

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Marinas

Instituto de Investigaciones Oceanológicas



DINAMICA DE NUTRIENTES EN EL DELTA DEL RIO COLORADO

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

ANDREA SANTA RIOS

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. FEBRERO 2012

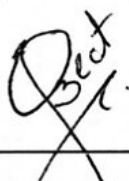
Instituto de Investigaciones Oceanológicas
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

DINAMICA DE NUTRIENTES EN EL DELTA DEL RIO COLORADO

T E S I S
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

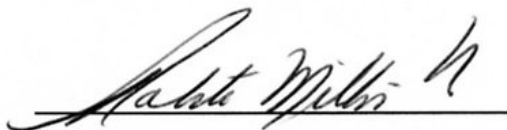
PRESENTA
ANDREA SANTA RIOS

Aprobada por:



Dr. Manuel Salvador Galindo Bect

Director de tesis



Dr. Roberto Millán Núñez

Sinodal



Dr. José Martín Hernández Ayón

Sinodal

Para mi amada familia por su apoyo incondicional para hacer realidad cada uno de mis sueños. Los amo!

*Para mi esposo mi gran amor, amigo, compañero de vida y estudio.
Gracias por acompañarme en este camino.*

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a mi director de tesis el Dr. Manuel Salvador Galindo Bect, por la gran enseñanza que me dio a lo largo de la realización de este proyecto.

A mis Sinodales José Martín Hernández Ayón y Roberto Millán Nuñez por sus aportes durante la realización de este trabajo.

Al grupo de POPEYE por su apoyo durante la toma y análisis de las muestras, igualmente al área de química del IIO por la ayuda en el análisis de muestras y por sus grandes aportes durante los seminarios de química.

A Conacyt por la beca otorgada para realizar mis estudios.

A Martica y Diana por su gran apoyo durante todo el desarrollo de la tesis.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1 Objetivos particulares	8
1.3 Área de Estudio	8
2. METODOLOGÍA	13
2.2 Toma de muestras y análisis de laboratorio.....	13
2.3 Procesamiento de datos	16
2.3.1 Análisis de variación espacio-temporal.....	16
2.3.2 Efectos de los procesos de mezcla y biológicos en las concentraciones de NInD.....	17
3. RESULTADOS	1
3.1 Variabilidad Hidrológica	1
3.1.1 Salinidad	1
3.1.2 Temperatura y densidad	3
3.1.3 Turbidez	7
3.1.4 Efecto de la marea sobre la variabilidad hidrológica	10
3.2 Variabilidad espacial de nutrientes en el delta del Río Colorado .	13
3.2.1 Nitratos.....	13
3.2.2 Nitritos	15
3.2.3 Amonio.....	18
3.2.4 Fosfatos	21
3.2.5 Silicatos.....	23

3.2.6 Carbono inorgánico disuelto	26
3.2.8 Efecto de la marea y procesos biológicos en la variabilidad de nutrientes	29
3.3.1 Análisis de los diagramas de mezcla	50
3.3 Río Hardy	55
4. DISCUSIÓN	63
4.1 Variabilidad espacio-temporal (2009-2010)	63
CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFIA	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descargas de aguas a México. Datos proporcionados por la Comisión Internacional de Límites de Aguas entre México y los Estados Unidos Sección Mexicana.....	2
Figura 2. Cuenca del Río Colorado (Tomado de U.S. Department of the Interior).....	9
Figura 3. Cuenca del bajo Río Colorado y Delta del Río Colorado (Adaptado de Pacific Institute, 2005).....	10
Figura 4. Estaciones de muestreo delta del Colorado	13
Figura 5. Estaciones de muestreo Río Hardy	15
Figura 6. Variación espacial y temporal de la salinidad en el área de estudio, (Abril Agosto Diciembre Marzo).....	2
Figura 7. Distribución espacial de salinidad: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	2
Figura 8. Variación espacial y temporal de la Temperatura Superficial: Abril Agosto Diciembre Marzo.....	4
Figura 9. Distribución espacial de temperatura: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	5
Figura 10. Variación espacial y temporal de la densidad (σ_t): Abril Agosto Diciembre Marzo.....	6
Figura 11. Distribución espacial de la densidad (σ_t) : (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	7

Figura 12. Distribución de la turbidez de acuerdo a la profundidad del disco de Secchi: Abril Agosto Diciembre Marzo.....	8
Figura 13. Distribución espacial de turbidez de acuerdo a la profundidad del disco de Sechi: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.	8
Figura 14. Regionalización de acuerdo a la turbidez.	10
Figura 15. Salinidad y marea (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.	11
Figura 16. Concentración de Nitratos: Abril Agosto Diciembre Marzo.....	14
Figura 17. Distribución espacial de nitratos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	15
Figura 18. Concentración de nitritos (μM): Abril Agosto Diciembre Marzo.	17
Figura 19. Distribución espacial de nitritos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	18
Figura 20. Concentración de amonio (μM). Abril Agosto Diciembre Marzo.	20
Figura 21. Distribución espacial de amonio: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	20
Figura 22. Concentración de fosfatos (μM) Abril Agosto Diciembre Marzo.	22
Figura 23. Distribución espacial de fosfatos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	23
Figura 24. Concentración de silicatos (μM): Abril Agosto Diciembre Marzo.	24

Figura 25. Distribución espacial de silicatos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	25
Figura 26. (A) Carbono Inorgánico Disuelto, (B) Carbono Inorgánico Disuelto estandarizado Alcalinidad total estandarizada: Abril Agosto Diciembre Marzo.	27
Figura 27. Distribución espacial de carbono inorgánico Disuelto: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.....	28
Figura 28. Nutrientes y mareas abril.	29
Figura 29. Nutrientes y mareas agosto.	30
Figura 30. Nutrientes y mareas diciembre.	31
Figura 31. Nutrientes y mareas diciembre.	31
Figura 32. Diagramas de mezcla de fosfatos, silicatos, carbono inorgánico disuelto y compuestos nitrogenados para abril y agosto.	35
Figura 33. Diagramas de mezcla de fosfatos, silicatos, carbono inorgánico disuelto, compuestos nitrogenados para diciembre y marzo.	36
Figura 34. Análisis de correlación entre Clorofila y nutrientes en el mes de abril en desviaciones estándar: (A) fosfato. (B) silicato (C) carbono inorgánico disuelto (D) nitrato. Las líneas punteadas denotan el rango del intervalo de confianza del 95%.	37
Figura 35. Razones de nutrientes DIN:PO ₄ : (A) Abril, (B) Agosto, (C) Diciembre y (D) Marzo.	39
Figura 36. Razones de nutrientes Si(OH) ₄ :DIN :(A) Abril, (B) Agosto, (C) Diciembre y (D) Marzo.	40

Figura 37. Razones de nutrientes Si(OH)_4 : PO_4 : (A) Abril, (B) Agosto, (C) Diciembre y (D) Marzo.	40
Figura 38. Estaciones de muestreo uniendo los estudios realizados bajo los tres escenarios de aporte de agua dulce.	42
Figura 39. Salinidad bajo los tres escenarios: con Hardy, con ríos, actual.	43
Figura 40. Variación espacial de la salinidad bajo los tres escenarios: (A) con Hardy , (B) con ríos y (C) actual.	43
Figura 41. Concentración de nitratos bajo los tres escenarios: con Hardy, con ríos, actual.	44
Figura 42. Variación espacial de los nitratos bajo los tres escenarios: (A) con Hardy , (B) con ríos y (C) actual.	45
Figura 43. Concentración de nitritos bajo los tres escenarios: con Hardy, con ríos, actual.	46
Figura 44. Concentración de fosfatos bajo los tres escenarios: Hernández Ayón, Cupul Magaña, Santa Ríos.	47
Figura 45. Concentración de silicatos bajo los tres escenarios: Hernández Ayón, Cupul Magaña, Santa Ríos.	49
Figura 46. Variación espacial de la salinidad bajo los tres escenarios: (A) con Hardy , (B) con ríos y (C) actual.	50
Figura 47. Diagramas de mezcla bajo los tres escenarios: Hernández Ayón <i>et al.</i> , 1993 (B,E,H), Cupul Magaña, 1994 (A,D,G), Santa Ríos (C,F,I). La escala de los silicatos para el estudio de Hernández Ayón <i>et al.</i> , 1993	

y de Santa Ríos (figuras (E y F) se presenta a mano derecha debido a la gran diferencia entre los valores con el estudio de Cupul Magaña).	51
Figura 48. Razones de nutrientes para los tres escenarios: Con Hardy (B,E,H), con ríos (A,D,G), actual (C,F,I).	54
Figura 49. Temperatura Río Hardy (Datos tomados de (CESPM))	55
Figura 50. Concentración histórica de nitratos en el Río Hardy. Cada una de las estaciones dentro del mapa tiene los colores que se representan en las gráficas. Fuente: García Hernández <i>et al.</i> , 2009 y los generados durante el presente estudio	57
Figura 51. Concentración histórica de fosfatos en el Río Hardy. Fuente: García Hernández <i>et al.</i> (2009) y presente estudio	59
Figura 52. Concentración histórica de amonio en el Río Hardy. Fuente: García Hernández <i>et al.</i> (2009) y presente estudio.	60
Figura 53. Concentración de silicato en el Río Hardy	62
Figura 54. Vectores de transporte de sedimentos (Tomado de Carriquiry y Sanchez 1999).....	64
Figura 55. Diagrama DRC variables hidrológicas.	66
Figura 56 Distribución espacial Fosfatos, silicatos, carbono inorgánico disuelto y nitratos: Abril Agosto Diciembre Marzo.	67
Figura 57. Contribución en porcentaje de los compuestos nitrogenados (nitrato, nitrito y amonio) al DIN total: 1 (Boca del DRC), 2 (Zona de mezcla), 3 (Cabeza del DRC).	70
Figura 58. Distribución espacial de pH.	71

Figura 59. Regresión entre pH y fosfato para el mes de agosto, los valores se encuentran en desviaciones estándar.	73
Figura 60. Nitrógeno Inorgánico Disuelto, Fosforo Inorgánico Disuelto y Sílice Inorgánico Disuelto para diferentes estuarios. Los valores son promedios de los muestreos realizados en cada estudio.	79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fechas de muestreo	14
Tabla 2. ACP para turbidez. Los colores representan cada una de las regiones.	9
Tabla 3. Razones de nutrientes (Los valores indican el valor de la pendiente.	41
Tabla 4. Razones de nutrientes de los 3 escenarios	53

1. INTRODUCCIÓN

El delta del Río Colorado (DRC) fue formado por la depositación del sedimento en el periodo en que el río fluía, en este periodo el Colorado transportaba entre 45 y 455 millones de toneladas métricas de sedimento anualmente (Minckley, 1991), de los cuales, entre el 70 y 80 % del limo se depositaba en la zona del delta (Morrison *et al.*, 1996).

Se estimaba que el volumen aproximado de descargas de agua del DRC hasta antes del represamiento en 1935, era de $21 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Baba *et al.*, 1991) y los aportes tanto de aguas como de sedimento eran fuentes de nutrientes, haciendo de esto una zona de alta productividad. Adicionalmente esta riqueza del delta es por el flujo y reflujo de las mareas, comúnmente de seis metros o mayores, con un flujo y reflujo inusualmente alto que prolonga el estuario mareal 56 km o más río arriba (Payne *et al.*, 1992).

Este sistema fue alterado inicialmente por la construcción y el llenado de la presa Hoover en el periodo 1935-1941 (Figura 1); por el llenado de la presa Glenn Canyon durante 1960-1979, periodo cuando la descarga fluvial a México disminuyó a aproximadamente $1.8 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Figura 1); y finalmente, por la conversión de los humedales, en tierras para la irrigación agrícola, reduciendo la extensión del delta de 7770 km² a 600 km² (Luecke *et al.*, 1999).

Cambios en la hidrología, hidrografía y ecología de la región debidos al represamiento del río han sido documentados, entre los que se incluyen, la remoción por silicatos en el río por la alta sedimentación en las presas (Mayer y Gloss, 1980), la pérdida de condiciones estuarinas, humedales y hábitat de aguas someras (Sykes, 1937; Hernández Ayón *et al.* 1993), quienes reportaron el cambio de un ambiente estuarino, a un sistema hipersalino, debido a la alta tasa de evaporación y al poco o nulo aporte de agua dulce. Comportamientos similares han sido encontrados para lagunas costeras de Baja California, como el Estero de Punta Banda y Bahía San Quintín, donde el gradientes de salinidad y densidad incrementa hacia la cabeza y disminuye hacia la zona oceánica adyacente (Pritchard y Shubel, 1981).

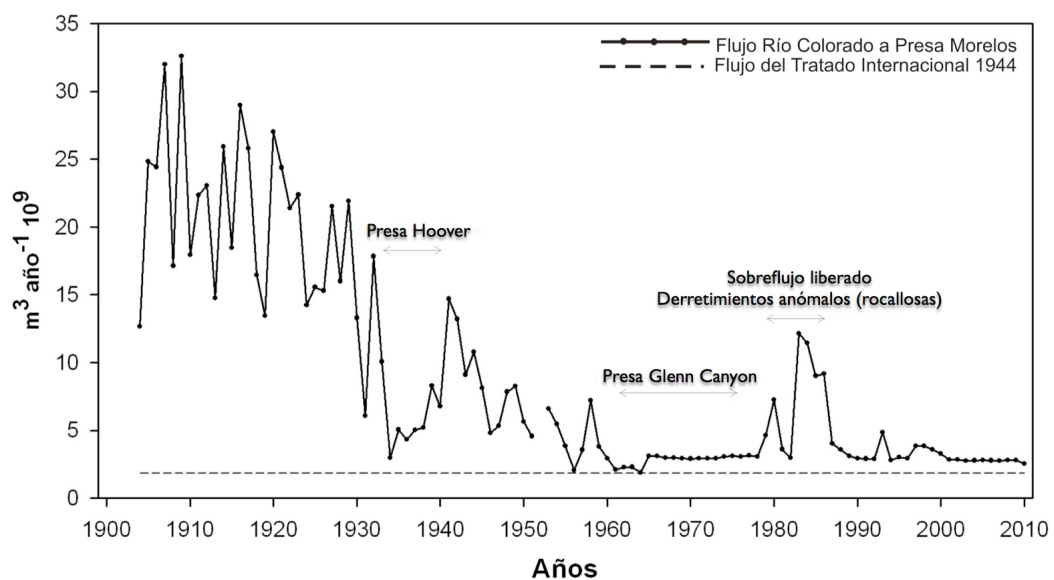


Figura 1. Descargas de aguas a México. Datos proporcionados por la Comisión Internacional de Límites de Aguas entre México y los Estados Unidos Sección Mexicana.

El volumen de descarga del RC a México, establecido en el Tratado Internacional de Límites y Aguas de 1944, es utilizado en su totalidad para necesidades agrícolas y urbanas, por lo cual ya no hay aportes del Río Colorado a la antigua zona estuarina y donde el único aporte de agua dulce que recibía el delta, provenía del Río Hardy (RH). Históricamente el RH era un brazo del RC, el cual fluía al Alto Golfo de California (AGC) (Sykes, 1993). A partir de la construcción de las presas en 1935 y 1960, el flujo de agua natural del RH fue sustituido por flujos de retorno agrícolas (García Hernández *et al.*, 2009). Sin embargo, las aguas del RH fluían directamente a la zona estuarina hasta el 2001, cuando se inició el proyecto de restauración de los humedales del RH, por parte de la Asociación Ecológica de Usuarios de los Ríos Hardy y Colorado (AEURHYC), quienes utilizaron bolsas de arena, para la construcción de un dique en la zona baja del río, con el fin de incrementar el área de humedales, la profundidad del río así como restaurar el hábitat para aves migratorias y vida silvestre asociada (Hinojosa Huerta *et al.*, 2005).

La idea general del proyecto de AEURHYC fue simular las funciones de una barrera de arena la cual existió en los años de 1930, donde eventos de flujos consecutivos crearon una represa natural a 35 km del Golfo de California, esta barrera mantuvo 20,000 hectáreas de humedales en el Río Hardy (Glenn *et al.*, 1996). Los grupos ecologistas de la zona han enfocado sus esfuerzos en la conservación de los ecosistemas riparios teniendo en cuenta que una parte de los humedales son parte de la Reserva de Biosfera del Alto Golfo de California y del delta de Colorado (SEMARNAP 1995).

El delta también está catalogado como un Área Importante de Aves en México (AICA), y un sitio de prioridad para la conservación de la biodiversidad como fue decretado por la Comisión Nacional en la Biodiversidad (CONABIO; Cervantes *et al.*, 1999). Adicionalmente es reconocido como un humedal de importancia internacional por la Convención de RAMSAR (Oficina de Convención de Ramsar ,1998), y forma parte de la Red Hemisférica de Reserva de Aves Playeras (RHRAP, 1998).

Este enfoque de restauración netamente ripario ha generado una pérdida de conectividad del estuario con el río. Entre los efectos de los ríos en los sistemas estuarinos y marinos, están los relacionados con la disponibilidad de nutrientes e incremento en la producción primaria (Nixon, 1992; Houde y Rutherford, 1993; Snow *et al.*, 2000).

Existe evidencia que el decremento del sílice disuelto por la construcción de presas (como se evidenció en el RC después de la construcción de la presa Lake Powell (Mayer y Gloss, 1980)), genera una disminución en las abundancias de diatomeas y copépodos, conllevando a un cambio en la composición de especies fitoplanctónicas, teniendo una repercusión en toda la cadena alimenticia pelágica y un alto impacto económico (Humborg *et al.*, 2000). Efectos en la zona estuarina y área marina adyacente, se manifiestan en las especies que en alguna etapa de su desarrollo son estuarino-dependientes, y en segundo término, en la reducción de la producción pesquera de la región (Mann y Lazier, 1996; Ardisson y Bourget, 1997).

En el AGC (Puerto Peñasco, San Felipe y Golfo de Santa Clara), una de las principales fuentes de ingresos económicos es la pesquería del camarón azul *Litopenaeus stylirostris*, éstos se reproducen fuera de la costa y las larvas inicialmente planctónicas, migran al estuario para utilizarlo como área de crianza durante sus fases postlarvales y juveniles (Vance *et al.*, 1998; Ehrhardt y Legault, 1999; Yimin Ye, 2000; Benfield y Downer, 2001; Ahmad Adnan *et al.*, 2002; Galindo Bect *et al.* 2010). Estudios realizados con anterioridad en el AGC, mencionan que las postlarvas migran principalmente por la costa de Sonora, desde Punta Borrascoso hacia su área de crianza en el DRC (Calderón Aguilera *et al.*, 2002; Galindo Bect *et al.*, 2010).

Debido a la importancia de la dinámica de los nutrientes en la productividad primaria y su repercusión en el ámbito social (teniendo en cuenta que el DRC es un área reproducción de especies económicamente importantes como el camarón azul Millán Nuñez *et al.*, 1999) , se han realizado una serie de estudios en el área, el primero fue realizado por Hernández Ayón *et al.* (1993), quienes al muestrear 17 estaciones a lo largo del área y realizar registros circadianos en una localidad, encontraron que para la época sin aporte del RC pero con aporte del RH los nutrientes no eran un factor limitante y el delta exportaba nutrientes al mar adyacente. Adicionalmente, no encontraron una estacionalidad en las concentraciones de los nutrientes.

Posteriormente, Cupul Magaña (1994) realizó el análisis bajo dos condiciones, la primera fue bajo solo aporte del RH, y la segunda con descargas del RC debido a deshielos anómalos en las Rocallosas. En

general, encontraron diferencias significativas entre los dos escenarios, mostrando la importancia del RC en las concentraciones y la distribución de nutrientes en el estuario. Adicionalmente al igual que Hernández Ayón (1993), encontró que el delta es una fuente de nutrientes debido principalmente al aporte de agua por la red de canales de marea y por la erosión del área que genera la liberación de los nutrientes que se encuentran en los sedimentos.

Muñoz Arriola *et al.* (2006) realizaron un balance biogeoquímico en épocas con y sin aporte del RC. La metodología desarrollada fue la de LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone), propuesta por Gordon *et al.* (1996). Donde encontraron al igual que Hernández Ayón *et al.*, 1993 y Cupul Magaña (1994) que el delta es exportador de nutrientes al mar adyacente.

Carriquiry *et al.* (2011), evaluaron los efectos del represamiento en el flujo de materiales en el DRC, encontrando que el estuario se encuentra en estado destructivo, por la falta de aporte de agua dulce y sedimentos. Mencionan que los sedimentos en suspensión, son controlados por el transporte durante el flujo y reflujo de la marea, a diferencia de los nutrientes, los cuales adicionalmente a las fuerzas físicas el importe de estos se veía favorecido por los procesos biogeoquímicos ocasionados por el transporte de agua del RH.

Entre otros estudios realizados en el RC y el RH se encuentra el análisis de Selenio, Molibdeno y Uranio en sedimentos (Orozco-Durán *et al.*, 2012) donde en el núcleo del RH encontraron máximos de estos elementos

en las profundidades correspondientes a la época previa al represamiento y para el RC los máximos para las capas superficiales. Por otro lado en estos mismos sitios Lugo-Ibarra *et al.*, 2011, analizaron Bifenilos Policlorados (PCBs) y pesticidas organoclorados (OCPs), encontrando un enriquecimiento de PCBs por las descargas de la geotérmica, mientras que para los núcleos del RC estimaron que los enriquecimientos se deben a los aportes atmosféricos y/o a la depositación de sedimentos.

1.1. Hipótesis

En estudios realizados previamente, se ha analizado la dinámica de los nutrientes inorgánicos disueltos (NInD) en el DRC, en con condiciones con/sin descarga de agua del RC y con aporte del RH, en estos estudios, se ha considerando al DRC en estado de erosión y un exportador neto de nutrientes al AGC.

Bajo la nueva condición con nulo aporte ripario (tanto del RC como del RH), se espera encontrar un decremento en los NInD disponibles para el crecimiento de fitoplancton y limitación en el sistema por silicatos principalmente debido al represamiento de agua dulce, así como también una posible limitación por nitrógeno, generando una disminución en la clorofila a, y por lo tanto conllevando a una menor productividad orgánica primaria.

1.2. Objetivos

Estudiar la dinámica del DIN (nitrógeno inorgánico disuelto), fosfato, silicatos y carbono inorgánico disuelto (CID) en el DRC bajo condiciones de nulo aporte de agua riparia (RC y RH).

1.2.1 Objetivos particulares

- Analizar la variación espacial y temporal de la concentración de NInD en el DRC.
- Estudiar los efectos de los procesos de mezcla y biológicos sobre la concentración de NInD en el DRC.
- Analizar las concentraciones de NInD en el RH para deducir su posible aportación al DRC.

1.3 Área de Estudio

La cuenca del Río Colorado tiene una superficie de 655 000 km² y conforma uno de los sistemas hídricos internacionales más importantes de la frontera México-Estados Unidos. Con una longitud de 2300 km iniciando en las Montañas Rocallosas de EUA, atravesando siete estados hasta desembocar en el Golfo de California (Figura 2).



Figura 2. Cuenca del Río Colorado (Tomado de U.S. Department of the Interior)

Al pasar la frontera norte con México se encuentra la presa Morelos, ésta recibe el volumen de agua del Río Colorado, establecido en el Tratado Internacional de Límites y Aguas de 1944, la cual se distribuye para usos domésticos y agrícolas, de tal forma que las aguas del Río Colorado ya no llegan al delta.

El Río Hardy, originalmente formado por las descargas de aguas de la Geotérmica de Cerro Prieto y del drenaje agrícola del Valle de Mexicali, su cauce atraviesa 24 Km. hasta desembocar en el DRC (Cohen y Henges 2001). Adicionalmente a las aguas mencionadas con anterioridad, a partir de junio del 2008 también reciben 72.6 m³/d de aguas residuales de la planta de tratamiento “Las Arenitas” de la ciudad de Mexicali, B.C., las cuales llegan

hasta la zona de restauración de humedales denominado “El Tapón” (Figura 3.).

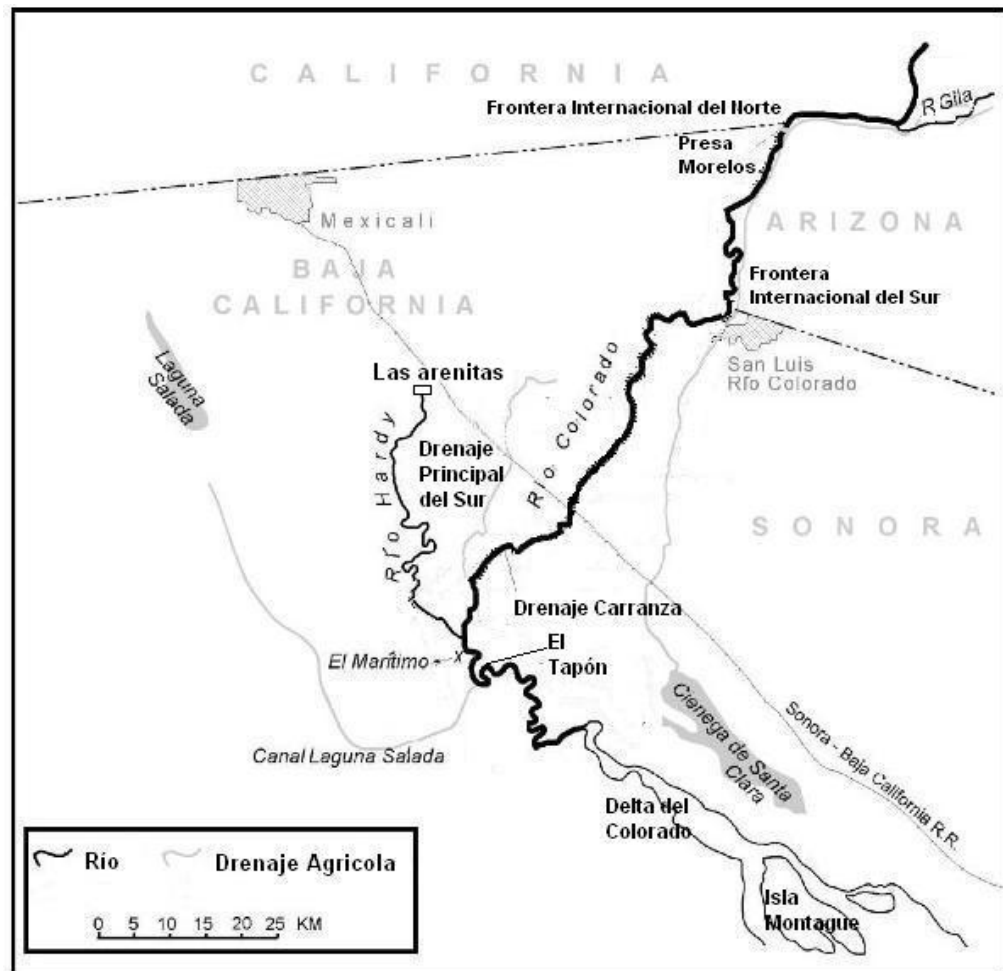


Figura 3. Cuenca del bajo Río Colorado y Delta del Río Colorado (Adaptado de Pacific Institute, 2005)

La planta de tratamiento “Las Arenitas” fue diseñada para recibir $64,800 \text{ m}^3/\text{d}$, pero actualmente trata $72,576 \text{ m}^3/\text{d}$ provenientes de redes domésticas y un 0.1% industriales, lo cual ha disminuido la eficiencia de la planta, vertiendo al Río Hardy agua con valores de 150 mg/L de DBO, equivalente a un 25% de remoción de este en la planta, un 50% del fósforo entrante, un 60% del amonio y un 16% de los sólidos suspendidos totales.

La planta cuenta con tratamiento primario (desarenador y rejillas); tratamiento secundario con lagunas de sedimentación y oxidación mediante aireación (comunicación personal por químico de la Planta). Finalmente esta agua es vertida al Río Hardy, donde se han reportado altas concentraciones de amonio y fosfatos con presencia de bajo oxígeno, lo cual se le ha asociado a la mortandad de peces en la zona y al aumento de cobertura algal que sugiere una eutrofización (García Hernández *et al.*, 2009). Antes del proyecto de restauración de El Tapón, el agua del Río Hardy fluía libremente al delta del Río Colorado.

El delta se encuentra en el área comprendida de la latitud N:31° 01' 12" a la 32° 09' 36" y de la longitud W:113° 36' 36" a la 115° 13' 12", entre los estados de Baja California y Sonora. El clima es muy árido, con una precipitación promedio anual menor a 7.5 cm, la temperatura máxima durante el día, puede ser mayor a 38°C por más de 5 meses al año, principalmente durante el verano y una evaporación de 2.7 m por año (Owen Joyce and Raymond 1996).

Cerca a la boca del canal del río la cuenca consta de tres canales separados por las islas Montague y Pelicano (Meckel 1975). Los canales fluctúan en un ancho aproximado de ~0.5 km en la parte norte de la Isla Montague, hasta ~3km a los lados de las islas Montague y Pelicano, alcanzando ~30 km entre las costas de Baja California y Sonora, al sur de las islas. La distancia entre la parte sur de las islas y la región mas interna influenciada por la marea, alcanza ~50 Km de largo (Información obtenida de Google Earth)

La amplitud de mareas puede llegar hasta 9 m durante mareas vivas (Mathews, 1969), generando una fuerte turbidez por la resuspensión de sedimentos en la columna de agua (Millán Nuñez *et al.*, 1999) y generando una alta movilización de sedimentos al Golfo de California, principalmente por el canal de la costa de Baja California (Carriquiry y Sánchez 1999). La temperatura promedio superficial del mar está entre 8.5 °C en invierno y 32.6°C en el verano (Álvarez Borrego y Galindo Bect, 1974; Martínez Rojas Reynoso, 1990). Es un estuario invertido con mayores salinidades en la cabeza y menores en la boca (Martínez Rojas Reynoso, 1990; Hernández Ayón *et al.*, 1993).

La concentración de clorofila y abundancia de fitoplancton es mayor durante la época de verano, la distribución espacial y temporal de fitoplancton y la concentración de clorofila están fuertemente influenciadas por la corriente de marea. En general el DRC es un estuario negativo, con alta productividad primaria fitoplanctónica (Millan Nuñez *et al.*, 1999).

2. METODOLOGÍA

2.2 Toma de muestras y análisis de laboratorio

Las muestras de agua superficiales se colectaron en el DRC durante cuatro campañas de muestreo de abril, agosto y diciembre de 2009 y marzo de 2010 siguiendo un plan 16 estaciones (de acuerdo a las estaciones de Hernández Ayón en 1993), distribuidas en los canales principales de la Isla Montague y Pelicano, así como en el cauce del Río Colorado influenciado por el flujo y reflujo de la marea (Figura 4). Los muestreos se realizaron durante tres días consecutivos en periodos de mareas vivas (Tabla 1).

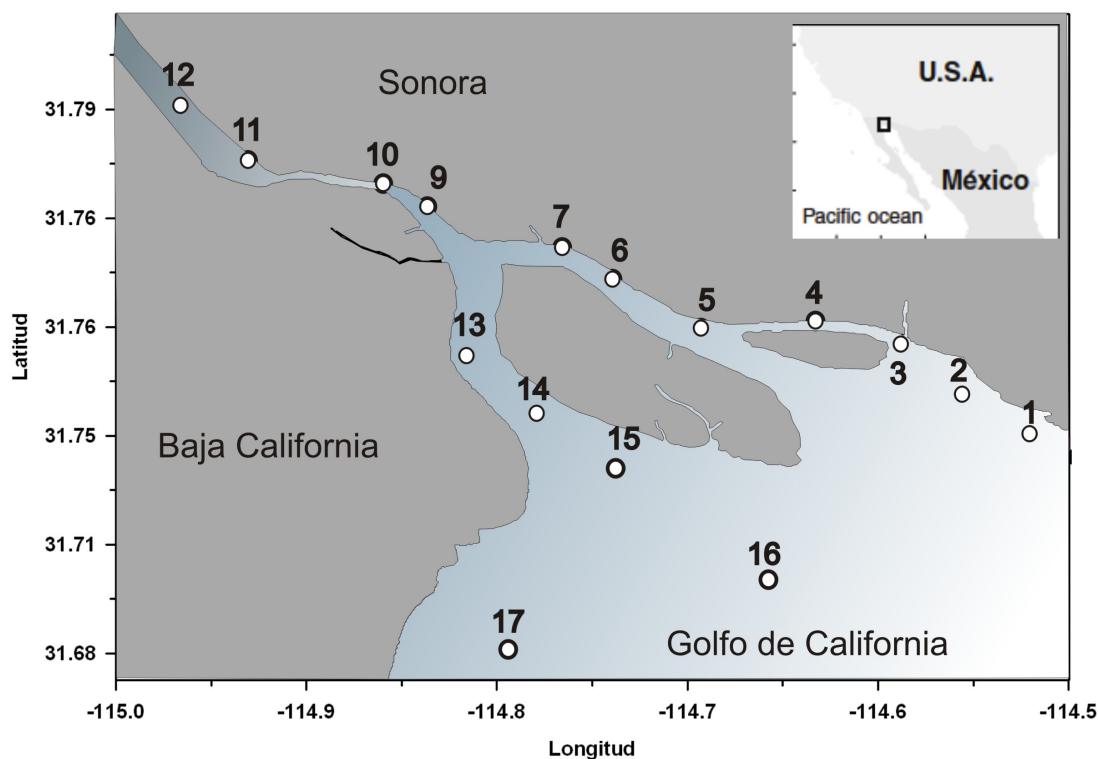


Figura 4. Estaciones de muestreo delta del Colorado

Tabla 1. Fechas de muestreo

	Delta Río Colorado		Río Hardy
	Día	Estaciones	
Abril 2009	24	7,9,10,11,12.	
	26	13,14,15,16,17.	
	27	1,2,3,4,5,6.	
Agosto 2009	18	14,15,16,17.	
	19	2,3,4,5,6,7.	
	20	1,9,10,11,12,13.	
Diciembre 2009	01	16,17,15, 14, 13, 7.	30-Noviembre 2009
	02	4,6,9,10,11,12.	
	03	1,2,3,4.	
Marzo 2010	13	16,17,15,14,13.	12-Marzo 2010
	14	12,11,10,9,7,6.	
	15	1,2,3,4,5.	

