

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOQUIMICA



*Estudio geoquímico de los cuerpos evaporíticos de la costa
nor-central del estado Falcón*

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el Br. Luis
Mujica para optar por el
Título de Licenciado en
Geoquímica.

Caracas, Julio 2011

ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: ***ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LOS CUERPOS EVAPORÍTICOS DE LA COSTA NOR-CENTRAL DEL ESTADO FALCÓN***, presentado por el Br. Luis Alberto Mujica Leal, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por esta Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciado en Geoquímica.

Prof. Manuel

Martínez

Tutor

Prof. Anna Gann

Jurado

Prof. Salvador lo Mónaco

Jurado

*Dedicado a mis Padres, Sol y Luis
Mis Abuelas Sabina y Petra
Y mi sobrina Lara Sofía*

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Central de Venezuela**, por ser la casa de estudios donde he tenido el honor de formarme como profesional.

A mis padres, **Luis** y **Sol** y mi hermana **Adriana**, por haberme brindado durante toda mi vida las herramientas y el apoyo para lograr mis metas y darme día a día su amor y comprensión.

A mi tutor el **Prof. Manuel Martínez**, por haberme enseñado el ejemplo de un verdadero Profesor, que hoy en día escasean. Y por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y haberse comportado como un padre durante aquellos momentos que otros hubieran actuado diferente, durante la realización del proyecto.

A mi chiquita **Joyse**, por haberme apoyado durante todo este tiempo y llenarme de regaños, sonrisas y felicidad durante todos aquellos momentos que los he necesitado.

A mi madre **Yrasenia** mi ex, **Mariacarolina** (co-autora y co-tutora), por haberme acompañado y compartido estos últimos años juntos y haberme brindado una amistad invaluable.

A mis padrinos y segundos padres, **Miriam y Ricardo**, en los cuales siempre he podido conseguir consejos para afrontar las dificultades en mi vida.

A mis Hermanos con los cuales tuve el gusto de compartir todos estos años, **Carlos (jeje), Pippin, Edgar, Candy y Andrés**, por las incontables horas de hablar, fútbol y demás actividades étlicas que hemos compartido todo este tiempo.

A Todos mis compañeros que he tenido el placer de compartir en nuestra **AGQ**, (**Duilliana mi Tata, Rebbeca, Yulimar, Omaña, El Pofe, David, Jhon, Dubraska, Popo**), y todos aquellos que hemos formado parte de esta familia y este proyecto en el cual hemos depositado mucho esfuerzo y esperanzas de un futuro mucho mejor.

A mi segunda Familia en **PHYSIS**, (**Jesús, Bencho, Joshi, Ronald, los Wills, Ecuador, Johan**). Para que sigamos emprendiendo retos y concretar proyectos que nos permitan alcanzar esas metas que nos hemos propuesto como científicos en este loco y bizarro mundo.

A todas mis compañer@s de laboratorio y con los cuales compartí gran parte del tiempo dedicado a este proyecto de tesis, (**Kris, Mayerling, Yra, Mayi, Mafer, Francia, la Dra. María Emilia, Gibran, Khely, Francis, Alexmar, Omnain y Luis alias el Feo**).

A los profesores, técnicos y demás personal del ICT, por su papel como base de mi formación a lo largo de mi vida universitaria y haberme enseñado no solo dentro del aula de clases sino también fuera de ella. Especialmente a los profesores **Carlos Barrios** y **Elisa Ochoa**, a los cuales agradezco y aprecio enormemente su amistad.

A todos aquellos que de alguna u otra manera formaron parte de mi vida universitaria y a los cuales agradezco el tiempo compartido con ellos. (**Mis jefas, Yadira, Miriam, prof. Inés, Dayana**), mis compañeros del auditorio **Tobías Lasser**, a mi equipo **Recreativo Ciencias**, todos mis compañeros de la “escuelita” de Geoquímica y aquellos que por alguna razón he olvidado mencionar.

Resumen

El presente trabajo se realizó con el objetivo de determinar las características químicas y mineralógicas de los cuerpos evaporíticos de la costa nor-central del estado Falcón. Se tomaron muestras de sedimentos, salmueras y sales en las salinas de Bajarigua y Las Cumaraguas ubicadas en la Península de Paraguaná y en la planicie costera del área de influencia del delta del río Mitare. En función de la naturaleza del tipo de muestra se aplicaron distintas metodologías experimentales. En el caso de sedimentos y sales, se realizó un análisis de DRX para establecer la mineralogía predominante en las muestras de estudio. Por su parte, las muestras de salmueras fueron sometidas a la determinación de alcalinidad por el método de Gran, sólidos totales disueltos (STD) y densidad por gravimetría. Este tipo de muestras en conjunto con una alícuota de sales disueltas fueron analizadas por las técnicas de EEO-ICP, EEA-llama y cromatografía iónica para la determinación de cationes (Ca, B, Sr, Na y K) y aniones (SO_4^{-2} y Cl^-) respectivamente. Con los datos obtenidos se elaboraron diagramas ternarios para la clasificación de las salmueras, diagramas interelementales para analizar el comportamiento de los solutos durante el proceso evaporativo y fueron determinados los índices de saturación con el programa de modelado geoquímico PHREEQC *interactive*. Al integrar resultados se obtuvo que el proceso determinante en la configuración de las características químicas y mineralógicas de las salinas de Las Cumaraguas y la planicie costera del delta del río Mitare, es fundamentalmente la evaporación restringida de las aguas del mar Caribe y el Golfete de Coro respectivamente. Éstas se clasifican como *sabkhas* costeros, cuya composición mineralógica está dominada principalmente por halita y yeso y sus salmueras se catalogan químicamente como Na-(Mg)-Cl-(SO_4), con componente Na-(Mg)-Cl en el caso de la planicie costera. Como consecuencia de su origen común (marino), las salinas de Las Cumaraguas y la planicie costera, presentan semejanzas en cuanto al proceso evolutivo de sus salmueras. En contraparte, la salina de Bajarigua se distingue ampliamente de las antes mencionadas, debido a que genéticamente esta se asocia a un marco geomorfológico e hidrológico particular. La misma se clasifica como un *sabkha* tipo playa de descarga debido a su carácter continental y a la influencia que tienen las aguas superficiales, asociadas a períodos de lluvia, y las aguas subterráneas en sus características. Químicamente su salmuera se clasifica como Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO_4) y Na-(Ca)-(Mg)-Cl, en donde se favorece la precipitación de Carbonatos (calcita y dolomita) y yeso a medida que avanza el proceso de evolución de la evaporación en las mismas. Adicionalmente en este sistema se obtuvieron fases minerales como halita, cuarzo, caolinita y albita, que son parte de los rasgos sedimentarios de la cuenca.

INDICE

Contenido	Pág.
INTRODUCCION	1
<i>Objetivos</i>	2
<i>Objetivo General</i>	2
<i>Objetivos Específicos</i>	3
<i>Justificación</i>	3
REVISION BIBLIOGRAFICA	5
<i>Evaporitas</i>	5
<i>Relación entre el Clima, tectónica y ambientes evaporíticos</i>	5
<i>Sabkhas</i>	9
<i>Equilibrios en ambientes evaporíticos</i>	14
<i>Química de los ambientes salinos</i>	17
Origen de la variabilidad composicional	19
Evolución de las salmueras	22
Salmueras Marinas	23
Salmueras no marinas	27
Comportamiento general de los solutos	31
Procesos Postdepositacionales	32
<i>Zona nor-central del estado Falcón</i>	34
Clima	35
Marco Geológico Regional	36
Geología Local	40
<i>Antecedentes</i>	46
METODOLOGIA	53
Etapa de Pre-campo	54
Etapa de campo	54
Etapa de Laboratorio	57
Tratamiento de datos	59
PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
Descripciones de campo	61
Análisis mineralógico	67
Determinaciones químicas	68
Graficas de clasificación de las salmueras	72
Relaciones interelementales	76
Índices de saturación de minerales	84
Integración de resultados	87
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	97
APÉNDICES	102

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura. 1 Corte longitudinal de la atmosfera terrestre, mostrando las principales celdas de circulación de aire. Obsérvese los cinturones de aire seco descendiendo 30° al norte y sur del ecuador	7
Figura. 2 Controles locales de aridez A) Desierto en sombra orográfica producto de la presencia de montañas. B) Desiertos costeros producto de surgencias de agua frías	9
Figura. 3 Corte longitudinal esquemático de los diferentes ambientes salinos	10
Figura. 4 Sabkhas de Arabia Saudita al sureste de Damman	12
Figura. 5 Salar de Uyuni, Altiplano Central, Bolivia	13
Figura. 6 Lago MacLeod, Australia del este	14
Figura. 7 Ilustración esquemática de las zonas en un Sabkha	15
Figura. 8 Componentes del balance de masa en un sabkha costero	17
Figura. 9 Esquema de clasificación de salmueras en términos de los cationes y aniones mayoritarios	18
Figura.10 Masas acumulativas de minerales precipitados y reabsorbidos a medida que avanza la evaporación y Secuencia de evaporación del agua de mar mostrando aumento de la densidad y cambios en las proporciones de algunos iones.	25
Figura. 11 Efecto de la variación de la descarga en proporciones iónicas y la paragénesis mineral a partir de una salmuera marina en función del volumen evaporado de la cuenca	27
Figura. 12 Diagrama de flujo de la evolución de las salmueras	30
Figura. 13 Gráficos esquemáticos de las curvas de comportamiento de los solutos en salmueras de cuencas cerradas	32
Figura 14 Fotografía satelital del área de estudio	34
Figura 15 Clasificación del clima del estado Falcón	35
Figura.16 Mapa paleogeográfico de la cuenca de Falcón durante el Mioceno inferior	38
Figura.17 Tabla de correlación de las unidades estratigráficas de la cuenca de Falcón de Oeste a Este	39
Figura.18 Mapa geologico, hoja (6252-III) de la región de Paraguaná	41
Figura.19 Mapa geológico de la cuenca del río Mitare	45
Figura.20 Ubicación de los cuerpos de Salinas identificados por Mendi y Rodríguez (2005) y Laguna Evaporítica y salina reportada por Rivas y Rojas (1997)	46
Figura. 21 Esquema de la metodología utilizada en el proyecto	53
Figura. 22 Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.	56
Figura. 23 Salina Las Cumaraguas	62
Figura. 24 Salina de Bajarigua	63
Figura. 25 Observaciones de campo, salina de Bajarigua.	64

Figura. 26	Campos de dunas en la zona proximal al delta del río Mitare	65
Figura. 27.	Imágenes de costras salinas en la planicie costera	65
Figura. 28	Planicie costera durante campaña de muestreo	66
Figura. 29	Porcentaje de error balance iónico de las muestras estudiadas	69
Figura. 30	Relación entre cationes y aniones de muestras de salmueras	68
Figura. 31	Relación conductividad teórica vs conductividad de campo	70
Figura. 32	Relación conductividad teórica vs conductividad de campo	75
Figura 33.	Grafico Na vs Cl	76
Figura 34.	Grafico ALK vs Cl	78
Figura 35.	Grafico Ca vs Cl	78
Figura 36.	Grafico SO ₄ vs Cl	80
Figura 37.	Grafico K vs Cl	81
Figura 38.	Grafico Mg vs Cl	82
Figura 39.	Grafico Sr vs Cl	83
Figura 40.	Grafico Na/Cl vs Cl	85
Figura 41.	Grafico Na/K vs Cl	85
Figura 42.	Índices de saturación para fases minerales más comunes en salmueras estudiadas.	87
Figura 43.	Modelo de evolución de las salmueras de la salina de Bajarigua.	91

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PAG
Tabla. 1 Minerales evaporíticos más comunes	6
Tabla. 2 Constituyentes disueltos mayoritarios en las aguas naturales	21
Tabla. 3 Clasificación basada en la salinidad de la paragénesis mineral y propiedades de las salmueras, basadas en agua de mar concentrada.	24
Tabla. 4 Tipos de salmueras y minerales asociados.	28
Tabla. 5 Leyenda de puntos de muestreo y muestras recolectadas	55
Tabla. 6 Resultados análisis mineralógicos.	67
Tabla. 7 Parámetros fisicoquímicos, y determinaciones químicas muestras de salmueras analizadas	71
Tabla. 8 Etiqueta Química muestras	74
Tabla. 9 Resumen de las características de las zonas estudiadas	89
Tabla 10. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEO-IAP	102
Tabla 11. Longitudes de onda utilizadas en el análisis de EEO-IAP	102
Tabla 12. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEA-llama	103
Tabla. 13 Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de Cromatografía iónica	103
Tabla 14. Límites de detección elementos analizados	104
Tabla 15. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de Difracción de Rayos X (Bruker Advance D8)	104
Tabla. 16 Índices de saturación de minerales, obtenidos mediante el programa PHREEQC interactive.	112
Tabla 17. Composición química de las costras salinas analizadas.	113



INTRODUCCION

Los sistemas evaporíticos son manifestaciones sedimentarias encontradas generalmente en las zonas áridas o semiáridas del planeta (Yechieli y Wood, 2002). El principal factor para la formación de estas acumulaciones es que la evaporación de las aguas ricas en iones, también conocidas como salmueras, exceda la recarga (Warren, 2010). Entre los minerales característicos de estos ambientes se puede mencionar calcita, yeso, silvita, halita, anhidrita, epsomita, para nombrar algunos. Estos ambientes salinos son conocidos con diversos nombres dependiendo de la cultura de la población adyacente a la zona de su formación, son ejemplos de estas denominaciones: sabkha, sebkhah, salinas, salares, saladas, playas (Yechieli y Wood, 2002). Las zonas áridas donde se desarrollan estos ambientes cubren aproximadamente un 40 % de la superficie terrestre en la actualidad (Bloom, 1998).

El estudio de las evaporitas en las áreas de la Geología y la Geoquímica es ampliamente utilizado como fuente de información sobre la historia sedimentaria, ambientes depositacionales e indicadores paleoclimáticos. En la industria petrolera su estudio tiene gran importancia debido a su acción como roca sello de los yacimientos y las consecuencias estructurales que estas acumulaciones pueden ocasionar al formar diapiros. Particularmente los depósitos salinos y las salmueras asociadas a estas zonas áridas son de gran importancia económica, ya sea por la explotación de sales para el consumo humano, su utilización como materia prima para diversos procesos industriales o acumulaciones importantes de elementos como litio y tungsteno (Warren, 2010). También tienen una gran importancia en la evaluación de posibles fuentes de recursos hídricos ya que estas zonas representan la zona de descarga o nivel base de las aguas subterráneas y superficiales. (Yechieli y Wood, 2002). Adicionalmente, una diversa flora y fauna se sustenta en estos ecosistemas (por ejemplo, mangles, algas, aves, etc.)



Venezuela posee alrededor de 4006 Km de zonas costeras, de las cuales el 35% aproximadamente presenta condiciones ambientales áridas tropicales o semiáridas. En el caso particular del estado Falcón, un 60% de su territorio se caracteriza por presentar estas condiciones climáticas, las cuales asociadas a sus características hidrológicas, promueven la formación de sistemas evaporíticos, desarrollados en las zonas costeras del estado principalmente y su explotación representa una de las actividades económicas propias de la región como es el caso de las salinas de Las Cumaraguas, la única que se explota de forma industrial en la zona, las restantes son explotadas de forma artesanal.

