

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería**

**Tesis para obtener el grado de:**

Maestra en Ingeniería

**Título de tesis:**

“Modelización dinámica para el manejo adaptativo en sitios de restauración, caso de estudio: El Chaussé, Delta del Río Colorado, México”

**Presenta:**

Juliana Franco Gutiérrez

**Director:**

Dr. Marcelo Antonio Lomeli Banda

**Codirectora:**

Dra. Concepción Carreón Diazconti

**Mexicali, Baja California, diciembre de 2025**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres, que siempre me han impulsado para alcanzar mis metas y han sido una inspiración para mi formación. Gracias por su amor y cariño*

*A mis hermanos, en especial **Natalia**, que, a pesar de la distancia siempre me hicieron sentir acompañada*

*A **Rafael**, quien con mucho amor ha sido mi soporte y me ha inspirado, aconsejado y motivado en mi camino profesional*

*A mis amigas y amigos, que en este proceso han sido un pilar y me han brindado palabras de aliento siempre que lo he necesitado*

*A **Restauremos El Colorado** por apoyar esta investigación, **al equipo de hidrología** por el trabajo de campo realizado y en especial a **Adrian**, quien siempre me brindó su apoyo, sus conocimientos y su tiempo*

*A la **Facultad de Ingeniería de la UABC** por brindarme esta oportunidad; a mi director de tesis **Dr. Marcelo Lomelí**, por creer en mí, por apoyarme y acompañarme; y a mi codirectora de tesis **Dra. Concepción Carreón**, quien me dedicó su tiempo, me compartió sus conocimientos y me aconsejó a lo largo de este camino*

*Al **Dr. Osvaldo Leyva** quien dedicó su tiempo para enseñarme, compartió sus conocimientos y me brindó la asesoría necesaria para desarrollar el modelo*

*Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías** por otorgarme la beca nacional no. 1297873*

## Resumen

El Río Colorado es uno de los ríos más regulados del mundo, lo que ha provocado alteraciones significativas en su ecosistema. Al tratarse de una cuenca binacional, la restauración ecológica en el Delta del Río Colorado representa un tema de interés tanto para México como para Estados Unidos, así como para organizaciones de la sociedad civil (ONG). El Chaussé es un sitio que forma parte de los esfuerzos, por lo que se desarrolló un modelo dinámico que integró variables hidrológicas interdependientes y su relación con la vegetación para contribuir a la formulación de estrategias para la gestión del recurso hídrico dentro de un esquema de manejo adaptativo. Se utilizaron registros continuos de la elevación del agua superficial y subterránea, volúmenes de riego y variables climatológicas correspondientes al periodo octubre de 2023 a septiembre de 2024. La recarga y descarga subterránea se estimaron mediante el método de fluctuación del nivel freático (WTFM), considerando áreas de influencia. Se establecieron relaciones entre las variables y con esto se construyó un modelo dinámico con resolución diaria en el software Stella Professional, para evaluar escenarios de reducción en los volúmenes de entrada como parte de un plan de manejo adaptativo. Los resultados indican que los eventos de riego generan incrementos inmediatos en la elevación del nivel freático y en los volúmenes de recarga; en contraste, la reducción en la frecuencia de las entregas de agua provoca disminuciones en estas variables. El modelo desarrollado es una herramienta útil para generar estrategias para la gestión del recurso hídrico en el sitio, al permitir evaluar distintos escenarios de manejo y su impacto en la dinámica hidrológica del sistema.

## Índice de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Hipótesis .....	4
1.2. Objetivo.....	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos específicos .....	5
2. Antecedentes.....	6
2.1. Área de estudio .....	12
2.1.1. Manejo Hídrico en El Chaussé .....	16
3. Marco teórico.....	19
3.1. Agua subterránea .....	19
3.1.1. Nivel freático .....	19
3.1.2. Carga hidráulica.....	19
3.1.3. Gradiente hidráulico y direcciones de flujo .....	20
3.1.4. Piezómetro .....	21
3.1.5. Sensores de presión.....	22
3.1.6. Método de la fluctuación del nivel freático .....	22
3.2. Agua superficial.....	24
3.2.1. Limnómetro .....	24
3.2.2. Caudal .....	25
3.2.3. Velocímetro acústico Doppler .....	26
3.2.4. Perfilador acústico Doppler .....	27
3.2.5. Evaporación directa .....	29
3.3. Topografía.....	30
3.3.1. Levantamiento topográfico .....	30
3.3.2. Nivelación topográfica.....	31
3.4. Modelos Dinámicos .....	32
3.4.1. Stella© .....	33
3.5. Manejo adaptativo.....	35
4. Materiales y Métodos .....	37
4.1. Agua superficial.....	37

4.1.1. Volumen de entrada .....	37
4.1.2. Volumen de salida.....	37
4.2. Suelo .....	40
4.3. Agua subterránea .....	41
4.3.1. Recarga y descarga subterránea .....	46
4.4. Climatología.....	46
4.5. Vegetación .....	47
4.6. Modelo conceptual del sistema dinámico de “El Chaussé” .....	47
4.7. Configuración del modelo en Stella.....	49
4.7.1. Matemización del modelo .....	50
4.7.2. Calibración y validación del modelo .....	54
4.8. Escenarios .....	54
4.9. Análisis de los resultados y generación de estrategias de manejo adaptativo .....	55
5. Resultados.....	56
5.1. Balance.....	56
5.1.1. Agua superficial .....	56
5.1.2. Suelo .....	58
5.1.3. Agua subterránea .....	60
5.1.4. Climatología.....	65
5.2. Modelo dinámico .....	69
5.2.1. Matemización del modelo .....	70
5.2.2. Calibración y validación del modelo .....	71
5.2.3. Escenarios de reducción de volúmenes de entrada .....	77
5.3. Conclusiones y discusión.....	86
5.4. Recomendaciones .....	89
6. Bibliografía.....	91

## Índice de figuras

Figura 1. Cuenca del Río Colorado.....	6
Figura 2. Distrito de Riego 014 Río Colorado.....	7
Figura 3. Localización de los Reaches de monitoreo en el Delta.....	10
Figura 4. Localización del El Chaussé.....	14
Figura 5. Distribución de la vegetación en el área de estudio.....	15
Figura 6. Compuerta Central en El Chaussé.....	17
Figura 7. Área inundable de El Chaussé.....	18
Figura 8. Corte transversal de un piezómetro, modificado de ASTM (2020).....	21
Figura 9. Limnómetro instrumentado en El Chaussé.....	24
Figura 10. Método velocidad-área, tomado de SonTek® (2019).....	25
Figura 11. FlowTracker 2.....	26
Figura 12. RiverSurveyor S5.....	27
Figura 13. Corte transversal compuerta central, modificado de Chow (1959).....	28
Figura 14. Diagrama de flujo con entradas y salidas en Stella.....	35
Figura 15. Esquema de manejo adaptativo, Restaremos El Colorado, 2024.....	36
Figura 16. Medición de flujo en el puente de aforo en CC.....	37
Figura 17. Limnómetros El Chaussé.....	38
Figura 18. Monitoreo de agua subterránea.....	42
Figura 19. Red piezométrica El Chaussé.....	43
Figura 20. Modelo conceptual del área de estudio.....	48
Figura 21. Entradas y salidas superficiales del sistema.....	57
Figura 22. Volumen de entrada y elevación del agua superficial.....	58

Figura 23. Tipo de suelo en el área de estudio a diferentes profundidades .....	59
Figura 24. Rendimiento específico calculado para los suelos del área de estudio .....	60
Figura 25. Elevaciones del nivel freático observadas .....	61
Figura 26. Elevaciones del nivel freático promedio y direcciones de flujo.....	62
Figura 27. Áreas de influencia para la estimación de recarga y descarga subterránea .....	63
Figura 28. Recarga y descarga medidas.....	64
Figura 29. Volumen diario de entrega, recarga y descarga 2023-2024 .....	65
Figura 30. Evaporación diaria y volumen mensual .....	67
Figura 31. Configuración del modelo en Stella .....	69
Figura 32. Elevación del meandro medida-simulada.....	72
Figura 33. Recarga medida-simulada .....	72
Figura 34. Descarga subterránea medida-simulada .....	73
Figura 35. Volumen de salida superficial medido-simulado .....	74
Figura 36. Volúmenes de entrada, salida y ENF estado inicial .....	76
Figura 37. Volúmenes de entrada, salida y ENF escenario 1 .....	79
Figura 38. Volúmenes de entrada, salida y ENF escenario 2 .....	82
Figura 39. Volúmenes de entrada, salida y ENF del escenario 3 .....	85

## Índice de tablas

Tabla 1. Rangos de elevaciones y vegetación.....	16
Tabla 2. Elementos básicos Stella.....	34
Tabla 3. Coordenadas banco de nivel Mojo7.....	39
Tabla 4. Coordenadas limnímetros Dique Norte (DN) y Dique Sur (DS).....	39
Tabla 5. Ajustes de función de gasto en función de la elevación de DN.....	40
Tabla 6. Ajustes de función ecuaciones de gasto en función de la elevación de DS.....	40
Tabla 7. Rendimiento específico según el tipo de suelo, (Johnson, 1967). ....	40
Tabla 8. Localización de los piezómetros de monitoreo de agua subterránea.....	44
Tabla 9. Ajustes de función variables meteorológicas.....	65
Tabla 10. Evaporación directa meandro de El Chaussé.....	66
Tabla 11. Balance en El Chaussé 2023-2024.....	68
Tabla 12. Parámetros estadísticos de la calibración del modelo.....	71
Tabla 13. Balance del estado inicial propuesto.....	75
Tabla 14. Balance escenario 1 .....	78
Tabla 15. Balance escenario 2 .....	81
Tabla 16. Balance escenario 3 .....	84



## 1.Introducción

La restauración del ecosistema ribereño en el Delta del Río Colorado (Delta) es de interés binacional debido al deterioro provocado por las alteraciones en el régimen hidrológico del Río Colorado (RC), la propagación de especies exóticas invasoras y la sobreexplotación del agua (Schlatter et al., 2017). El RC es uno de los ríos más regulados en el mundo, su flujo se ve interrumpido por más de diez presas de gran tamaño y 80 derivaciones que extraen el agua para diversos usos, y es desviado en su totalidad antes de llegar al Delta. Es por esto que se han gestionado acuerdos entre Estados Unidos y México para mejorar las condiciones ecológicas del RC y su Delta (González-Sargas et al., 2024; Luecke et al., 1999; Ramírez-Hernández et al., 2015).

Debido a la importancia que históricamente ha representado el RC para los usuarios, en el año de 1944 se estableció el “Tratado Sobre Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América”, firmado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas de México (CILA) y de los Estados Unidos (IBWC por sus siglas en inglés). En el Tratado se establecieron las condiciones y el volumen de agua que le corresponde a cada uno de los países involucrados (CILA, 1944) y este marcó el inicio de la colaboración binacional para la gestión del agua del RC.

Sin embargo, no fue hasta la firma del Acta 319, en el año 2012, cuando se destinó un volumen exclusivamente para el medio ambiente. Durante las negociaciones, los comisionados de la CILA y el IBWC refirieron su interés para asegurar el ecosistema del RC, lo que llevó a la firma del Acta 319. En esta, se asignaron 195 hm<sup>3</sup> de agua destinada al medio ambiente por medio de los eventos de Flujo Pulso y de Flujo Base, que serían entregados por México, Estados Unidos y una coalición de Organizaciones no Gubernamentales (ONG), en un plazo de cinco años posteriores a la firma del Acta (CILA, 2012).



Una vez concluida la vigencia del Acta 319, dando continuidad a los esfuerzos realizados para incluir al medio ambiente como un usuario del RC, en el año 2017 entró en vigor el Acta 323, en la que se asignaron 259 hm<sup>3</sup> de flujos ambientales y se destinaron fondos para el monitoreo y para la restauración del Delta (IBWC, 2017). Ha sido a través de concesiones federales de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que las ONG han restaurado poco más de 540 Ha de hábitat ribereño y desértico, generando parches de vegetación que funcionan como zonas de descanso para aves migratorias y especies de fauna endémica (Alianza Revive el Río Colorado, 2024).

Los modelos dinámicos (MD) (Forrester, 1958) permiten analizar sistemas complejos de variables interdependientes que van cambiando a través del tiempo. Han sido ampliamente utilizados para el análisis de datos hidrológicos y como herramientas de toma de decisiones, así como para el manejo del recurso hídrico (Barati et al., 2019; Nassery et al., 2017). Se utilizan para estudiar la evolución de los ecosistemas a través del tiempo, considerando variables físicas, biológicas, hidrológicas y otras que puedan interactuar en el sistema.

Por otro lado, el manejo adaptativo es un método con un enfoque flexible, dinámico y sistemático que sirve para gestionar sistemas naturales complejos, y que, en vez de aplicar soluciones fijas, implica un proceso continuo de aprendizaje y ajuste. El manejo adaptativo se basa en un esquema secuencial en el cual se llevan a cabo la planeación, la implementación, el monitoreo de las variables involucradas y la evaluación de estas; posteriormente, se adapta el plan a las condiciones cambiantes y a los resultados obtenidos durante el monitoreo de las variables del sistema que se está evaluando (Bormann et al., 1999; Holling, 1978; Williams & Brown, 2014).

Como parte de los esfuerzos de restauración en el Delta, este estudio tiene por objetivo desarrollar un modelo dinámico que integre variables interdependientes de la hidrología, así como



su relación con la vegetación en el sitio de restauración El Chaussé, y que contribuya a la formulación de estrategias de gestión del recurso hídrico dentro de un plan de manejo adaptativo.



### **1.1.Hipótesis**

Un modelo dinámico del sitio de restauración El Chaussé que incluya variables hidrológicas y su relación con la vegetación, contribuirá en la implementación de estrategias de gestión del recurso hídrico como parte de un plan de manejo adaptativo que permita preservar el ecosistema ante posibles escenarios de reducciones de volúmenes de agua.



## **1.2.Objetivo**

### ***1.2.1.Objetivo General***

Desarrollar un modelo dinámico que integre variables interdependientes de la hidrología y la vegetación del sitio de restauración El Chaussé y que contribuya a la generación de estrategias de gestión del recurso hídrico como parte de un plan de manejo adaptativo, ante posibles escenarios de reducción en los volúmenes de entrada al sistema.

### ***1.2.2.Objetivos específicos***

- Recopilar la información sobre la hidrología superficial, subterránea, del clima y variables involucradas durante un año hidrológico.
- Desarrollar un modelo dinámico que integre las variables interdependientes de la hidrología y la vegetación de El Chaussé.
- Evaluar escenarios de reducción en los volúmenes de entrada al sistema.
- Proponer estrategias de manejo adaptativo para eficientizar el uso del agua en el sitio de restauración.

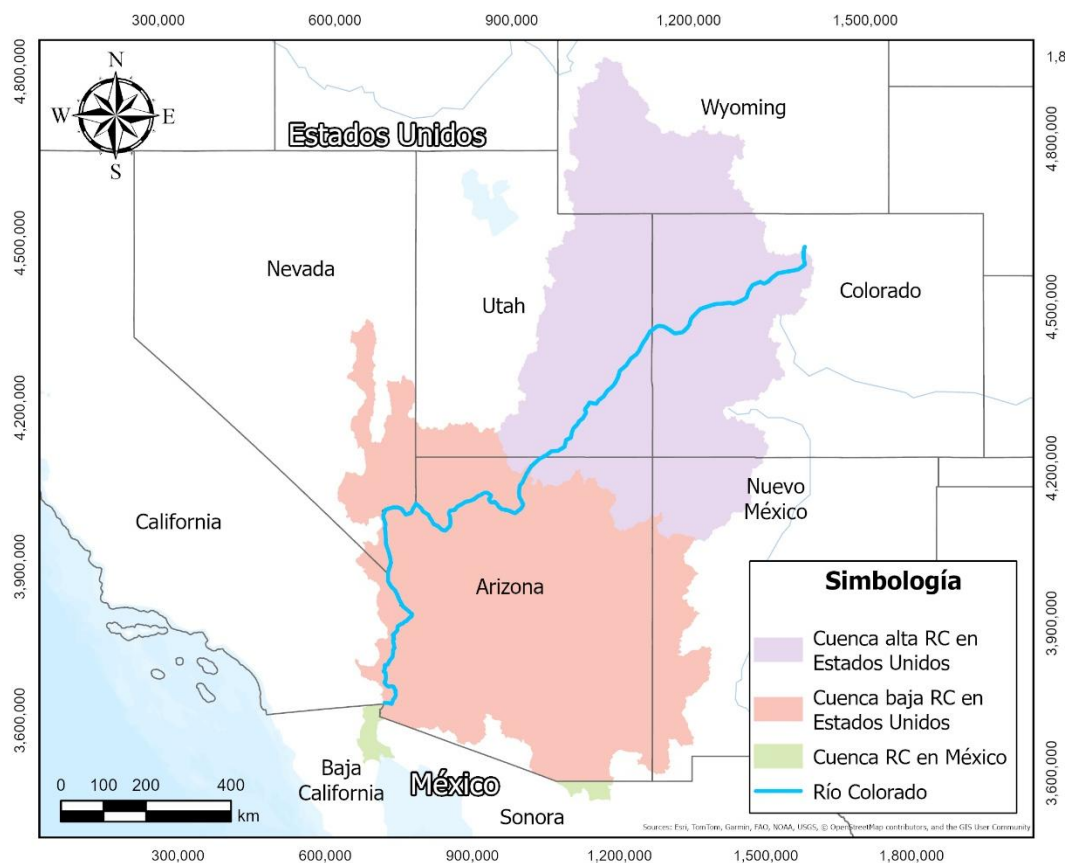


## 2. Antecedentes

El Río Colorado nace en las montañas rocosas de Colorado y Wyoming en Estados Unidos, donde recorre 2,140 km de noreste a suroeste, pasando por los Estados de Utah, Nevada, California, Nuevo México y Arizona (Figura 1) (Benke & Cushing, 2011). Posteriormente, ingresa a México por el límite entre los Estados de Baja California y Sonora, y recorre 160 km hasta desembocar en el Golfo de California (Samaniego López, 2008).

**Figura 1.**

*Cuenca del Río Colorado*



Derivado de la construcción de grandes estructuras hidráulicas para la captación y distribución del agua a lo largo del cauce del RC durante el siglo XX y de que a partir de 1944 México empezó a recibir el agua del Tratado por la Presa Morelos y el canal Sánchez Mejorada,

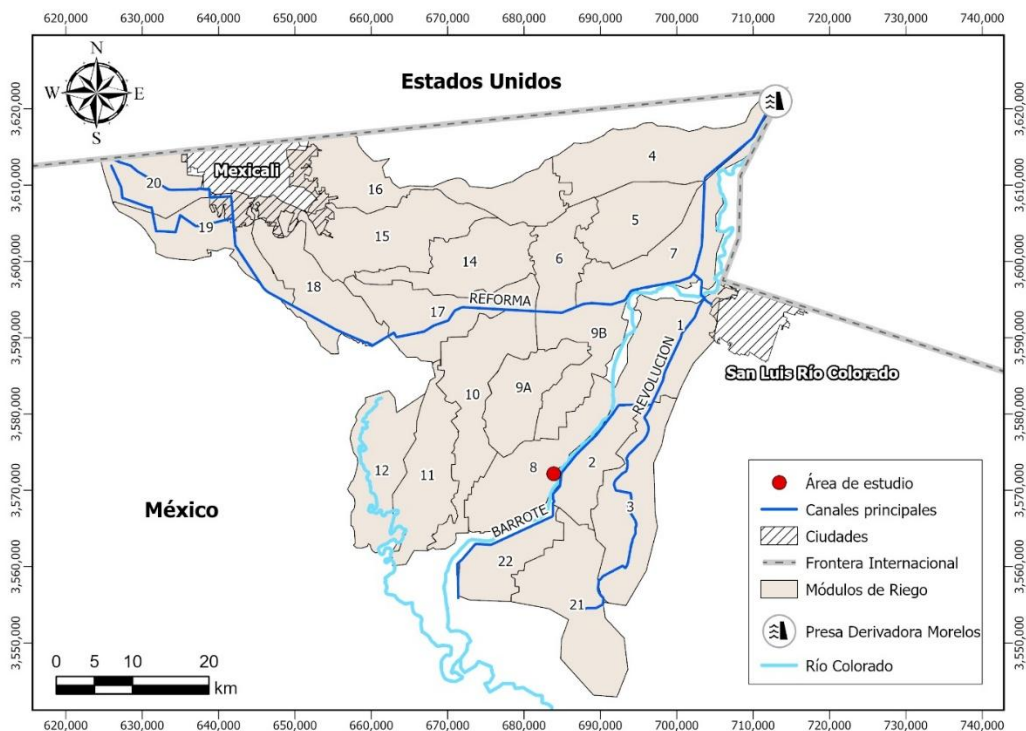


el régimen hidrológico del río se ha ido alterando, provocando un deterioro en el ecosistema, que se traduce en pérdidas del hábitat ribereño y de especies de fauna (Luecke et al., 1999; Secretaría de Relaciones Exteriores, 2024).

El volumen total que recibe México se deriva hacia la red de canales del Distrito de Riego 014 (DR014) y se entrega a usuarios agrícolas, domésticos e industriales (IMTA, 2020). El Valle de Mexicali tiene una superficie de cultivo de 171,135 Ha, siendo una de las superficies agrícolas más grandes de México (CONAGUA, 2019). El agua para la agricultura en esta zona depende principalmente del RC y su distribución se gestiona mediante la infraestructura del DR014 (Figura 2). De los 1,850 hm<sup>3</sup> asignados a México conforme al Tratado de 1944, 645.04 hm<sup>3</sup> (88.3%), están concesionados para la agricultura (CONAGUA, 2016; IMTA, 2020).

**Figura 2.**

*Distrito de Riego 014 Río Colorado*





Debido a la manera en que se distribuye el agua en el Valle de Mexicali, el cauce principal del RC en México se encuentra seco en casi toda su extensión. Al ser una cuenca binacional y un hábitat de especies endémicas de flora y fauna, restaurar los ecosistemas de Delta se volvió un tema de interés tanto para México, Estados Unidos y las ONG (Luecke et al., 1999; Richter et al., 2024).

Es por esto que en 2013 se firma un acuerdo binacional en el que se asigna un volumen para el medio ambiente, además de recurso económico para la restauración del ecosistema que lleva como nombre Acta 319. El Flujo Pulso fue el primer evento de este compromiso y se presentó en marzo del 2014, mediante el cual se entregó un volumen de 130 hm<sup>3</sup> de agua del río Colorado por la Presa Morelos hacia el cauce principal del RC (CILA, s. f.). Por otro lado, con el objetivo de disminuir posibles pérdidas por infiltración y evaporación generadas si todo el volumen fuera entregado en un solo evento, se libraron los flujos restantes del compromiso (65 hm<sup>3</sup>) en una serie de pequeños eventos que constituyeron el denominado Flujo Base. Este volumen se entregó en diversos puntos del RC desde el 2014 hasta el 2017 (Nelson et al., 2017).

Uno de los requerimientos del Acta fue evaluar la respuesta hidrológica y biológica del ecosistema a estos flujos. El análisis de la respuesta hidrológica del evento del Flujo Pulso fue realizado mediante la sectorización de la sección mexicana del cauce del RC en 7 tramos (*Reaches*) a partir de la Presa Morelos, cuyas fronteras fueron definidas en función de la vegetación, las condiciones hidrológicas y su potencial para ser restaurados. El *Reach* 1 (que se extiende en los primeros 26 km del río después de la Presa Morelos) tiene presencia de agua superficial proveniente del retorno agrícola, que se mantiene también por los niveles someros del agua subterránea y las filtraciones de la Presa Morelos. Los *Reaches* 2 y 3 (del km 26 al 31 y del 31 al 63, respectivamente) se encuentran secos, tienen muy poca cobertura vegetal y los niveles del agua

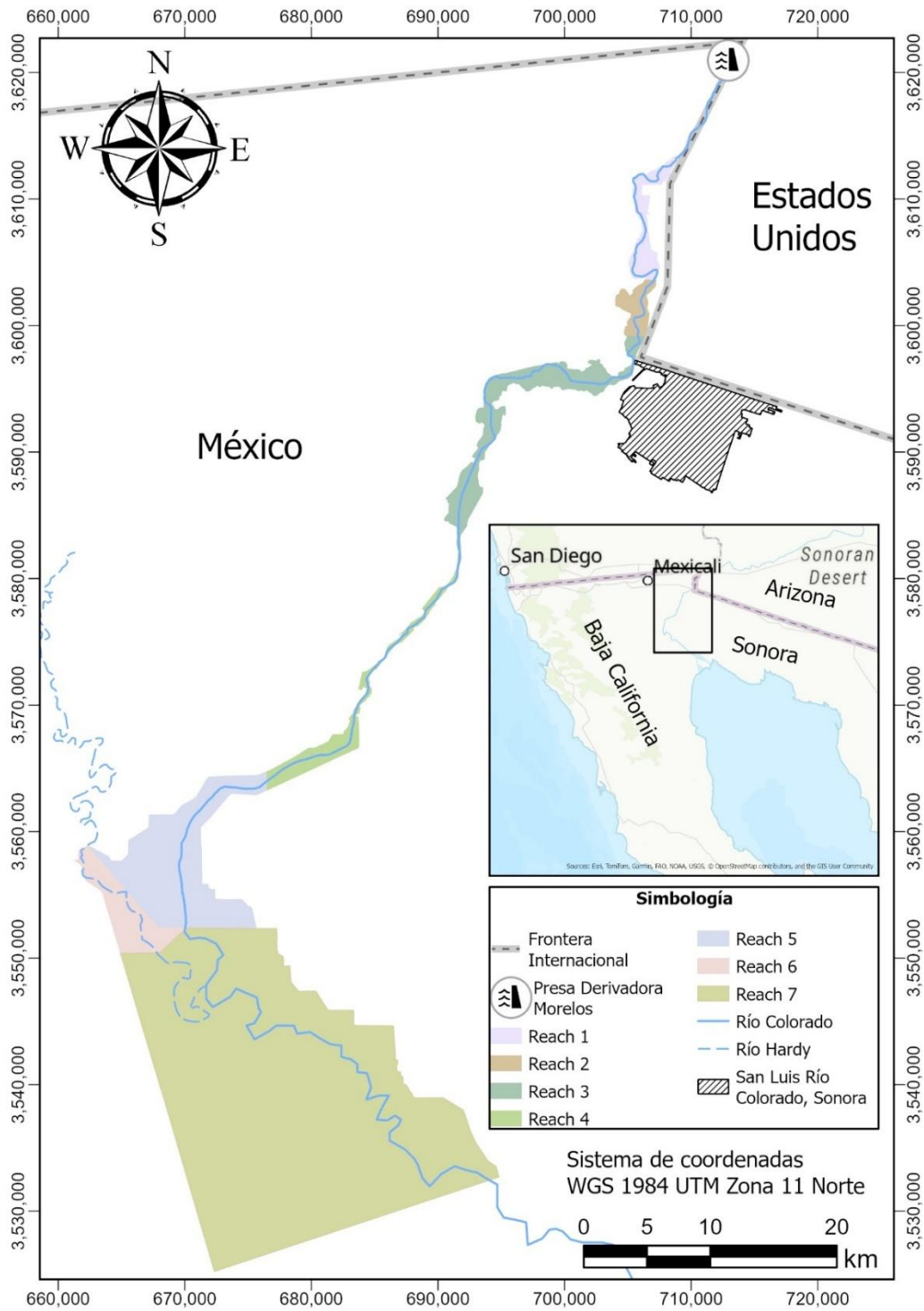


subterránea son profundos debido a la extracción de pozos de riego. El *Reach 4* se extiende desde el km 63 hasta el km 90, se caracteriza por sus niveles de agua subterránea someros y la presencia de agua superficial en el cauce, además de una mezcla de vegetación invasiva (*Tamarix ramosissima*) y especies nativas de vegetación, incluyendo álamos (*Populus fremontii*) y sauces (*Salix gooddingii* y *Salix exigua*); esta es la zona en la que se han implementado la mayoría de los esfuerzos de restauración debido a sus condiciones ecológicas favorables. El *Reach 5* (del km 90 al 106) es otra zona del río que se encuentra seca y se caracteriza por su alta salinidad y vegetación invasiva. El *Reach 6* se caracteriza por sus bosques de mezquites (*Prosopis*) y pino salado (*Tamarix ramosissima*), además de la presencia de agua superficial de retorno agrícola. En el *Reach 7* confluyen el Río Hardy (RH) y el RC (Figura 3), y se caracteriza por una red de escurrimientos superficiales perennes y esteros en el Delta, partiendo desde su confluencia con el RH, hasta su desembocadura en el Golfo de California (Figura 3) (Nelson et al., 2017).



