubicación de obras hidráulicas (galerías drenantes) – Reclasificación de modelos*, la bibliografía indica que la construcción y proyección de galerías drenantes debe ser en elevaciones menores a los 100 msnm cercanas a la costa, o en zona de valles; es por ello que se realiza la reclasificación del modelo digital de elevaciones y este nuevo modelo indica que la zona noroeste de la bahía sólo tiene una pequeña porción de playa la cual es aceptable para la construcción de galerías, mientras que la región central y sureste de la Bahía Salsipuedes es completamente apta para este fin, como se puede ver en la **Figura 7.65** (superior izquierda), denotadas las zonas óptimas en tono verde claro.

En el aspecto geológico, los fundamentos clave para el análisis multicriterio fueron la geología de rocas y de fallas, cada una con sus respectivos modelos digitales. La reclasificación aplicó los mismos criterios que para el análisis de riesgo, es decir, para la geología de rocas se indica que la zona óptima para la construcción de galerías es donde se encuentren depositadas rocas tales como aluviales, areniscas, conglomerados o lutitas, que van de la mano de las propiedades geohidrológicas favorables. En el mapa de la **Figura 7.65** (superior derecha) se puede observar en color verde las zonas geológicas óptimas para proyección de galería drenante, desde el kilómetro 92+000 hasta el 99+000, despreciando únicamente algunas secciones de playa entre los kilómetros 92+000 – 96+000 y la zona noroeste de la bahía en su totalidad.

En cuanto a las fallas normales y fracturas, las galerías deben estar alejadas de estas por lo menos 200 metros lineales en distancia euclidiana, como se muestra en la **Figura 7.65** (inferior izquierda) con color verde, dando como resultado dos zonas en la frontera este y sureste de la Bahía Salsipuedes, a la altura de los kilómetros 94+000 – 95+000 y 97+000 – 98+000. Es por ello que los modelos de reclasificación fueron idénticos a los de la sección de *Riesgo geohidrológico*.

El último rubro del análisis multicriterio es el correspondiente a la geohidrología de la zona, para ello intervienen cuatro factores de suma importancia: la conductividad hidráulica, la porosidad efectiva, el caudal o gasto hidráulico y el nivel piezométrico medio.

El modelo de conductividad hidráulica se reclasificó mediante el criterio que indica que las galerías drenantes se deben proyectar en zonas donde los valores de K sean entre 0.0008 a 0.01 m/d, como se puede observar en la **Figura 7.65** (inferior derecha). Dichos valores corresponden a rocas como aluviales, areniscas y conglomerados, es por ello que en el mapa se puede observar que la zona óptima por este criterio es la comprendida desde el kilómetro 92+000 hasta el 93+500 de la Bahía Salsipuedes, en todo su ancho.

La reclasificación de la porosidad efectiva se hizo con el criterio que manifiesta que las galerías drenantes se deben construir en rocas con una porosidad efectiva entre 0.10% y 0.15%, esto da como resultado la **Figura 7.66** (parte izquierda), donde se denota que la zona noroeste de la bahía, desde el kilómetro 83+000 hasta el kilómetro 91+800 corresponden a valores menores a ese criterio, los cuales corresponden a rocas ígneas más compactas como lo son las andesitas y los basaltos. Mientras que la zona central y sureste de la bahía (kilómetro 92+000 hasta 99+000) corresponden a rocas como areniscas, aluviales y conglomerados que son rocas metamórficas menos compactas y por lo tanto más porosas.

En cuanto a la reclasificación del modelo de niveles piezométricos medios, se siguió el mismo criterio que para el cálculo del riesgo geohidrológico, es decir, que las zonas donde los niveles piezométricos sean menores a 90 mca son las aptas para la construcción de galerías, esto se debe a que el nivel piezométrico está más cercano al nivel del mar y por lo tanto flujo hacia el océano será más fácil e incluso predominante. Las zonas en morado del mapa de la **Figura 7.67**, son las idóneas y quedan desde finales del kilómetro 87 (87+900) hasta el kilómetro 99+100

El último factor geohidrológico, y en general, para el análisis multicriterio es la reclasificación del modelo de caudales o gastos hidráulicos, para la cual se utilizó el criterio de 20 m³/d como mínimo para delimitar las zonas ideales para la construcción o proyecto de galerías drenantes, el resultado se ve en la **Figura 7.66** (parte derecha), donde se observa que la zona noroeste y hasta la zona

central en el kilómetro 91+900 corresponden a niveles piezométricos menores a los 20 metros cúbicos diarios, mientras que a partir del kilómetro 92+000 y hasta el kilómetro 99+100, los caudales son mayores, específicamente en el kilómetro 92, propiciado el flujo adecuado entre estratos porosos hasta una posible galería que desemboque al mar.

El análisis multicriterio se generó por la multiplicación de capas reclasificadas por cada una de las condiciones o criterios mencionados anteriormente (topografía, geología de rocas, fallas geológicas, conductividad hidráulica, porosidad efectiva, caudal y nivel piezométrico medio), dando como resultado la **Figura 7.70**, en la cual se muestran específicamente 4 zonas en color azul que manifiestan la necesidad de construcción de una galería drenante.

Las cuatro zonas quedan en la parte central de la Bahía Salsipuedes, por lo que si se hace un acercamiento al mapa desde el kilómetro 90 al 94, quedaría como se muestra en la **Figura 8.20**; la primera es una forma irregular de 750 metros de largo aproximadamente, que va desde el kilómetro 92+100 hasta el kilómetro 92+850, con anchos variables; la segunda también es una forma irregular, y tiene aproximadamente 350 metros de longitud con ancho variable, se encuentra desde el kilómetro 92+900 hasta el kilómetro 93+250.

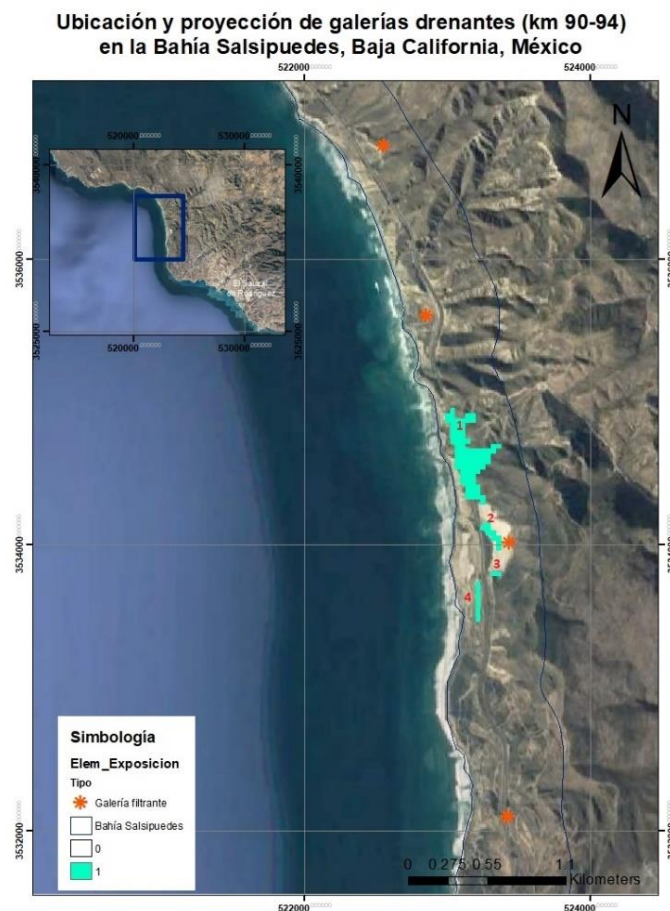


Figura 8.20. Acercamiento a zonas de ubicación y proyección de galerías drenantes (km 90 – 94).

La tercera zona de ubicación de galerías es de forma tentativamente ovalada con una longitud de 80 metros en eje mayor y 50 metros de eje menor, aproximadamente, que va desde el kilómetro

93+300 hasta el kilómetro 93+350. Por último, la zona en el kilómetro 93+500 de forma rectangular (desde el km 93+450 hasta km 93+730), con aproximadamente 280 metros de longitud y ancho variable. Como se muestra en la siguiente **Tabla 8.2**.

Tabla 8.2. Zonas de ubicación de galerías drenantes en Bahía Salsipuedes.

Zona	Cadenamiento (Km)	Ancho (m)	Longitud (m)	Superficie (Km ²)	Relación porcentual de superficie en B.H.* (%)
1	92+100 - 92+850	130 - 325	750	0.090	0.258%
2	92+900 - 93+250	40 - 80	350	0.012	0.033%
3	93+300 - 93+350	40 - 50	80	0.004	0.010%
4	93+450 - 93+730	40 - 50	280	0.011	0.030%
				Total	0.332%

*Bahía Salsipuedes con 35 km² de superficie aproximada.

Como se puede observar en la **Tabla 8.2**, las cuatro zonas donde se requiere la construcción o proyecto de galerías drenantes están dentro de los kilómetros 92 y 93 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada. La relación porcentual total en superficie dice que el 0.332% del área total de la Bahía Salsipuedes (35 kilómetros cuadrados aproximadamente) requieren de la proyección de una galería drenante en la actualidad, según los datos recabados hasta diciembre de 2021.

Siendo el kilómetro 92 (desde el cadenamiento 92+100 hasta 92+900) el más necesario, con una relación porcentual de 0.258%. En segundo orden quedan las zonas ubicadas en el kilómetro 93, las cuales abarcan dos sitios de inestabilidad (km 93+000 y 93+500), con relaciones porcentuales menores a 0.033%.

Cabe mencionar que en el kilómetro 93+000, como se ha mencionado en apartados anteriores (*Marco teórico*), se construyó una galería drenante de sección abovedada de casi un kilómetro de longitud con geometría de herradura, debido a los acontecimientos del 28 de diciembre de 2013 y como medida de mitigación de deslizamientos de tierra por acción de aguas subterráneas; es por ello que, aunque las zonas 2, 3 y 4 de la **Tabla 8.2** y **Figura 8.20**, aparezcan como necesarias para la construcción de una galería drenante, se descartan por la existencia de una funcional en la actualidad, que tiene un aforo de 15 a 20 m³ por día.

Por lo que se corrobora que la zona 1, correspondiente al kilómetro 92 (específicamente el kilómetro 92+500), es la más idónea para colocar una galería drenante, con base en los 7 criterios del análisis (topografía, geología de rocas, fallas geológicas, conductividad hidráulica, porosidad efectiva, caudal y nivel piezométrico medio).

8.6.1 Proyección galería drenante kilómetro 92+500

Por la distribución y forma irregular en la zona 1, es necesario que la galería a proyectar en el kilómetro 92+500 tenga una geometría en forma de herradura, como la de la galería drenante del kilómetro 93.

La longitud de la herradura puede ser variable, pero debe abarcar la mayor parte de la zona 1 (zona color azul, ver **Figura 8.21**), que es aproximadamente la mitad de la longitud de la galería del

kilómetro 93, entonces la galería en el kilómetro 92+500 debe estar entre los 400 a 500 metros de largo con una pendiente del 2% del centro de la herradura hacia los portales norte y sur (salidas/entradas). La herradura debe comenzar en el portal norte (P.N.) que se localizará en el kilómetro 92+200 aproximadamente y terminar en el portal sur (P.S.), ubicado entre los cadenamientos 92+600 – 700.

En cuanto a la sección, esta puede ser abovedada, circular, o mixta, la única condición que debe cumplir es que garantice un drenaje correcto del flujo base o caudal sub – superficial de los estratos permeables, con un caudal diario de más de 500 metros cúbicos, dando un espectro de 3.45 metros como diámetro mínimo.

Por la geología de la zona, que tiene base de areniscas con conglomerados y aluviales empacados en arena y arcilla, es correcto que se coloquen drenes de penetración a cada 15 metros en longitud del eje de la galería, con la finalidad de aliviar esos más de 500 metros cúbicos diarios de flujo base en el kilómetro 92+500.

Los drenes pueden ser de diámetros varios, esta característica depende directamente de la ubicación del dren en el eje de la galería, ya que dependiendo esa ubicación el caudal puede variar y por lo tanto la determinación del diámetro hidráulico correcto para cada dren, véase el apartado de *Resultados y discusiones – Modelo conceptual del km 92+500*. Para garantizar ese alivio de caudales en los estratos permeables del kilómetro 92+500, es posible que en cada hilera de drenes vayan de 3 a 5 en abanico.

Por la topografía de la zona (km 92+500), los drenes tendrán longitudes de 15 metros en los primeros 110 metros a las entradas de los portales norte y sur de la galería. Mientras que, para la sección media de la herradura, los drenes tendrán longitudes de 30 metros. Esto debido a que se pretende que los drenes no sobresalgan a nivel de terreno natural. También se debe especificar que los drenes deberán ser ranurados dependiendo la porosidad efectiva de los estratos.

La galería proyectada para el kilómetro 92+500 se puede ver en la **Figura 8.21**, donde además se muestra en planta la galería del kilómetro 93+000 (línea color magenta), así como las zonas de ubicación del análisis multicriterio (color azul), para tener una referencia clara de dónde tiene que pasar la galería proyectada (línea color naranja). A manera de esbozo, se marca el perfil del modelo conceptual del km 92+500, que se presentará en el siguiente apartado.

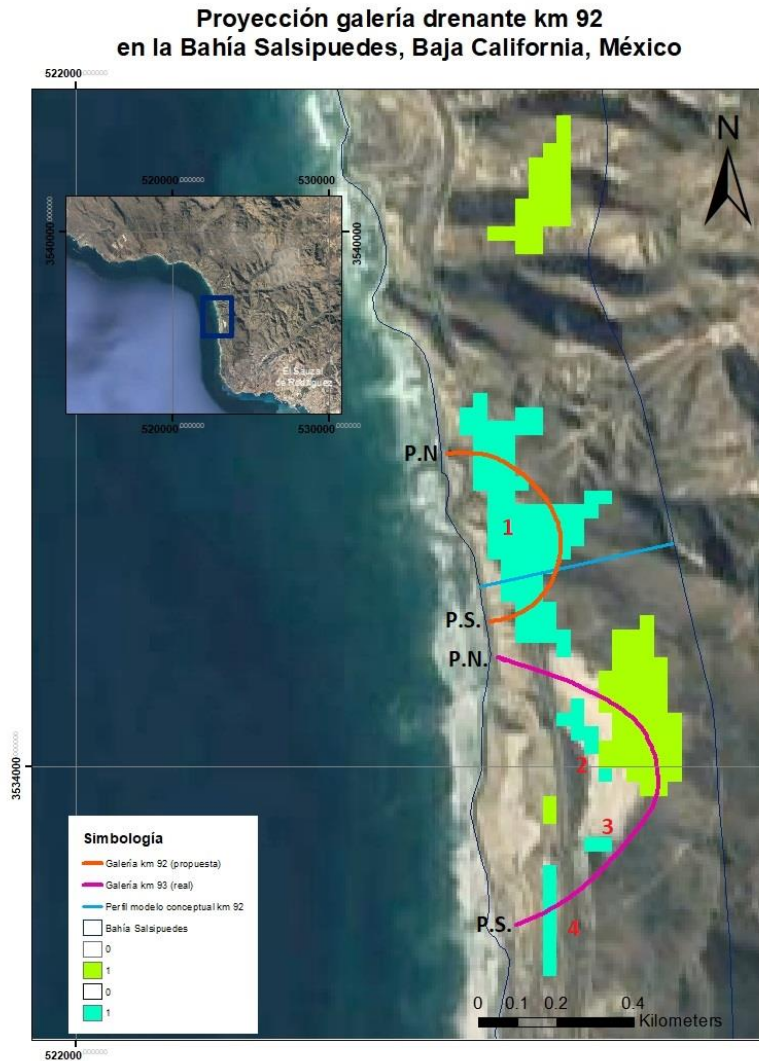


Figura 8.21. Proyección de galería drenante en el kilómetro 92+500 de la Bahía Salsipuedes.

8.7 Modelo conceptual del km 92+500

Para la generación del modelo conceptual se localizó el sitio de mayor interés por su inestabilidad estructural debido a la acción del agua subterránea y sub – superficial, el cual resultó ser el kilómetro 92+500 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada que atraviesa la Bahía Salsipuedes.

El modelo conceptual del kilómetro 92+500 es un perfil topográfico con información que permite representar de manera fácil y esquemática el comportamiento geológico, geofísico y geohidrológico del sitio de estudio, además muestra la relación entre estos factores.

Como se vio en la sección de *Metodología – Modelo conceptual*, este esquema es de gran utilidad en trabajos de campo y presentaciones, ya que sintetiza todos los conceptos, comportamientos y parámetros importantes de una zona específica de estudio. El modelo conceptual del kilómetro 92+500 se representa en la **Figura 7.79**, de la sección mencionada de *Metodología – Modelo conceptual*.

En la **Figura 7.79**, se puede observar un perfil donde el lado continente queda a la izquierda y el lado mar a la derecha, por su topografía se puede decir que la zona más alta del kilómetro 92+500 está sobre de la cota 150 msnm, mientras que la zona más baja llega a la cota 0 msnm. Es por ello que se considera como una zona escarpada y de pendientes elevadas, las cuales rondan entre los 37 a 45° con respecto al nivel del mar que, a su vez, favorecen los escurrimientos superficiales ocasionados por las precipitaciones invernales.

En cuanto a su geología, según las estratigrafías de las muestras obtenidas en los sondeos de método *Wire – Line*, es decir, los sondeos *WL – 01* y *WL – 02* del kilómetro 92 (nombre general que se le da al sitio inestable por parte de la dependencia de gobierno), se tiene que la parte superior consta de un estrato de 2 a 10 metros de espesor formado por aluviales sub – angulosas con tamaños de 2 a 6 centímetros, la mayoría empacadas en arenas amarillas finas.

Después de los 10 metros de excavación a partir del nivel de terreno natural, es posible visualizar un estrato de lutitas con una coloración gris clara, altamente fracturadas y moderadamente consolidadas, este estrato tiene un espesor promedio de 8 metros, aunque es variable y de menor ancho conforme se acerca a lado mar.

A partir de los 15 a 18 metros y hasta los 60 metros de profundidad se encuentra el estrato de areniscas de grano medio a fino con coloraciones grises claras, las cuales son muy deleznales, es decir, que tienen muy poca compactación, por lo tanto, se encuentran completamente saturadas, este estrato tiene un ancho variable que va desde los 40 hasta los 45 metros de espesor, viéndose disminuido en la zona de acantilados cercanos al mar.

Por último, la roca base del kilómetro 92+500 es el conglomerado, que se encuentra a partir de los 60 metros de profundidad y debajo de los 87 metros, que fue la profundidad máxima de excavación en el sondeo *WL – 01 – Km 92*. El conglomerado es del tipo polimíctico en matriz arenosa de grano medio con clastos pequeños.

Ahora bien, por los estudios geofísicos realizados en la zona (refracción sísmica), es posible visualizar isolíneas de velocidad de onda sísmica las cuales van desde los 490 m/s hasta los 4,400 m/s. Según el tipo de material localizado, corresponden el rango de velocidades de onda sísmica P, por ejemplo, para los aluviales el valor de velocidad de onda sísmica P promedio es de 490 m/s, para las lutitas fracturadas corresponde un valor de 1,300 m/s, en el caso las areniscas el valor aumenta a 2,200 m/s en promedio, mientras que para los conglomerados los valores promedio rondan en los 4,400 m/s. En el caso de las areniscas, normalmente su valor es menor al registrado, el aumento del valor de velocidad de onda sísmica se debe a la presencia de agua, es decir, la saturación del medio arenoso.

En cuanto a las propiedades geotécnicas referenciadas a los tipos de rocas o materiales localizados en los estratos del kilómetro 92+500, se puede decir que, los valores de cohesión más elevados se encuentran en el estrato de areniscas con valores promedio de 7.50 ton/m², los cuales se deben principalmente a la presencia de agua subterránea; mientras que los valores más bajos están en los conglomerados y aluviales con valores entre los 2.50 a 3.50 ton/m², haciendo posible que las rocas menos cohesivas hagan una especie de frontera que contiene el flujo de agua subterránea en el estrato de areniscas, en un tipo de acuífero pequeño. Los ángulos de fricción interna de los

materiales registrados (conglomerados, areniscas, lutitas y aluviales) rondan los 26 a 36°, lo que hace relación con la topografía del sitio y su ángulo de deposición en los taludes.