En cada estación se recolectaron muestras de agua superficial para la obtención de temperatura, salinidad, pH, amonio, nitratos, nitritos, silicatos, carbono inorgánico Disuelto y fosfatos.

Para la zona del Río Hardy se realizaron dos muestreos en diciembre de 2009 y marzo 2010, en una serie de seis estaciones a través del cauce del río; iniciando en la canaleta Parshal de la planta de tratamiento “Las Arenitas” y finalizando en la zona cercana al tapón (Figura 5).

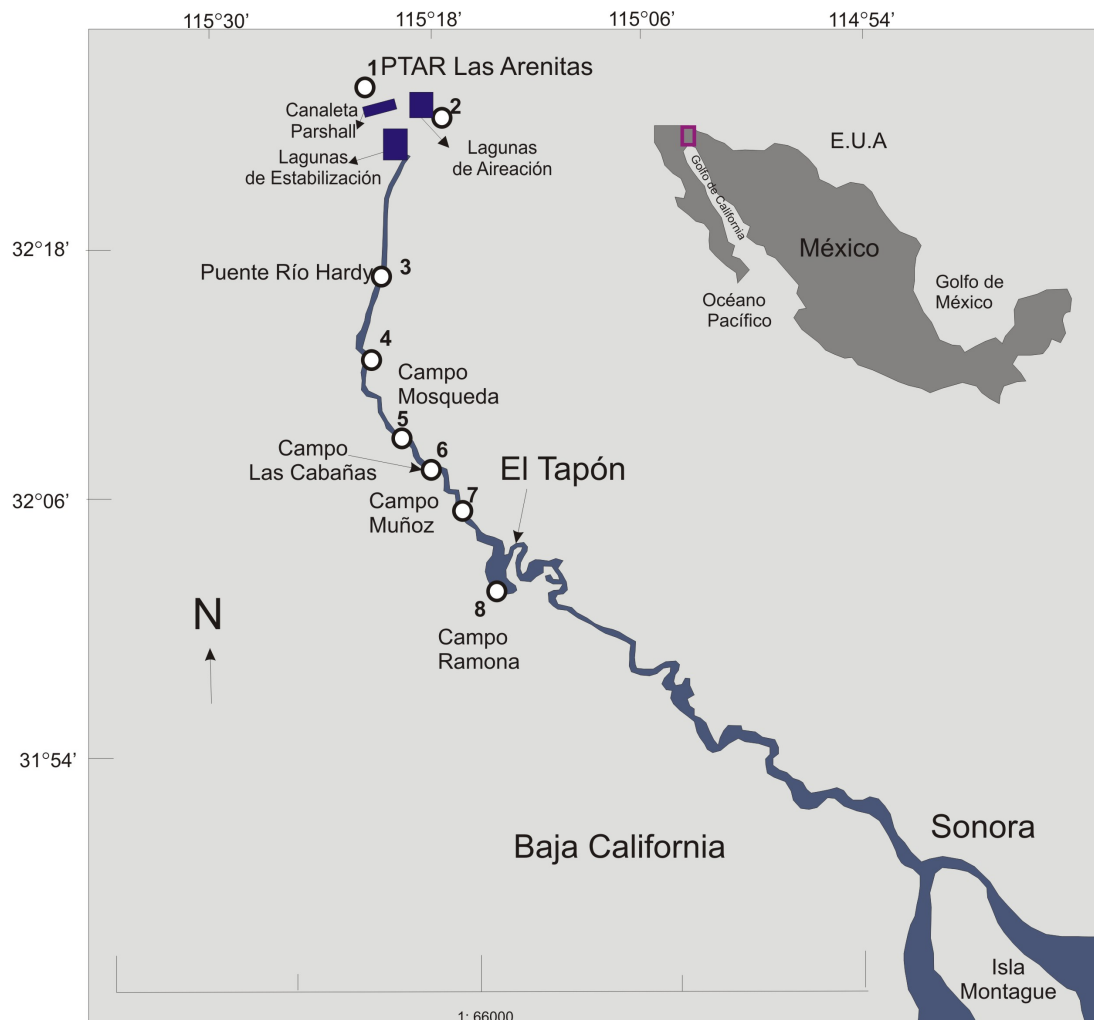


Figura 5. Estaciones de muestreo Río Hardy

Las muestras de nutrientes fueron filtradas a través de filtros de fibra de vidrio GF/C Whatman de 24 mm de diámetro de un poro nominal de 1.2 μm y almacenadas en botellas de polietileno de 25 mL y posteriormente se congelaron hasta el análisis en laboratorio, que se realizó por medio de un Autoanalizador de Flujo Segmentado modelo Skalar San Plus con modificaciones de los métodos colorimétricos descritos por Strickland y Parsons (1972) en el laboratorio del Dr. Camacho, los límites de detección para los compuestos nitrogenados variaron entre 0.01 y 0.04, para los silicatos entre 0.18 y 0.21 y fosfatos 0.07 y 0.11.

Las muestras de salinidad se tomaron en botellas de borosilicato y se determinó a partir de la conductividad por medio de un Salinómetro 3400B Guildline. La temperatura se midió con un termómetro de cubeta y la turbidez por medio de un disco de Secchi.

Para Carbono Inorgánico Disuelto (CID), las muestras puntuales fueron colectadas en botellas de borosilicato de 500 mL, se les agregó 100 μ L de HgCl y fueron selladas con grasa Apiezon. Se utilizó para el análisis en el laboratorio el método de coulometría descrito por Johnson *et al.* (1987).

La clorofila *a* se determinó utilizando las ecuaciones de Millan Nuñez y Álvarez Borrego, 1978 y de Jeffrey y Humphrey, 1975.

2.3 Procesamiento de datos

2.3.1 Análisis de variación espacio-temporal

Para determinar la variación espacial se realizaron gráficas de contorno, esta representación en isolíneas es solo con el fin de visualización, ya que los muestreos no fueron simultáneos y los resultados muestran una aproximación a la realidad. Adicionalmente se realizaron gráficas de estación vs parámetro, con las cuales se pudo visualizar tanto la variabilidad espacial como temporal, que para efectos de facilidad visual de las gráficas, se invirtió el orden en la numeración de las estaciones, para que las estaciones de Sonora, Baja California y el río, coincidan con la ubicación física en el área de estudio. (A) Baja California, (B) Río, (C) Sonora.

Para analizar si se presentaban diferencias significativas entre los meses entre zonas y en general, se realizaron pruebas de bondad de ajuste

o de Kruskal Wallis, de acuerdo a la naturaleza de los datos. Así también se aplicó la prueba a posteriori de Wilcoxon para determinar entre que meses o zonas existieron diferencias.

Normalización del CID: Con el fin de eliminar los efectos de la salinidad en las concentraciones calculadas de CID se normalizó por la salinidad de acuerdo a la siguiente ecuación (Deep sea research, 2005):

$$nCO_2 = S(\text{oceánica}) * CO_2 / S$$

2.3.2 Efectos de los procesos de mezcla y biológicos en las concentraciones de NInD

Para identificar los efectos de los procesos de mezcla y biológicos en las concentraciones de nutrientes, se calculó el grado de asociación lineal entre los nutrientes, la altura de marea y la clorofila a, por medio de la correlación de Pearson a un α del 0.05.

Consecuentemente para establecer como los procesos de mezcla de fuentes de agua afectan las variables estudiadas, se realizaron gráficas de altura de marea y salinidad para cada uno de los días de muestreo. Para lo cual se aplicaron diferentes desfases al nivel de marea predicho para el Golfo de Santa Clara (GSC), con respecto a la hora de la colecta de muestras. Teniendo en cuenta que la marea se retrasa a medida que nos internamos al delta, se aplicó un retraso de 1 hr para las estaciones 7 y 13; 2 hrs para la estación 9; 3 hrs para las estaciones 10 y 11 y 4 hrs para la

estación 12. El cálculo fue realizado considerando la observación del nivel de marea al momento de coleccionar las muestras.

Para evaluar los procesos biológicos de remoción y adición (fotosíntesis y degradación de la materia orgánica respectivamente), que controlan el balance de nutrientes en la columna de agua, se consideró el uso de diagramas de mezcla, con el cual se determina el grado en el que los materiales disueltos son adicionados o removidos a lo largo de un gradiente de salinidad (Webster *et al.*, 2005), el modelo implica que dos masas de agua de diferente salinidad se mezclan y que una serie de concentraciones del material disuelto se deberían acomodar a lo largo de una línea de salinidad. Debido a que los diagramas de mezcla implican que se debe tener dos miembros terminales (uno de agua dulce y otro marina), la aproximación de estos no es tan acertada para el presente análisis de nutrientes, pero se presenta con el fin de tener una idea general de los procesos de remoción y adición a lo largo del gradiente de salinidad. Debido a la falta de dos miembros terminales para realizar el cálculo de la línea teórica de mezcla, se calculó teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\frac{NinD\text{ Océano}}{Salinidad\text{ Océano}} = \frac{NinD\text{ Delta}}{Salinidad\text{ Delta}}$$

Donde se conocen el NinD y la salinidad en el océano que corresponden a la estación 1 y la salinidad en el delta correspondiente a la estación 12, con esto se calculó la concentración del NinD en el delta por la evaporación.

Otra forma utilizada para determinar la tasa de consumo de los nutrientes fue realizando regresiones entre los nutrientes y la clorofila para determinar el grado de asociación entre estos y por lo tanto determinar qué

tanto de la concentración del nutriente se puede explicar con la clorofila. La otra metodología que se utilizó fue la de realizar gráficas entre los nutrientes, obteniendo por medio de la pendiente de la línea de regresión la razón de consumo y regeneración de los nutrientes teniendo en cuenta las establecidas por Redfield Richards (Redfield *et al.*, 1963) C:N:Si:P 106:16:16:1 (Torres Delgado, 2008).

Por medio de estas razones es posible establecer si existe en el sistema una limitación de nutrientes, que se encuentra basada en los requerimientos de nutrientes para el crecimiento de fitoplancton; el criterio descrito por Dortch y Whitledge (1992) establece que razones de N:P de 10 y de Si:DIN de 1 indican limitación estequiométrica por N, mientras que valores de Si:DIN de 1 y de Si:P de 3 indican limitación por Si de diatomeas y valores DIN:P de 20-30 indica limitación por fósforo. De acuerdo a Justic *et al.* (1995) las razones de Si:P > 22 y DIN:P >22 indican limitación por fósforo (entendiendo DIN como el Nitrógeno Inorgánico Disuelto = $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{NH}_4$), cuando los valores de DIN:P <10 y Si:DIN >1 existe una limitación por DIN y valores de Si:P <10 y Si:DIN <1 limitación por Si.

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidad Hidrológica

3.1.1 Salinidad

En general para los cuatros meses, se encontró un gradiente con menores salinidades en la zona oceánica de Baja California y Sonora estaciones 1,2, 16 y 17), incrementando hacia la zona más interna del delta (estaciones 10,11 y 12), con excepción del mes de Agosto que presentó un comportamiento diferente en estas zonas (Figs. 6 y 7). En los cuatro muestreos realizados de acuerdo al análisis de bondad de ajuste a un α de 0.05, la mayoría de las estaciones con excepción de la 7 y 14 no presentaron diferencias significativas entre los meses de muestreo.

Durante el mes de abril de 2009 el mayor valor de salinidad fue de hasta 40.9 unidades y se registró en la estación 12 y el menor de 36 en la estación 1 (Figuras 6 y 7), siendo estas las estaciones más riparias y oceánicas respectivamente. El valor promedio de la salinidad fue de 38.3 unidades con una desviación estándar de 1.5. Este comportamiento fue similar al mes de marzo de 2010 donde se encontraron los máximos y mínimos en las mismas estaciones, con valores de 40.9 y 36.1 unidades. Para los meses de agosto y diciembre los mínimos se localizan en la estación 1 con valores cercanos a 36 unidades y los máximos en las estaciones 10, 11 y 12 con valores mayores de 40 unidades para los dos periodos.

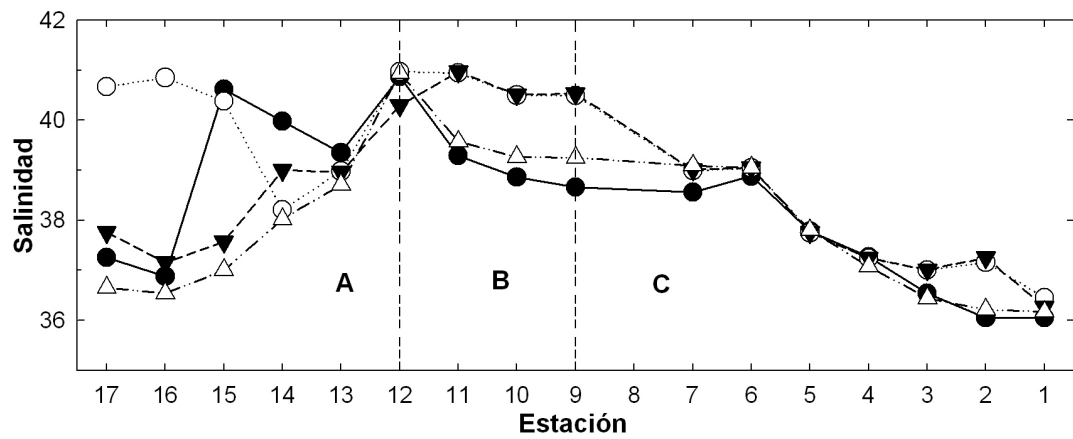


Figura 6. Variación espacial y temporal de la salinidad en el área de estudio, (—●— Abril○..... Agosto ---▼--- Diciembre -△- Marcho).

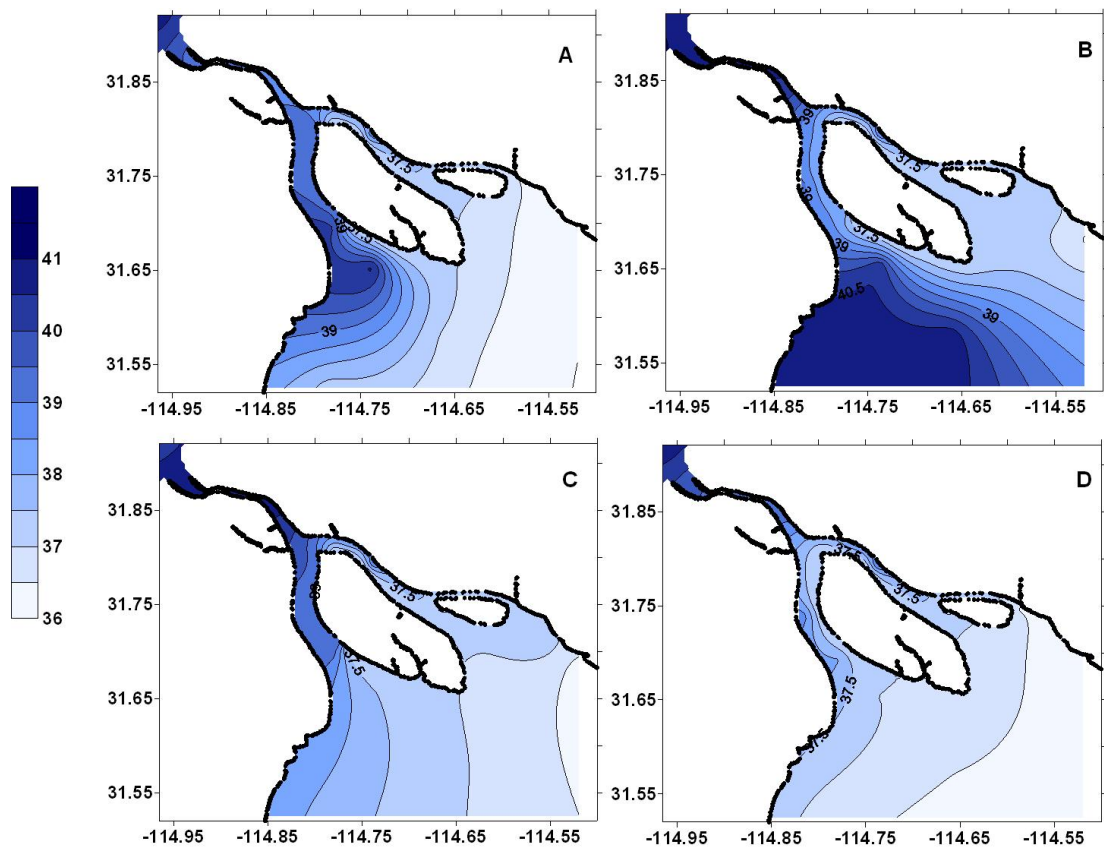


Figura 7. Distribución espacial de salinidad: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

3.1.2 Temperatura y densidad

La fluctuación anual de la temperatura, siguió el típico patrón de las estaciones climáticas, con valores menores de hasta 15 °C en invierno (diciembre y marzo), en las estaciones 9,11,12 y 14. Temperaturas máximas de hasta 32 °C en verano (agosto) para casi todas la estaciones, a excepción de las estaciones 15 y 17 y temperaturas de transición entre 21 y 23 °C en primavera (abril) para casi todas las estaciones de muestreo (Figura 8 y 9).

Se encontró diferencias significativas entre los cuatro meses por medio de la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para muestras independientes, al realizar una prueba a posteriori de Wilcoxon para dos muestras independientes con aproximación de Kruskal Wallis se evidenció que los meses de diciembre y marzo no tienen diferencias significativas.

Con las mismas pruebas estadísticas, entre las zonas (A,B y C) se encontró que para abril y diciembre existían diferencias entre todas las zonas, mientras que para marzo los canales de Baja California y Sonora fueron similares y para agosto la temperatura se mantuvo homogénea a través de cada una de las zonas.

El canal de Sonora presentó un comportamiento similar en los meses de diciembre y marzo, mientras que las zonas de Baja California y el río fueron diferentes a través de todos los meses de estudio.

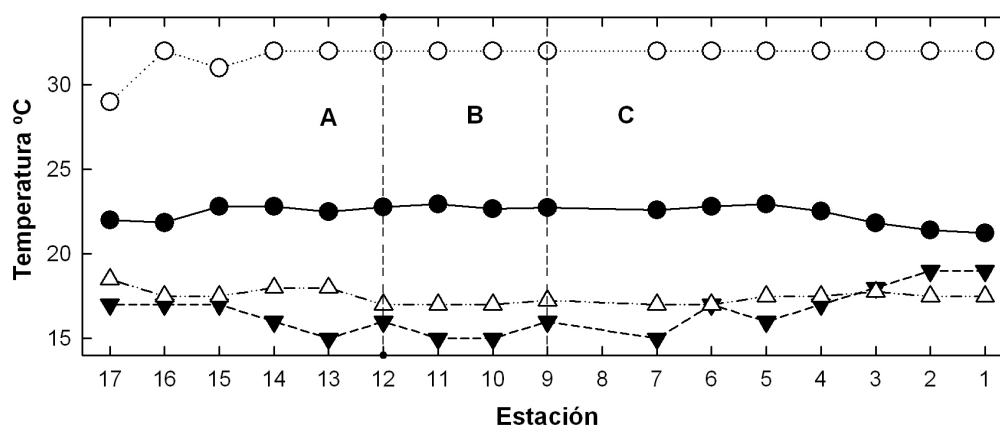


Figura 8. Variación espacial y temporal de la Temperatura Superficial:
 —●— Abril —○— Agosto —▼— Diciembre —△— Marzo.

Para el mes de abril las temperaturas menores se presentaron en las estaciones más oceánicas ($\sim 21.2^{\circ}\text{C}$) y para los otros puntos de muestreo los valores fueron similares, con un promedio de 22.4°C a menos de una desviación estándar.

En el mes de Agosto, se encontró un comportamiento homogéneo en las temperaturas a lo largo de la malla de muestreo, con un promedio de 31.7°C , pero al igual que en el mes de abril se presentó una disminución en la temperatura con valores mínimos de 29°C en estaciones oceánicas 15 y 17 (Fig.8 y 9).

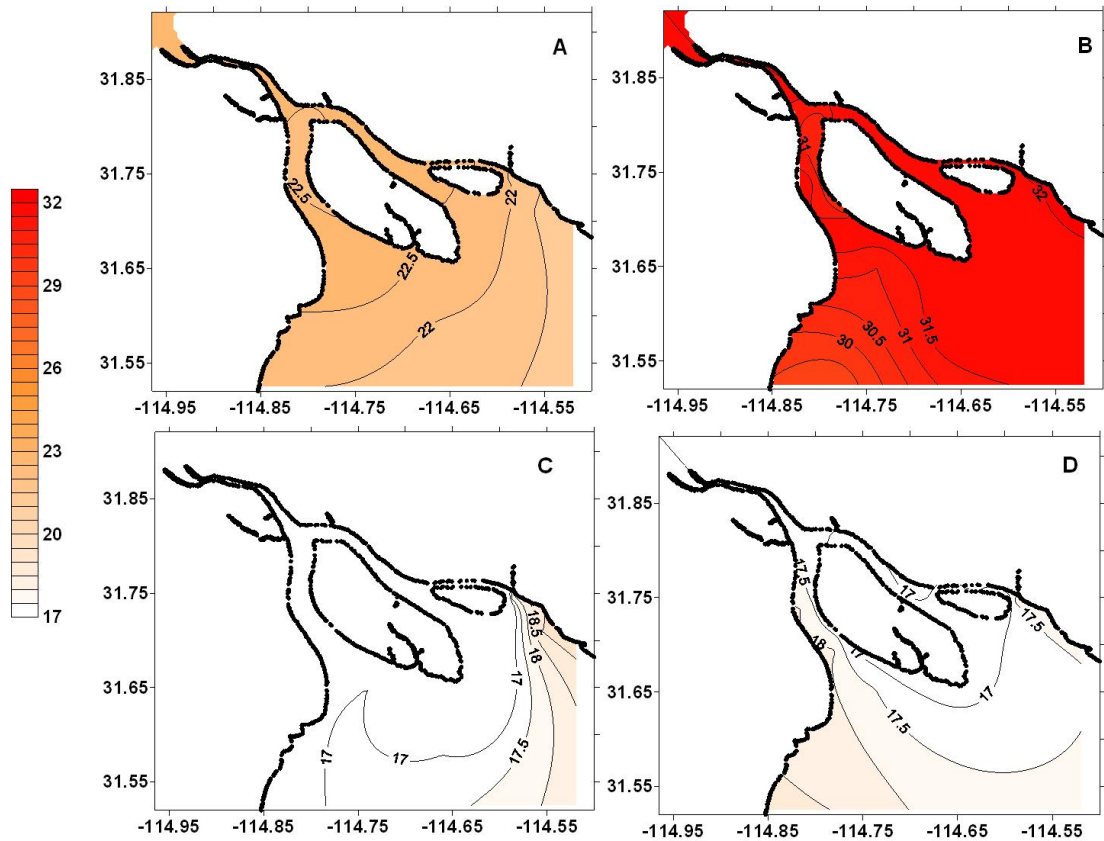


Figura 9. Distribución espacial de temperatura: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

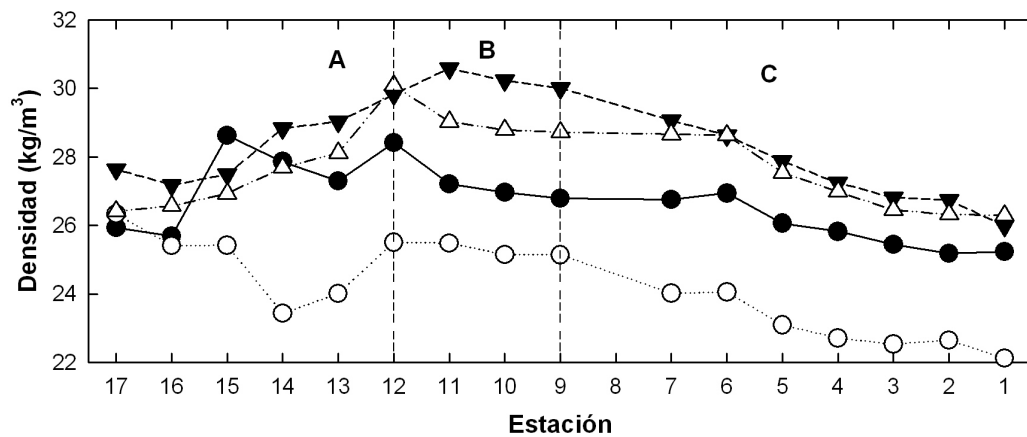
En cuanto a la densidad (σ_t) se encontró un patrón similar a lo presentado en la salinidad; donde la densidad incrementó de la boca del DRC a la cabeza para los meses de abril, diciembre y marzo, mientras que para el mes de agosto no se evidenció este gradiente para la costa de Baja California.

Las mayores densidades se encontraron en general para la costa de Baja California y la zona del río (Figura 10 y 11), mientras que en la costa de Sonora, principalmente en la zona más oceánica la densidad fue menor.

La costa de Sonora presentó el comportamiento más homogéneo en cuanto a la densidad, con un incremento constante desde la zona oceánica

hacia la zona del río , las menores densidades se presentaron para el mes de agosto con valores cercanos a los 22 Kg/m³. En la zona del río el incremento fue constante hacia el interior para los meses de abril, agosto y diciembre, donde las menores densidades se mantuvieron entre los 25 Kg/m³ para el mes de agosto.

La costa de Baja California presentó un comportamiento similar para diciembre y marzo con un incremento desde el océano hacia la zona del río; abril y agosto presentaron altos y bajos. Se encontraron diferencias significativas tanto entre los meses de muestreo, como entre las tres zonas de estudio.



**Figura 10. Variación espacial y temporal de la densidad (σ_t): —●— Abril
○..... Agosto ---▼--- Diciembre ---△--- Marzo.**

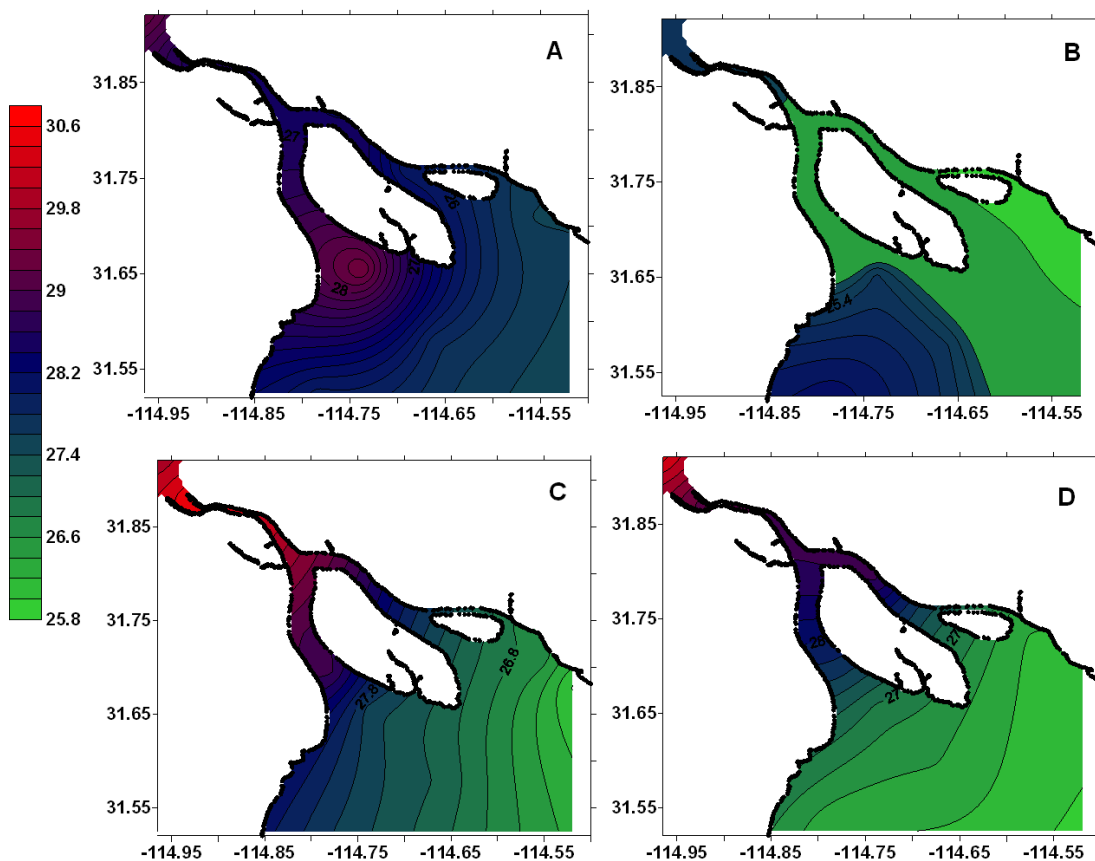


Figura 11. Distribución espacial de la densidad (σ_t) : (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

3.1.3 Turbidez

El DRC se caracteriza por ser una zona de fuerte mezcla provocada por la acción de la marea y de alta turbidez (Santamaría del Ángel *et al.*, 1994), esto se ve reflejado en los meses de muestreo realizados durante este estudio, donde se evidenció un constante gradiente a través de los cuatro periodos, donde la profundidad del disco de secchi disminuye de las estaciones oceánicas a las más internas del Delta (Figuras 12 y 13).

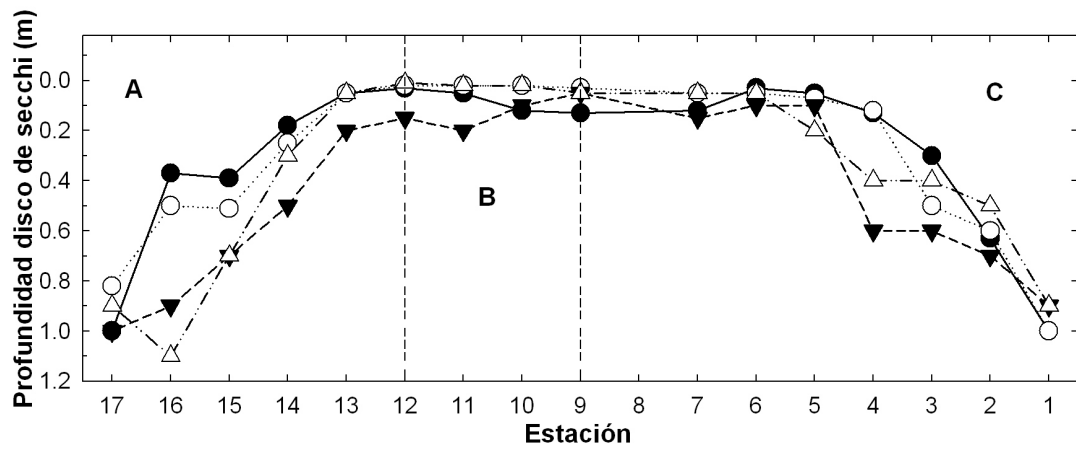


Figura 12. Distribución de la turbidez de acuerdo a la profundidad del disco de Secchi: —●— Abril○..... Agosto ---▼--- Diciembre -△- Marcho.

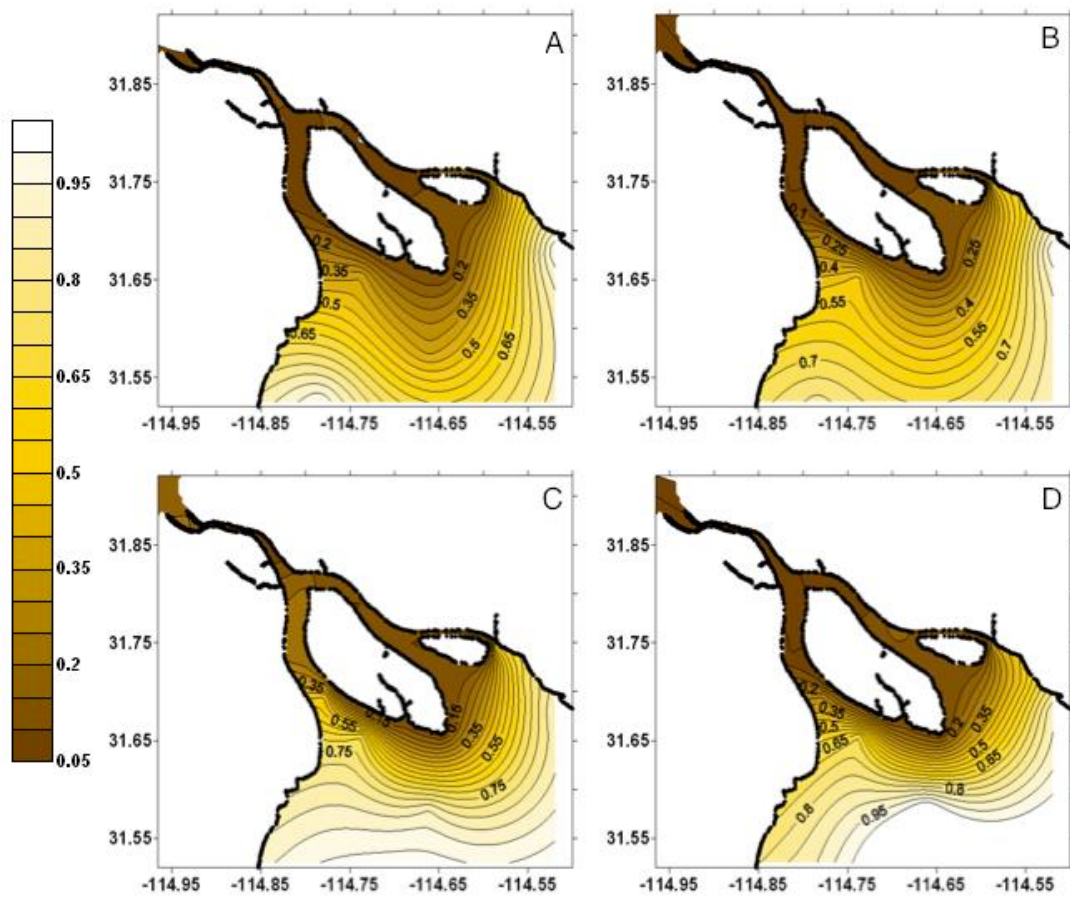


Figura 13. Distribución espacial de turbidez de acuerdo a la profundidad del disco de Sechi: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

De acuerdo al análisis de varianza de Kruskal Wallis para muestras independientes, no se encontraron diferencias significativas entre los meses a un α del 0.05.