Figura 3.

Localización de los Reaches de monitoreo en el Delta





En regiones áridas, el agua subterránea es un recurso determinante para el correcto desarrollo de la vegetación debido a la relación entre la profundidad del nivel freático y la longitud de las raíces. Puesto que el 38% de la población vive en zonas áridas, es de interés mundial estudiar las interacciones entre la vegetación y el agua subterránea, ya que pueden ser indicadores del desarrollo o de los cambios en el recurso subterráneo (Huang et al., 2019).

La modelización hidrológica permite entender los sistemas medioambientales, brindando elementos para la toma de decisiones en la planeación, la predicción de eventos como inundaciones y sequías, así como la evolución de los acuíferos (Pandi et al., 2021). Es por esto que en la región se han desarrollado modelizaciones con diversos enfoques y objetivos, entre los que se destacan el manejo del recurso subterráneo, la restauración ecológica y el manejo de la zona ribereña (Pérez González, 2008; Rodríguez-Burgueño, 2012).

Por otro lado, la teoría de los MD ha ido evolucionando con el tiempo, permitiendo su aplicabilidad en distintas disciplinas, incluyendo el medio ambiente y los recursos naturales (Yang et al., 2015). Estos modelos han sido utilizados en diversas partes del mundo permitiendo estudiar los sistemas medioambientales. En China, por ejemplo, se han desarrollado modelos dinámicos del uso sostenible de los recursos hídricos (Sun et al., 2017), en Irán, se ha modelado el decaimiento del agua subterránea bajo diferentes escenarios económicos y de cambio climático (Balali & Viaggi, 2015); y, en Estados Unidos, para identificar procesos hidrológicos y el consumo de agua en plantaciones de eucalipto (Ouyang et al., 2016). En la región, los modelos dinámicos se han aplicado en el área de medio ambiente, por ejemplo, para la detección de islas de calor en el municipio de Mexicali (Casillas-Higuera et al., 2014).



## 2.1. Área de estudio

La presente investigación fue realizada en Mexicali, Baja California, al noreste de México, más específicamente en el Valle de Mexicali, que se extiende en una superficie de poco más de 3,700 km<sup>2</sup> y que es una de las zonas agrícolas más importantes del país. Mexicali y su Valle limitan al Norte con Estados Unidos, al Sur con el Golfo de California, al Este con el estado de Sonora y el oeste con el municipio de Tecate. Esta región se caracteriza por su clima desértico cálido según la clasificación de Köppen-Geiger, con temperaturas máximas de 52 °C y una precipitación media anual de 70.9 mm, según los registros históricos del Servicio Meteorológico Nacional durante 1951 a 2010 (Kottek et al., 2006; Lira, 2005; Servicio Meteorológico Nacional, 2012).

El Valle de Mexicali es parte de una planicie aluvial deltaica formada por millones de años de depósito de material detrítico acarreado por los escurrimientos del RC, formando lo que se conoce como el Delta del Río Colorado (Gastil, 1975; Lira, 2005). Estos depósitos albergan al Acuífero del Valle de Mexicali (AVM), el cual se ubica en el extremo norte de Baja California en una extensión de 4,908 km<sup>2</sup> y cuyo espesor varía desde los 600 m hasta los 4,000 m aproximadamente. El AVM es descrito como un acuífero fluvio-deltaico, cuya dirección preferencial de flujo va en dirección NE-SO; las recargas al acuífero en la región provienen de las infiltraciones del RC, canales de distribución, así como los flujos de retorno agrícola y el flujo subterráneo proveniente de aguas arriba (CONAGUA, 2020).

Según estimaciones para el año 2023, la recarga media anual del AVM fue de 520.5 hm<sup>3</sup>, con un volumen de extracción de 950 hm<sup>3</sup> y una disponibilidad media anual de -432 hm<sup>3</sup>, lo que quiere decir que el AVM se encuentra en condiciones de sobreexplotación (CONAGUA, 2024). Debido a esta condición, el acuífero se encuentra en condición de Veda tipo III, lo que indica que se permiten extracciones para usos domésticos, industriales, agrícolas, entre otros, pero de manera



limitada, y no se otorgan nuevos permisos de extracción de agua del subsuelo dentro de la zona ni modificar los aprovechamientos existentes (CONAGUA, 2020).

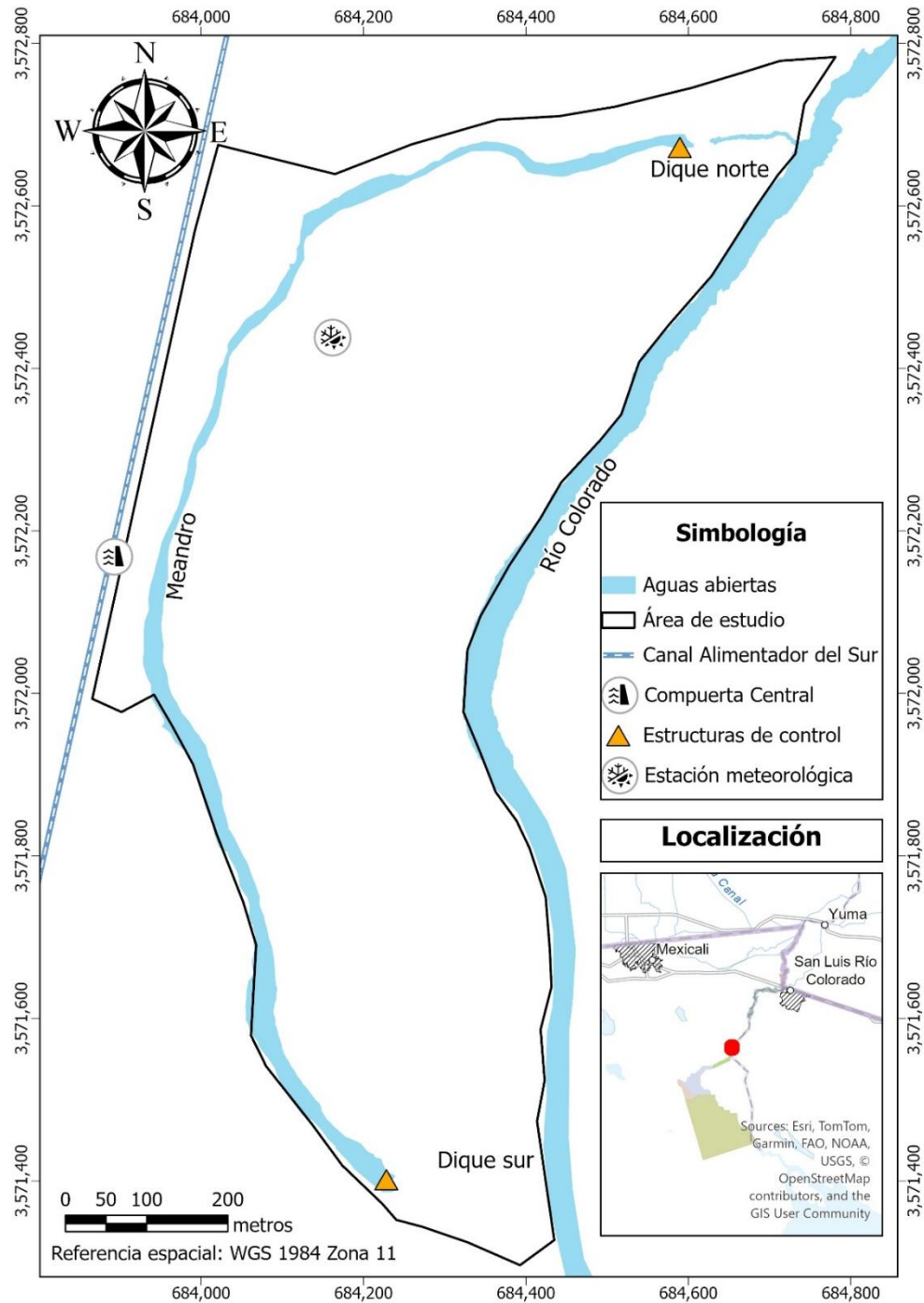
Las recargas al acuífero en la región se ven limitadas, ya que el flujo superficial del RC en México se deriva hacia la red de canales en el Valle de Mexicali. Por lo tanto, a partir del km 15 del RC se presenta una desconexión hidráulica del sistema, causada por la ausencia de agua superficial en el cauce e incrementos en la profundidad de los niveles de agua subterránea, y como resultado, las acciones de restauración ecológica se ven limitadas en esta zona.

Por otro lado, el *Reach* 4, que comprende del km 63 al 90, tiene presencia de agua superficial y de vegetación nativa, además de niveles someros de agua subterránea. Esta zona se caracteriza como la de mayor potencial de restauración según investigaciones posteriores al Flujo Pulso del 2014 (Nelson et al., 2017). Gran parte de los esfuerzos de restauración se han llevado a cabo en esta, incluyendo a El Chaussé, un sitio de gran importancia ecológica que se extiende en una superficie de 62.7 Ha. Limita al Norte y al Sur con parcelas agrícolas, al Este con el RC y al Oeste con el Canal Alimentador del Sur (Figura 4).



Figura 4.

Localización de El Chaussé

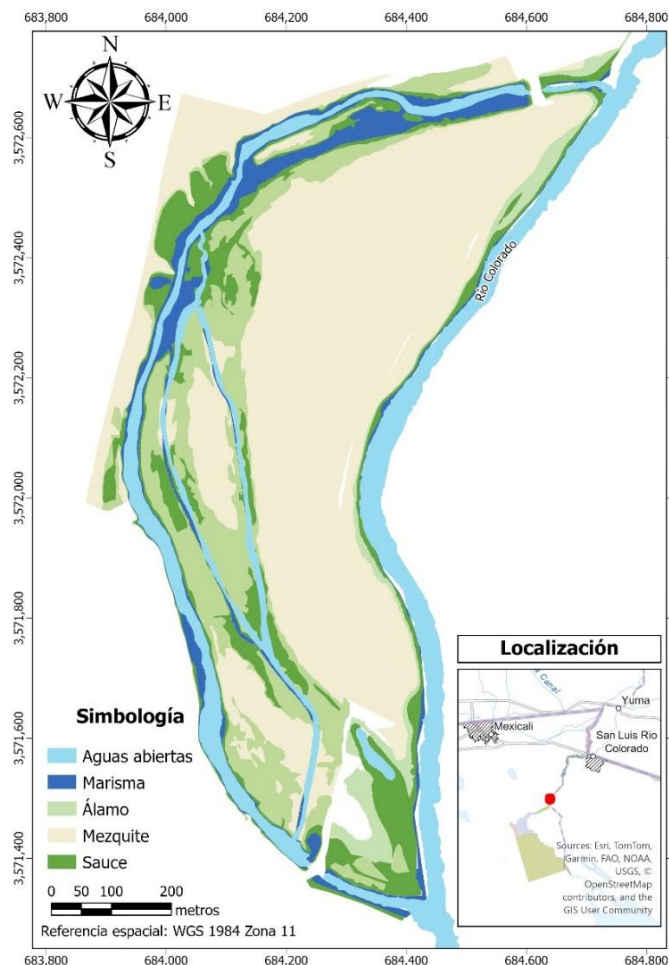




La elevación del terreno natural varía desde los 13.6 a los 20.6 msnm, que conforman tres tipos de terrazas y de hábitats: Las terrazas bajas y medias conforman el hábitat ribereño, mientras que las terrazas altas presentan un hábitat desértico. La elevación del nivel freático se encuentra entre los 11.32 y 14.61 msnm y, en conjunto con los cambios topográficos del sitio, se observan profundidades del agua subterránea que fluctúan entre los 0 y 6 m en las distintas terrazas. Finalmente, la distribución de la vegetación está conformada por aproximadamente 4.5 Ha de marisma, 19.5 Ha de vegetación ribereña y 34.5 Ha de vegetación desértica (Figura 5).

**Figura 5.**

*Distribución de la vegetación en el área de estudio*





En el sitio predominan especies nativas de flora, incluyendo álamos (*Populus fremontii*) y sauces (*Salix gooddingii* y *Salix exigua*); mezquites (*Prosopis glandulosa* y *Prosopis exigua*), y distintas variedades de palo verde (*Parkinsonia aculeata*, *Parkinsonia florida* y *Parkinsonia microphilla*) (Tabla 1), que hace cientos de años era la vegetación predominante en el Delta (Luecke et al., 1999).

**Tabla 1.**

*Rangos de elevaciones y vegetación*

Vegetación	Superficie (Ha)	Rango de elevación (msnm)	Tipo de Vegetación	Terraza
Marisma	4.5	13.632	Ribereña	Baja
Alamo/Sauce	19.5	13.632-13.900	Ribereña	Baja-media
Mezquite	34.5	13.900-15.	Desértica	Alta

### **2.1.1. Manejo Hídrico en El Chaussé**

Dentro del sitio de restauración el personal de “Restauramos El Colorado” ha desarrollado diversos protocolos de riego para cumplir con las necesidades hídricas de los hábitats desérticos y ribereños. Por ejemplo, en las terrazas altas (aproximadamente 44 Ha) en las que se encuentra el hábitat con menor requerimiento hídrico se utiliza un sistema de riego presurizado que, por medio de goteros, provee una descarga de 16 l/h a las especies de vegetación desértica en esta zona.

Por otro lado, las terrazas bajas y medias (aproximadamente 19 Ha), se abastecen por inundación a través de una compuerta de descarga ahogada con una capacidad máxima de 2,500 l/s, denominada Compuerta Central, situada en el km 28+840 del Canal Alimentador del Sur (CAS) (Figura 6).



**Figura 6.**

*Compuerta Central en El Chaussé*

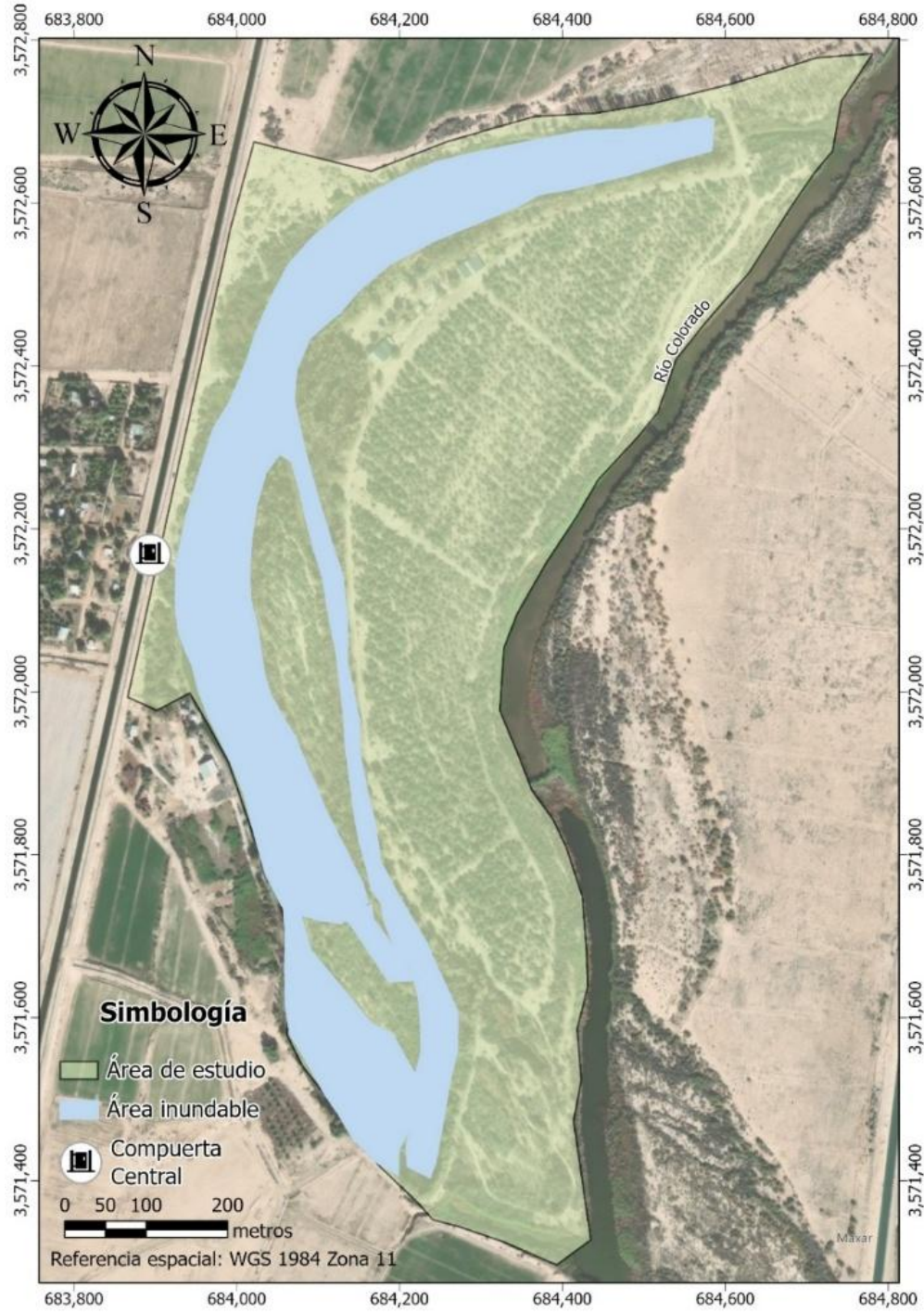


Una vez abierta la compuerta, el agua ingresa hacia un cauce conocido como el meandro cuyo nivel (tirante) es controlado mediante dos estructuras reguladoras: Dique Norte (DN) y Dique Sur (DS). Cuando los diques están cerrados, la elevación del agua en el meandro aumenta, permitiendo el riego por inundación y, una vez que este finaliza, se abren las estructuras para dar salida al agua retenida en el meandro hacia el cauce del RC (Figura 7).



Figura 7.

Área inundable de El Chaussé





### **3.Marco teórico**

#### **3.1.Agua subterránea**

Se define como agua subterránea al agua subsuperficial que se encuentra por debajo del nivel freático donde el suelo se encuentra completamente saturado, a estas formaciones se les conoce como acuíferos. Los acuíferos pueden ser confinados, semiconfinados o libres dependiendo de las condiciones del medio. Si el agua se encuentra contenida entre dos capas de baja permeabilidad, se habla de un acuífero confinado, mientras que si la frontera superior es el nivel freático, se define como acuífero libre (Fetter, 2001; Freeze & Cherry, 1979).

##### ***3.1.1.Nivel freático***

El agua subterránea está sometida a mayor presión que la atmosférica y a medida en que la distancia hacia la superficie es menor, la presión disminuye. Se define como nivel freático cuando la presión en el medio poroso es igual a la presión atmosférica. Es el límite superior de la zona saturada, esto quiere decir que por debajo del nivel freático todos los poros del medio se encuentran saturados de agua, mientras que, por encima del nivel freático, los poros contienen tanto agua como aire. Teniendo en cuenta esta definición, la profundidad del nivel freático (PNF) es la profundidad desde el terreno natural o desde el brocal de un pozo a la que se encuentra el nivel del agua subterránea (Freeze & Cherry, 1979).

##### ***3.1.2.Carga hidráulica***

La energía total del agua subterránea en un punto dado se define como carga hidráulica. Es la sumatoria de los componentes *elevación* y *presión* (ecuación 1) y representa el nivel que va a



alcanzar el agua dentro de un piezómetro. Se obtiene determinando la posición vertical del nivel freático referenciado a una cota, usualmente, el nivel del mar (Freeze & Cherry, 1979).

### **Ecuación 1.**

*Carga hidráulica*

$$h = z + \frac{P}{\gamma}$$

Donde  $h$  es la carga hidráulica (m),  $z$  (m) es la carga de elevación con respecto a un datum de referencia y  $\frac{P}{\gamma}$  es igual a la presión en metros columna de agua (m), donde  $P$  es la presión ( $\text{kg/m}^2$ ) y  $\gamma$  ( $\text{kg/m}^3$ ) es el peso específico.

### **3.1.3. Gradiente hidráulico y direcciones de flujo**

El gradiente hidráulico es la variación de la carga hidráulica en un sistema de flujo subterráneo que depende de las diferencias en las cargas en distintos puntos de un sistema. Por otro lado, la dirección de flujo es la trayectoria que sigue el fluido debido a la diferencia de cargas o el gradiente hidráulico. Se representa como la distancia entre piezómetros y la diferencia de cargas hidráulicas (ecuación 2) (Freeze & Cherry, 1979).

### **Ecuación 2.**

*Gradiente hidráulico*

$$\nabla h = \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Donde  $\nabla h$  es gradiente hidráulico (adimensional),  $\Delta h$  es igual a diferencial de cargas (m) y  $\Delta L$  es el diferencial de distancias (m).

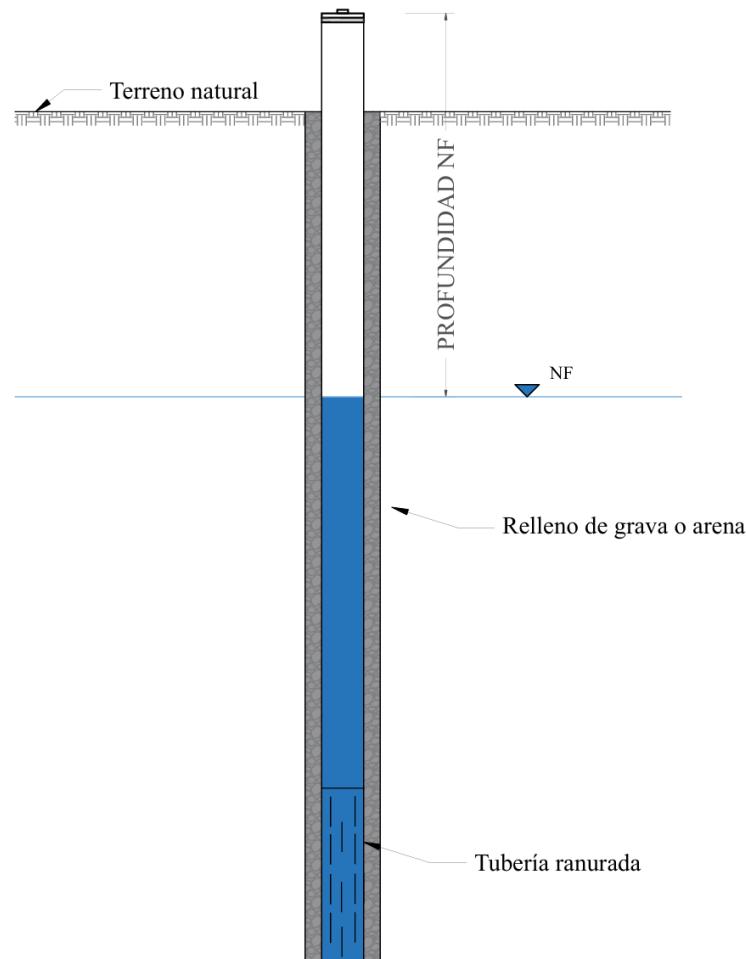


### 3.1.4. Piezómetro

Al dispositivo utilizado para medir la carga hidráulica se le conoce como piezómetro, conformado por un tubo sellado a lo largo y ranurado al fondo, que está diseñado para permitir el flujo de agua hacia el tubo sin que ingresen partículas del medio (Figura 8). Usualmente se construyen en grupo de tal manera que brinden información sobre las direcciones de flujo del agua subterránea (Freeze & Cherry, 1979).

#### Figura 8.

*Corte transversal de un piezómetro, modificado de ASTM (2020)*





### ***3.1.5. Sensores de presión***

Los sensores de presión (leveloggers) son utilizados tanto para la medición del nivel del agua superficial como subterránea. Estos registran la presión absoluta, es decir, la sumatoria de la presión hidrostática ejercida por la columna de agua, más la presión barométrica. Los datos obtenidos permiten determinar la columna de agua, removiendo la presión barométrica mediante los registros de presión de un segundo sensor instalado fuera del agua (Solinst, 2020).

Los sensores toman lecturas de la presión en kilopascales (kPa), por lo que se debe usar un factor de conversión para transformarlas a metros columna de agua (mca), basándose en la relación entre la presión, la densidad del agua y la gravedad (ecuación 3). En hidráulica se utiliza el factor 0.1019744289 mca/kPa, que proviene de la inversa del producto de la densidad ( $\rho$ ) por la aceleración gravitacional ( $g$ ), que representa la presión ejercida por una columna de un metro de altura (Bureau International des Poids et Mesures, 2019; Streeter et al., 1998).

#### **Ecuación 3.**

*Altura de la columna de agua*

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

Donde  $h$  es la altura de la columna de agua (m),  $P$  es igual a la presión (kPa),  $\rho$  es la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $g$  es la aceleración gravitacional ( $\text{m/s}^2$ ).

### ***3.1.6. Método de la fluctuación del nivel freático***

El método de la fluctuación del nivel freático (WTFM por sus siglas en inglés) es una metodología que se fundamenta en la premisa de que los incrementos en el nivel del agua subterránea en acuíferos someros no confinados corresponden a la recarga proveniente de la



percolación que llega hasta el nivel freático (Becke et al., 2024; Boumis et al., 2022; Freeze & Cherry, 1979; Healy & Cook, 2002; Yimam et al., 2023). Este enfoque es adecuado en acuíferos que presentan variaciones rápidas en periodos cortos (horas o días) con respecto a un evento puntual (Healy & Cook, 2002); y ha sido aplicado en otras investigaciones en sitios de restauración en la región (Hernández-López, 2023).