Por otro lado, la geohidrología en el kilómetro 92+500 está determinada por la infiltración de agua proveniente de los escurrimientos de temporada ocasionados por las precipitaciones invernales. En las zonas donde hay arrastre de sedimentos, cauces de escurrimientos y valles es más posible que se lleve a cabo el fenómeno de la infiltración de agua al sub – suelo, como se ve en las flechas azules de la **Figura 7.79**.

Una vez infiltrada, estabilizada y depositada el agua en un estrato, en este caso el correspondiente a las areniscas, es posible medir el nivel piezométrico. En el caso del kilómetro 92+500, se encuentran dos tubos de observación funcionales, los cuales son: el *TO – 01 – 92* y el *TO – 02 – 92*, el primero registra el nivel freático a 41.59 msnm, mientras que el segundo a 12.86 msnm; lo que hace que el nivel piezométrico sea casi linealmente descendente de lado continente a mar, pero al pasar el cruce de la carretera escénica Tijuana – Ensenada (Línea magenta en la **Figura 7.79**) este nivel cae abruptamente, y coincide con la oscilación evidente en una isolínea de velocidad de onda sísmica P (2,000 m/s). La razón por la cual esta situación ocurre se puede deber a dos opciones, primero la cercanía con la playa, que es donde desemboca la mayor parte del flujo base que está en el estrato de areniscas, o segundo, a la presencia de fallas geológicas, grietas o fracturas que permiten el alivio de caudales; haciendo que los niveles disminuyan de manera escabrosa.

La presencia de local (únicamente en el kilómetro 92+500) de fallas, fracturas tectónicas y trazas de deslizamiento de tierras, hace posible que por ellas se conduzca el flujo base o caudal almacenado en los estratos con porosidades efectivas y conductividades hidráulicas elevadas.

Debido a la gran porosidad efectiva de los aluviales, areniscas y conglomerados, que a su vez se encuentran bien interconectadas poro a poro, se origina una conductividad hidráulica mayor, y a su vez, la presencia de flujo de agua subterránea o sub – superficial en dichos materiales; siendo la mayor concentración de isolíneas de caudal en el kilómetro 92+500, con valores desde los 260 m³/d a profundidades mayores de 87 metros en el estrato de conglomerados, pasando por el estrato de areniscas con valores entre los 300 a 400 m³/d, hasta llegar a los aluviales donde las isolíneas de caudal sobrepasan los 460 m³/d.

Todo ese flujo sub – superficial o caudal, no necesariamente es almacenado en un acuífero, encharcamiento o bolsón subterráneo, sino que desemboca al mar por medio de los agrietamientos y fracturas locales de la zona. Muchas de estas fracturas se encuentran en el lecho marino, aproximadamente a unos 30 a 40 metros desde la línea de playa.

El agua fluye por los estratos porosos y con conductividades hidráulicas elevadas por acción de la gravedad hacia los centros de las redes de flujo, una vez ahí, el agua se encuentra con las trazas de deslizamiento, fallas, fracturas o agrietamientos, que hacen posible un flujo de mayor velocidad, no hacia un acuífero, sino hacia el mar, provocando una especie de fuente o afloramiento del flujo base en el lecho marino. Es ahí donde el agua de la Bahía Salsipuedes va a dar, provocando burbujes, deltas o enturbiamiento del agua marina por coloides de lutitas, areniscas, etc. Como se puede observar en la **Figura 8.22**.



Figura 8.22. Afloramiento de flujo base en el kilómetro 92+500.

Dejando un poco de lado la geología, geofísica y geohidrología, en el modelo conceptual, también se adjunta el dato mensual de deslizamiento de tierras, obtenido del inclinómetro 04 del kilómetro 92+500 que se realizó en el sondeo *WL – 04 – 92*. Este inclinómetro marca un desplazamiento mensual de 3.43 milímetros hacia lado mar, lo que es un valor elevado si se toma como comparación el desplazamiento mensual que registraba el kilómetro 93 cuando ocurrió el desastre del 28 de diciembre de 2013, donde se registraban valores mayores a 4 mm por mes, asentamientos diferenciales de más de 4 centímetros sobre la carretera y grietas de más de 3 centímetros de espesor (TGC & Pelayo C., Informe de monitoreo, 2021).

Este desplazamiento de tierras hacia el mar, que tiene una magnitud mensual considerable se relaciona directamente con el agua subterránea y sub – superficial que se queda en los estratos de suelo o roca y que no llega a ser aflorada en el lecho marino, es por ello la importancia de un mejor alivio de presiones hidrostáticas con ayuda de galerías drenantes, por ejemplo.

8.7.1 Modelo conceptual del km 92+500 con galería proyectada

El kilómetro 92+500, o como se le conoce generalmente el km 92, es un sitio marcado como inestable por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y *CAPUFE*, es por ello que en la actualidad (a la fecha que se escribe este documento en Julio de 2022) se realizan proyectos de estabilización a base de mallas de alta tensión, así como un sistema de anclaje en los taludes escarpados a nivel de playa desde el kilómetro 92+100 hasta el kilómetro 92+700. Las anclas son a base de varillas de acero de 1 a 2 pulgadas de diámetro, con una tensión de 30 toneladas y de 35 metros de longitud, ligadas de manera externa con trabes y cabezales de concreto de alta resistencia, que están representados en color morado en el modelo conceptual, véase **Figura 7.79**.

Estas anclas si cumplen con el objetivo principal que es de contener la masa de tierra ante el desplazamiento, pero no se está atacando el principal motivo del desplazamiento de tierras, el cual

es la acción de aguas subterráneas y sub – superficiales, por lo que independientemente de la construcción del sistema de anclaje en el kilómetro 92+500, que es de gran utilidad, es necesario un sistema de drenaje que alivie las presiones hidrostáticas de la zona de estudio.

Es por ello que la proyección de una galería en forma de herradura de entre 300 a 400 metros de longitud es ideal para evitar posibles eventos de deslizamientos de tierras. Como se vio en el apartado anterior, *Resultados y discusiones – Distribución de galerías drenantes en la Bahía Salsipuedes – Proyección de galería drenante km 92+500*, la galería drenante proyectada debería cumplir con el requerimiento principal de aliviar el agua subterránea localizada principalmente en el estrato de areniscas saturadas. Un bosquejo de lo que podría ser esa galería queda representado en un modelo conceptual actualizado, que se muestra en la **Figura 8.23**, la galería drenante proyectada, representada en color verde, captaría los caudales del estrato de areniscas por medio de drenes de penetración a cada 15 metros desde la entrada en cualquiera de sus portales (norte o sur, al ser en geometría de herradura). Por la topografía los drenes más cercanos a la zona media de la herradura serían de 30 metros de largo, mientras que los cercanos a los portales (110 metros desde cada portal hacia el centro) tendrían un largo de 15 metros.

Los drenes captarían el agua subterránea por acción de la gravedad y esta agua a las salidas de la galería (portales norte y sur) podría ser captada para tratamiento, uso, o bien, simplemente para ser depositada al mar.

Como se muestra en la **Figura 8.23**, la galería debe construirse en el estrato de areniscas, el cual se encuentra ampliamente visible en los taludes escarpados en playa; también se debe considerar que la galería debe estar sobre la base de conglomerados para mayor estabilidad y atravesar las fracturas tectónicas y la traza de deslizamiento, con la finalidad de captar más agua.

La longitud de la galería drenante del kilómetro 92+500 en perfil, está basada principalmente en la condición de que se debe construir una vez encontrado el frente excavación con el estrato de conglomerados, 55 metros más de longitud en la galería, esto para garantizar el cruce con las fracturas tectónicas y traza de deslizamiento.

La longitud de la galería en perfil de la Figura X, es de 210 metros lineales, los cuales corresponden a la distancia euclidiana al centro de la galería (con geometría de herradura) vista desde la planta de la **Figura 8.23**.

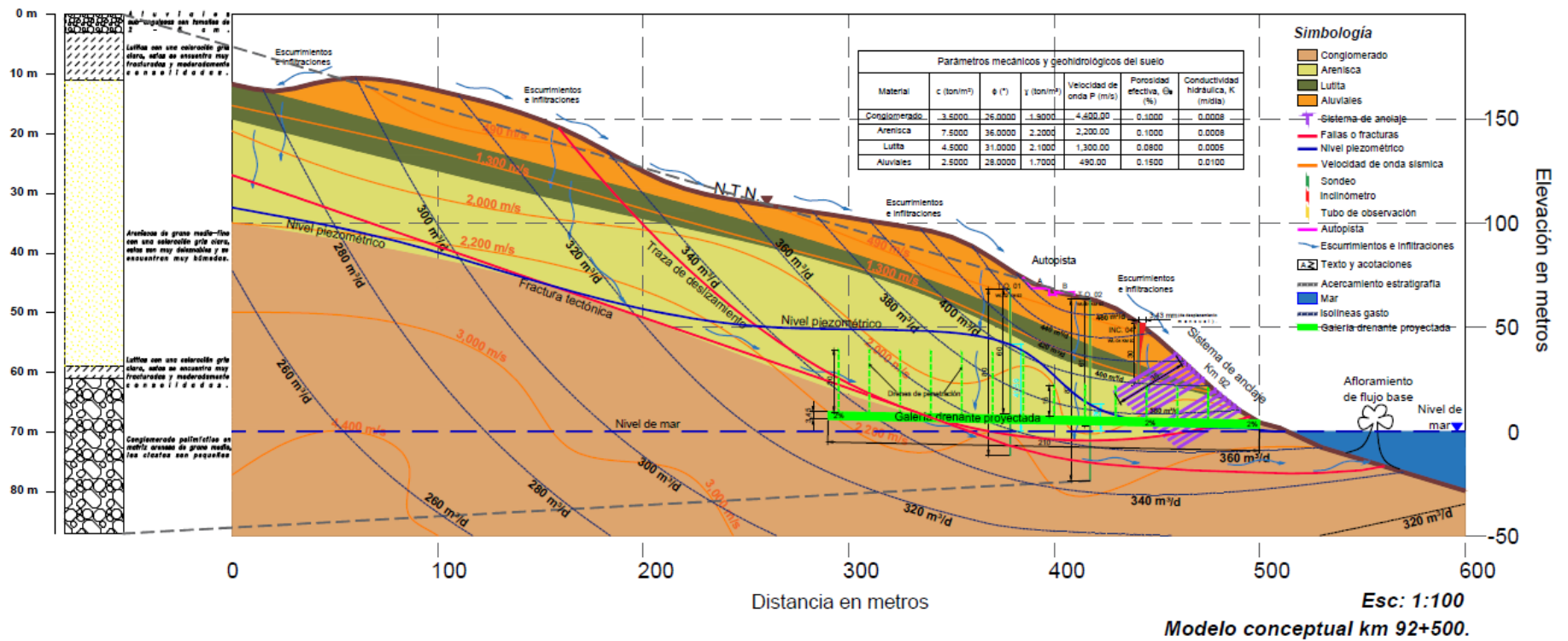


Figura 8.23. Modelo conceptual del kilómetro 92+500, tomando en cuenta la proyección de una galería drenante.

9 CONCLUSIONES

En la revisión bibliográfica realizada con la metodología *PRISMA*, se determinó que los países orientales son los que llevan actualmente la delantera en la investigación del agua subterránea para su uso, captación y tratamiento. Por otro lado, los países occidentales, si bien tienen cierta notoriedad por ser precursores de estos temas, principalmente en Francia, en años recientes han tenido un declive en la investigación. Específicamente en América, los Estados Unidos es el único país presente en la investigación de temas relacionados al agua subterránea y su relación con los deslizamientos de tierras y carreteras; México queda varias décadas atrás, siendo en los años noventa su última aportación importante al respecto.

El estudio del comportamiento del agua subterránea en México es un tema poco estudiado en la bibliografía actual, y específicamente en la región noroeste del país donde se ubica la zona conocida como la Bahía Salsipuedes, dentro del municipio de Ensenada en el estado de Baja California. En esta zona predomina un clima frío semiárido mediterráneo con lluvias invernales y formaciones geológicas costeras con presencia de areniscas, lutitas, conglomerados y aluviales que propician la infiltración y flujo del agua a través de sus estratos.

La presencia de agua subterránea y sub – superficial en la Bahía Salsipuedes es incuestionable, si bien los meses de abril mayo y junio, posteriores a la temporada de lluvias invernales son los que presentan un alza en el nivel piezométrico, la Bahía Salsipuedes se encuentra saturada en sus estratos permeables durante todo el año, es decir, los estratos correspondientes a rocas tales como areniscas, lutitas, aluviales y conglomerados.

De la instrumentación piezométrica instalada en la Bahía Salsipuedes fue posible obtener datos de niveles piezométricos con los que se determinaron 36 redes de flujo sub – superficial. La distribución de esas redes de flujo en la Bahía Salsipuedes está en función de la densidad de instrumentación colocada en los sitios específicos denominados como inestables por la *SCT* y *CAPUFE*, es decir, a mayor cantidad de instrumentación piezométrica instalada, mayor cantidad de redes de flujo estimadas.

De las redes de flujo sub – superficial en la Bahía Salsipuedes, se sustenta que la mayoría de las líneas equipotenciales siguen trayectorias concéntricas cuando se encuentran en estratos de rocas con porosidades efectivas y conductividades hidráulicas bajas. Mientras que, en zonas con mayores porosidades efectivas y conductividades hidráulicas elevadas, estas líneas siguen trayectorias desordenadas, las cuales en su mayoría se asemejan a la sinuosidad de los escurrimientos superficiales.

Las líneas equipotenciales de la Bahía Salsipuedes fueron creadas con el método de interpolación *IDW*, que fue el más óptimo y preciso, si se compara con los otros dos métodos utilizados: *Spline* y *Kriging*. El modelo *IDW* de niveles piezométricos medios del cual se obtuvieron las líneas equipotenciales tuvo un *RMSE* de 22.447 unidades, que fue menor al 23.955 unidades obtenido por *Kriging*, factor determinante para su elección.

En cuanto a las líneas de flujo, estas siguen trayectorias perpendiculares a las equipotenciales en todos los casos, y en la mayoría de las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes se asemejan a los accidentes topográficos superficiales.

La cantidad de líneas de flujo en cada red de la Bahía Salsipuedes va en relación al tipo de roca en el que fluye el agua sub – superficial; cuando una roca es ígnea, consolidada, de baja porosidad y conductividad hidráulica, el agua corre a través de más líneas de flujo, entre 12 a 17 por red; ahora bien, si la roca es metamórfica, fracturada, con alta porosidad y conductividad hidráulica, el número de líneas de flujo es menor, entre 6 a 11 por red, lo que hace posible que los canales de flujo sean mayores, y por lo tanto, mayores caudales en cada rectángulo curvilíneo de esa red.

Con las redes de flujo de la Bahía Salsipuedes fue posible la determinación de caudales subterráneos y sub – superficiales de la zona de estudio. La mayor concentración de caudal se presentó entre los kilómetros 92+000 al 93+000, siendo el pico más elevado del histograma de caudales en el kilómetro 92+500 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada con un caudal aproximado de 523.13 m³/día.

Además de la forma, densidad y niveles piezométricos en las redes de flujo, el factor que determinó a la zona del kilómetro 92+500 como la de mayor concentración de caudales fue la conductividad hidráulica, por ende, el tipo de roca que almacena el agua subterránea es el principal factor al definir la concentración de caudales en una zona, que para el kilómetro 92+500 corresponden a aluviales, areniscas y conglomerados.

Es por ello, que el agua subterránea y sub – superficial es el principal factor de amenaza en los fenómenos de deslizamiento de tierras, ya que la presencia de agua en los estratos cercanos a las trazas de deslizamiento hace que disminuya la resistencia a esfuerzos cortantes del material y ocurran esta clase de movimientos. Por lo tanto, la amenaza principal en la determinación del riesgo geohidrológico en la zona de estudio son los niveles piezométricos, que afectan directamente a los elementos en exposición en la bahía, los cuales son en su mayoría obras civiles para estabilización, comunicación y mantenimiento de la zona.

Los elementos en exposición generan importes, estos a su vez en pérdidas, y las zonas de pérdidas más elevadas en la Bahía Salsipuedes corresponden a las de emergencia técnica o también llamados sitios inestables, en los que se realizaron galerías drenantes, pedraplenes y bermas, tales son los casos de los kilómetros 88+000, 93+000, 94+000 y 95-96+000. Las zonas con calificaciones de vulnerabilidad más elevadas corresponden a los sitios con mayores pérdidas económicas, esto se debe a que los elementos expuestos a la amenaza del agua subterránea se encuentran en mayor concentración en zonas inestables y por lo tanto su uso es mayor.

Con los factores amenaza, exposición y vulnerabilidad, guiados por la metodología de superposición difusa ponderada (*Fuzzy – WOM*, por sus siglas en inglés), fue posible determinar los sitios de riesgo geohidrológico en la Bahía Salsipuedes, es decir, aquellos sitios vulnerables a deslizamientos de tierras ante la acción o amenaza del agua subterránea y sub – superficial. Se determinó que las zonas comprendidas en los kilómetros 91+500 – 92+000, 93+000 y 94+700 – 95+300 son las de mayor riesgo geohidrológico, y con potencial ocurrencia a un deslizamiento de tierras. Además de las pérdidas y vulnerabilidad de la zona, el factor que terminó esos sitios fue la geología y los niveles piezométricos, que por estar en zonas con materiales menos consolidados permitieron una mayor saturación y por lo tanto un riesgo latente.

Si bien en la actualidad, con base a la recopilación histórica de los desplazamientos de tierras en la Bahía Salsipuedes desde 1961 hasta 2020, se puede decir que ocurren 0.576 deslizamientos importantes al año, es decir, un periodo de retorno de 6.92 meses para cada deslizamiento. Este

periodo se podría acrecentar si no se realiza un trabajo de estabilización en las principales zonas de riesgo geohidrológico de la bahía. Por esta razón, fue posible determinar las zonas de ubicación de obras hidráulicas, en este caso, galerías drenantes que permitan el abatimiento de caudales subterráneos y sub – superficiales en la Bahía Salsipuedes, tomando como base metodologías parecidas al *ALPRIFT* y *DRASTIC*, es decir, mediante el álgebra de mapas y análisis multicriterio.

El análisis de múltiples criterios de la zona de estudio para la construcción de galerías drenantes como: la topografía, la geología de rocas y de fallas, y la geohidrología, determinó que los sitios en los que se deben proyectar este tipo de obras hidráulicas son en los kilómetros 92+500 y 93+000.

Actualmente el kilómetro 93+000, donde ocurrió el desplazamiento más importante de las últimas décadas, cuenta con obras de estabilización tal como bermas, pedraplén y, por supuesto, galería drenante. Por lo que la proyección de una nueva galería drenante en ese sitio se descarta, aunque sigue apareciendo en los análisis debido a los registros de niveles piezométricos elevados, lo cual se debe mitigar ejerciendo un mantenimiento adecuado a la galería construida. Con base al análisis multicriterio de ubicación de galerías, se determina la proyección de una galería drenante en el kilómetro 92+500 para abatir los caudales subterráneos que no afloran al lecho marino por medio de las trazas de deslizamiento o fracturas tectónicas locales.

Si bien, en la actualidad se está realizando un proyecto de estabilización por medio de anclas en el kilómetro 92+000 – 92+800, este se encarga simplemente de contener los estratos de aluviales y areniscas en los taludes escarpados a pie de playa y por lo tanto una protección momentánea a la carretera escénica Tijuana – Ensenada. Pero no abate los flujos sub – superficiales que provocan la saturación de las areniscas, provocando un alza en su velocidad de onda sísmica P, y disminución en resistencia ante esfuerzos cortantes que provocan una traza de deslizamiento de más de 100 metros de profundidad, es por ello que la proyección de una galería drenante sería la solución idónea.