A causa de la fragilidad ambiental que presentan los ambientes costeros y la sensibilidad que estos presentan a la modificación por las actividades antrópicas y el escaso conocimiento que en la actualidad se tiene acerca de la composición, procesos y dinámica de los ambientes salinos en las costas de Falcón, es pertinente su estudio con un criterio geoquímico. Este trabajo de investigación se propone aportar una serie de datos que permitan complementar y ampliar el conocimiento de la geoquímica e hidrología actual de la zona de estudio.

Es por las razones aquí mencionadas que se hace necesario estudiar los diferentes cuerpos evaporíticos de la región desde el punto de vista geoquímico, tomando en cuenta la composición química y mineralógica de los cuerpos de sales a estudiar, así como la dinámica hidrológica y sedimentaria. En particular en el área de la Geoquímica no se han encontrado trabajos que se ocupen del estudio de las formaciones salinas de la zona o de la dinámica hidrogeoquímica asociada a ellos. Para dar solución a este planteamiento se han propuesto los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Establecer las características químicas y mineralógicas de los cuerpos evaporíticos ubicados en las salinas Las Cumaraguas, salina de Bajarigua y la planicie costera del río Mitare, ubicados al norte del estado Falcón.



OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las fases minerales presentes en los diferentes cuerpos evaporíticos ubicados principalmente en la línea de costa oriental de la península de Paraguaná, así como otras manifestaciones en la planicie costera con influencia del delta del río Mitare.
- Establecer la composición química de las salmueras de las zonas de estudio.
- Clasificar y diferenciar los diferentes cuerpos en base a su composición química y características geomorfológicas.
- Comparar y correlacionar los diferentes cuerpos salinos estudiados, en atención a su contexto geográfico y sedimentario.

Justificación

La importancia del presente trabajo de investigación se encuentra fundamentada en los aportes sobre la comprensión desde el punto de vista geoquímico de los procesos costeros del estado Falcón. De igual manera, el conocimiento de los diferentes parámetros químicos determinados en estos ambientes aportará información de interés para el establecimiento de las variaciones ambientales que puedan estar asociadas a la acción del hombre. En este trabajo se presenta la oportunidad de establecer comparaciones entre una serie de ambientes evaporíticos distintos desde el punto de vista hidrogeológico, o desde la modificación del paisaje por parte del hombre para el aprovechamiento de los recursos minerales que pueden obtenerse en estos ambientes. Tal es el caso de la salina de Las Cumaraguas, que presenta una serie de acumulaciones evaporíticas similares a las encontradas a lo largo del istmo de los Medanos de Coro que no han sido alteradas por el hombre. De igual manera se tiene la oportunidad de estudiar y comparar sistemas cuyo origen se encuentra relacionado en su totalidad a la evaporación de agua de mar, como lo son los casos antes mencionados y sistemas con aportes de aguas fluviales o posiblemente subterráneas como es el caso de las acumulaciones de la planicie



fango costera del río Mitare y la salina de las Bajarigua ubicada en la zona norte de la región de Paraguaná.

A continuación se desarrollan los distintos aspectos teóricos que sirven de sustento para el presente trabajo de investigación y que son herramientas para el desarrollo e interpretación de los resultados.



REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta sección se realizara una revisión bibliográfica de los conceptos teóricos básicos necesarios para la comprensión y realización de este trabajo de investigación y está dividida en generalidades sobre las evaporitas, geoquímica de las evaporitas, la zona de estudio, geología regional y local del estado Falcón y antecedentes.

Evaporitas

Son rocas compuestas de sales precipitadas por la evaporación solar de salmueras en la superficie o cercanas a ella (Warren 2006). Las evaporitas se definen como aquellos minerales producidos a partir de una solución salina producto de la evaporación parcial o total del agua (Blatt, 1992). Las salmueras que originan estos cuerpos pueden ser de origen marino, no marinas o híbridas, producto de la mezcla de aguas marinas y aguas dulces. Al ser necesario un ambiente árido y que la pérdida de agua exceda la entrada para que ocurra su acumulación, la depositación y diagénesis de las evaporitas es mucho más dependiente del clima que en el caso de los sedimentos siliciclasticos y carbonaticos (Warren 2006). Todas las sales evaporíticas son sales iónicas y contienen mayoritariamente los iones Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , en proporciones variables junto a otros constituyentes menos comunes como B, Ba^{2+} , Sr^{2+} , Br^- , I^- (tabla 1). La mineralogía y el orden en que precipitan las sales van a estar condicionadas por las características químicas de la salmuera que las origine (Warren 2006).

Relación entre el clima, tectónica y ambientes evaporíticos

Los depósitos evaporíticos están dispersos irregularmente a lo largo de todo el tiempo geológico, pero representan sólo alrededor de 1% de las rocas fanerozoicas, siendo el Pérmico el periodo de mayor abundancia. Posiblemente estas etapas de gran abundancia reflejan tiempos en los cuales los continentes se han visto concentrados, producto de la deriva continental, en el cinturón comprendido entre los 30°N y 30 °S de latitud (Blatt, 1992).



Tabla1. Minerales evaporíticos más comunes (tomado de Warren, 2006).

Mineral	Formula	Mineral	Formula
Anhidrita	CaSO ₄	Leonardita	MgSO ₄ ·4H ₂ O
Antarcticita	CaCl ₂ ·6H ₂ O	Leonita	MgSO ₄ ·K ₂ SO ₄ ·4H ₂ O
Glaserita	K ₂ SO ₄ · ¹ / ₂ H ₂ O _{nn}	Loevita	2MgSO ₄ ·2Na ₂ SO ₄ ·5H ₂ O
Aragonito	CaCO ₃	Calcita-Mg	(Mg _x ,Ca _{1-x})CO ₃
Bassanita	CaSO ₄ · ¹ / ₂ H ₂ O	Magnesita	MgCO ₃
Bischofita	MgCl ₂ ·6H ₂ O	Meyeorfita	Ca ₂ B ₅ O ₁₁ ·7H ₂ O
Bloedita	Na ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·4H ₂ O	Mirabilita	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
Borax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10 H ₂ O	Nahcolita	NaHCO ₃
Boracita	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ ·Cl	Natron	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O
Burkeita	Na ₂ CO ₃ ·2Na ₂ SO ₄	Nitratita	NaNO ₃
Calcita	CaCO ₃	Nitre	KNO ₃
Carnalita	MgCl ₂ ·KCl·6H ₂ O	Pentahidrita	MgSO ₄ ·5H ₂ O
Colemanita	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	Pirsonita	CaCO ₃ ·Na ₂ CO ₃ ·2H ₂ O
Darapskita	Na ₃ (SO ₄)(NO ₃)·H ₂ O	Polihalita	2CaSO ₄ ·MgSO ₄ ·K ₂ SO ₄ ·H ₂ O
Dolomita	Ca _(1+x) Mg _(1-x) (CO ₃) ₂	Proberita	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O
Epsomita	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Priceita	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O
Ferronatrita	3NaSO ₄ ·Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·6H ₂ O	Rineita	FeCl ₂ ·NaCl·3KCl
Gaylusita	CaCO ₃ ·Na ₂ CO ₃ ·5H ₂ O	Sanderita	MgSO ₄ ·2H ₂ O
Glauberita	CaSO ₄ ·Na ₂ SO ₄	Schoenita	MgSO ₄ ·K ₂ SO ₄ ·6H ₂ O
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Shortite	2CaCO ₃ ·Na ₂ CO ₃
Halita	NaCl	Silvita	KCl
Hankesita	9Na ₂ SO ₄ ·2Na ₂ CO ₃ ·KCl	Singenita	CaSO ₄ ·K ₂ SO ₄ ·H ₂ O
Hexahidrita	MgSO ₄ ·6H ₂ O	Tachidrita	CaCl ₂ ·2MgCl ₂ ·12H ₂ O
Howlita	H ₅ Ca ₂ SiB ₅ O ₁₄	Ternadita	Na ₂ SO ₄
Ikaita	CaCO ₃ ·6H ₂ O	Termonatrita	Na ₂ CO ₃ ·3H ₂ O
Inyoita	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·13 H ₂ O	Tincalconita	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O
Kainita	4MgSO ₄ ·4KCl·11H ₂ O	Trona	NaHCO ₃ ·Na ₂ CO ₃
Kemita	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	Tichita	2MgCO ₃ ·Na ₂ CO ₃ ·5H ₂ O
Kieserita	MgSO ₄ ·H ₂ O	Ulexita	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O
Langbeinita	2MgSO ₄ ·K ₂ SO ₄	Vanthoffita	MgSO ₄ ·3Na ₂ SO ₄

Debido a la gran dependencia y relación de las condiciones climáticas asociadas a la formación de estos cuerpos, son utilizados para reconstruir la distribución de los continentes a través del tiempo geológico. Un gran número de investigadores ha publicado mapas mostrando las reconstrucciones paleo geográficas utilizando evaporitas antiguas, corales y depósitos de carbón como indicadores de las posiciones durante el tiempo geológico de los cinturones climáticos ecuatoriales, tropicales y subtropicales (Hardie, 1991; figura 1). Sin embargo, hay otros factores que pueden producir las condiciones para la formación de las evaporitas, por lo cual se ha reconsiderado la fiabilidad de las evaporitas como indicadores de paleolatitudes y cinturones climáticos globales (Warren, 2006).

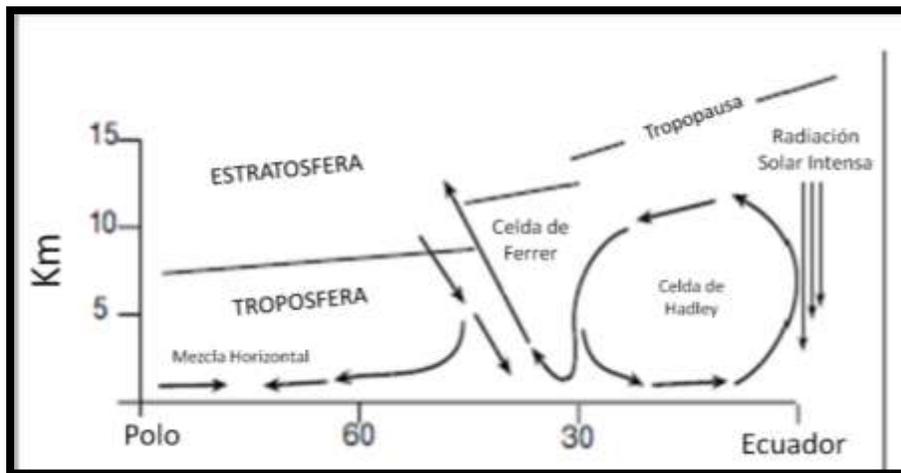


Fig. 1. Corte longitudinal de la atmósfera terrestre, mostrando las principales celdas de circulación de aire. Tomado y modificado de Warren (2006).

Sin duda las latitudes centrales del planeta han constituido una importante zona climática para la acumulación de evaporitas a través del tiempo geológico, pero las acumulaciones actualmente activas no están restringidas a estas zonas tropicales, pudiendo ser encontradas en latitudes templadas tan altas como 55° (Hardie, 1991). Las acumulaciones evaporíticas actuales tienen lugar en diversas situaciones, relacionadas siempre a las zonas de descarga de aguas superficiales



en regiones semi-áridas a desiertos hiperáridos. Las evaporitas costeras aparecen en las costas de estos ambientes, de igual manera se puede encontrar la precipitación de lagos salinos y eflorescencias en los desiertos polares en la Antártida (Warren, 2006), pero los volúmenes de sal creados en estas regiones frías son insignificantes en comparación con las formadas en las zonas áridas más cercanas al ecuador.

La tectónica también juega un papel importante en la ocurrencia de los ambientes evaporíticos, producto de las sombras orográficas y las evaporitas estratificadas, las cuales nos muestran satisfactoriamente la asociación a largo plazo entre sedimentación y clima en contextos extensionales o compresivos y que muestran una respuesta climática independiente de si la tierra se encuentra en un modelo climático de tipo invernadero o glacial (Hay, 1996). En zonas de “rifting” continental los primeros materiales que se depositan en las cuencas que se forman son evaporitas producto de la evaporación del agua de mar que ha invadido la zona de rift y que posteriormente podemos encontrarlas en las zonas de margen pasivo como ocurre en Brasil. En el caso de ambientes compresivos se puede mencionar el efecto de “sombra orográfica” producido por las montañas que actúan como una trampa para la humedad y las lluvias (figura 2A). Adicionalmente a estos efectos derivados de la tectónica, el efecto producido por la surgencia de cuerpos de aguas frías, que al concentrarse paralelas a la costa ocasionan una disminución de la evaporación y crean corrientes de aire frío que a medida que se mueven dentro del continente tienden a calentarse y desarrollan una capacidad mayor para absorber humedad que crearla (figura 2B). Lo anterior sugiere que las evaporitas antiguas pudieron verse afectadas por su ambiente tectónico al igual que las actuales, debido a ello se debe reconsiderar su uso para reconstrucciones de paleolatitudes y cinturones climáticos globales (Hardie, 1991).

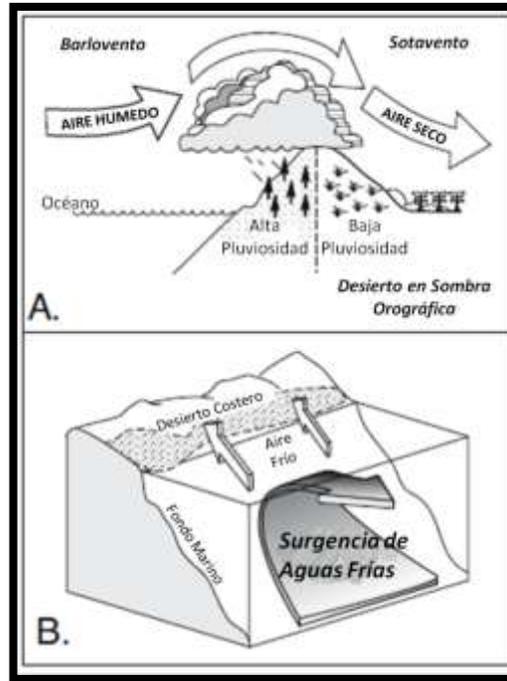


Fig. 2 controles locales de aridez A) Desierto en sombra orográfica producto de la presencia de montañas. B) Desiertos costeros producto de surgencias de agua frías. Tomado y modificado de Warren (2006).

Sabkhas

El término sabkha es una palabra árabe definida por Kinsman (1969) como una planicie salina cuya superficie está determinada por el nivel freático de las aguas subterráneas y que ocasionalmente puede estar inundada por agua. (Handford, 1981). También es definido como un sistema sedimentario regido por aguas subterráneas y caracterizado por sindeposición de minerales evaporíticos en la zona capilar, que precipitan en ambientes salinos marinos y continentales. (Warren y Kendall, 1985, citado por Warren, 2006)

A pesar de que las condiciones para su formación y los procesos hidrogeológicos son similares en todos los sabkhas donde se forman las evaporitas, éstos presentan diferencias en sus contextos sedimentarios e hidrológicos como pueden ser el aporte de agua marina, aguas meteóricas o subterráneas y que dominen procesos sedimentarios diferentes como pueden ser los procesos eólicos, procesos fluvio-lacustrinos o marinos.