Teniendo en cuenta que no se presentó una gran variabilidad estacional de la profundidad del disco de secchi, pero que si fue evidente una regionalización entre las zonas de mayor y menor turbidez; se realizó un Análisis de Componente Principal (ACP), con el fin de establecer regiones de similitud estadística dentro del área (Tabla 2).

Tabla 2. ACP para turbidez. Los colores representan cada una de las regiones.

Estación	ACP 1	ACP 2	ACP 3
1	0.87	0.79	-0.80
2	-0.37	0.56	-0.41
3	-0.75	-0.36	-0.17
4	-0.98	-0.58	0.61
5	-0.39	-0.93	0.82
6	-0.94	-0.36	0.15
7	-0.49	0.45	0.05
9	-0.83	0.02	0.12
10	0.42	0.71	0.08
11	-0.13	0.68	-0
12	-0.83	0.01	0.06
13	-0.89	0.10	0.13
14	-0.98	-0.45	0.29
15	-0.85	-0.89	0.62
16	-0.73	-0.93	0.80
17	-0.37	0.35	0.39

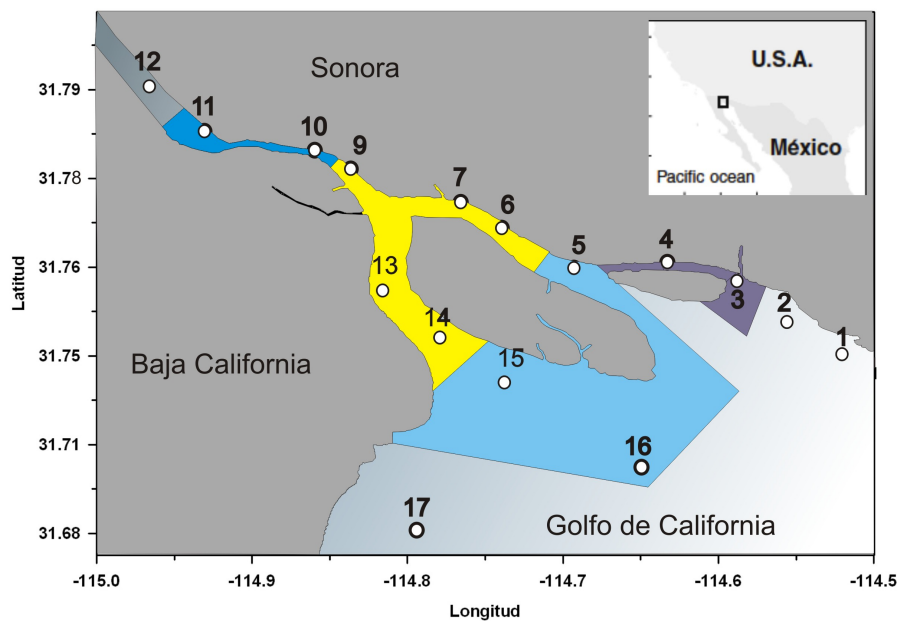


Figura 14. Regionalización de acuerdo a la turbidez.

De acuerdo al ACP para turbidez (Tabla. 2) se encontraron 4 regiones diferentes, las cuales corresponden al área del río con la mayor turbidez (exceptuando la estación 12), la zona media del delta que sería la zona de mezcla, el área influenciada por la isla Pelicano y por último la boca del DRC. Para las estaciones 1, 2, 12 y 17 no se encontraron similitudes con las otras regiones

3.1.4 Efecto de la marea sobre la variabilidad hidrológica

Como se evidenció anteriormente existe un alto gradiente entre el área de la cabeza y la boca del delta para las variables hidrológicas, por lo cual se realizó el análisis entre estas variables y la marea con el fin de comprender más claramente los cambios a través de las estaciones de muestreo. En las siguientes cuatro figuras se presenta la altura de marea (líneas punteadas

roasa) y salinidad (puntos azules) para cada uno de los días de muestreo (las mareas están considerado el desfase mencionado en la metodología).

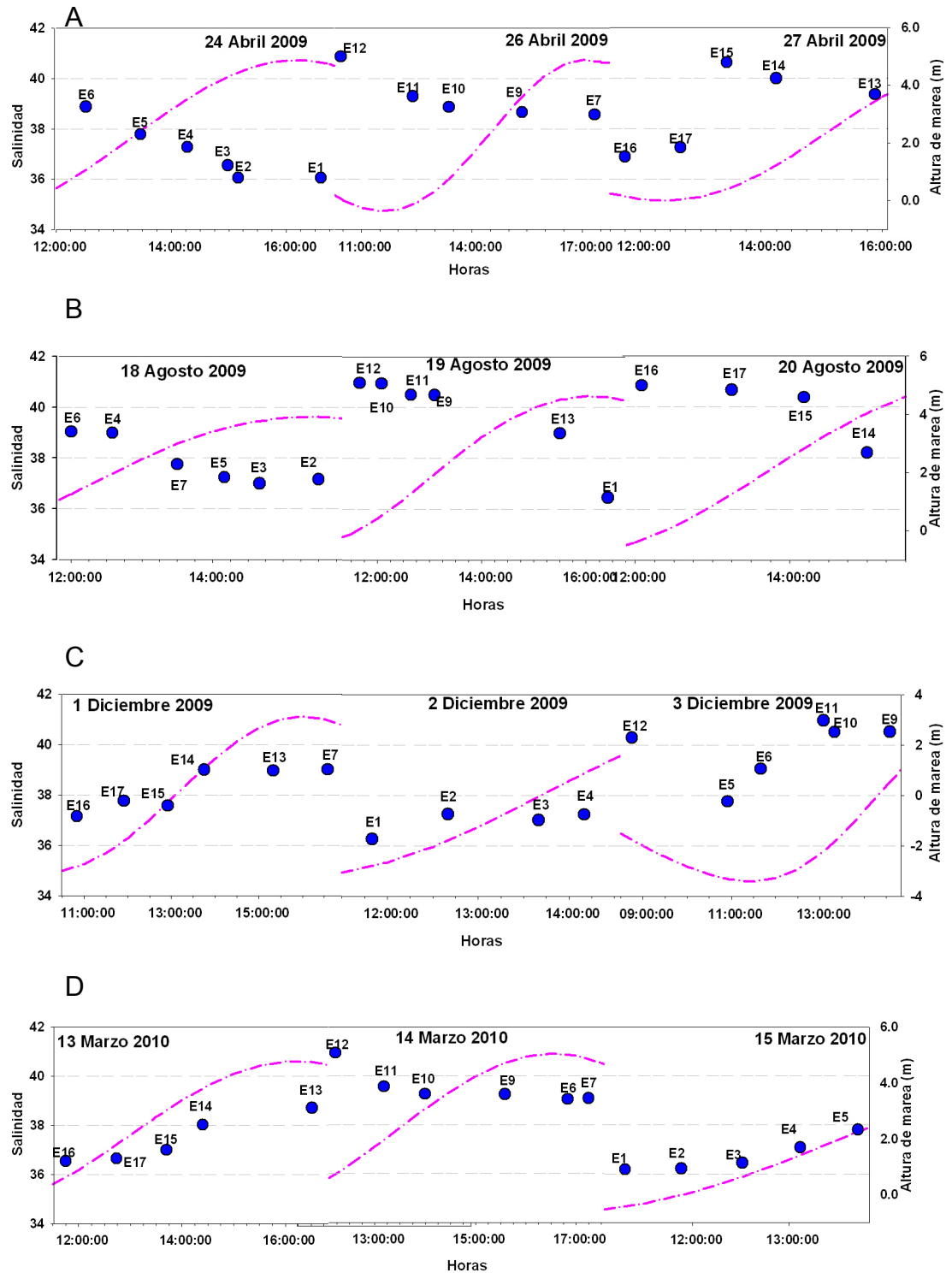


Figura 15. Salinidad y marea (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

Para el mes de abril en el primer día de muestreo (24 de abril), en la estación 6 debido a que se tomó la muestra en el inicio de subida de marea la mayor influencia era por el agua más salina de la zona riverense al igual que sucede para la estación 5. Para las siguientes estaciones se ve como al aumentar la marea ingresaron aguas del Alto Golfo de California para ser mezcladas con las de la zona alta del Delta. Este fenómeno también puede verse para los otros dos días de muestreo donde es clara la mezcla del agua con efecto de evaporación de la cabeza del DRC y la de el AGC.

En el mes de agosto se presentaron salinidades más altas, al igual que en el mes de abril se puede identificar en la figura 15 B como el estado de marea influye en la salinidad del punto de muestreo: para el caso del primer día de muestreo la estación 6 presentaba mayor influencia de las aguas hipersalinas que las del Alto Golfo de California, mientras que las otras estaciones presentaron una mezcla entre estas dos debido al transporte de las mareas. Para el segundo día, se tomaron las muestras en la marea más baja haciendo más fuerte la señal hipersalina para esta zona. En cuanto al último día de muestreo las estaciones más oceánicas presentaron la señal de las aguas hipersalinas debido a que se tomó la muestra en el inicio de subida de marea y por lo tanto se presentaba poca agua del Golfo de California. Este proceso de mezcla entre las dos fuentes de agua se puede identificar igualmente para los meses de diciembre y marzo (Figuras 15 C y D).

3.2 Variabilidad espacial de nutrientes en el delta del Río Colorado

3.2.1 Nitratos

En general la concentración de nitratos para los cuatro meses de muestreo se incrementó de la región oceánica, hacia el interior del delta, con valores mínimos entre 0.01 y 0.2 μM en las estaciones oceánicas 1, 2 y 17, a valores máximos de hasta 21.7 μM en las estaciones 10,11 y 12 (Figuras 16 y 17). Con la prueba de Kruskal Wallis para muestras independientes, a un nivel de confianza del 95%, se identificó que no existen diferencias significativas entre cada una de las campañas de muestreo.

Al analizar a cada una de las zonas se identificó por medio de las pruebas estadísticas correspondientes, que para el mes de abril no se presentaron diferencias significativas entre las zonas A, B y C (exceptuando el pico de la estación 6), contrario al mes de agosto donde se encontraron diferencias significativas entre todas las zonas. Para los meses de diciembre y marzo las zonas de Baja California y Sonora fueron similares.

En cuanto a la estacionalidad por zonas se encontró que las costas de Baja California y Sonora no presentan diferencias significativas a través de los meses, mientras que la zona del río en el mes de abril presentó un comportamiento diferente al resto de los meses.

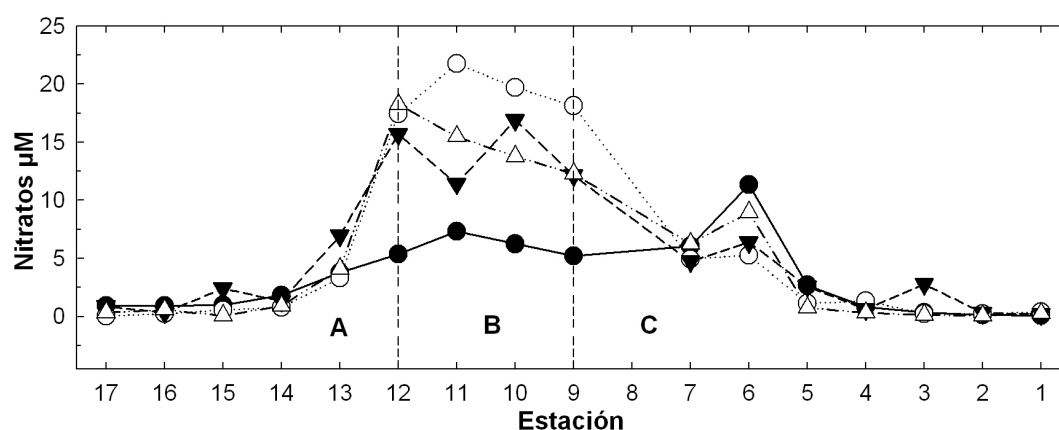


Figura 16. Concentración de Nitratos: —●— **Abril** —○— **Agosto** —▼— **Diciembre** —△— **Marzo**.

Las concentraciones mínimas se registraron en los meses de abril y diciembre en la estación 1, con valores de 0.08 y 0.20 μM respectivamente; en marzo en la estación 2 con valor de 0.05 μM ; y en agosto en la estación 16, con valor de 0.01 μM (Figuras 16 y 17). Durante las campañas de muestreo se mantuvo un patrón constante de máximas concentraciones de nitratos, principalmente en la estación 6 y en las correspondientes a la zona del río (Figura 16).

Los rangos de concentraciones de nitratos para la costa de Sonora fueron entre 0.08 y 11.35 μM , en el área del río se presentó la mayor concentración en el mes de marzo con 18.24 μM y se mantuvo un rango entre 5.21 y 18.24 μM a través de los meses. Para Baja California la menor concentración fue de 0.01 μM y la mayor de 6.94 μM .

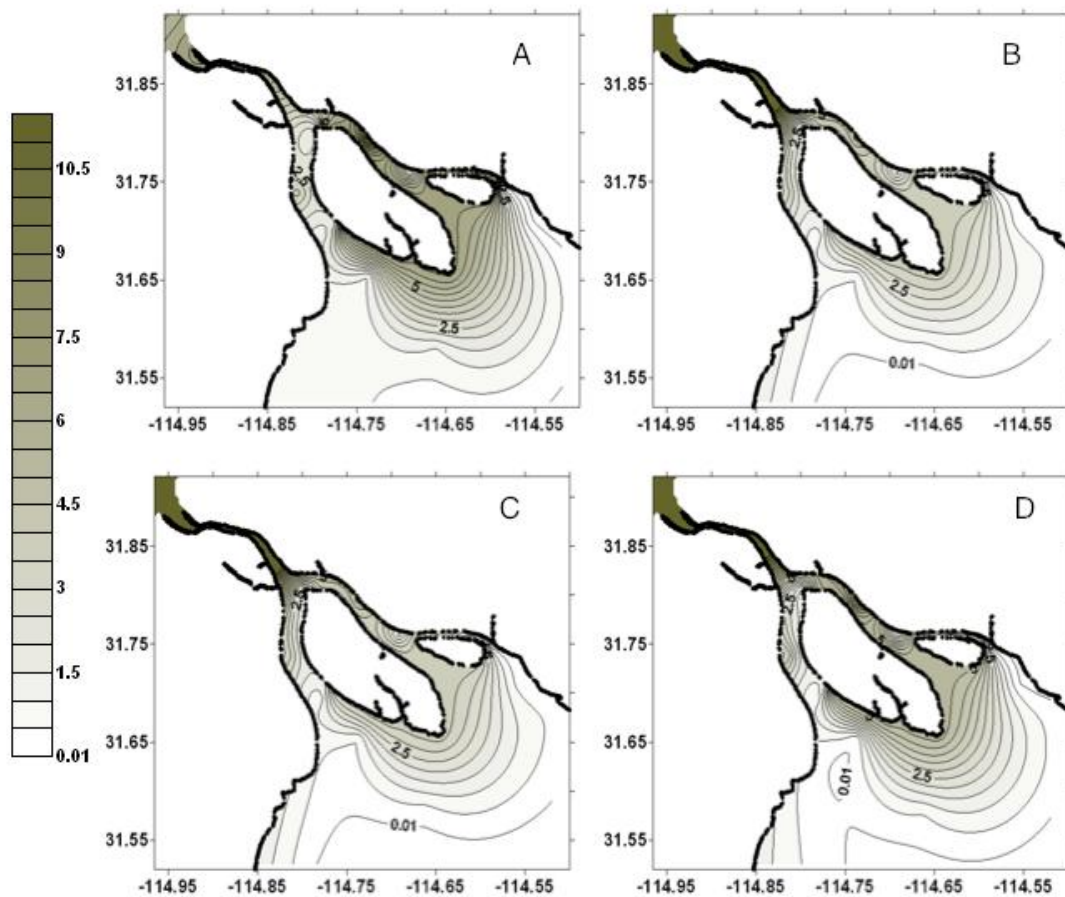


Figura 17. Distribución espacial de nitratos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

3.2.2 Nitritos

Los nitritos se comportaron con el patrón característico observado en las otras variables durante el mes de agosto y abril, con mayores concentraciones en la cabeza del delta y una clara disminución en la boca del DRC. Como se puede evidenciar en la figura 18 y 19, hay diferencias estacionales en las concentraciones de nitritos lo que se verificó por medio de una prueba de Kruskal Wallis para muestras no paramétricas independientes. Con la prueba a posteriori se identificó que no hay

diferencias en la distribución de las concentraciones entre los meses abril-agosto y diciembre-marzo, pero si entre pares (figura 18).

En general el rango de nitritos se encontró entre 0.05 – 1.54 μM , presentándose la mayor concentración en la zona del río y la menor en la costa de Sonora. Entre las zonas se encontró que las costas de Baja California y Sonora presentaron un comportamiento similar a través de los meses de muestreo, mientras que en la zona del río se encontró una diferencia significativa en el mes de agosto.

En los meses de abril, diciembre y marzo no se identificaron diferencias significativas entre todas las zonas de muestreo, mientras que en agosto se encontró que todas las zonas presentaron un comportamiento diferente.

En la costa de Baja California se encontró en promedio una mayor concentración de nitritos para el mes de abril (0.46 μM), mientras que para la costa de Sonora y el río fue para el mes de agosto (0.55 y 1.41 μM respectivamente).

Para los meses de diciembre y marzo se encontraron los promedios menores de concentraciones de nitritos, con valores de 0.21 y 0.20 μM respectivamente (Figura 18). En estos dos meses no se ve una gran variabilidad entre las estaciones.

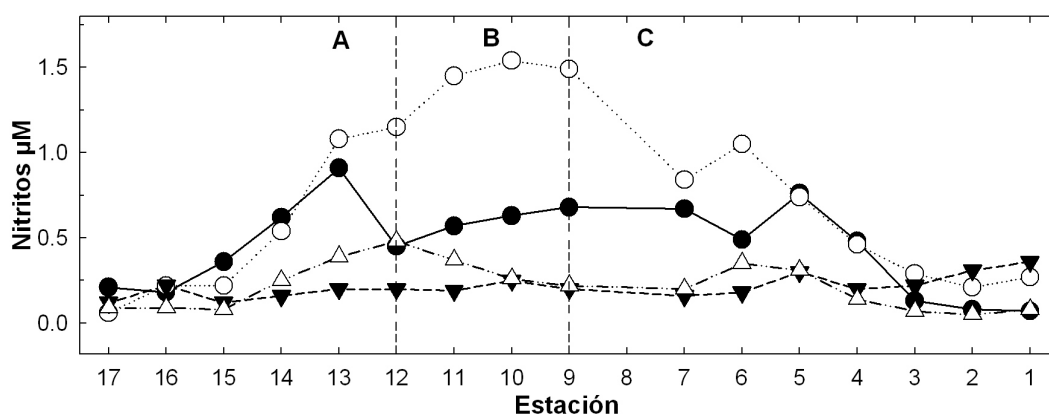


Figura 18. Concentración de nitritos (μM): —●— **Abril**○..... **Agosto** ---▼--- **Diciembre** -△- **Marzo**.

La mayor concentración de nitritos se encontró en la estación 10 en el mes de agosto con un valor de $1.54 \mu\text{M}$, y al igual que para los nitritos se evidenció otro pico máximo en la estación 6. Este mes presentó adicionalmente la menor concentración junto con diciembre de nitritos en las estaciones oceánicas, con valores de $0.06 \mu\text{M}$ para agosto estación 17 y $0.05 \mu\text{M}$ para diciembre en la estación 2.

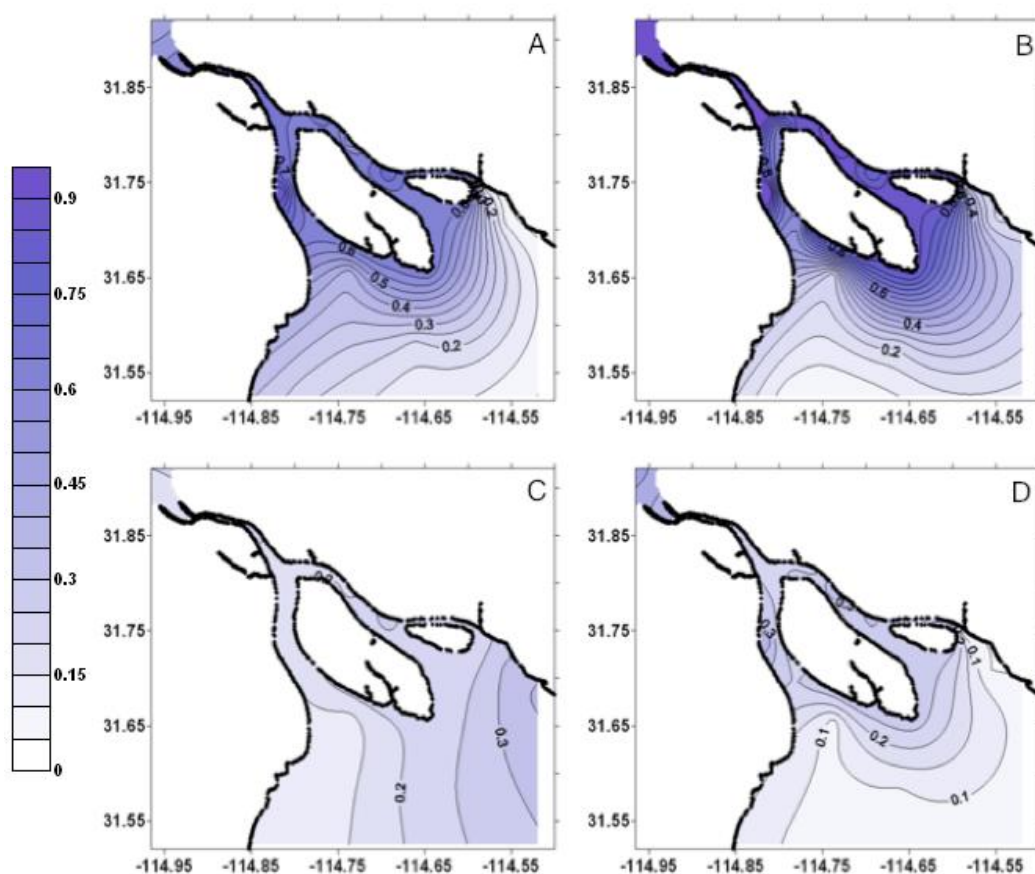


Figura 19. Distribución espacial de nitritos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

3.2.3 Amonio

El amonio en general presentó a través de los meses un comportamiento heterogéneo con diferentes picos y bajos durante la campaña de muestreo. Dentro de los picos presentados fueron constantes los incrementos en la estación más oceánica de la costa de Baja California (estación 17), en la estación 6 para abril y agosto y otro en la estación 7 para diciembre y marzo. Los rangos de concentraciones a través de todas las campañas de muestreo fue de 0.25 a 12.48 μM con un mínimo en la estación 16 de marzo y el máximo en la estación 12 de agosto.

Para los meses de abril, diciembre y marzo no se encontraron diferencias significativas entre las zonas de estudio (Baja California, Sonora y el río), mientras que en agosto la costa de Sonora presentó un comportamiento diferente a las otras zonas (Figura 20). En general no se evidenciaron diferencias estacionales entre las concentraciones de todo el delta y entre las zonas.

Las máximas concentraciones se presentaron en la costa de Sonora en el mes de diciembre con un valor de 8.51 μM , mientras que en la zona del río se encontró en el mes de agosto con 12.49 μM y en Baja California en el mes de marzo con 6.41 μM .

Los menores promedios (tomando el total de las concentraciones de todas las estaciones) de concentración de amonio se presentaron en los meses de abril y marzo, con valores de 1.9 y 1.7 μM respectivamente; la menor concentración se encontró en la estación 16 del mes de marzo 0.2 μM . Para el mes de abril el mínimo de 0.5 μM se presentó en la estación 10 y el máximo de 4.7 μM en la estación 6. En el mes de agosto se encontraron las mayores concentraciones de amonio con un promedio de 2.9 μM y un máximo en la estación 12 de 12.4 μM , en general se pudo evidenciar diferentes picos de máximos a través del mes, encontrando en la estación 7 concentraciones altas tanto en el mes de agosto como diciembre de 5.3 μM y 8.5 μM respectivamente (Figura 20).

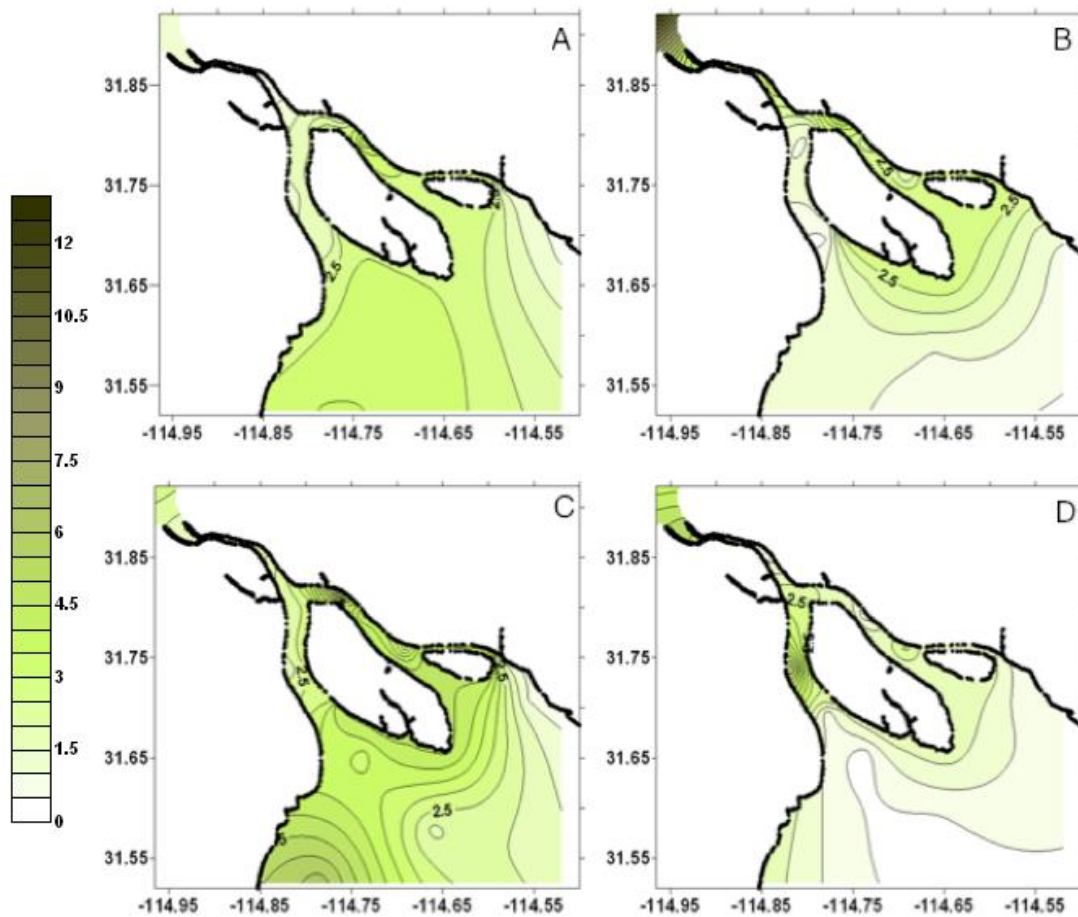
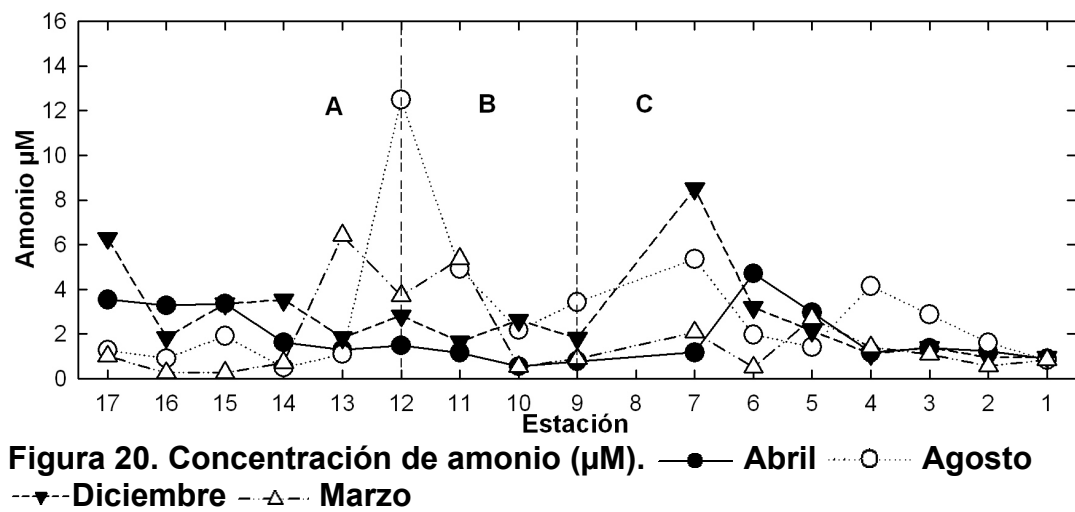


Figura 21. Distribución espacial de amonio: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

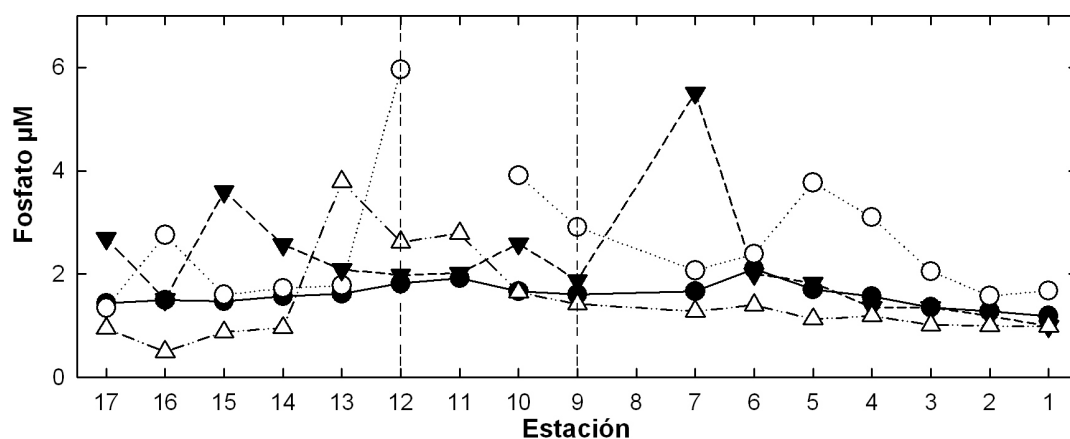
3.2.4 Fosfatos

Para los fosfatos como la mayoría de las otras variables, se evidenció un ligero incremento en la zona del río y al igual que el amonio diferentes picos a través de los meses de muestreo. En general las concentraciones se mantuvieron entre 0.50 y 5.96 μM (sin tomar en cuenta el valor de la estación 12 de 23.2 μM que se eliminó por ser un valor anómalo que no pudo ser respaldado con otros datos).

Al realizar los análisis estadísticos correspondientes se encontró que en la costa de Sonora abril y marzo presentaron un comportamiento similar mientras que diciembre y agosto fueron diferentes. En el área del río solo se encontraron diferencias significativas en agosto y en la costa de Baja California no se encontraron diferencias significativas (Figuras 22 y 23).

Las mayores concentraciones se encontraron en la zona del río en el mes de agosto (5.96 μM), en Baja California en marzo (3.79 μM) y en Sonora en diciembre (5.55 μM). Al analizar el delta en conjunto se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro meses de muestreo.

Para el mes de abril, el valor máximo fue de 2.1 μM en la estación 6 y el mínimo de 1.2 μM en la estación 1, con un promedio de 1.6 μM y desviación estándar de 0.2 (Figura 22). En Agosto los valores fueron mayores, con un máximo de 23.2 μM en la estación 11 y un promedio de 3.8 ± 5.2 (Figura 22).



**Figura 22. Concentración de fosfatos (μM) —●— Abril —○— Agosto
—▼— Diciembre —△— Marzo.**

En diciembre se encontró el máximo de 5.5 μM en la estación 7 y el mínimo de 0.99 μM en la estación 1, siendo esta la estación más oceánica; el promedio para este mes fue de 2.2 μM, siendo mayor que para abril, con una desviación estándar cercana a 1, indicando baja variabilidad en este mes. Para marzo la mayor concentración de 3.8 μM en la estación 7, con un promedio de 1.5 μM y un máximo de 3.8 μM en la estación 7. Al igual que en diciembre, la menor concentración se presentó en las estaciones oceánicas pero en esta ocasión frente a la costa de Sonora en la estación 16.