La galería drenante del kilómetro 92+500 debe ser con geometría de herradura, que abarque la totalidad de la zona 1 (véase **Figura 8.21**) de los sitios determinados por el análisis multicriterio, con portales norte y sur frente al mar, iniciando en el kilómetro 92+200 y terminando en el kilómetro 92+600-700 con 400 a 500 metros de longitud. La sección puede ser circular o abovedada, pero con una altura o diámetro mínimo de 3.45 metros que permitan conducir más de 500 metros cúbicos de agua diarios. Debe tener drenes de penetración de diámetro variable a cada 15 metros en abanico, que abatan el agua que se encuentra en el estrato más saturado del kilómetro 92+500 el cual corresponde al de areniscas, que tiene un espesor de 40 a 45 metros. Los drenes deben tener longitudes de 15 metros en los primeros 110 metros desde la entrada de los portales (norte o sur) y de 30 metros de longitud en el centro de la galería, justo en el espesor de saturación más elevado del estrato de areniscas.

La proyección de la galería drenante en el kilómetro 92+500 de la carretera escénica Tijuana – Ensenada, garantiza el correcto comportamiento geohidrológico de la zona y por lo tanto la comunicación adecuada e ininterrumpida con el resto de la península.

En conclusión, la investigación del agua subterránea, sub -superficial y su relación con los deslizamientos de tierras se ha visto menguada durante los últimos años en México, esto aunado a que las dependencias de gobierno no utilizan la información que se obtiene de la instrumentación instalada y monitoreada en las zonas inestables por presencia de agua subterránea, hace que el

riesgo geohidrológico en México sea latente. La importancia del estudio del agua subterránea en México, y especialmente en la Bahía Salsipuedes, Baja California, radica en que el agua que satura los estratos permeables de un sitio específico, es uno de los factores amenazantes que determinan la ocurrencia de fenómenos de desastre, como son los deslizamientos de tierras.

Esta investigación potencia el interés académico, gubernamental y social por la situación de inestabilidad geohidrológica actual en la Bahía Salsipuedes, así como en el resto del país donde se presenten proyectos de vías de comunicación con propiedades geológicas, topográficas, hidrológicas y climáticas similares. Haciendo posible la mitigación del agua subterránea y sub – superficial y con ello un avance en la prevención de desastres naturales, socioeconómicos, así como en el aprovechamiento de los recursos hídricos.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (C), C. C. (12 de Abril de 2021). *Cuatro Cuatros Bura*. (Bura) Recuperado el 13 de Mayo de 2021, de <https://cuatrocuatros.mx/es/>
- Abidi, A., Demehati, A., & El Qandil, M. (2019). Landslide Susceptibility Assessment Using Evidence Belief Function and Frequency Ratio Models in Taounate city (North of Morocco). *Geotechnical and Geological Engineering*, 96-111. doi:10.1007/s10706-019-00992-0
- Achite, M., Tsangaratos, P., Ilia, I., & Toubal, A. (2021). Applying support vector machines optimized by genetic algorithm for estimating the spatial distribution of mean annual precipitation. *Arabian Journal of Geosciences*, 86-102. doi:10.1007/s12517-021-07006-5
- Aeroterra. (21 de enero de 2020). *Aeroterra distribuidor de ESRI*. Recuperado el 11 de junio de 2022, de ESRI: <https://www.aeroterra.com/es-ar/que-es-gis/introduccion>
- Akinwumiju, A., & Olorunfemi, M. (2019). Development of a conceptual groundwater model for a complex basement aquifer system: The case OF OSUN drainage basin in southwestern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 77-96. doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.103574
- Alonso Sarriá, F. (2006). *Sistemas de Información Geográfica: Temario de la asignatura (2013-2014)* (Primera ed.). Murcia, España: Universidad de Murcia. Obtenido de <http://fobos.inf.um.es/alonso/SIGCCAA/temario.pdf>
- Aparicio Mijares, F. J. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Primera ed.). México, D.F., México: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Arshad, A., Zhang, Z., Zhang, W., & Dilawar, A. (2020). Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of Pakistan. *Geoscience Frontiers*, 102-117. doi:10.1016/j.gsf.2019.12.013
- ASCE. (07 de enero de 2022). *American Society of Civil Engineers*. Recuperado el 21 de junio de 2022, de Biography Karl Terzaghi: <https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/notable-civil-engineers/karl-terzaghi>
- Asmael, N., Villanueva, J., Peyraube, N., Baalousha, M., Huneau, F., & Dupuy, A. (2021). Integrative approach for groundwater pollution risk assessment coupling hydrogeological, physicochemical and socioeconomic conditions in southwest of the damascus basin. *Water (Switzerland)*, 71-98. doi:10.3390/w13091220
- Ayt, O. M., Chaibi, M., Mercier, D., Maquaire, O., Maanan, M., Costa, S., . . . Ragaru, E. (2020). The typology of slope slides of the cliff coast of Safi-Morocco, and the role of the clay layer in triggering failure. *Journal of African Earth Sciences*, 96-110. doi:10.1016/j.jafrearsci.2020.103878
- Baalousha, H., Tawabini, B., & Seers, T. (2021). Fuzzy or non-fuzzy? A comparison between fuzzy logic-based vulnerability mapping and DRASTIC approach using a numerical model. a case study from qatar. *Water (Switzerland)*, 97-115. doi:10.3390/w13091288

- Ballesteros Navarro, B. J., Antequera F., M., González R., A., & Martos R., S. (2020). El patrimonio hidráulico del sistema de galerías de Zucaña (Almansa-SE España) y sus condicionantes geológicos e hidrogeológicos. *Boletín Geológico y Minero*, 131(1), 7-24. doi:10.21701/bolgeomin.131.1.001
- Band, S., Janizadeh, S., Pal, S., Chowdhuri, I., Siabi, Z., Norouzi, A., . . . Mosavi, A. (2020). Comparative analysis of artificial intelligence models for accurate estimation of groundwater nitrate concentration. *Sensors (Switzerland)*, 64-87. doi:10.3390/s20205763
- Barbecho C., J. G., & Calle O., J. E. (2012). *Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui* (Primera ed.). Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Barceló, M. (1983). Qanat(s) a Al-Andalus. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2(2), 3-22. Obtenido de <https://raco.cat/index.php/DocumentsAnalisi/article/view/41295>
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater* (Segunda ed.). Nueva York, Estados, Unidos: Dover Publications, Inc.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B., & Barua, S. (2020). Delineation of groundwater potential zones in Karha river basin, Maharashtra, India, using AHP and geospatial techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 117-138. doi:10.1007/s12517-020-05702-2
- Beynon-Davies, P. (2002). *Information Systems: An introduction to informatics in organizations* (Segunda ed.). Basingstoke, Reino Unido: Palgrave Macmillan.
- Bhawani, S., & Goel, R. (2011). Engineering Rock Mass Classification. En S. Bhawani, & R. Goel, *Tunnelling, Foundations and Landslides* (págs. 45-62). Roorkee, India: Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-385878-8.00006-9
- Carrillo Yee, E. (2015). *Fractabilidad de series de tiempo de precipitación y temperatura en el estado de Baja California* (Primera ed.). Ensenada, Baja California, México: Universidad Autónoma de Baja California.
- CEPIS. (15 de Marzo de 2011). *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*. (CEPIS) Recuperado el 17 de junio de 2022, de DigiCollection: <http://helid.digicollection.org/en/d/Jh0206s/11.html>
- Chakraborty, R., Pal, S., Malik, S., & Das, B. (2018). Modeling and mapping of groundwater potentiality zones using AHP and GIS technique: a case study of Raniganj Block, Paschim Bardhaman, West Bengal. *Modeling Earth Systems and Environment*, 111-137. doi:10.1007/s40808-018-0471-8
- Chen, D., & Weiteng Chen, H. (19 de marzo de 2013). Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901-2010. *Environmental Development*, 6, 69-79. doi:10.1016/j.envdev.2013.03.007.
- Choudhry, S., & Morad, M. (agosto de 1998). GIS errors and surface hydrologic modeling: An examination of effects and solutions. *Journal of Surveying Engineering*, 124(3), 134-143. doi:10.1061/(ASCE)0733-9453(1998)124:3(134)

- Chow, V. T. (2000). *Hidrología Aplicada* (Tercera ed.). (J. G. Saldarriaga, Trad.) Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Cianflone, G., Vespasiano, G., Tolomei, C., De Rosa, R., Dominici, R., Apollaro, C., . . . Polemio, M. (02 de marzo de 2022). Different Ground Subsidence Contributions Revealed by Integrated Discussion of Sentinel-1 Datasets, Well Discharge, Stratigraphical and Geomorphological Data: The Case of the Gioia Tauro Coastal Plain (Southern Italy). *Sustainability (Switzerland)*, 12-31. doi:10.3390/su14052926
- CICESE, C. (29 de julio de 2022). *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*. Recuperado el 28 de mayo de 2022, de Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM): <http://clicom-mex.cicese.mx>
- CONAGUA. (07 de enero de 2022). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Recuperado el 17 de mayo de 2022, de SIATL: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Crook, D. S., Tripathi, S. C., & Jones, R. T. (Agosto de 2020). Traditional design principles of a groundwater irrigation system in the foothills of the western ghats of southwest India. *International Mountain Society*, 40(3), 21-32. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00065.1
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda ed.). Barcelona, España: Ediciones Omega S.A.
- Das, S., Pardeshi, S., Kulkarni, P., & Doke, A. (2018). Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 137-150. doi:10.1007/s12517-018-3522-6
- DGST, S. (25 de mayo de 2019). *Dirección General de Servicios Técnicos*. Recuperado el 25 de junio de 2022, de Datos viales: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos_Viales_2022/02_BC_DV2022.pdf
- DOF. (21 de Diciembre de 2016). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 17 de junio de 2022, de Secretaría de Gobernación: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5466288&fecha=21/12/2016
- Domenico, P., & Schwartz, F. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (Segunda ed.). Nueva York, Estados Unidos: John Wiley and sons Inc.
- Elsevier, S. (18 de mayo de 2022). *Scopus Preview*. Recuperado el 30 de julio de 2022, de RELX: <https://www.scopus.com/home.uri>
- Elvis, B., Arsène, M., Théophile, N., Bruno, K., & Olivier, O. (15 de enero de 2022). Integration of shannon entropy (SE), frequency ratio (FR) and analytical hierarchy process (AHP) in GIS for suitable groundwater potential zones targeting in the Yoyo river basin, Méiganga area, Adamawa Cameroon. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15-39. doi:10.1016/j.ejrh.2022.100997

- ESRI. (07 de enero de 2022). *ArcGIS PRO - ESRI*. Recuperado el 25 de junio de 2022, de Recursos - Referencia de las herramientas: <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-pro/resources>
- Falah, F., & Zeinivand, H. (2019). GIS-Based Groundwater Potential Mapping in Khorramabad in Lorestan, Iran, using Frequency Ratio (FR) and Weights of Evidence (WoE) Models. *Water Resources*, 110-124. doi:10.1134/S0097807819050051
- Fansa Saleh, G., Pérez C., A. J., Hermosilla P., J., & Iranzo G., E. (28 de Junio de 2021). Medio físico y características constructivas de galerías drenantes de aguas subálveas en ambientes semiáridos del sudeste español y Túnez. *Cuadernos geográficos*, 60(2), 147-170. doi:10.30827/cuadgeo.v60i2.15621
- Fernandes, A. L., Cruz, J. V., Figueira, C., & Prada, S. (09 de septiembre de 2020). Groundwater chemistry in Madeira Island (Portugal): main processes and contribution to the hydrogeological conceptual model. *Environmental Earth Sciences*, 79(413), 41-60. doi:10.1007/s12665-020-09151-8
- Fernández, B. (21 de Julio de 2014). *Diarium Universidad de Salamanca*. Recuperado el 17 de mayo de 2022, de Deslizamiento en México, diciembre 2013: <https://diarium.usal.es/begom/2014/07/21/deslizamiento-en-mexico-diciembre-de-2013/>
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology* (Cuarta ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, Inc.
- Franke, R. (1982). Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. (Elsevier, Ed.) *Computer and Mathematics with Applications*, 8(4), 273-281. doi:10.1016/0898-1221(82)90009-8
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater* (Primera ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, Inc.
- Fuentes, C., & Rendón, L. (2012). *Riego por gravedad* (Primera ed.). Querétaro, Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Garfi, G., John, C. M., Rucker, M., Lin, Q., Spurin, C., Berg, S., & Krevor, S. (10 de enero de 2022). Determination of spatial distribution of wetting in the pore networks of rocks. *Journal of colloid and interface science*, 786-795. doi:10.1016/j.jcis.2021.12.183
- Geometrics. (12 de enero de 2022). *Geometrics Inc*. Recuperado el 17 de mayo de 2022, de Seismographs: <https://www.geometrics.com/seismographs/>
- Gharekhani, M., Nadiri, A., Khatibi, R., & Sadeghfam, S. (2021). An investigation into time-variant subsidence potentials using inclusive multiple modelling strategies. *Journal of Environmental Management*, 54-71. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112949
- Golden, S. (07 de enero de 2022). *Golden Software*. Recuperado el 17 de mayo de 2022, de Surfer-Visualize Data: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>

- Golkarian, A., & Rahmati, O. (2018). Use of a maximum entropy model to identify the key factors that influence groundwater availability on the Gonabad Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 70-90. doi:10.1007/s12665-018-7551-y
- Gorgij, A. D., Kisi, O., Moayeri, M. M., & Moghaddam, A. A. (2018). Hydraulic conductivity estimation via the AI-based numerical model optimization using the harmony search algorithm. *Hydrology research*, 49(5), 155-170. doi:10.2166/nh.2018.147
- Gu, X., Wu, S., Ji, X., & Zhu, Y. (2021). The Risk Assessment of Debris Flow Hazards in Banshanmen Gully Based on the Entropy Weight-Normal Cloud Method. *Advances in Civil Engineering*, 11-22. doi:10.1155/2021/8841310
- Gutiérrez, F., Fabregat, I., Roqué, C., Carbonel, D., Zarroca, M., Linares, R., . . . Sevil, J. (2019). Sinkholes in hypogene versus epigene karst systems, illustrated with the hypogene gypsum karst of the Sant Miquel de Campmajor Valley, NE Spain. *Geomorphology*, 124-186. doi:10.1016/j.geomorph.2018.12.003
- H. Moreno, M. V. (noviembre de 2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquía: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquía)*, VI(5), 59-69.
- Harr, M. (1962). *Groundwater and Seepage* (Segunda ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill Inc.
- Hou, E., Wang, J., & Chen, W. (2018). A comparative study on groundwater spring potential analysis based on statistical index, index of entropy and certainty factors models. *Geocarto International*, 27-57. doi:10.1080/10106049.2017.1299801
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (30 de noviembre de 2013). The Varnes classification of landslides types, an update. *Springer - Verlag Berlin Heidelberg*. doi:10.1007/s10346-013-0436-y
- INEGI. (12 de septiembre de 2003). Carta geológico-minera Ensenada H11-2. *H11-2 Baja California, Segunda*. México, D.F., México: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 15 de mayo de 2022, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Geologia_hist/1_250_000/702825675387.pdf
- INEGI. (22 de mayo de 2015). Carta Uso de Suelo y Vegetación. *Serie V - Ensenada H11-2, Segunda*. Ensenada, Baja California, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 17 de mayo de 2022, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/uso_suelo/702825572242.pdf
- José, C., Thomas, J., Prasannakumar, V., & Reghunath, R. (2019). BaDAM Toolbox: A GIS-Based Approach for Automated Drainage Basin Morphometry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 24-36. doi:10.1007/s12524-018-0913-9

- Keyence. (21 de enero de 2018). *Keyence de México*. Recuperado el 07 de junio de 2022, de Fundamentos de medición, conceptos básicos de los sistemas de medición: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/basic/error.jsp>
- Koutalakis, P. D., Tzoraki, O. A., Prazioutis, G. I., Gkiatas, G. T., & Zaimes, G. N. (22 de abril de 2021). Can drones map earth cracks? Landslide measurements in North Greece using UAV photogrammetry for nature-based solutions. *Sustainability-MDPI*, 13-33. doi:10.3390/su13094697
- Kutlug, S. E., & Colkesen, I. (2021). Performance analysis of advanced decision tree-based ensemble learning algorithms for landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*, 75-114. doi:10.1080/10106049.2019.1641560
- Legg, M. (1991). Sea beam evidence of recent tectonics activity in the California Continental Borderland. *American Association of Petroleum Geologists*, IV(7), 179-196.
- Lictevout, E., Abellanosa, C., Maass, C., Pérez, N., Yáñez, G., & Véronique, L. (septiembre de 2020). Exploration, mapping and characterization of filtration galleries of the Pica Oasis, northern Chile: A contribution to the knowledge of the Pica aquifer. *Andean Geology*, 47(3), 529-558. doi:10.5027/andgeoV47n3-3272
- López F., J. A. (2022). Paisajes tradicionales asistidos por galerías drenantes: un patrimonio cultural y territorial amenazado. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 68(1), 55-79. doi:10.5565/rev/dag.695
- López Lambraño, Á. A. (17 de marzo de 2006). Determinación de sitios apropiados para ubicar rellenos sanitarios en el municipio de Querétaro utilizando sistemas de información geográfica. *Congreso Internacional de Ingeniería UAQ, Segundo*, 14 - 17.
- López-Lambraño, Á. A. (14 de octubre de 2020). Apuntes Laboratorio de SIG. *Modulo de Sistemas de Información Geográfica, Primera*, 33-48. Ensenada, Baja California, México: UABC. Recuperado el 12 de junio de 2022
- López-Lambraño, Á. A., Fuentes, C., López-Ramos, Á. A., Mata R., J., & López-Lambraño, M. (14 de marzo de 2018). Spatial and temporal Hurst esponent variability of rainfall series based on the climatological distribution in a semiarid region in Mexico. *Atmósfera*, 31(3), 199-219. doi:10.20937/ATM.2018.31.03.02
- Luijendijk, E. (06 de enero de 2022). Transmissivity and groundwater flow exert a strong influence on drainage density. *Earth Surface Dynamics*, 10, 1-22. doi:10.5194/esurf-10-1-2022
- Mahmoodi, N., Keisel, J., Wagner, P. D., & Fohrer, N. (2020). Integrating water use systems and soil and water conservation measures into a hydrological model of an Iranian Wadi system. (P. Science, Ed.) *Journal of Arid Land*, 12(4), 545-560. doi:10.1007/s40333-020-0125-3
- Martínez Heras, J. (10 de octubre de 2020). *IArtificial.net*. Recuperado el 09 de junio de 2022, de Error cuadrático medio para regresión: <https://www.iartificial.net/error-cuadratico-medio-para-regresion/>