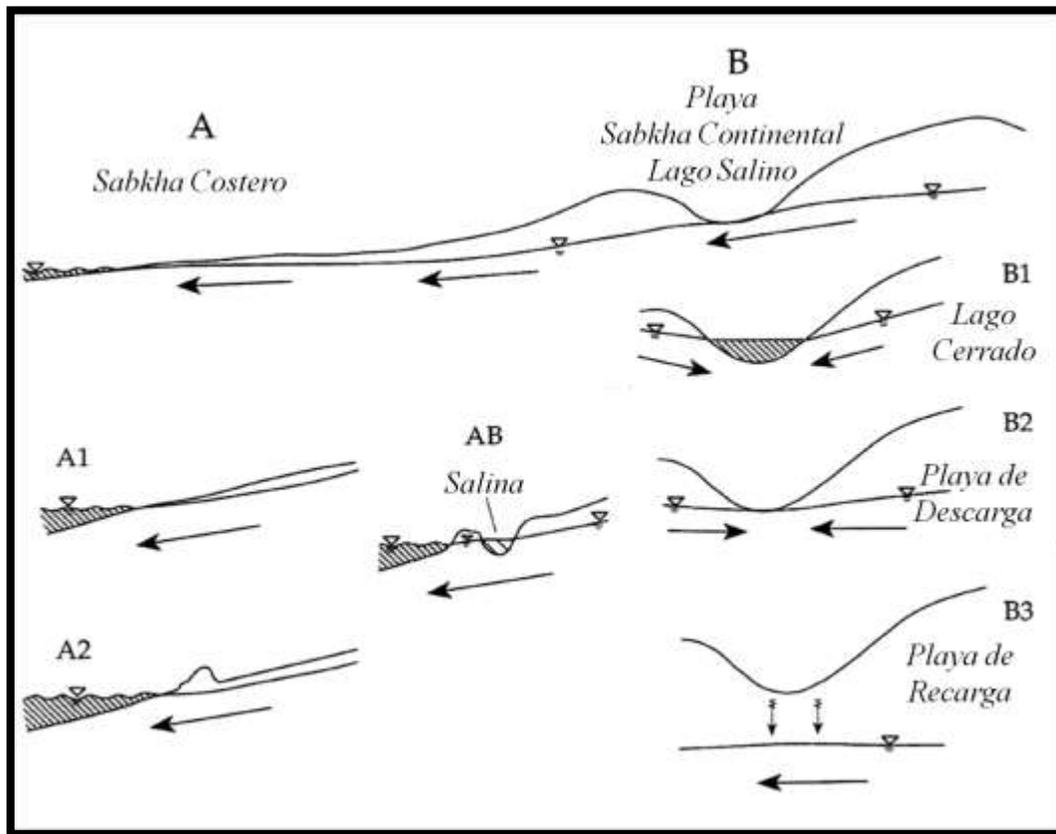


Fig. 3 Corte longitudinal esquemático de los diferentes ambientes salinos. Tomado y modificado de Yechieli y Wood (2002).

- Sabkha costero

En el ambiente costero existe una conexión hidráulica entre el agua de mar y el sabkha (Yechieli y Wood, 2002) (figura 3, A1). Una variante de este sistema ocurre



cuando se evita la entrada directa del agua de mar al sabkha producto de una barrera costera (figura 3, A2).

Generalmente el régimen hidrológico de estas áreas se encuentra dividido en dos partes principales: sabkha costero (marino) y sabkha continental (Robinson y Gunatilaka, 1991; Patterson y Kinsman, 1981, citado por Yechieli y Wood, 2002). La división entre las zonas mencionadas tiene lugar donde no se observa influencia marina alguna, por debajo del máximo nivel del mar durante el Holoceno (figura 8). El sabkha continental aquí mencionado es similar a la playa o sabkha continental descrito más adelante. Los sabkha continentales más estudiados y conocidos en la actualidad son los encontrados en las costas sur del Golfo Pérsico (Warren 2006).

- Playa o sabkha continental

Existen distintos tipos de sabkhas continentales o playas y su principal diferencia es la elevación de las aguas subterráneas en relación con la superficie de la playa (Rosen, 1994, citado por Yechieli y Wood, 2002) (Figura 3, B).

En las playas de descarga el límite capilar coincide con el nivel de la playa. A pesar de que el nivel puede variar estacionalmente, en promedio la profundidad del agua es menor que el grosor del límite capilar, la profundidad no es mayor de algunos metros dependiendo del tamaño intersticial de los poros. El factor más importante para la acumulación de evaporitas en las playas es que el nivel de las aguas subterráneas se encuentre cerca de la superficie. (Rosen, 1994). Éstas se encuentran en diversas partes del mundo como por ejemplo Australia, Estados Unidos e Irán.

Una playa de recarga se forma cuando la recarga a las aguas subterráneas es mayor que la descarga por lo cual no se acumulan evaporitas en la superficie (Rosen, 1994). Algunas pueden ser explicadas como remanentes de épocas donde los niveles de agua eran mayores y que luego mermaron debido a cambios climáticos, actividad tectónica o efecto antrópico (Yechieli y Wood, 2002). En

algunas pueden encontrarse evaporitas debido a la evaporación del agua superficial pero solo por cortos periodos de tiempo.

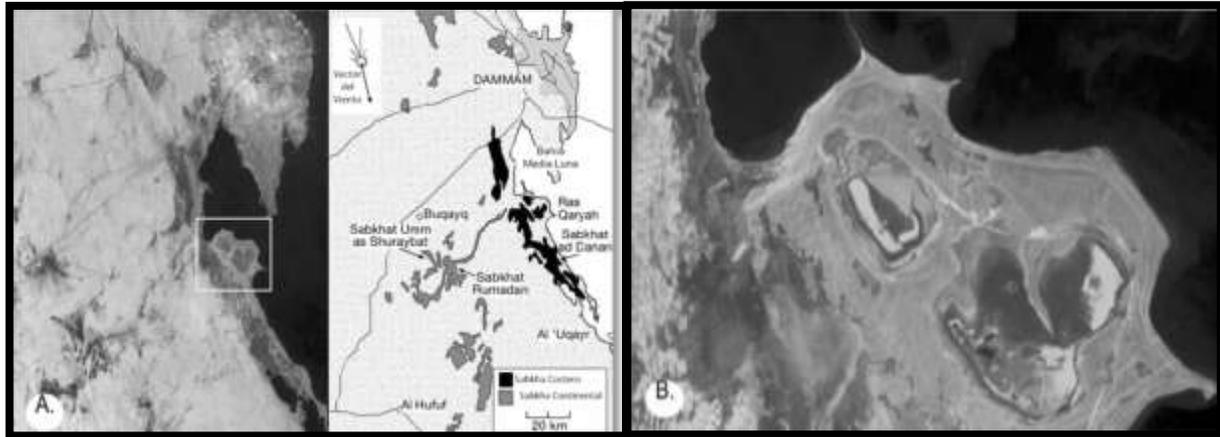


Fig. 4 Sabkhas de Arabia Saudita al sureste de Damman. A) Distribución de sabkhas costeros y continentales a lo largo de la costa de Damman. B) Vista de los sabkhas detrás de Ras Qaryah. Tomado y modificado de Warren (2006).

- Lago salino

Son playas donde el reservorio de aguas salinas abiertas se mantiene constante durante el desarrollo del mismo (Yechieli y Wood, 2002). En el caso de un lago terminal cerrado como el Mar Muerto, todas las aguas superficiales y subterráneas convergen hacia el lago y no hay escape de agua aunque generalmente presentan descarga a las aguas subterráneas.(figura 3, B1).

Los lagos terminales no mantienen un estado estacionario por un largo tiempo. Estos se mantienen activos generalmente por tectónica, que es responsable por la subsidencia continua que excede la depositación de sedimentos clásticos y químicos (Yechieli y Wood, 2002). Ejemplos de estos lagos son el Mar Muerto, el salar de Uyuni (fig. 5), el lago Asal en África.

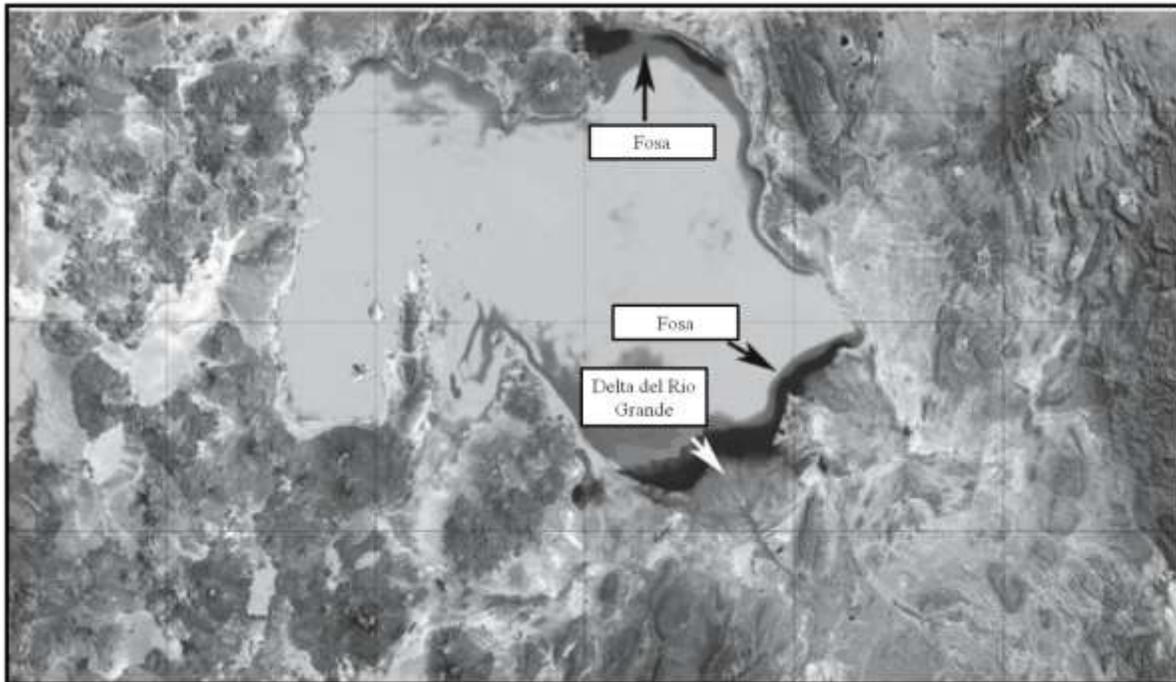


Fig. 5. Salar de Uyuni, Altiplano Central, Bolivia. Tomada y modificada de Warren (2006).

- Salina

Estas se refieren a cuencas evaporíticas en que las condiciones húmedas se mantienen la mayoría del tiempo (figura 3, AB). Estas presentan durante el año un lago perenne. Un tipo interesante de salina se presenta en las costas australianas donde se observan lagos salinos adyacentes al océano pero que no tienen conexión superficial con las aguas marinas, ya que se encuentran aisladas del mar. Estas son alimentadas por medio de aguas subterráneas e invasiones de agua oceánica (Warren y Kendal, 1985, citado por Yechieli y Wood, 2002). Al igual que los lagos salinos, las salinas no se mantienen en un estado estacionario ya que están llenas de sedimentos (químicos, aluviales o eólicos).

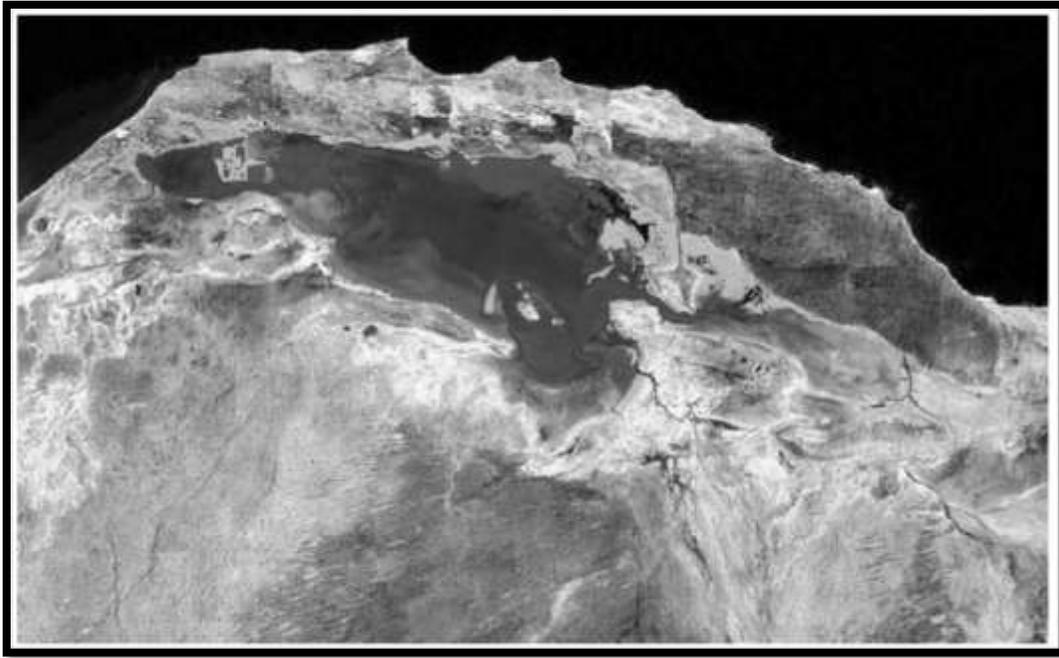


Fig. 6 Lago MacLeod, Australia del este. Salina más grande del mundo (imagen de Landsat cortesía de la NASA, tomada de Warren 2006).

Equilibrios en ambientes evaporíticos

Es sumamente importante el poder diferenciar entre las distintas fuentes de agua y solutos para poder comprender los distintos ambientes salinos (Yechieli y Wood, 2002). Las figuras 8 y 9 son representaciones esquemáticas de las distintas zonas encontradas en los sabkhas y de las posibles fuentes y pérdidas de agua y solutos en estos sistemas.

En los sabkhas podemos distinguir una serie de zonas importantes dentro del sabkha que serán las responsables de la recarga de agua y solutos, así como de la descarga. En estas zonas tomarán lugar los distintos procesos que tienen lugar en estos ambientes, produciendo la acumulación de las capas de sal (figura, 7).