Por otro lado, cuando una muestra de suelo saturada libera agua por efecto gravitacional, no todo el contenido de agua es drenado, ya que una fracción permanece adherida a las partículas del suelo por capilaridad. En hidrogeología, esta propiedad se define como rendimiento específico ( $S_y$ ) y se define como la relación entre el volumen de agua drenado con respecto al volumen total contenido en el acuífero (Meinzer, 1923; Woessner & Poeter, 2020). Una de las ventajas del WTFM es su simplicidad, ya que requiere únicamente series de tiempo de la elevación del nivel freático y una estimación del rendimiento específico (Becke et al., 2024). La recarga se calcula multiplicando el rendimiento específico por la variación de altura del nivel freático en un intervalo de tiempo, como se presenta a continuación:

#### **Ecuación 4.**

*Recarga*

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Donde  $S_y$  es el rendimiento específico (adimensional),  $\Delta h$  es la variabilidad de altura del nivel freático (m) y  $\Delta t$  el diferencial de tiempo (horas).



## 3.2. Agua superficial

### 3.2.1. Limnómetro

Consiste en una regleta graduada en centímetros instalada de manera vertical en el lecho de un cuerpo de agua, que permite determinar el tirante hidráulico, el cual, puede ser transformado en elevación tomando como referencia una cota conocida en metros sobre el nivel del mar (msnm) (IMTA, 1992).

Para registrar de manera continua el tirante del agua superficial, es posible instrumentar un sensor de presión junto al limnómetro mediante la colocación de un tubo ranurado a un costado de la regleta, el cual se encuentra protegido con un geotextil que evita la entrada de sedimentos, pero a su vez permite el flujo del agua (Figura 9), permitiendo correlacionar el nivel de la superficie del agua observada con las mediciones continuas del sensor.

#### Figura 9.

*Limnómetro instrumentado en El Chaussé*





### 3.2.2. Caudal

En hidráulica e hidrología, el caudal se define como el volumen de agua que pasa instantáneamente por una sección determinada en una unidad de tiempo y se calcula mediante la ecuación de gasto (Pedroza González, 2018).

#### Ecuación 5.

*Ecuación de Gasto*

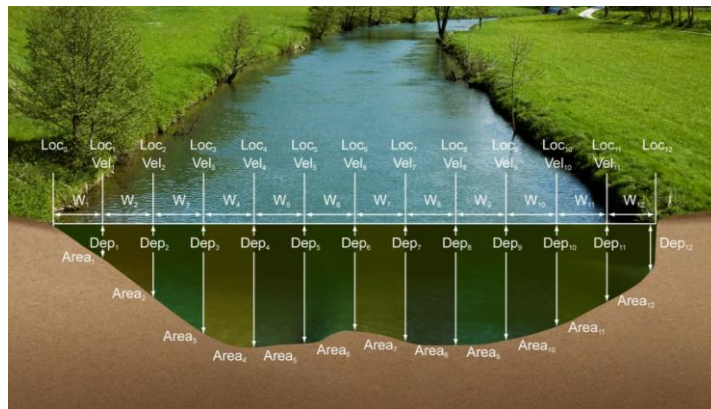
$$Q = V \times A$$

Donde  $V$  es velocidad (m/s) y  $A$  es igual a área (m<sup>2</sup>).

El caudal en la compuerta de un canal se puede obtener de manera directa o indirecta dependiendo de las condiciones en el sitio y de los instrumentos disponibles para llevar a cabo la medición. Uno de los métodos directos es el de velocidad-área, el cual, consiste en subdividir la sección transversal en dovelas de área conocida y en medir la velocidad del agua en cada una de estas (Figura 10). Posteriormente, mediante la ecuación de gasto, se obtiene el caudal de cada sección y que sumados, permiten la obtención del caudal total (ISO, 2021).

#### Figura 10.

*Método velocidad-área, tomado de SonTek® (2019)*



Donde  $Loc$ , es cada una de las ubicaciones (m),  $Vel$  es la velocidad medida en cada estación (m/s) y  $Dep$  es la profundidad en cada una de las estaciones (m).



### 3.2.3. Velocímetro acústico Doppler

Los velocímetros acústicos Doppler (ADV®) por sus siglas en inglés, son utilizados como instrumentos de medición que permiten determinar el caudal en cuerpos de agua superficiales de manera directa. Uno ellos, el FlowTracker2 desarrollado por la compañía SonTek®, cuenta con un rango de velocidad de  $\pm 0.001$  a 4 m/s; una precisión de  $\pm 1\%$  de la velocidad medida y requiere una profundidad mínima de 0.02 m para su operación (Figura 11). Su funcionamiento se basa en la emisión y recepción de ondas de ultrasonido para calcular la velocidad del agua en varios puntos a lo largo de una sección de aforo. Estas mediciones, combinadas con la ubicación e información de la profundidad, permiten que el instrumento calcule el caudal implementando normativa internacional (ISO, 2021; Sontek, 2019).

#### Figura 11.

*FlowTracker 2, Sontek: (a) instrumento de medición; (b) medición de flujo en el área de estudio (Sontek, 2019)*



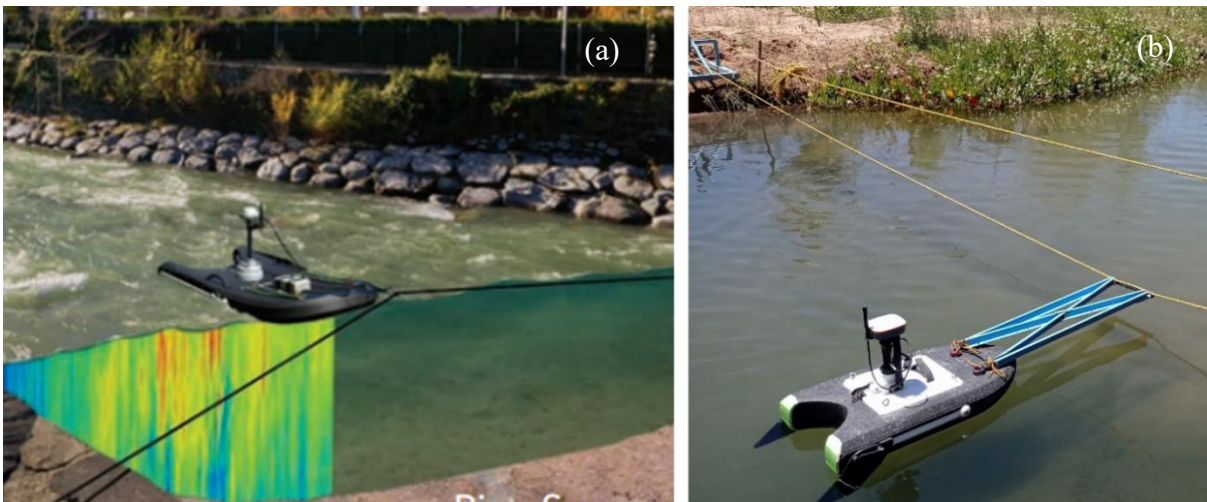


### 3.2.4. Perfilador acústico Doppler

Otro de los equipos de medición directa es el perfilador acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés), el cual está diseñado para calcular las descargas fluviales, corrientes de agua en tres dimensiones y profundidades. Uno de ellos, el River Surveyor S5® (RSS5), es un instrumento que mide profundidades de 0.2 hasta 15 m, tiene una resolución de 0.001 m/s y una precisión de hasta  $\pm 2.5\%$  de la velocidad medida (Figura 12). Su funcionamiento consiste en generar perfiles conformados por celdas que registran la velocidad y profundidad a lo largo de una sección transversal, permitiendo calcular el caudal total que está pasando por la sección de medición (Sontek, 2022).

#### Figura 12.

*RiverSurveyor S5. (a) perfil generado por el instrumento de medición; (b) medición en la salida de DN en el área de estudio*



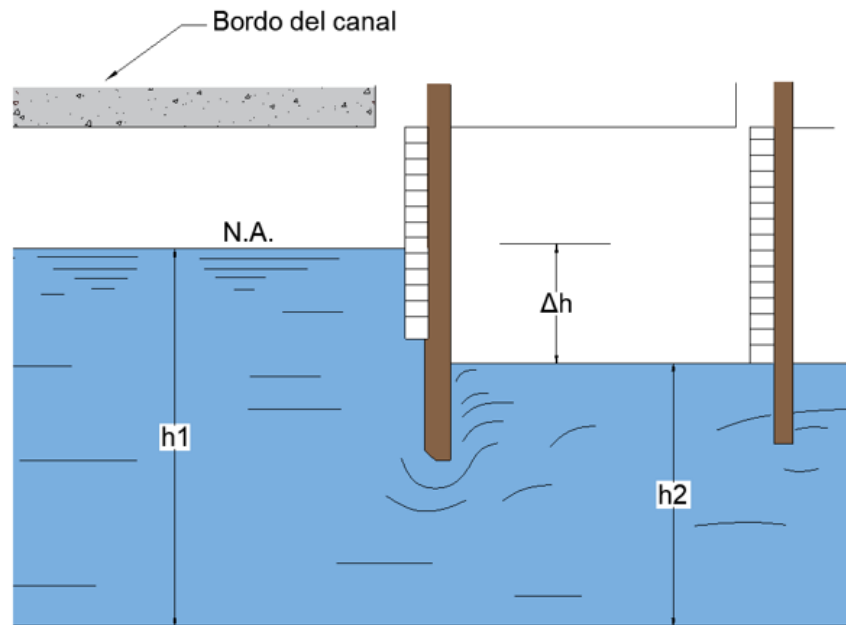
Por otro lado, los métodos indirectos consisten en determinar caudales teóricos a partir de ecuaciones en las que se consideran los parámetros geométricos de las estructuras hidráulicas, tales como el área y el tirante de agua. La ecuación utilizada para la estimación del gasto depende del tipo de estructura hidráulica, una de estas siendo la compuerta con descarga sumergida, la cual se deriva directamente de la aplicación del principio de Bernoulli a un orificio sumergido, en conjunto



con la ecuación de continuidad, lo que permite relacionar la diferencia de cargas aguas arriba y aguas abajo con el caudal que atraviesa la compuerta (Chow, 1959) (Figura 13).

**Figura 13.**

*Corte transversal compuerta central, modificado de Chow (1959)*



Esta ecuación es una herramienta confiable para estimar caudales en este tipo de estructuras, siempre y cuando se considere un coeficiente de descarga que contemple los efectos de contracción, fricción así como otras pérdidas energéticas (Chow, 1959). Debido a las condiciones de la compuerta por la que ingresa el agua al El Chaussé, esta ecuación será utilizada en el presente estudio para estimar caudales de entrada (Ecuación 6).

**Ecuación 6.**

*Caudal para compuertas de descarga ahogada.*

$$Q = Cd \times A_h \times \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Donde  $Q$  es igual a caudal,  $Cd$  es el coeficiente de descarga (adimensional),  $A_h$  es el área hidráulica ( $m^2$ ),  $g$  es la constante gravitacional y  $h_1$  y  $h_2$  son las cargas hidráulicas (m).



### 3.2.5. Evaporación directa

Se puede definir la evaporación como la cantidad de agua que se transforma en vapor desde las superficies de los océanos, ríos, lagos o arroyos. La evaporación es controlada por la cantidad de energía disponible en la superficie y la facilidad con la que el vapor puede moverse hacia la atmósfera. La tasa de evaporación depende de múltiples factores ambientales, entre ellos la temperatura del aire y del agua, la humedad relativa, la velocidad del viento y la energía solar disponible (Allen, 1998; Chow et al., 2008; Shuttleworth, 2012).

Valiantz (2006) desarrolló una versión simplificada para estimar la evaporación directa (ecuación 7) con datos que pueden ser fácilmente obtenidos mediante una estación climatológica. Existen diferentes ecuaciones dependiendo de los datos disponibles, un ejemplo de esto es la ecuación usada por Hernández-López (2023) en su determinación del balance hidrológico de un sitio de restauración en la región del Delta. Para este trabajo de investigación se utilizó otra de las simplificaciones propuestas por el autor debido a la ausencia de datos de velocidad del viento por fallos en la estación meteorológica.

#### Ecuación 7.

*Ecuación de Penman simplificada para estimar la evaporación directa*

$$E_{PEN} \approx 0.047\sqrt{T + 9.5} - 2.4 \left( \frac{R_S}{R_A} \right)^2 + 0.09(T + 20) \left( \frac{1 - RH}{100} \right)$$

Donde  $E_{PEN}$  es evaporación directa (mm),  $T$  (°C) es temperatura,  $R_S$  es radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día),  $R_A$  es radiación extraterrestre (MJ/m<sup>2</sup>/día) y  $RH$  es humedad relativa (%). La radiación solar extraterrestre debe ser calculada a través de la siguiente ecuación (Allen, 1998) para poderla utilizar en la ecuación 7.

#### Ecuación 8.

*Ecuación para estimar la radiación extraterrestre*

$$H_0 = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \omega_s \sin\phi \sin\delta]$$



Donde  $H_0$  es la radiación solar extraterrestre ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ ),  $G_{sc}$  es la constante solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $d_r$  es la corrección por distancia Tierra-Sol (adimensional),  $\delta$  es la declinación solar en radianes,  $\omega_s$  es el ángulo horario al atardecer y  $\varphi$  es la latitud (grados).

### **3.3. Topografía**

Ciencia encargada del estudio y representación detallada de la superficie de la tierra. Su propósito consiste en determinar la posición relativa de puntos en el terreno y plasmar tanto elementos naturales (montañas, ríos, valles), como aquellos creados por el ser humano (camino y edificios) en planos, mapas o modelos digitales de elevación (MDE) (Ghilani & Wolf, 2012).

#### ***3.3.1. Levantamiento topográfico***

Por otro lado, un levantamiento topográfico es el proceso mediante el cual se recopilan datos en campo para determinar las dimensiones y posición del terreno. Consiste en la medición de ángulos, distancias y desniveles, que posteriormente se plasman en un plano o MDE. Esto se realiza mediante equipos topográficos especializados, como los receptores de navegación satelital (GNSS) por sus siglas en inglés, mismos que, reciben información de geolocalización para determinar ubicaciones de manera precisa (Arellano Sánchez, 2019; Ghilani & Wolf, 2012).

Los MDE obtenidos mediante el postproceso de datos obtenidos en campo, son representaciones en formato de celdas de una superficie continua, en el que se asigna un valor de altura a cada celda de la malla (Earth Science Data Systems, 2024) y su precisión está dada principalmente por la distancia entre los puntos de muestreo (Burrough, 2001).

Las técnicas de interpolación son fundamentales para la obtención de un MDE preciso, y se basan en los principios de la correlación espacial, donde se asume que los puntos que están más



cercanos entre sí serán más similares que los que se encuentran alejados. La literatura clasifica los diferentes métodos de interpolación como globales y locales, los primeros utilizan la totalidad de los puntos muestreados para generar predicciones para un punto en particular; mientras que los métodos locales predicen el valor de un punto desconocido basado en los valores de los pixeles vecinos (Burrough et al., 2015).

Así como existen metodologías in situ para la obtención de datos topográficos, existe también otro método denominado percepción remota (remote sensing). El cual es llevado a cabo mediante la técnica de teledetección óptica o bien Light detection and ranging (LiDAR, por sus siglas en inglés), y utiliza la luz laser para obtener una nube de puntos de la superficie de la tierra, que almacenan datos de latitud, longitud y altimetría (Weitkamp, 2005).

### ***3.3.2. Nivelación topográfica***

Una de las aplicaciones de la topografía en el ámbito de la hidrología y medio ambiente es la nivelación de estructuras o sitios de monitoreo, la cual permite establecer la elevación de cada uno de estos sitios con respecto a un datum vertical. Una de las maneras de llevar a cabo una nivelación es a través de un GPS diferencial, en el que se utiliza un receptor fijo en una ubicación conocida (base) y uno móvil que recibe correcciones y las aplica a sus mediciones de posición (García-Martín et al., 1994; Leick et al., 2015).

La precisión en las nivelaciones topográficas depende de la metodología implementada. El método estático, por ejemplo, es una técnica en la que los receptores se colocan durante periodos prolongados en el punto a levantar y se obtienen resultados con precisión milimétrica después de un procesamiento de los datos. Por otro lado, el método cinemático en tiempo real (RTK por sus siglas en inglés), consiste en colocar un receptor base en un punto conocido, usualmente un



monumento o mojonera, y el uso de un receptor móvil, que recibe las correcciones diferenciales en tiempo real que transmite la base, lo que permite calcular su posición con una precisión al centímetro (Ghilani & Wolf, 2012).

### **3.4. Modelos Dinámicos**

Un modelo es un recurso utilizado para representar una aproximación de algún sistema o fenómeno, y puede ser desarrollado de manera física o matemática. Los modelos físicos son aquellos en los que se replica el fenómeno de manera directa, por ejemplo, en un laboratorio. Los modelos matemáticos, en cambio, son representaciones indirectas por medio de ecuaciones que describen el proceso físico que ocurre en el sistema (Wang & Anderson, 1995).

Según Sterman (2000), los modelos dinámicos (MD) son una serie de herramientas conceptuales que permiten entender la estructura y dinámica de sistemas complejos. Estas herramientas se basan en la teoría de sistemas inicialmente desarrollada por Forrester (1958), quien introdujo la dinámica de sistemas como una manera de comprender fenómenos complejos a través de flujos de información y retroalimentación.

Los MD parten de elaborar modelos esquemáticos, donde a cada una de las variables se le introducen ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento y que permiten interrelacionar las variables (Alda, 2003). Una característica importante de esta metodología radica en mostrar la relación que hay entre los diferentes componentes del sistema que se está estudiando, a partir de ello, es posible proponer escenarios para visualizar los cambios que habría en estas variables interdependientes (Khan et al., 2007).

Los MD se distinguen por su capacidad de representar sistemas que evolucionan en el tiempo, incorporando procesos de retroalimentación (positiva y negativa), no linealidades y con retardos temporales (Sterman, 2000). Estas características permiten explorar no solo el



comportamiento histórico del sistema, sino también simular la respuesta de las variables dependientes a los cambios que se realicen en las variables de entrada (Richardson, 2011).

Además, los MD han sido ampliamente utilizados en disciplinas como la ecología (Grant et al., 1997) y la gestión de recursos hídricos (Winz et al., 2009). Su valor radica en que permite integrar variables de distinta naturaleza (sociales, económicas, ambientales) dentro de un marco coherente que ayuda a la toma de decisiones.

Una de las áreas en donde los modelos dinámicos han sido ampliamente utilizados es en el estudio del medio ambiente. Resolver problemas ambientales con el enfoque de la dinámica de sistemas o MD, implica describir el medio ambiente en términos de procesos y condiciones que están interrelacionadas. Esto quiere decir que se entiende al medio ambiente como un sistema cambiante y dinámico (Deaton & Winebrake, 1999).

A diferencia de los modelos hidrológicos tradicionales, que tienden a centrarse en la representación de procesos físicos bajo supuestos deterministas o de correlación, los MD permiten representar las relaciones de causalidad entre variables, incorporar retroalimentaciones y retardos temporales que influyen en la evolución del sistema y simular cambios ante escenarios de presión o de manejo (Ouyang et al., 2016; Winz et al., 2009), como podría ser en este estudio la reducción de los volúmenes de agua para el riego del sitio.

### ***3.4.1. Stella©***

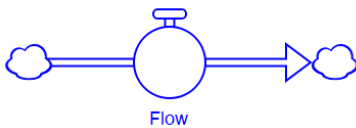


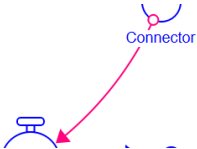
Es una herramienta diseñada para facilitar el modelado dinámico de sistemas complejos y su simulación a lo largo del tiempo. Este software fue desarrollado en la década de 1980 con el propósito de hacer accesible la metodología de la dinámica de sistemas a investigadores y estudiantes sin necesidad de conocimientos avanzados en programación.



El fundamento teórico de Stella© proviene de la dinámica de sistemas desarrollada por Forrester (1958), que utiliza diagramas de flujo para representar los diferentes elementos de un sistema: niveles (stocks), flujos (flows), convertidores (converters) y conectores (connectors), que se observan en la Tabla 2. Estos cuatro componentes permiten construir modelos visuales que luego son traducidos en ecuaciones resueltas numéricamente (Ford, 1999).

**Tabla 2.**

*Elementos básicos Stella*

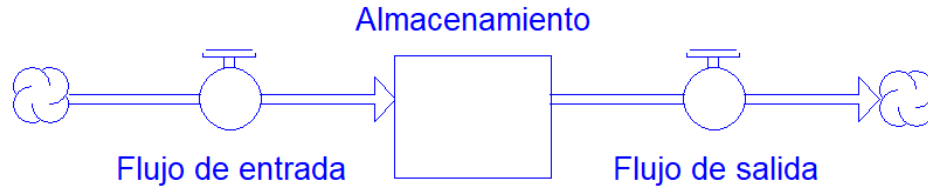
Elemento	Descripción	Figura
Stock (reservorio)	Estos representan el comportamiento variable sobre una cantidad que se acumulan o que disminuyen con el tiempo. Los <i>stocks</i> o reservorios se pueden definir como un espacio donde se almacena o acumula información, que pueda dirigirse hacia otros componentes del sistema (Deaton & Winebrake, 1999).	
Flow (flujo)	Estos indican la dirección en la que se mueven las variables, ya sean entradas o salidas de un stock hacia otros. El valor de cada flujo se expresa como la cantidad de cambio que causa en el stock en una unidad de tiempo (Deaton & Winebrake, 1999).	
Converters (convertidores)	Son aquellos que regulan los flujos, es decir, pueden ser tasas, constantes o ecuaciones que ayuden a convertir de una unidad a otra (Deaton & Winebrake, 1999).	
Connectors (conectores)	Estos establecen relaciones entre diferentes variables del modelo. De manera gráfica los elementos se unen mediante flechas indicando el sentido de los flujos, que describen las relaciones de causa y efecto dentro del sistema analizado.	

Una de las principales ventajas de Stella© es el enfoque visual e intuitivo de su interfaz, ya que le permite al usuario representar un sistema mediante diagramas de retroalimentación y cadenas casuales, lo que facilita la construcción del modelo y la comunicación de los resultados (Barlas, 2007; Costanza & Gottlieb, 1998) (Figura 14).



**Figura 14.**

*Diagrama de flujo con entradas y salidas en Stella*



Stella© ha sido utilizado por diversos autores como Constanza y Gottlieb (1998) lo en el área de medio ambiente y sostenibilidad; Ford (1999) lo aplicó en el análisis de problemas ambientales y recursos naturales; y en la región, Casillas-Higuera et al. (2014) lo implementaron para detectar islas de calor en la ciudad de Mexicali, Baja California.

### **3.5. Manejo adaptativo**

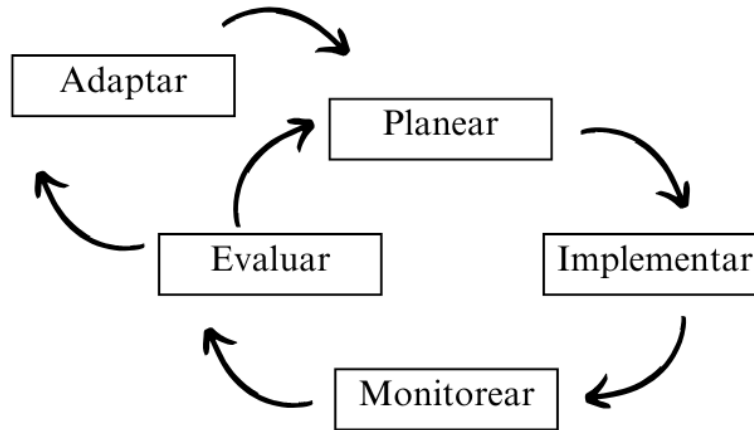
Consiste en comprender a los sistemas naturales como complejos y dinámicos, por lo que la toma de decisiones debe irse ajustando a través del tiempo basándose en la experiencia y en los cambios observados en las variables del mismo sistema, así como las de su entorno que también tienen efectos en este. El manejo adaptativo busca la manera de mejorar continuamente las prácticas considerando un proceso iterativo donde la toma de decisiones se debe ajustar a las observaciones (Bormann et al., 1999; Gann et al., 2019).

Gann et al., (2019), considera el manejo adaptativo como uno de los pilares de la restauración de ecosistemas. Para ello, es necesario monitorear, así como evaluar si los objetivos de restauración se están cumpliendo o no, y es necesario seguir una serie de pasos que incluyen planear, actuar, monitorear y evaluar (Bormann et al., 1999). En la Figura 15 se presenta de manera esquemática, los pasos antes mencionados:



**Figura 15.**

*Esquema de manejo adaptativo, Restauremos El Colorado, 2024*



Según el enfoque del manejo adaptativo, **planear** se refiere a la evaluación de la información existente, definir los problemas, los objetivos y las necesidades, además de establecer las acciones de manejo; **implementar** corresponde a llevar a cabo las acciones previstas en el plan; **monitorear** se refiere a recopilar datos sobre los cambios en las variables dentro de un sistema, de modo que se pueda comparar lo esperado con lo observado; **evaluar** implica analizar los datos recopilados durante el monitoreo para saber qué tan bien se están cumpliendo los objetivos planteados en la etapa inicial del manejo adaptativo, y finalmente; **adaptar** puede estar o no dentro del ciclo del manejo adaptativo, ya que esta será necesaria o no dependiendo de los resultados de la etapa de evaluación (Bormann et al., 1999; Stankey et al., 2005).



## 4. Materiales y Métodos

### 4.1. Agua superficial

#### 4.1.1. Volumen de entrada

Las entradas de agua fueron aforadas diariamente en la Compuerta Central (CC) mediante el uso del FlowTracker 2 (FT2) de Sontek® (Figura 16), los resultados fueron correlacionados con los aforos indirectos, estos últimos utilizando la Ecuación 6. Esta ecuación integra los registros de presión obtenidos por dos sensores que registran cargas ( $h_1$  y  $h_2$ ), así que, utilizando el coeficiente de descarga adecuado para la abertura de la compuerta e ingresando los demás parámetros hidráulicos involucrados en la ecuación, mediante hojas de cálculo, se obtuvo el caudal y volumen que ingresó al área de estudio durante cada entrega de agua.