- Mijailov, L. (1989). *Hidrogeología* (Primera ed.). Moscú, Rusia: Mir.
- Mitas, L., & Mitsova, H. (1988). General Variational Approach to the Interpolation Problem. *Computer and Mathematics with Applications*, 16(12), 983-992. doi:0097-4943/88
- Mohamed, R., Brooks, S., Tsai, C., Ahmed, T., Rucker, D., Ulery, A., . . . Carroll, K. (2021). Geostatistical interpolation of streambed hydrologic attributes with addition of left censored data and anisotropy. *Journal of Hydrology*, 98-114. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126474
- Mohebbi, T. G., Nakhaei, M., & Lak, R. (2020). A GIS-based comparative study of hybrid fuzzy-gene expression programming and hybrid fuzzy-artificial neural network for land subsidence susceptibility modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 87-116. doi:10.1007/s00477-020-01810-3
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., D.G., A., & Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med*, 6(7), 67-79. doi:10.1371/journal.pmed1000097
- Navarro-Olache, L. F., Castro, R., Durazo, R., Hernández-Walls, R., Mejía T., A., Flores V., X., & Flores M., A. L. (2021). Influence of Santa Ana winds on the surface circulation of Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Atmósfera*, 34(1), 97-109. doi:10.20937/ATM.52719
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*, 4(3), 313-332. doi:10.1080/02693799008941549
- Onwe, M., Abraham, E., Ambrose, N., & Osike, O. (28 de febrero de 2022). An evaluation of the hydrogeology potential of Nsukka, Southern Nigeria, using geographic information system. *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 12-33. doi:10.1007/s13201-022-01579-6
- Ouedraogo, I., Defourny, P., & Vanclooster, M. (2019). Application of random forest regression and comparison of its performance to multiple linear regression in modeling groundwater nitrate concentration at the African continent scale. *Hydrogeology Journal*, 111-129. doi:10.1007/s10040-018-1900-5
- Pelayo C., A. (15 de mayo de 2022). Reportes fotográficos Dron, carretera escénica Tijuana-Ensenada. *Fotografías en Dron*. Ensenada, Baja California, México: TGC Geotecnía, S.A. de C.V. en colaboración con SCT.
- Philip, G. M., & Watson, D. (1982). A Precise Method for Determining Contoured Surfaces. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 22, 205-212.
- Phong, T., Pham, B., Trinh, P., Ly, H., & et, a. (2021). Groundwater Potential Mapping Using GIS-Based Hybrid Artificial Intelligence Methods. *Groundwater*, 52-68. doi:10.1111/gwat.13094
- Pollicino, L., Masetti, M., Stevenazzi, S., Cristaldi, A., Righetti, C., & Gorla, M. (2021). Multi-aquifer susceptibility analyses for supporting groundwater management in urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 115-128. doi:10.1016/j.jconhyd.2021.103774

- Prasad P., L. V. (2020). Application of machine learning techniques in groundwater potential mapping along the west coast of India. *GIScience and Remote Sensing*, 45-64. doi:10.1080/15481603.2020.1794104
- Q. Liu, X. M. (2014). Interactions Between Surface Water and Groundwater: Key Processes in Ecological Restoration of Degraded Coastal Wetlands Caused by Reclamation. *Springer Verlag - Hidrology Journal*, 25(7), 187-195.
- R. Ortega, D. C. (abril de 2015). Estimación del peligro sísmico en el centro de Baja California: Un modelo consistente entre las regiones del Golfo de California y la Peninsular. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 114-125.
- RAE. (17 de enero de 2019). *Real Academia Española*. Recuperado el 01 de julio de 2022, de Diccionario de la lengua: <https://dle.rae.es/metodolog%C3%ADa>
- RAE. (17 de enero de 2020). *Real Academia Española*. Recuperado el 25 de junio de 2022, de Diccionario de la lengua española: <https://dle.rae.es/criterio>
- RAE. (25 de mayo de 2021). *Real Academia Española*, Riesgo. Recuperado el 12 de junio de 2022, de Diccionario RAE: <https://dle.rae.es/riesgo>
- RAE. (01 de enero de 2022). *Real Academia Española*. Recuperado el 18 de julio de 2022, de Diccionario de la lengua española: <https://dle.rae.es/enseñado>
- Rane, N., & Jayaraj, G. (25 de mayo de 2022). Comparison of multi-influence factor, weight of evidence and frequency ratio techniques to evaluate groundwater potential zones of basaltic aquifer systems. *Springer Science and Business Media B.V.*, 77-107. doi:10.1007/s10668-021-01535-5
- Royle, A. G., Clausen, F., & Frederiksen, P. (1981). Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocessing*, 1(2), 377-394.
- SAJA. (07 de noviembre de 2019). *SAJA Construcción y Desarrollo de Servicios S.L.* Recuperado el 18 de junio de 2022, de Tipos de Obras Hidráulicas: <https://sajasl.es/tipos-obra-hidraulica-blog>
- Sakala, E., Fourie, F., Gomo, M., & Coetzee, H. (2018). GIS-based groundwater vulnerability modelling: A case study of the Witbank, Ermelo and Highveld Coalfields in South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 62-82. doi:10.1016/j.jafrearsci.2017.09.012
- Salar, S., Othman, A., & Hasan, S. (2018). Identification of suitable sites for groundwater recharge in Awaspí watershed using GIS and remote sensing techniques. *Environmental Earth Sciences*, 45-60. doi:10.1007/s12665-018-7887-3
- Sanaan B., N. (2020). The qanat system: A reflection on the heritage of the extraction of hidden waters. En N. Sanaan B., *Adaptive strategies for water heritage* (págs. 40-57). Delft, Países Bajos: C. Hein. doi:10.1007/978-3-030-00268-8_3
- Sánchez- San Román, J. (2012). *Memorias de Hidrología*. Universidad de Salamanca, Geología. Salamanca: Universidad de Salamanca.

- Sanders, L. (1998). *A manual of field Hydrogeology* (Primera ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, Inc.
- Santoyo V., E., & Hinojosa, G. (2012). *Manual de fichas técnicas para un estudio geotécnico* (Primera ed.). México, D.F., México: TGC Geotecnia S.A. de C.V.
- Santoyo V., E., Bermúdez G., E., & Gallardo C., M. (29 de 07 de 2022). *Ecuador Documents*. Recuperado el 2022, de Ecuador Documents: <https://documents.ec/document/deslizamiento-en-el-km-93-autopista-tijuana-2017-03-15-deslizamiento-en-el-km.html?page=1>
- SCT. (15 de mayo de 2017). *Normativa para la infraestructura del transporte*. (S. d. Transportes, Productor) Recuperado el 25 de junio de 2022, de NIT-SICT, Normativa SCT: <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>
- SCT. (30 de Noviembre de 2019). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Recuperado el 17 de junio de 2022, de Comunicaciones SCT: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2019/02_BC.pdf
- SCT, P. T. (05 de enero de 2014). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Recuperado el 17 de junio de 2022, de Noticias de prensa y comunicados oficiales: <https://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/problematika-de-la-autopista-tijuana-ensenada/>
- SEDATU. (03 de Enero de 2018). *Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano*. Recuperado el 14 de junio de 2021, de Gobierno de México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/300387/Te_rminos_de_Referencia_Atlas.pdf
- Sheik Mohideen, A. R. (2021). Morphometric assessment of hydrogeomorphic processes and landscape evolution in the Kallar watershed (Western Ghats, India): regionalisation and prioritisation. *Arabian Journal of Geosciences*, 58-86. doi:10.1007/s12517-021-08105-z
- Smith, L., & Weathcraft, S. (1993). *Groundwater flow in maidment, a handbook of hydrology* (Primera ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw Hill, Inc.
- SOP. (1975). *Deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada* (Primera ed.). México, D.F., México: Secretaría de Obras Públicas.
- Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1990). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones* (Sexta ed.). (A. Rico Rodríguez, Ed., & J. Menéndez Menéndez, Trad.) México, D.F., México: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Taboada, J., Ordóñez, C., Busto, J., & Martínez-Alegría, R. (2000). Análisis multicriterio para la selección de emplazamientos de vertederos de residuos sólidos en el entorno de Valladolid. *Mapping*, 60, 28-32.
- Tang, P., Zhang, D., & Li, H. (19 de enero de 2022). Predicting permeability from 3D rock images based on CNN with physical information. *Journal of Hydrology*, 606, 13-26. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127473

- Tauxe, J. D. (1994). *Porous Medium Advection–Dispersion Modeling in a Geographic Information System* (Primera ed.). Austin, Texas, Estados Unidos: Universidad de Texas en Austin.
- Témez, J. (1978). *Calculo Hidrometeorológico de Caudales máximos en pequeñas cuencas naturales* (Primera ed.). Madrid, España: Dirección General de Carreteras.
- TGC, & Juárez, V. A. (2016). *Informe de gestión de servicios de impacto ambiental de la emergencia técnica en el km 88+000-89+000*. TGC Geotecnia S.A. de C.V., Ambiental. México: Grupo TGC.
- TGC, & Mendoza, S. (2017). *Informe hidrológico-hidráulico de los sitios comprendidos en los kilómetros 94+000 al 98+000*. TGC Geotecnia, S.A. de C.V., Geotecnia - Hidrología. Ensenada: Grupo TGC. Recuperado el 18 de mayo de 2022
- TGC, & Moser, M. (2016). *Estudio Geológico km 84+000-98+000*. TGC Geotecnia S.A. de C.V., Geología. México: Grupo TGC.
- TGC, & Pelayo C., A. (2021). *Informe de monitoreo de la carretera escénica Tijuana-Ensenada, Km 84+000 - 98+000*. TGC Geotecnia, S.A. de C.V., Geotecnia. Ensenada, B.C.: Grupo TGC.
- TGC, & Santoyo V., E. (2017). *Estudio geofísico para los km 84+000 al 98+000 de la carretera escénica Tijuana-Ensenada*. TGC Geotecnia S.A. de C.V., Geotecnia. México: Grupo TGC.
- TGC, & Zazueta R., J. A. (2018). *Inspección visual de estructuras tradicionales de la autopista Tijuana - Ensenada*. TGC Geotecnia S.A. de C.V., Inspección. México: Grupo TGC.
- TGC, Gallardo, M., & Bermúdez, E. (2018). *Informe geotécnico general de la Bahía Salsipuedes, del kilómetro 84+000 al 98+000 de la carretera escénica Tijuana-Ensenada*. TGC Geotecnia, S.A. de C.V., Geotecnia. Ciudad de México, México: Grupo TGC. Recuperado el 21 de mayo de 2022
- Thapa, R., Gupta, S., Haque, M., & Kaur, H. (2020). Application of geospatial modeling in deciphering groundwater recharge site and structures in Paschim Medinipur district, India. *Sustainable Water Resources Management*, 116-133. doi:10.1007/s40899-020-00442-3
- Toledo, M., Morán, R., & Campos, H. (15 de agosto de 2012). Modelación del movimiento del agua en medios porosos no lineales mediante un esquema de diferencias finitas. Aplicación al sobrevertido en presas de escollera. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 28(4), 225-236. doi:10.1016/j.rimni.2012.02.002
- Toribio, G. (08 de octubre de 2019). *Grupo TYC-GIS formación*. Recuperado el 17 de junio de 2022, de Cursos GIS: <https://www.cursosgis.com/creacion-de-un-modelo-digital-de-elevacion-dem-a-partir-de-curvas-de-nivel-en-arcgis/>
- Trèves, F. (1995). *Topological Vector Spaces, Distributions and Kernels* (Tercera ed.). Lafayette, Indiana, Estados Unidos: Academic Press, Inc.
- UCM. (25 de mayo de 2019). *Univesidad Complutense de Madrid*. Recuperado el 10 de julio de 2022, de Contenido media de datos: <https://biblioteca.ucm.es/data/cont/media/www/pag-53529/OPERADORES.pdf>

- UNESCO, W. (2012). *International Glossary of Hydrology* (Séptima ed.). Génova, Suiza: Chair, Publications Board. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>
- Vélez Otálvaro, M. V. (2004). *Hidráulica de aguas subterráneas* (Tercera ed.). Medellín, Antioquía, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el mayo de 2022
- Watson, D. F., & Philip, G. M. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing*, 2(4), 315-327.
- Yuxiang, L., Yongjun, J., Wei, H., Min, C., & Yang, M. (27 de marzo de 2020). A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology and environment in karst areas: current status, challenges and perspectives. *Journal of Hydrology*, 586(1), 45-60. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124891

11 ANEXOS

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO

Asunto: Solicitud de Información Bahía Salsipuedes.
Ensenada, B.C. a 27 de Enero de 2021.

Ing. Julio César Inzunza Castro
Subgerente Técnico de la Coordinación Regional I Tijuana
Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos

PRESENTE

Estimado Ingeniero Inzunza:

Por medio de la presente, le manifiesto de manera atenta que el estudiante **Gabriel Morales Carranza** con matrícula **333773** del programa de **Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI)** de la **Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño (FIAD)** de la **Universidad Autónoma de Baja California**, actualmente se encuentra desarrollando un trabajo de investigación y tesis titulado **"MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE REDES DEL FLUJO SUB SUBPERFICIAL EN LA BAHÍA SALSIPUEDES, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO"**, debido a esto, el estudiante requiere la utilización de planos e información técnica de la zona de estudio, como son:

- Listado de Instrumentación (Piezómetros y Tubos de Observación) de la Bahía Salsipuedes actual (Km 84+000 al 98+000).
- Plantas de ubicación de Piezómetros y Tubos de Observación en la Bahía Salsipuedes,
- Mediciones Piezométricas mensuales de la instrumentación en la Bahía Salsipuedes, (por lo menos doce (12) mediciones mensuales anteriores a la fecha).

Por lo anterior, solicitamos a Usted, el gran favor de autorizar el suministro de dicha información, la cual será utilizada únicamente para un caso de estudio académico, sin fines de lucro y que será de mucha utilidad para que el estudiante del Programa Educativo, tenga la experiencia de trabajar con información real de campo, contribuyendo así a su formación técnica.

Agradezco de ante mano la atención a la presente solicitud, quedo a su disposición para cualquier duda o aclaración. Me despido enviando un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE
"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE"


Dr. Álvaro Alberto López Lambrano
Profesor-Investigador
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
Universidad Autónoma de Baja California


Caminos y Puentes
Federales de L.S.C.
Coordinación Regional I-Noroeste

27 ENE 2021
9:54
RECIBIDO
Subcoordinación Técnica

Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana # 3917, Fraccionamiento Playitas, c.p.22860, Ensenada, Baja California, México. Tel. +52 (646) 174 4333 y 178 9744

Figura 11.1. Carta de solicitud de información a SCT-CAPUFE.

PROYECTO 982-G-18	PROF. EXPLORADA (m)	37.4	SONDEO	SMC-1
LOCALIZACIÓN	Carretera escénica Tijuana-Ensenada Km 92+000			PROF. NAF (m) No se detectó

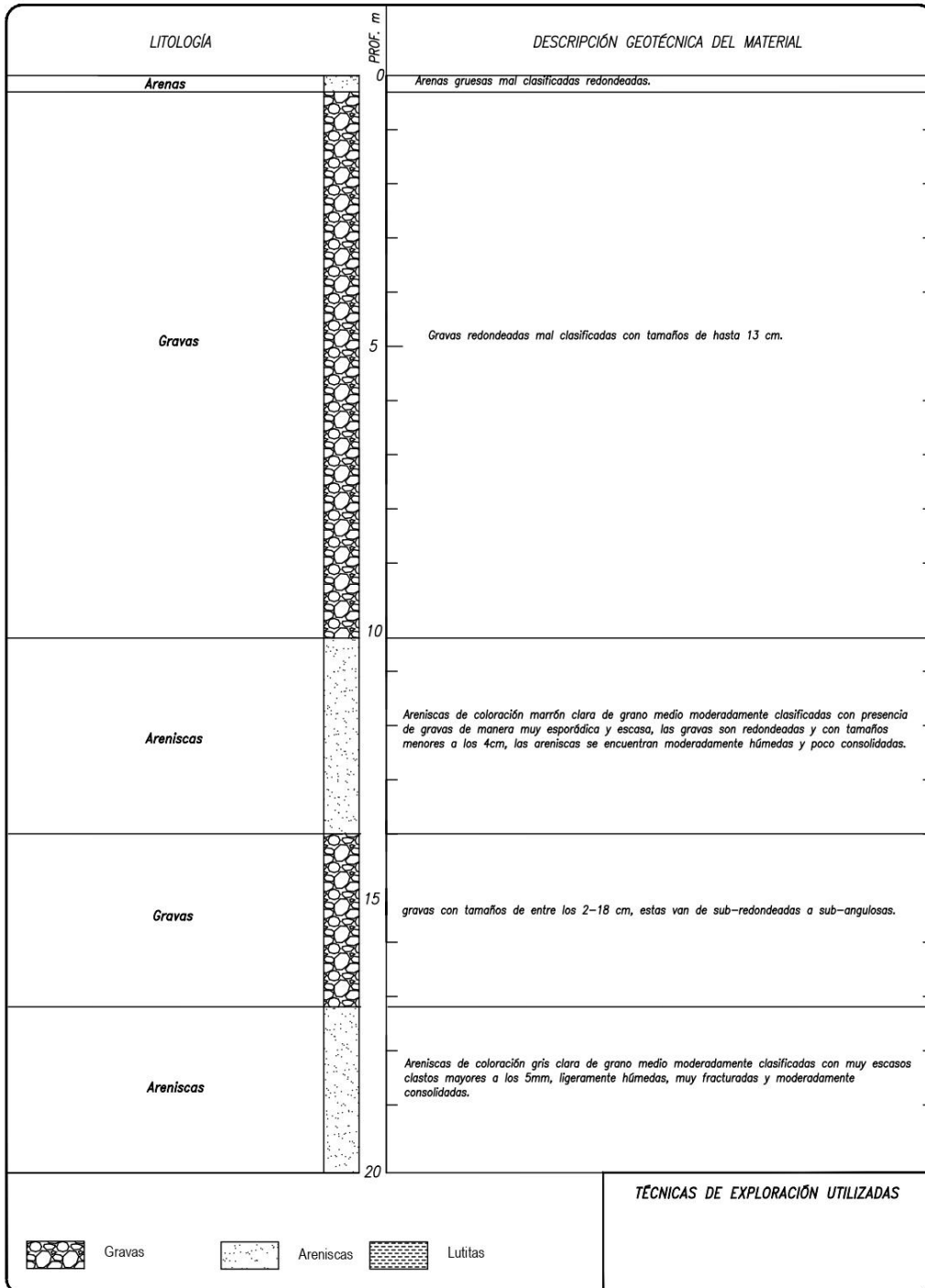


Figura 11.2. Estratigrafía SMC-1 km 92+000, de 0 a 20 metros de profundidad.

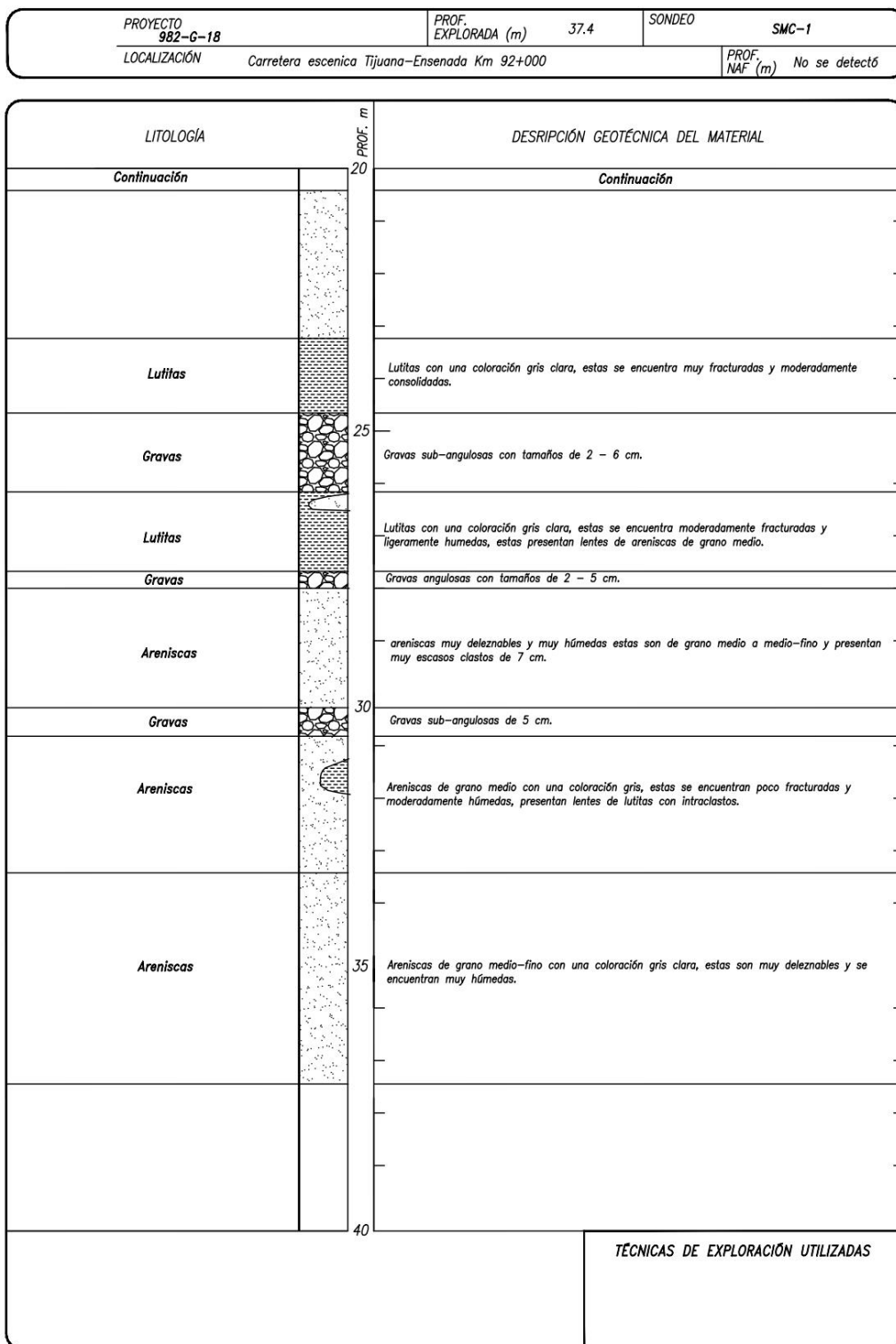


Figura 11.3. Estratigrafía SMC-1 km 92+000, de 20 a 37.4 metros de profundidad.