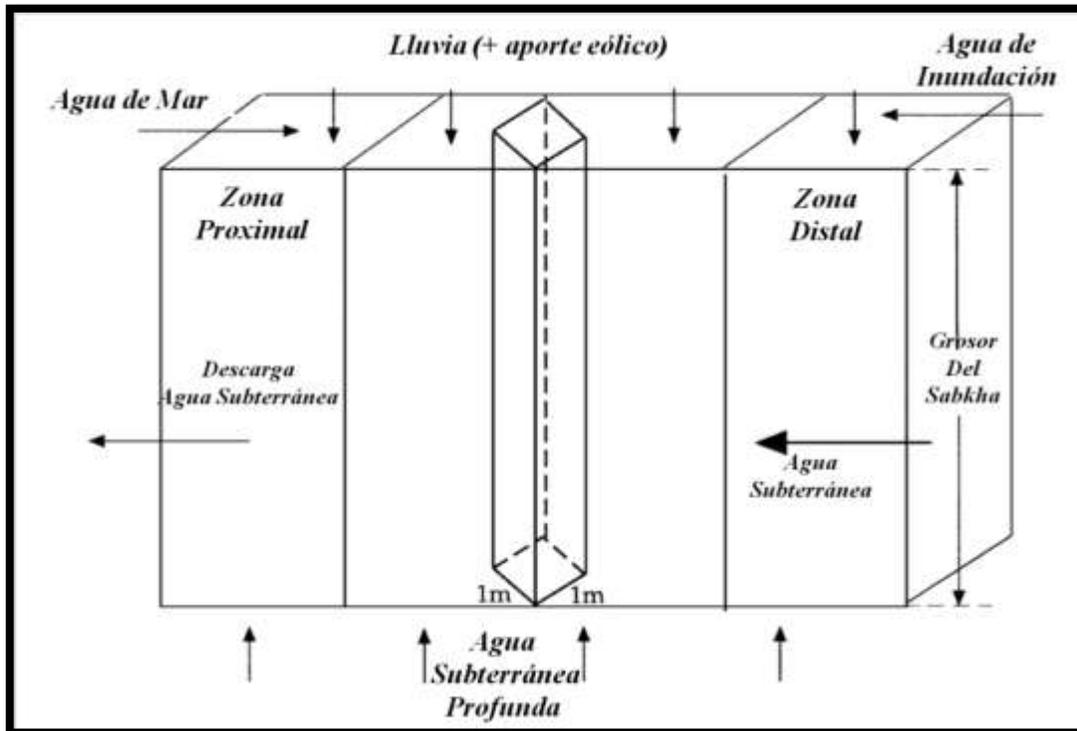


Fig. 7 ilustración esquemática de las zonas en un sabkha. Tomado de Yechieli y Wood (2002).

El modelo de equilibrio conceptual se puede resumir de la siguiente manera: las aguas subterráneas someras llegan al nivel del sabkha. Esto debido a que los sabkhas costeros representan generalmente las zonas regionales de descarga en los sistemas hidrológicos, de modo que pueden recibir los fluidos de los acuíferos suprayacentes de igual manera. En este caso las cuencas profundas pueden descargar a la base del sabkha. (Yechieli y Wood, 2002). Inundación por parte del agua de mar puede adicionar agua al sistema. Aguas meteóricas pueden ser añadidas al sistema directamente por la lluvia o escorrentía superficial y la remoción de agua puede ocurrir por descarga al mar y evapotranspiración.

La ecuación que describe el balance de masa de agua para un estado estacionario asociado con este modelo conceptual puede ser formulada de la siguiente manera, donde las dimensiones fundamentales son masa, longitud y tiempo.



$$Q_m = Q_r + Q_f + Q_{sw} + Q_{gs} + Q_{gd} - Q_e$$

Donde:

- Q_e = Evaporación neta
- Q_m = descarga promedio hacia el océano
- Q_r = Precipitación Promedio
- Q_f = Inundación terrestre promedio
- Q_{sw} = recarga promedio debido a inundación marina
- Q_{gs} = descarga promedio de aguas superficiales al sabkha.
- Q_{gd} = flujo promedio de aguas profundas

Los solutos en los sabkhas son derivados de la lluvia, el agua de mar, escorrentía, descarga de aguas subterráneas someras y profundas. Estos son perdidos por medio de la precipitación mineral, descarga al océano, conversión de líquido a gas y decaimiento radioactivo (Yecheili y Wood, 2002). También pueden perderse sólidos por medio de las interacciones agua-roca, el balance de la masa de solutos para un estado estacionario es el siguiente.

$$Q_m C_m = Q_r C_r + Q_f C_f + Q_{sw} C_{sw} + Q_{gs} C_{gs} + Q_{gd} C_{gd} - P - G \pm E$$

Donde:

- C_m = concentración promedio de solutos en descarga al mar
- C_r = concentración de solutos promedio en la lluvia
- C_{sw} = concentración promedio de inundación marina
- C_f = concentración promedio solutos de inundación por tierra
- C_{gs} = concentración de solutos en recarga de aguas subterráneas superficiales
- C_{gd} = Concentración de solutos aguas subterráneas profundas (M/L³)
- P = tasa de precipitación mineral e interacciones agua roca (M/T)
- G = tasa de conversión de soluto a gas y decaimiento radioactivo
- E = procesos eólicos y otras fuentes de erosión

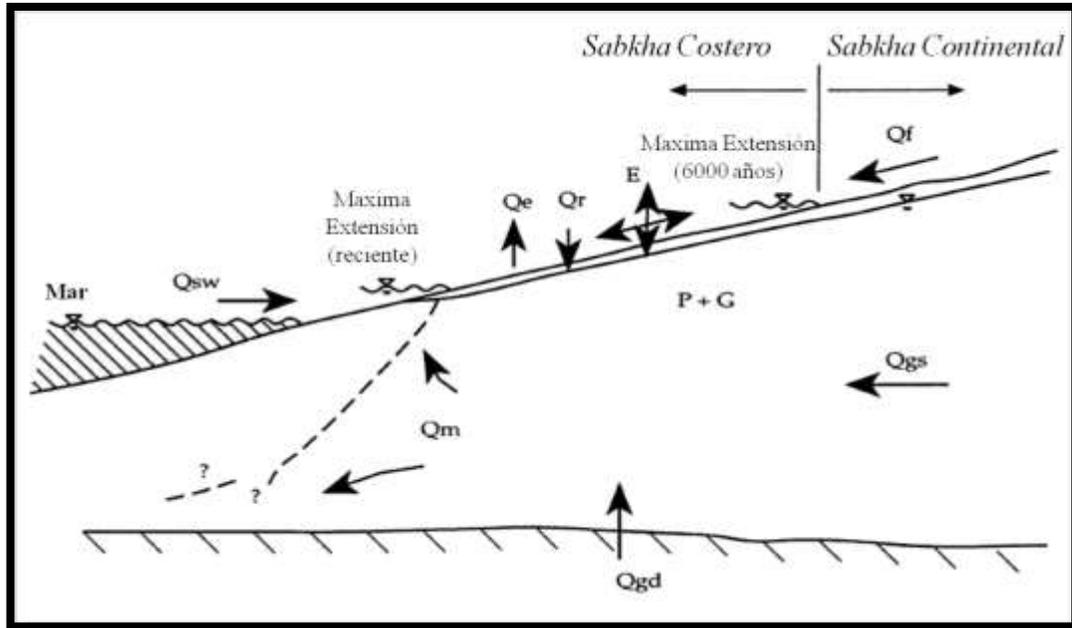


Fig. 8. Componentes del balance de masa en un sabkha costero. Tomado y modificado de Yechieli y Wood (2002).

Química de los ambientes salinos

Numerosos análisis sobre la composición química de las salmueras han sido llevados a cabo y publicados en diversas partes del mundo (Eugster y Hardie, 1978). Las salmueras de los ambientes salinos, al igual que las aguas de los ríos y manantiales del mundo, están dominadas por un pequeño número de solutos mayoritarios. Entre estos solutos más importantes se pueden mencionar, SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- . Adicionalmente debe tomarse en consideración que algunos depósitos son ricos en boratos y nitratos (Warren, 2010) y que la composición de las salmueras varía de un cuerpo a otro. Los equilibrios deben estudiarse en el sistema quinario estándar del agua de mar, (Na, K, Mg, Cl, SO_4), con la adición de Ca y $\text{HCO}_3\text{-CO}_3$. Una clasificación detallada basada en la combinación de Na y K es utilizada en base a la propuesta de Eugster y Hardie (1978), (fig.9). Para comparaciones generales se pueden distinguir cinco tipos de salmueras (ver tabla 4). Para discusiones detalladas de la evolución de las salmueras Na y K pueden ser tratados por separado, el SiO_2

debe ser adicionado así como, Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Sr^{2+} , Li^+ , y cualquier otro ión que se considere de relevancia (Eugster 1980). Adicionalmente para su clasificación Eugster y Hardie (1978) proponen un esquema de nomenclatura con los siguientes parámetros:

- Iones mayoritarios en una concentración menor a 5% molar de los totales no son utilizados en el nombre asignado.
- Iones presentes en >5% pero <25% son representadas en paréntesis
- Iones en >25% mol son mostrados en orden de abundancia
- Aniones y cationes son gráficos por separado pero unidos para el nombre final, con los cationes siendo mencionados primero.

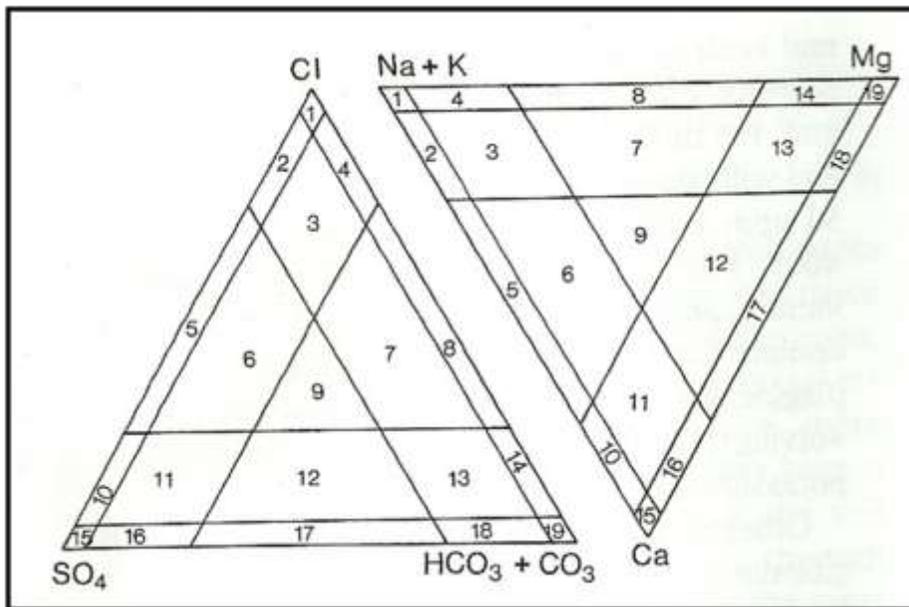


Fig. 9. Esquema de clasificación de salmueras en términos de los cationes y aniones mayoritarios. Concentraciones en %mol. Notación utilizada: Aniones: 1, Cl; 2, Cl-(SO₄); 3, Cl-(SO₄)-(CO₃); 4, Cl-(CO₃); 5, Cl-SO₄; 6, Cl-SO₄-(CO₃); 7, Cl-CO₃-(SO₄); 8, Cl-CO₃; 9, Cl-SO₄.CO₃; 10, SO₄-Cl; 11, SO₄-(CO₃)-(Cl); 12, SO₄-CO₃-(Cl); 13, CO₃-(SO₄)-(Cl); 14, CO₃-(Cl); 15, SO₄; 16, SO₄-(CO₃); 17, SO₄-CO₃; 18, CO₃-SO₄; 19, CO₃. Cationes: 1, Na; 2, Na-(Ca); 3, Na-(Ca)-(Mg); 4, Na-(Mg); 5, Na-Ca; 6, Na-Ca-(Mg); 7, Na- Mg-(Ca); 8, Na-Mg; 9, Na-Ca; 10, Ca-(Na); 11, Ca-(Mg)-(Na); 12, Ca-Mg-(Na); 13, Mg-(Ca)-(Na); 14, Mg-(Na); 15, Ca; 16, Ca-(Mg); 17, Ca-Mg; 18, Mg-(Ca); 19, Mg. Tomado y modificado de Eugster y Hardie (1978).



Origen de la variabilidad composicional

Por medio de un modelo de computadora Hardie y Eugster (1970) fueron capaces de demostrar que la clave de la gran variabilidad de la composición química de las salmueras en diferentes cuencas se encontraba en la composición química de las aguas entrantes en ellas (Eugster, 1980). En tal sentido, el precipitado final, producto de la evaporación en una cuenca particular, se encuentra definido desde el momento en que las aguas entrantes han adquirido sus solutos (Eugster, 1980).

El agua de lluvia y las reacciones de meteorización son las principales fuentes de solutos. El agua de lluvia también puede contribuir con cada uno de los siete solutos principales en las aguas, exceptuando la sílice, y su mayor contribución será de los iones Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- (Eugster, 1980). La cantidad que aportará es muy variable y dependiente de los aerosoles marinos y la contaminación.

Una gran cantidad de reacciones de meteorización contribuye a la carga de solutos en las aguas. Entre las más efectivas está la disolución congruente de minerales solubles como yeso o halita, la cual puede llevar a concentraciones muy altas y es un importante proceso en el reciclado de las evaporitas (Eugster, 1980). La calcita también se disuelve de manera congruente, pero su disolución es extremadamente dependiente de la presión de CO_2 .

La solubilidad del cuarzo es muy baja, 6,5 ppm a pH menores de nueve, pero puede alcanzar los 100 ppm en pH mayores (Eugster y Hardie, 1978). Para el resto de los silicatos es más compleja, ya que la mayoría de las reacciones de disolución son incongruentes, ya que involucran la precipitación de otro silicato como minerales de arcilla (Eugster, 1980). Por ejemplo, los feldespatos al hidrolizarse forman minerales de arcillas y en dicho proceso las aguas son cargadas con Na^+ , HCO_3^- y sílice. Otros silicatos producen la adición de iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , pero las aguas se encuentran dominadas por el bicarbonato, proveniente de la atmósfera o por procesos en el suelo (Eugster, 1980).



Las reacciones redox también son importantes durante los procesos de meteorización, en términos de disolución de silicatos de hierro y oxidación de sulfuros. En ambientes oxidantes el hierro se comporta como un elemento inmóvil, precipitando en diversas fases minerales. La oxidación del ión sulfuro representa una fuente significativa de acidez en las aguas; esta reacción se ve favorecida por la acción bacteriana (Eugster, 1980).

En resumen, la composición química de las aguas entrantes a las cuencas depende principalmente de las rocas y minerales presentes en contacto con las aguas (Warren, 2006). Rocas ígneas y metamórficas producen aguas ricas en sílice y Ca-Na-HCO₃, a menos que se encuentren sulfuros que contribuyan con SO₄²⁻. Las calizas forman aguas ricas en Ca-HCO₃ y pobres en sílice. Las rocas máficas y ultramáficas producen aguas alcalinas Mg-HCO₃.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que el conocer detalladamente las rocas que están siendo afectadas en las cabeceras de los ríos o que se encuentran en contacto con las aguas subterráneas, haría posible la predicción de la composición química de las aguas entrantes en los sabkhas. Pero usualmente se aplica el caso inverso, utilizando la composición química de las aguas como trazadores para las reacciones de meteorización. Claramente no es necesario que todos los solutos provengan de interacciones con rocas cercanas a la superficie, algunas fuentes termales se pueden asociar a sistemas hidrotermales de gran extensión y profundidad y que pueden actuar como fuentes de constituyentes de gran importancia como B o Li (Eugster, 1980)



Tabla 2. Constituyentes disueltos mayoritarios en las aguas naturales. Datos reportados por Hem (1985). Tomado y modificado de Bronlow (1996).