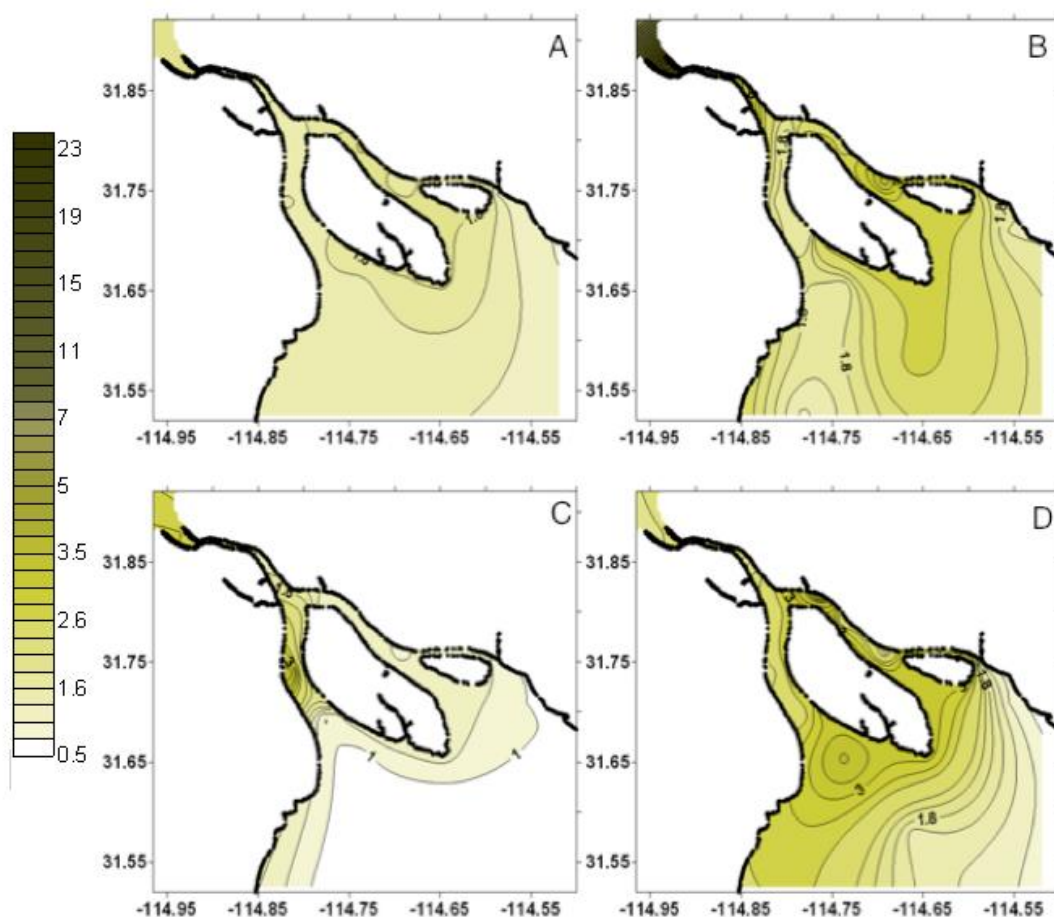


Figura 23. Distribución espacial de fosfatos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

3.2.5 Silicatos

Los silicatos mostraron un patrón constante de incremento de la zona oceánica hacia la cabeza del DRC, con un intervalo de concentraciones con un mínimo de 4.3 μM para marzo en la costa de Baja California y el máximo de 97.06 μM en agosto en la zona del río.

En general la costa de Sonora presentó mayores concentraciones que la costa de Baja California con rangos entre 6.6 - 51.12 μM y 4.3 - 49.7 μM

respectivamente. Mientras que la zona del río presentó las mayores concentraciones con un rango entre 21.1 y 97.06 μM .

De acuerdo a las pruebas estadísticas realizadas para el mes de abril no se presentaron diferencias entre las zonas, mientras que para los otros tres meses se evidenciaron diferencias significativas entre todas las zonas (Figuras 24 y 25).

En la costa de Sonora diciembre se comportó diferente a las otras temporadas, mientras que en la costa de Baja California se evidenció un comportamiento similar por pares entre abril - agosto y diciembre - marzo. Para el río el mes de agosto presentó diferencias significativas con los otros meses.

En general tomando todo el delta en conjunto, todos los meses presentaron diferencias estadísticamente significativas, pero al realizar la prueba a posteriori se evidenció que los meses de diciembre y marzo presentan comportamiento similar.

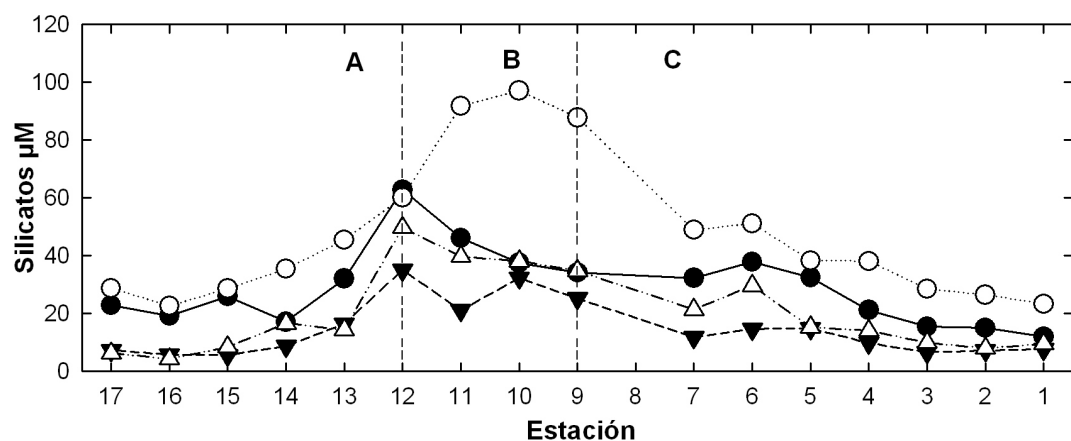


Figura 24. Concentración de silicatos (μM): —●— Abril Agosto
 ---▼--- Diciembre --△-- Marzo.

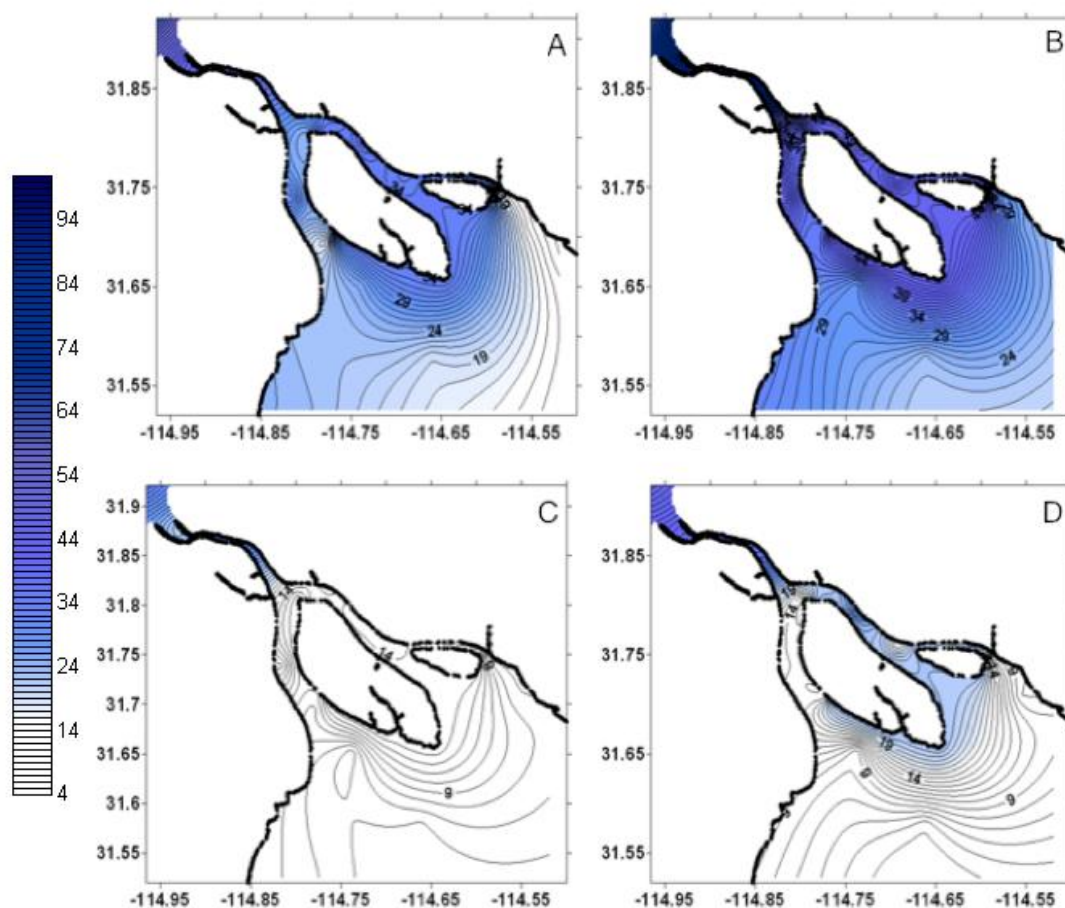


Figura 25. Distribución espacial de silicatos: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

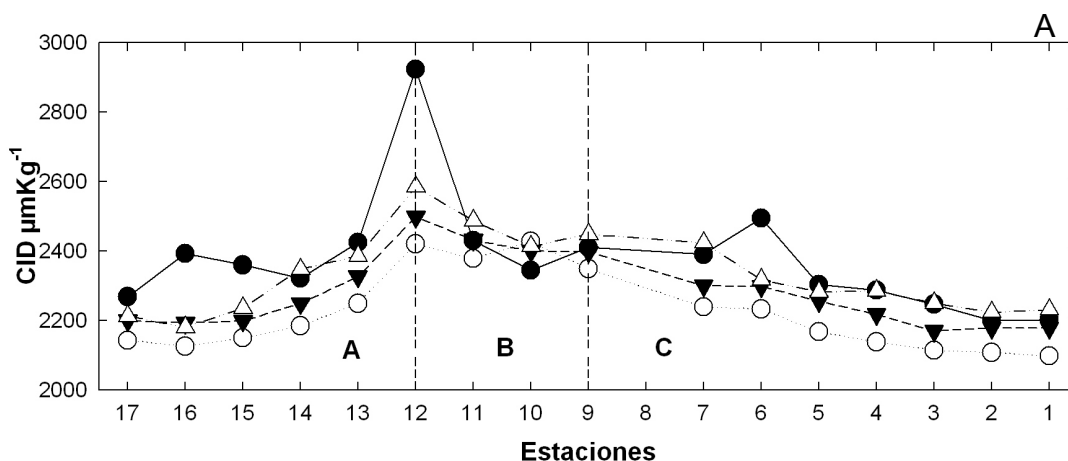
Los meses que presentaron una concentración promedio menor de silicatos fueron diciembre y marzo con valores entre 14.3 ± 9.4 y 20 ± 14 μM respectivamente. En Agosto se presentó el pico más alto de concentración de silicatos con valores de $97 \mu\text{M}$, en general este mes presentó concentraciones por encima de los otros meses para todas las estaciones, siendo la más baja en la estación 16 con un valor de $22.6 \mu\text{M}$, en este punto se encontraron las menores concentraciones en el mes de marzo y diciembre también con valores entre 4 y 5 μM (Figura 25).

El mes de abril presentó un promedio de $29 \pm 13.3 \mu\text{M}$, un máximo en la estación 12 de $62.7\mu\text{M}$ y un mínimo en la estación 1 de 12; al igual que para los nitratos y nitritos se presentaron las mayores concentraciones en las estaciones riparias y las menores en las oceánicas.

3.2.6 Carbono inorgánico disuelto

El Carbono Inorgánico Disuelto CID y el Carbono Inorgánico disuelto normalizado nCID en general presentaron un comportamiento similar a través de los meses, con valores menores en las estaciones oceánicas y máximos en las estaciones 6 y 12 (Figura 26 A y B), y un gradiente uniforme de aumento hacia la cabeza del estuario. Las concentraciones de CID se mantuvieron entre los 2097 y $2923 \mu\text{molKg}^{-1}$ y las de nCID entre 2109 y $2908 \mu\text{molKg}^{-1}$. Las mayores concentraciones para todas las zonas se presentaron en el mes de abril y las menores en agosto.

Al analizar las diferencias entre las concentraciones de CID y el nCID se encontró que para los meses de abril y marzo los valores de nCID fueron menores que los de CID contrario a lo ocurrido en los meses de agosto y diciembre.



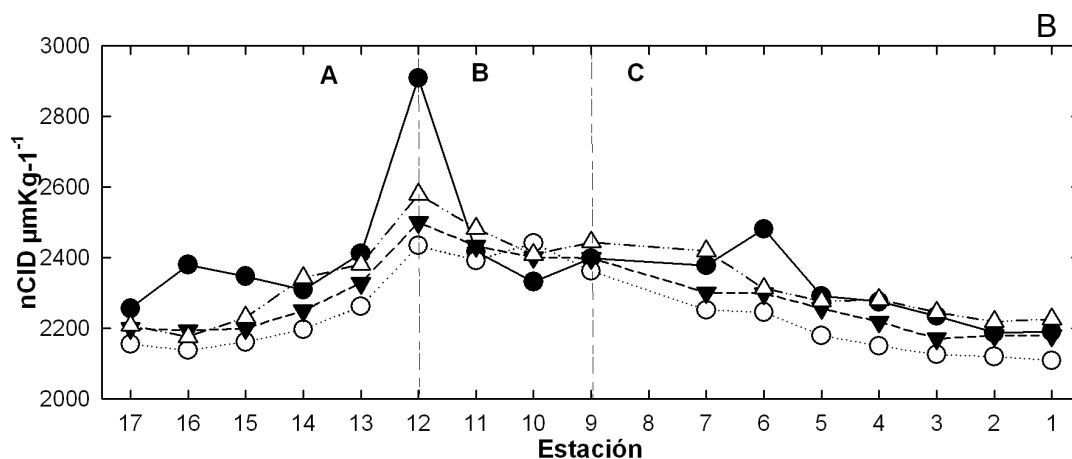


Figura 26. (A) Carbono Inorgánico Disuelto, (B) Carbono Inorgánico Disuelto estandarizado Alcalinidad total estandarizada: —●— Abril
○..... Agosto ---▼--- Diciembre -△- Marzo.

Al realizar el análisis estadístico entre las zonas se encontró que las costas de Baja California y Sonora presentaron un comportamiento similar entre los meses de agosto, diciembre y marzo; mientras que para la zona del río agosto fue el que presentó diferencias significativas. Al analizar el delta en conjunto se encontró que los meses de abril, agosto y diciembre presentan un comportamiento similar.

Como se puede identificar en la figura 27 el mes de abril presentó las mayores concentraciones de CID, con valores en las estaciones oceánicas entre los $2200 \mu\text{molKg}^{-1}$, el promedio en general fue de $2362 \pm 165 \mu\text{molKg}^{-1}$, la variabilidad en este mes fue alta debido a los picos presentados: estación 6, 12, 16 (Figura 26).

Agosto a diferencia de abril fue el mes con menores concentraciones de carbono inorgánico Disuelto ($2232 \pm 113 \mu\text{molKg}^{-1}$) aunque se mantuvo el gradiente de valores más altos en la estación 12, el menor valor del año se

presentó en este mes en la estación 1 con una concentración de $2096 \mu\text{molKg}^{-1}$. Diciembre y marzo presentaron gradientes similares con promedios entre los $2281 \pm 101 \mu\text{molKg}^{-1}$ y $2327 \pm 113 \mu\text{molKg}^{-1}$.

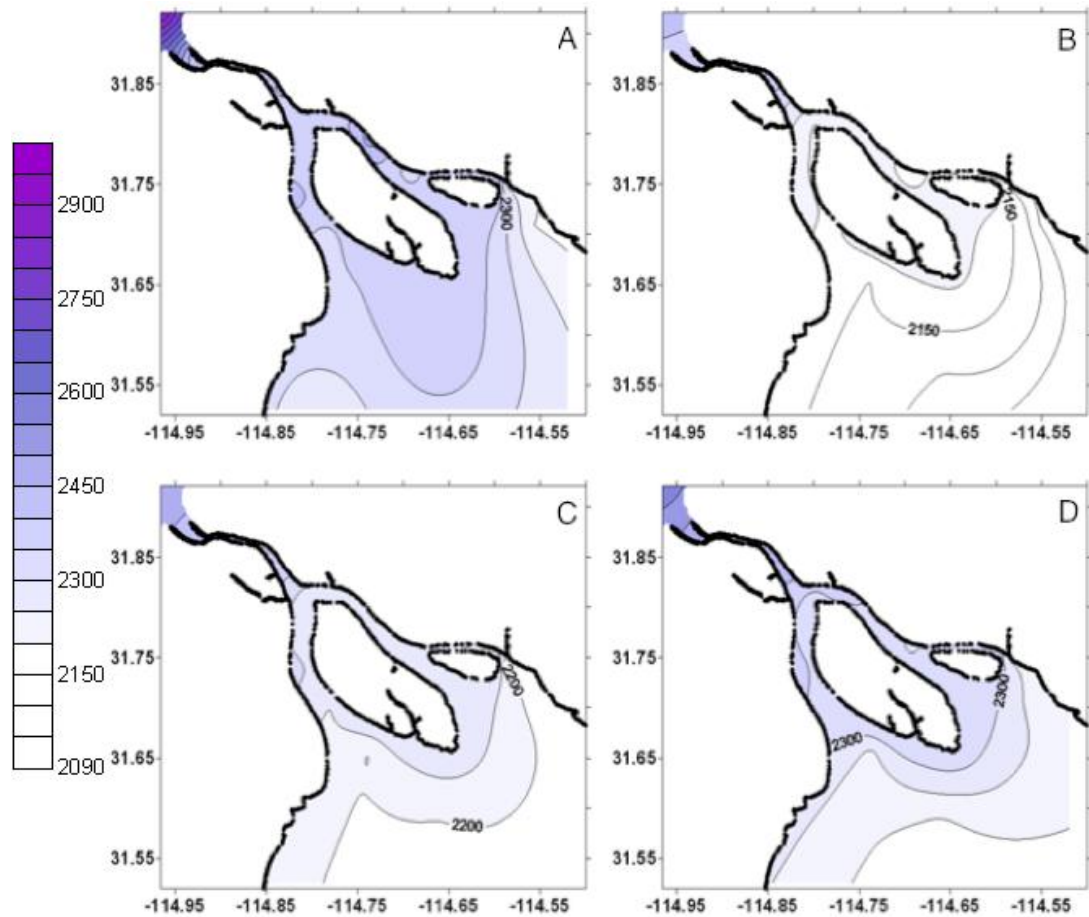


Figura 27. Distribución espacial de carbono inorgánico Disuelto: (A) abril, (B) agosto, (C) diciembre y (D) marzo.

3.2.8 Efecto de la marea y procesos biológicos en la variabilidad de nutrientes

Para evaluar los efectos generados por la marea en las concentraciones de nutrientes, al igual que con la salinidad se realizaron una graficas de concentraciones de nutrientes versus altura de marea para cada mes del estudio (Figuras 28-31). En general no se encontró una comportamiento consistente de los nutrientes con la altura de marea, presentándose en algunos casos (como las estaciones 1-6 en abril) una relación inversa y en otros directa (estaciones 13 a 16 para nitritos, silicatos y CID).

Para el mes de abril de la estación 1 a la 6 se evidenció una relación inversa para todos los nutrientes, en las estaciones 7 a 12 no se encontró una relación clara entre los nutrientes y la marea, al igual que sucedió en las estaciones 13 a 16 (Figura 28).

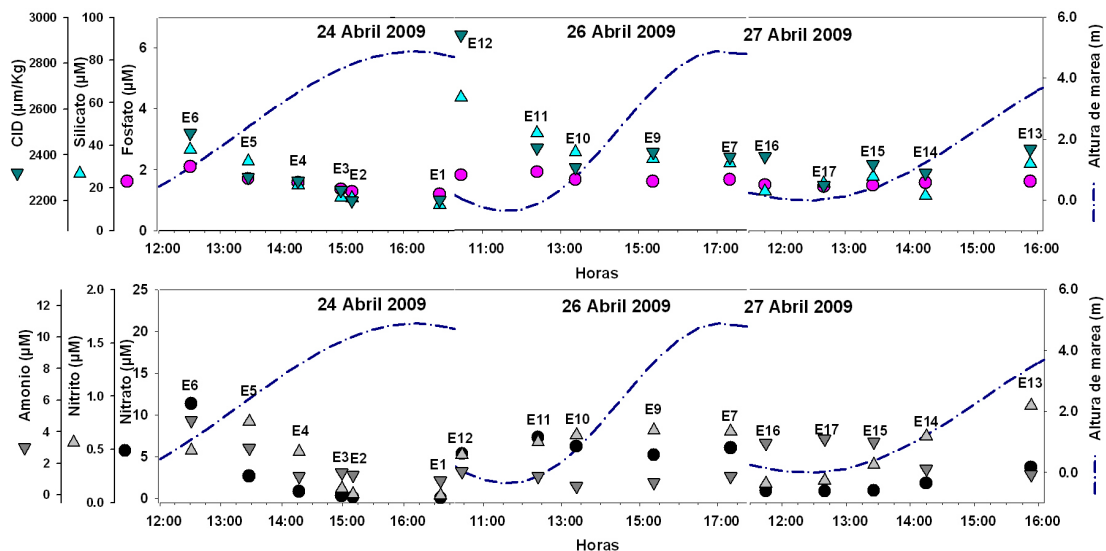


Figura 28. Nutrientes y mareas abril.

Para agosto de la estación 2 a la 6 se evidenció para los nitritos, nitratos, silicatos y CID una relación inversa, lo cual también se encontró para los nitritos en las estaciones 9 a 13 y para el fosfato en las estaciones 14 a 17. Para el amonio y fosfato en las estaciones 2 a 6 no se presentó una relación clara, al igual que para el amonio, nitrato y silicato en las estaciones 9 a 13 y el sílice, nitrato y CID en las estaciones 14-17 (Figura 29).

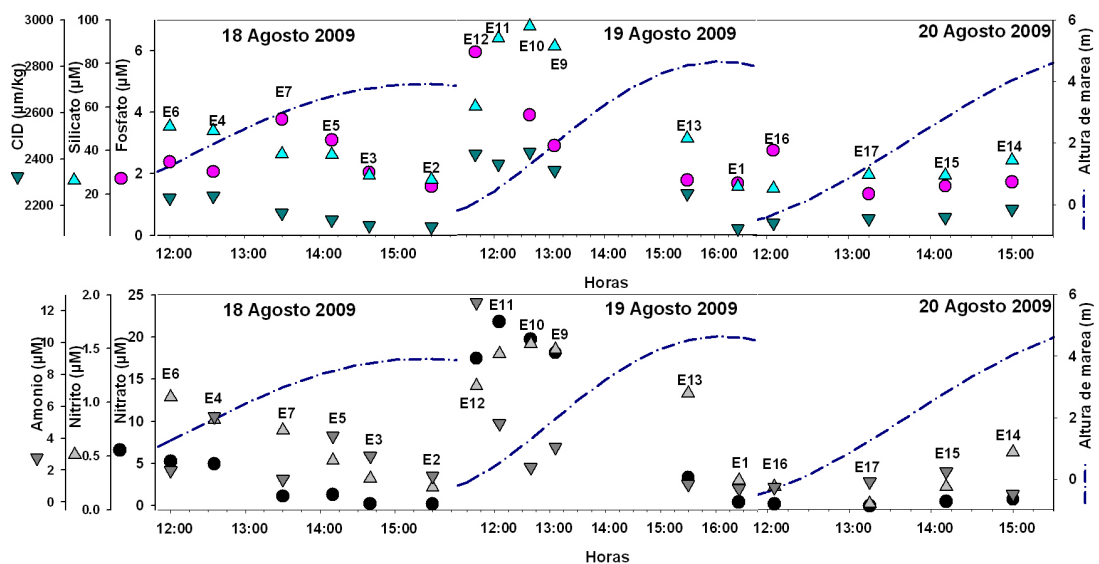


Figura 29. Nutrientes y mareas agosto.

En diciembre se evidenció un pequeño incremento de los nitratos, silicatos y CID en las estaciones 13 a 16 con la marea, para las estaciones 1-4 y 5 a 12 no fue clara la relación entre las mareas y la concentración de los nutrientes (Figura 30).

Para marzo al igual que diciembre se evidenció el incremento de nutrientes con la marea para las estaciones 1-5, mientras que para las estaciones 7 a 12 se presentó una relación inversa entre los nitratos y silicatos con la

marea. Para las estaciones 13- 16 no se evidenció una relación clara (figura 31)

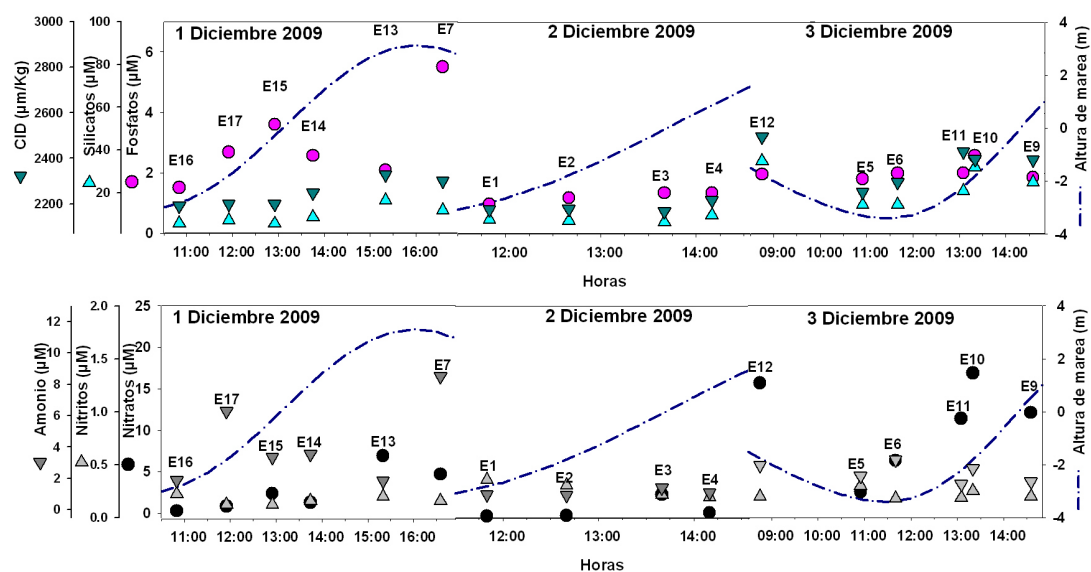


Figura 30. Nutrientes y mareas diciembre.

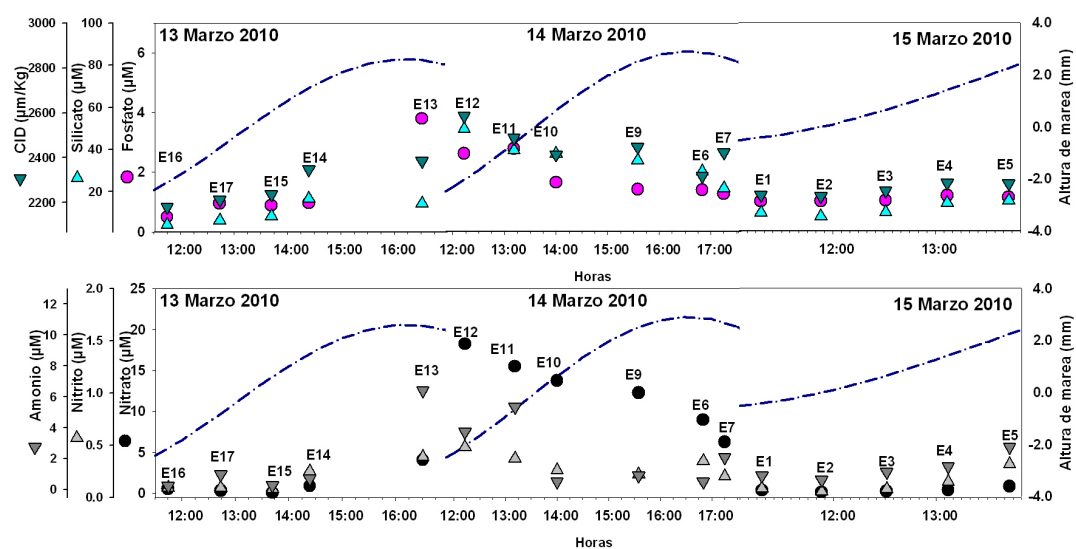


Figura 31. Nutrientes y mareas diciembre.

Existen procesos biológicos de remoción y adición (fotosíntesis y degradación de la materia orgánica respectivamente) que controlan la cantidad de nutrientes en la columna de agua, para lo cual se utilizaron tres métodos para estimar este efecto: Diagramas de mezcla, Correlación nutrientes – clorofila y razones entre nutrientes.

Fosfatos.

En general el fosfato presenta una adición a la columna de agua en la mayoría de las estaciones del periodo estudiado (Figuras 32 y 33). En marzo, la mayor parte de los valores se encuentran por encima pero cercanas a la línea teórica de mezcla, lo que indica una ligera adición o un posible comportamiento conservativo (con excepción de las estaciones 11, 12 y 13 donde se observa un proceso de adición (Figura 32)). En el mes de abril se evidenció un comportamiento homogéneo entre las concentraciones de fosfato a través de la línea teórica de mezcla, con todos los valores por encima y muy cercanos a la línea. En agosto las estaciones 1,2,3,7, 13,14 y 15 muestran un comportamiento conservativo, la 17 se encontró por debajo de la línea de mezcla mientras el resto de las estaciones indican un posible proceso de adición a la columna de agua (Figura 33). En diciembre al igual que abril todas las estaciones se encontraron por encima de la línea de mezcla, con excepción de las estaciones oceánicas de Sonora.

En cuanto a la correlación entre el fosfato y la clorofila, solo se encontró una correlación significativa para el mes de abril (Figura 34).

Silicatos.

De acuerdo a los diagramas de mezcla, en general existe un proceso de adición de silicatos a la columna de agua. En abril se encontraron todas las estaciones por encima de la línea de mezcla, mientras que en agosto, diciembre y marzo algunas de las estaciones estuvieron cercanas o sobre la línea teórica, en los tres meses fue constante que las estaciones más oceánicas de la costa de Baja California y Sonora presentaran este comportamiento conservativo. (Figuras 32 y 33).

Los silicatos al igual que los fosfatos solo presentaron una correlación significativa con la clorofila para el mes de abril (figura 34).

Carbono.

El carbono inorgánico disuelto presenta en general un comportamiento conservativo, exceptuando las estaciones 16,12 y 16 para el mes de abril y la 12 de diciembre que se encontraron por encima de la línea. Adicionalmente se evidenció un proceso de remoción para las estaciones 14 y 15 en abril, 15, 16 y 17 en agosto, 3,14,15 y 17 en agosto y por último las estaciones 6 y 16 en marzo.

Al igual que los otros nutrientes al analizar la correlación entre el CID y la clorofila solo se evidenció una correlación significativa (y la mayor de todas) en el mes de abril, donde el 90% del CID puede ser explicada por la clorofila.

Compuestos nitrogenados.

En general para los compuestos nitrogenados el proceso dominante fue la adición a la columna de agua y el comportamiento conservativo a través de la línea teórica de mezcla.

Para el nitrato dominan los procesos de adición a la columna de agua en los meses de abril, agosto y diciembre, principalmente para las estaciones internas del delta y un proceso conservativo para las estaciones oceánicas. En marzo a diferencia de los otros meses se presenta un proceso de remoción para las estaciones 16 y 17 , un comportamiento conservativo en las estaciones 1,2,3 y 15; las estaciones restantes se encontraron por encima de la línea teórica de mezcla (Figuras 32 y 33).

Los nitratos presentaron una relación significativa con la clorofila solo en el mes de abril con un 71.1% de los datos pueden ser explicados por el modelo lineal (figura 34).

En cuanto a los nitritos, dominó el proceso de adición para los meses de abril, agosto y marzo, mientras que en el mes de diciembre la mayoría de los datos se encontraron por debajo de la línea teórica de mezcla.

En abril las estaciones oceánicas de la costa de Sonora (1,2,3) presentaron un comportamiento conservativo, mientras que las otras estaciones se mantuvieron por encima de la línea de mezcla. En el mes de agosto solo la estación 17 se encontró por debajo de la línea de mezcla, para las estaciones oceánicas de las costas de Sonora y Baja California se encontró un proceso conservativo y en las estaciones internas se evidenció un proceso de adición.

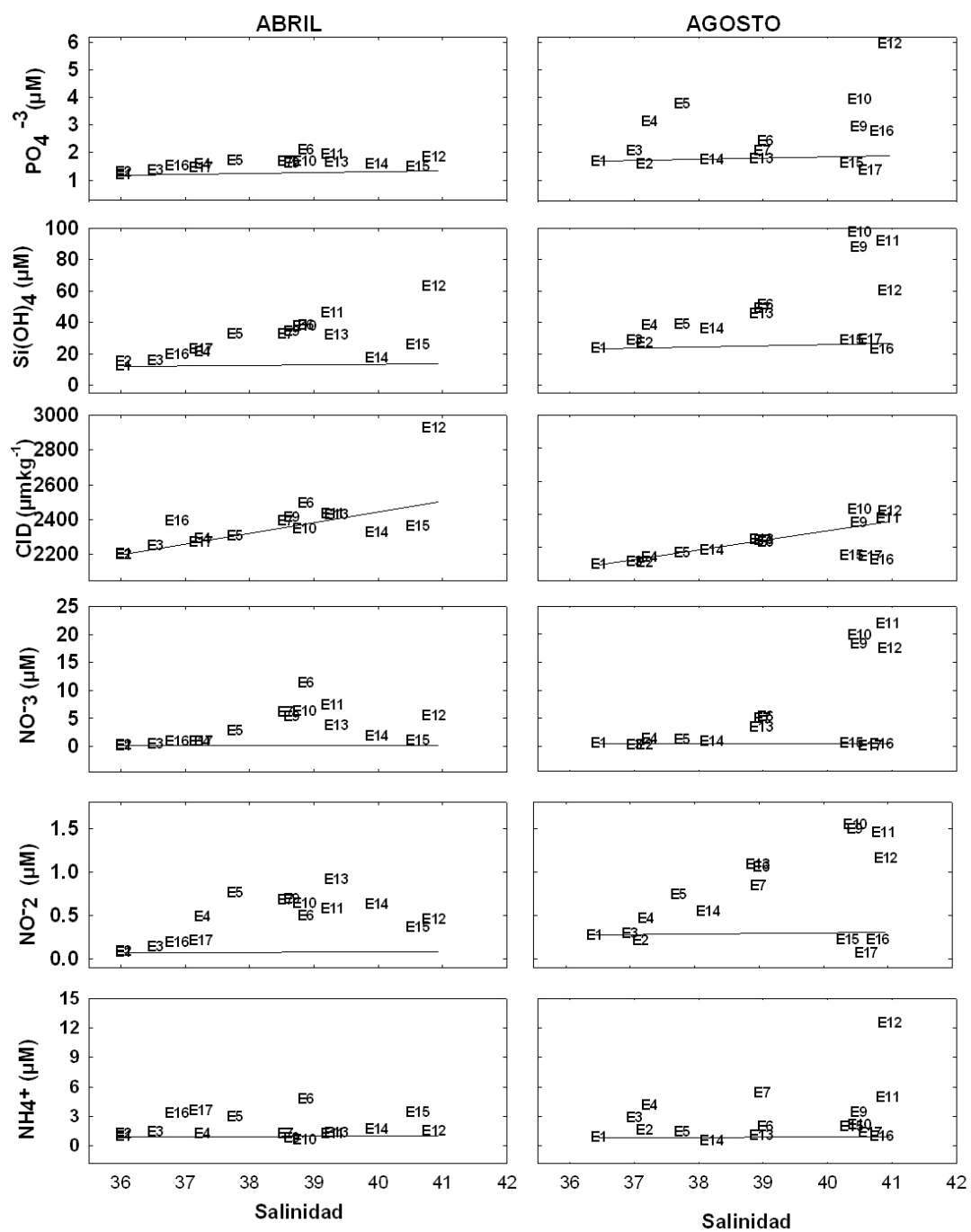


Figura 32. Diagramas de mezcla de fosfatos, silicatos, carbono inorgánico disuelto y compuestos nitrogenados para abril y agosto.