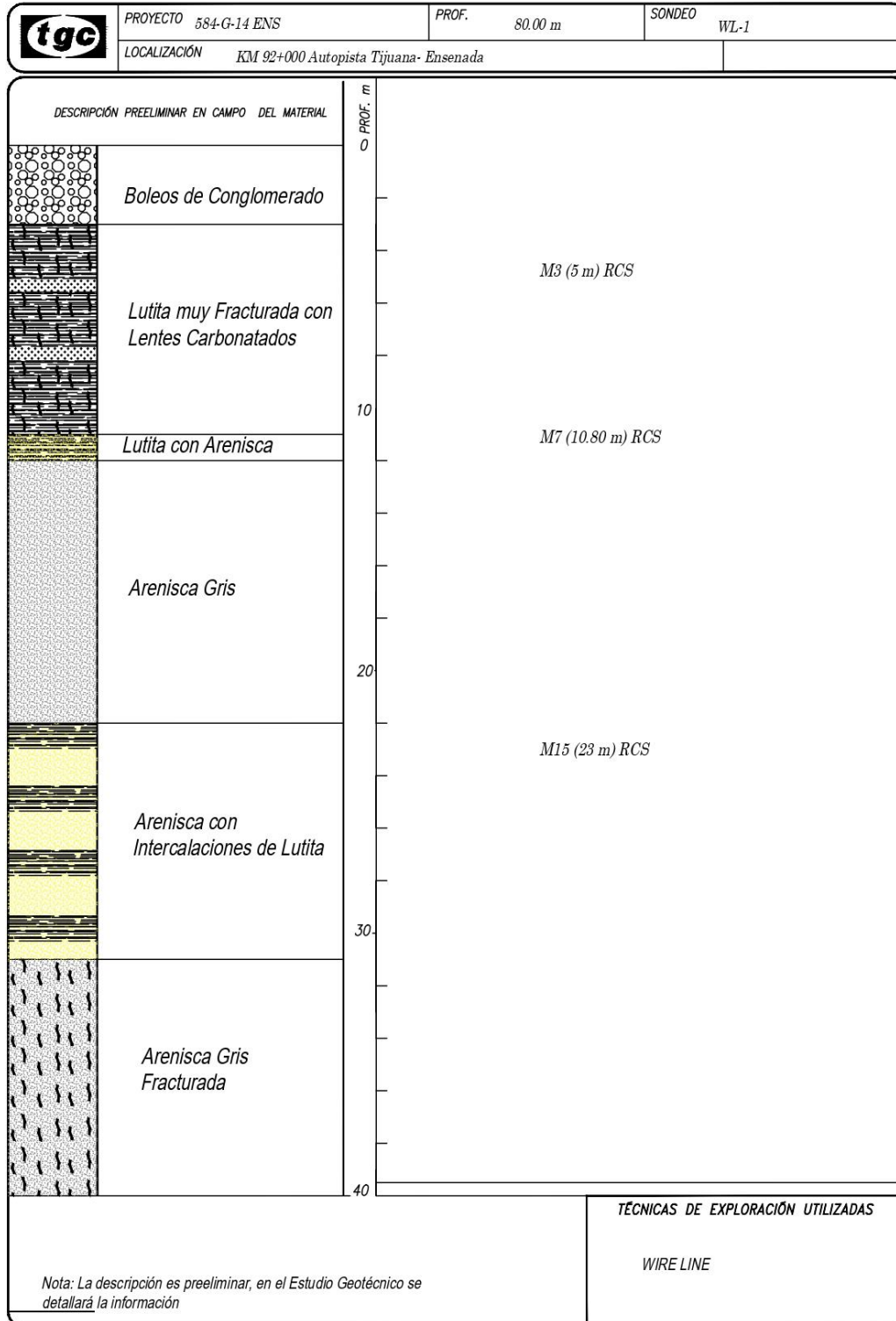


Figura 11.4. Estratigrafía WL-1 km 92+000, de 0 a 40 metros de profundidad.

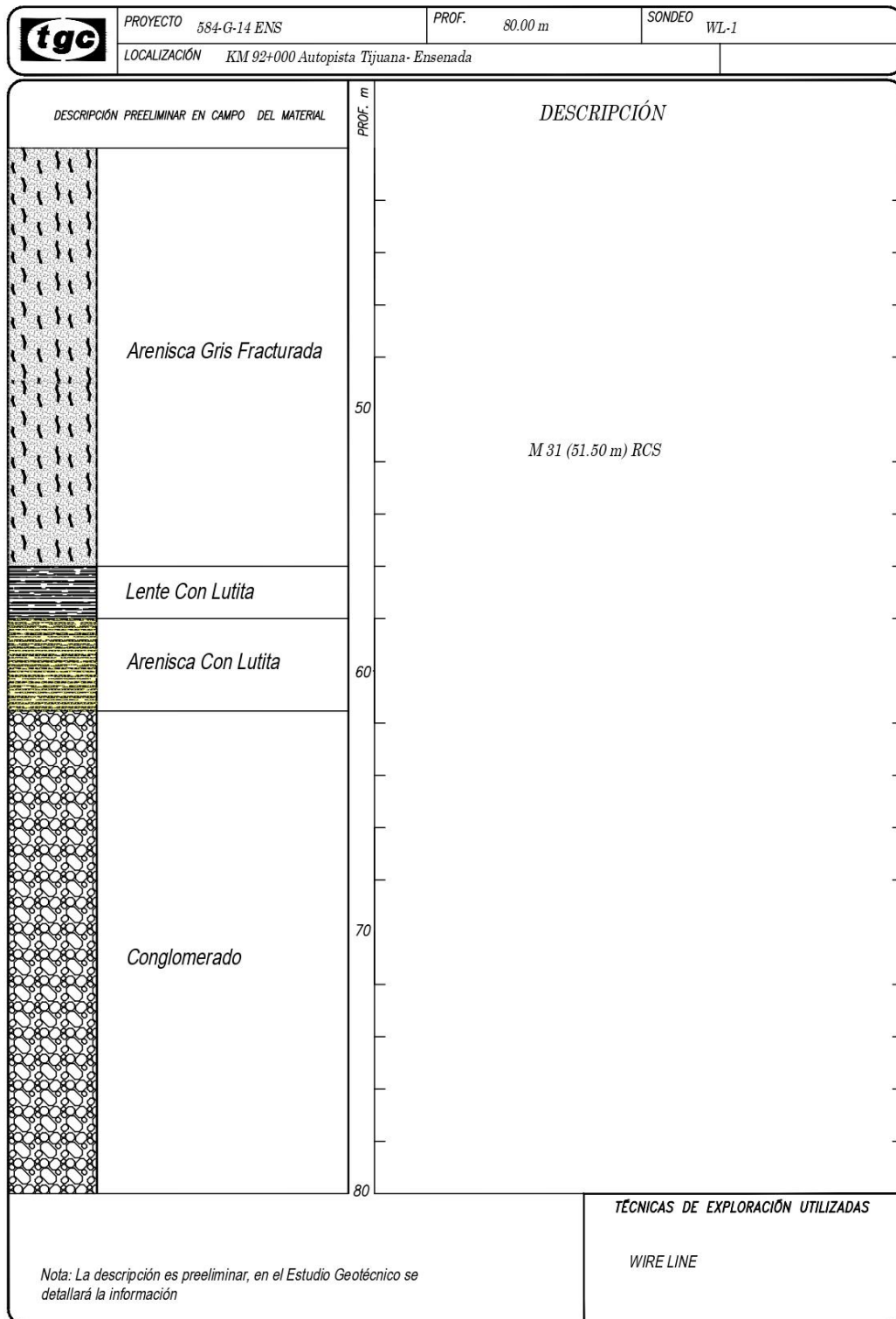


Figura 11.5. Estratigrafía WL-1 km 92+000, de 40 a 80 metros de profundidad.

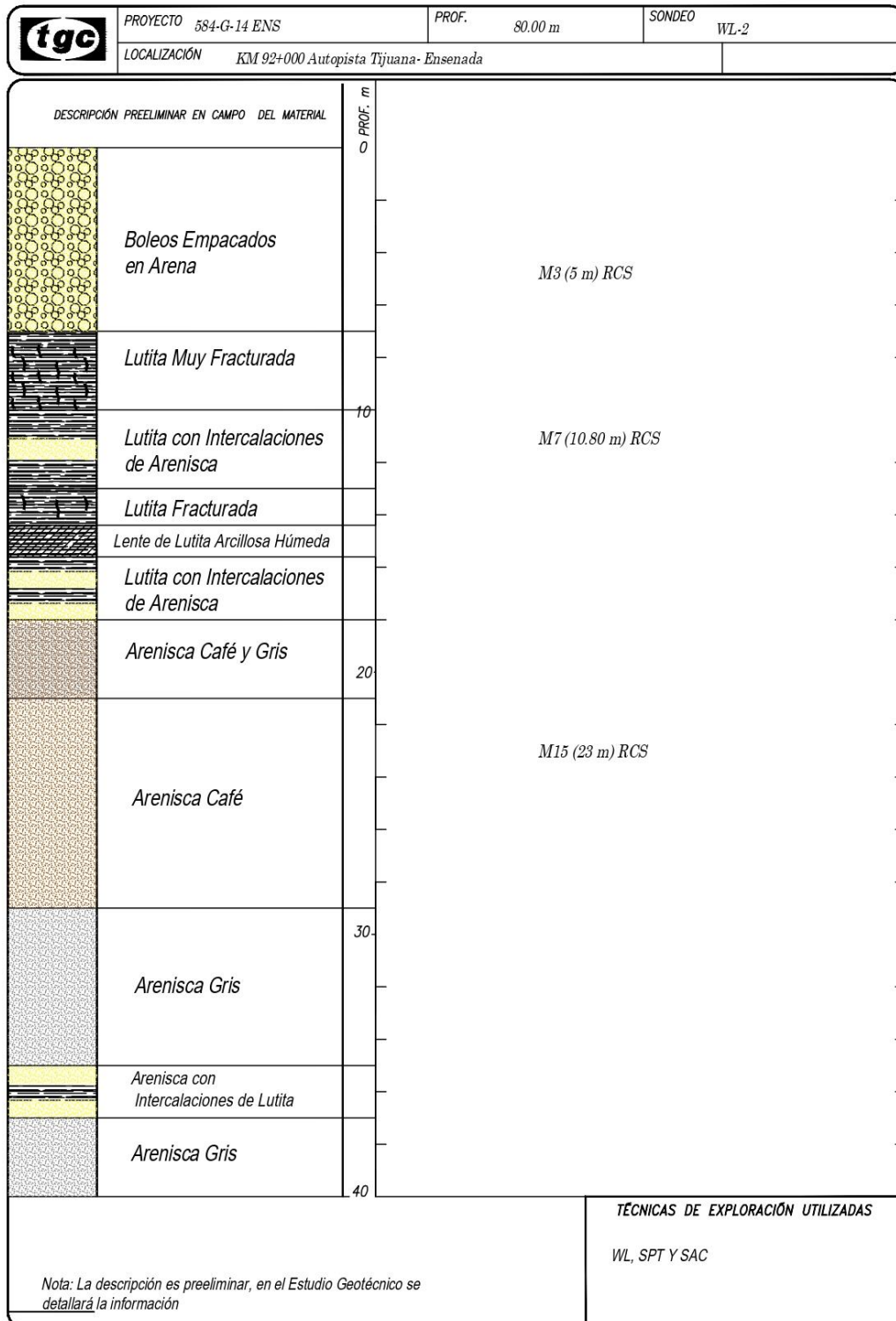
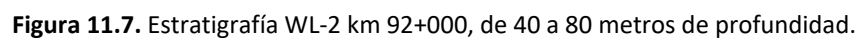


Figura 11.6. Estratigrafía WL-2 km 92+000, de 0 a 40 metros de profundidad.



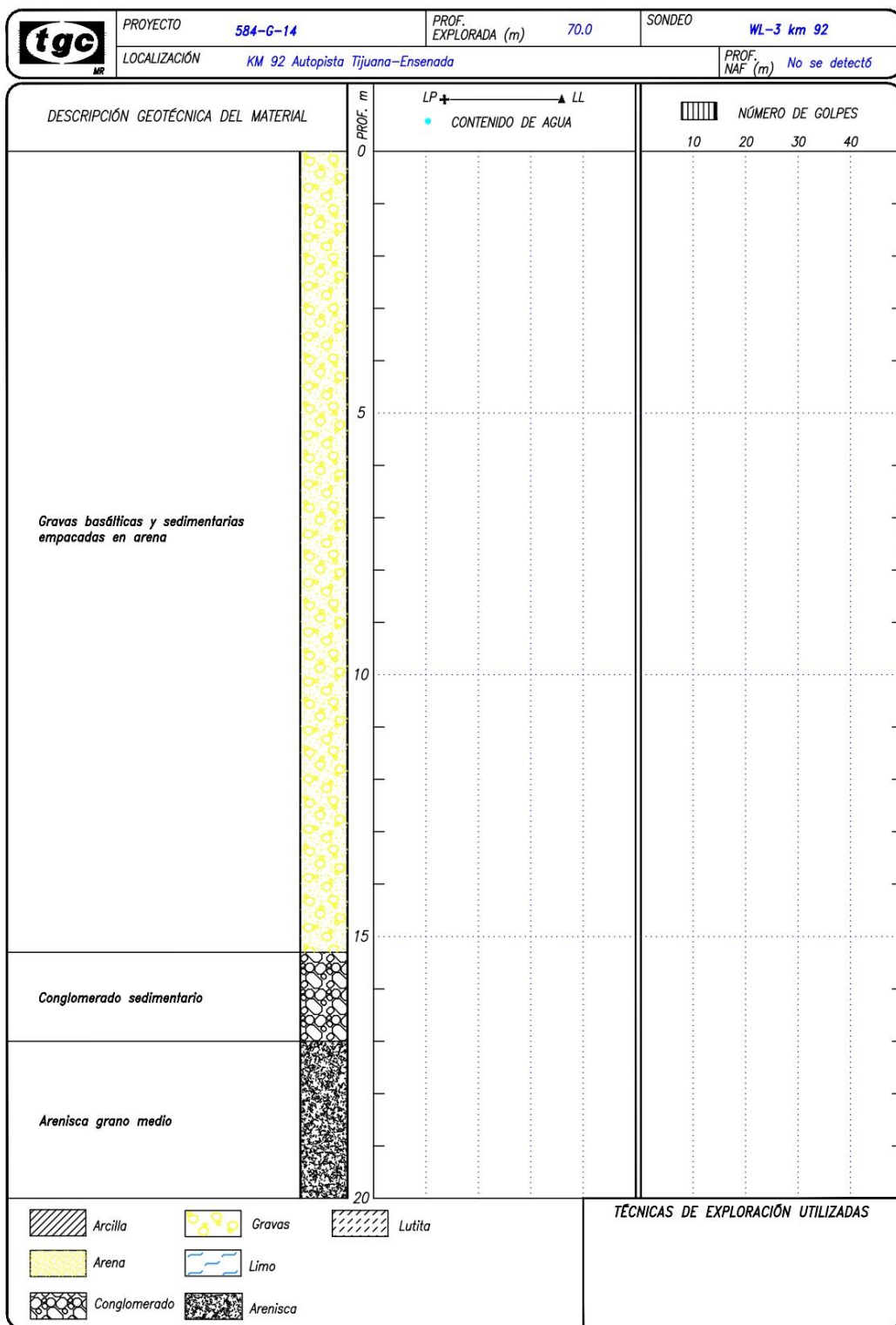


Figura 11.8. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 0 a 20 metros de profundidad.

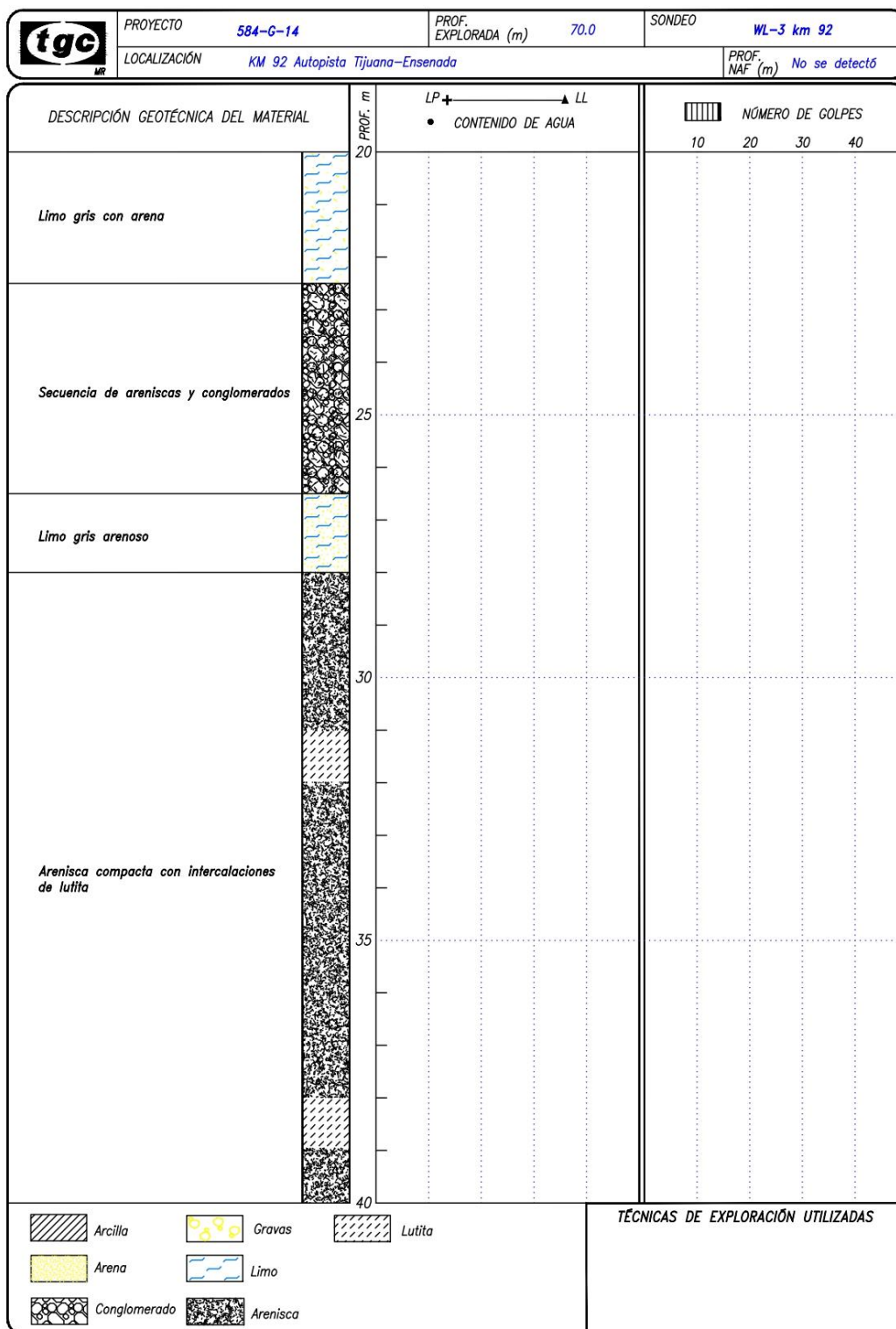


Figura 11.9. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 20 a 40 metros de profundidad.