Elemento	Especies disueltas más comunes	Rango de Concentración (mg/L)	Fuente Geológica
Silicio	H_4SiO_4	1-30 (SiO_2)	Meteorización de silicatos
Aluminio	$Al^{3+}, Al(OH)_4^-$	0-0.05 (Al)	Meteorización de silicatos
Hierro	Fe^{+2}, Fe^{+3} , Hidroxido férrico coloidal	0-15	Silicatos de hierro, óxidos de hierro, sulfuros
Calcio	$Ca^{2+}, CaSO_4$	4-400 (Ca^{2+})	Meteorización de silicatos y carbonatos
Magnesio	$Mg^{2+}, MgSO_4$	1-1350 (Mg^{2+})	Meteorización de silicatos y carbonatos
Sodio	Na^+	0-10500	Meteorización de silicatos y sales
Potasio	K^+	0-380	Meteorización de silicatos
Carbono	$HCO_3^-, CO_3^{2-}, H_2CO_3, CO_2$	0-1000 (HCO_3^-)	Atmosfera, materia orgánica.
Sulfuro	SO_4^{2-}, H_2S, HS^-	0-2700 (SO_4^{2-})	Meteorización sulfuros
Cloro	Cl^-	1-19000	Meteorización rocas sedimentarias, sales
Flúor	F^-	0-10	Meteorización de minerales
Nitrógeno	NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+	0-15 (NO_3^-)	Atmósfera, desechos orgánicos, suelos
Materia orgánica	Variedad de especies	0.1-10	Actividad biológica
Oxígeno	O_2	0-12	Atmósfera, fotosíntesis



Evolución de las salmueras

En los ambientes de sabkhas todas las aguas superficiales y cercanas a la superficie son sujetas a concentración por evaporación. La evaporación capilar es importante si las aguas subterráneas están lo suficientemente cerca de la superficie y son responsables de la formación de las capas superficiales de sales características de estos ambientes (Eugster, 1980). La evaporación de las aguas aumenta la carga de solutos en las aguas y eventualmente debe llevar a la precipitación mineral. El análisis de los resultados obtenidos en un grupo de ambientes evaporíticos llevó a Eugster y Jones (1979) a proponer 5 procesos principales que afectan la composición química de las salmueras durante el proceso de evaporación y formación de acumulaciones evaporíticas.

Precipitación de minerales: Representa la mayor pérdida de solutos en los ambientes evaporíticos (Yechieli y Wood, 2002). La precipitación secuencial de acuerdo al grado de evaporación, modificará la composición de la salmuera residual, dependiendo de la composición original y los minerales específicos que precipitan (Yechieli y Wood, 2002).

Procesos de disolución-precipitación: Durante su recorrido el agua puede interactuar con las rocas circundantes y disolver parte de ellas y reprecipitar alguna fase mineral (Yechieli y Wood, 2002). Las costras eflorescentes y las capas de suelo representan también otro proceso que afecta la evolución de las salmueras, aumentando la carga de solutos (Eugster, 1980), al pasar el agua por los suelos y remover las fases minerales más solubles como lo son halita, carbonatos y yeso. Uno de los procesos de este tipo comúnmente descritos es el proceso de dolomitización, donde la calcita es disuelta y se produce la precipitación de la dolomita, este proceso incrementará la concentración de calcio en las salmueras y puede provocar la precipitación de sulfato de calcio (Yechieli y Wood, 2002). Este proceso puede modificar la concentración del agua de mar y convertirla en una salmuera de tipo Cálctica –clorada.



Intercambio iónico: Este proceso ocurre en distintas superficies activas, principalmente en las arcillas, y se le atribuye la pérdida de solutos (Eugster, 1980). Dicho efecto se ve disminuido al estar en contacto las arcillas con las salmueras altamente concentradas (Yechieli y Wood, 2002).

Desgasificación: Se refiere a la pérdida de gases por parte de las salmueras principalmente la pérdida de CO_2 al equilibrarse con la atmósfera o debido a cambios de temperatura, lo cual produce una disminución en el total de especies carbonatadas. (Eugster, 1980). Este es uno de los mecanismos por los cuales el pH de las aguas alcalinas aumenta durante la concentración evaporítica. El sulfato puede ser removido también de la salmuera posterior a la reducción bacteriana a H_2S y su posterior pérdida.

Reacciones redox: Asociadas a la materia orgánica, pueden ser responsables de cambios en la química de las aguas, especialmente en contacto entre cuerpos de aguas salinas y aguas frescas (Custodio *et al*, 1987 citado por Yechieli y Wood, 2002). El proceso de reducción más descrito y estudiado es la reducción del sulfato a sulfuro. También puede ocurrir la reducción de otros iones como el nitrato en tales ambientes, para formar amoníaco o gas nitrógeno (Yechieli y Wood, 2002).

Salmueras marinas

Las características químicas y la proporción de los iones mayoritarios en el agua de mar son prácticamente constantes en todos los océanos del mundo (Warren, 2006). El agua de mar está dominada por el Na^+ y Cl^- , con menores cantidades de SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , HCO_3^- . Usando la clasificación de Eugster y Hardie (1978), mencionada anteriormente, el agua de mar es un agua Na-(Mg)-Cl-(SO_4), con una densidad de 1,03 g/ml y una salinidad del 35 ± 2 ‰. Al evaporarse el agua de mar una serie predecible de sales evaporíticas primarias cristalizan a partir de las aguas hipersalinas concentradas (Warren, 2006; tabla 3, figura 10).



Tabla 3. Clasificación basada en la salinidad de la paragénesis mineral y propiedades de las salmueras, basadas en agua de mar concentrada. Tomado y modificado de Warren 2006

Etapa Salmuera	Mineral Precipitado	Salinidad (‰)	Grado de evaporación	Perdida de agua (%)	Densidad (g/ml)	Aguas Hipersalinas
Marina o euhalina	Carbonato esqueletal	35-37	1x	0	1,040	
Mesohalina o Vitahalina	Carbonatos de elementos alcalinos	37 – 140	1 – 4 x	0 – 75	1,040 – 1,100	
Penesalina	CaSO ₄ (Yeso/Anhidrita)	140 – 250	4 – 7	75 – 85	1,010- 1,126	
	CaSO ₄ ± Halita	250 - 350	7 – 11	85 – 90	1,126 – 1,214	
Supersalina	Halita (NaCl) Sales de K-Mg (amargas)	>350 Extremas y variables	>11x >60x	>90 ≈99	>1,214 >1,290	

A medida que el agua de mar se concentra, el primer mineral en precipitar es el CaCO₃, usualmente como aragonito. Esto ocurre en aguas mesohalinas donde se ha alcanzado el doble de la concentración original del agua de mar, al alcanzar una concentración de cuatro a cinco veces mayor se produce la precipitación del yeso en aguas penesalinas. Al alcanzar de diez a doce veces la concentración original del agua de mar la halita precipita en aguas supersalinas, posterior a la precipitación de la halita se produce la precipitación de las sales amargas (sulfatos y cloruros de potasio o magnesio) a concentraciones superiores entre setenta y noventa veces la del agua de mar original. La carnalita y la epsomita son las especies de sales amargas dominantes a partir de la evaporación de salmueras marinas actuales (Warren, 2006).

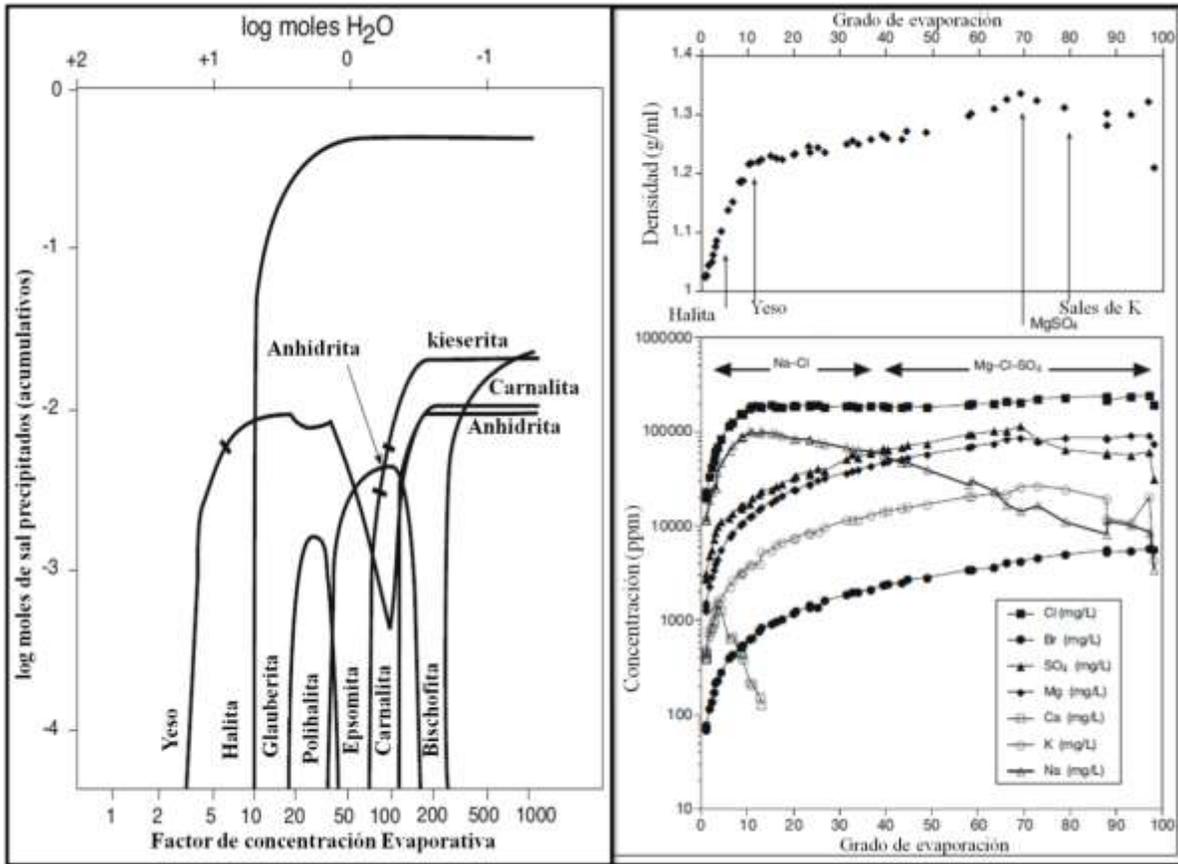


Fig. 10. (izquierda) Masas acumulativas de minerales precipitados y reabsorbidos a medida que avanza la evaporación. Tomado y modificado de Hardie 1991. (Derecha) Secuencia de evaporación del agua de mar mostrando aumento de la densidad y cambios en las proporciones de algunos iones al aumentar la densidad. Tomado y modificado de Warren (2006).

La evaporación del agua de mar ha sido estudiada por una serie de autores que van desde Usiglio (1848), quien evaporó 51 grupos de agua mediterránea y determinó la secuencia de sales durante la concentración evaporativa (Eugster *et al*, 1980). Por muchos años se estudió la evolución y orden de precipitación de las fases minerales producto de la evaporación del agua de mar en el laboratorio, en especial la secuencia de precipitación de las sales amargas ya que se presentaban grandes problemas para determinar la secuencia de su precipitación debido a la complejidad del sistema y la reducción extrema del volumen de agua requerida (Eugster, 1980). Van'T Hoff (1905,1909,1912) y sus colaboradores utilizando principalmente las sales de la cuenca Zechstein estudiaron dicho



problema utilizando salmueras sintéticas y lograron predecir el equilibrio de evaporación del agua de mar y sirvieron de base a los estudios de Braitsch (1971), Dean (1978). Posteriormente los trabajos realizados por Harvie y Eugster terminaron por delimitar los equilibrios minerales producto de la evaporación del agua de mar actual y pudieron establecer que la secuencia de precipitación de las sales y el nivel de salinidad a la cual precipitaban variaba de acuerdo a la temperatura y los niveles de impurezas en las salmueras residuales (Warren, 2006).

En los últimos tiempos se ha descubierto que la dinámica hidrológica en las cuencas puede tener un efecto importante en la evolución de las salmueras en un grado mayor de lo esperado en los modelos químicos (Warren, 2006). El escape de las salmueras, su mezcla con aguas meteóricas o frescas en los márgenes de la cuenca, la influencia de capas de aire húmedo por encima de las salmueras, produce que los cuerpos de aguas marinas modernas alcancen la precipitación de sales amargas en un solo ciclo de desecación (Warren, 2006). Sanford y Wood (1991) modelaron los cambios en la composición de fluidos y la secuencia de sales primarias que precipitarían a partir de la hidrología de una salmuera donde se descargaba parte de su volumen a través de los sedimentos suprayacentes. Los autores encontraron que la tasa de pérdida (tasa o relación entre la descarga y la recarga) tenía un profundo efecto tanto en la secuencia de precipitación de los minerales como en su espesor y volumen (figura.11).

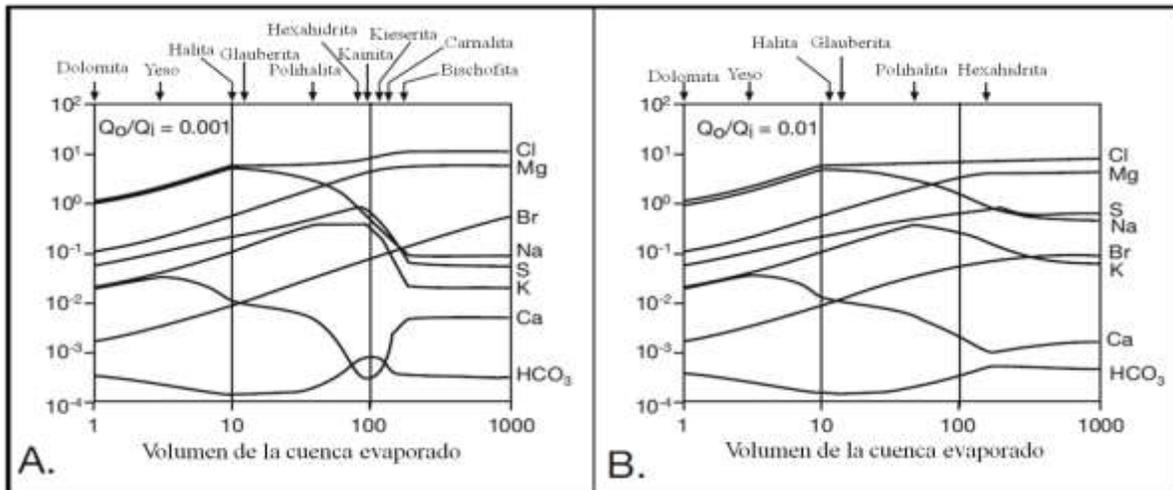


fig. 11. Efecto de la variación de la descarga en proporciones iónicas y la paragénesis mineral a partir de una salmuera marina en función del volumen evaporado de la cuenca. A) Tasa de descarga .001 (\approx Cuenca cerrada). B) tasa de descarga 0.01. Tomado y modificado de Yechieli y Wood, (2002).