#### Figura 16.

*Medición de flujo en el puente de aforo en CC*



#### 4.1.2. Volumen de salida

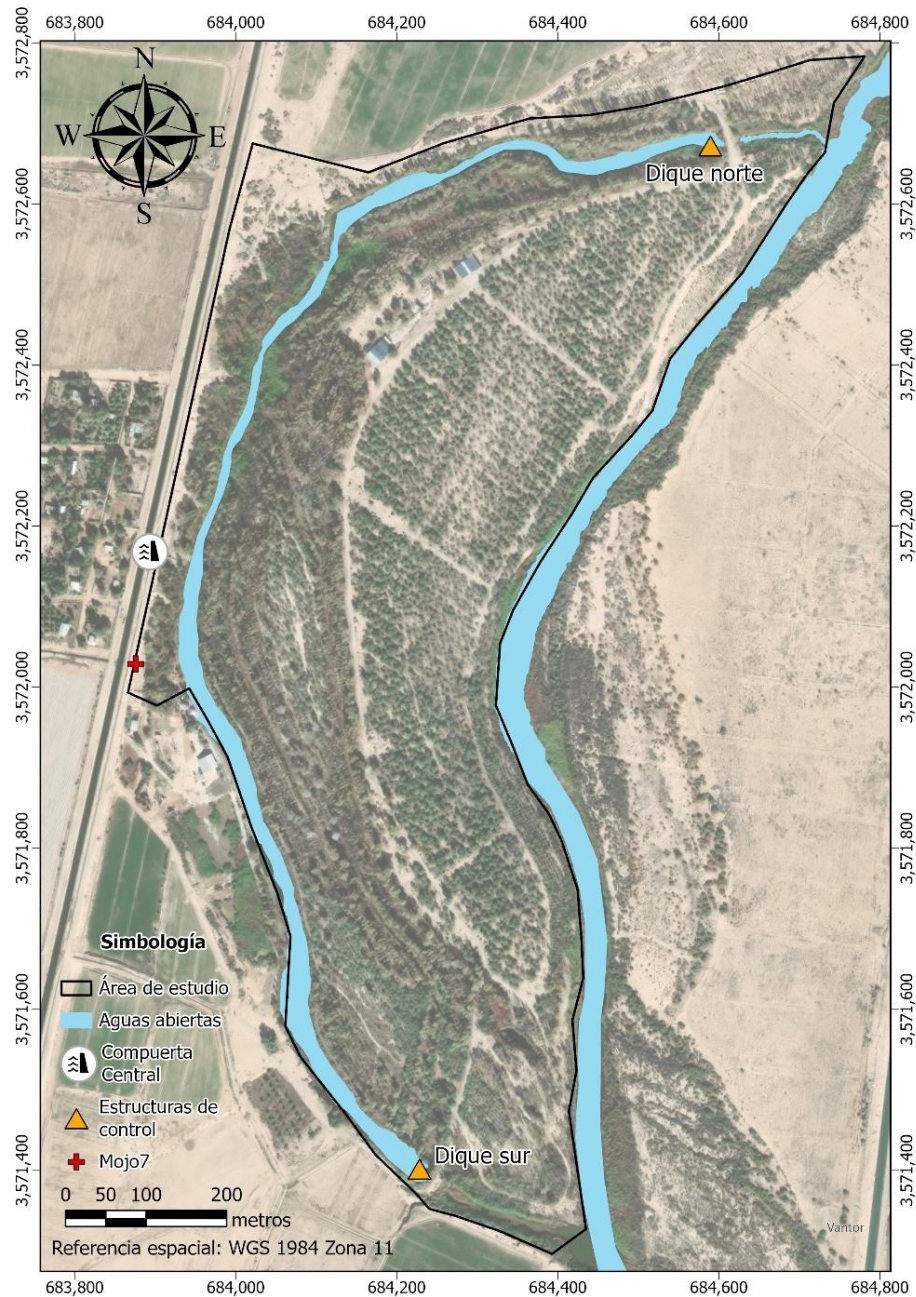
El volumen de salida superficial se obtuvo mediante correlaciones entre la elevación del espejo del agua y la medición de flujos en los sitios Dique Norte y Dique Sur del meandro por donde se libera el agua una vez finalizados los riegos, realizada con los instrumentos FT2 y RSS5).



Cada sito a su vez, fue instrumentado con limnímetros (Figura 17) en conjunto con sensores de presión obteniendo de manera horaria el comportamiento de niveles de agua.

**Figura 17.**

*Limnímetros El Chaussé*





Los limnímetros fueron nivelados durante el año 2021 utilizando un GPS de doble frecuencia marca Topcon Modelo GR-5, el cual corrigió sus elevaciones verticales tomando como referencia las coordenadas de un banco de nivel denominado Mojo7 (Tabla 3).

**Tabla 3.**

*Coordenadas banco de nivel Mojo7*

<b>Sitio</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Elevación (msnm)</b>
Mojo7	683,875.7406	3,572,028.8232	20.477

Como resultados se obtuvieron las coordenadas de los limnímetros en el DATUM horizontal UTM WGS 1984 Zona 11 Norte y en el DATUM vertical NAD 83, como se muestra en la Tabla 4, a continuación:

**Tabla 4.**

*Coordenadas limnímetros Dique Norte (DN) y Dique Sur (DS)*

<b>Sitio</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Elevación (msnm)</b>
DN	684591.921	3572674.238	12.250
DS	684229.842	3571399.728	12.060

Los sensores de cada limnómetro registraron lecturas a partir del 1 de septiembre de 2023 al 30 de septiembre de 2024. Se correlacionaron los datos de las elevaciones puntuales de los limnímetros con el tirante que registraron los sensores, posteriormente, mediante un ajuste de función lineal se obtuvieron las elevaciones de manera continua (Fenton & Keller, 2001).

Los caudales continuos de salida por el DN y DS se estimaron mediante la correlación entre las mediciones de elevación de los limnímetros y los caudales medidos con los instrumentos. Para cada una de las estructuras reguladoras se utilizaron ajustes de función de tipo cuadrático, obteniéndose las ecuaciones de las Tablas 5 y 6:



**Tabla 5.**

*Ajustes de función de gasto en función de la elevación de DN.*

Abertura (m)	Ajuste de Función
0.7	$Q = -582.77x^2 + 16979x - 121990$
0.55	$Q = -1683.2x^2 + 46262x - 316899$
0.35	$Q = 1178.5x^2 - 31857x + 215993$
0.3	$Q = -451.8x^2 + 12986x - 92423$
0.25	$Q = -929.3x^2 + 26453x - 187454$
0.22	$Q = 425x - 5287.4$
0.2	$Q = -1825.8x^2 + 51551x - 363213$
0.15	$Q = 1.1102x - 1.3393$

**Tabla 6.**

*Ajustes de función ecuaciones de gasto en función de la elevación de DS.*

Abertura (m)	Ajuste de Función
0.40	$Q = -389.69x^2 + 11395x - 81883$

#### 4.2.Suelo

La clasificación de los suelos fue obtenida de los informes realizados durante el proceso constructivo de los piezómetros, una vez caracterizados los suelos, se les asignaron valores de rendimiento específico según los rangos establecidos por Johnson (1967), con base a las texturas del suelo (Tabla 7).

**Tabla 7.**

*Rendimiento específico según el tipo de suelo, (Johnson, 1967).*

Clasificación de suelo	Rangos de rendimiento específico Sy	
arcilla limosa	0.02	0.03
arcilla limosa	0.03	0.04
limo arcilloso	0.04	0.05
arcilla-arena	0.05	0.1
limo arenoso	0.1	0.15
arena limosa	0.15	0.25
arena	0.25	0.4



Posteriormente, se obtuvo un promedio ponderado del rendimiento específico por piezómetro, calculado a partir de la proporción de cada tipo de suelo identificado en los diferentes perfiles. Este enfoque permite representar la capacidad de almacenamiento del sistema a falta de información a diferentes profundidades, y ha sido ampliamente utilizado en estudios de estimación de recarga mediante el WFTM (Healy, 2010; Healy & Cook, 2002). A partir de estos valores puntuales se generó, mediante el método de interpolación de Kriging, una superficie que representara la distribución del rendimiento específico en todo el sitio. Se obtuvieron polígonos de rendimiento específico con diferentes valores dentro de cada área de influencia.

#### **4.3. Agua subterránea**

El agua subterránea fue monitoreada mensualmente durante un año hidrológico a partir de septiembre de 2023. El nivel freático se midió manual y automáticamente, con una sonda electroacústica Solinst graduada milimétricamente y con sensores de nivel HOBO que operan en un rango de cero a 207 kPa y de cero a nueve metros con un error de  $\pm 0.5$  cm que registran mediciones de presión y temperatura a cada hora (HOBO, 2008; Solinst, 2020). Los datos obtenidos fueron descargados in situ al inicio de cada mes por el equipo técnico de hidrología de Restauemos El Colorado, y posteriormente fueron transferidos en hojas de cálculo para su procesamiento (Figura 18).



**Figura 18.**

*Monitoreo de agua subterránea. (a) medición de PNF; (b) descarga de datos de los sensores*

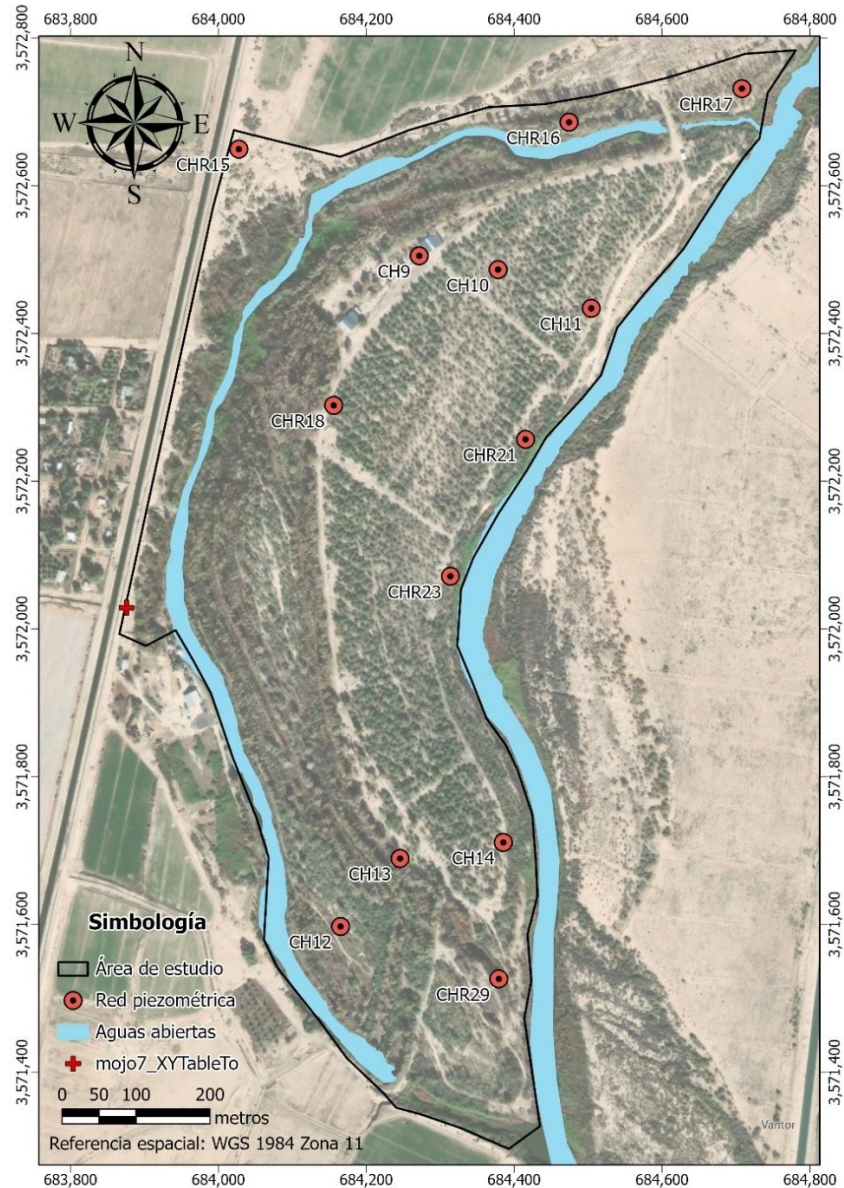


La red de monitoreo se conforma de 13 piezómetros instalados de manera longitudinal a lo largo del sitio de restauración, tomando en consideración una distribución transversal al eje del río, así como del meandro dentro del sitio (Figura 19).



Figura 19.

Red piezométrica El Chaussé



Al igual que los limnómetros del DN y DN se utilizó un GPS de doble frecuencia marca Topcon Modelo GR-5 para nivelar la cota de sus brocales, corrigiendo las elevaciones verticales y utilizando como referencia las coordenadas del banco de nivel Mojo7 (Tabla 3).



Como resultados se obtuvieron las coordenadas de los piezómetros en el DATUM horizontal UTM WGS 1984 Zona 11 Norte y en el DATUM vertical NAD 83, como se muestra en la Tabla 8, a continuación:

**Tabla 8.**

*Localización de los piezómetros de monitoreo de agua subterránea.*

<b>Sitio</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Elevación al brocal (msnm)</b>
CH9	684271.71	3572505.02	15.338
CH10	684378.30	3572486.33	16.220
CH11	684504.31	3572433.96	17.163
CH12	684165.27	3571597.30	14.542
CH13	684245.71	3571689.29	14.508
CH14	684385.33	3571711.03	14.929
CHR15	684027.75	3572649.38	18.404
CHR16	684474.25	3572685.84	14.796
CHR17	684708.03	3572731.30	14.476
CHR18	684155.97	3572302.54	16.115
CHR21	684415.48	3572256.60	16.124
CHR23	684313.80	3572071.34	15.940
CHR29	684379.27	3571526.39	13.575

La PNF y la ENF se obtuvieron mediante los registros de los sensores (leveloggers) instrumentados en 12 de 13 piezómetros. La metodología consistió en realizar una compensación entre la presión absoluta con la presión barométrica, para finalmente obtener la presión hidrostática. Los valores de presión obtenidos en kPa fueron convertidos a metros columna de agua aplicando el factor de conversión 0.1019744289 mca/kPa, que proviene de la inversa del producto de la densidad del agua por la aceleración gravitacional. La PNF horaria se obtuvo con los registros de los sensores en conjunto de la siguiente ecuación:

**Ecuación 9.**

*PNF*

$$PNF = \text{longitud de instalación} - (P_{hidro} * 0.1019744289)$$



Donde longitud de instalación es la profundidad a la que está instalado el sensor en el pozo de observación (m) y  $(P_{hidro} * 0.1019744289)$  es la presión hidrostática (mca).

Se utilizó la elevación al brocal de cada uno de los pozos para obtener la información del nivel freático en función de la elevación como se muestra en la siguiente ecuación:

**Ecuación 10.**

*ENF*

$$ENF = Elevación\ brocal - PNF$$

Donde ENF es la elevación del nivel freático (msnm), la elevación brocal es la elevación corregida durante la nivelación topográfica (msnm) y PNF es la profundidad del nivel freático (m).

Con esta información se generaron gráficas de elevación del nivel freático que permitieron observar el comportamiento del agua subterránea en el tiempo y con ello determinar la respuesta del nivel freático a las entregas de agua en el sitio, así como la recesión después de cada evento.

Se obtuvieron las elevaciones mínimas, promedio y máximas en cada piezómetro, información que se utilizó para generar mapas de líneas equipotenciales y para determinar las direcciones del flujo subterráneo mediante una interpolación de datos. Se interpoló mediante Kriging después de haber realizado un análisis exploratorio de los datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el que se compararon diferentes métodos de interpolación y se clasificaron mediante criterios basados en estadísticas de validación cruzada (Burrough et al., 2015).

Los mapas de líneas equipotenciales fueron utilizados para definir las áreas de influencia de los piezómetros para posteriormente realizar la estimación de la recarga por el método de fluctuación del nivel freático.



### **4.3.1. Recarga y descarga subterránea**

Para determinar el volumen de recarga y descarga subterránea se implementó la metodología del WTFM conforme a la ecuación 4, donde se emplea la variación de elevaciones del nivel freático, junto con los valores de rendimiento específico ( $S_y$ ); determinados a partir del análisis textural de los suelos en el área de estudio. La estimación de la recarga por áreas de influencia fue calculada con la metodología utilizada por Hernández-López (2023), partiendo de la delimitación de líneas equipotenciales obtenidas a partir de las elevaciones mínimas, promedio y máximas trazadas a cada 20 cm.

Debido a que, en cada una de estas áreas existen polígonos con distintos valores de  $S_y$ , fue multiplicado por el área de cada polígono, y la suma de estos productos se multiplicó por la variación de la ENF en el tiempo  $\left(\frac{\Delta h}{\Delta t}\right)$ , considerando recarga cuando la ENF presentó ascensos; y descarga cuando se registraron descensos. Las series de tiempo utilizadas para la estimación de la recarga y descarga representan el flujo neto, por lo tanto las pérdidas por evapotranspiración ya se contabilizan al utilizar esta metodología (Healy & Cook, 2002; Hou et al., 2023).

### **4.4. Climatología**

Los datos meteorológicos fueron procesados para estimar la evaporación del meandro en el área de estudio. Los datos de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento se obtuvieron por medio de una estación VantagePro2 de la marca Davis Instruments® instalada a 2 metros de altura dentro del área de estudio en las coordenadas 3,572,438.79 Norte, 684,162.33. Estos datos fueron recolectados mensualmente y procesados en hojas de cálculo donde se recopiló la información del periodo de monitoreo.

Los datos faltantes fueron estimados mediante el método estadístico de correlación utilizando los registros de la estación Yuma Valley de *The Arizona Meteorological Network*



(AZMET por sus siglas en inglés), ubicada en las coordenadas 3621477.28 Norte, 715,580.82 Este a 58 km al noreste de la estación en El Chaussé. Se llevó a cabo una correlación para las variables temperatura, radiación solar y humedad relativa con información de las estaciones entre septiembre del 2023 y noviembre del 2024.

La estimación de la evaporación del meandro se llevó a cabo utilizando la ecuación 7, propuesta por Allen (1998), quien desarrolló diferentes ecuaciones para estimar la evaporación de manera simplificada, considerando únicamente parámetros que se pueden obtener de estaciones meteorológicas básicas. Se escogió la ecuación que no utiliza datos de viento debido a la información faltante de la estación meteorológica en el área de estudio. Uno de los componentes de la ecuación para estimar la evaporación es la radiación extraterrestre, la que fue calculada utilizando la ecuación 8 del apartado 5.2.5, en la que se consideraran variables que se pueden obtener de la literatura, además de información de la latitud y longitud de la estación.

#### **4.5. Vegetación**

Para este estudio se consideró una longitud de raíces de tres metros de profundidad para la vegetación ribereña, de acuerdo con lo establecido por la literatura (Stromberg & Patten, 1996). Los tres metros de profundidad se consideraron como un parámetro crítico dentro del análisis debido a que la vegetación ribereña dejaría de estar conectada con el agua subterránea si la PNF disminuyera más allá de los tres metros de las raíces.

#### **4.6. Modelo conceptual del sistema dinámico de “El Chaussé”**

El modelo conceptual (Figura 20) fue construido utilizando sistemas de información geográfica, con el cuál para construir el esquema del modelo dinámico en Stella. Se incluyeron las entradas y salidas de agua del sitio consideradas para el modelo dinámico partiendo de la ecuación general de balance de acuerdo con la ley de conservación, donde:



### Ecuación 11.

*Balance de acuerdo con la Ley de Conservación.*

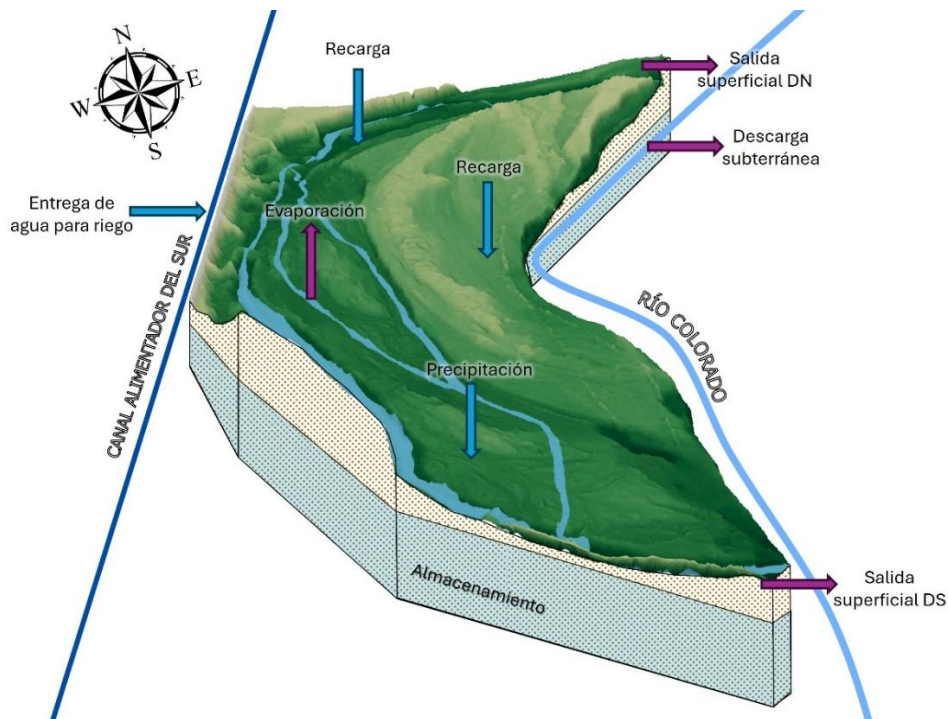
$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio en almacenamiento}$$

Donde las entradas son el volumen de agua para riego y la precipitación y las salidas son la recarga subterránea, la evaporación directa, y la salida superficial a través de DN y DS.

Por otro lado, se considera el agua subterránea dentro del balance, por lo que, utilizando la misma ecuación, se consideran como entrada la recarga y como salida la descarga. Al usar el método WTFM no es posible separar la evapotranspiración de los fenómenos de descarga debido a que estas fluctuaciones incluyen también los aumentos y disminuciones de nivel provocadas por este fenómeno, así que, si bien se incluye dentro del modelo conceptual, en el modelo dinámico esta variable está integrada a la descarga subterránea.

### Figura 20.

*Modelo conceptual del área de estudio*





#### **4.7. Configuración del modelo en Stella**

Para representar el funcionamiento de El Chaussé, se construyó un modelo dinámico en Stella, con el objetivo de detectar la relación entre las variables de entrada y salida del sistema y sus posibles variaciones e bajo diferentes escenarios de volúmenes de riego. Todas las ecuaciones del modelo se derivaron de datos medidos con los sensores de nivel, registros meteorológicos y estimaciones de recarga y descarga con el método WTFM.

##### **1. Variable de entrada: volumen de riego (flujo)**

el volumen diario de riego se obtuvo directamente de los sensores de presión instalados en la compuerta central (CC) y se ingresó a Stella como una tabla de volumen en el tiempo ( $m^3/d$ ).

##### **2. Almacenamiento superficial (stock)**

El volumen almacenado en el meandro se modeló como un stock que recibe aportaciones del riego y pierde agua mediante tres diferentes mecanismos: la evaporación directa del meandro, la recarga hacia el acuífero y la salida superficial controlada hacia el cauce principal del RC.

##### **3. Elevación del agua en el meandro (convertidor)**

Esta variable es la que controla la salida del agua superficial por DN y DS, por lo que es necesario modelar su comportamiento para automatizar la salida superficial.

##### **4. Evaporación directa**

Se estableció como un flujo de pérdida del stock meandro, estimada a partir de una versión simplificada del método de Penman para aguas abiertas.

##### **5. Salida superficial (flujo)**



El volumen que sale del meandro hacia el cauce principal del RC después de un evento de riego se representó mediante un flujo que es la sumatoria del volumen de salida por DN y el volumen de salida por DS.

#### **6. Recarga (flujo)**

El volumen de recarga se estableció como un flujo de salida del meandro (es decir, una pérdida para el stock superficial) y una entrada hacia el stock del acuífero, de acuerdo con lo establecido en la ecuación de balance.

#### **7. Acuífero (stock)**

El volumen almacenado en el acuífero se modeló como un stock que recibe el flujo de la recarga, que ocurre cuando hay ascensos en la elevación del nivel freático, y tiene un flujo de salida de descarga hacia el cauce principal del RC.

Esta representación de los stocks y flujos refleja la dinámica del sistema observada en campo: durante la entrega de agua, el acuífero responde con un ascenso en el nivel freático, mientras que al finalizar el riego inicia el proceso de recesión, en el que el agua fluye hacia las zonas más bajas, en este caso el cauce principal del RC.

#### ***4.7.1. Matematización del modelo***

El modelo dinámico se formuló a partir del balance de masas de los componentes superficial y subterráneo, utilizando un paso del tiempo diario, por lo que las variables de flujo se expresan en unidades de volumen por día ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) y representan la dinámica del sistema. Se conceptualizó mediante dos stocks principales: el meandro y el acuífero. Cada uno de estos almacenan volumen, mientras que los movimientos de agua entre estos y hacia afuera del sistema se representan como flujos.



**Stock meandro:** se consideraron las variables de entrada y salida del balance para ingresar la ecuación de este componente del modelo (Ecuación 12).

**Ecuación 12.**

*Stock acuífero*

$$\frac{dV_{meandro}}{dt} = riego(t) - Ev_{meandro} - recarga(t) - Q_{superficial}(t)$$

Donde  $riego(t)$  es el volumen de entrada al sitio mediante la compuerta ( $m^3/d$ ),  $Ev_{meandro}$  es la pérdida diaria desde la superficie del agua ( $m^3/d$ ),  $recarga(t)$  es el flujo desde el meandro hacia el acuífero y  $Q_{superficial}(t)$  es el volumen de salida superficial mediante la operación mecánica de las compuertas de DN y DS.

**Stock acuífero:** este stock recibe el flujo que sale del meandro, por lo que es una pérdida para el almacenamiento del meandro y al mismo tiempo un flujo positivo hacia el acuífero (Ecuación 13).

**Ecuación 13.**

*Stock acuífero*

$$\frac{dV_{acuifero}}{dt} = recarga(t) - descarga(t)$$

**Flujo elevación meandro:** se estableció la relación entre el riego, la salida del agua superficial y la elevación del meandro para representar sus cambios en la elevación del espejo del agua mediante una regresión múltiple ARX simple, que consiste en un modelo de series de tiempo lineal que predice variables de salida basándose en sus valores pasados y los valores de otras variables exógenas. Estas regresiones son utilizadas en la modelización dinámica (Lerner, 1990; Sophocleous, 2005). Esta regresión genera aumentos en la elevación del meandro cuando hay riego



y el descenso del nivel cuando hay ausencia de este, además de también ser influido por la descarga superficial del meandro hacia el río.

#### Ecuación 14.

*Dinámica del meandro*

$$\frac{dElev_{meandro}}{dt} = k[(\alpha + \beta_1 * riego(t) - \beta_2 * salida\ sup(t)) - Elev(t)]$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente autorregresivo de la elevación,  $\beta_1$  es el coeficiente de la variable exógena riego,  $\beta_2$  es el coeficiente de la variable exógena de salida superficial y  $k$  es el retardo en el tiempo.

**Flujo salida superficial:** si bien la salida superficial se compone de la sumatoria de las salidas de DN y DS, en el modelo se está usando únicamente una salida debido a que las compuertas no suelen ser operadas al mismo tiempo, y para liberar el agua de riego una vez este finaliza, se abre ya sea DN o DS. Se utilizó una ecuación condicionante para habilitar el flujo desde el meandro hacia el cauce cuando la elevación de este llegue a la cota final de riego ( $\approx 14.17$  msnm) Se utilizó la ecuación del ajuste de función, de DN presentado en la Tabla 5, multiplicada por 86.4 para obtener el volumen de salida en  $m^3/día$ . Además de condicionar la salida superficial cuando se alcanza el nivel máximo, se condicionó para que se abriera el día en que finalizara el riego y además, que se mantuviera abierta durante dos días como se observa en los datos monitoreados.

**Flujo evaporación directa del meandro:** esta se incorporó explícitamente como un flujo de salida sin que sea dinámico, ya que las variables climatológicas que afectan la evaporación no se incluyeron como parte del modelo dinámico.

**Flujo recarga al acuífero:** la recarga se estimó inicialmente mediante el método WTFM, con estos datos se ajustó una regresión cuadrática de la interrelación entre la recarga diaria total y el volumen de riego, para que esta varíe cuando el volumen de riego sea modificado.