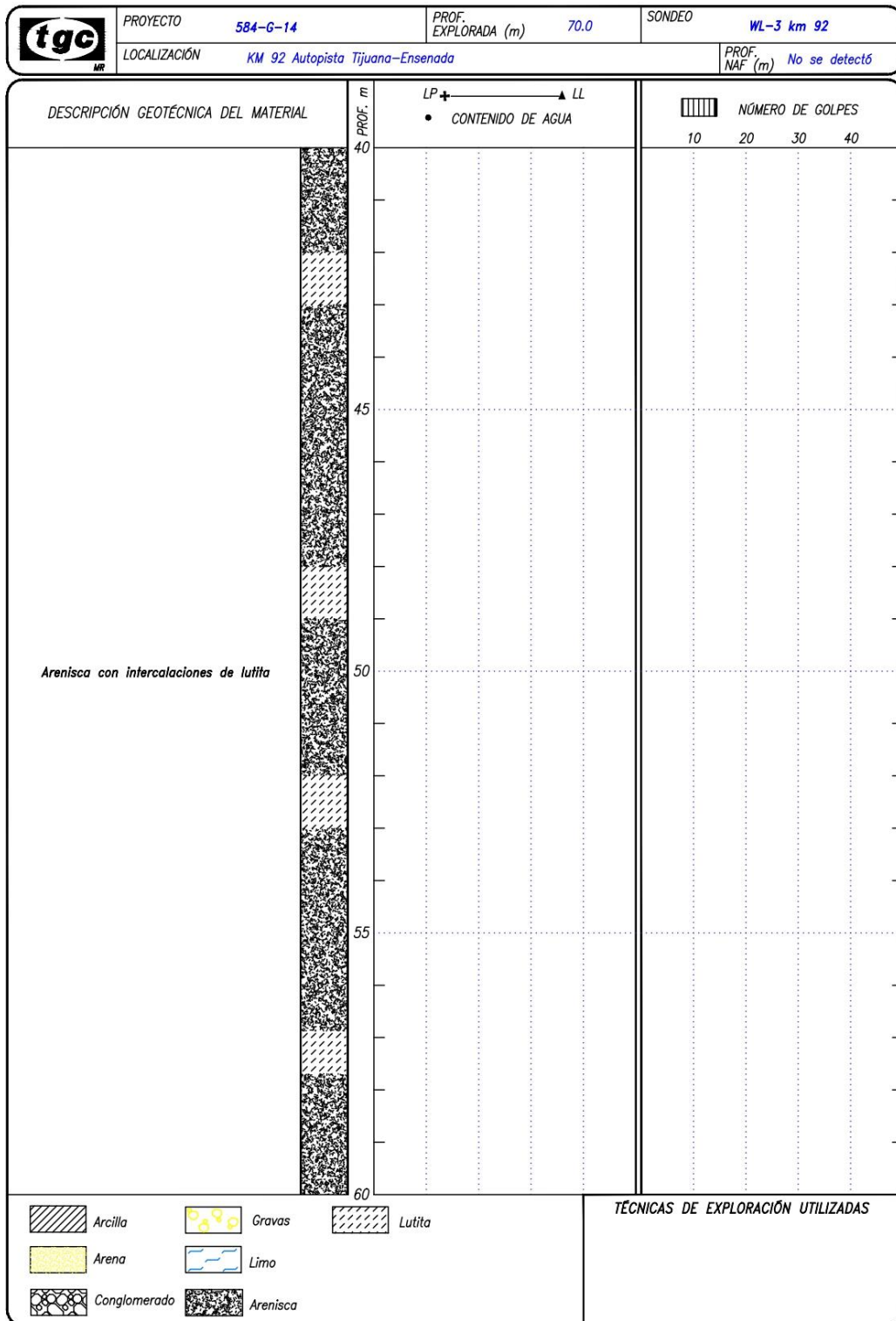


Figura 11.10. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 40 a 60 metros de profundidad.

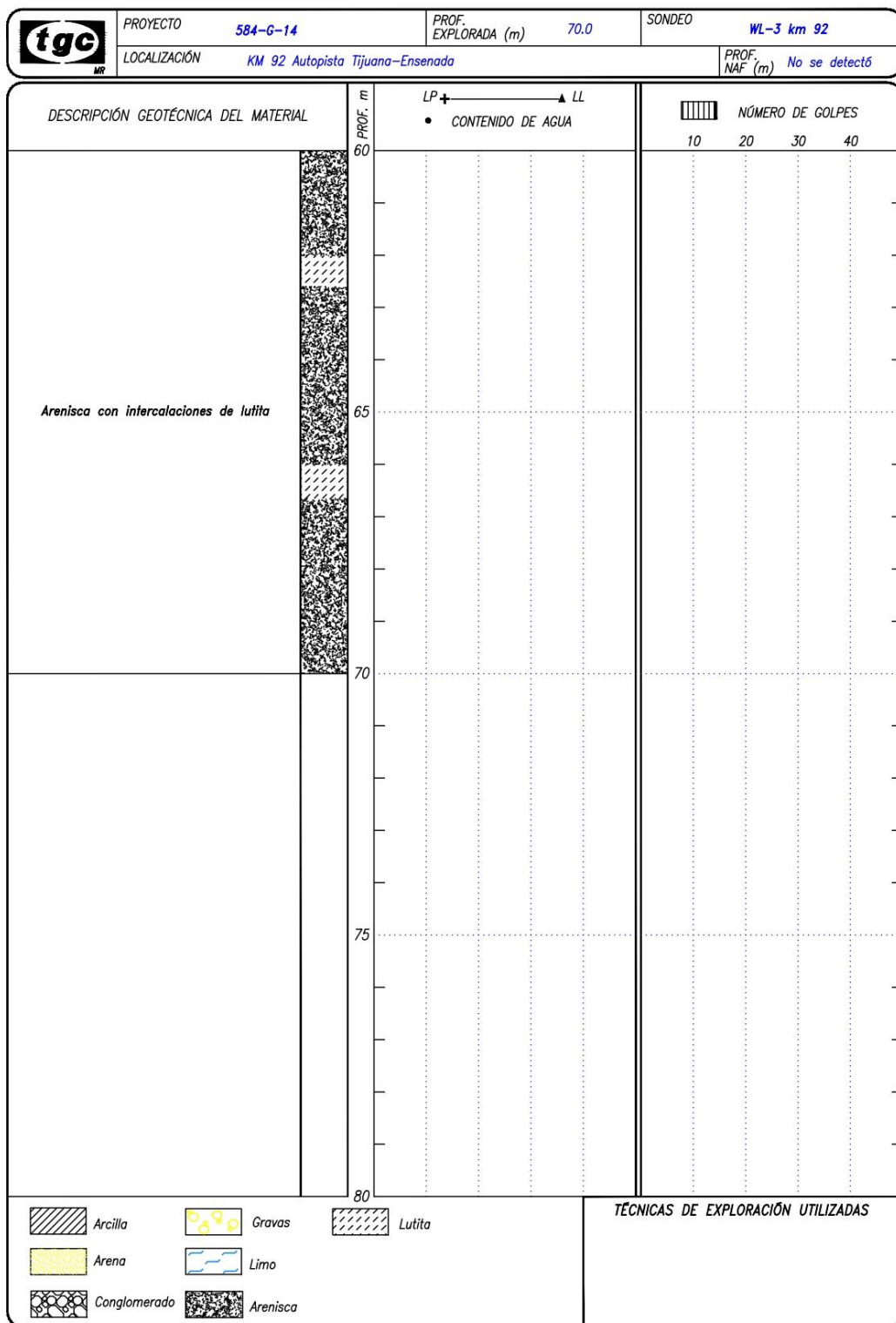


Figura 11.11. Estratigrafía WL-3 km 92+000, de 60 a 70 metros de profundidad.

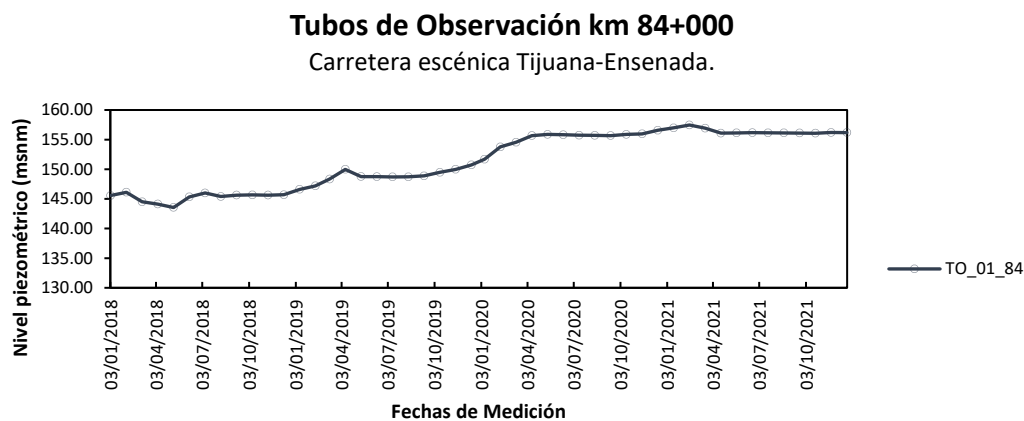


Figura 11.12. Series de tiempo tubos de observación km 84+000.

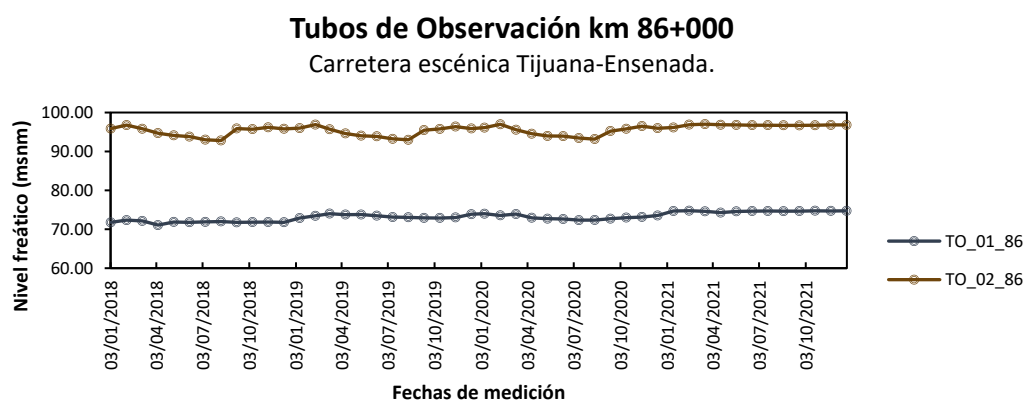


Figura 11.13. Series de tiempo tubos de observación km 86+000.

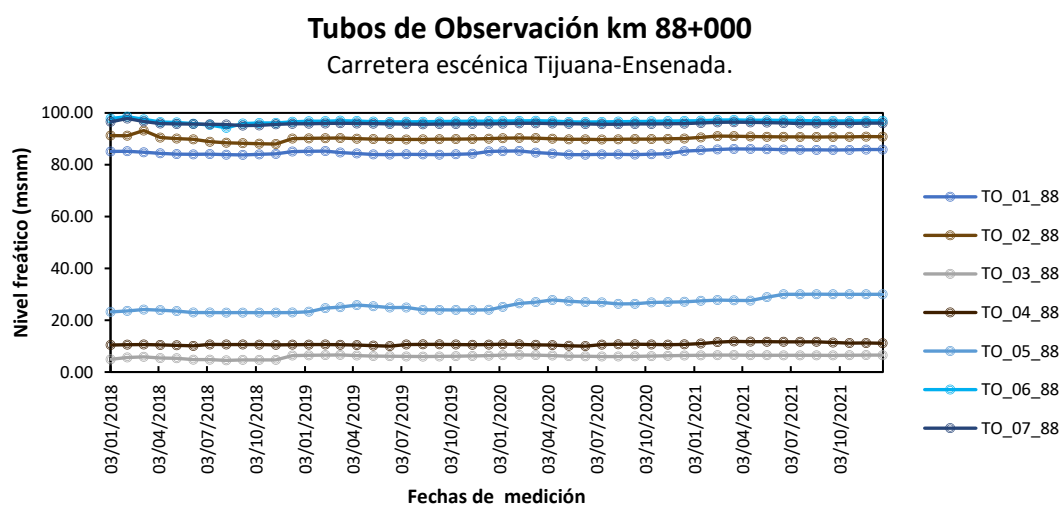


Figura 11.14. Series de tiempo tubos de observación km 88+000.

Tubos de observación km 90+000

Carretera escénica Tijuana-Ensenada.

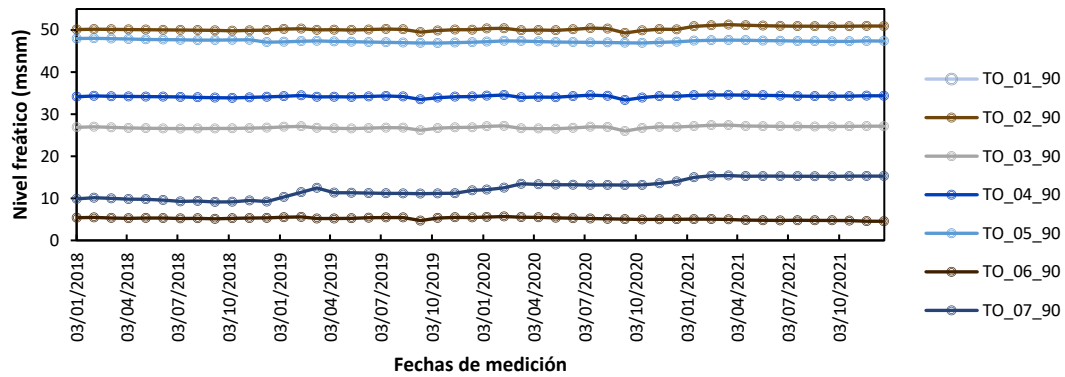


Figura 11.15. Series de tiempo tubos de observación km 90+000.

Tubos de observación km 91+000

Carretera escénica Tijuana-Ensenada.

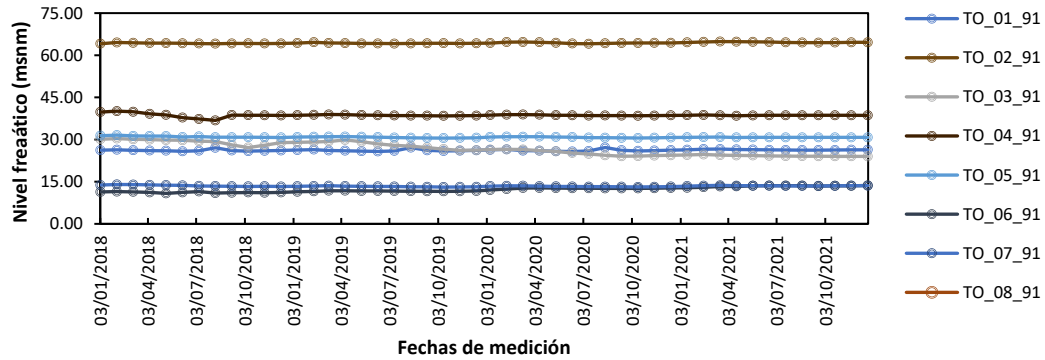


Figura 11.16. Series de tiempo tubos de observación km 91+000.

Tubos de observación km 92+000

Carretera escénica Tijuana-Ensenada.

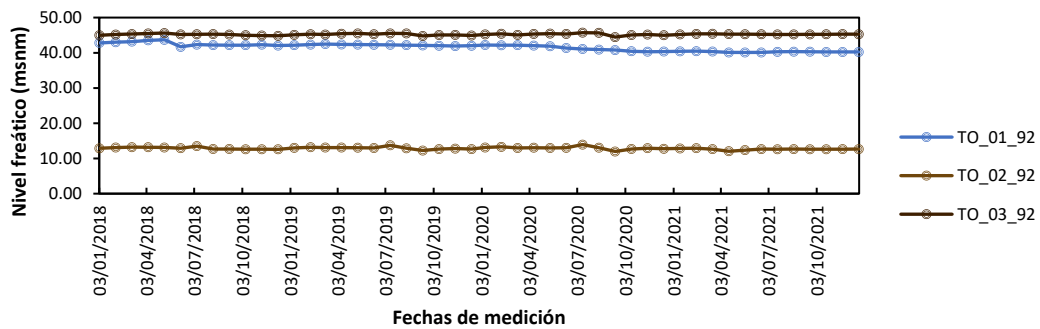


Figura 11.17. Series de tiempo tubos de observación km 92+000.

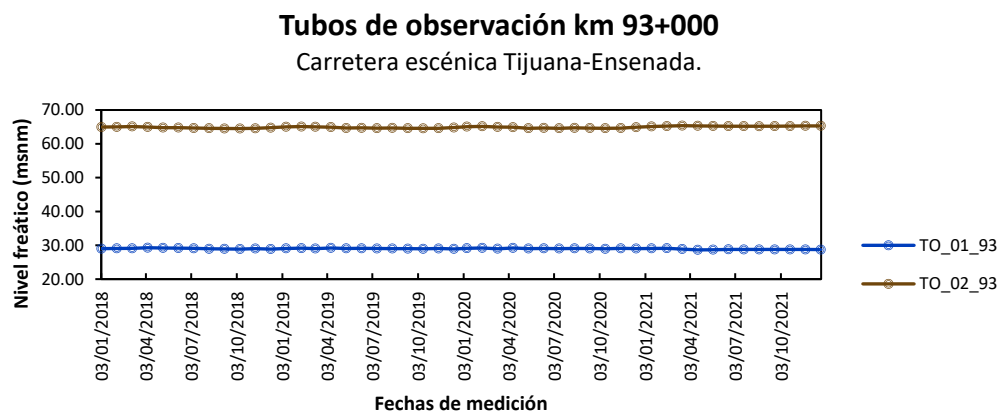


Figura 11.18. Series de tiempo tubos de observación km 93+000.

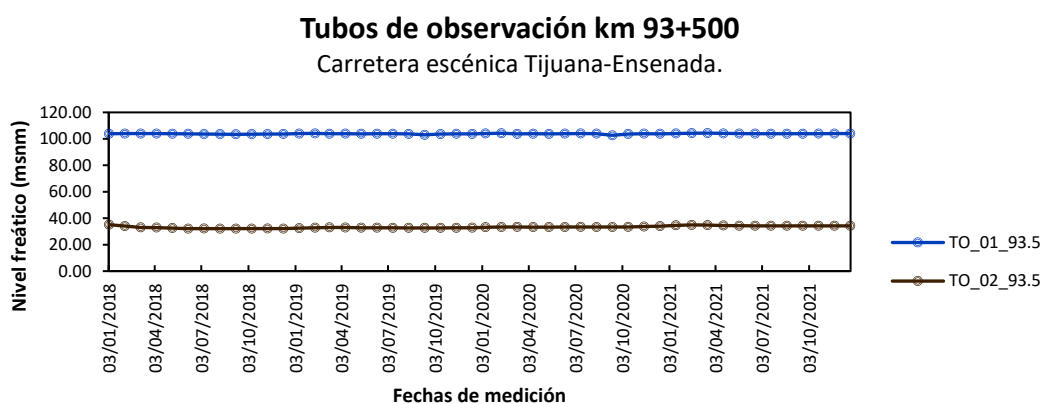


Figura 11.19. Series de tiempo tubos de observación km 93+500.