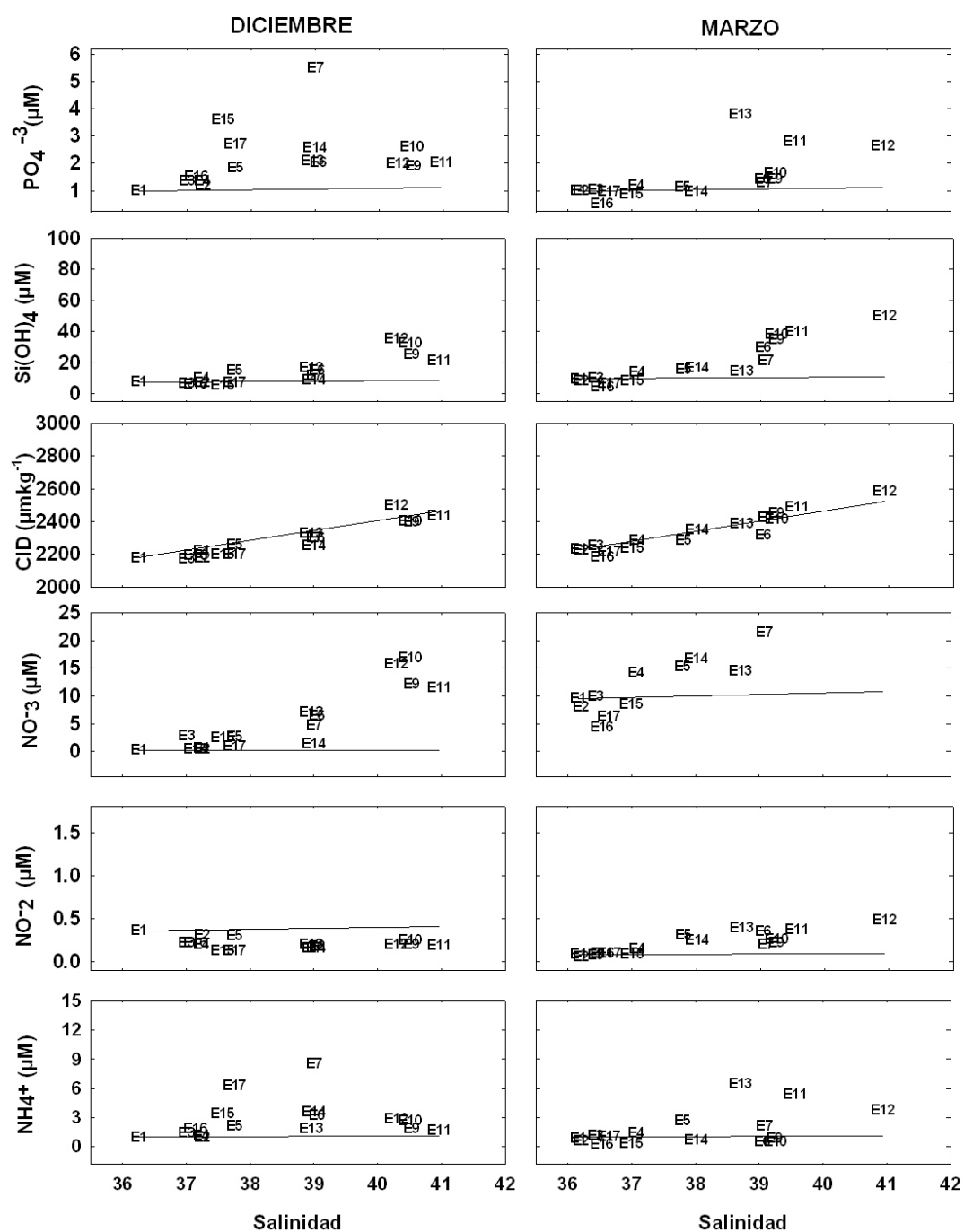


Figura 33. Diagramas de mezcla de fosfatos, silicatos, carbono inorgánico disuelto, compuestos nitrogenados para diciembre y marzo.

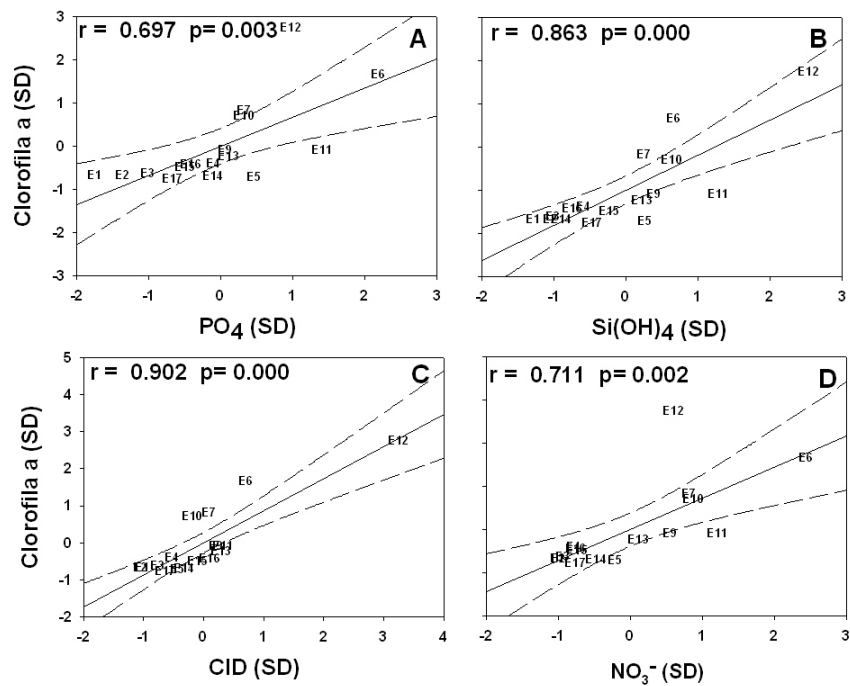


Figura 34. Análisis de correlación entre Clorofila y nutrientes en el mes de abril en desviaciones estándar: (A) fosfato. (B) silicato (C) carbono inorgánico disuelto (D) nitrato. Las líneas punteadas denotan el rango del intervalo de confianza del 95%.

Para el mes de diciembre solo las estaciones 2 y 5 presentaron un comportamiento conservativo, el resto de las estaciones se encontraron por debajo de la línea de mezcla; mientras que para marzo el proceso que dominó el sistema fue la adición y un comportamiento conservativo para las estaciones oceánicas (Figuras 32 y 33). El nitrito no presentó relación significativa con la clorofila en ninguno de los meses.

El diagrama de mezcla para el amonio indica que hubo procesos de adición a la columna de agua durante casi todo el periodo estudiado, para el mes de abril se encontraron las estaciones 5, 6 y las oceánicas de la costa

de Baja California por encima de la línea teórica de mezcla, las otras estaciones presentaron un comportamiento conservativo (Figura 32).

En el mes de agosto las estaciones 1,2 y 5 de Sonora y todas las de la costa de Baja California presentaron un comportamiento conservativo; las estaciones del río e internas de la costa de Sonora se encontraron por encima de la línea teórica (Figuras 32 y 33).

Para el amonio como en el nitrito no se encontró relación significativa con la clorofila en ninguno de los meses.

Por último el valor de la razón entre nutrientes se obtuvo de la pendiente de la regresión lineal y se determinó tanto por el intercepto como por el valor de la pendiente el nutriente limitante. Todas las razones presentaron un comportamiento directamente proporcional.

Las razones DIN:PO₄ , se encontraron cerca de una razón redfiliana para el mes de abril, con una pendiente de 14.9, para los otros meses las razones fueron menores con razones de 4.25:1, 0.55:1 y 4.50:1 (Tabla 3), de acuerdo a Justic et al., (1995) las razones DIN: PO₄ < 10 indican que existe una limitación por nitrógeno inorgánico disuelto (Figura 36). Analizando el intercepto de la gráfica para abril (A), agosto (B) y marzo (D) el nutriente limitante es el DIN debido al intercepto negativo en el eje de la "Y". Mientras que para diciembre (C) el fósforo es el nutriente limitante. En general se puede decir que para invierno el fósforo se agota más rápidamente que el DIN, mientras que para los meses más cálidos el DIN se agota más rápidamente.

Esta limitación por los compuestos nitrogenados también es posible identificarlo por el intercepto para la razón $\text{Si(OH)}_4:\text{DIN}$ (Figura 35) donde se encontró esta condición para todos los meses del año y por las razones $\text{Si(OH)}_4:\text{DIN} > 1$ que se encontraron a través de todos los meses, con valores entre 1.75:1 para marzo y 2.69:1 para diciembre (Tabla 3).

Después de encontrar que el nutriente que limita la productividad primaria es el DIN, se evidenció por medio de la razón $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ que para el mes de abril el nutriente que se acaba después del DIN es el fósforo (de acuerdo a lo establecido por Justic *et al.*, 1995) con valor mayor de $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ a 22 (Tabla 3). Para los otros meses el sílice se acaba después del DIN $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4 < 10$ (Figura 38).

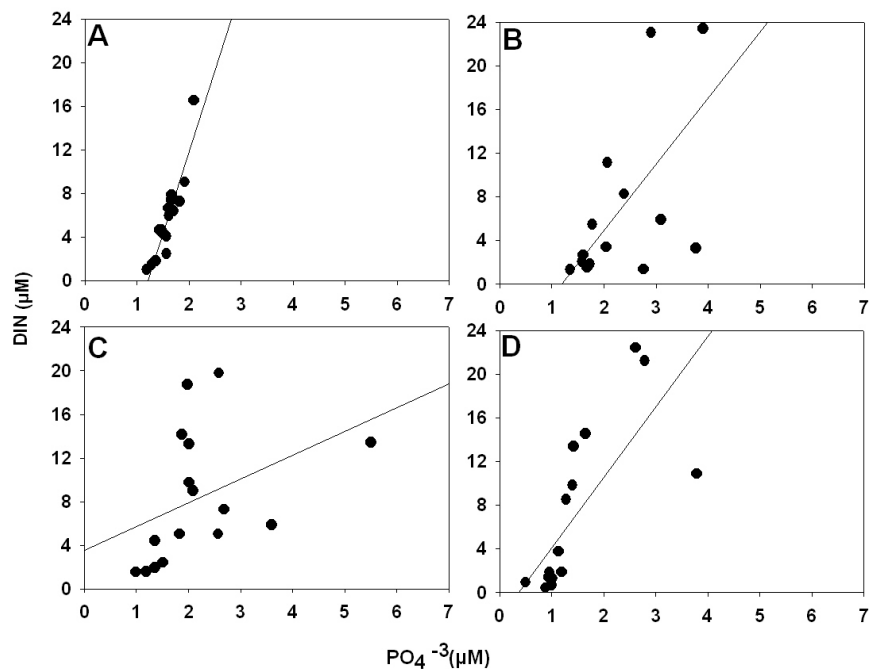


Figura 35. Razones de nutrientes $\text{DIN}:\text{PO}_4$: (A) Abril, (B) Agosto, (C) Diciembre y (D) Marzo.

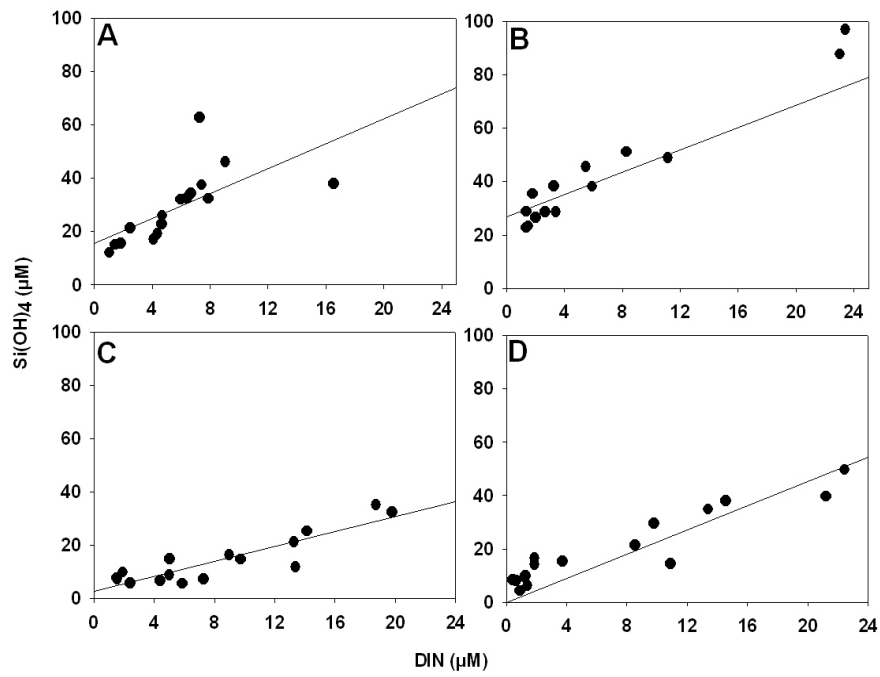


Figura 36. Razones de nutrientes Si(OH)_4 :DIN : (A) Abril, (B) Agosto, (C) Diciembre y (D) Marzo.

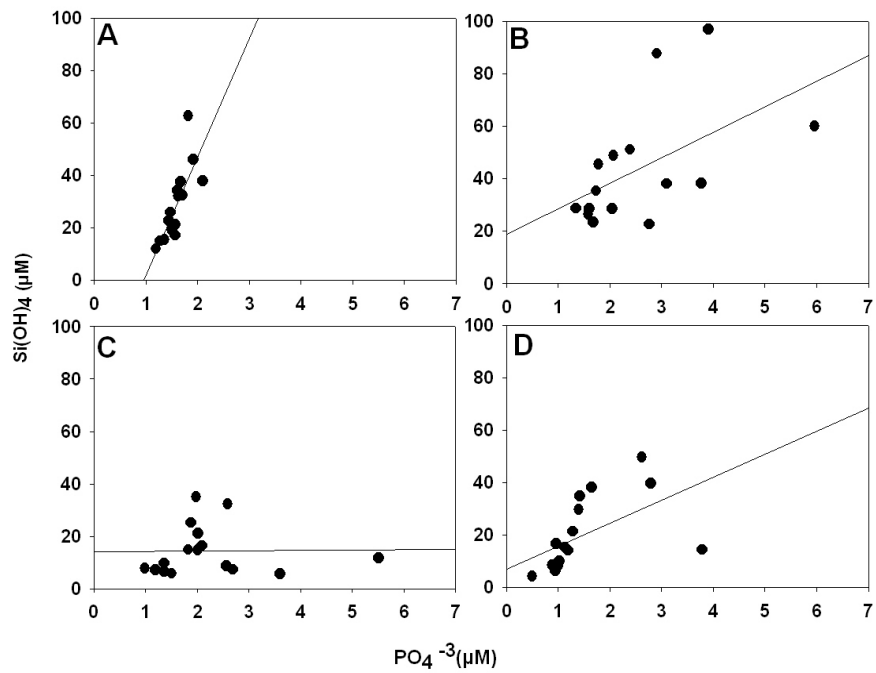


Figura 37. Razones de nutrientes Si(OH)_4 : PO_4^{3-} : (A) Abril, (B) Agosto, (C) Diciembre y (D) Marzo.

Tabla 3. Razones de nutrientes (Los valores indican el valor de la pendiente).

	DIN: PO₄	Si(OH)₄:DIN	Si(OH)₄: PO₄
Abril	14.9	2.32	43.22
Agosto	4.25	2.09	9.75
Diciembre	0.55	2.69	0.13
Marzo	4.50	1.75	8.77

3.3 Comparaciones entre los tres escenarios de aporte de agua dulce

Con el fin de evidenciar los cambios en la dinámica de los NInD generados por las alteraciones antropogénicas, se analizó la diferencia entre los estudios realizados por Hernández Ayón et al. (1993) en condiciones de aporte solo del Río Hardy, Cupul Magaña (1994) que además incluía el Río Colorado, con el presente estudio donde no se presentó ningún aporte de agua dulce al sistema. Debido a la disponibilidad de datos, se tomó para este análisis el mes de marzo para los tres estudios. Por efectos prácticos los llamaremos de ahora en adelante estudio con Hardy, estudio con ríos y estudio sin ríos. Debido a que en los tres estudios no se estudiaron exactamente las mismas estaciones, se planteó una nueva red de estaciones para este análisis como se puede identificar en la figura 38.

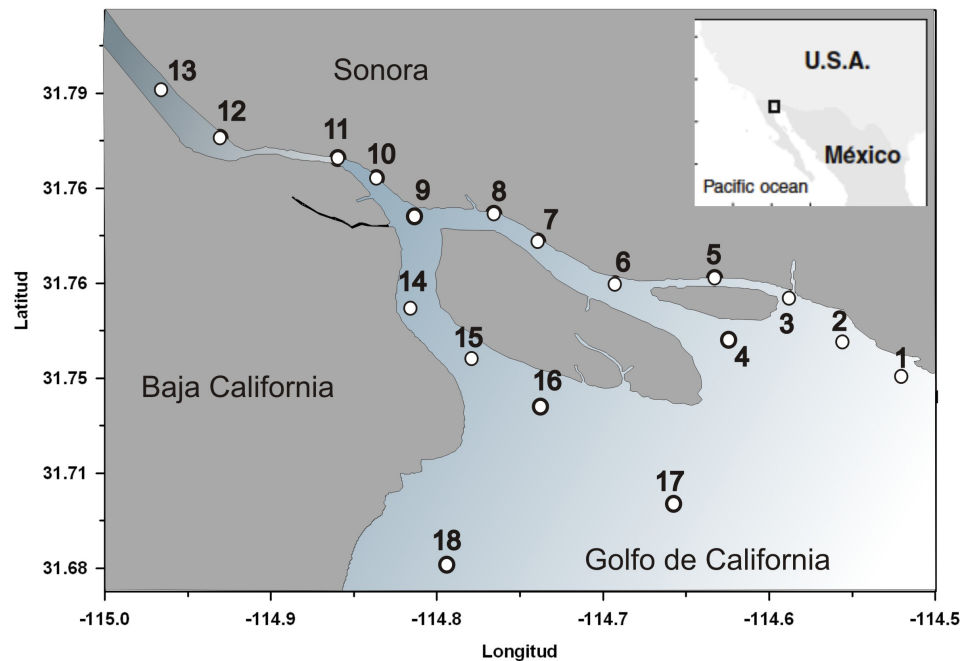


Figura 38. Estaciones de muestreo uniendo los estudios realizados bajo los tres escenarios de aporte de agua dulce.

La salinidad presentó notables diferencias entre el estudio con ríos y el estudio con Hardy y el actual, donde es evidente el aporte de agua dulce por parte del río Colorado con una disminución hasta de 40 unidades de salinidad en la boca del estuario (Figura 39). En la costa de Sonora y Baja California para los estudios con Hardy y el actual se ve un aumento de la salinidad al llegar más cerca al estuario, contrario a lo encontrado en el estudio con ríos. En promedio el estudio con ríos presentó una salinidad a través de las estaciones de 11.43, mientras que el estudio con Hardy y el actual de 38.51 y 36.44 respectivamente (Figura 40).

De acuerdo al análisis estadístico correspondiente se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas en la salinidad de los tres estudios, pero no se presentaron diferencias significativas entre el estudio con Hardy y el actual. Al realizar el análisis por zonas se encontró que para

la zona del río si se presentaron diferencias significativas entre el estudio con Hardy y el actual.

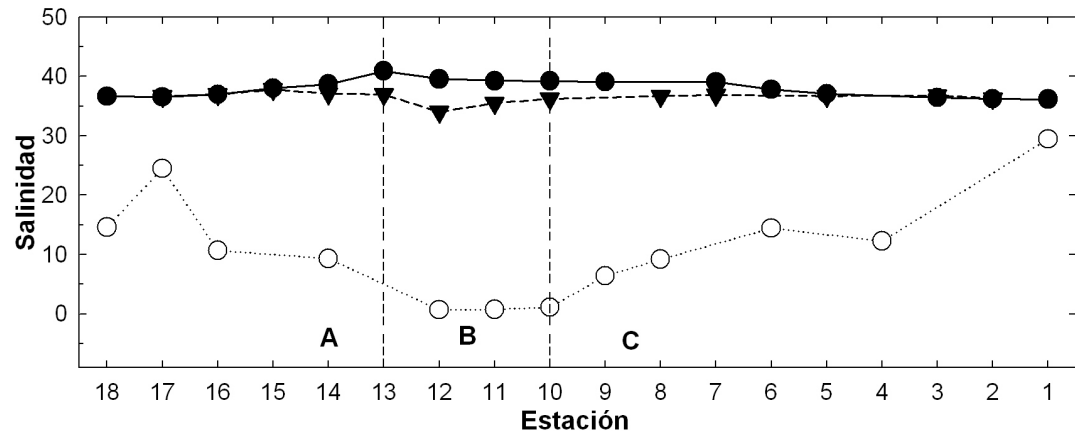


Figura 39. Salinidad bajo los tres escenarios: ---▼--- con Hardy,○..... con ríos, —●— actual.

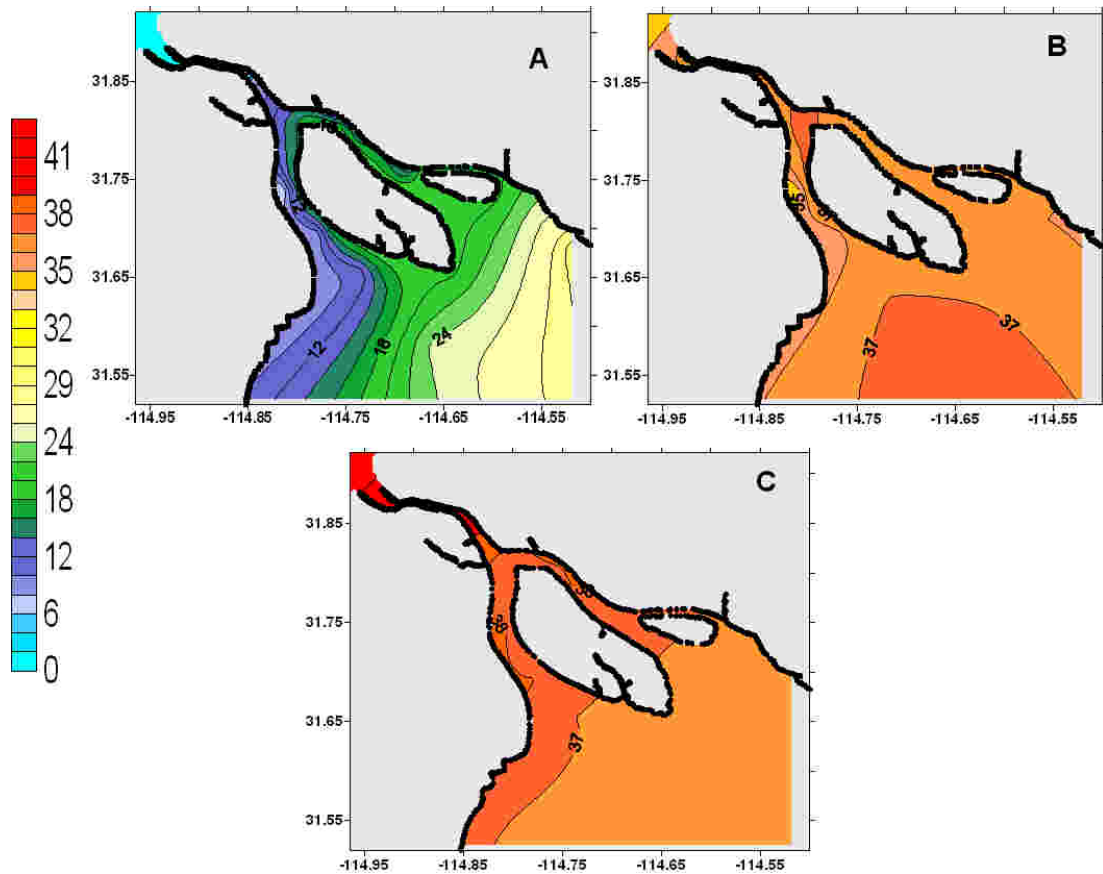


Figura 40. Variación espacial de la salinidad bajo los tres escenarios: (A) con ríos, (B) con Hardy y (C) actual.

En cuanto a los nitratos para los tres estudios se evidenció un comportamiento de incremento hacia la zona del río, con las mayores concentraciones en esta zona en el estudio con Hardy y en las costas de Baja California y Sonora en el estudio con ríos.

Las concentraciones de nitratos en el estudio con Hardy, presentaron un máximo en la estación 11 con valor superior a los 40 μ M, para las dos costas se presentó un incremento desde la estación 7 hasta la 11 y de la 16 a la 13 con un pico en la 15 (Figura 41).

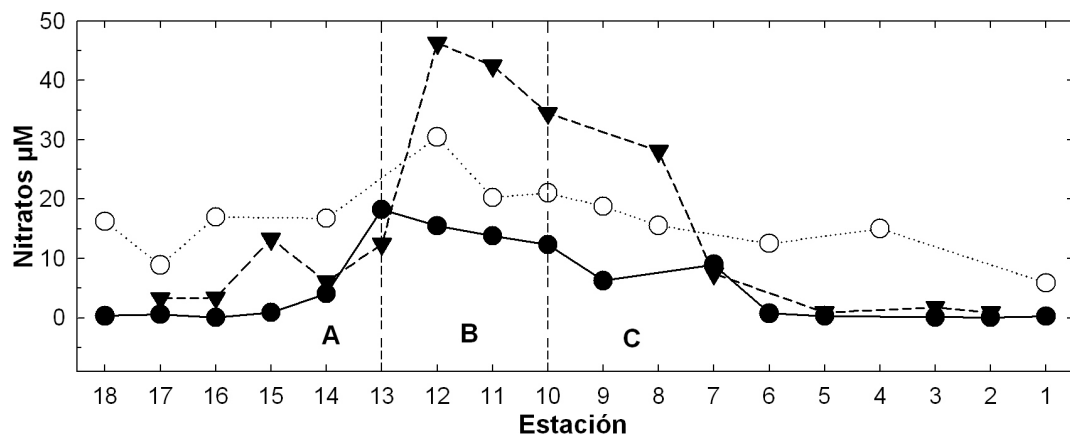


Figura 41. Concentración de nitratos bajo los tres escenarios: ---▼--- con Hardy,○..... con ríos, —●— actual.

Las concentraciones de nitratos para el estudio con ríos fueron mayores en las dos costas que en los estudios con Hardy y actual (Figura 42), pero el estudio con Hardy presenta los mayores valores en la región interna, de la estación 8 a la 12. En general es notable la disminución de las concentraciones en el escenario sin aporte de agua dulce del Río Colorado y del Río Hardy (estudio actual).

De acuerdo al análisis estadístico efectuado a los resultados de las estaciones que coincidían en los 3 estudios, el estudio con Hardy se comportó de forma similar en las costas de Baja California y Sonora a el estudio actual, mientras que el estudio con ríos y el actual no presentaron diferencias significativas en la zona del río.

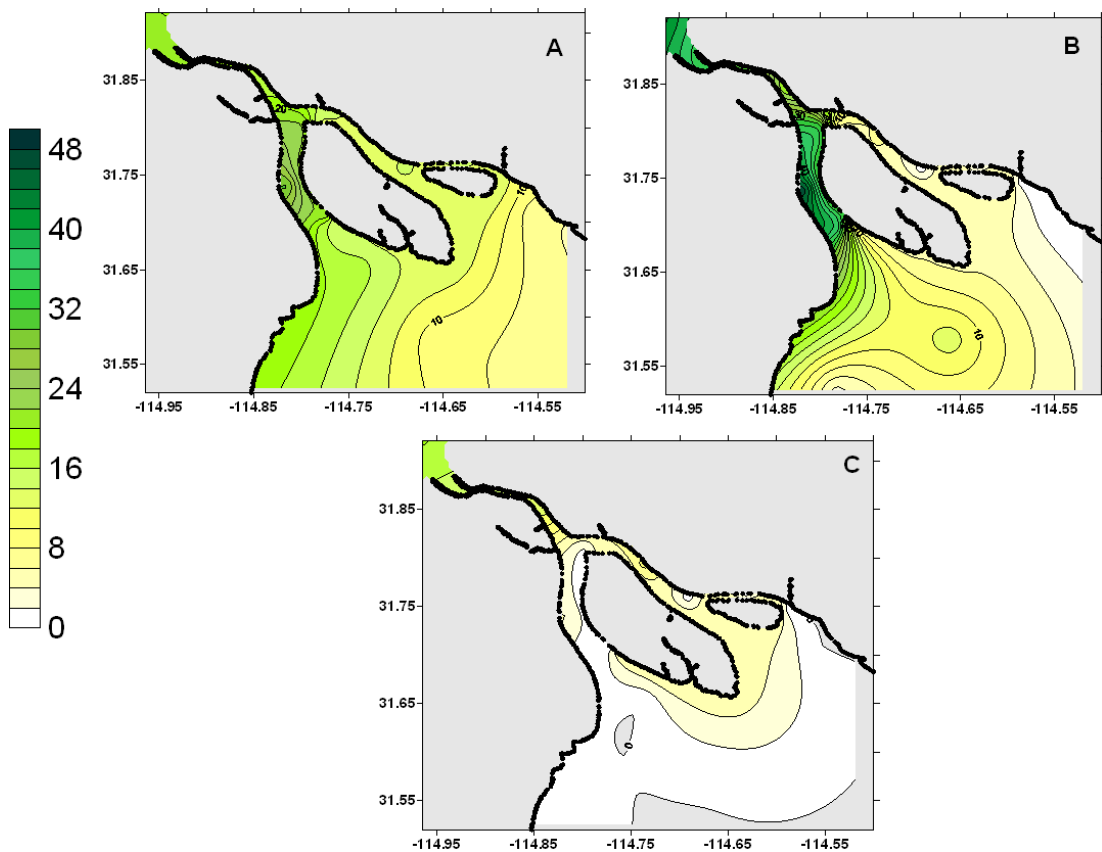


Figura 42. Variación espacial de los nitratos bajo los tres escenarios: (A) con ríos, (B) con Hardy y (C) actual.

En las concentraciones de nitritos es evidente como el aporte de agua dulce en el estudio con ríos presentó las mayores concentraciones de nitritos. En los nitritos no se encontró un comportamiento similar a los otros nutrientes con un incremento hacia la zona del río (Figura 43).

Como se mencionó anteriormente las mayores concentraciones corresponden al estudio con ríos, seguido por el estudio con Hardy y el actual, con promedios de 1.96 μM , 0.85 μM y 0.22 μM respectivamente. El análisis estadístico muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los estudios con Hardy y el actual y entre el con ríos y el actual, pero si existen entre el estudio con Hardy y con ríos.

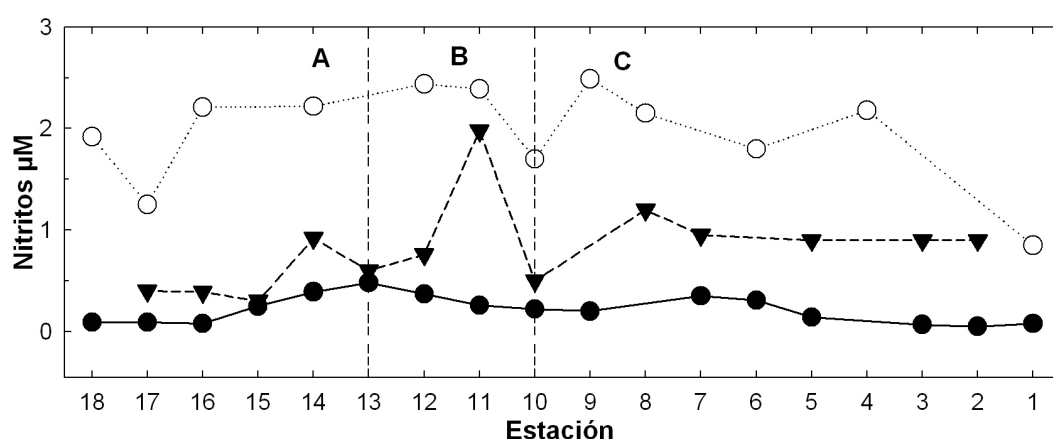


Figura 43. Concentración de nitritos bajo los tres escenarios: ---▼--- con Hardy,○..... con ríos, —●— actual.

En el estudio con ríos el máximo de Nitritos disueltos fue de 2.5 μM en la estación 9, y la mínima de 0.85 μM se encontró en la en la estación 1 (Figura 44C). En el área correspondiente al Río (C) las concentraciones de nitritos aumentaron al acercarse a la zona más interna, con un máximo de 2.44 μM en la estación 12, posteriormente en la costa de Baja California disminuyeron a valores de 1.25 μM hasta la estación 17 y aumentaron en la 18 valor de 1.92 μM (Figura 43).

Para el escenario del estudio con Hardy, las concentraciones de nitritos fueron menores que en el estudio con ríos, pero mayores que en el

estudio actual. El comportamiento de los nitritos fue similar a los nitratos, con dos máximos en cada costa: en Baja California la estación 14 y en Sonora la estación 8. En cuanto al estudio 3 presentó las menores concentraciones con mínimos de $0.05 \mu\text{M}$ y un máximo de $0.48 \mu\text{M}$ en las estaciones 2 y 13 respectivamente.