**Ecuación 15.**

*Regresión no lineal para el flujo de recarga*

$$recarga(t) = a_0 + a_1 * riego(t) + a_2 * riego(t)^2$$

**Flujo descarga subterránea:** la descarga se representó mediante una regresión cuadrática ajustada en función de la elevación del meandro, condicionándola para que no ocurriera de manera simultánea a la recarga.

**Ecuación 16.**

*Regresión no lineal para el flujo de descarga.*

$$descarga(t) = b_0 + b_1 * Elev_{meandro}(t) + b_2 * Elev_{meandro}(t)^2$$

Los flujos tanto de recarga como de descarga se pueden representar mediante relaciones empíricas a través de regresiones no lineales, como lo han estudiado Ardana et al. (2022), X. Huang et al. (2019), Ouyang et al. (2016) y Van Lanen et al. (2024).

**Elevación del nivel freático:** finalmente, utilizando la ecuación del WTFM, se despejó la variación de nivel para convertir la recarga del modelo en elevación del nivel freático general del sitio, utilizando el promedio de rendimiento específico del sitio, así como la sumatoria de todas las áreas de influencia (Ecuación 18).

**Ecuación 17.**

*Variaciones en el nivel freático a partir de la Ecuación 4 de recarga*

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A * S_y}$$

Esto fue utilizado para conocer en función del nivel, cómo afectan las variaciones en el volumen de entrada, ya que las raíces de la vegetación ribereña crecen hasta tres metros.



#### ***4.7.2. Calibración y validación del modelo***

Durante la calibración del modelo se ajustaron los parámetros que controlan la recarga, la descarga, la elevación del meandro y la salida superficial del sistema, de manera que el comportamiento de los datos simulados reprodujera de manera adecuada los datos observados durante el año de monitoreo. Después de haber llevado a cabo la calibración de cada uno de los flujos y convertidores del sistema, se corrió el modelo para validar las series diarias simuladas contra las observadas de la elevación del meandro, la recarga subterránea, la descarga subterránea y la salida superficial. Además, se llevó a cabo una validación temporal, evaluando que coincidieran los eventos en la simulación con respecto a lo observado.

Para establecer el estado inicial del modelo se eliminaron las entregas de flujos ambientales realizadas durante el año hidrológico, con el fin de que las reducciones del volumen de entrada se aplicaran exclusivamente sobre los riegos programados para el sitio. El volumen total de riego del estado inicial fue de 2,349,959 m<sup>3</sup>. En condiciones normales de operación, el sitio recibe riegos de aproximadamente 250,000 m<sup>3</sup> en nueve meses del año, además de dos riegos de menor magnitud destinados a mantener los niveles del agua superficial en el meandro; y un mes en el que no hay riego.

#### **4.8. Escenarios**

A partir del estado inicial se plantearon tres escenarios de reducción del volumen de riego:

**Escenario 1)** en este escenario se aplicó una disminución del 20% en el volumen para el riego del sitio. Considerando: 1] riegos de 250,000 m<sup>3</sup> durante marzo a septiembre, 2] dos riegos de mantenimiento entre 40,000 y 50,000 m<sup>3</sup>, y 3] tres meses sin entregas de agua para riego.

**Escenario 2)** en este escenario se aplicó una disminución del 30% en el volumen para el riego del sitio, siendo reflejadas tanto en su magnitud como su frecuencia. Se consideró: 1] Riegos



entre 230,000 m<sup>3</sup> y 250,000 m<sup>3</sup> durante los meses de marzo a septiembre, 2] dos riegos de mantenimiento de entre 40,000 y 50,000 m<sup>3</sup>, y 3] tres meses sin entregas de agua para riego.

**Escenario 3)** Se planteó un tercer escenario de reducción del 50% del volumen para simular la respuesta del sistema a la reducción abrupta de volumen de entrada. Estas disminuciones se aplicaron únicamente en frecuencia, ya que se asignaron volúmenes de mayor magnitud (300,000 m<sup>3</sup>). Este escenario considera: 1] tres riegos de 300,000 m<sup>3</sup> en mayo, julio y agosto, 2] un riego de 250,000 m<sup>3</sup> en marzo, 3] un riego de mantenimiento (40,000 m<sup>3</sup>) en diciembre, y 4] ausencia de riego durante los siete meses restantes.

#### **4.9. Análisis de los resultados y generación de estrategias de manejo adaptativo**

Por último, se analizaron los resultados obtenidos del balance, así como del sistema dinámico, con lo que se hicieron las propuestas de reducción de volúmenes de entrada como parte de un plan de manejo adaptativo del sitio El Chaussé.



## 5.Resultados

### 5.1.Balance

#### *5.1.1. Agua superficial*

El volumen de entrada de agua se obtuvo para cada uno de los eventos de entrega para riego en el sitio, y se consideró, además, el volumen que ingresó al sitio como Flujos Ambientales Federales (AF).

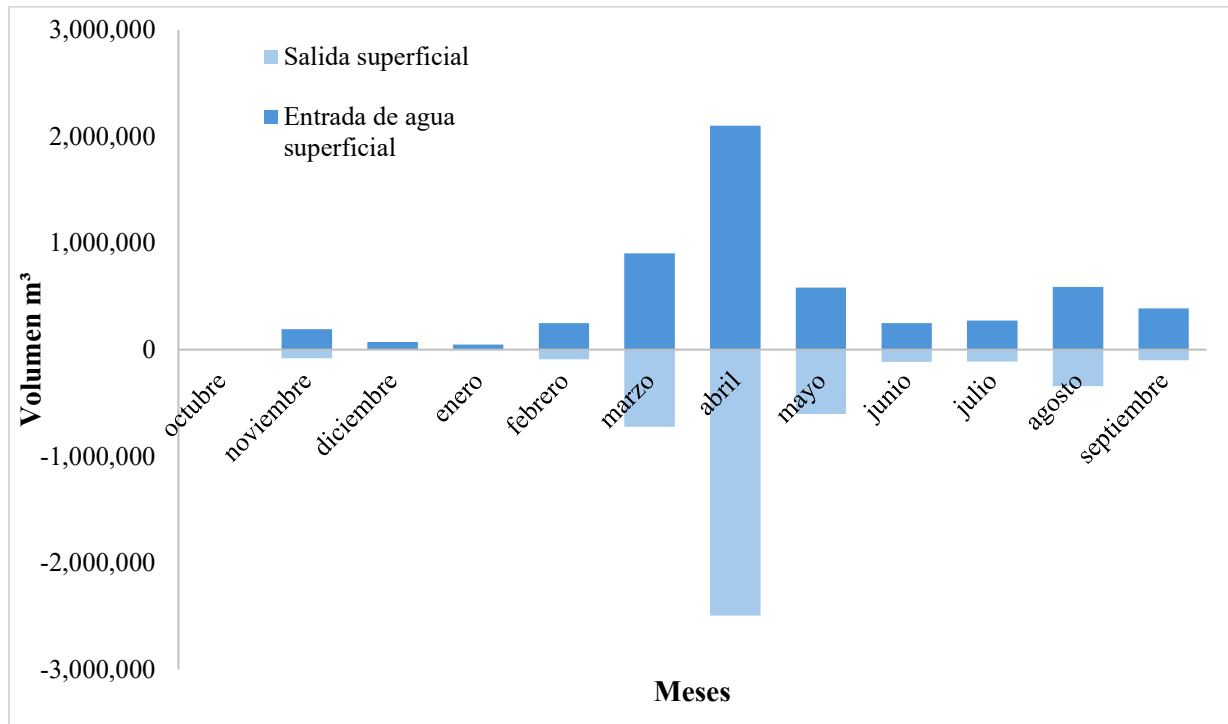
El año de estudio inició en octubre de 2023 y finalizó en septiembre de 2024. Se observa como en los meses de marzo hasta mayo hubo una entrega de agua adicional al volumen de riego; este volumen fue una entrega de AF directamente al RC que entraron y salieron por el sitio de manera inmediata, es decir, no hubo retención del agua mediante las estructuras de control. Además de estas entregas de AF, el mes con mayor volumen para riego fue agosto, en el que se utilizaron 588,988 m<sup>3</sup>, seguido de septiembre y julio.

Durante octubre, diciembre y enero no hubo volumen de salida, esto debido a que en octubre no hubo riego y durante diciembre de 2023 y enero de 2024 se entregó volumen únicamente con el propósito de mantener el nivel en el sitio, por lo que las estructuras de control no se abrieron. Sin tener en cuenta los meses en los que hubo entregas de flujos ambientales, el porcentaje de agua que salió de manera superficial del sitio osciló entre el 25 y 58% del volumen total de entrada, con una media de 41%. El mes en el que salió más volumen fue en abril (2,494,633.3 m<sup>3</sup>) y en mes en el que hubo menor salida superficial fue noviembre de 2023 (81,520.1 m<sup>3</sup>) (Figura 21).



**Figura 21.**

*Entradas superficiales al sistema*

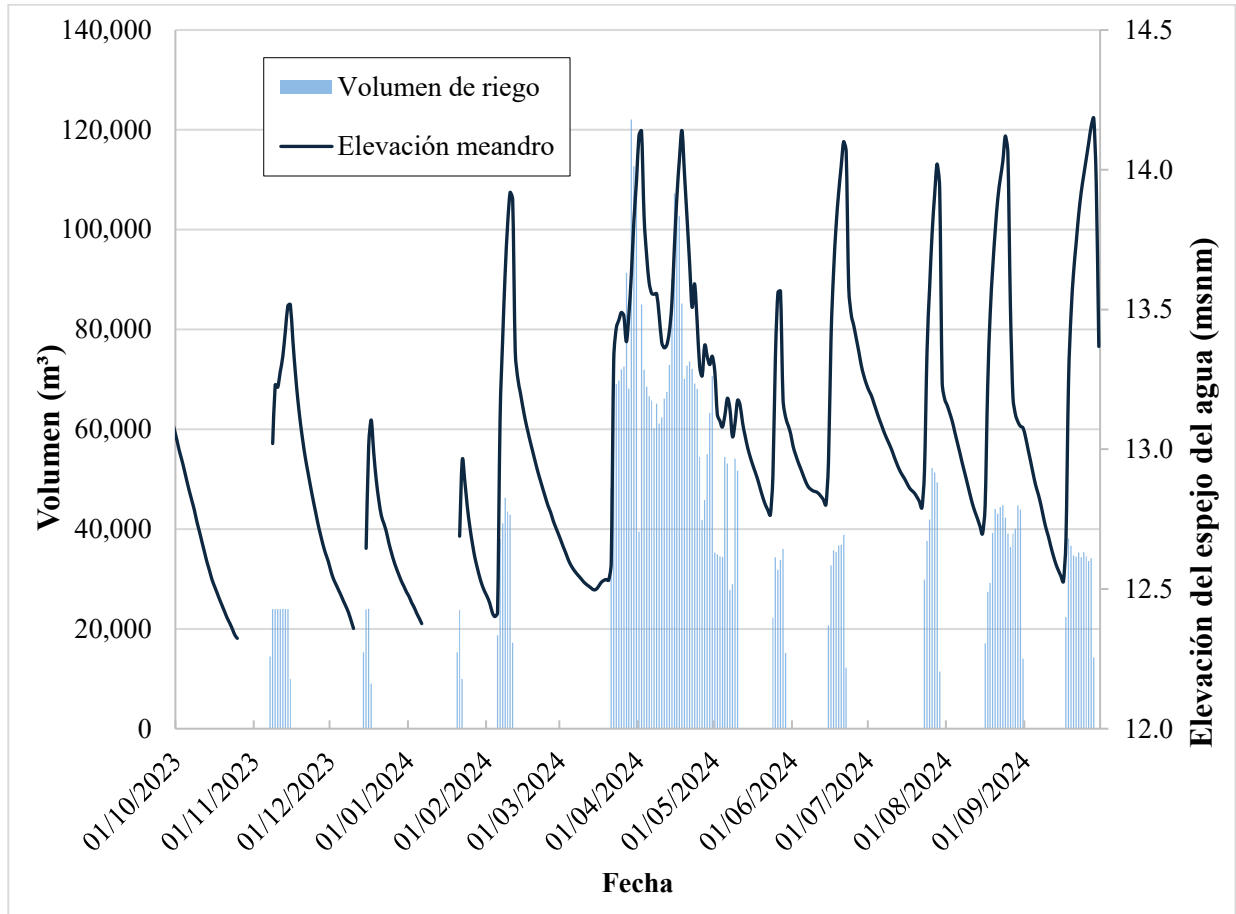


En la Figura 22 se observan los cambios en la elevación del agua superficial y los tiempos de respuesta durante las entregas de agua para riego en El Chaussé. Se incluye además una gráfica con el volumen de las entregas para poder relacionar los eventos con los cambios en la elevación del agua. Se observan aumentos de hasta 1.5 metros durante las entregas de agua, en el momento en que estas finalizan y se abren las estructuras reguladoras DN y DS, la elevación empieza a disminuir.



**Figura 22.**

*Volumen de entrada y elevación del agua superficial*



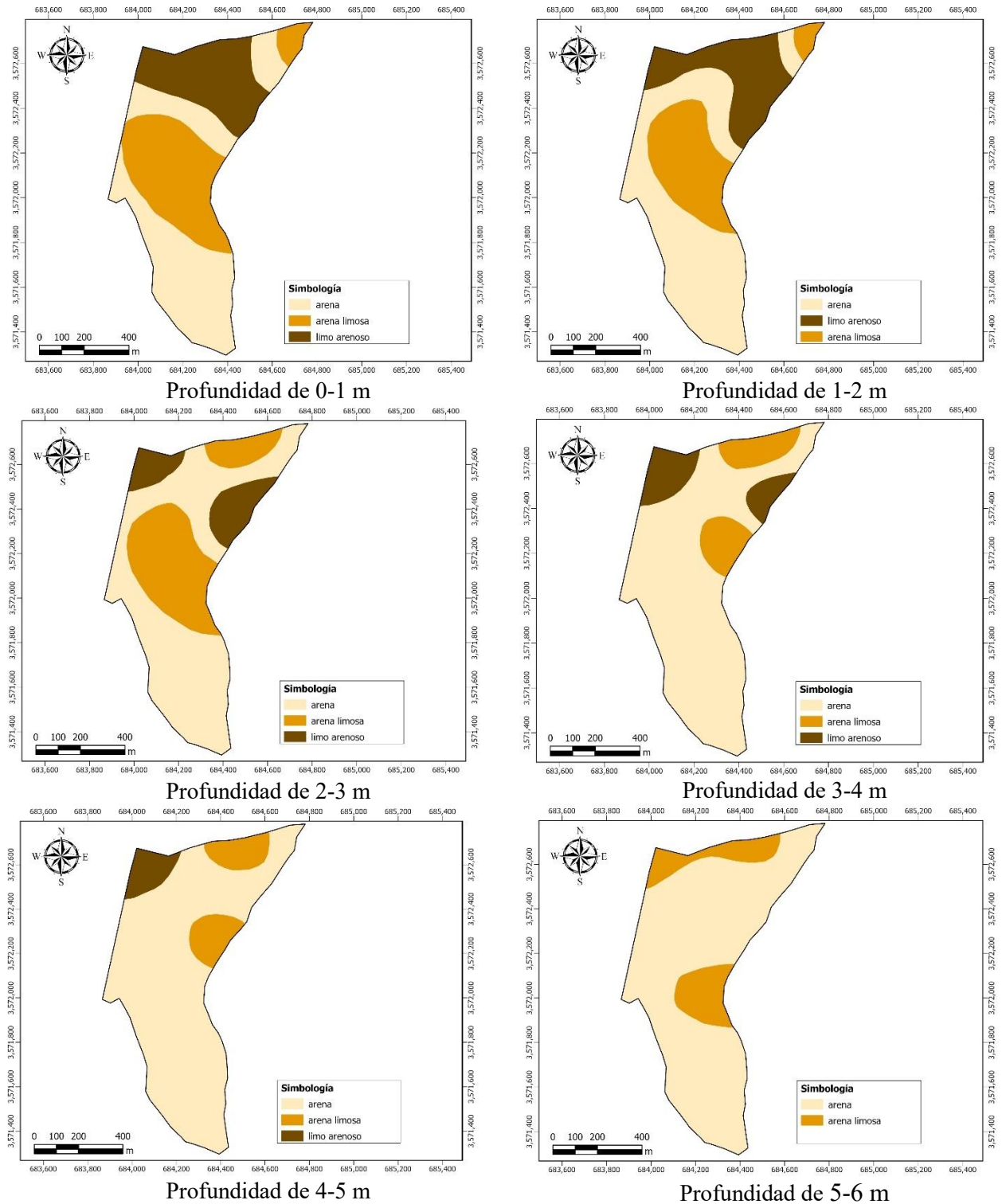
### 5.1.2.Suelo

Los mapas de distribución de suelos, contruidos a partir de descripciones litológicas de los piezómetros, muestran variaciones en las propiedades de los materiales del subsuelo a cada metro de profundidad (Figura 23), hasta los seis metros ya que, a partir de esta profundidad, las muestras indican exclusivamente suelos arenosos. Los tipos de suelos que predominan en el sitio en la zona Norte y Centro son arenas, arena limosa y limo arenoso, esto se mantiene desde la superficie hasta los seis metros de profundidad, en cambio en la zona Sur predominan los suelos arenosos desde la superficie.



Figura 23.

Tipo de suelo en el área de estudio a diferentes profundidades

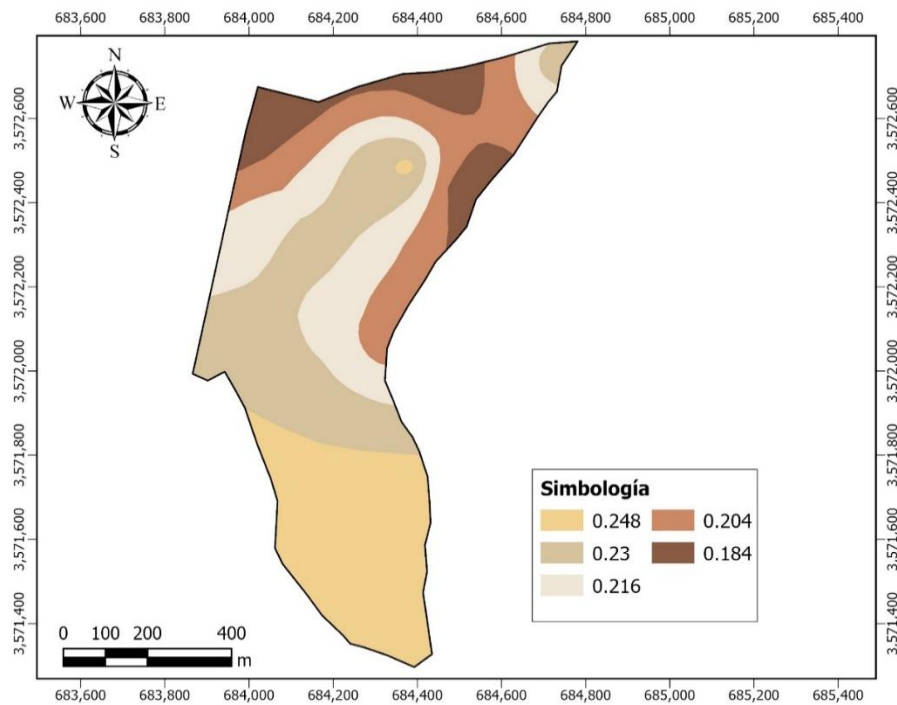




A partir de la clasificación de los suelos en el área de estudio se asignaron valores de  $S_y$  de acuerdo con la Tabla 7. Debido a que no es posible diferenciar la contribución específica de cada capa litológica a las fluctuaciones observadas del nivel freático, la respuesta del sistema se considera representativa de la porción de acuífero del área de estudio. Bajo esta limitación, se obtuvo un promedio ponderado de  $S_y$  en cada uno de los piezómetros y a partir de esta información se interpoló mediante el método de Kriging con SIG para obtener una superficie de rendimiento específico (Figura 24).

**Figura 24.**

*Rendimiento específico calculado para los suelos del área de estudio*



### 5.1.3. Agua subterránea

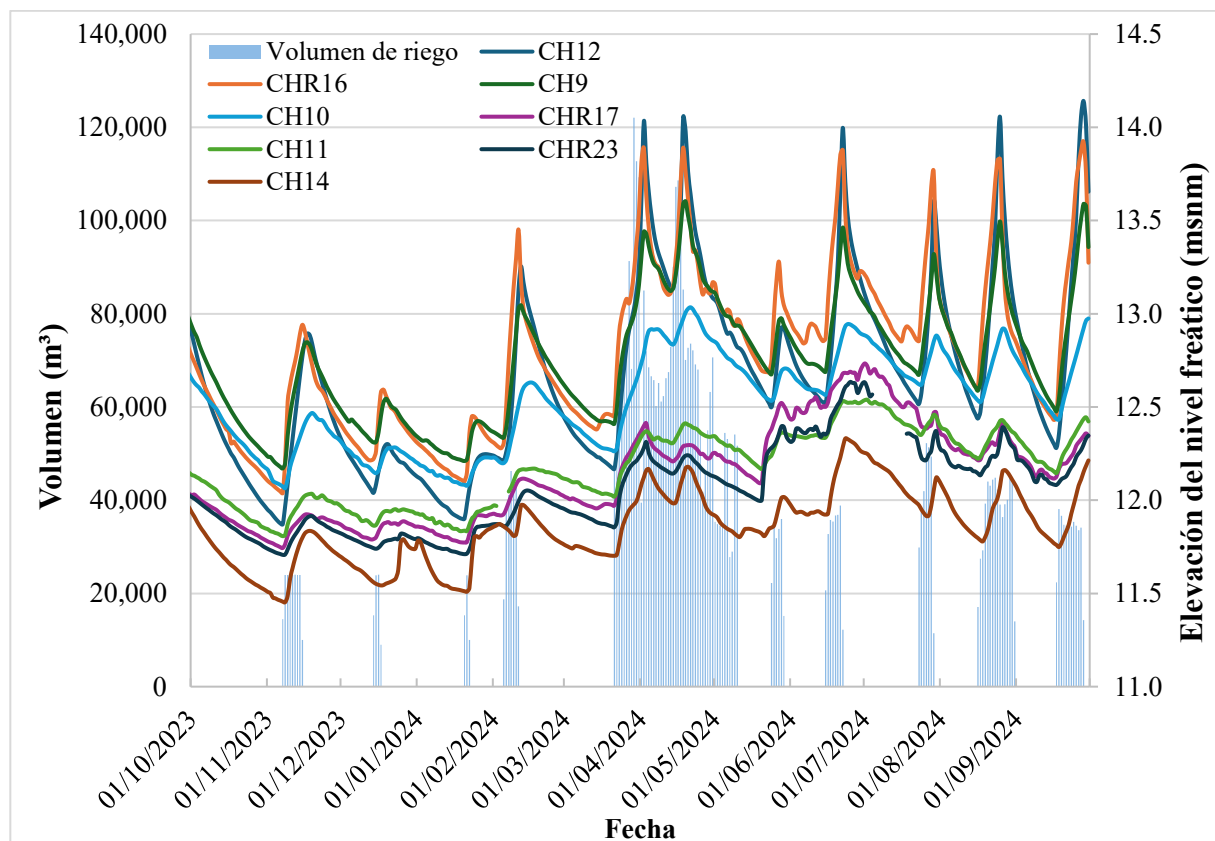
En la Figura 25 se observan las elevaciones del nivel freático de los piezómetros que representaron las áreas de influencias de El Chaussé. La ENF máxima se registró en los piezómetros CH12 y CHR16 durante los días en que hubo entrega de agua para riego, así como la



entrega de los flujos ambientales de AF. Aunque estos flujos fueron entregados durante marzo, abril y mayo, se observa un incremento general de la ENF promedio a partir de marzo del 2024 que se mantiene hasta septiembre del mismo año. Las elevaciones máximas se registraron el último día de la entrega de agua para riego de septiembre de 2024. Las fluctuaciones que se registraron a partir de marzo se dieron en respuesta a las variaciones en el volumen de entrega diario, mismo que se graficó en la parte posterior a manera de columnas apiladas. Se observa que el comportamiento del agua subterránea varía cuando hay cambios en los volúmenes de entrega.

**Figura 25.**

*Elevaciones del nivel freático observadas*



Para estimar el volumen de recarga y descarga de agua subterránea con el método WTFM, se determinaron áreas de influencia dentro del área de estudio para estimar la recarga para cada

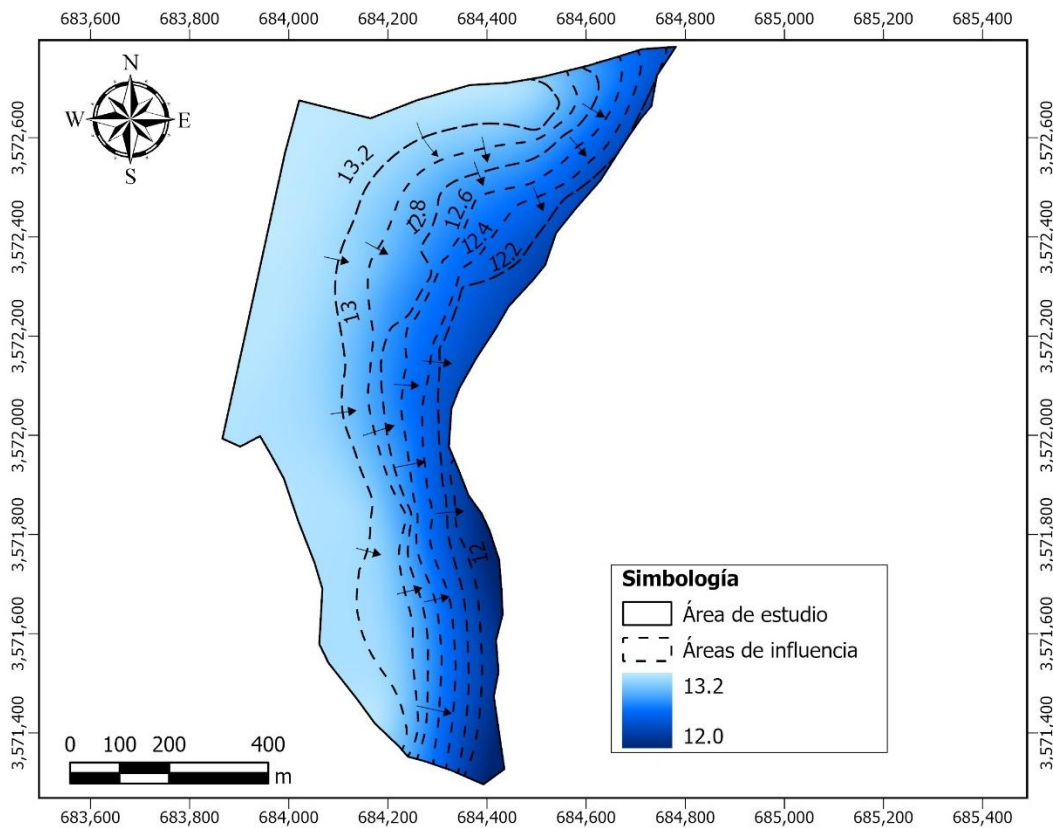


una de estas. Se obtuvo un mapa de líneas equipotenciales y las direcciones de flujo con SIG para determinar las áreas de influencia de los piezómetros, al promediar las elevaciones mínimas, promedio y máximas durante el año hidrológico (Figura 26).