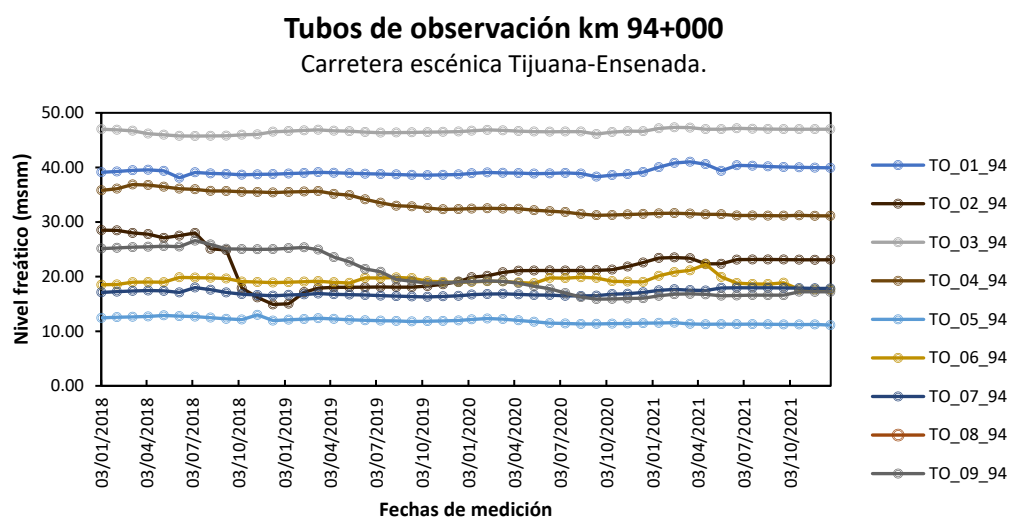


Figura 11.20. Series de tiempo tubos de observación km 94+000.

Tubos de observación km 95-96+000

Carretera escénica Tijuana-Ensenada.

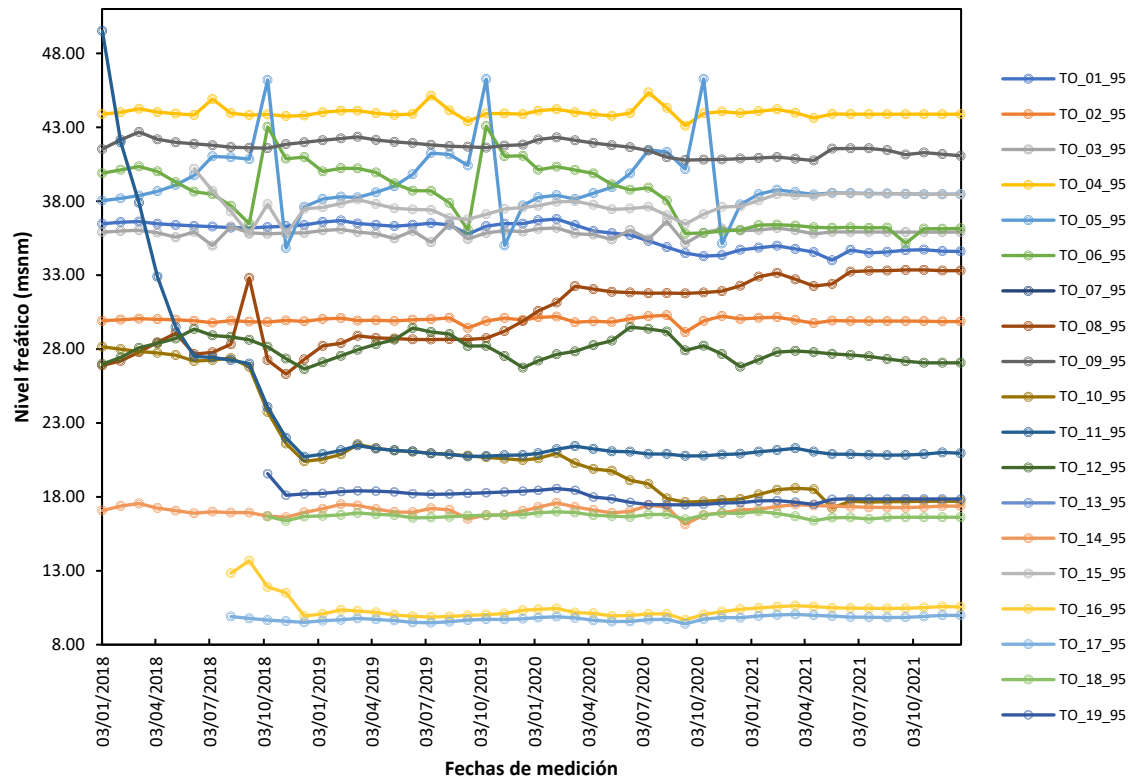


Figura 11.21. Series de tiempo tubos de observación km 95-96+000.

Tubos de observación km 98+000

Carretera escénica Tijuana-Ensenada.

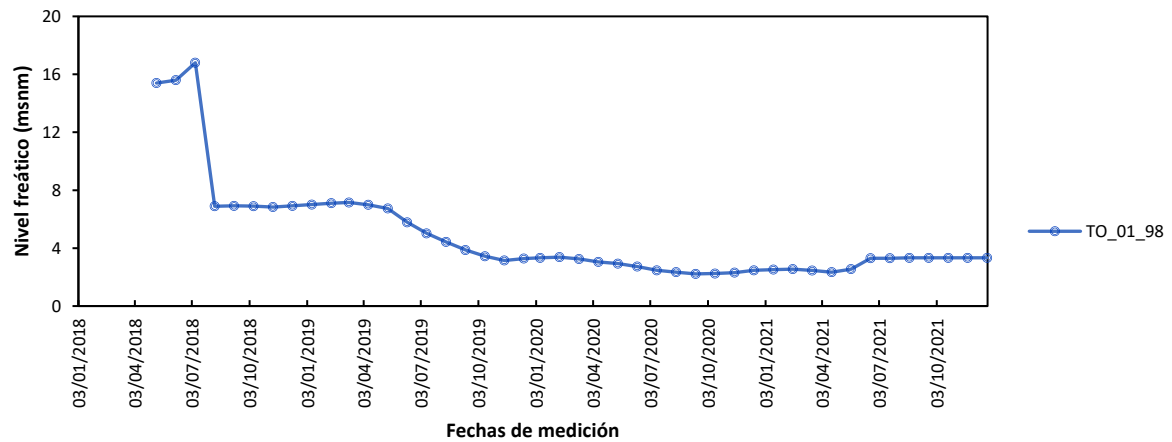


Figura 11.22. Series de tiempo tubos de observación km 98+000.

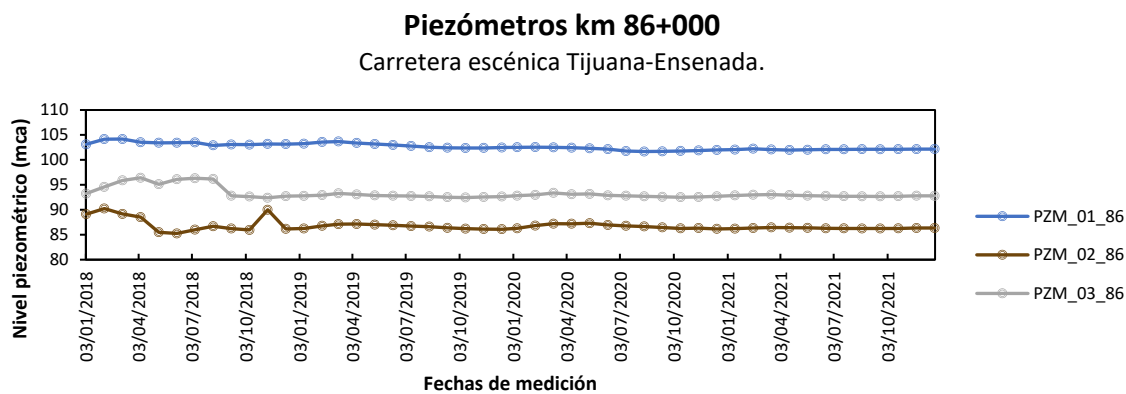


Figura 11.23. Series de tiempo piezómetros km 86+000.

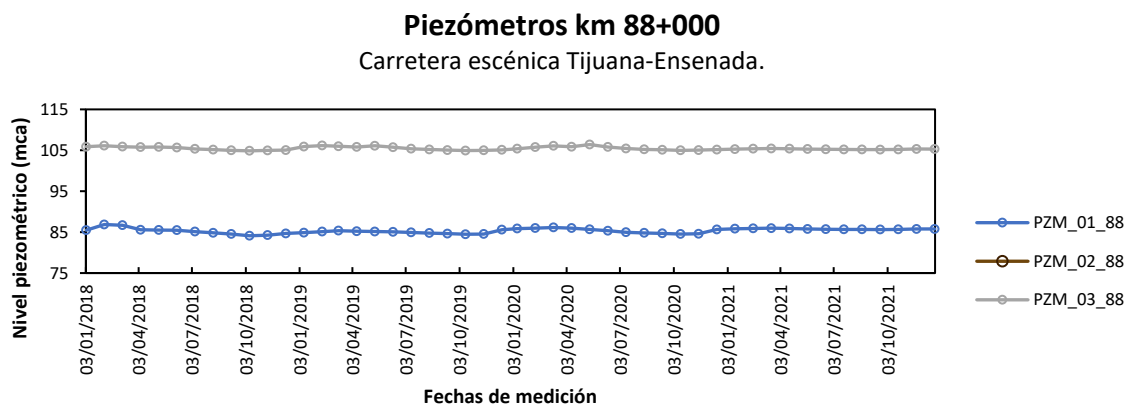


Figura 11.24. Series de tiempo piezómetros km 88+000.

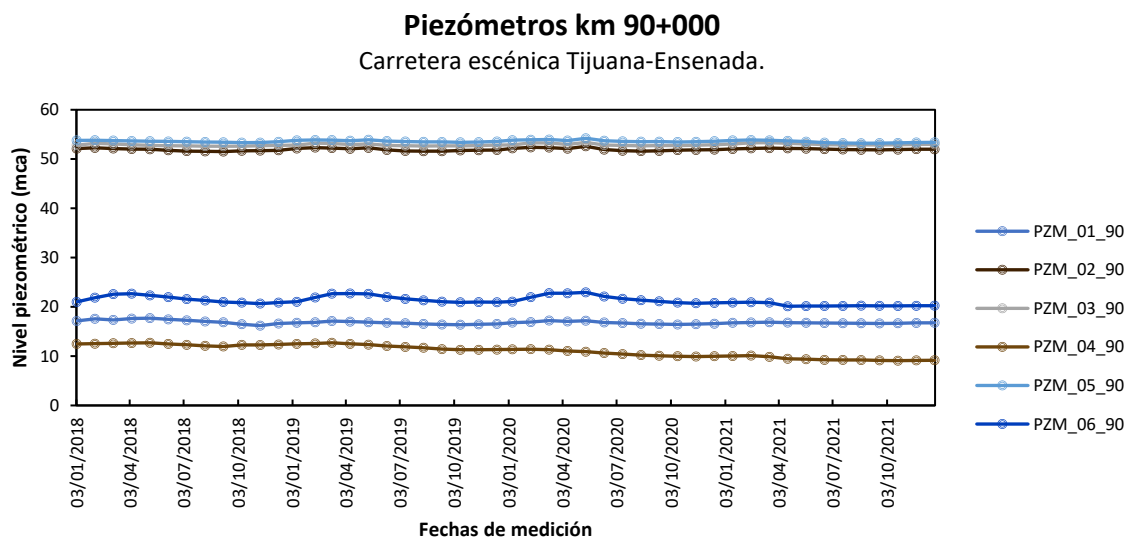


Figura 11.25. Series de tiempo piezómetros km 90+000.

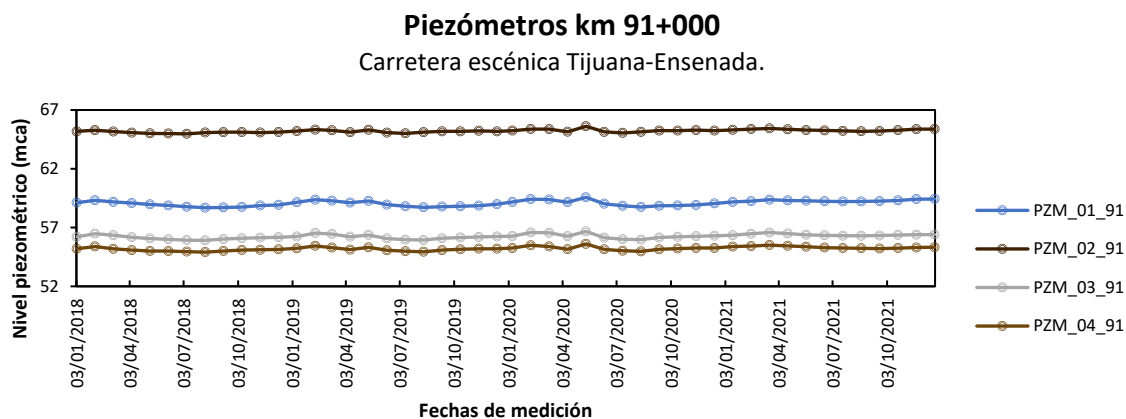


Figura 11.26. Series de tiempo piezómetros km 91+000.

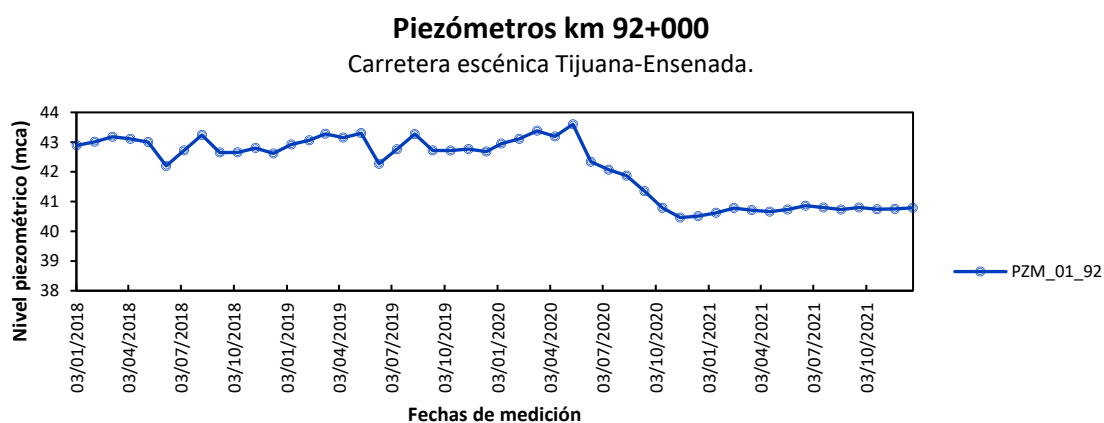


Figura 11.27. Series de tiempo piezómetros km 92+000.

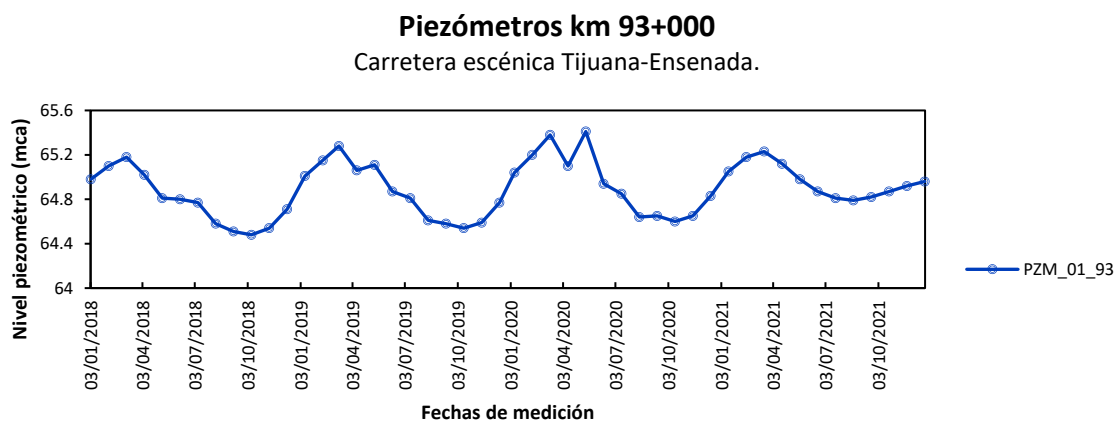


Figura 11.28. Series de tiempo piezómetros km 93+000.

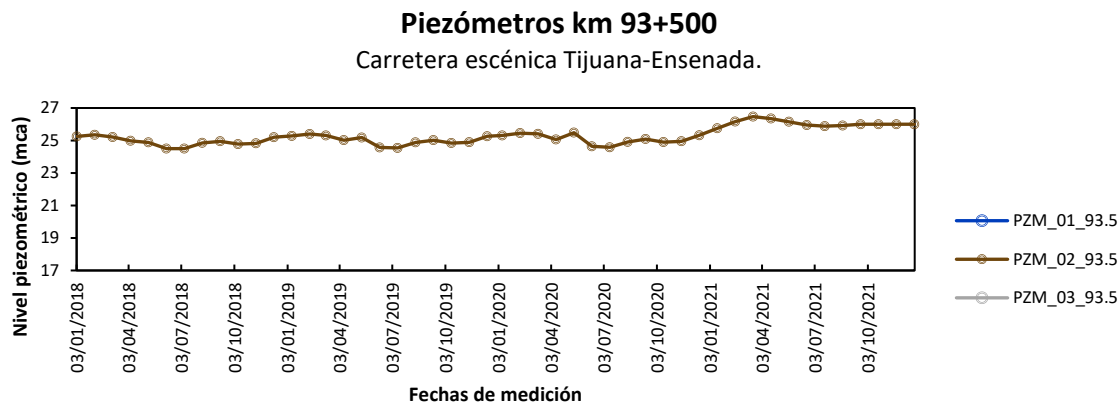


Figura 11.29. Series de tiempo piezómetros km 93+500.

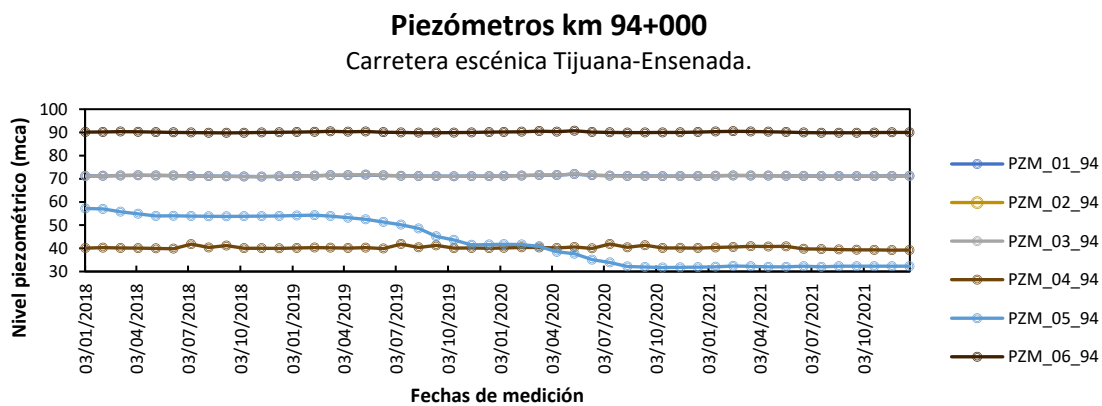


Figura 11.30. Series de tiempo piezómetros km 94+000.