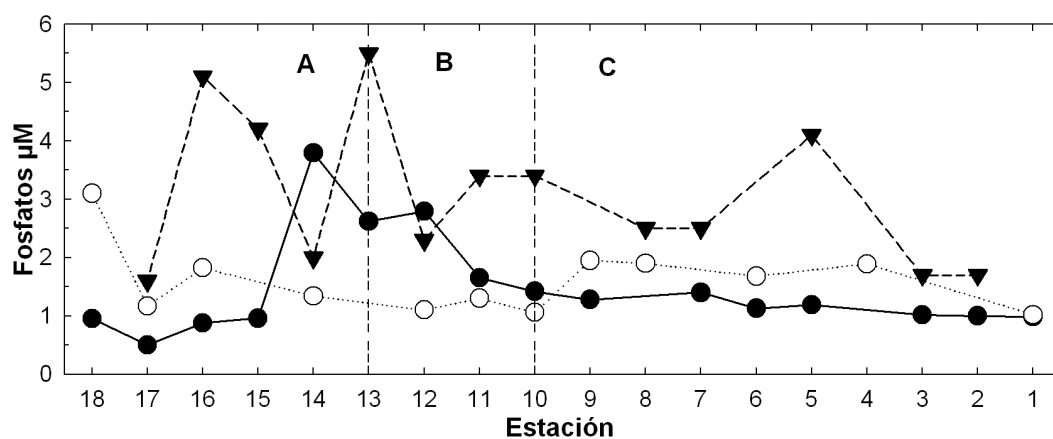


Figura 44. Concentración de fosfatos bajo los tres escenarios: ---▼--- Hernández Ayón,○..... Cupul Magaña, —●— Santa Ríos.

En cuanto a los fosfatos en general se evidenció que las mayores concentraciones se presentaron en el estudio con Hardy, para los otros estudios se presentó un comportamiento similar para las dos costas con mayores concentraciones en las costas en el estudio con ríos y en la zona del río en el estudio actual.

El promedio de la concentración de fosfatos fue mayor para el estudio con Hardy de $3.07 \mu\text{M}$, seguido por el con ríos de $1.61 \mu\text{M}$ y el 3 de $1.47 \mu\text{M}$. De acuerdo al análisis estadístico los estudios con ríos y el actual no presentan diferencias estadísticamente significativas en las costas de Sonora y Baja California.

La concentración de fosfatos en la costa de Sonora (zona C) fue similar entre los estudios con ríos y el actual, con menores valores en el estudio actual, seguido por el con ríos y el mayor en el con Hardy con un máximo en la estación 5 (Figura 44). Al ingresar a la zona (B) las concentraciones de fosfatos son mayores en los estudio con Hardy y el actual que en el con ríos, siendo el estudio con Hardy el que presentó valores más altos que los otros dos; el mayor valor dentro del área del río (zona B) se presentó para el estudio con Hardy en la estación 13 ($5.5 \mu\text{M}$), el estudio con ríos también presentó un máximo en la estación 12 de $2.79 \mu\text{M}$. En la costa de Baja California (zona A) el estudio actual presentó un pico en la estación 14 contrario al estudio con Hardy donde en esta estación se encontró una de las concentraciones más bajas para esta costa, en general en la zona (A) se mantuvo la misma tendencia de mayores concentraciones en el estudio con Hardy y menores en el actual.

En los silicatos se ve notablemente la diferencia entre los 3 estudios, donde en el estudio con ríos los silicatos alcanzan valores mayores a $200 \mu\text{M}$, mientras que para el estudio con Hardy y el actual los mayores valores fueron de $49.7 \mu\text{M}$ y $56 \mu\text{M}$ respectivamente. El promedio para el estudio con ríos fue de $173.6 \mu\text{M}$, el promedio para el estudio con Hardy de $37.41 \mu\text{M}$ y para el estudio actual de $20 \mu\text{M}$ (Figura 45). Entre los estudios con Hardy y el actual no existieron diferencias significativas, mientras que el estudio con ríos presenta diferencias significativas con los otros dos estudios (Figura 46).

En la costa de Baja California (zona A) para los estudios con Hardy y el actual se ve un comportamiento de los silicatos similares, sin presentar

una tendencia clara de incrementos o decrementos, mientras que para el estudio con ríos se encontró un mínimo en las estaciones 17 y otro en la 14. En la región B los estudios con ríos y el actual presentan una tendencia de incremento hacia las estaciones más riparias, comportamiento seguido por el estudio con Hardy pero con una disminución en la estación 13. En la zona C para el estudio con ríos es notable dos puntos altos en las estaciones 4 y 6 con valores entre los 100 y los 270 μM , en el estudio con Hardy se presentó un aumento en la estación 5 y posteriormente una disminución al acercarse a la zona B; mientras que en el estudio actual se evidenció una tendencia de aumento de la estación más oceánica a la estación más cercana al río (Figuras 45 y 46).

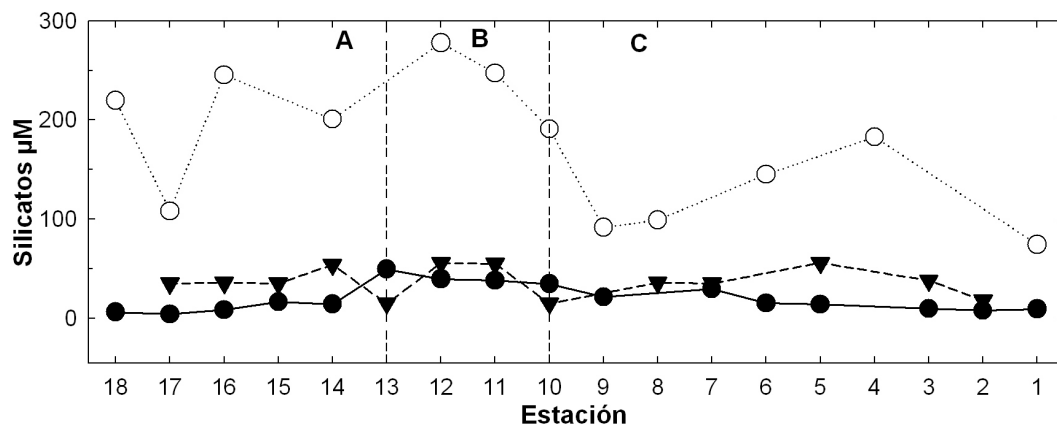


Figura 45. Concentración de silicatos bajo los tres escenarios: ---▼--- Hernández Ayón,○..... Cupul Magaña, —●— Santa Ríos.

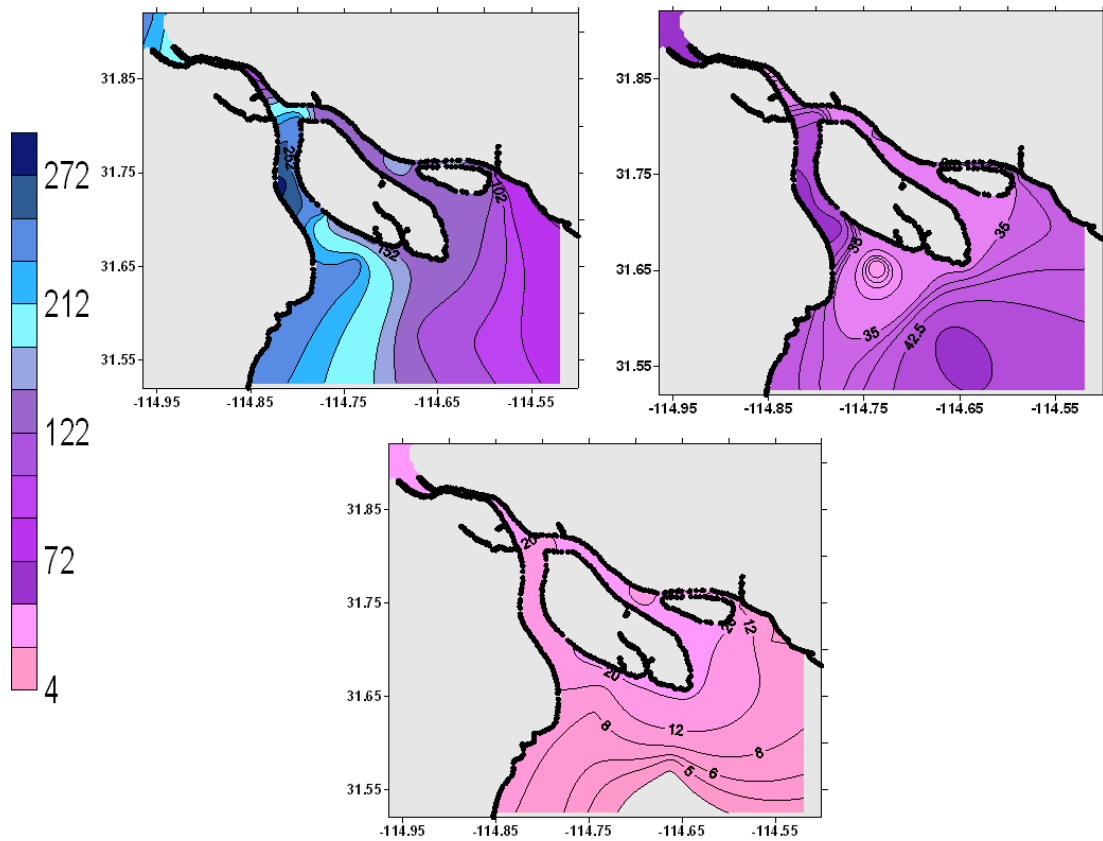


Figura 46. Variación espacial de la salinidad bajo los tres escenarios: (A) con ríos, (B) con Hardy y (C) actual.

3.3.1 Análisis de los diagramas de mezcla

Al igual que para el análisis realizado para los datos generados en el presente estudio de la influencia de los procesos biológicos en las concentraciones de nutrientes, para las comparaciones se realizaron los diagramas de mezcla (Figura 47) y el análisis de la razones entre nutrientes (Tabla 4, Figura 48).

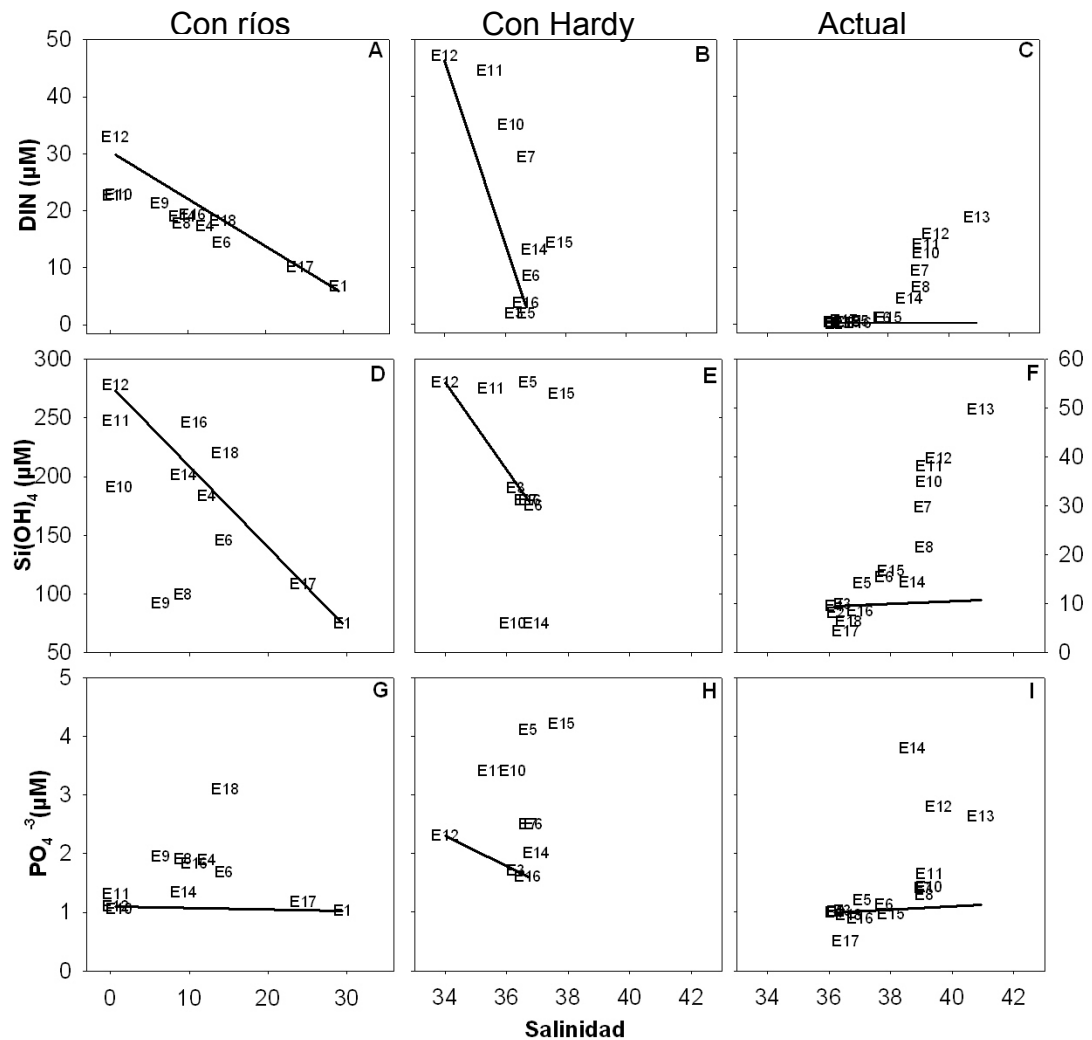


Figura 47. Diagramas de mezcla bajo los tres escenarios: Hernández Ayón *et al.*, 1993 (B,E,H), Cupul Magaña, 1994 (A,D,G), Santa Ríos (C,F,I). La escala de los silicatos para el estudio de Hernández Ayón *et al.*, 1993 y de Santa Ríos (figuras (E y F) se presenta a mano derecha debido a la gran diferencia entre los valores con el estudio de Cupul Magaña).

En la figura 48 se presentan los diferentes diagramas de mezcla de acuerdo a los tres escenarios estudiados, inicialmente es necesario aclarar que se mantuvo en la mayoría la misma escala para comparar los tres escenarios, la excepción fue en los silicatos para el estudio con ríos (figura 47 D).

En general se puede evidenciar para el DIN que en el estudio con ríos (Figura 47 A) existen procesos de remoción de la columna de agua a lo largo del estuario lo que podría indicar un consumo del DIN que ingresa por el río. Sin embargo para las estaciones oceánicas de la costa de Baja California se evidencia un comportamiento conservativo. Para el estudio con Hardy se evidencia una clara adición a la columna de agua en las estaciones internas y al igual que para el escenario con ríos un comportamiento conservativo en las estaciones oceánicas de la costa de baja California. (Figuras 47 B). En cuanto al estudio actual, se evidencia al igual que en el estudio con Hardy una adición en las estaciones internas, pero un comportamiento conservativo en las estaciones oceánicas de las dos costas (Figura 47 C).

Para los silicatos es evidente la diferencia en las concentraciones presentes en los 3 estudios y la importancia del aporte de este nutriente por el río, en el estudio con ríos (Figura 47 D) la mayoría del silicato que ingresa al sistema es removido de la columna de agua, solo se evidencia una adición para las estaciones 16 y 18 que se localizan en el sur de la costa de BC. Para el estudio con Hardy se evidencia un comportamiento conservativo en algunas de las estaciones, una remoción para las estaciones 10 y 14 y una adición en las 5,11 y 15 (Figura 47 E). En el último estudio se evidencia como los procesos de adición del nutriente a la columna de agua prevalecen en el sistema hasta llegar a la zona sur de la costa de BC, donde se presentan procesos de remoción del nutriente (Figura 47 F).

Por último, para los fosfatos en los tres muestreos se evidencia que los procesos de adición son mayores que los de remoción, para el estudio

con ríos las estaciones del río y las más oceánicas de las dos costas, presentaron un comportamiento conservativo, las otras estaciones mostraron procesos de adición (Figura 47 G). En el estudio con Hardy las estaciones 3, 12 y 16 presentaron un comportamiento conservativo y las otras una adición a la columna de agua (Figura 47 H) y por último en el estudio actual se evidenció una adición en las estaciones internas, remoción en la estación 17 y un proceso conservativo en las estaciones de la costa de Sonora de la 1 a la 6 y de la de Baja California de la 15 a la 16 (Figura 47 I).

Las razones de nutrientes para los tres escenarios se encontraron menores a lo establecido por Redfield *et al.*, 1963, que establece C:N:Si:P 106:16:16:1 (Figura 48). De acuerdo a los interceptos y a las pendientes se encontró que en los tres estudios existe una limitación por DIN con razones DIN:P <10, al igual se evidenció que el Si es el nutriente que se consume después de acabado el DIN (Tabla 4).

Tabla 4. Razones de nutrientes de los 3 escenarios

Estudio	DIN: PO ₄	Si(OH) ₄ :DIN	Si(OH) ₄ : PO ₄
1	3	0.12	6.92
2	0.20	7.48	7.74
3	4.50	1.75	8.77

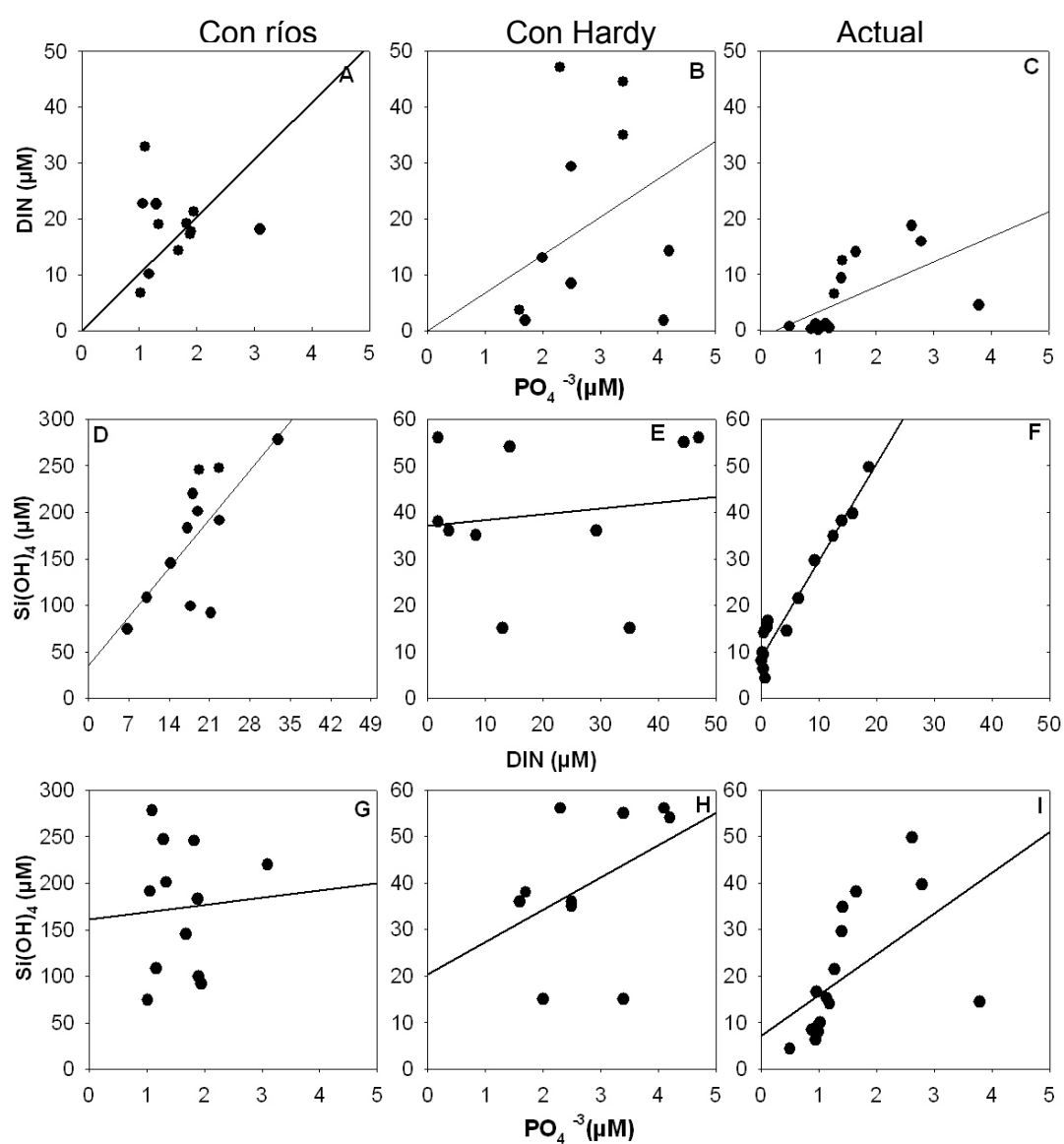


Figura 48. Razones de nutrientes para los tres escenarios: Con Hardy (B,E,H), con ríos (A,D,G), actual (C,F,I).

3.3 Río Hardy

Para el análisis de nutrientes en el Río Hardy se realizaron dos muestreos, el primero en el mes de diciembre 2009 y el segundo en marzo 2010, estos datos se unieron con valores tomados anteriormente en el Río Hardy por parte de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) y un estudio privado por García Hernández *et al.*, 2009. El orden de las estaciones (Figura 5) sigue el curso del río, desde la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Las Arenitas (estación 1) hasta la zona de Campo Ramona cerca al proyecto del Tapón. Es importante mencionar que no en todas las gráficas se encuentran todas las estaciones debido a la disponibilidad de los datos, pero se presenta una gama de colores uniforme en las gráficas, con el fin de hacer más fácil el análisis.

Para el caso de la temperatura en el Río Hardy (Figura 49) se muestra un patrón estacional con las menores temperaturas en enero–febrero y un aumento gradual hasta agosto. La menor temperatura se encontró en enero de 2010 (14.5 °C) y la mayor en julio de 2009 (36°C).

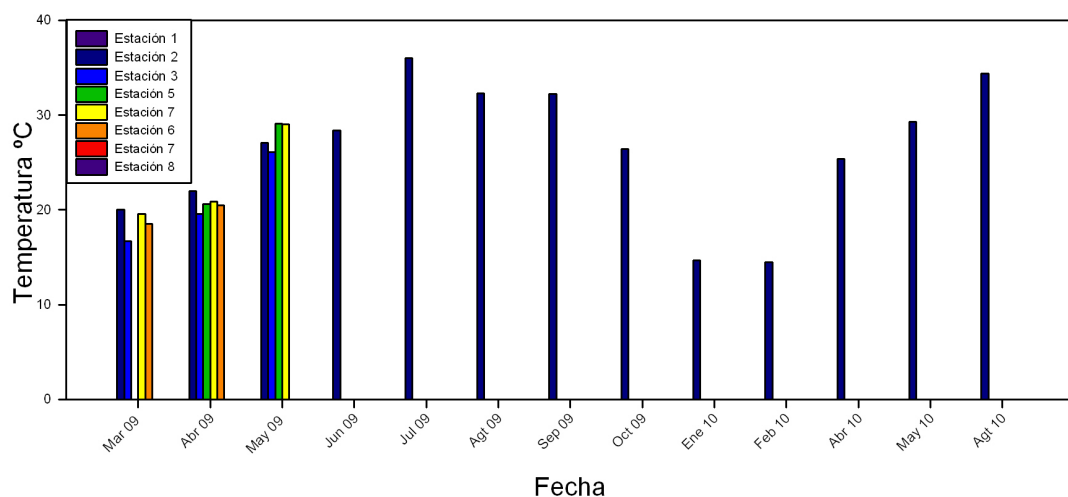


Figura 49. Temperatura Río Hardy (Datos tomados de (CESPM))

Los valores de nitratos fueron tomados de García Hernández *et al.*, 2009 y de los generados durante el presente estudio, se evidenció una gran variabilidad entre los meses y las estaciones, las gráficas se dividieron en antes de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) y después de la PTAR. En general los valores de nitratos fueron mayores después de la construcción de la PTAR y mantuvieron un constante decremento en el transcurso del RH.

En el 2006 antes de la PTAR las concentraciones de nitratos alcanzaron valores máximos de 24.19µM en Campo Muñoz y mínimos de 1.61µM en campo Mosqueda; es evidente el cambio estacional, donde los mayores valores en cada una de las estaciones fue mayor en el verano (mayo, junio y julio). Campo Muñoz (estación 7) y Campo Ramona (estación 8) presentaron mayores concentraciones que Campo Mosqueda (estación 5) pero no se mantuvo un patrón durante este año.

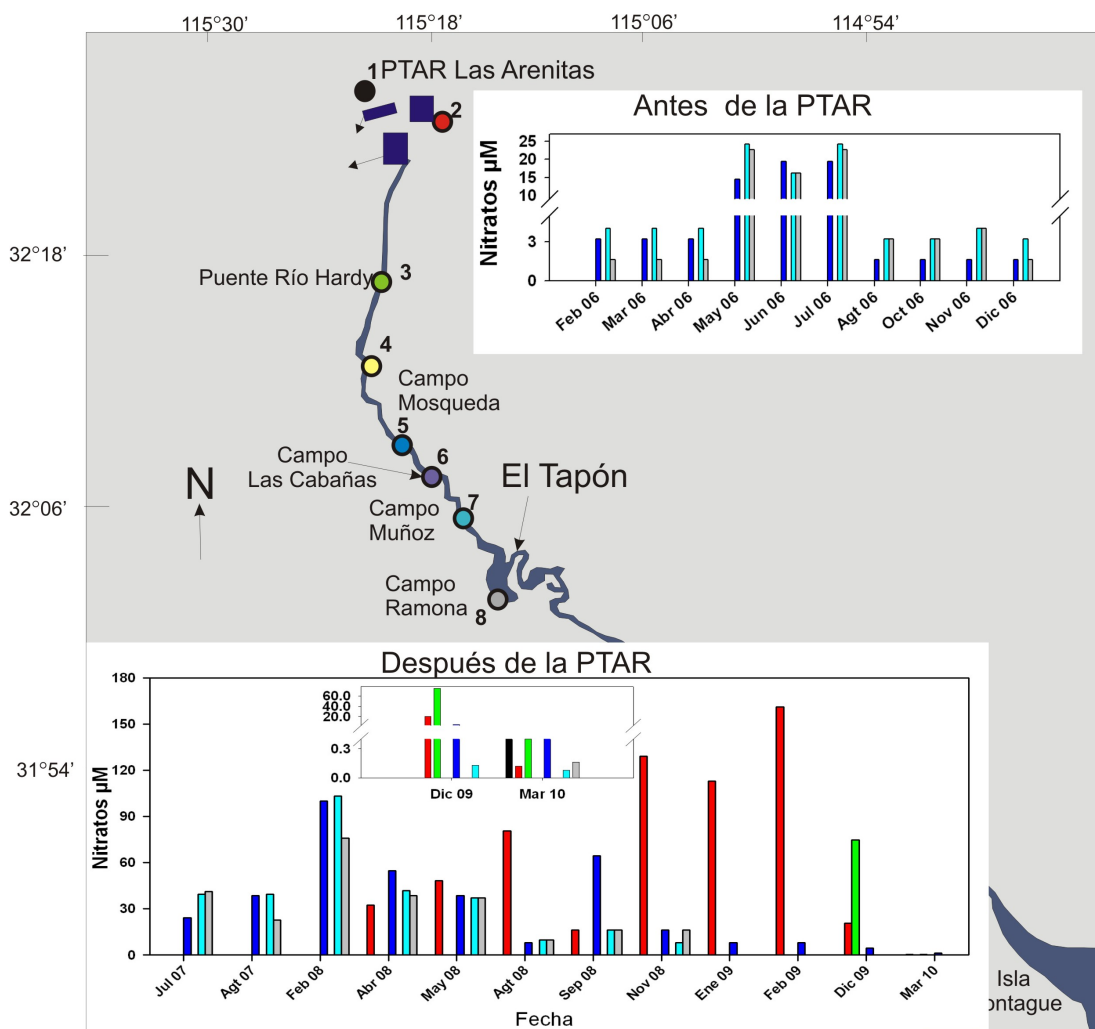


Figura 50. Concentración histórica de nitratos en el Río Hardy. Cada una de las estaciones dentro del mapa tiene los colores que se representan en las gráficas. Fuente: García Hernández *et al.*, 2009 y los generados durante el presente estudio

Para julio 2007 a febrero 2009 se encontró una gran variabilidad, llegando a valores de hasta 161 µM. En Campo Mosqueda (estación 5) se puede ver un patrón de máximos y mínimos por épocas, pero sin ser consistente a través de los años y por estaciones, el mismo comportamiento se encuentra para Campo Muñoz. Las concentraciones de salida de la planta (estación 2) variaron a través del tiempo, llegando a valores máximos

de 161 μM en febrero de 2009 y mínimo de 0.12 μM en marzo de 2010, el promedio para esta estación fue de 66.82 μM .

La estación 3 (puente Río Hardy) presentó mayores concentraciones que los de la salida de la planta y la 8 (Campo Ramona) concentraciones similares a las estación 7. Los nitratos presentes desde campo Mosqueda hasta campo Ramona disminuyeron a través del tiempo después de construida la PTAR Las Arenitas.

Las concentraciones de fosfatos a través de las estaciones fueron muy variables en el tiempo como se puede ver en la figura 46. De los fosfatos de entrada a la PTAR (estación 1) el 96% son removidos (estación 2) para marzo de 2010. La estación 2 no mantiene un patrón estacional, presentó un promedio de 71.7 μM y un mínimo de 0.72 μM en marzo 2010 y un máximo en diciembre 2009. La estación 3 al igual que la 2 se caracterizó por concentraciones altas de fosfatos (promedio de 70.17 μM) pero no muestran un patrón en el tiempo. Para las estaciones 4,6,8 no se cuenta con muchas muestras, los promedios para estos fueron de 1.89 μM , 6.60 μM y 6.62 μM respectivamente.

En general debido a la dispersión de los datos no es posible ver un comportamiento estacional para las estaciones de muestreo. La estación 5 campo Mosqueda presentó valores muy bajos de hasta 0.08 μM en mayo de 2009, hasta de 26.32 μM en febrero del mismo año. En Campo Muñoz (estación 7) el promedio (11.44 μM) fue el mayor de las estaciones que se encuentran después del puente Río Hardy (estación 3). El máximo para

Campo Muñoz fue de $24.2\mu\text{M}$ en febrero de 2008 y el mínimo en diciembre de 2009 ($24.21\mu\text{M}$).

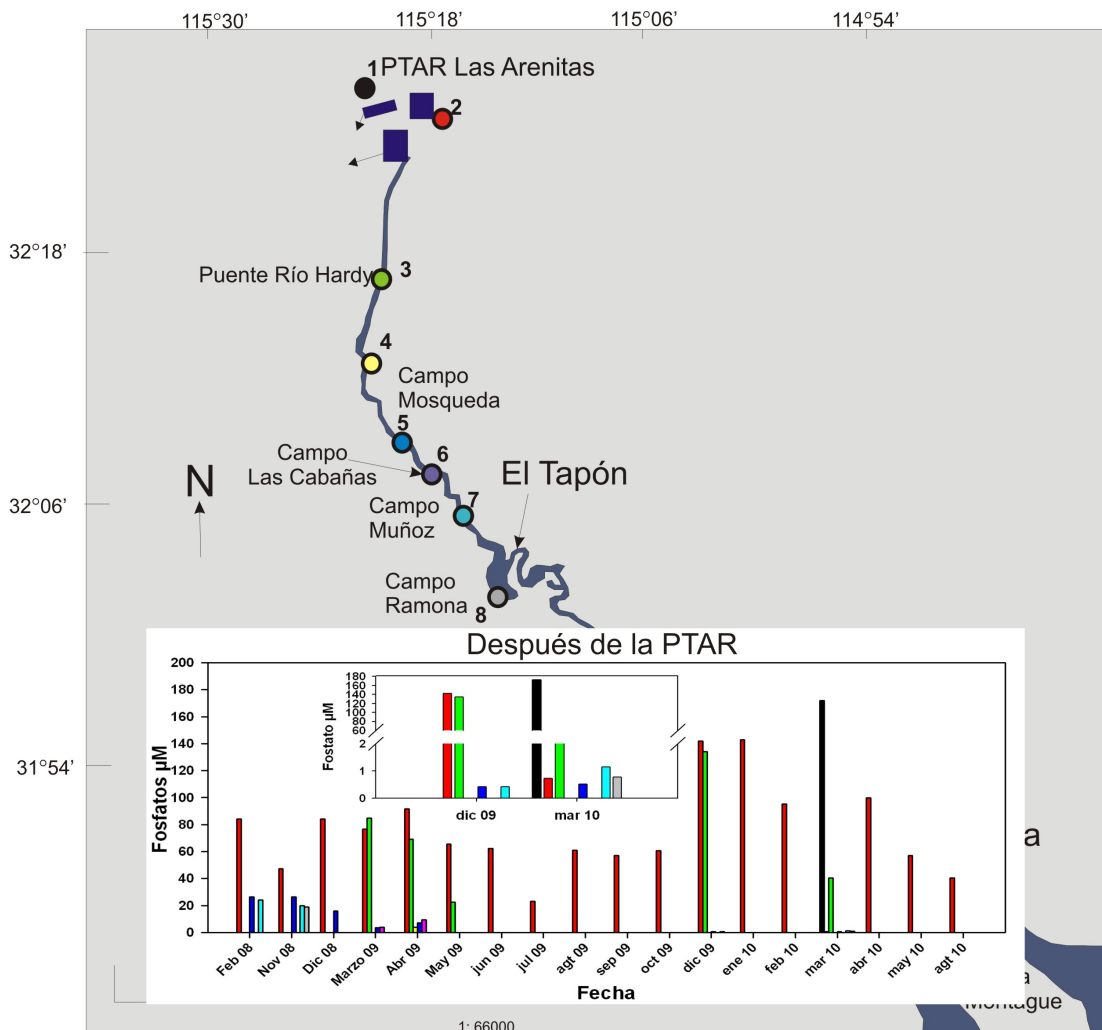


Figura 51. Concentración histórica de fosfatos en el Río Hardy. Fuente: García Hernández *et al.* (2009) y presente estudio

Las concentraciones de amonio presentaron variaciones hasta de 3 órdenes de magnitud, con valores menores a $1\mu\text{M}$ y mayores a $1000\mu\text{M}$. La mayor concentración de amonio se encontró en la estación 1 de entrada a la PTAR con un valor de $2,471\mu\text{M}$ de esto un 35% sale de la planta (estación 2), en esta estación el promedio fue de $513\mu\text{M}$ con un máximo de $1850\mu\text{M}$

en diciembre 2009 y un mínimo de 94.4 μM . Estas altas concentraciones son seguidas por la estación 3 y posteriormente los valores bajan considerablemente al llegar a los Campos Mosqueda, Muñoz y Ramona, con promedios de 9.46 μM , 4.86 μM y 22.8 μM respectivamente (Figura 51).