Las elevaciones promedio del sitio se encuentran entre los 12 y 13.2 msnm, con una dirección del flujo hacia el Sureste, desde el meandro hacia el RC.

**Figura 26.**

*ENF promedio y direcciones de flujo*

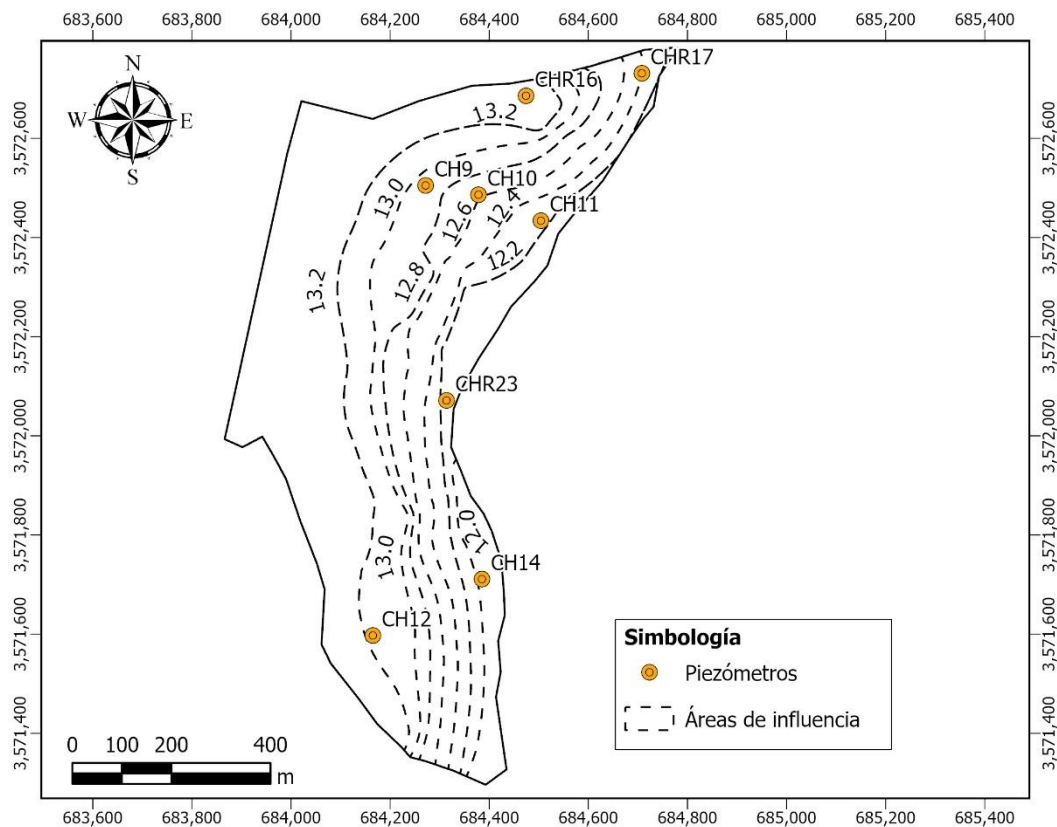




Las áreas de influencia están delimitadas a cada 20 cm de diferencia en la ENF, como se muestra en la Figura 27.

**Figura 27.**

*Áreas de influencia para estimación de recarga y descarga subterránea*



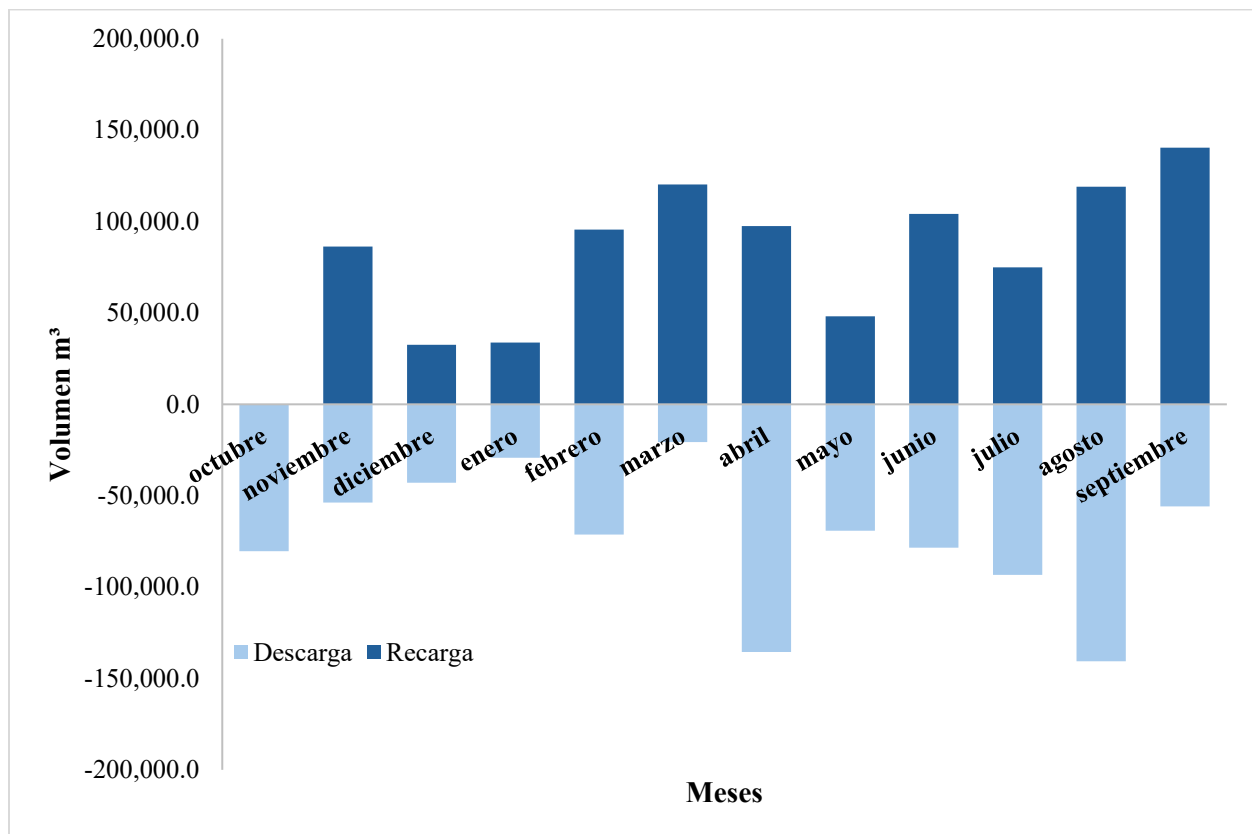
La recarga y descarga por área de influencia fue sumada para obtener los volúmenes totales en el área de estudio, en la Figura 28 se muestra la recarga y descarga mensual durante el año monitoreado. La recarga varió entre 32,621.9 y 140,333.9 m<sup>3</sup>. En octubre no se observa recarga debido a la ausencia de riego, y la descarga que se observa es la recesión del agua subterránea después de la entrega de agua del mes previo. Si bien hubo algunos meses en los que el valor de la descarga fue mayor, en el año hubo un cambio de almacenamiento positivo de 81,319.1 m<sup>3</sup>.



Los meses en los que hubo mayor recarga fueron marzo y abril del 2024, con un volumen de 120,219.7 m<sup>3</sup> y 97,487.9 m<sup>3</sup> respectivamente. Los meses en los que hubo mayor descarga subterránea fueron agosto y abril, con un volumen de 140,619 m<sup>3</sup> y 135,575.5 m<sup>3</sup>.

**Figura 28.**

*Recarga y descarga medidas*

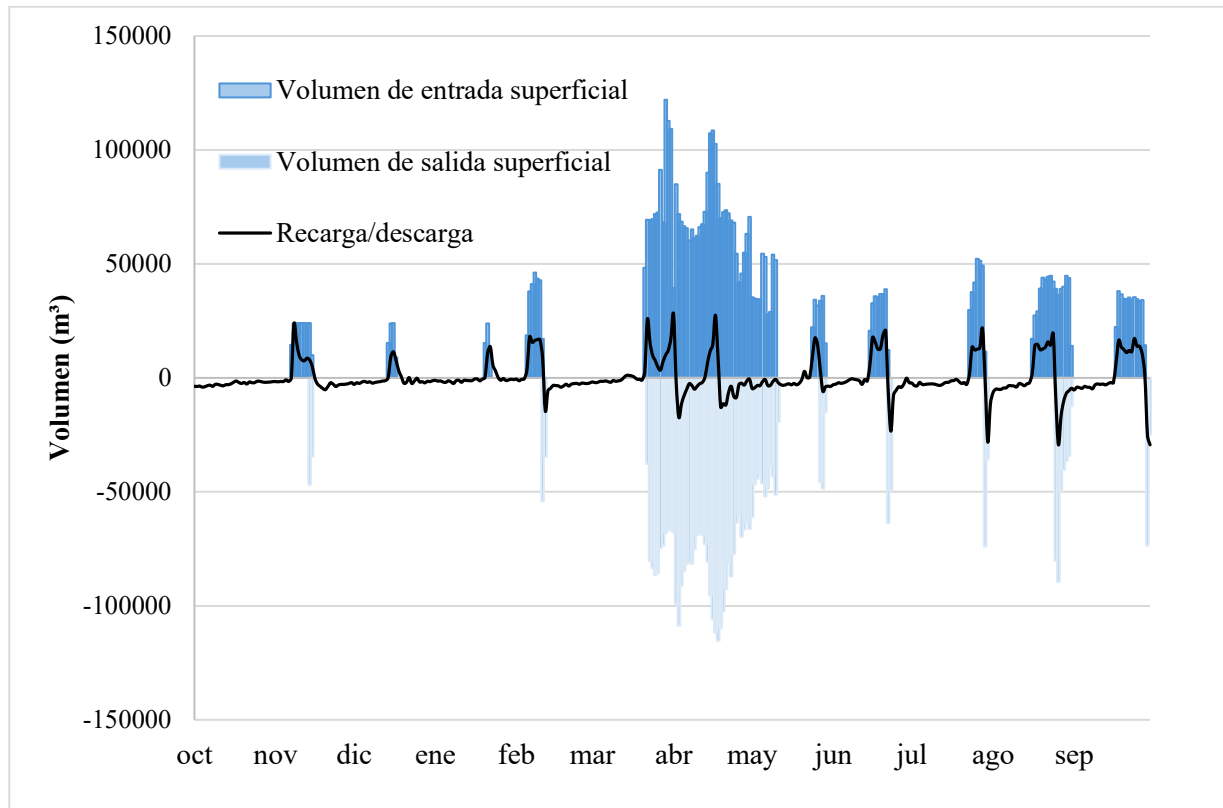


Para mostrar la respuesta del agua subterránea a las entregas de agua en el sitio se graficó de manera diaria el volumen de riego y el volumen de salida superficial con barras apiladas; y la recarga y descarga con una línea continua. Se observa como la recarga empieza a ocurrir en el momento en el que empieza la entrega, a diferencia de la descarga subterránea, que ocurre en ausencia de este y cuando se abren las estructuras de control de DN y DS (Figura 29).



**Figura 29.**

*Volumen diario de entrega, recarga y descarga 2023-2024*



#### **5.1.4. Climatología**

La correlación entre los datos de temperatura, radiación solar y humedad relativa resultó en los ajustes de función presentados en la Tabla 9 con coeficientes de determinación de 0.82, 0.78 y 0.75 respectivamente (Tabla 9) y cada ecuación fue utilizada para completar los datos faltantes en la serie de datos.

**Tabla 9.**

*Ajustes de función variables meteorológicas*

<b>Variable</b>	<b>Ajuste de Función</b>
Temperatura	$y = 0.9737x - 1.6222$
Radiación Solar	$y = 245.18x + 14.756$
Humedad relativa	$y = 0.8459x + 0.0021$



Con los datos diarios completos se estimó la evaporación en aguas abiertas para el meandro de El Chaussé utilizando la Ecuación 7. Para lo que se calculó previamente la radiación extraterrestre utilizando la Ecuación 8 de manera diaria en hojas programadas. La evaporación anual fue de 50,943.1 m<sup>3</sup>, siendo junio el mes con mayor volumen mensual evaporado, con un total de 6,523 m<sup>3</sup>. Por el contrario, el mes en el que hubo menor volumen de evaporación fue enero, con 1,819.9 m<sup>3</sup>.

**Tabla 10.**

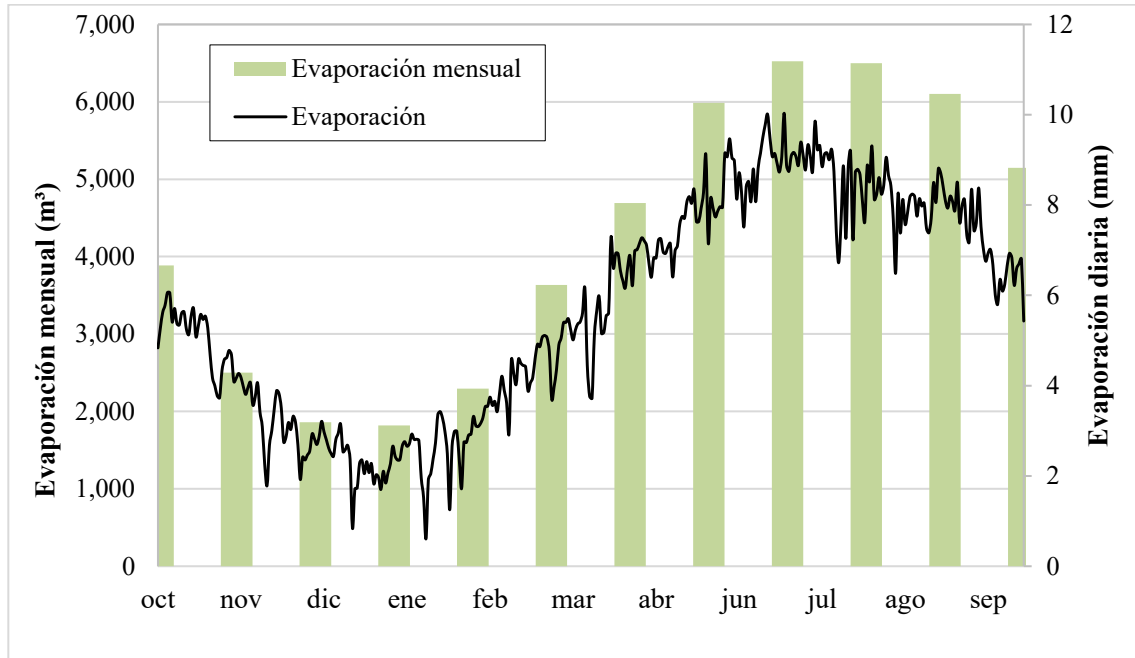
*Evaporación directa meandro de El Chaussé*

<b>Tiempo</b>		<b>Variable</b>	
<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Evaporación (mm)</b>	<b>Evaporación (m<sup>3</sup>)</b>
<b>2023</b>	<b>octubre</b>	159.3	3,885.8
	<b>noviembre</b>	102.4	2,499.5
	<b>diciembre</b>	76.2	1,858.6
<b>2024</b>	<b>enero</b>	74.6	1,819.9
	<b>febrero</b>	94.1	2,295.4
	<b>marzo</b>	148.9	3,634.1
	<b>abril</b>	192.4	4,694.3
	<b>mayo</b>	245.3	5,985.7
	<b>junio</b>	267.3	6,523.0
	<b>julio</b>	266.4	6,499.1
	<b>agosto</b>	250.0	6,100.4
	<b>septiembre</b>	210.9	5,147.2
<b>Total</b>		2,087.8	50,943.1



**Figura 30**

*Evaporación diaria y volumen mensual*



Los resultados diarios obtenidos fueron utilizados como dato de entrada en el modelo, ya que no se modelizó la dinámica de esta variable.

En la Tabla 11 se presenta el resumen del balance obtenido con los datos monitoreados durante el periodo de estudio que fueron descritos anteriormente. El cambio de almacenamiento total obtenido para el periodo de estudio fue de 73,747.6 m<sup>3</sup>, si no se tuvieran en cuenta los meses en los que hubo AF se obtiene un cambio en almacenamiento mucho mayor (529,845.2 m<sup>3</sup>), ya que el sitio alcanza a retener más volumen de agua de manera superficial principalmente. La salida superficial representó un 82.3%, la recarga un 16.8% y la evaporación un 0.9% del volumen total de entrada.



**Tabla 11.**

*Balance en El Chaussé 2023-2024*

Año	Mes	Volumen de entrada (m³)	Recarga subterránea (m³)	Descarga subterránea (m³)	Evaporación (m³)	Volumen de salida superficial m³	Δ almacenamiento sup (m³)	Δ almacenamiento sub (m³)	Δ almacenamiento total (m³)
<b>2023</b>	octubre	0.0	0.0	80,424.8	3,885.8	0.0	-3,885.8	-80,424.8	-84,310.6
	noviembre	192,394.7	86,316.4	53,767.2	2,499.5	81,520.1	22,058.6	32,549.2	54,607.8
	diciembre	72,185.3	32,621.9	42,846.8	1,858.6	0.0	37,704.8	-10,224.9	27,479.9
	enero	49,165.6	33,718.7	29,237.4	1,819.9	0.0	13,627.0	4,481.3	18,108.3
<b>2024</b>	febrero	247,733.7	95,587.9	71,339.2	2,295.4	88,785.0	61,065.3	24,248.7	85,314.0
	marzo	904,507.2	120,219.7	20,642.4	3,634.1	723,828.1	56,825.3	99,577.2	156,402.6
	abril	2,103,129.1	97,487.4	135,575.5	4,694.3	2,494,633.3	-493,686.0	-38,088.1	-531,774.0
	mayo	582,690.4	48,207.4	69,242.1	5,985.7	602,502.8	-74,005.5	-21,034.8	-95,040.3
	junio	249,272.1	104,237.4	78,447.9	6,523.0	113,176.4	25,335.4	25,789.4	51,124.8
	julio	273,763.4	74,853.3	93,270.4	6,499.1	109,809.9	82,601.1	-18,417.1	64,184.0
	agosto	588,988.1	119,015.0	140,619.5	6,100.4	343,068.9	120,803.8	-21,604.5	99,199.3
septiembre	387,924.0	140,333.9	55,866.5	5,147.2	98,458.4	143,984.6	84,467.4	228,452.0	
<b>Total</b>		<b>5,651,753.5</b>	<b>952,599.0</b>	<b>871,279.8</b>	<b>50,943.1</b>	<b>4,655,783.0</b>	<b>-7,571.5</b>	<b>81,319.1</b>	<b>73,747.6</b>

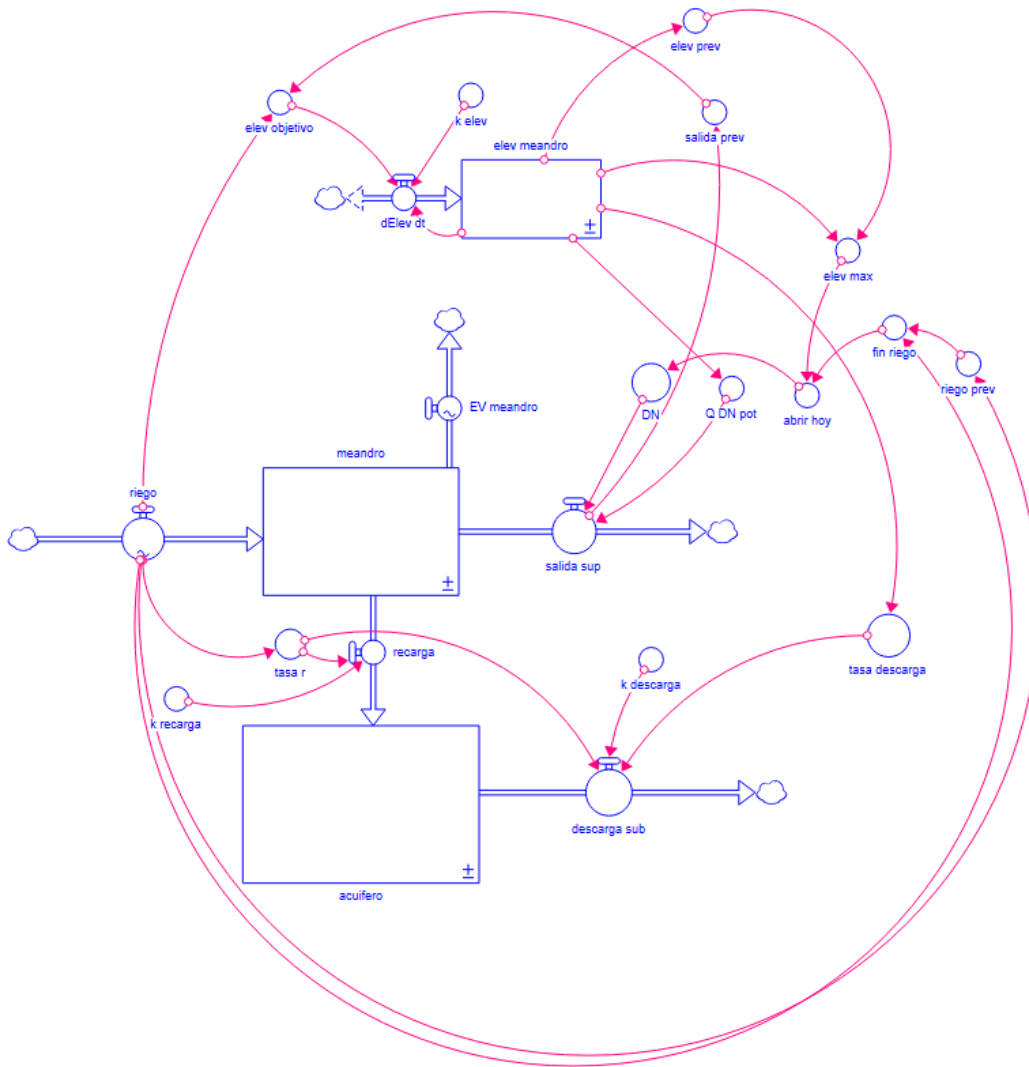


## 5.2. Modelo dinámico

La Figura 31 representa la estructura final del modelo desarrollado en STELLA para simular la dinámica del sitio de restauración, incorporando los procesos de almacenamiento superficial, recarga subterránea, descarga subterránea y salida superficial regulada. El modelo integra elementos empíricos (regresiones calibradas), condiciones operativas (apertura de compuertas) y procesos hidrológicos simulados mediante ecuaciones diferenciales.

**Figura 31.**

*Configuración del modelo en Stella*





La arquitectura general se compone de tres stocks principales, cinco flujos, y una serie de convertidores y condiciones lógicas que permiten reproducir el comportamiento observado en campo.

### ***5.2.1. Matemización del modelo***

El volumen de agua para riego se ingresó al modelo como una serie de tiempo, así como la evaporación directa, ya que los datos necesarios para que esta última sea una variable dinámica no se incluyeron en el modelo. Por otro lado, la recarga subterránea se representó mediante una regresión cuadrática en función del volumen diario de riego con un coeficiente de determinación  $R^2=0.812$ :

$$recarga = -1.41 \times 10^{-5} * riego^2 + 1.165 * riego - 11480$$

La descarga subterránea se obtuvo de igual manera mediante una regresión cuadrática en este caso en función de la elevación con un  $R^2=0.722$ :

$$descarga = -736.45 * elev_{meandro}^2 + 14623.89 * elev_{meandro} - 69911.22$$

La elevación del meandro se representó mediante un modelo autorregresivo con variables exógenas, en función del riego y del volumen de salida superficial con un coeficiente de determinación  $R^2=0.971$ :

$$elev_{meandro} = -4.64 \times 10^{-5} * salida_{superficial} + 6.80 \times 10^{-6} * riego + 12.63$$

El volumen de salida superficial fue modelado a través de los ajustes de función presentados en la Tabla 5 utilizando la abertura de 0.70 m. Se simplificó la salida a la apertura de



una sola compuerta posterior al riego debido a que en el sitio solo se abre una de estas cuando la entrega de agua finaliza.

### 5.2.2. Calibración y validación del modelo

Para calibrar el modelo se utilizaron 157 días, ya que estos representan un comportamiento usual de los planes de riego para el sitio. Durante la calibración del modelo se ajustaron los parámetros que controlan la recarga, la descarga, la elevación del meandro y la salida superficial del sistema, con el fin de que el comportamiento de los datos simulados reprodujera de manera adecuada los observados. Este proceso se llevó a cabo para la elevación del meandro, la recarga, la descarga subterránea y la salida de agua superficial controlada. Se calculó el error absoluto medio y el error cuadrático medio (MAE y RMSE por sus siglas en inglés) para estas variables (Tabla 12) además de realizar una comparativa visual de los datos observados vs simulados.

**Tabla 12.**

*Parámetros estadísticos de la calibración del modelo*

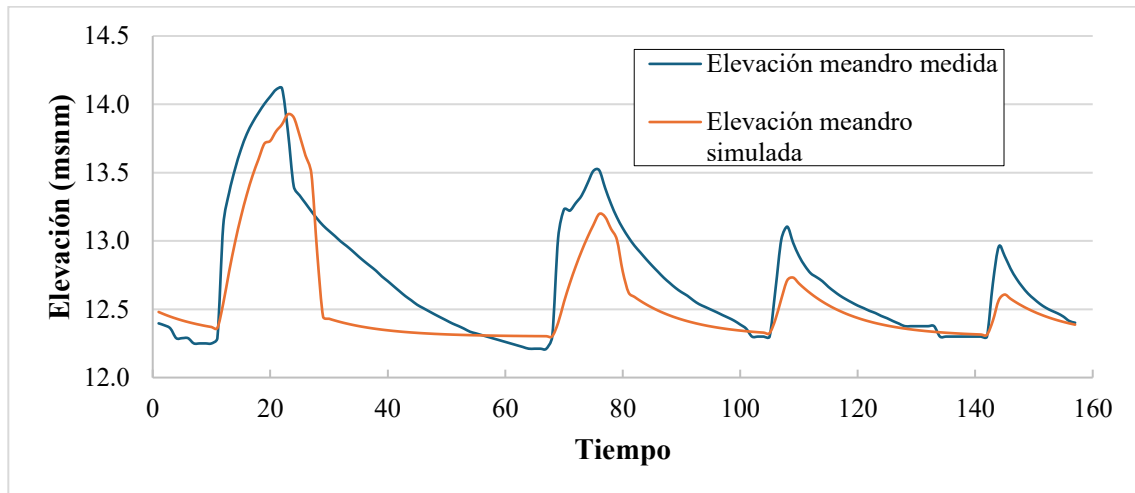
Variable	MAE	RMSE
Elevación meandro (m)	0.2	0.266
Recarga (m <sup>3</sup> /día)	956	2751
Descarga subterránea (m <sup>3</sup> /día)	1038	2534
Salida superficial (m <sup>3</sup> /día)	3535	15,774

Tanto en la serie de datos medidos como simulados, la elevación del meandro muestra ascensos durante los riegos y descensos progresivos posteriores a este, sin embargo, la elevación simulada presenta valores máximos menores que los medidos en todos los eventos; mientras los picos medidos alcanzan los 14.2 msnm, los simulados llegan hasta los 13.8 msnm. Aunque existen diferencias de magnitud, el modelo reproduce adecuadamente la secuencia relativa de ascensos y descensos, indicando que la simulación respeta la dinámica del sistema (Figura 32).