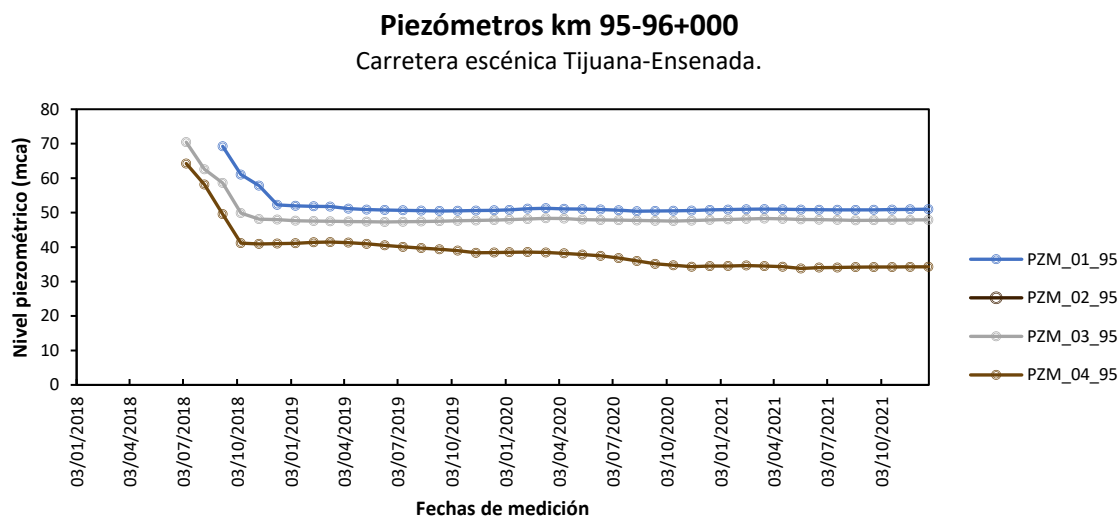


Figura 11.31. Series de tiempo piezómetros km 95-96+000.

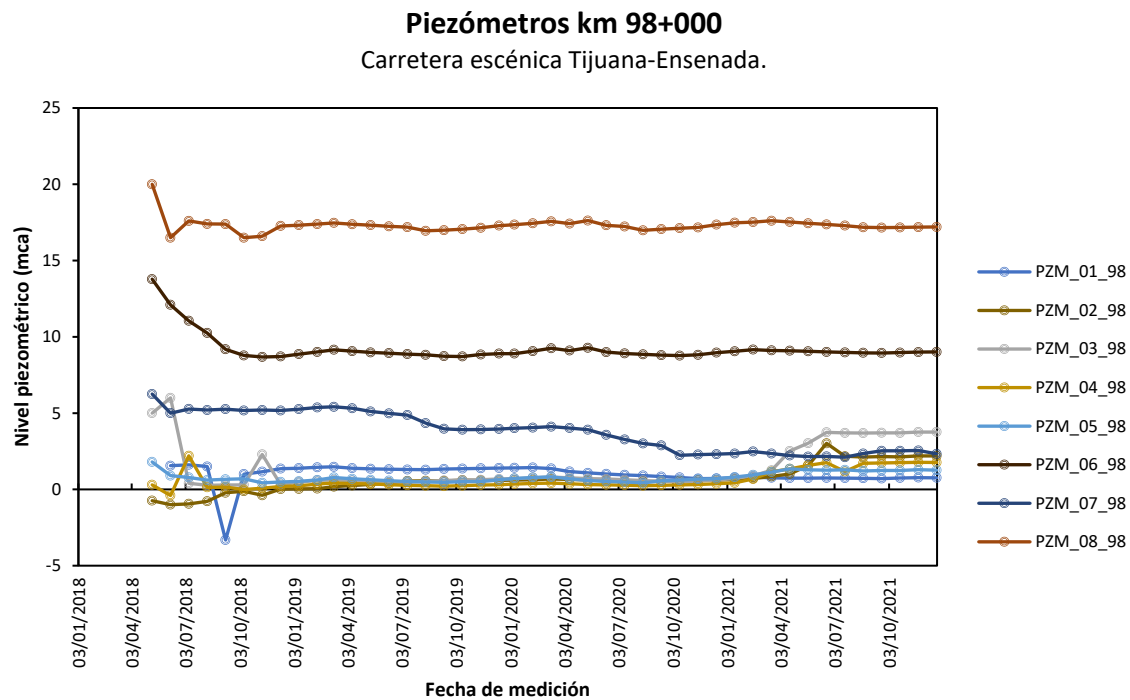


Figura 11.32. Series de tiempo piezómetros km 98+000.

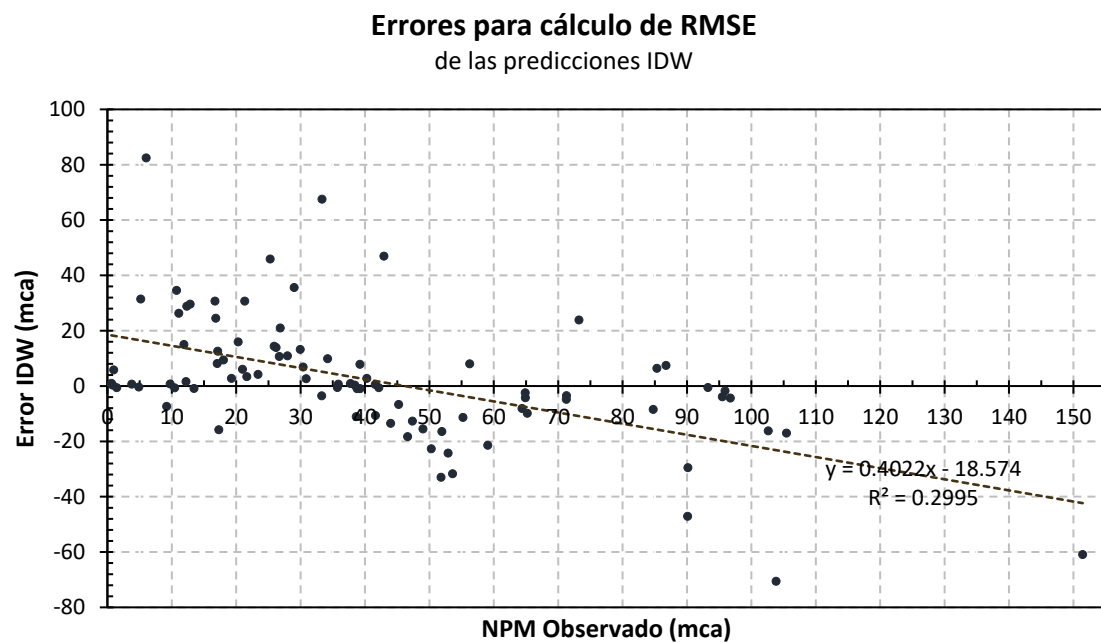


Figura 11.33. Relación de errores de RMSE para la predicción IDW.

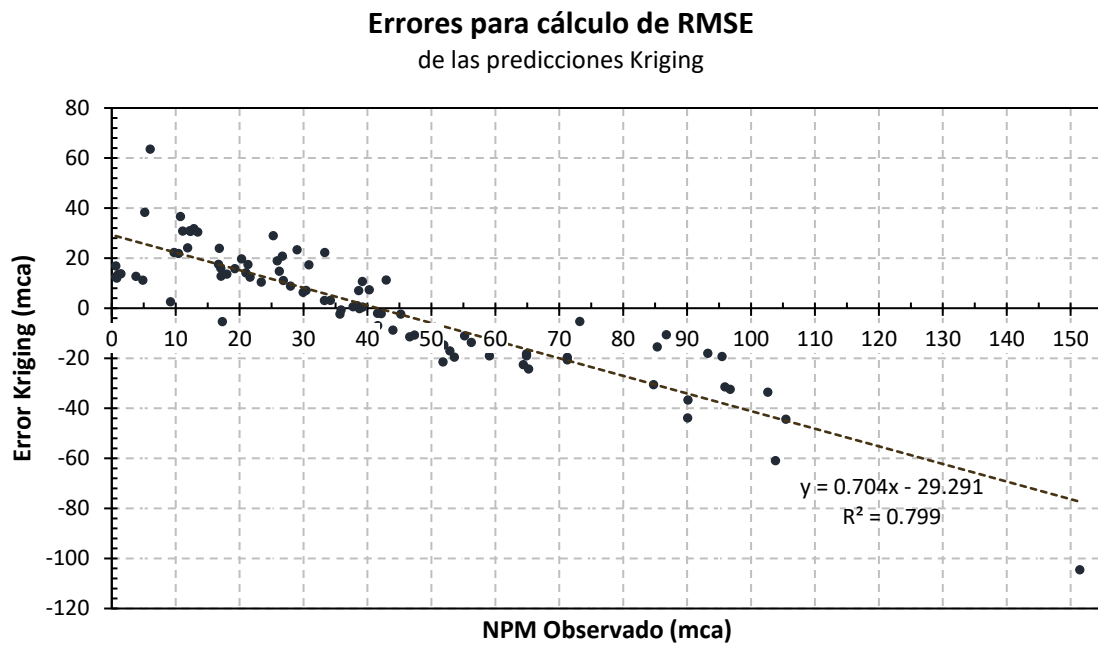


Figura 11.34. Relación de errores RMSE para la predicción Kriging.

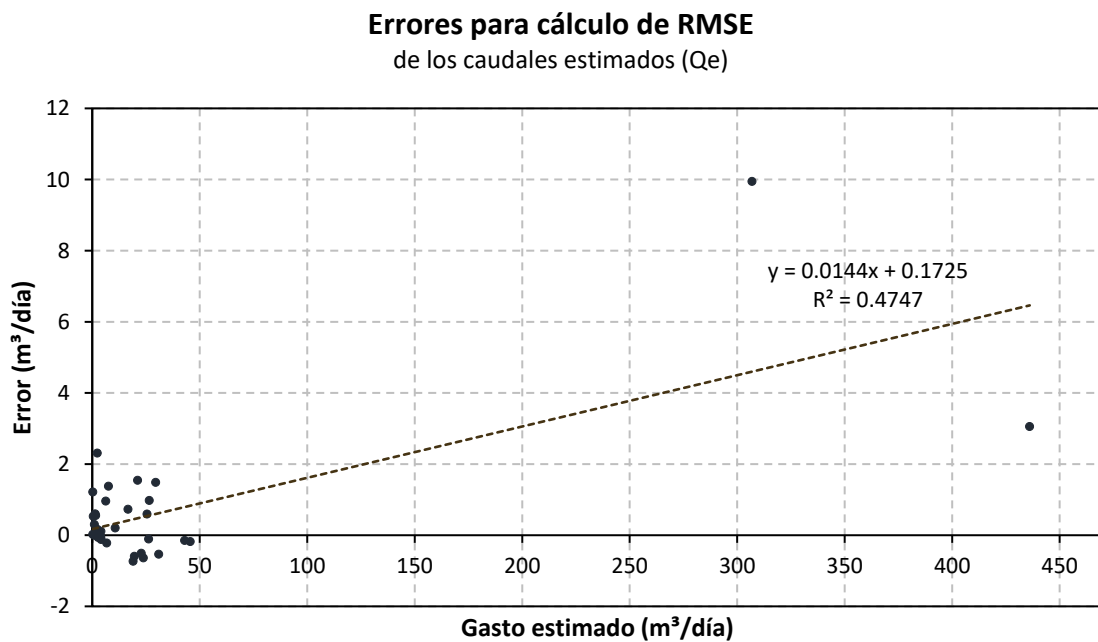


Figura 11.35. Relación de errores RMSE para la predicción de caudal estimado (Q_e).

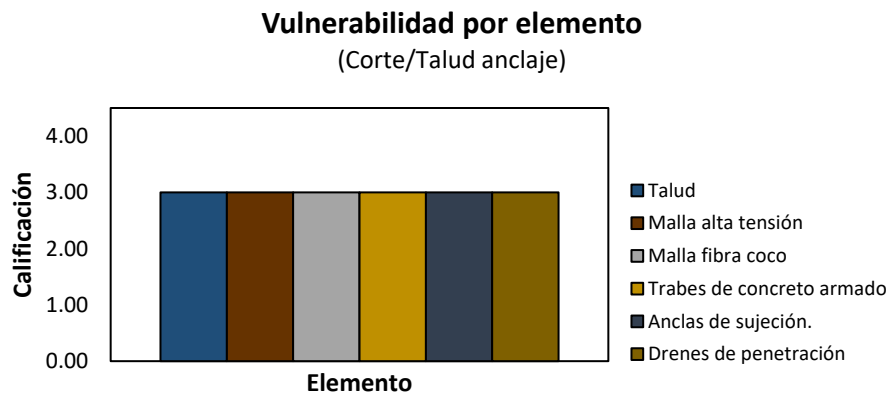


Figura 11.36. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de corte/talud anclaje.

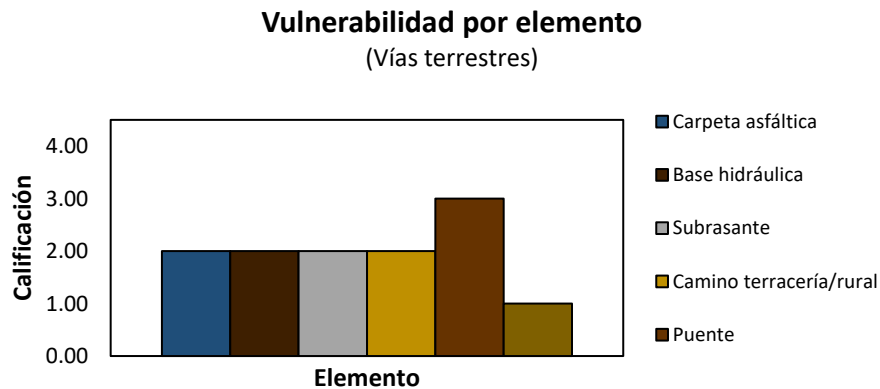


Figura 11.37. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de vías terrestres.

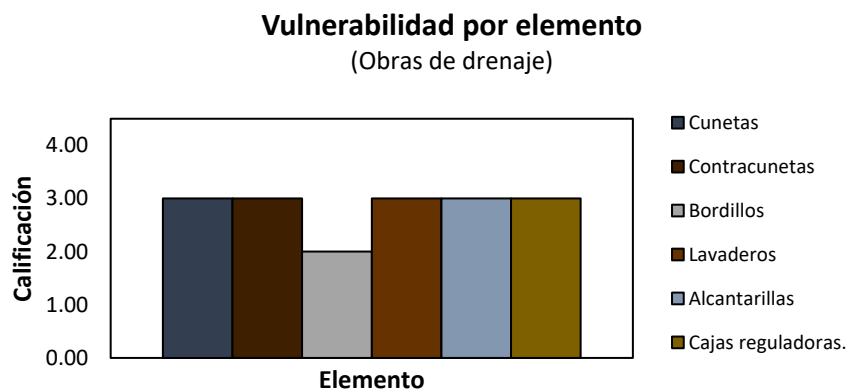


Figura 11.38. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de obras de drenaje.

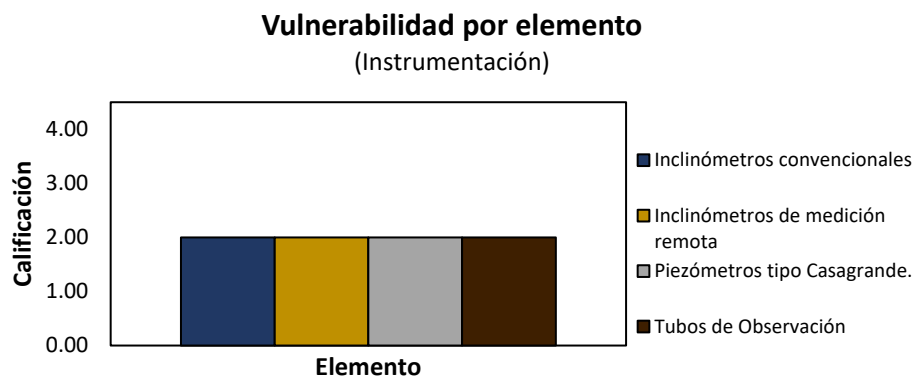


Figura 11.39. Calificación de vulnerabilidad por elemento en el sistema de instrumentación.

Tabla 11.1. Matriz de evaluación de vulnerabilidad estructural por elementos en exposición en la Bahía Salsipuedes, calificaciones.

Evaluación de vulnerabilidad estructural													
Sistema	Elemento	Desconchamiento o desprendimiento	Desplome	Socavación	Flechas o deformación	Corrosión	Agrietamientos	Daño por impacto	Estado de drenaje	Elemento faltante en la estructura	Estructura interior expuesta.	Calificación por elemento	Calificación del sistema
Corte/Talud Anclaje	Talud	4.00	1.00	3.00	3.00	4.00	4.00	0.00	2.00	0.00	0.00	3.00	3.00
	Malla alta tensión	0.00	0.00	0.00	3.00	3.00	0.00	3.00	0.00	2.00	0.00	3.00	
	Malla fibra coco	0.00	0.00	0.00	3.00	3.00	0.00	3.00	0.00	2.00	0.00	3.00	
	Trabes de concreto armado	3.00	3.00	0.00	3.00	3.00	3.00	1.00	0.00	0.00	3.00	3.00	
	Anclas de sujeción.	0.00	3.00	0.00	3.00	2.00	0.00	0.00	0.00	3.00	3.00	3.00	
	Drenes de penetración	0.00	2.00	3.00	1.00	4.00	1.00	0.00	4.00	0.00	0.00	3.00	
Vías terrestres	Carpeta asfáltica	3.00	1.00	0.00	2.00	2.00	4.00	2.00	2.00	0.00	3.00	2.00	2.00
	Base hidráulica	2.00	1.00	0.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.00	3.00	2.00	
	Subrasante	2.00	1.00	0.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.00	3.00	2.00	
	Camino terracería/rural	3.00	1.00	0.00	2.00	2.00	4.00	2.00	2.00	0.00	3.00	2.00	
	Puente	3.00	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	1.00	2.00	3.00	
	Senalamiento vertical y horizontal	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	4.00	0.00	3.00	0.00	1.00	
Obras de Estabilidad	Bermas	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	4.00	4.00	4.00
	Pedraplén	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	4.00	4.00	
	Sobreancho	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00	3.00	3.00	
	Galerías drenantes	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3.00	4.00	0.00	4.00	4.00	
	Zanjas drenantes	3.00	1.00	3.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.00	2.00	2.00	
	Pozos (Ranney, lumbreras y estabilizadores)	3.00	1.00	2.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.00	2.00	2.00	
	Trincheras	4.00	3.00	4.00	4.00	3.00	4.00	2.00	3.00	0.00	2.00	3.00	
Obras de Drenaje	Cunetas sección triangular	3.00	1.00	3.00	2.00	3.00	3.00	2.00	3.00	0.00	1.00	3.00	3.00
	Contracunetas sección triangular	3.00	1.00	3.00	2.00	3.00	3.00	2.00	3.00	0.00	1.00	3.00	
	Bordillos	3.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00	0.00	1.00	2.00	
	Lavaderos sección triangular.	3.00	1.00	3.00	2.00	3.00	3.00	2.00	3.00	0.00	1.00	3.00	
	Alcantarillas	3.00	1.00	4.00	2.00	4.00	3.00	2.00	3.00	0.00	1.00	3.00	
	Cajas reguladoras.	3.00	1.00	4.00	2.00	4.00	3.00	2.00	3.00	0.00	1.00	3.00	
Instrumentación	Inclinómetros convencionales	0.00	2.00	0.00	4.00	3.00	4.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	2.00
	Inclinómetros de medición remota	0.00	2.00	0.00	4.00	3.00	4.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	
	Piezómetros tipo Casagrande.	0.00	2.00	0.00	3.00	3.00	3.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	
	Tubos de Observación	0.00	2.00	0.00	3.00	3.00	3.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	
Construcciones Varias	Casas Móviles	1.00	0.00	0.00	0.00	2.00	1.00	3.00	2.00	1.00	2.00	2.00	3.00
	Casas convencionales	3.00	2.00	1.00	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00	1.00	3.00	2.00	
	Almacenes de construcción	3.00	2.00	2.00	3.00	2.00	3.00	1.00	2.00	1.00	3.00	3.00	
	Caseta de Cobro	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00	1.00	3.00	3.00	
	Restaurant Cuatro Cuatros	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00	1.00	3.00	2.00	