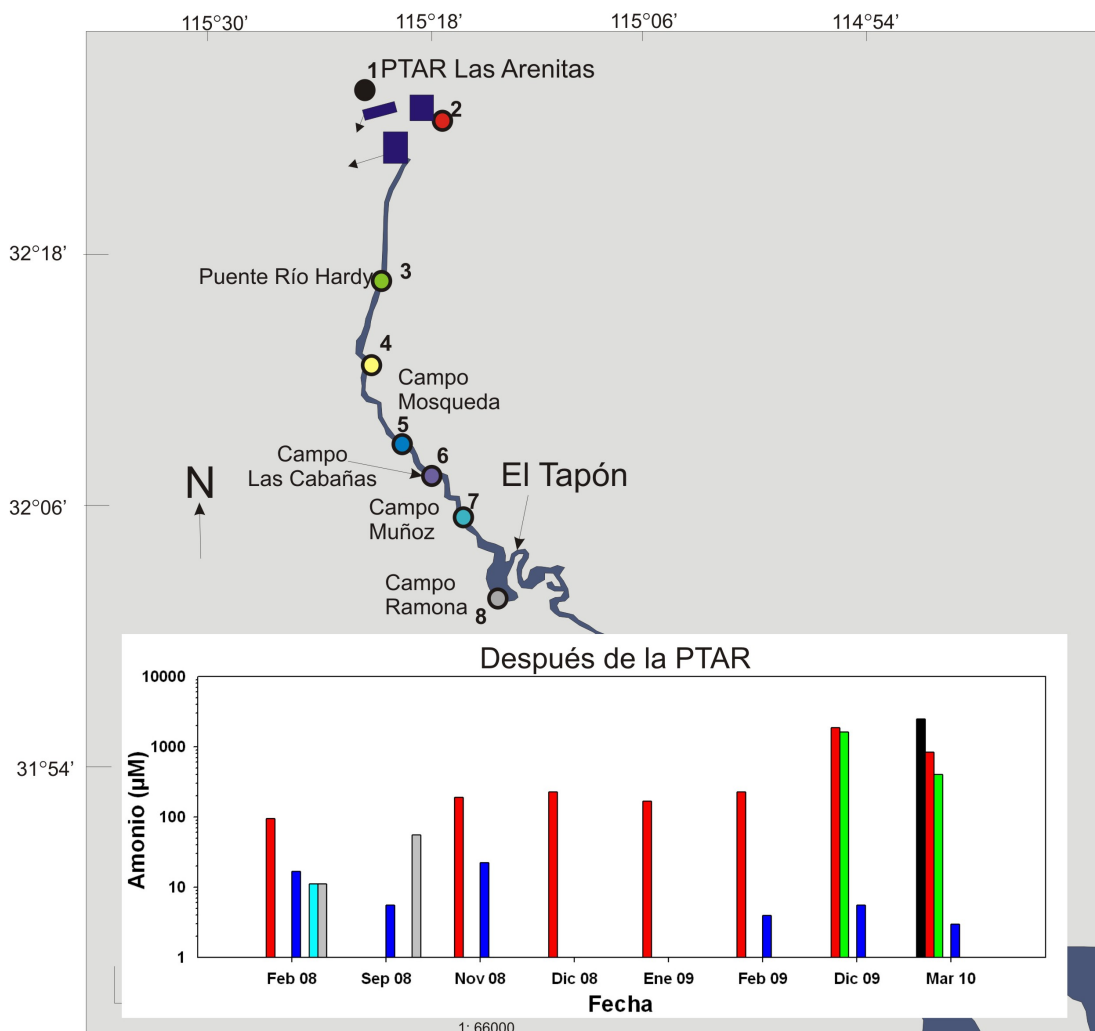


Figura 52. Concentración histórica de amonio en el Río Hardy. Fuente: García Hernández *et al.* (2009) y presente estudio.

Al igual que en los otros nutrientes analizados para el Río Hardy, los silicatos presentan mayores concentraciones en las estaciones 1,2 y 3 y

posteriormente los valores bajan en las estaciones de los campos de recreación (Campo Ramona y Campo Mosqueda) (Figura 53).

El promedio para diciembre y marzo fue de 212 μ M, la mayor concentración se encontró al igual que en los otros nutrientes en la entrada de la PTAR en marzo de 2010 para una posterior disminución en la estación 2, los valores para esta estación se mantuvieron entre los 200 y 300 μ M, con menor concentración en el mes de marzo.

Para la estación 3 (Puente Río Hardy) la concentración en marzo fue mayor que en la estación 2, pero para diciembre fue menor.

Las estaciones correspondientes a los campos Mosqueda, Muñoz y Ramona presentaron un promedio de 136 μ M, manteniéndose las concentraciones de silicato entre los 130 μ M y 200 μ M.

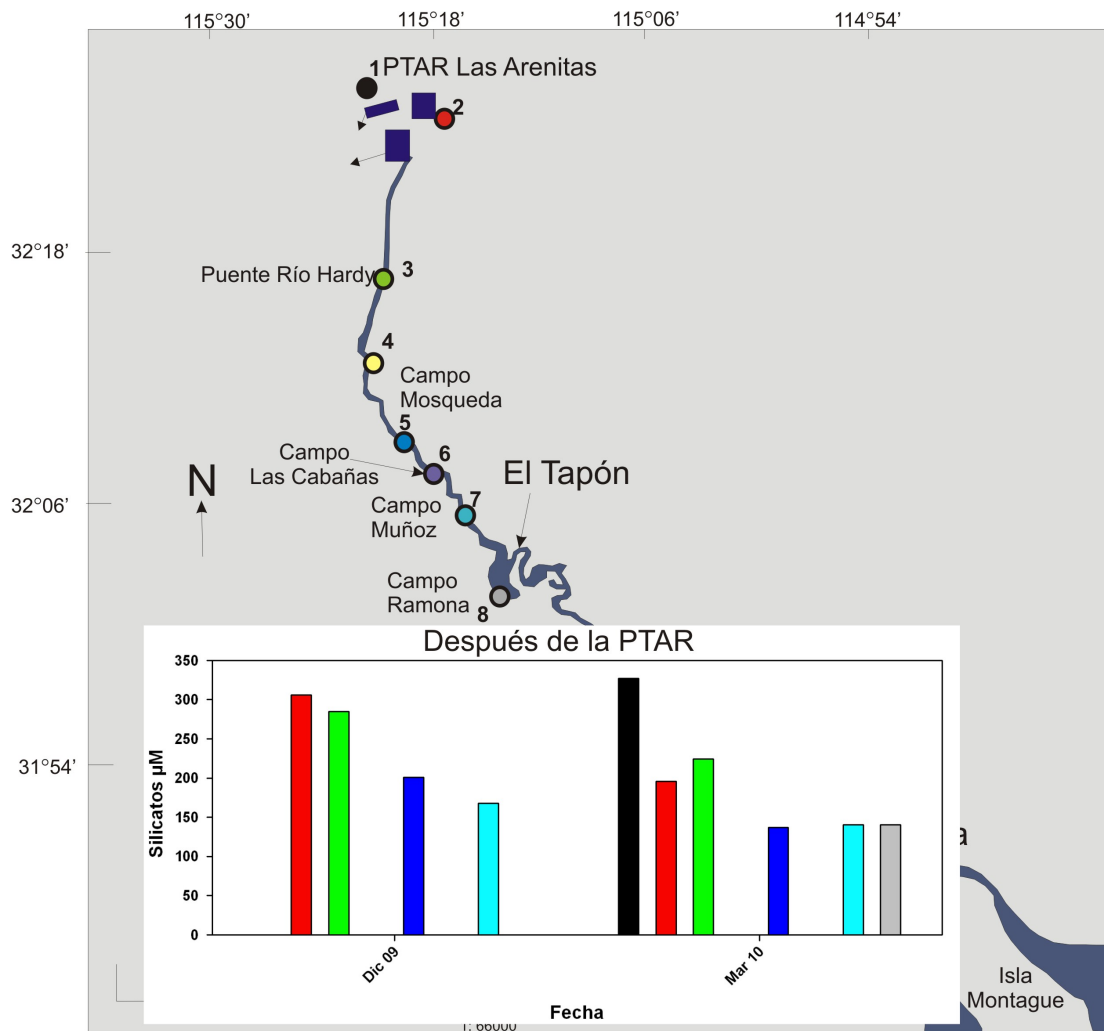


Figura 53. Concentración de silicato en el Río Hardy

4. DISCUSIÓN

4.1 Variabilidad espacio-temporal (2009-2010)

El DRC presentó las características típicas de un estuario hipersalino, con mayores salinidades en la zona más interna, tal como lo estableció Hernández Ayón *et al.*, 1993. El incremento fue constante a través de los meses de estudio, pero los rangos de las concentraciones variaron de acuerdo a la estación climática, las cuales mantuvieron el ciclo estacional reportado por Álvarez Borrego y Galindo Bect, 1974; Martínez Rojas Reynoso, 1990, con menores temperaturas en invierno (15 °C) y mayores en el verano (>30°C).

Dentro de las variaciones hidrológicas durante el periodo de estudio, se encontró que la salinidad mantuvo un patrón constante de menores salinidades en la costa de Sonora y mayores en la de Baja California (BC). Este mismo comportamiento se evidenció para la densidad, la cual fue influenciada claramente por la estación climática (Figura 11), pero mantuvo el patrón de mayores densidades en la costa de BC que en Sonora. Estas altas densidades en BC también las encontraron Lavín *et al.*, 1998, asociadas a aguas generadas en la cabeza del Alto Golfo de California (con altas salinidades), mientras que en Sonora encontraron menores densidades y salinidades. En general en el estudio de Lavín *et al.*, (1998), encontraron al igual que en este estudio las mayores densidades en las temporadas frías (Figura 10) que en las cálidas y un máximo de salinidad en la costa de BC (como se presentó para abril y agosto en las estaciones oceánicas de la costa de BC).

Este patrón de diferencias entre las dos costas fue explicado por el patrón de transporte de los sedimentos encontrado por Álvarez Borrego *et al.*, 1993 y Carriquiry y Sánchez 1999, donde describen que los sedimentos son transportados dentro del DRC ingresando por la costa de Sonora y saliendo por la de BC (Figura 55) manteniendo un sentido anti horario. Este patrón también se puede evidenciar en la distribución de la turbidez la cual es mayor en la costa de Sonora que en la de BC.

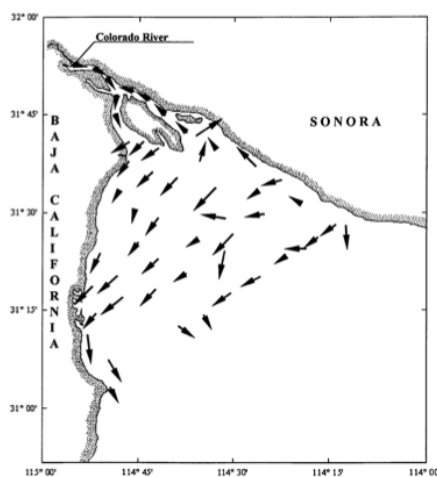


Figura 54. Vectores de transporte de sedimentos (Tomado de Carriquiry y Sanchez 1999)

Los patrones de circulación en el DRC son claves para poder entender la dinámica tanto de las variables hidrológicas, como de los NInD. En el caso inicial de la salinidad, en la figura 15 se evidenció que el valor obtenido se encuentra afectado por las condiciones de la marea en la toma de muestreo y que principalmente responde a una mezcla de dos fuentes de agua: la más salina (> 40 unidades) correspondiente a la zona del río y la menos salina (36 unidades) proveniente del AGC. Lo cual lo evidenciaron

Carriquiry *et al.* (2011) donde encontraron dentro de su serie de tiempo realizada en la boca del canal río, que existe un ciclo en el cual cada 48h durante mareas muertas la cuenca estuarina es dominada por aguas hipersalinas ($S \sim 40$) y mientras la marea progresa a mareas vivas hay un ingreso de aguas del Golfo de California, las cuales son menos salinas.

Este comportamiento es similar a lo reportado para otros estuarios, como Tomales Bay y Mission Bay (Largier *et al.*, 1997) y otros en Australia y Sudafrica (Potter *et al.*, 2010), donde a pesar de que aun existen aportes temporales de agua dulce, en épocas de verano se convierten en estuarios hipersalinos. Para los estuarios de Australia y Sudáfrica se les atribuye esta condición hipersalina al tamaño y profundidad de la boca del estuario, la variabilidad en la intrusión de aguas tanto marinas como rivereñas, aunado a las altas temperaturas durante los largos y secos veranos y otoños (Chuwen *et al.*, 2009), en el caso de los estuarios de clima mediterráneo Largier *et al.* (1997) mencionan cambios en la densidad del agua y un aumento en el tiempo de residencia.

Para el delta del Colorado, se puede plantear la hipótesis que las aguas hipersalinas en las estaciones más altas del canal (>40 unidades) se deben a la combinación de varios factores: inicialmente debido a las altas tasas de evaporación del delta (teniendo en cuenta que el canal del río es más somero la evaporación puede llegar a ser mayor), otro factor que no se encuentra debidamente estudiado, puede ser el aporte de sales por las planicies de inundación, que son cubiertas por el agua marina solo durante periodos de mareas vivas extremas del año, el agua evaporada deposita

grandes cantidades de sales, las cuales regresan al sistema por el lavado en la siguiente marea viva extrema. Este proceso también lo describe Hernández Ayón *et al.*, 1993 como una posible fuente de las altas salinidades y concentraciones de nutrientes.

En general se podría resumir el comportamiento de las variables hidrológicas como se describe en la figura 56:

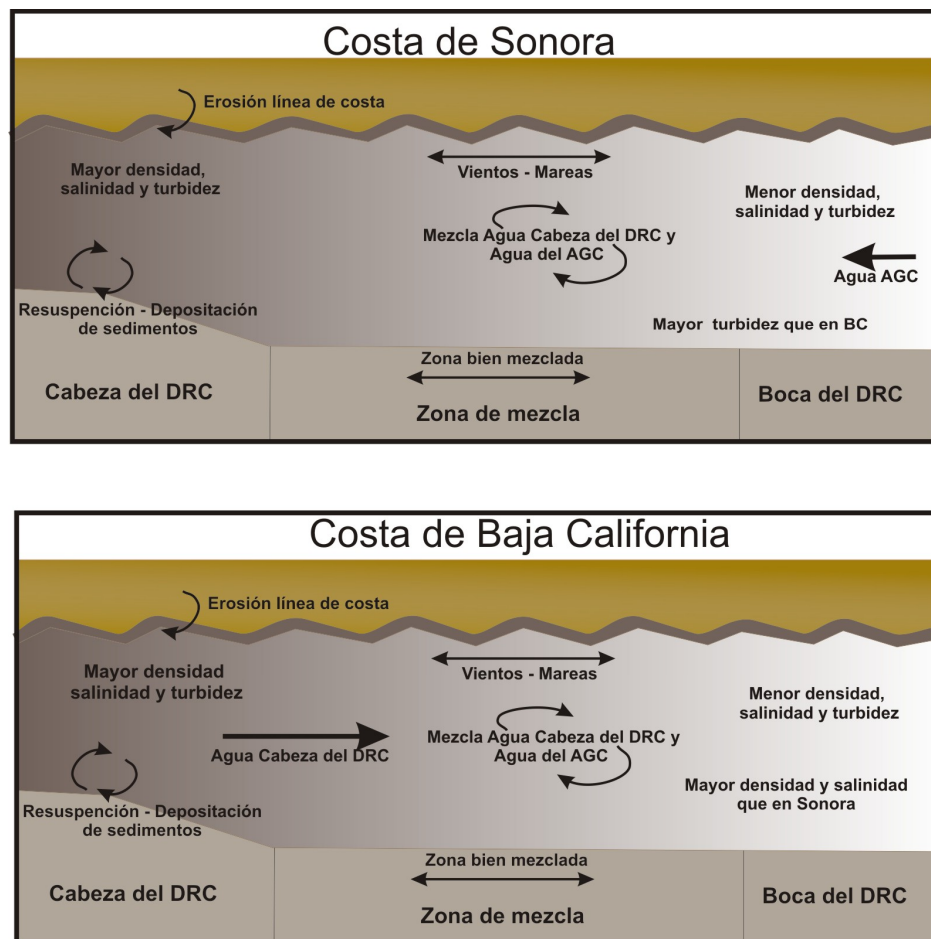


Figura 55. Diagrama DRC variables hidrológicas.

El comportamiento de los NInD mostró algunas características similares a las establecidas para la salinidad y turbidez para todos los meses de estudio en el DRC. El nitrato, fosfato, silicato y CID mantuvieron una

tendencia de incremento desde la boca del delta hacia la cabeza, contrario a lo evidenciado para el amonio y el nitrito (Figura 56).

Al igual que las variables hidrológicas se presentaron diferencias entre las tres zonas (Sonora, río y Baja California) y variaciones estacionales a diferencia de lo encontrado por Hernández Ayón *et al.*, 1993 quien no evidenció una variación estacional entre los nutrientes.

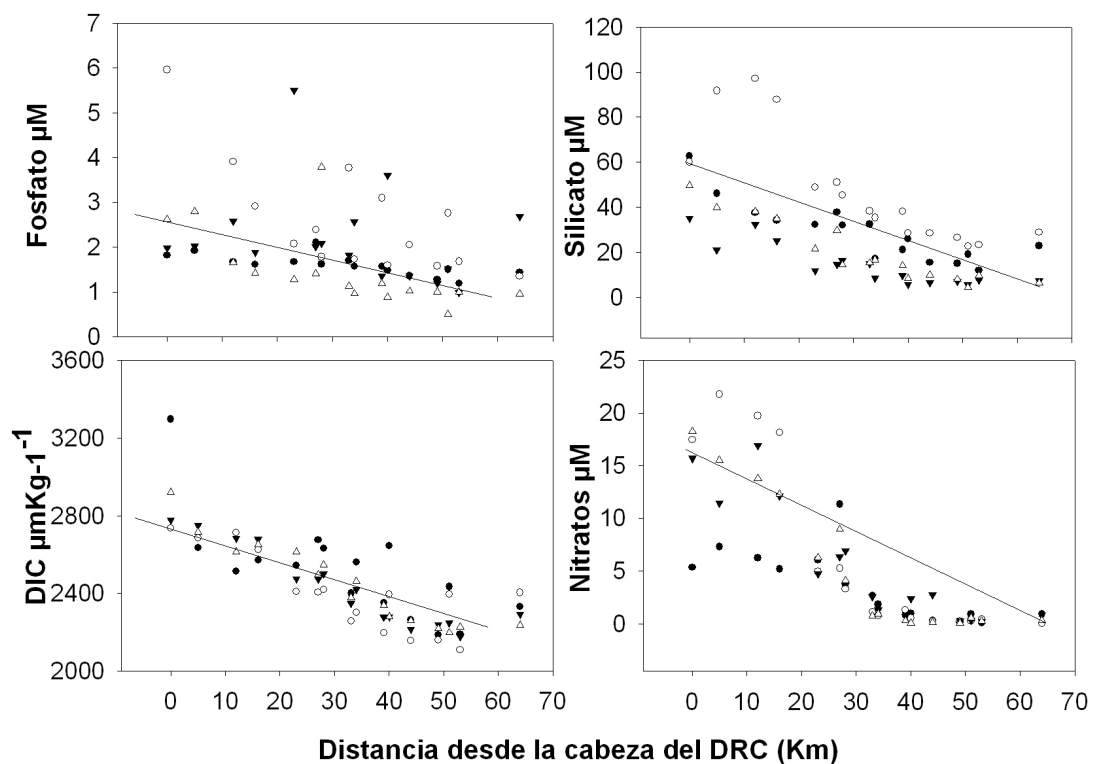


Figura 56 Distribución espacial Fosfatos, silicatos, carbono inorgánico disuelto y nitratos: —●— Abril —○— Agosto —▼— Diciembre —△— Marzo.

En el estudio realizado cuando existían solo aportes del RH, encontraron que para la mayoría de los casos se mantenía el comportamiento de mayores concentraciones en las estaciones de BC que

en el de Sonora, en este estudio el comportamiento varió de acuerdo a cada nutriente y a la época climática:

Para el caso de los nitratos, se evidenció que fueron mayores las concentraciones para todos los meses en la costa de Sonora que en la de BC, indicando que las aguas del AGC acarrearon concentraciones mayores de nitratos ($2-3 \mu\text{M}$) que las que salen del DRC (Figura 16), de acuerdo al muestreo realizado por Nieto García en 1996 en el Golfo Norte encontró altas concentraciones de nitratos ($> 14\mu\text{M}$) a bajas salinidades, en el AGC encontró concentraciones entre ($2-3 \mu\text{M}$) parecidas a las del presente estudio para las estaciones oceánicas de la costa de Sonora. Estos nitratos ingresan al DRC y mantienen un comportamiento conservativo hasta llegar a la parte más interna (E4 - E5) donde se generan procesos de adición a la columna de agua y un incremento de las concentraciones hacia el río.

En cuanto a los otros dos compuestos nitrogenados (nitritos y amonio), en los meses de abril y marzo las concentraciones que ingresan al sistema fueron menores que las de salida (BC), mientras que en agosto el comportamiento fue similar a lo encontrado para el nitrito. Para abril y marzo el nitrito y el amonio presentan un comportamiento conservativo en las estaciones oceánicas de la costa de Sonora, indicando que en general para los compuestos nitrogenados para los meses de abril y marzo las concentraciones que ingresan del AGC no se ven alteradas por procesos biológicos.

Al ingresar a la zona interna del DRC la adición de los compuestos nitrogenados dominan el sistema, este alto contenido de nitrógeno presente

en la cabeza del DRC, puede provenir del material orgánico depositado en el sedimento, al generarse un exceso de nitrógeno orgánico y al oxigenarse los sedimentos del fondo por la resuspensión, una parte del NH_4^+ por actividad bacteriana se convierte a NO_2 y NO_3 , este nitrógeno acumulado en el sedimento puede ser resuspendido a la columna de agua por los procesos erosivos de las mareas (Zheng *et al.*, 2004), lo cual evidenciaron Carriquiry *et al.*, 2011, quienes encontraron que las concentraciones altas de nutrientes dentro de la zona interna del río se asociaban a las máximas de sestón orgánico. Adicionalmente esto concuerda con lo definido por Hernández Ayón *et al.*, 1993, donde define que las concentraciones de nitritos y nitratos en la zona interna es debido a los procesos de nitrificación del amonio.

Si se analiza el porcentaje de cada una de las especies nitrogenadas en relación al DIN se puede evidenciar que el amonio es la especie dominante para agosto y diciembre en las dos costas (BC y Sonora) y para marzo y abril solo en la costa de Sonora (Figura 58), mientras que en nitrato domina la zona de la cabeza del DRC, lo cual se esperaba debido a que el nitrato es la forma mas dominante del nitrógeno disuelto

Por lo tanto la baja concentración de amonio y alta de nitrato + nitrito es indicador de una alta tasa de nitrificación en la zona del río, lo cual también fue encontrado por Carriquiry *et al.*, 2011, por el aumento de las razones de DIN:P y DIN: Si al incrementarse el nitrato en la zona interna.

Para la costa de Sonora dominó en todos los meses el amonio por procesos tanto de amonificación donde el nitrito es reducido a amonio, o por remineralización de la materia orgánica.

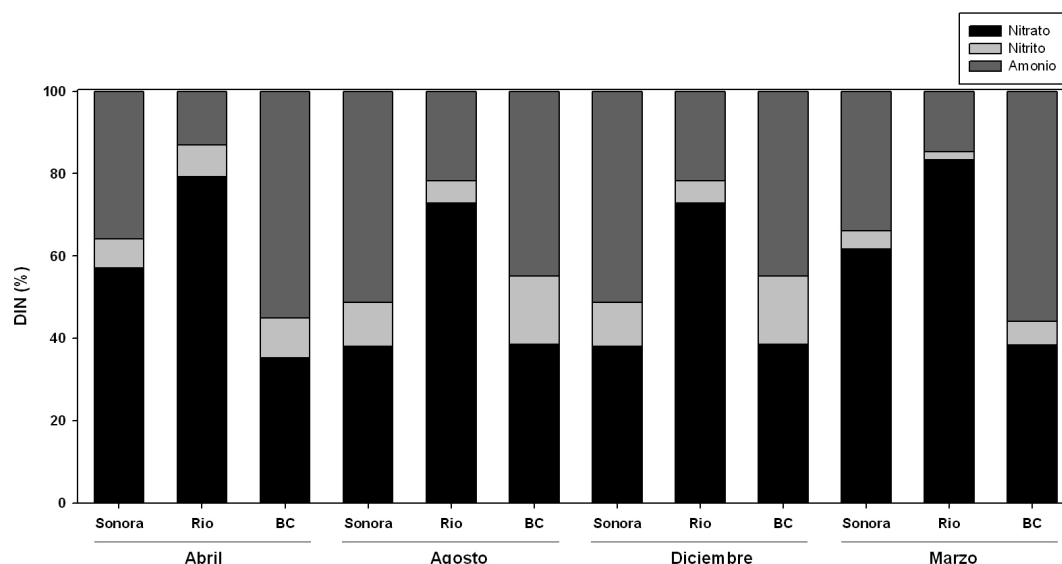


Figura 57. Contribución en porcentaje de los compuestos nitrogenados (nitrato, nitrito y amonio) al DIN total: 1 (Boca del DRC), 2 (Zona de mezcla), 3 (Cabeza del DRC).

Otra posible fuente del nitrógeno es la descrita por Hernández Ayón *et al.*, (1993), donde define que posiblemente existe un aporte de agua subterránea al área que aportaba altas cantidades de nutrientes al DRC. A pesar que en este estudio no se encontró la disminución de salinidad en la estación 11 como encontró Hernández Ayón *et al.*, (1993), aun no es posible con los datos disponibles desechar la hipótesis planteada.

De acuerdo a las razones DIN:PO_4 y $\text{Si(OH)}_4\text{:DIN}$ indican que el nitrógeno es el nutriente limitante para la actividad primaria en el DRC ya que había concentraciones $>0.3\mu\text{M}$ de fosfato y $>5\mu\text{M}$ de silicato en ausencia de nitrato.

En cuanto al fosfato se encontró una diferencia entre los meses de estudio y el patrón de mayor DIP en la entrada que la salida para abril y agosto y viceversa para diciembre- marzo. En el mes de abril se encontró una relación directa y significativa del 69.7% de las concentraciones del DIP

con la clorofila a (Figura 34) y un comportamiento conservativo en las estaciones oceánicas y de adición en la parte interna del DRC.

Esta relación del DIP – clorofila a y el proceso de adición a la columna de agua también fue evidenciada por Delgadillo Hinojoza *et al.*, 2008, en el interior de la bahía de San Diego donde encontraron un patrón de disminución del pH hacia la cabeza (como lo encontrado en este estudio en la figura 58) y una saturación de oxígeno, de acuerdo a estos autores esto puede ser explicado por una retención del detritus del fitoplancton en el estuario y una continua respiración bacteriana de la materia orgánica, la cual libera DIP y CID a la columna de agua (Para el mes de abril también se encontraron los máximos de CID y una asociación del 90.2% con la clorofila a). Lo cual va claramente asociado con la alta abundancia bacteriana ($3.5 \times 10^6 - 20.8 \times 10^6$ mg/m³) en el mes de abril asociada a una alta productividad primaria, un máximo de sestón orgánico y una alta respiración bacteriana (Borbon, 1995).

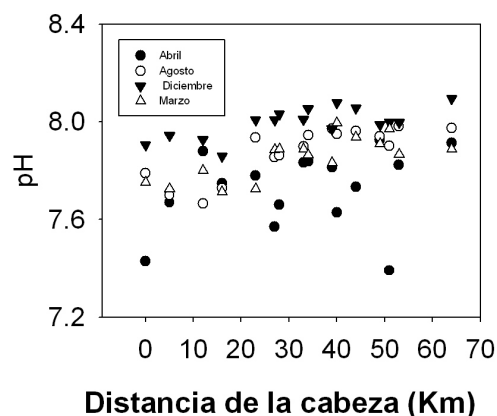


Figura 58. Distribución espacial de pH.

La liberación de DIP en la cabeza del DRC para los otros meses que no es tan clara la asociación con la clorofila *a*, se puede deber a diferentes mecanismos: Caraco *et al.* (1990) mencionan que a mayores salinidades se produce una competencia con el sulfato por las zonas de adsorción, de esta forma la remoción del DIP en las partículas disminuye, otro factor que afecta las concentraciones disueltas del fosfato es el efecto buffer, el cual cuando aguas con bajo DIP llegan a zonas con alta salinidad y se produce una desorción del DIP presente en el material particulado, de esta forma se llega al efecto amortiguador en el estuario (Prastka *et al.*, 1998). Lo cual se puede ver en los diagramas de mezcla, donde aumenta la concentración del DIP al ingresar a aguas más salinas.

Otro proceso que influye en la liberación de DIP a la columna de agua es la liberación de oxihidroxidos de aluminio y hierro debido a un incremento en el pH (Carpenter y Smith, 1984), al analizar la relación entre el DIP y el pH se ve que su asociación es muy baja y no es significativa para el invierno y primavera (Figura 59), pero para verano si se ve una relación significativa con un $r^2 = 37.7$ y un α de 0.012, esto es consistente con otros estudios como en la Bahía Aarhus en Dinamarca donde a finales de verano, se genera una reducción en los oxihidroxidos de hierro debido a las altas temperaturas (Jensen *et al.*, 1995) y una alta liberación de DIP a la columna de agua de los sedimentos.

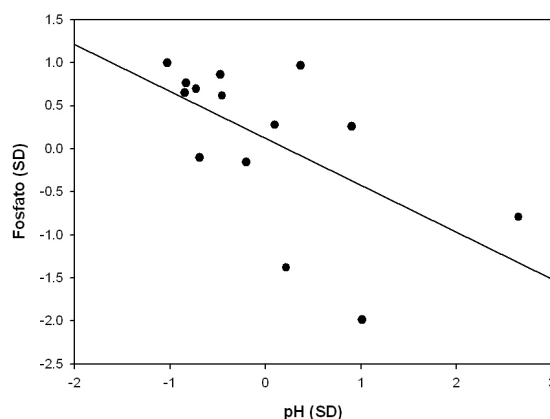


Figura 59. Regresión entre pH y fosfato para el mes de agosto, los valores se encuentran en desviaciones estándar.

Por lo tanto, los procesos de adición a la columna de agua evidenciados en los diagramas de mezcla (Figuras 32 y 33) pueden deberse a tres factores principales: la respiración bacteriana, el efecto de amortiguamiento del DIP, la influencia de la salinidad al generar competencia con los sulfatos por zonas para adsorción, y para el verano una posible reducción de los oxihidroxidos de Fe.

En cuanto al CID se mencionó anteriormente su asociación con la respiración bacteriana para el mes de abril, donde se obtuvieron los mayores valores de todos los meses de estudio. Para los otros meses se evidenció el incremento hacia la boca del DRC y de acuerdo a los diagramas de mezcla un comportamiento conservativo a través de los meses de estudio. Al analizar las diferencias entre el CID y el nCID se encontró que una parte de las concentraciones calculadas se vio influenciada por la salinidad de la zona.

Las concentraciones de CID presentes en el DRC son altas comparadas con áreas de alta productividad y surgencias como Bahía San Quintín (BSQ). Valor comparativo de 2200 μmKg^{-1} entre un evento de surgencia en BSQ (Camacho Ibar *et al.*, 2007) y el mes de mayor productividad en el DRC de 2923 μmKg^{-1} .

Los silicatos también incrementaron hacia la cabeza del delta y se encontró que los procesos de adición a la columna de agua dominaron el sistema, esta podría ser atribuido a la resuspensión de los silicatos presentes en los sedimentos que fueron transportados en un pasado por el RC con alto contenido de silicatos (Como lo encontrado por Cupul Magaña, 1994), o también a un posible aporte de agua subterránea como lo define Hernández Ayón *et al.*, 1993.

El sílice disuelto acarreado por el río pudo ser almacenado en las aguas intersticiales de los sedimentos después que las frústulas de las diatomeas se disolvieron durante el enterramiento en los sedimentos, este sílice tiene una baja preservación en los sedimentos en ambientes óxicos donde este es acarreado de nuevo a la columna de agua (Canfield *et al.*, 2005), proceso que puede estar sucediendo en el DRC, en donde las zonas con mayor turbulencia evidencian mayores concentraciones de DSI.

Finalmente de acuerdo a Soetarlet *et al.*, 2006 los estuarios macromareales y turbios tales como el DRC se caracterizan por ser heterotróficos, los cuales tienen el potencial de actuar como una fuente de nutrientes inorgánicos disueltos, donde la remineralización de los NInD es mayor que la incorporación a la biomasa, se podría entonces decir que el

DRC es un estuario típicamente heterotrófico, que exporta NInD al océano adyacente.

Comparación entre los tres escenarios

Al analizar las diferencias entre los tres muestreos realizados, se ve claramente como los efectos del represamiento tanto del RC como del RH, han influido en las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos en el DRC (Figuras 39-46), es evidente como la descarga de agua es el factor principal que controla la transferencia de materia de la tierra a los océanos (Ludwig *et al.*, 2008) y por lo tanto controla en gran parte la disponibilidad de material disuelto en el sistema costero.