**Figura 32.**

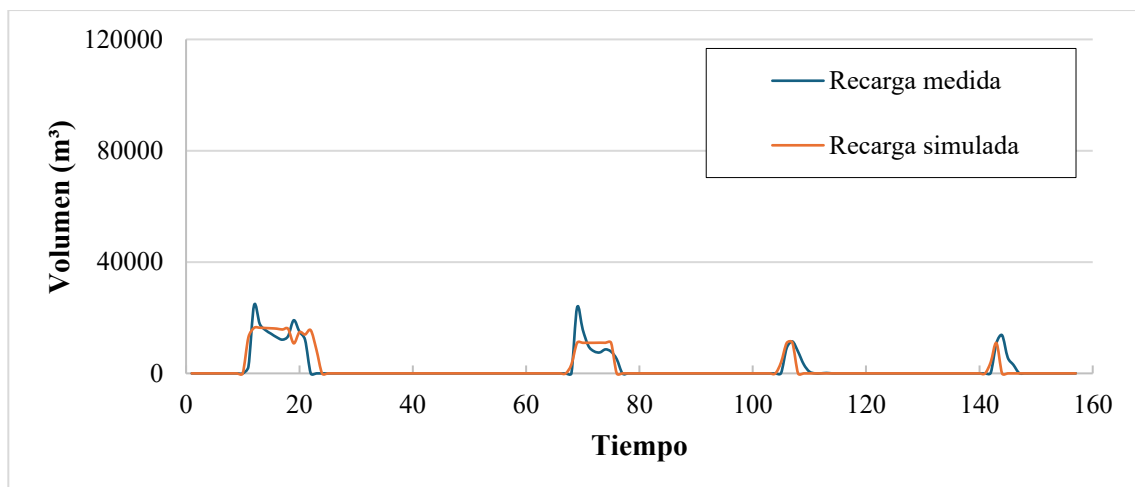
*Elevación del meandro medida-simulada*



Por otro lado, en el volumen de recarga se observa una menor diferencia entre lo medido vs simulado, especialmente en términos de temporalidad y magnitud. La recarga simulada ocurre exactamente durante los mismos días que los medidos, indicando que el modelo replica correctamente esta variable (Figura 33).

**Figura 33.**

*Recarga medida-simulada*

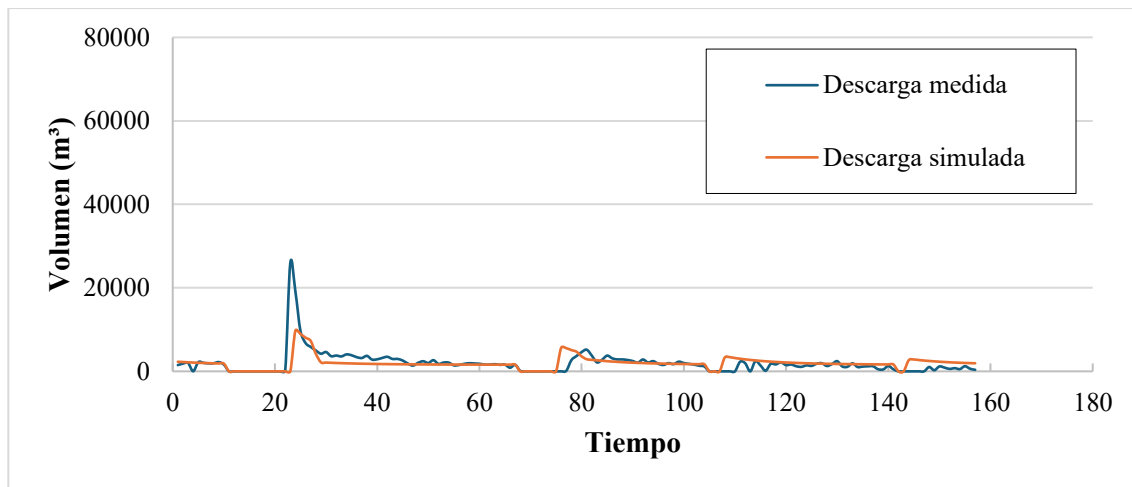




La descarga subterránea presenta mayor variabilidad entre la serie medida y la simulada, especialmente en la magnitud de los picos (Figura 34). Los valores simulados tienden a ser más constantes y suavizados, mientras que los medidos presentan mayor variabilidad y fluctuaciones de corto plazo.

**Figura 34.**

*Descarga subterránea medida-simulada*

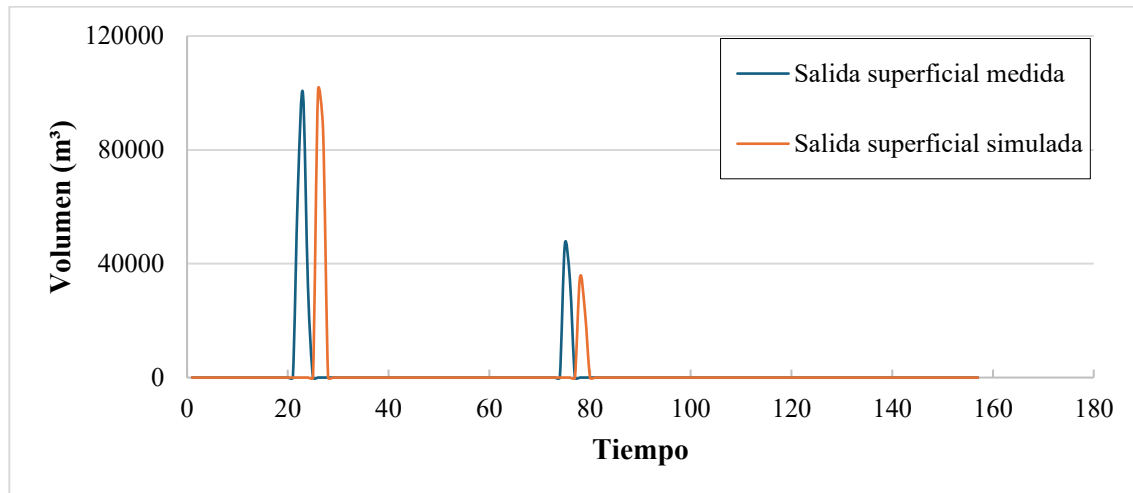


El volumen de salida superficial simulado se presenta inmediatamente después de los picos de volumen de salida medidos (Figura 35), lo que indica una correcta relación entre elevación del meandro y descarga superficial, con un ligero desfase temporal, pero sin diferencias en la magnitud. Esto resultó en un mayor error medio, que se debe al desfase temporal ya que el volumen está bien representado.



**Figura 35.**

*Volumen de salida superficial medido-simulado*



A partir del modelo calibrado se propuso un estado inicial en el que se propusieron riegos principales durante nueve meses del año, además de dos riegos de mantenimiento y un mes sin riego. El volumen total de entrada propuesto fue de 2,349,959.0 m<sup>3</sup>, asociado exclusivamente a los riegos programados en el sitio, ya que para el estado inicial se excluyeron las entregas de flujos ambientales con el fin de aislar el efecto del riego sobre la dinámica del sitio.

Con la simulación del estado inicial se obtuvo un volumen de recarga anual de 887,757.8 m<sup>3</sup> y un volumen de descarga subterránea de 814,614 m<sup>3</sup>, resultando en un cambio de almacenamiento subterráneo de 73,143.5 m<sup>3</sup>. El volumen de salida superficial fue de 946,661.2 m<sup>3</sup>, por lo que el cambio en almacenamiento total fue de 537,740 m<sup>3</sup>, lo que quiere decir que durante todo el año hubo presencia de agua superficial en el meandro (Tabla 13).



**Tabla 13.**

*Balance del estado inicial propuesto*

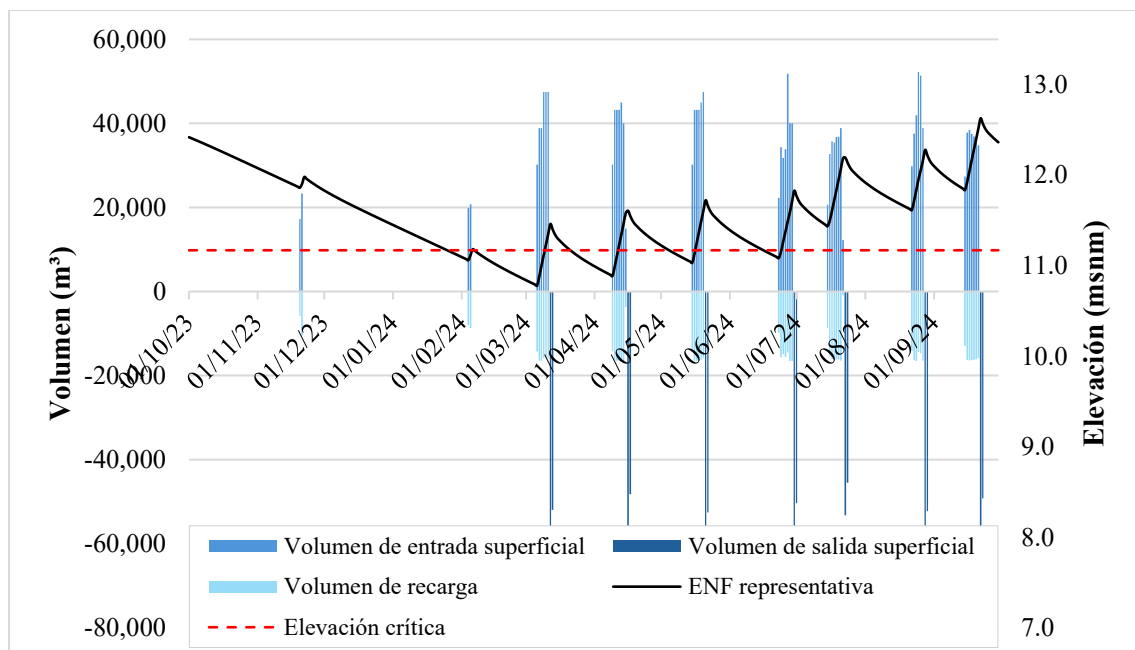
Año	Mes	Volumen de entrada (m³)	Recarga subterránea (m³)	Descarga subterránea (m³)	Evaporación (m³)	Volumen de salida superficial m³	Δ almacenamiento sup (m³)	Δ almacenamiento sub (m³)	Δ almacenamiento total (m³)
<b>2023</b>	octubre	0.0	0.0	47,552.3	3,885.8	0.0	-3,885.8	-47,552.3	-51,438.1
	noviembre	192,394.0	80,155.7	61,471.4	2,499.5	46,986.5	62,752.3	18,684.3	81,436.6
	diciembre	72,185.0	25,925.2	63,276.1	1,858.6	0.0	44,401.2	-37,350.9	7,050.3
<b>2024</b>	enero	49,166.0	14,930.1	57,960.7	1,819.9	0.0	32,416.1	-43,030.6	-10,614.6
	febrero	247,734.0	94,878.4	67,552.4	2,295.4	102,734.5	47,825.7	27,326.0	75,151.6
	marzo	259,200.0	96,909.2	63,832.6	3,634.1	113,397.8	45,258.9	33,076.7	78,335.5
	abril	254,880.0	97,558.3	71,684.8	4,694.3	114,127.7	38,499.6	25,873.5	64,373.1
	mayo	250,560.0	95,436.6	82,955.8	5,985.7	111,555.0	37,582.7	12,480.8	50,063.5
	junio	254,880.0	93,402.0	74,128.4	6,523.0	112,905.6	42,049.4	19,273.6	61,323.0
	julio	259,200.0	96,909.2	73,507.8	6,499.1	114,748.3	41,043.3	23,401.4	64,444.8
agosto	259,200.0	96,216.5	74,983.0	6,100.4	116,448.8	40,434.3	21,233.5	61,667.8	
septiembre	250,560.0	95,436.6	75,709.1	5,147.2	113,757.0	36,219.3	19,727.5	55,946.8	
<b>Total</b>		<b>2,349,959.0</b>	<b>887,757.8</b>	<b>814,614.3</b>	<b>50,943.1</b>	<b>946,661.2</b>	<b>464,596.9</b>	<b>73,143.5</b>	<b>527,740.4</b>



El comportamiento del ENF muestra una respuesta inmediata y pronunciada a cada uno de los riegos, alcanzando valores cercanos a 12.57 m. Tras cada aumento, el nivel freático inicia un descenso paulatino, lograr encontrarse por debajo del umbral crítico de 11.17 m durante marzo y abril (Figura 36).

**Figura 36.**

*Volúmenes de entrada, salida y ENF estado inicial*



En el estado inicial, con un volumen total de entrada de 2,349,959 m<sup>3</sup>, el volumen de salida superficial representó el 40%, la recarga el 37% y la evaporación representa menos del 1%. Este porcentaje de evaporación se mantiene en todos los escenarios debido a que fue una serie de tiempo ingresada al modelo con los datos medidos y no fue un valor simulado.



### ***5.2.3. Escenarios de reducción de volúmenes de entrada***

#### **Escenario 1 (reducción del 20%)**

Se ajustó la frecuencia de las entregas de agua para riego, de tal manera que se programaron riegos de 250,000 m<sup>3</sup> entre marzo y septiembre, dos riegos adicionales de 40,000 m<sup>3</sup> en diciembre y febrero y se consideraron tres meses sin riego, sumando un volumen total de 1,848,188 m<sup>3</sup>, lo que representa una reducción de aproximadamente 500,000 m<sup>3</sup> con respecto al estado inicial.

Con este volumen de entrada se obtuvo un volumen de recarga anual de 735,651 m<sup>3</sup> y un volumen de descarga subterránea de 746,214.1 m<sup>3</sup>, lo que refleja un ligero predominio de la descarga. El volumen de salida superficial de 753,541.3 m<sup>3</sup>, resultando en un cambio de almacenamiento superficial de 308,052.9 m<sup>3</sup> y un cambio de total de 297,489.8 m<sup>3</sup>. Los meses en los que se presentó un cambio de almacenamiento subterráneo negativo fue los meses en los que no hubo riego en el sitio, por lo que los niveles y volúmenes de agua subterránea estuvieron descendiendo (Tabla 14).



**Tabla 14.**

*Balance escenario 1*

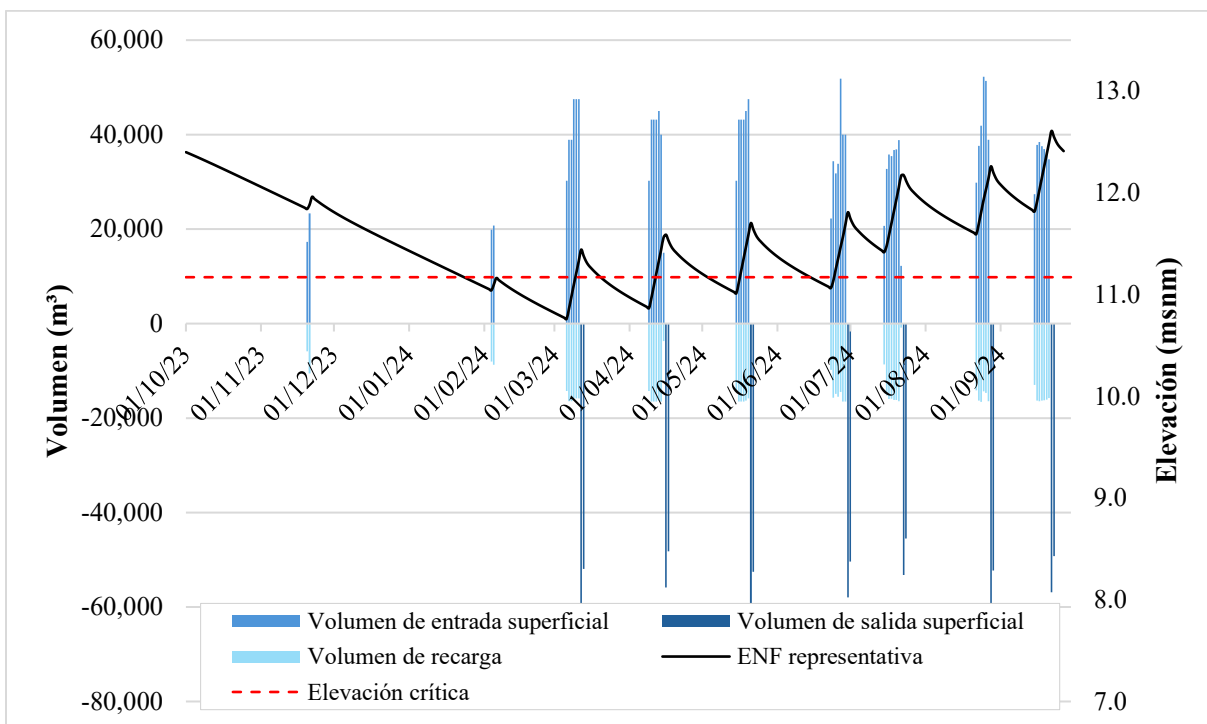
Año	Mes	Volumen de entrada (m³)	Recarga subterránea (m³)	Descarga subterránea (m³)	Evaporación (m³)	Volumen de salida superficial m³	Δ almacenamiento sup (m³)	Δ almacenamiento sub (m³)	Δ almacenamiento total (m³)
<b>2023</b>	octubre	0.0	0.0	47,552.3	3,885.8	0.0	-3,885.8	-47,552.3	-51,438.1
	noviembre	40,608.0	16,407.0	50,785.2	2,499.5	0.0	21,701.5	-34,378.3	-12,676.8
	diciembre	0.0	0.0	53,001.0	1,858.6	0.0	-1,858.6	-53,001.0	-54,859.6
<b>2024</b>	enero	0.0	0.0	49,341.7	1,819.9	0.0	-1,819.9	-49,341.7	-51,161.6
	febrero	40,608.0	16,739.5	52,346.1	2,295.4	0.0	21,573.1	-35,606.6	-14,033.5
	marzo	250,560.0	94,743.8	73,612.1	3,634.1	111,440.4	40,741.7	211,131.7	61,873.4
	abril	259,840.0	100,341.4	68,201.4	4,694.3	104,097.3	50,707.0	32,140.0	82,847.0
	mayo	252,360.0	95,943.0	72,409.3	5,985.7	112,688.2	37,743.1	23,533.7	61,276.8
	junio	254,090.1	103,474.9	50,852.7	6,523.0	57,992.2	86,100.0	52,622.2	138,722.2
	julio	249,272.1	105,453.3	84,682.7	6,499.1	149,058.8	-11,739.1	20,770.6	9,031.5
agosto	251,811.7	92,486.5	67,267.0	6,100.4	112,150.8	41,074.0	25,219.6	66,293.6	
septiembre	249,038.3	110,061.6	76,162.7	5,147.2	106,113.5	27,716.0	33,898.9	61,614.9	
<b>Total</b>		<b>1,848,188.2</b>	<b>735,651.0</b>	<b>746,214.1</b>	<b>50,943.1</b>	<b>753,541.3</b>	<b>308,052.9</b>	<b>-10,563.1</b>	<b>297,489.8</b>



En la Figura 37 se muestra la variación de la ENF en el tiempo, así como los volúmenes de riego, recarga subterránea y salida superficial representados en barras apiladas. Se observa como cada uno de los riegos provoca un ascenso rápido del nivel freático, con picos que alcanzan desde los 12 hasta los 12.6 msnm. En el intervalo más amplio sin riego (octubre a marzo) se observa un descenso en la ENF sostenido en el tiempo, incluso por debajo del umbral crítico durante tres meses. A partir de marzo se propusieron riegos mensuales, lo que permite la recuperación de los niveles de agua subterránea.

**Figura 37.**

*Volúmenes de entrada, salida y ENF escenario 1*



El volumen total de entrada del escenario 1 fue de 1,848,188.2 m³, el volumen de salida superficial representó el 32.1% y la recarga el 31.3%.



### **Escenario 2 (reducción del 30%)**

Para este escenario se ajustó tanto la frecuencia de riego como la magnitud. Se propuso una programación con siete riegos principales (entre 230,000 y 245,000 m<sup>3</sup>) a partir de marzo hasta septiembre y un único riego de mantenimiento de 40,000 m<sup>3</sup> propuesto en el mes de diciembre, mientras que los meses de octubre, noviembre, enero y febrero no recibieron aportes de agua. Este esquema resultó en un volumen total de entrada de 1,704,030.9 m<sup>3</sup>, lo que representa una reducción cercana a los 646,000 m<sup>3</sup>, es decir  $\approx 30\%$ .

Con este volumen de entrada se obtuvo una recarga subterránea anual de 668,105.4 m<sup>3</sup> y una descarga de 742,291.5 m<sup>3</sup>, reflejando una descarga más marcada en comparación con el escenario 1. El volumen de salida superficial fue de 723,476.1 m<sup>3</sup>, por lo que el cambio de almacenamiento superficial fue de 261,506.2 m<sup>3</sup>, el cambio de almacenamiento subterráneo negativo de 74,186 m<sup>3</sup> y el cambio en almacenamiento total fue de 187,320.2 m<sup>3</sup> (Tabla 15).



**Tabla 15.**

*Balance escenario 2*

Año	Mes	Volumen de entrada (m³)	Recarga subterránea (m³)	Descarga subterránea (m³)	Evaporación (m³)	Volumen de salida superficial m³	Δ almacenamiento sup (m³)	Δ almacenamiento sub (m³)	Δ almacenamiento total (m³)
<b>2023</b>	octubre	0.0	0.0	47,552.3	3,885.8	0.0	-3,885.8	-47,552.3	-51,438.1
	noviembre	0.0	0.0	47,546.6	2,499.5	0.0	-2,499.5	-47,546.6	-50,046.1
	diciembre	41,472.0	17,385.5	54,388.7	1,858.6	0.0	22,227.9	-37,003.2	-14,775.3
<b>escenario 2</b>	enero	0.0	0.0	51,235.0	1,819.9	0.0	-1,819.9	-51,235.0	-53,054.8
	febrero	0.0	0.0	46,100.2	2,295.4	0.0	-2,295.4	-46,100.2	-48,395.6
	marzo	241,920.0	92,578.5	72,235.3	3,634.1	106,589.5	39,118.0	20,343.1	59,461.1
	abril	244,840.0	96,626.3	70,957.2	4,694.3	107,477.3	36,042.1	25,669.1	61,711.2
	mayo	235,872.0	96,507.4	69,852.2	5,985.7	100,783.0	32,595.9	26,655.2	59,251.1
	junio	231,441.2	95,150.8	56,903.6	6,523.0	99,449.5	30,317.9	38,247.2	68,565.2
	julio	228,594.3	96,791.1	79,406.1	6,499.1	89,570.1	35,734.1	17,384.9	53,119.0
	agosto	238,040.8	77,467.6	68,301.6	6,100.4	109,591.1	44,881.7	9,166.0	54,047.7
	septiembre	241,850.5	95,598.3	77,812.8	5,147.2	110,015.6	31,089.4	17,785.5	48,874.9
<b>Total</b>		<b>1,704,030.9</b>	<b>668,105.4</b>	<b>742,291.5</b>	<b>50,943.1</b>	<b>723,476.1</b>	<b>261,506.2</b>	<b>-74,186.0</b>	<b>187,320.2</b>

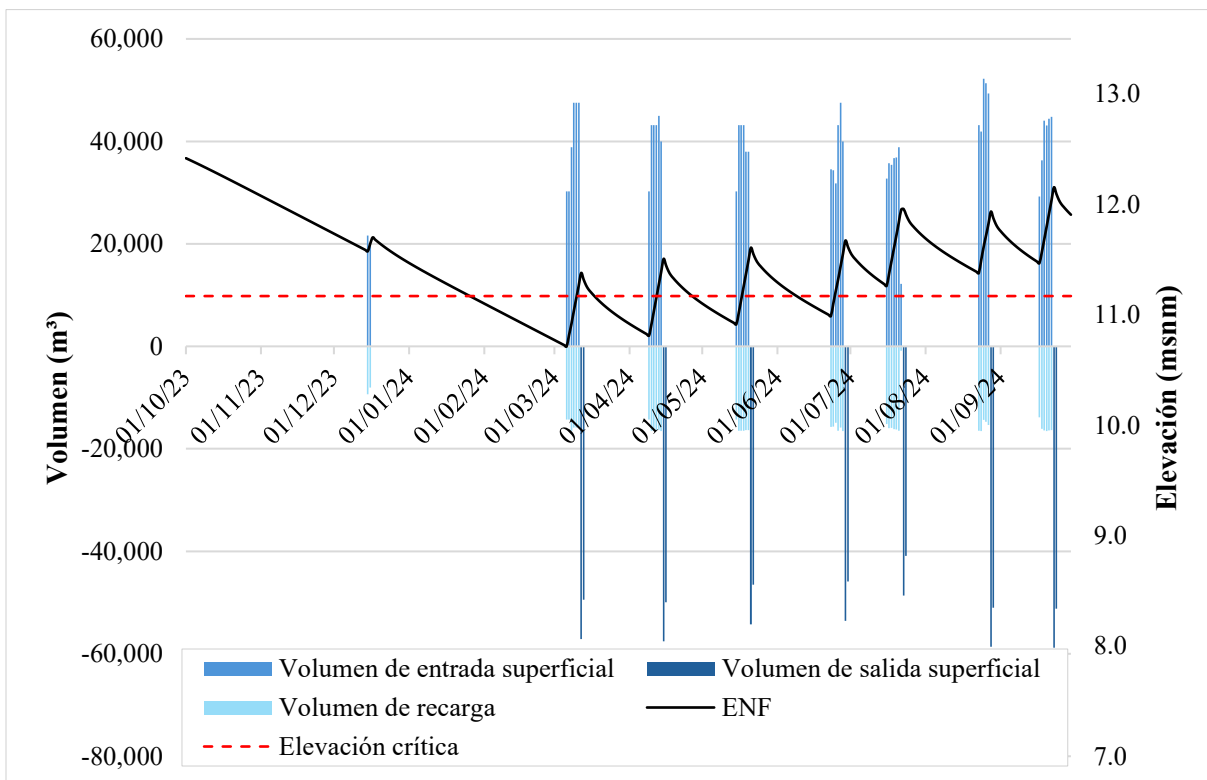


En la Figura 38 se muestra la variación temporal de la ENF para el Escenario 2, junto con los volúmenes de riego, recarga subterránea y salida superficial representados mediante barras apiladas. En este escenario, los aportes de agua son más reducidos que en el estado inicial y en el Escenario 1, lo cual se refleja en la respuesta del sistema. Cada riego genera un ascenso del nivel freático, aunque con picos más moderados que alcanzan valores entre los 11.8 y 12.3 msnm.

Durante el intervalo sin riego comprendido entre octubre y marzo, se observa un descenso sostenido de la ENF y si bien el riego de mantenimiento de diciembre atenúa el descenso del agua subterránea, a partir del 26 de enero la elevación desciende por debajo del umbral crítico (11.17 msnm). A inicios de marzo la elevación vuelve a aumentar y debido a que a partir de este momento hay riegos programados todos los meses, la ENF empieza a ascender de manera gradual.