Salmueras no marinas

A diferencia de las salmueras de origen marino, las aguas continentales no presentan la homogeneidad química que presentan las aguas oceánicas. Una serie de minerales mucho más diversa y menos predecible precipita durante la evaporación de aguas continentales (Warren, 2006). En ambientes no marinos, los ríos y las aguas subterráneas son las principales fuentes de iones que precipitarán como sales evaporíticas (Warren, 2006). Eugster y Hardie (1978) en su trabajo "Saline Lakes", diferencian cinco tipos principales de salmueras en lo que ellos denominaron cuencas evaporíticas hidrológicamente cerradas (Tabla 4).

Cuando cualquiera de estos tipos de agua se concentra en alguna cuenca particular, ésta deposita una serie característica de minerales evaporíticos (Warren, 2006). Como en el caso de las salmueras marinas, el primer mineral en precipitar es el carbonato de calcio, específicamente calcita y debido a la baja relación Mg/Ca en todas las aguas excepto en aguas de descarga en contacto con rocas ultramáficas, la calcita formada contiene menos de 5% mol de $MgCO_3$ (Eugster y Hardie, 1978). A medida que continúa la precipitación de la calcita,



aumenta la relación Mg/Ca en el agua, por lo tanto el contenido de Mg en el carbonato que sigue precipitando aumenta también. Por razones cinéticas es posible que el aragonito precipite en sustitución de la calcita, tal cual ocurre en el Mar Muerto (Eugster y Hardie, 1978).

Tabla 4. Tipos de salmueras y minerales asociados. Tomado de Warren 2006.

Tipo de Salmuera	Minerales Característicos	
Ca-Mg-Na-(K)-Cl	Antarcticia	CaCl ₂ ·6H ₂ O
	Bischofita	MgCl ₂ ·6H ₂ O
	Carnalita	MgCl ₂ ·KCl·6H ₂ O
	Halita	NaCl
	Silvita	KCl
	Tachidrita	CaCl ₂ ·2MgCl ₂ ·12H ₂ O
Na-(Ca)-SO₄-Cl	Glauberita	CaSO ₄ ·Na ₂ SO ₄
	Halita	NaCl
	Mirabilita	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
	Ternadita	Na ₂ SO ₄
	Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Mg-Na-(Ca)-SO₄-Cl	Bischofita	MgCl ₂ ·6H ₂ O
	Bloedita	Na ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·4H ₂ O
	Epsomita	MgSO ₄ ·7H ₂ O
	Glauberita	CaSO ₄ ·Na ₂ SO ₄
	Halita	NaCl
	Hexahidrita	MgSO ₄ ·6H ₂ O
	Kieserita	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O
	Mirabilita	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
	Ternadita	Na ₂ SO ₄
	Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Na-CO₃-Cl	Halita	NaCl
	Nahcolita	NaHCO ₃
	Natron	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O
	Termonatrita	Na ₂ CO ₃ ·3H ₂ O
	Trona	NaHCO ₃ ·Na ₂ CO ₃
Na-CO₃-SO₄-Cl	Burkeita	Na ₂ CO ₃ ·2Na ₂ SO ₄
	Halita	NaCl
	Mirabilita	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
	Nahcolita	NaHCO ₃
	Natron	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O
	Ternadita	Na ₂ SO ₄
	Termonatrita	Na ₂ CO ₃ ·3H ₂ O



Posterior a la precipitación de la calcita descrita anteriormente, se definen tres posibles vías de evolución de la salmuera (figura. 12). Si el agua tenía una relación molar $\text{HCO}_3/\text{Ca}+\text{Mg}$ alta, 3 o mayor, tomará el camino evolutivo tipo I, donde los metales alcalinos son removidos rápidamente con la concentración evaporativa y el enriquecimiento en magnesio suficiente para producir carbonatos ricos en magnesio como protodolomita no ocurrirá (Eugster y Hardie, 1978). El producto final de este camino es una salmuera alcalina del tipo $\text{Na-CO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$ o una salmuera $\text{Na-CO}_3\text{-Cl-(SO}_4\text{)}$.

Contrariamente si el agua tenía inicialmente una relación molar $\text{HCO}_3/\text{Ca}+\text{Mg}$ baja, ésta evoluciona por el camino II, el bicarbonato es rápidamente removido, mientras los metales alcalinos se enriquecen. Debido a la pérdida rápida de HCO_3 estas aguas nunca producirán carbonatos ricos en Mg, por lo cual se volverán salmueras $\text{Ca-Na-SO}_4\text{-Cl}$.

En muchas aguas, ni el bicarbonato ni el calcio mas el magnesio son las especies dominantes, como consecuencia, grandes cantidades de carbonatos de metales alcalinos son formados en el proceso, y evolucionan por la vía III, el magnesio se enriquece sobre el Ca, y calcita rica en magnesio o dolomita se vuelve abundante (Eugster, 1980). Eventualmente, el $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ o el HCO_3^- son agotados, y las salmueras se vuelven alcalinas y se saturan en yeso.

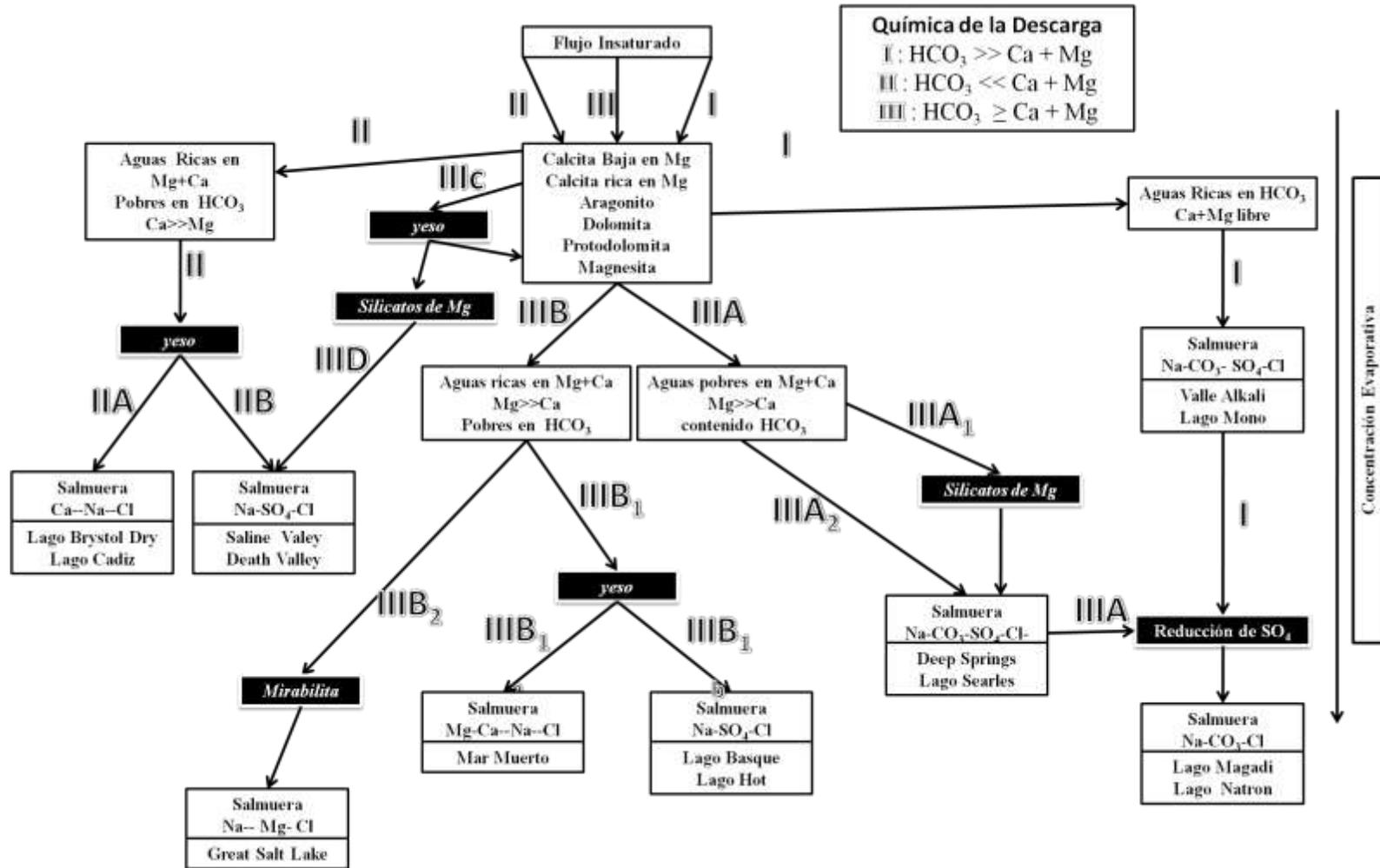


Figura 12. Diagrama de flujo de la evolución de las salmueras. Rectángulos sólidos representa precipitados importantes. Se muestran los tipos de aguas comunes así como también los diferentes tipos de salmueras finales y ejemplos de zonas donde se encuentran. La precipitación de silicatos de Mg y la reducción de SO_4 son posibles en la mayoría de caminos. Tomado de Warren (2006), basado en Eugster y Hardie (1978).



Comportamiento general de los solutos

Dependiendo del alcance del fraccionamiento durante la evolución de la salmuera y la efectividad de los diferentes procesos de fraccionamiento, los solutos se comportan en una serie de patrones específicos (Holland, y Turekian, 2003). Utilizando la experiencia obtenida en el estudio del Lago Magadi en Kenya, Eugster y Jones (1979), identificaron cinco tipos diferentes de comportamiento de los solutos en las salmueras (figura 13).

- I. Este tipo de soluto es el que se mantiene en solución durante todo el proceso de concentración de la salmuera. Esto no quiere decir que este soluto no está envuelto en la formación de capas eflorescentes, sino que simplemente será redissuelto cuantitativamente posteriormente mediante la descarga. Ejemplos de estos solutos son el Cl^- y Na^+ .
- II. En estos solutos tipo a y b, un catión y un anión respectivamente, se combinan en la precipitación de una fase mineral. En el punto de saturación, el comportamiento de ambos cambia y b es agotado rápidamente, mientras el soluto a se concentra pero de manera más lenta que un constituyente conservativo. Ejemplo de este efecto serian el Ca^{2+} y el HCO_3^{2-} .
- III. Un soluto de este tipo es removido de la solución de manera gradual por una serie o combinación de mecanismos, como precipitación mineral, sorción o desgasificación. Ejemplo de esto es el $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ en el lago Magadi.
- IV. El efecto producido por un mecanismo de remoción que no es tan dependiente de la concentración y es efectivo solo a la mitad del rango de concentración produce una línea sigmoideal. Ejemplos son los procesos del intercambio iónico, adsorción superficial y reducción biogénica, solutos que siguen esta tendencia son K^+ y SO_4^{2-} .
- V. Por último, un soluto sin carga, como el SiO_2 , al alcanzar la saturación con su correspondiente fase sólida simplemente permanece constante.

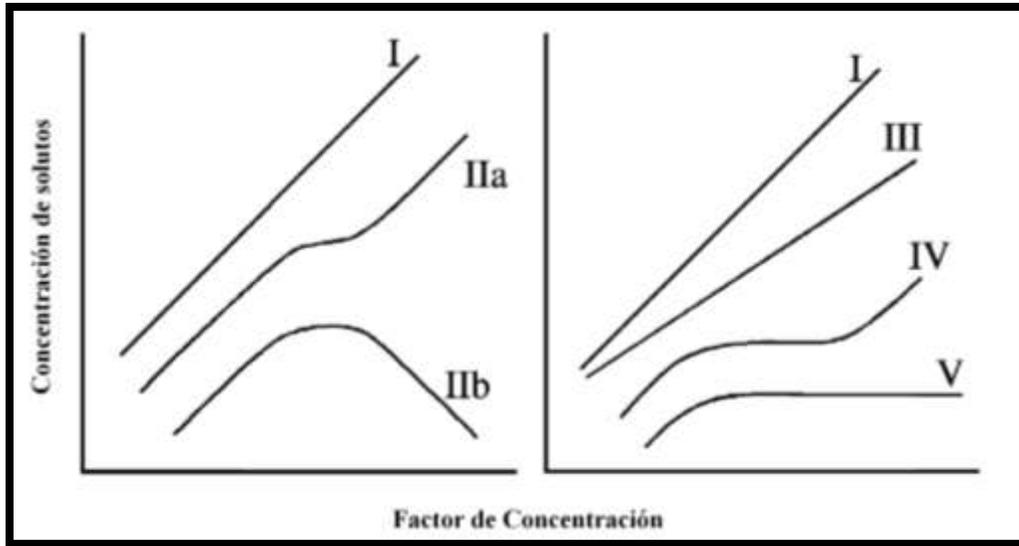


Figura 13. Gráficos esquemáticos de las curvas de comportamiento de los solutos en salmueras de cuencas cerradas. Tomado de Holland y Turekian (2003).

Procesos postdepositacionales

Las evaporitas son altamente susceptibles a cambios diagenéticos debido a su solubilidad, su alta porosidad inicial y la presencia de salmueras intersticiales. (Eugster, 1980). Muchas de estas salmueras son capaces de interactuar con minerales menos solubles, como carbonatos de metales alcalinos y silicatos, y como resultado podemos obtener una variedad de minerales autigénicos característicos (Eugster, 1980).

Minerales salinos: Debido a que su solubilidad es extremadamente dependiente de la presión de CO_2 , la trona y la nahcolita suelen formarse a partir de salmueras intersticiales, con la adición de CO_2 originado por procesos bacterianos (Eugster, 1980). Por ejemplo en la formación Green River, la nahcolita se encuentra como concreciones esféricas entre los lodos de carbonatos alcalinos, mientras que la trona forma acumulaciones de cristales en formas circulares (Eugster, 1980).



En las salmueras intersticiales hay minerales ricos en Na_2CO_3 como la gaylusita, pirsonita o shortita que se formarán por medio de reacciones con minerales de carbonato de calcio.

El yeso y la anhidrita pueden formarse entre los sedimentos a través de procesos autigénicos, como la reacción de CaCO_3 con aguas ricas en sulfatos. En los sabkhas de las costas árabes, este parece ser el proceso que origina los nódulos de yeso que se forman cercanos a la superficie, con escorrentía continental aportando los iones Ca y el agua de mar aportando los sulfatos (Eugster, 1980).

Sales triples como la glauberita, burkeita, hankesita, entre otras, se forman comúnmente por reacciones de meteorización a partir de sales precipitadas anteriormente.

Minerales asociados: Las zeolitas y los silicatos asociados, como la searlesita y feldespatos potásicos, son productos secundarios comunes de los sedimentos lacustres (Eugster, 1980). Estos se forman por la reacción de las salmueras intersticiales con vidrio volcánico, gel de sílice o silicatos precursores. Son típicos de aguas alcalinas, debido a que el alto pH promueve la disolución del sílice y por lo tanto su reactividad y ocupan el lugar de las arcillas como la montmorilonita en ambientes no alcalinos (Eugster, 1980).

En el lago Searless, California, la searlesita ($\text{NaBSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) aparece debido a las altas concentraciones de boro. Otros silicatos de boro, así como silicatos ricos en sodio suelen aparecer como consecuencia de salmueras intersticiales con alta actividad de Na y SiO_2 (Eugster, 1980). El raro silicato de zirconio elpisita ($\text{Na}_2\text{ZrSi}_6\text{O}_{12}(\text{OH})_6$) es un caso en estudio, ya que se presume que se forma por la interacción entre minerales detríticos como el zircón con salmueras alcalinas.