Al analizar las concentraciones de los nutrientes a través de los estudios realizados, es muy claro como el sílice fue el mejor indicador de los cambios en el DRC por las alteraciones antropogénicas realizadas al sistema. El sílice pasó de concentraciones de $\sim 181 \mu\text{M}$ en la zona del río, en condiciones de flujo del RC y RH a $\sim 45 \mu\text{M}$ en la actualidad con los dos represamientos. Esto va de acuerdo a lo expuesto por Raguenu *et al.* (2000), donde definen que los tres principales mecanismos para la disminución de sílice son: eutrofización, manejo hidrológico y la biodepositación por especies invasivas.

Para el caso del DRC la construcción de presas a lo largo del tiempo es el factor que generó esta disminución en el SiD, existe alguna evidencia que el decremento del SiD por la construcción de presas genera una disminución en las abundancias de diatomeas y copépodos, llevando un cambio en la composición de las especies fitoplanctónicas, lo cual tiene una repercusión

en toda la cadena alimenticia pelágica y un alto impacto económico (Humborg *et al.*, 2000).

Las implicaciones de reducción de sílice disuelto que llega a la zona costera por el represamiento han sido evidenciadas también para el Río Danubio (Humborg *et al.*, 1997), el Río Yangtze (Chai *et al.*, 2009), el Río Luleäven (Sferratore *et al.*, 2008) entre otros.

Para el DIN y el DIP la diferencia entre los tres escenarios no fue tan notoria teniendo en cuenta que se presentaron mayores concentraciones de DIN y DIP para el estudio con solo presencia del RH, el cual descargaba en el DRC aguas residuales provenientes de riegos agrícolas y actividades domésticas. Solo para el caso del nitrito se pudo evidenciar las mayores concentraciones en el muestreo con aporte de los dos ríos.

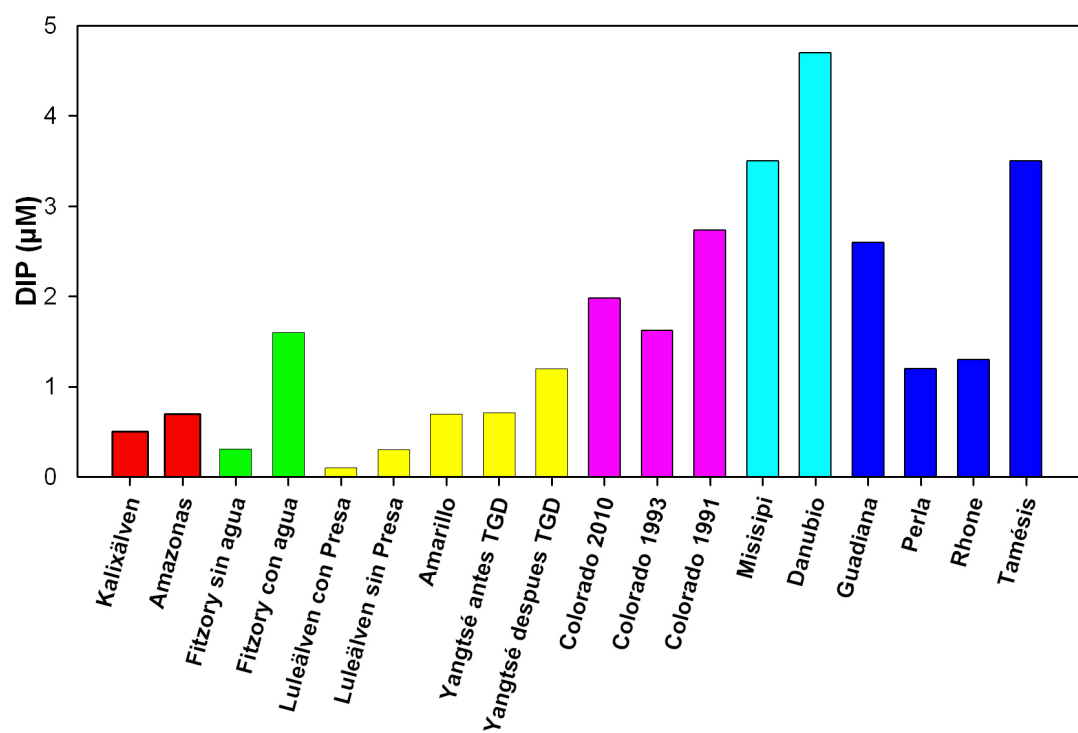
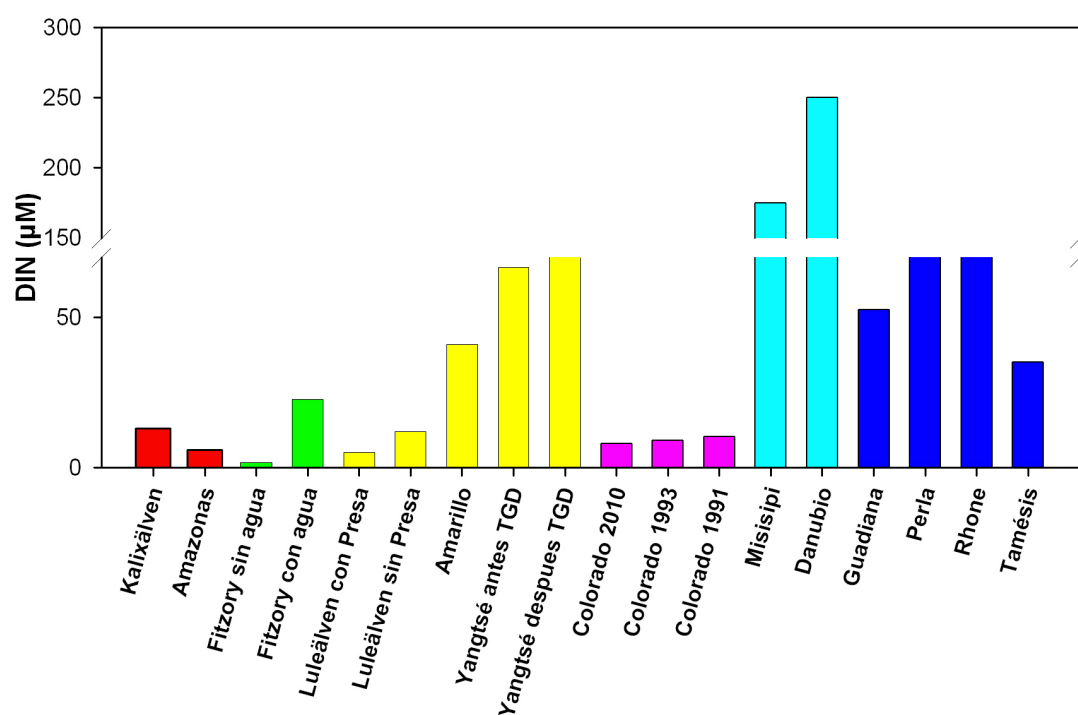
Al analizar los diagramas de mezcla es evidente como el DRC cuando existía aporte de agua dulce por parte de los dos ríos, consumía los nutrientes disueltos (DIN y Si(OH)_4), los cuales pudieron ser depositados posteriormente a los sedimentos en forma orgánica. Estos nutrientes son los que por la falta de aportes de agua dulce se están remineralizando y reciclando hacia la columna de agua.

Después de evidenciar las diferencias entre las concentraciones de los NInD a través de los estudios realizados, es necesario comparar estos datos con otros obtenidos a través del mundo con el fin de determinar que tan bajas o altas están las concentraciones de nutrientes frente a otros sistemas bajo diferentes condiciones de alteración antropogénica. En la figura 60 se presentan datos de diferentes estuarios, los estudios realizados

en el DRC se presentan en rosado, mientras que los otros estudios se presentan de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Prístino : Kalixälven en Suecia (Sferratore *et al.*,2008) o con baja influencia humana Amazonas (Smith y DeMaster, 1996), Tamésis (Sanders *et al.*,2001). (Color Rojo)
- Con aportes ocasionales de agua dulce: Fitzory en Australia (Radke *et al.*, 2006, Ford 2006). (Color verde)
- Con construcción de presas: Yangtze en China (Chai *et al.*,2009), Luleälven en Suecia (Sferratore *et al.*,2008) y Amarillo en China (Zhang *et al.*,2008). (Color amarillo)
- Con presas y altos aportes antropogénicos: Misisipi en USA (Liu y Dagg, 2003), y Danubio en Rumania (Humborg *et al.*, 1997). (Color azul claro).
- Eutrofizados: Perla en China (Yin *et al.*, 200), Guadiana en España (Domingues *et al.*, 2011) , Rhone en Francia (Moutin *et al.*,1998). (Color azul oscuro)

Inicialmente al analizar las figura 60 se puede ver claramente como el DRC ha presentado bajo todas las condiciones estudiadas concentraciones de nitrógeno bajas (8.04-10.29 μM) pero cercanas a las encontradas para estuarios como el Fitzory en Australia (1.61-22.6 μM), el Luleälven en Suecia (5-12 μM), el Amazonas (6 μM) y el Kalixälven (13 μM). Mientras que los valores de DIP (1.6 – 2.73 μM) se encontraron cercanos a los encontrados para estuarios eutrofizados (1.2 -3.5 μM).



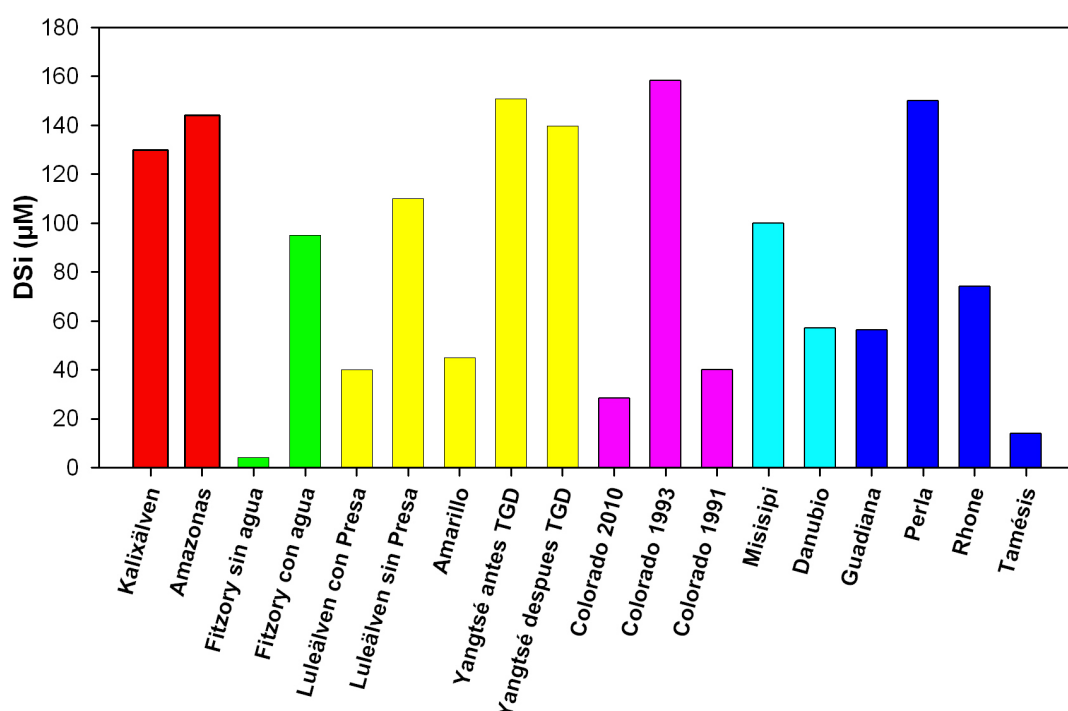


Figura 60. Nitrógeno Inorgánico Disuelto, Fosforo Inorgánico Disuelto y Sílice Inorgánico Disuelto para diferentes estuarios. Los valores son promedios de los muestreos realizados en cada estudio.

Como se mencionó anteriormente el DSi en este caso de estudio es el mejor indicador de las alteraciones generadas por el ser humano al sistema, dentro de la figura 60 se puede ver como el DRC presentaba concentraciones mayores a estuarios prístinos como el Kalixälven y al Amazonas, pero que después de la construcción de sistemas de represamiento las concentraciones disminuyeron en un 82% al igual que sucedió para el Luleälven y el Fitzory con un decremento de un 63 – 95% respectivamente.

4.1.6 Río Hardy

En un principio se planteó realizar el análisis de nutrientes en el RH con el fin de establecer la importancia de las concentraciones de NInD a través de su cause y su posible aportación al DRC antes de la construcción del dique de contención. Se evidencio como debido a que las aguas residuales de tipo doméstico e industrial acarrearán más nutrientes al sistema (en este caso se evidenció en los nitratos), que las aguas de retorno agrícola. Encontrando que actualmente los nutrientes dentro del sistema del RH son mayores que cuando no existía la planta de tratamiento.

Las altas concentraciones de nutrientes encontradas a la salida de la PTAR, disminuyeron en el transcurso del río, posiblemente por el incremento de algas (que se evidenció durante la toma de muestras) que este tomando los nutrientes excedentes y generando un proceso de eutrofización.

Adicionalmente en el estudio de García-Hernández et al. (2009) encontraron valores de amoníaco que exceden los límites permisibles para toxicidad en peces, estos unidos al proceso de eutrofización por el crecimiento de algas, podrían ser las razones de la mortandad de peces reportada por los residentes del RH.

Por lo tanto es posible que a pesar que se evidenció en el estudio de Hernández Ayón et al., 2003 que los aportes del RH eran importantes, en la actualidad las concentraciones de NInD que llegan al final del RH son muy bajas (DIN: 0.24- 0.37 μM , DIP 0.42-0.77 μM y DSi: 140 – 168 μM), por la toma de los nutrientes por las algas.

Para realizar un proceso de recuperación del DRC con aporte de nutrientes (eg. Con aguas residuales de la planta de tratamiento de las arenitas), sería necesario tomar el agua directamente del efluente de la PTAR Las Arenitas, para esto sería necesario mejorar la calidad de las emisiones por medio de un tratamiento terciario de las aguas. Esto podría ser la solución para disminuir la actual eutrofización en el RH y su consecuente mortandad de peces, así como también sería una fuente importante de nutrientes al DRC en su actual proceso erosivo.

Este posible incremento de nutrientes por el aporte de aguas residuales podrían ser de importancia para incrementar la productividad primaria y consecuentemente aumentar las especies de importancia económica como lo es el camarón azul.

Es necesario tener en cuenta que no es posible que el ecosistema retorne a su estado inicial, ya que este no es un sistema lineal, sino que tiene complicadas y variadas interacciones. Lo importante es llevar al ecosistema y mantenerlo en un estado donde pueda brindar todos los beneficios ambientales necesarios.

CONCLUSIONES

El DRC es un estuario hipersalino típicamente heterotrófico, con alta turbidez y con estaciones climáticas muy marcadas. Presenta un gradiente de altas concentraciones de NInD en la zona riveña y menores en la zona costera, donde el agua del AGC ingresa por la costa de Sonora y retorna al AGC por la costa de BC.

Los nitratos y el amonio no presentaron una variación estacional, mientras que los nitritos, fosfatos, silicatos y CID tuvieron diferencias significativas entre los meses de muestreo.

Existió una diferencia estacional entre las concentraciones de nutrientes para las tres zonas (Sonora, Baja California y el Río), donde para el caso de los compuestos nitrogenados para los meses de diciembre y marzo las costas de Sonora y BC presentaron un comportamiento similar, pero fueron diferentes al río, mientras que para el mes más cálido se presentó un comportamiento heterogéneo entre las zonas. Para los otros nutrientes se encontraron también diferencias entre las zonas de estudio a través de las estaciones climáticas.

Las concentraciones de nutrientes encontradas en la costa de Sonora fueron mayores que las de BC para los NInD (exceptuando el CID), para los meses de abril y agosto.

Solo para el mes de abril se presentó una asociación clara de los NInD (exceptuando el nitrito y el amonio) con la clorofila a. Este mes se caracterizó por las mayores concentraciones de CID debido a la respiración bacteriana. Es posible entonces decir que en el mes de abril los nutrientes no presentan un comportamiento típico dominado por la hidrología de la zona, pero que si fueron dominados en su mayoría por procesos biológicos de respiración.

Las concentraciones de nutrientes no presentaron buena correlación con las mareas, pero se encontró que el momento de la toma de muestra (marea subiendo o bajando) influyó en la concentración encontrada de acuerdo a la fuente de agua que estuviera pasando en el momento de la toma de la muestra.

Las razones estimadas de DIN:DIP , $\text{Si(OH)}_4\text{:DIP}$ y $\text{Si(OH)}_4\text{:DIN}$ indicaron que solo para el mes de abril se encontró una relación tipo Redfield y que el nutriente limitante para todos los meses es el DIN.

Durante las alteraciones de aportes de agua dulce al DRC se presentaron cambios en la dinámica de los NInD, donde las concentraciones de silicatos disminuyeron hasta un 82% con el represamiento del RC y RH. Siendo de esta forma el sílice disuelto el mejor indicador de las afectaciones generadas por los represamientos al sistema.

Las concentraciones de DIN encontradas en el DRC fueron similares a las encontradas en otros estuarios de tipo mediterráneo que presentan aportes ocasionales de agua, mientras que los valores de DIP fueron similares a los de estuarios eutrofizados.

Los nutrientes encontrados en el RH mantuvieron un patrón de decremento desde la PTAR Las Arenitas hacia la zona del Tapón, indicando un posible consumo de las algas.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmad Adnan N, Loneragan NR, Connolly RM (2002): Variability of, and the influence of environmental factors on, the recruitment of postlarval and juvenile *Penaeus merguensis* in the Matang mangroves of Malaysia. *Mar Biol* 141:241–251.
- Aller, R. C., Yingst, Y. (1985): Effects of the marine deposit- feeders *Heteromastus fAformis* (Polychaeta), *Macoma balthica* (Bivalvia), and *Tellina texana* (Bivalvia) on averaged sedimentary solute transport, reaction rates, and microbial distributions. *J. mar. Res.* 43: 615-645.
- Ardisson P-L, E Bourget. (1997): A study of the relationship between freshwater runoff and benthos abundance: a scale-oriented approach. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 45: 535-545.
- Baba, J., Peterson, C.D., Schrader, H.J., (1991): Modern fine-grained sediments in the Gulf of California during the last century. *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. Eds., AAPG, Mem. 47, 569 - 587.
- Benfield M.C., Downer R.G. (2001): Spatial and temporal variability in the nearshore distributions of postlarval *Farfantepenaeus aztecus* along Galveston Island, Texas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*; 52:445-456.
- Camacho-Ibar VF, Hernández-Ayón M, Santamaría-del-Ángel E, Dásele-Heuser LW, Zertuche-González JA (2007): Correlation of surges with carbon stocks in San Quintín Bay, a coastal lagoon in northwest Mexico. In: Hernández de la Torre B, Gaxiola Castro G (eds). *Carbon in Aquatic*

Ecosystems of Mexico. Co-edited by the Department of Environmental and Natural Resources, National Ecology Institute NEI and the Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada CICESE, Mexico City; 355-370.

Canfield, D.E., Kristensen, E. and Thamdrup, Bo., (2005): The Sulfur Cycle. *Advances in Marine Biology*, 48, 2005, 313-381.

Caraco N, Cole J , Likens GE (1990): A comparison of phosphorus immobilization of freshwater and coastal marine systems. *Biogeochemistry* 9:277-290.

Carpenter, P. D. and J. D. Smith (1984): Effect of pH, iron and humic acid on the estuarine behavior of phosphate. *Environ. Tech. Lett.*, 6, 65–72.

Carriquiry, José D, et al. (2011): The effects of damming on the materials flux in the Colorado River delta. *Environmental Earth Science* 62:1407–1418

Carriquiry JD, Sánchez A (1999): Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Mar Geol* 158:125–145. doi:10.1016/S0025-3227 (98)00189-3

Cervantes, M., M. J. Román, and E. Mellink. (1999) AICA: NO- 17 Delta del Río Colorado. In: H. Benítez, C. Arizmendi, and L. Márquez. Base de datos de las AICAS. CIPAMEX, CONABIO, FMCN and CCA. Available online at [http:// www.conabio.gob.mx.México](http://www.conabio.gob.mx.México)).

Chai, C., Yu, Z., Shen, Z., Song, X., Cao, X., Yao, Y. (2009): Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Science of the Total Environment* 407: 4687-4695.

- Chuwen, B. M., S. D. Hoeksema, and I. C. Potter. (2009): The divergent environmental characteristics of permanently-open, seasonally-open and normally-closed estuaries of south-western Australia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 85:12–21.
- Cohen, M.J., C. Henges-Jeck, and G. Castillo-Moreno. (2001): «A Preliminary Water Balance for the Colorado River Delta, 1992-1998». *Journal of Arid Environments* 49: 35-48.
- Cupul Magaña AL. (1994): Flujos de sedimentos en suspensión y de nutrientes en la cuenca estuarina del Río Colorado. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, BC, México, 117 pp.
- Deep-sea research: Oceanographic research papers, Volume 52 Pergamon Press, 2005
- Domingues RB, TP Anselmo, AB Barbosa, U Sommer, HM Galvão (2011): Nutrient limitation of phytoplankton in the freshwater tidal zone of a turbid, Mediterranean estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91: 282-297.
- Dortch Q., and T. E. Whittedge (1992): Does Nitrogen or Silicon Limit Phytoplankton Production in the Mississippi River Plume and Nearby Regions?. *Continental Shelf Research* 12:1293-1309.
- Dugdale, R. C., F. P. Wilkerson, and H. J. Minas (1995): The role of a silicate pump in driving new production, *Deep Sea Res. Part I*, 42, 697 – 719.
- Ehrhardt, N. M., and Legault, C. M. (1999): Pink shrimp, *Farfantepenaeus duorarum*, recruitment variability as an indicator of Florida Bay dynamics. *Estuaries*, 22: 471–483.

- Friedl, G. and A. Wüest. (2002): Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming. *Aquatic Science* 64: 55-65.
- García Hernández, J, et al. (2001): Selenium, selected inorganic elements, and organocholine pesticides in bottom material and biota from the Colorado River delta. *Arid Environmet.* 49-65.
- Galindo Bect MS. (2003): Larvas y postlarvas de camarones peneidos en el alto Golfo de California y capturas de camarón con relación al flujo del río Colorado. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, BC, México; 69.
- Galindo-Bect M. Salvador, Aragón Noriega E. Alberto, Hernández-Ayón J. Martín, Lavín Miguel F., Huerta Diaz Miguel A., Delgadillo Hinojosa Francisco and Segovia Zavala José A. (2010): Distribution of Penaeid Shrimp Larvae and Postlarvae in the Upper Gulf of California. *Crustaceana* 83 (7): 809-819.
- Glenn, E., Lee, C., Felger, R. & Zengel, S. (1996). Effects of water management on the wetlands of the Colorado River delta, Mexico. *Conservation Biology*, 10: 1175–1186.
- Gordon DCJ, Boudreau PR, Mann KH, Ong J-E, Silvert WL, Smith SV, Wattayakorn G, Wulff F, Yanagi T (1996): LOICZ biogeochemical modelling guidelines. *LOICZ Reports & Studies*, 5:1-96.
- Hernández-Ayón JM, Galindo-Bect MS, Flores-Báez BP, Álvarez- Borrego S (1993) Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Est. Coast. Shelf Sci.* 37: 593-602.

- Hinojosa-Huerta, O., H. Iturribarría-Rojas, Y. Carrillo-Guerrero, M. de la Garza-Treviño, and E. Zamora-Hernández. (2004). Bird Conservation Plan for the Colorado River Delta. Pronatura Noroeste, Dirección de Conservación Sonora. San Luis Río Colorado, Sonora, México.
- Houde, E. D. Y E. S. Rutherford. (1993). Recent trends in estuarine fisheries: predictions of fish productions of fish production and yield. *Estuaries* 16(2):161-176 p.
- Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu and B. v. Bodungen, (1997). Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature* 386: 385–388.
- Humborg, C., D. J. Conley, L. Rahm, F. Wulff, A. Cociasu and V. Ittekkot, (2000). Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio* 29: 44 – 49.
- Jeffrey, S. W. and Humphrey, G. F. (1975): New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanzen*. 167, 191 – 194.
- Jensen, H.S., Mortensen, P.B., Anderson, F.O., Rasmussen, J. and Jensen, A. (1995). Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. *Limnology and Oceanography* 40, 908-917.
- Johnson, K. M., Sieburth, J. McN., Williams, P. J. LeB., Brandstrom, L. (1987). Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: automation and calibration. *Mar. Chem.* 21: 1

- Justic, D., N. N. Rabalais, R. E. Turner, y Q. Dortch. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 40:339–356
- Kumary, Anila KS and Azis, Abdul PK and Natarajan, P (2001) Sediment characteristics of Poonthura estuary (southwest coast of India) in relation to pollution. *Indian Journal of Marine Sciences*, 30 (2). pp. 75-80.
- Largier, J.L., Hollibaugh, J.T., Smith, S.V., (1997). Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45, 789e797.
- Lebo, M.E., 1991. Particle-bound phosphorus along an urbanized coastal plain estuary. *Marine Chemistry* 34, 225e246.
- Liu, H., Dagg, M.J. (2003) Interactions between nutrients, phytoplankton growth, and micro- and mesozooplankton grazing in the plume of the Mississippi River. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 258:31-42.
- Lorenzen, C. J. (1965) Determination of chlorophylls and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* 12, 343 – 346.
- Ludwig Wolfgang, Dumont Egon, Meybeck Michel, Heussnera Serge, (2009): River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Progress in Oceanography* 80:199–217.
- Luecke, D. F., J. Pitt, C. Congdon, E. Glenn, C. Valdés-Casillas, and M. Briggs. (1999). *A delta once more*. Boulder, CO: Environmental Defense Fund.

- Lugo-Ibarra K.C., Daesslé L.W., Macías-Zamora J.V., Ramírez-Álvarez N.. (2011): Persistent organic pollutants associated to water fluxes and sedimentary processes in the Colorado River delta, Baja California, México. *Chemosphere* 85: 210–217.
- Martinez- Rojas Reynoso, MK (1990) Distribución especial y registros circadianos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en el delta del Río Colorado, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 90 p.
- Mann, K. H. y J. R. N. Lazier. 1996. Dynamics of marine ecosystems. Biological-Physical interactions in the oceans. Blackwell Science, Cambridge, 394 p.
- Mattews, T. M., W. W. Schroeder y D. E. Sterns. 1991. Endogenous rhythm, light and salinity effects on postlarval brown shrimp *Penaeus aztecus* larval recruitment to estuaries. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 154, 177-189 p.
- Meckel, L. D. 1975. Holocene sand bodies in the Colorado delta area, northern Gulf of California. In: Broussard MC (ed) *Deltas, models for exploration*. Houston Geol Soc., Houston, 239-265 p.
- Millán Núñez, R., E. Santamaría del Angel, R. Cajal Medarano y O. A. Barocio León. 1999. El delta del Río Colorado: Un ecosistema con alta productividad primaria. *Ciencias Marinas*, 25(4):509-540 p.
- Minckley, W L. (1991) Native Fishes of the Grand Canyon Region: An Obituary? Committee to Review the Glen Canyon Environmental Studies, Water, Science and Technology Board.

- Morrison, Jason I, Sandra L Postel and Peter H Gleick. (1996): The Sustainable Use of Water in the Lower Colorado River Basin. The Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Oakland.
- Moutin T, Raimbault P, Golterman HL, Coste B. (1998) The input of nutrients by the Rhone river into the Mediterranean Sea: recent observations and comparison with earlier data. *Hydrobiologia*;373/374:237–46.
- Muñoz Arriola, F., J. Carriquiry Beltrán, E. Nieto García Y J. M. Hernández Ayón. (1999). Colorado River Delta. En: Mexican and cCentral American coastal lagoon system: Carbon, nitrogen and phosphorus fluxes (regional workshop II). LOICZ report & studies 13, 59-64 p.
- Nixon, S. W., J. A. Ammerman, L. P. Atkinson, V. M. Berounsky, G. Billen, W. C. Boicourt, W. R. Boynton, T. M. Church, D. M. DiToro, R. Elmgren, J. H. Garber, A. E. Giblin, R. A. Jahnke, N. J. P. Owens, M. E. Q. Pilson, and S. P. Seitzinger. (1996). The fate of nitrogen at the land–sea margin of the North Atlantic Ocean. In “Nitrogen Cycling in the North Atlantic Ocean and its Watersheds” (R. W. Howarth, Ed.), pp. 141–180. Kluwer Academic, Dordrecht.
- Orozco Borbón MV. (1995): Producción y biomasa de bacteriopláncton en el Delta del Río Colorado y San Felipe B.C, Golfo de California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, BC, México; 69.

- Orozco-Durán, Daesslé L. W., Gutiérrez-Galindo E., Muñoz-Barbosa A.. (2012): Distribution of Selenium, Molybdenum and Uranium in Sediment Cores from the Colorado River Delta, Baja California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 88:104–107
- Owen-Joyce, S.J., and Raymond, L.H. (1996). An Accounting System for Water and Consumptive Use Along the Colorado River, Hoover Dam to Mexico. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2407.
- Payne, J.M., Reid, F.A., and Carrera Gonzalez, E. (1992). “Feasibility Study for the Possible Enhancement of the Colorado Delta Wetlands: Baja California Norte, Mexico.” Prepared by Ducks Unlimited. 31 pp., plus appendix.
- Potter, I.C., et al., (2010), The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline, *Estuar. Coast. Shelf Sci.* doi:10.1016/j.ecss.2010.01.021.
- Prastka, K., Sanders, R. and Jickells, T. (1998). Has the role of estuaries as sources or sinks of dissolved inorganic phosphorus changed over time? Results of a Kd study. *Mar. Pollut. Bull.* 36, 718–728.
- Pritchard, D.W y J.R. Schubel. (1981): Physical and geological processes controlling nutrients levels in estuarine. En: B.J. Nelson (ed) “Estuaries and nutrients”. Human Press Inc. 47-69.

- Radke, L.C., Ford, P.W., Webster, I.T., Atkinson, I., Douglas, G., Oubelkheir, K., Li, J., Robson, B., and Brooke, B. (2009). Biogeochemical zones within a macrotidal, dry-tropical fluvial-marine transition area: A dry-season perspective. *Aquatic Geochemistry*. DOI 10.1007/s10498-009-9070-7.
- Ragueneau, O., and Others. 2000. A review of the Si cycle in the modern ocean: Recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as paleoproductivity proxy. *Global Planet. Change* 26: 317–365.
- Redfield, A.C., Ketchum, B.H., Richards, F.A., (1963). The influence of organisms on the composition of sea-water. In: Hill, M.N. (Ed.), *The Sea*. John Wiley & Sons, New York, pp. 12–37.
- Sanders R, Jickells T, Mills D. (2001): Nutrients and chlorophyll at two sites in the Thames plume and southern North Sea. *J Sea Res*;46:13–28.
- Santamria-del-Ángel E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal color scanner imagery. *J Geophys. Res.*, 99(C4): 7411-7421.
- SEMARNAP. (1995). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Rio Colorado. Secretaria del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Publicación Especial 1. México co D.F., México.
- Sferratore, A., Billen, G., Garnier, J., Smedberg, E., Humborg, C., Rahm, L., (2008). Modelling nutrient fluxes from sub-arctic basins: comparison of pristine vs. dammed rivers. *Journal of Marine Systems* 73, 236–249.

- Shumilin EN, Carriquiry JD, Camacho-Ibar VF, Sapozhnikov D, Kalmykov S, Sánchez A, Aguñiga-García S, Sapozhnikov YA (2002) Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River Delta and Upper Gulf of California. *Mar Chem* 79:113–131. doi:10.1016/S0304-4203(02)00059-2
- Simpson J. H., Vennell R. and Souza A. J., (2001) The Salt Fluxes in a Tidally-Energetic Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 52, 131–142.
- Smith, W.O. and DeMaster, D.J. (1996). Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: Correlation with seasonal river discharge. *Continental Shelf Research* 16(3):291- 319.
- Smith, J. D., and A. R. Longmore. (1980). Behaviour of phosphate in estuarine water. *Nature* 287: 532–534.
- Snow, G. C., J. B. Adams y G. C. Bate. (2000). Effect of river flow on estuarine microalgal biomass and distribution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51, 255-266 p.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. (1972). (2nd Edition) A practical handbook of sea-water analysis. *J. Fish. Res. Bd. Canada*. 167: 311 pp.
- Sykes, G. «The Colorado Delta.» Carnegie Institution of Washington 460 (1937): 56-69.
- Torres Delgado EV. (2008): Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de nutrientes inorgánicos en la región de las grandes islas del Golfo de California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, BC, México; 69.

U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey URL:
<http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/natural/codrought/> Page.

Last Modified: Tue 18-May-2004 11:25:52 MDT.

Vance, D. J., M. D. E. Haywood, D. Heales, R. Kenyon and N. Loneragan.
(1998). Seasonal and annual variation in abundance of postlarval and
juvenile banana prawns *Penaeus merguensis* and environmental
variation in two estuaries in tropical northeastern Australia: a six year
study. Mar. Ecol. Progress ser. 163, 21-36 p.

Webster IT, Atkinson I, Bostock H et al (2006) The Fitzroy Contaminants
Project – A Study of the Nutrient and Fine-Sediment Dynamics of the
Fitzroy Estuary and Keppel Bay. Cooperative Research Centre for
Coastal Zone, Estuary & Waterway Management Technical Report
#42. Brisbane, Queensland

Yimin Ye. 2000. Is recruitment related to spawning stock in penaeid shrimp
fisheries?. Journal of Marine Science 57, 1103-1109 p.

Yin Y, Cohen S, Huang GH (2000) Global climate change and regional
sustainable development: The case of Mackenzie Basin in Canada.
Integrated Assessment 1, 21-37.

Zhong Zhang, J. (2000). The use of pH and buffer intensity to quantify the
carbon cycle in the ocean. Mar. Chem. 70: 121–131.

Zhang, S.R., Lu, X.X., David, L., Higgitt, Chen, Arthur, C.T., Han, J.T., Sun,
H.G., 2008. Recent changes of water discharge and sediment load in
the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. Global and Planetary Change
60, 365–380.

Zheng, Lianyuan, Changsheng Chen and Frank Y Zhang. «Development of water quality model in the Satilla River Estuary, Georgia.» Ecological Modelling (2004): 457-482.