**Figura 38.**

*Volúmenes de entrada, salida y ENF escenario 2*





El volumen de entrada del escenario 2 fue de 1,704,030.9 m<sup>3</sup>, donde el volumen de salida superficial representó el 30.8% y la recarga el 28.4%.

### **Escenario 3 (reducción del 50%)**

En el tercer escenario se evaluó un esquema en el que se aumentó la magnitud de cada una de las entregas, pero con una disminución en la frecuencia de riego. Se propusieron únicamente cuatro riegos espaciados durante el año entre 245,000 y 300,000 m<sup>3</sup> en marzo, mayo, julio y agosto, además de un riego de mantenimiento en diciembre. Como resultado, el volumen de entrada total fue de 1,186,272.0 m<sup>3</sup>.

Bajo este esquema el modelo estimó una recarga subterránea anual de 364,254.7 m<sup>3</sup> y una descarga subterránea de 714,807 m<sup>3</sup>, indicando un cambio de almacenamiento negativo de 350,552.6 m<sup>3</sup>. La salida superficial fue de 511,0228 m<sup>3</sup>, lo que resultó en un cambio de almacenamiento negativo de 90,501 m<sup>3</sup> (Tabla 16).



**Tabla 16.**

*Balance escenario 3*

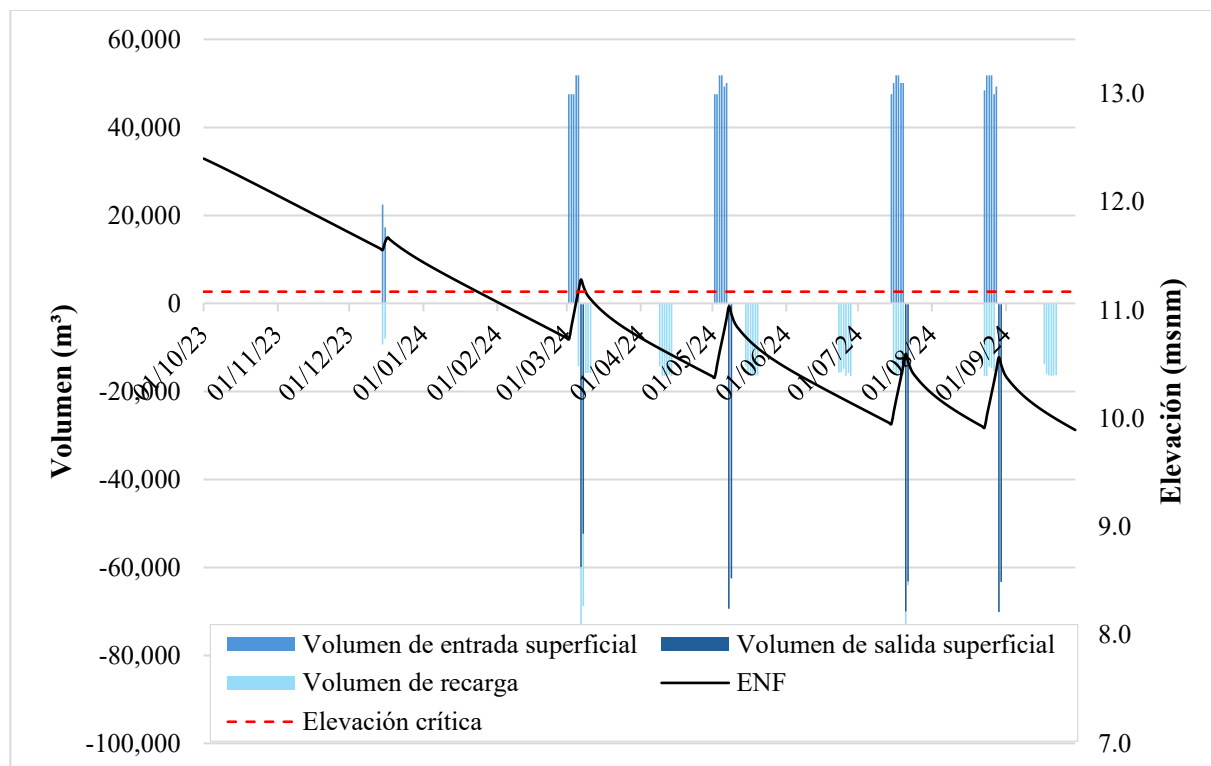
Año	Mes	Volumen de entrada (m³)	Recarga subterránea (m³)	Descarga subterránea (m³)	Evaporación (m³)	Volumen de salida superficial m³	Δ almacenamiento sup (m³)	Δ almacenamiento sub (m³)	Δ almacenamiento total (m³)
<b>2023</b>	octubre	0.0	0.0	47,552.3	3,885.8	0.0	-3,885.8	-47,552.3	-51,438.1
	noviembre	0.0	0.0	47,546.6	2,499.5	0.0	-2,499.5	-47,546.6	-50,046.1
	diciembre	39,744.0	15,816.4	53,989.8	1,858.6	0.0	22,069.0	-38,173.5	-16,104.5
<b>escenario 3</b>	enero	0.0	0.0	51,140.4	1,819.9	0.0	-1,819.9	-51,140.4	-52,960.2
	febrero	0.0	0.0	46,096.6	2,295.4	0.0	-2,295.4	-46,096.6	-48,392.1
	marzo	246,240.0	76,560.4	76,444.8	3,634.1	112,390.3	53,655.2	115.6	53,770.8
	abril	0.0	0.0	49,475.1	4,694.3	0.0	-4,694.3	-49,475.1	-54,169.5
	mayo	298,080.0	91,233.7	80,289.8	5,985.7	131,933.6	68,927.0	10,943.8	79,870.9
	junio	0.0	0.0	49,954.6	6,523.0	0.0	-6,523.0	-49,954.6	-56,477.5
	julio	301,536.0	90,243.4	73,415.8	6,499.1	133,250.8	71,542.7	16,827.6	88,370.3
	agosto	300,672.0	90,400.9	68,449.6	6,100.4	133,448.1	70,722.6	21,951.2	92,673.9
	septiembre	0.0	0.0	70,451.9	5,147.2	0.0	-5,147.2	-70,451.9	-75,599.1
<b>Total</b>		<b>1,186,272.0</b>	<b>364,254.7</b>	<b>714,807.3</b>	<b>50,943.1</b>	<b>511,022.8</b>	<b>260,051.4</b>	<b>-350,552.6</b>	<b>-90,501.2</b>



La Figura 39 que corresponde al escenario 3 muestra la respuesta del sistema a la disminución de los volúmenes de entrada al sitio. Desde octubre hasta febrero solo hubo un riego de mantenimiento que, si bien atenúa la recesión, no la mitiga y partir del 24 de enero la ENF pasa el umbral crítico. A partir de marzo, los riegos principales provocan ascensos más notorios del ENF, aunque de menor magnitud que en los escenarios con mayor volumen aplicado y además se observa una recesión más prolongada debido al espaciamiento en tiempo que se propuso para los riegos. Como resultado, el nivel freático se mantiene persistentemente por debajo del umbral crítico durante la mayor parte del año, con ascensos breves tras cada riego que no alcanzan los valores observados en los escenarios con mayor disponibilidad de agua.

**Figura 39.**

*Volúmenes de entrada, salida y ENF del escenario 3*





El volumen total de entrada del escenario 3 fue de 1,186,272 m<sup>3</sup>, la salida superficial representó el 21.7% del volumen total y la recarga representó el 15.5%, siendo el escenario donde los porcentajes tanto de salida superficial como de recarga varían más.

### **5.3. Conclusiones y discusión**

#### **Balance**

El volumen requerido para el riego por inundación responde a la naturaleza del sitio y sus condiciones topográficas. Debido a que hay diferencias en el terreno natural de hasta 1.20 m, es necesario que el meandro en el sitio alcance este tirante para empezar a inundar las terrazas medias y que, de esta manera, se alcance a regar la vegetación ribereña que se ubica hasta la cota 14.17 msnm. Derivado de esto, un porcentaje del volumen que ingresa al sitio no es utilizado por la vegetación, sino que es necesario únicamente para alcanzar la cota máxima de elevación, por lo que una porción del volumen es liberado hacia el cauce principal del RC cuando el riego finaliza. Esto implica que, para poder llevar a cabo el riego por inundación, el volumen por cada evento de riego no puede reducirse significativamente con respecto al volumen ya establecido. Es por esto que las propuestas en los escenarios implican cambios en la frecuencia de riego y en menor medida en el volumen de cada entrega.

- El cambio en almacenamiento de 73,747.6 m<sup>3</sup> del año monitoreado se debe a que el volumen de AF representó el 60% del volumen total que ingresó al sitio, mismo volumen que salió de manera casi inmediata después de entrar, por lo que el volumen total de la salida superficial está altamente sesgado por este evento. Sin considerar los meses en los que hubo AF en el balance del año monitoreado se obtuvo un cambio de



almacenamiento de 529,845.2 m<sup>3</sup>, siendo un volumen similar al simulado como estado inicial (537,740.4 m<sup>3</sup>), lo que representa una diferencia del 0.4% o 7,895.2 m<sup>3</sup>.

### **Modelo dinámico**

- En el estado inicial, el ENF se mantiene de manera constante por encima del umbral crítico de 11.17 m, con ascensos pronunciados después de cada riego y descensos suaves entre eventos, condición que favorece la permanencia del agua superficial en el meandro durante todo el año. Se llega al umbral crítico establecido en dos periodos: del 26 de enero al 09 de marzo y del 20 de marzo al 12 de abril. A partir del riego de este mes la ENF empieza a presentar una tendencia ascendente, manteniéndose por encima de los 11.17 msnm.
- En contraste, el escenario 1 muestra ya una reducción visible en la amplitud de recuperación del nivel freático; aunque los riegos siguen siendo suficientes para superar el umbral crítico, la duración del ENF en niveles óptimos disminuye entre un 10 y 15 % respecto al estado inicial. En el escenario 2, la reducción del riego provoca descensos más prolongados por debajo del umbral crítico, principalmente durante los meses de enero hasta junio. Finalmente, para el escenario 3, el efecto es mucho más pronunciado ya que el nivel freático permanece la mayor parte del año por debajo del umbral crítico.
- Mientras que la recarga anual del estado inicial asciende a 887,757.8 m<sup>3</sup>, el escenario 1 y 2 reflejan una reducción de aproximadamente el 17 % y 25% respectivamente. En el escenario 3, la recarga disminuye de forma más marcada, alcanzando solo 364,254.7 m<sup>3</sup>, es decir, una reducción del 41%.
- En el estado inicial y el escenario 1, los valores entre recarga y descarga no tienen una gran variación, en cambio, en el escenario 2 la descarga representa un 11% más que la



- recarga y en el escenario 3 la descarga casi la duplica. Esto se debe a la reducción en las entregas de agua para riego, que disminuyen el volumen disponible para recargar el acuífero en el área de estudio. Esto quiere decir que no es recomendable disminuir el volumen de riego al 50%, debido al cambio en almacenamiento que esto generaría.
- Los cambios de almacenamiento sintetizan las implicaciones de estos procesos. Mientras que el estado inicial presenta un cambio total de almacenamiento positivo de 537,740 m<sup>3</sup>, confirmando la presencia continua de agua superficial en el meandro, los escenarios 1 y 2 muestran almacenamientos positivos pero cada vez más reducidos, equivalentes a disminuciones aproximadas de 40% y 70 % con respecto al estado inicial. El escenario 3 marca el punto de inflexión más crítico al presentar un almacenamiento total negativo de -90,501.2 m<sup>3</sup>. Este cambio de almacenamiento implica que el sistema pierde más agua de la que recibe.
  - Para utilizar esta metodología en otros sitios, sería necesario determinar qué variables afectan las entradas y salidas dentro del sistema y de esta manera ajustar las correlaciones empíricas establecidas. Algunas de las variables de sitio en particular dependen del manejo en campo, por lo que pueden ser descritas en un modelo con mayor facilidad. Sería necesario evaluar qué operaciones lógicas deben cambiar para cada sistema de manera particular.

El manejo adaptativo se ha implementado con anterioridad en el sitio de restauración, ya que se han ido disminuyendo riegos tanto en frecuencia como en magnitud con la finalidad de hacer un mejor uso del recurso hídrico. Estas adecuaciones se han implementado de manera empírica, por lo que este modelo de manejo se propone como una herramienta para programar el



agua de riego en el área de estudio, siguiendo los diferentes procesos implicados en el manejo adaptativo. Se propone implementar el Escenario 1 de reducción de riego, seguido del monitoreo de las variables involucradas en el modelo para comparar qué tan cercana o lejana es la simulación con respecto a los datos observados, esto permitirá hacer los ajustes necesarios en el modelo e irlo recalibrando con la finalidad de que pueda ser una herramienta de manejo del sitio de restauración.

#### **5.4.Recomendaciones**

Una de las principales limitaciones del modelo se relaciona con las diferencias observadas entre la elevación simulada del meandro y los datos registrados en campo. Para mitigar este efecto en la salida superficial del agua, se condicionó la apertura de la compuerta para que se activara inmediatamente después de cada entrega para riego. Esta modificación operativa permitió reducir las subestimaciones del volumen de salida superficial.

En el caso de la descarga subterránea, su simulación también depende elevación del meandro, por lo que los errores en la representación de esta variable afectar esta variable. Sin embargo, la diferencia entre los valores medidos y simulados fue de 2,127.4 m<sup>3</sup>, lo que representa una diferencia del 0.7% del volumen total descargado. Esto sugiere que, si bien existe una subestimación inherente al modelo, su magnitud es relativamente baja.

El modelo está limitado a responder a las entregas de agua para riego ya que el sistema responde en mayor medida a estos eventos, sin embargo, si hubiera cambios alrededor que modificaran el régimen hidrológico local, el modelo no podría reproducirlos sin una reconfiguración de las entradas.

Con base en estas limitaciones, se recomienda incorporar en futuras versiones del modelo variables climatológicas adicionales, dado que las condiciones atmosféricas y del suelo evolucionan a lo largo del tiempo y pueden influir en el comportamiento superficial y subterráneo



del sistema. Asimismo, se recomienda verificar de manera experimental la profundidad de las raíces de álamos y sauces del sitio de restauración, con el objetivo de validar el umbral crítico establecido. Finalmente, se sugiere realizar una validación del modelo con un año hidrológico diferente, lo cual permitiría evaluar la capacidad predictiva del modelo fuera del periodo de calibración.



## 6. Bibliografía

- Alda, F. L. (2003). Modelos dinámicos en las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 11(2), Article 2.
- Alianza Revive el Río Colorado. (2024). *ESFUERZO DIPLOMÁTICO BINACIONAL EN EL RÍO COLORADO* [Map].
- Allen, R. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage*. 300.
- Ardana, P. D. H., Redana, I. W., Yekti, M. I., & Simpen, I. N. (2022). *Groundwater Level Forecasting Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network Approaches*.
- Arellano Sánchez, J. (2019). *Guías metodológicas para levantamientos geodésicos en México*. 92. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i92.447>
- ASTM. (2020). *Standard Practice for Monitoring Well Protection At or Near Land Surface*.
- Balali, H., & Viaggi, D. (2015). Applying a System Dynamics Approach for Modeling Groundwater Dynamics to Depletion under Different Economical and Climate Change Scenarios. *Water*, 7(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/w7105258>
- Barati, A. A., Azadi, H., & Scheffran, J. (2019). A system dynamics model of smart groundwater governance. *Agricultural Water Management*, 221, 502-518. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.047>
- Barlas, Y. (2007). *System Dynamics: Systemic Feedback Modeling For Policy Analysis*.
- Becke, A. L., Solórzano-Rivas, S. C., & Werner, A. D. (2024). The watertable fluctuation method of recharge estimation: A review. *Advances in Water Resources*, 189, 104635. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104635>
- Benke, A. C., & Cushing, C. E. (2011). *Rivers of North America*. Elsevier.
- Bormann, B. T., Martin, J. R., Wagner, G. W., Alegria, P. G., Cunningham, M. H., Brookes, P. F., Berg, J., & Henshaw, J. (1999). *Adaptive management*. 505-534.
- Boumis, G., Kumar, M., Nimmo, J. R., & Clement, T. P. (2022). Influence of Shallow Groundwater Evapotranspiration on Recharge Estimation Using the Water Table Fluctuation Method. *Water Resources Research*, 58(10), e2022WR032073. <https://doi.org/10.1029/2022WR032073>
- Bureau International des Poids et Mesures. (2019). *International System of Units*.



- Burrough, P. A. (2001). GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis. *Environmental and Ecological Statistics*, 8(4), 361-377. <https://doi.org/10.1023/A:1012734519752>
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems*. OUP Oxford.
- Casillas-Higuera, A., García-Cueto, R., Camacho, O., & Gonzalez-Navarro, F. F. (2014). DETECCIÓN DE LA ISLA URBANA DE CALOR MEDIANTE MODELADO DINÁMICO EN MEXICALI, B.C., MÉXICO. *Información tecnológica*, 25(1), 139-150. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000100015>
- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de Canales Abiertos*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2008). *Applied hydrology* ([Nachdr.], internat. ed. 1988). McGraw-Hill.
- CILA. (s. f.). *Informe Final del Acta 319 sobre el Monitoreo de Flujos Ambientales en el Tramo Limítrofe y Delta del Río Colorado*.
- CILA. (1944). *Tratado sobre la distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América*. <http://www.cila.gob.mx/tyc/1944.pdf>
- CILA. (2012). *Acta 319*.
- CONAGUA. (2016). *Programa hídrico Regional 2014-2018 de la Región Hidrológico-Administrativa I Península de Baja California*.
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México*.
- CONAGUA. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE MEXICALI (0210), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA*.
- CONAGUA. (2024). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE MEXICALI (0210), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA*.
- Costanza, R., & Gottlieb, S. (1998). Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part II. *Ecological Modelling*, 112(2), 81-84. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00073-8)
- Deaton, M., & Winebrake, J. J. (1999). *Dynamic Modeling of Environmental Systems*. Springer Science & Business Media.



- Earth Science Data Systems, N. (2024, julio 31). *Digital Elevation/Terrain Model (DEM) | NASA Earthdata* [Topic Page]. Earth Science Data Systems, NASA. <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/digital-elevation-terrain-model-dem>
- Fenton, J. D., & Keller, R. J. (2001). *The Calculation of Streamflow From Measurements of Stage*.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology: Fourth Edition*. Waveland Press.
- Ford, A. (1999). *Modeling the Environment*.
- Forrester, J. W. (1958). *Industrial Dynamics*.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *GROUNDWATER*. Prentice-Hall.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon, K. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- García-Martín, A., Rosique-Campoy, M. F., & Segado-Vázquez, F. (1994). *Topografía Básica Para Ingenieros (IV)*.
- Gastil, R. G. (1975). Plutonic zones in the Peninsular Ranges of southern California and northern Baja California. *Geology*, 3(7), 361-363. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1975\)3%253C361:PZITPR%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3%253C361:PZITPR%253E2.0.CO;2)
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2012). *Elementary Surveying An Introduction to Geomatics*.
- González-Sargas, E., Meehan, T. D., Hinojosa-Huerta, O., Villagomez-Palma, S., Calvo-Fonseca, A., Dodge, C., Gómez-Sapiens, M., & Shafroth, P. B. (2024). Bird community response to one decade of riparian restoration along the Colorado River delta in Mexico. *Ecological Engineering*, 205, 107291. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107291>
- Grant, W. E., Pedersen, E. K., & Marín, S. L. (1997). *Ecology and Natural Resource Management: Systems Analysis and Simulation*. John Wiley & Sons.
- Healy, R. W. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge University Press.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>



- Hernández-López, D. D. (2023). *DETERMINACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO 2021 DEL SITIO DE RESTAURACIÓN LAGUNA GRANDE DEL DELTA DEL RÍO COLORADO COMO ELEMENTO DE MANEJO ADAPTATIVO*.
- HOBO. (2008). *HOBO U20 Water Level Logger Manual*.
- Holling, C. S. (1978). *ADAPTIVE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND MANAGEMENT*.
- Hou, X., Yang, H., Cao, J., Feng, W., & Zhang, Y. (2023). A Review of Advances in Groundwater Evapotranspiration Research. *Water*, 15(5), 969. <https://doi.org/10.3390/w15050969>
- Huang, F., Zhang, D., & Chen, X. (2019). Vegetation Response to Groundwater Variation in Arid Environments: Visualization of Research Evolution, Synthesis of Response Types, and Estimation of Groundwater Threshold. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101849>
- Huang, X., Gao, L., Crosbie, R. S., Zhang, N., Fu, G., & Doble, R. (2019). Groundwater Recharge Prediction Using Linear Regression, Multi-Layer Perception Network, and Deep Learning. *Water*, 11(9), 1879. <https://doi.org/10.3390/w11091879>
- IBWC. (2017). *Minute 323*.
- IMTA. (2020). *El Agua en el Valle de Mexicali, Baja California Origen, uso y destino*.
- ISO. (2021). *ISO 748: Hydrometry- Measurement of liquid flow in open channels- Velocity area methods using point velocity measurements*.
- Johnson, A. I. (1967). Specific yield: Compilation of specific yields for various materials. En *Water Supply Paper* (Nos. 1662-D). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/wsp1662D>
- Khan, S., Yufeng, L., & Ahmad, A. (2007). *System Dynamics Modeling for Water Savings and Conjunctive Water Management*.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons.
- Lerner, D. N. (1990). Groundwater recharge in urban areas. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 24(1), 29-33. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(90\)90006-G](https://doi.org/10.1016/0957-1272(90)90006-G)



- Lira, H. (2005). *Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC*. 18.
- Luecke, D. F., Pitt, J., Congdon, C., Valdés-Casillas, C., & Briggs, M. (1999). *A Delta Once More: Restoring riparian and wetland habitat in the Colorado River Delta*. Sonoran Institute.
- Meinzer, O. (1923). *The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles*.
- Nassery, H. R., Adinehvand, R., Salavitabar, A., & Barati, R. (2017). Water Management Using System Dynamics Modeling in Semi-arid Regions. *Civil Engineering Journal*, 3(9), Article 9. <https://doi.org/10.21859/cej-030913>
- Nelson, S. M., Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Milliken, J., Kennedy, J. R., Zamora-Arroyo, F., Schlatter, K., Santiago-Serrano, E., & Carrera-Villa, E. (2017). A history of the 2014 Minute 319 environmental pulse flow as documented by field measurements and satellite imagery. *Ecological Engineering*, 106, 733-748. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.040>
- Ouyang, Y., Xu, D., Leininger, T. D., & Zhang, N. (2016). A system dynamic model to estimate hydrological processes and water use in a eucalypt plantation. *Ecological Engineering*, 86, 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.008>
- Pandi, D., Kothandaraman, S., & Kuppusamy, M. (2021). Hydrological models: A review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 12(3), 223-242. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2021.117540>
- Pedroza González, E. (2018). *Hidráulica Básica*.
- Pérez González, D. (2008). *Modelización hidráulica de la relación acuífero-Río Colorado en el tramo FFCC-Vado Carranza como elemento para la restauración de la zona riparia*. <https://hdl.handle.net/20.500.12930/3250>
- Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Zamora-Arroyo, F., Carreón-Díazconti, C., & Pérez-González, D. (2015). Mimic pulse-base flows and groundwater in a regulated river in semiarid land: Riparian restoration issues. *Ecological Engineering*, 83, 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.006>
- Richardson, G. P. (2011). Reflections on the foundations of system dynamics. *System Dynamics Review*, 27(3), 219-243. <https://doi.org/10.1002/sdr.462>



- Richter, B. D., Lamsal, G., Marston, L., Dhakal, S., Sangha, L. S., Rushforth, R. R., Wei, D., Ruddell, B. L., Davis, K. F., Hernandez-Cruz, A., Sandoval-Solis, S., & Schmidt, J. C. (2024). New water accounting reveals why the Colorado River no longer reaches the sea. *Communications Earth and Environment*, 5(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01291-0>
- Rodríguez-Burgueño, E. (2012). *Modelación geohidrológica transitoria de la relación acuífero-río de la zona FFCC-vado Carranza del río Colorado con propósito de manejo de la zona riparia*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Samaniego López, M. A. (2008). El control del río Colorado como factor histórico: La necesidad de estudiar la relación tierra/ agua. *Frontera norte*, 20(40), 49-78.
- Schlatter, K. J., Grabau, M. R., Shafroth, P. B., & Zamora-Arroyo, F. (2017). Integrating active restoration with environmental flows to improve native riparian tree establishment in the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 661-674. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.015>
- Secretaría de Relaciones Exteriores. (2024). *Atribuciones de la CILA en la cuenca del Río Colorado*. gob.mx. <http://www.gob.mx/sre/es/acciones-y-programas/atribuciones-de-la-cila-en-la-cuenca-del-rio-colorado>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2012). *Reporte del Clima en México*.
- Shuttleworth, W. J. (2012). *Terrestrial Hydrometeorology*. John Wiley & Sons.
- Solinst. (2020). *Barometric Compensation and the Importance of Barometric Data*.
- Sontek. (2019). *FlowTracker2 User's Manual*.
- Sontek. (2022). *RiverSurveyor S5/M9 System Manual*.
- Sophocleous, M. (2005). Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal*, 13(2), 351-365. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0385-6>
- Stankey, G. H., Clark, R. N., & Bormann, B. T. (2005). *Adaptive management of natural resources: Theory, concepts, and management institutions*. (No. PNW-GTR-654; p. PNW-GTR-654). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-654>



- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. MacGraw-Hill Company.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (1998). *Fluid Mechanics* (novena).
- Stromberg, J. C., & Patten, D. T. (1996). Instream flow and cottonwood growth in the eastern Sierra Nevada of California, USA. *Regulated Rivers: Research & Management*, 12(1), 1-12. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199601\)12:1%253C1::AID-RRR347%253E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199601)12:1%253C1::AID-RRR347%253E3.0.CO;2-D)
- Sun, Y., Liu, N., Shang, J., & Zhang, J. (2017). Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 142, 613-625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.110>
- Valiantzas, J. D. (2006). Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Journal of Hydrology*, 331(3), 690-702. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.012>
- Van Lanen, H. A. J., Van Loon, A. F., Wanders, N., & Prudhomme, C. (2024). *Process-based modelling*.
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1995). *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. Academic Press.
- Weitkamp, C. (2005). Lidar: Introduction. En *Laser Remote Sensing*. CRC Press.
- Williams, B. K., & Brown, E. D. (2014). Adaptive Management: From More Talk to Real Action. *Environmental Management*, 53(2), 465-479. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0205-7>
- Winz, I., Brierley, G., & Trowsdale, S. (2009). The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management. *Water Resources Management*, 23(7), 1301-1323. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9328-7>
- Woessner, W. W., & Poeter, E. P. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*.
- Yang, J., Lei, K., Khu, S., & Meng, W. (2015). Assessment of Water Resources Carrying Capacity for Sustainable Development Based on a System Dynamics Model: A Case Study of Tieling City, China. *Water Resources Management*, 29(3), 885-899. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0849-y>



Yimam, A. Y., Sishu, F. K., Assefa, T. T., Steenhuis, T. S., Reyes, M. R., Srinivasan, R., & Tilahun, S. A. (2023). Modifying the water table fluctuation method for calculating recharge in sloping aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101325. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101325>