Entre la gran cantidad de minerales secundarios de los depósitos salinos se encuentran algunos minerales no silicatados que son muy insolubles, como es el caso de la fluorita, celestita (SrSO_4) y la dawsonita ($\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$) (Eugster, 1980).

Zona nor-central del estado Falcón

El área de estudio (figura 14) se ubica en la zona norte del estado Falcón, específicamente en las zonas costeras de la Península de Paraguana, correspondiente a la proyección más septentrional del territorio venezolano que se extiende hacia el Mar Caribe, el Istmo de los Médanos de Coro y la planicie fango costera del delta del río Mitare ubicada en la zona norte del estado Falcón limitada al norte por el golfo de Coro.

De toda la extensión de la región nor-central del estado Falcón, el presente trabajo de investigación, busca determinar las características químicas, mineralógicas y sedimentológicas de las acumulaciones evaporíticas listadas a continuación:

- Salina de Las Cumaraguas
- Salina de Bajarigua
- Acumulaciones salinas planicie costera con influencia del delta del río Mitare.

La ubicación de las zonas de estudio puede apreciarse en la siguiente figura.



Figura. 14. Fotografía satelital del área de estudio. Tomado de Google Earth 2010

Clima

La precipitación media anual es de 480 mm. Esta presenta variaciones importantes por toda el área de estudio. En Paraguaná las precipitaciones aumentan de oeste a este, alcanzando mínimos en la costa occidental, debido a los vientos alisios que penetran por el NE y E (Rivas y Rojas,1997). Las precipitaciones mínimas se registran en las ciudades de Punto Fijo (350 mm) y Punta Macolla (325 mm) y máximas en las localidades de Pueblo Nuevo (601 mm) y Santa Ana (569 mm). En la zona enmarcada en el delta del río Mitare se registran precipitaciones anuales de 430 mm.

El clima correspondiente a la zona de estudio se encuentra en un área climática de tipo árida y semiárida, de precipitaciones escasas, según la clasificación utilizada por COPLANARH (1975) (figura 15) y se clasifica como tropical-desértico-isotermo según la clasificación de Koeppen. La temperatura media anual es de 28°C. La vegetación es principalmente del tipo xerófila (cardones, tunas, cujíes)

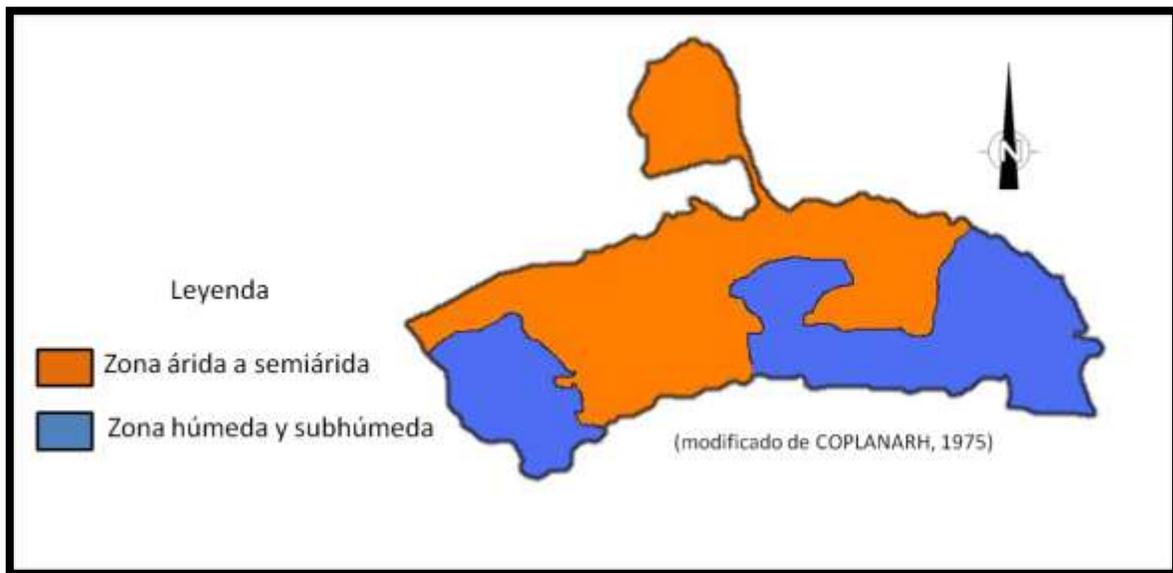


Figura 15. Clasificación del clima del estado Falcón. Modificado de COPLANARH (1975).



Marco Geológico Regional

Los depósitos evaporíticos objeto de este estudio representan depósitos Holocenos, depositados actualmente en el estado Falcón. Sin embargo, se hace necesario el tener un conocimiento general de la historia geológica de la región, así como de los distintos procesos tectónicos y características depositacionales que caracterizan a la región a los largo del tiempo geológico.

La denominada cuenca Terciaria de Falcón actualmente aflora sobre unos 36.000 Km² en el noroccidente venezolano y que comprende al estado Falcón y partes de los estados Zulia, Lara y Yaracuy. (Audemard, 1995). Ésta se encuentra supra yaciendo al basamento alóctono Caribeño, el cual fue emplazado durante una fase compresiva que afectó el oeste de Venezuela y que está conformado principalmente por depósitos tipo flysch y rocas meta-sedimentarias del Cretácico Tardío (Bezada *et al.*, 2008). Su registro sedimentario es casi continuo desde el Eoceno tardío, excepto por tres inconformidades angulares de algún significado regional, pero sin afectar la totalidad de la cuenca, tal es el caso del surco de Urumaco (Audemard, 1999).

Se han planteado diversas hipótesis intentando explicar el origen de la cuenca, Muessig (1984), interpreta su formación como una cuenca pull apart, formada en un sistema de fallas transcurrentes dextral. Es de acuerdo a esta teoría las islas de Aruba, Curazao y Bonaire eran adyacentes entre si durante el Eoceno y fueron separadas por un régimen extensivo con dirección este-oeste que fue el responsable de la formación de las cuenca de Falcón y Bonaire (Bezada *et al.*, 2008). Bezada *et al.* (2008) respaldan con sus resultados la hipótesis propuesta por Audemard (1998), donde el origen de la cuenca está asociado a una fase de rifting de edad oligocena a consecuencia de un campo de esfuerzos regional distensivo a lo largo del margen norte del continente sudamericano el cual dio origen a una cuenca conformada por la cuenca de Falcón y la cuenca de Bonaire.

La cuenca presentó su máxima extensión, durante el Oligoceno y el Mioceno inferior (González de Juana, 1980). Esta presenta forma elongada en dirección



este-oeste y está limitada por las zonas emergidas a lo largo de sus márgenes sur y oeste parcialmente cerrada al norte por la “isla” de Paraguaná, estando abiertas al Golfo de Venezuela por intermedio del surco de Urumaco que separa a su vez las zonas emergidas de Dabajuro al oeste y de Paraguaná al NE (Audemard, 1995), (figura 16).

La secuencia sedimentaria de la cuenca de Falcón presenta de manera global las siguientes características:

- Las facies cambian lateralmente, haciéndose progresivamente más marinas hacia el Este
- La secuencia evoluciona verticalmente de depósitos marinos profundos a unidades sedimentarias esencialmente más continentales, de depósitos de plataforma continental y de zona litoral. Generalizando, la secuencia es globalmente regresiva.
- La evolución ocurre de forma progresiva pero a veces de manera abrupta. Los cambios bien marcados corresponden a discordancias.

Las tres discordancias de extensión regional permiten subdividir la secuencia sedimentaria de la cuenca de Falcón en cuatro conjuntos separados por ellas, y que pueden ser ubicadas en los límites Plio-Pleistoceno, Mio-Plioceno y Mioceno medio-Inferior (Audemard, 1995).

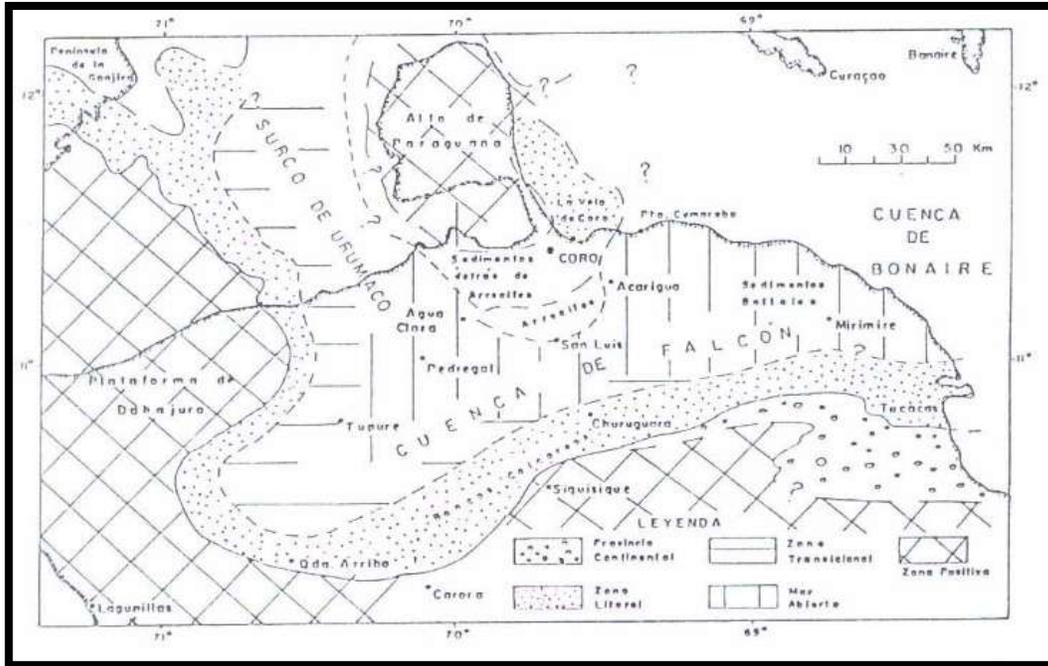


Figura 16. Mapa paleogeográfico de la cuenca de Falcón durante el Mioceno inferior. Tomado de González de Juana (1980).

El conjunto Oligo-Mioceno constituye la parte esencial de la sedimentación de la cuenca de o estrecho falconiano, según la denominación de González de Juana (1980). Los primeros depósitos de esta cuenca son de edad eoceno superior, pertenecientes a la formación Cerro Misión, y se encuentran confinados al margen sureste de la cuenca. Las formaciones hacia los bordes sur y oeste de la cuenca, pasan progresivamente a depósitos de fuerte influencia terrígena, siendo la formación Pecaya de origen marino y las formaciones Paraíso y Castillo caracterizadas por la influencia terrígena mencionada, hasta llegar a la formación Churuguara conformada por calizas de plataforma. Hacia la isla de Paraguaná al norte, la formación Pecaya se interdigita con las calizas arrecifales de la formación San Luis y sus facies peri-arrecifales (Audemard, 1995).

Magmas de composición basáltica se han intercalado o intrusionado en este conjunto de edad Oligoceno- Mioceno inferior (Brueren, 1949). Estas intrusiones se encuentran datadas cercanas al límite entre el Oligoceno y el Mioceno, y han

sido reportadas solamente en contacto con las formaciones Pecaya y Paraíso. Posteriormente todo este conjunto fue recubierto por los sedimentos de la formación Agua Clara.

El conjunto Mioceno medio y superior presenta características menos marinas que el conjunto subyacente (Audemard, 1995). El eje de la sedimentación es desplazado hacia el norte del anticlinorio de Falcón, producto de la inversión de la cuenca sufrida durante el Mioceno medio-inferior, sin embargo el sector oriental de la cuenca, preservó su geometría de cuenca marina profunda hasta el Mioceno Superior tardío, permitiendo la acumulación de una potente secuencia pelítica denominada Grupo Agua Salada (Audemard, 1995). Este conjunto está representado por depósitos continentales hacia el oeste que progresivamente se vuelven más marinos hacia el Este. En la plataforma de Dabajuro la sedimentación es esencialmente de tipo deltaica, ejemplo de ello es la formación La Puerta inferior. En el surco de Urumaco se encuentran depósitos deltaicos alternados con depósitos marinos y de plataforma interna (neríticos). La secuencia de la plataforma de Coro es de tipo plataforma interna que pasa a facies marinas más profundas en Cumarebo.

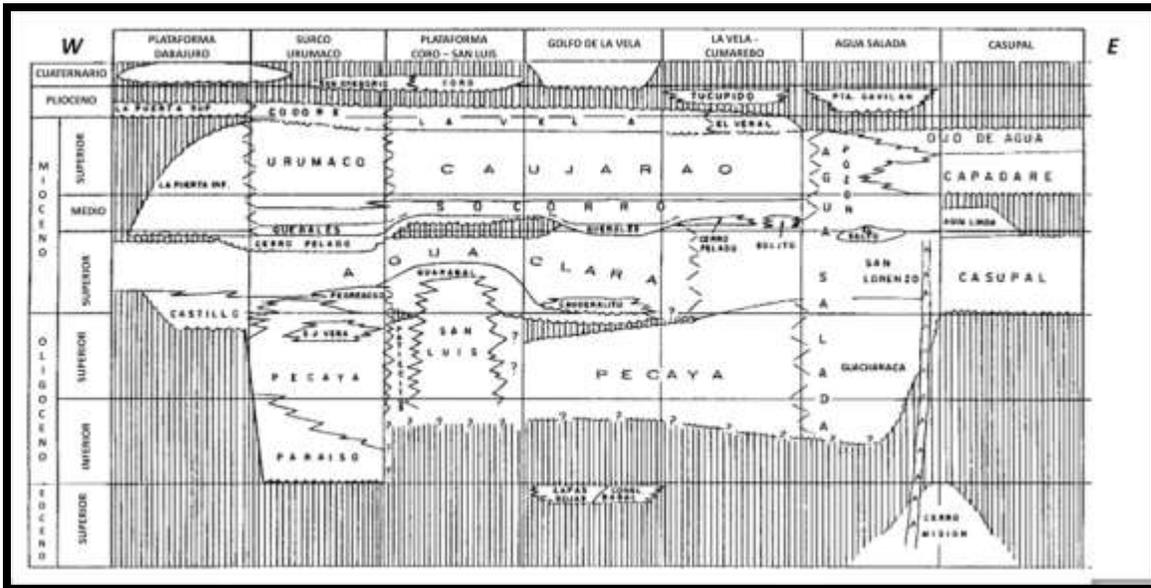


Figura 17. Tabla de correlación de las unidades estratigráficas de la cuenca de Falcón de Oeste a Este. Tomado y modificado de Audemard (2000).



El conjunto Mioceno superior- Plioceno preserva la tendencia general de la secuencia de la cuenca de Falcón descrita anteriormente ya que mantiene la misma distribución geográfica y mantiene las variaciones laterales de oeste a este de facies continentales a marinas (Audemard, 1995). Entre los aspectos más resaltantes de esta etapa tenemos la desaparición de la cuenca profunda del sector oriental, donde se deposita una secuencia de plataforma interna (formación Punta Gavilán).

La discordancia basal de este conjunto es muy nítida en la plataforma de Dabajuro donde la formación La Puerta superior esta discordante sobre la inferior, y en el sector oriental la formación Punta Gavilán se encuentra discordante sobre el Grupo Agua Salada. En contraste esta discordancia es extremadamente difícil de observar en la zona norcentral de Falcón posiblemente debido a que la surrección tectónica que había comenzado con anterioridad al Sur de la cuenca.

Por último tenemos el conjunto Plio-Cuaternario el cual es esencialmente de tipo continental, exceptuando las zonas actualmente sumergidas y parcialmente sumergidas durante los máximos marinos interglaciares como Paraguaná y las líneas actuales de costa. Por lo aquí expuesto esta unidad está compuesta por depósitos continentales, restringidos a la plataforma de Dabajuro y al sector nor-central del estado Falcón, y por depósitos marinos asociados a la costa actual y a la Península de Paraguaná (Audemard, 1995).

Geología Local

Los ambientes evaporíticos que piensan estudiarse en el presente trabajo han sido en su mayoría identificados por otros autores con anterioridad, los cuerpos evaporíticos de la región de Paraguaná han sido descritos por Mendi y Rodríguez (2005). En su integración geológica de la región de Paraguaná los autores hacen una descripción detallada de la geología de la península de Paraguaná. En la figura 18 se puede observar el mapa geológico compilado por los autores y posteriormente una breve descripción de las unidades geológicas y geomorfológicas descritas.

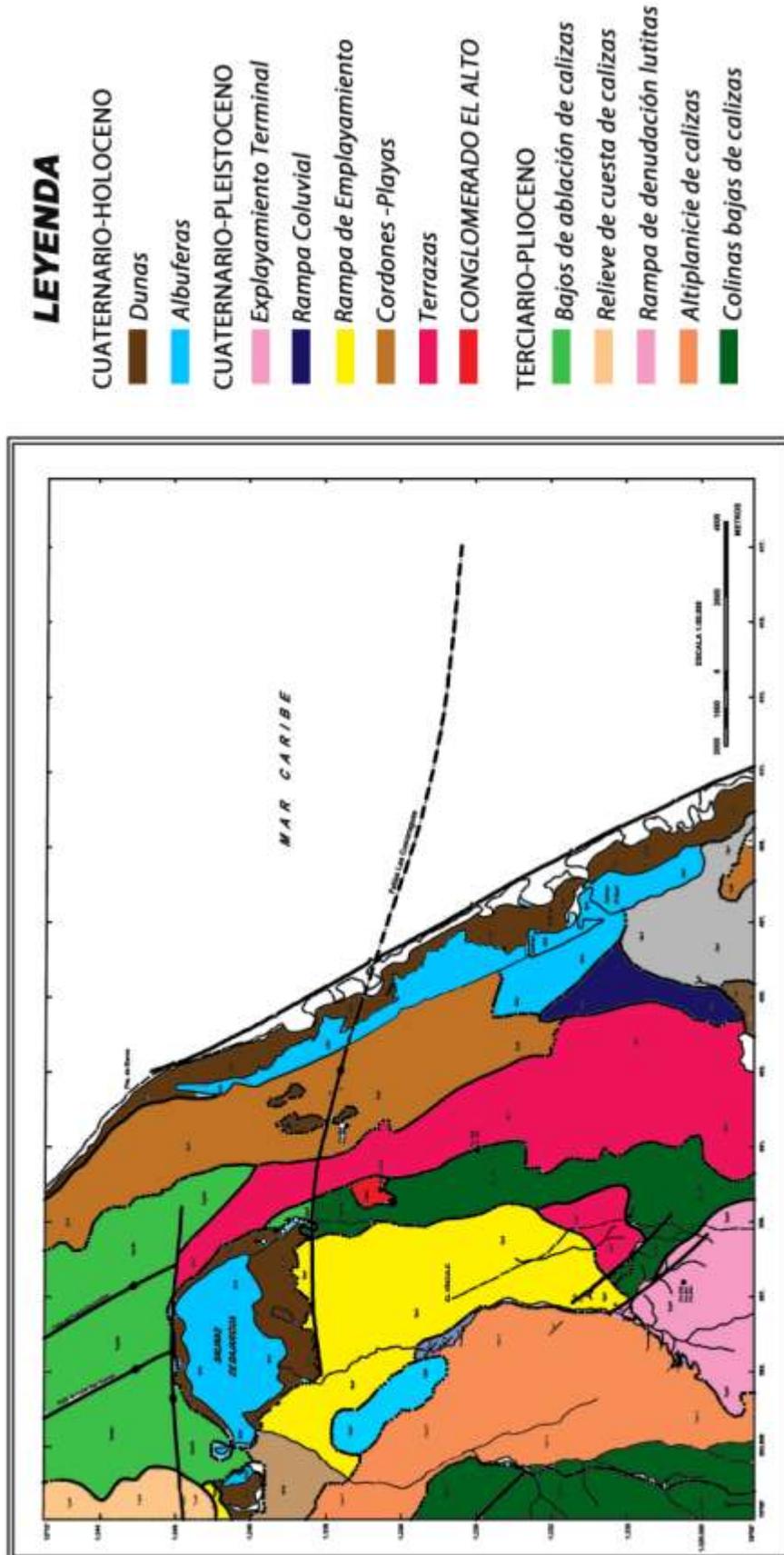


Figura 18. Mapa geológico, hoja (6252-III) de la región de Paraguaná. Tomado de Mendi y Rodríguez (2005).



- Depositos aluvionales terrestres y marinos (Cuaternario- Holoceno)

Dunas: los cuerpos de dunas encontrados en estas zonas se encuentran principalmente en la periferia de la salina de Bajarigua, y las salinas de Las Cumaraguas. Estan constituidas por material tamaño arena acumulada por procesos eolicos y se encuentran en contacto con las unidades de marismas, terrazas y los bajos de ablación de calizas.

Albuferas: constituida por las salinas alineadas casi paralelamente con la línea de costa este, entre las que se pueden mencionar las salinas de Los Cubitos, Ciénaga Negra, Honda de Barabara, Bajarigua y Las Cumaraguas. Descritas como lagunas de aguas salobres caracterizadas por sedimentos de grano fino y precipitación de minerales evaporíticos producto de la evaporación de la agua de mar. Presentan contactos con las unidades de dunas, con la unidad de cordones y playas y en el caso de la salina de Bajarigua con los bajos de ablación de calizas.

- Depositos aluvionales terrestres y marinos (Cuaternario- Pleistoceno)

La geología local de la península de Paraguaná esta dominada principalmente en la zona de importancia para este trabajo de investigación por el Conglomerado El Alto y por la formación Paraguaná.

El Conglomerado El Alto, nombre asignado a una secuencia aflorante en el Cerro El Alto, ubicado 4 Km al este de la población El Vínculo. Hacia su base está conformada por un paquete ciclico de limolita, arenisca y delgados niveles de guijarros con espesores de 13, 20 y 4 cm respectivamente, el cual disminuye hacia el tope.

Presenta estratificación cruzada, y el conglomerado presente en el tope de la unidad, es polimíctico con clastos redondeados de cuarzo, fragmentos de roca y abundantes conchas de moluscos y gasterópodos (Mendi y Rodríguez, 2005). Se encuentra suprayacente a el miembro Amuay de la Formación Paraguaná.

La formación Paraguaná está caracterizada con una secuencia estratigráfica que comienza con lutitas calcáreas, sigue con niveles de lutitas y areniscas y termina



con calizas algales. Esta se encuentra separada marcadamente por dos miembros. Un miembro inferior arcilloso-limoso denominado El Hato y uno superior carbonático denominado Amuay, la cual cubre aproximadamente un 85% de la superficie de la península de Paraguaná

El miembro Amuay, esta conformado por un intervalo carbonático muy fosilífero, que presenta en ocasiones influencia clástica elevada, siendo clasificadas como biomicritas, calizas aloquímicas arenosas y micritas arenosas.

Por su parte el miembro El Hato, esta conformado principalmente por intercalaciones de arcilitas y limolitas arenosas friables y fosilíferas, y algunas areniscas.

A continuación hacemos la descripción de las unidades geomorfológicas identificadas en la figura 18.

Explayamiento terminal: encontrado cerca de la costa este de la península, ocupa una gruesa franja desde el oeste de Adícora hasta las salinas de Tura. Representa la parte terminal de una planicie aluvial, presentando forma de abanico y canales anastomosados producto del represamiento de las aguas fluviales por otro cuerpo de agua poco profunda, en este caso representados por los cuerpos de salinas en la parte sureste del mapa.

Rampa coluvial: se encuentran generalmente en la zona este de la península, a los pies de las elevaciones mas prominentes de la zona. En la figura 18 se puede observar como se encuentra en contacto con las altiplanicies de calizas, y rampas de emplazamiento, encontradas al noroeste del Vínculo. Se encuentran constituidas por la acumulación de sedimentos, en su mayoría detrítico proveniente de las vertientes cercanas y por efecto del escurrimiento superficial.

Rampa de explayamiento: encontrada entre el poblado de El Vínculo y la salina de Bajarigua. Está conformada por la coalescencia de una serie de explayamientos de piedemonte, por material detrítico proveniente de los sedimentos arcillosos de



la formación Paraguaná presenta contactos con la altiplanicie de calizas y las colinas de calizas.

Cordones y playas: se encuentran en el extremo noreste de la península. En la figura 18, se observa como representa una barrera aislando las unidades de albuferas, representadas por las salinas encontradas a lo largo de la costa este de Paraguaná, de la parte noreste de la península.

Terrazas: ubicada en la zona noreste de la península, al este del poblado del Vínculo. Poseen una gran extensión, ocupando desde el borde este de la salina de Bajarigua, hasta el noreste de Pueblo Nuevo. Caracterizadas por presentar superficies elevadas y planas, limitadas por un escarpe.

Bajos de ablación de calizas: perteneciente a la formación Paraguaná, se encuentra ubicado al sur de cabo San Román. Presentan una superficie aplanada y ligeramente inclinada, modelada sobre las rocas de la formación Paraguaná, específicamente sobre las calizas del miembro Amuay, producto de la acción erosiva del mar.

Relieve de cuesta de calizas: se encuentran hacia el flanco norte de la fila de Tausabana-El rodeo. Posee relieve uniformemente plano y levemente inclinados constituidos de capas de litología competente, opuestos a taludes con una pendiente mayor, sus capas resistentes están conformadas por las calizas y margas del Miembro Amuay.

Rampa de denudación de lutitas: ubicada cercana a Pueblo Nuevo, cubre gran parte del flanco este de la Mesa de Cocodite y se puede observar en la zona sur del mapa de la figura 18. Representan las zonas de acumulación de los sedimentos producto de la acción erosiva, principalmente por escorrentía superficial.

Altiplanicie de calizas: ubicada al sur de la salina de Bajarigua, abarca hasta la zona norte de la Mesa de Cocodite. Posee un alto relieve con crestas bien definidas y vertientes predominantemente complejas.

colinas bajas de calizas: Pueden observarse en las adyacencias de la población de El Vínculo. Originadas a partir del levantamiento y posterior erosión de la formación Paraguaná y constituidos principalmente por areniscas, arcillas entre otras litologías. Presentan una baja altitud y notablemente afectadas por procesos eólicos.

En la figura 19 se observa un mapa geológico con la distribución de formaciones adyacentes a la zona de la planicie costera con influencia del río Mitare, como podemos observar la zona donde se enfoca el presente trabajo de investigación representa depósitos actuales con alta influencia de los procesos costeros de la zona.

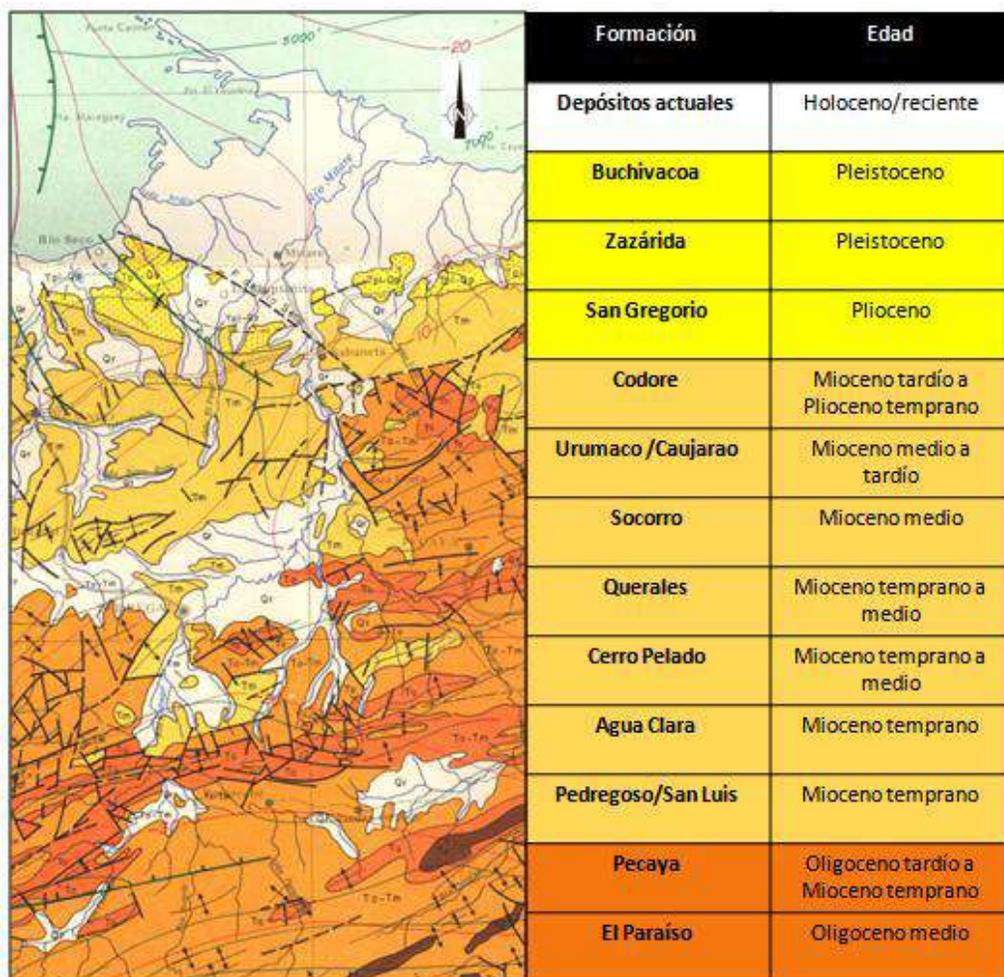


Figura 19. Mapa geológico de la cuenca del río Mitare.

A continuación se muestra una imagen señalando las diferentes acumulaciones evaporíticas señaladas o mencionadas por los autores Mendi y Rodríguez (2005) y Laguna Evaporítica y salina reportada por Rivas y Rojas (1997), en la región de Paraguaná y Rivas y Rojas (1997), en la zona deltaica del río Mitare.



Figura 20. Ubicación de los cuerpos de Salinas identificados por Mendi y Rodríguez (2005) y Laguna Evaporítica y salina reportada por Rivas y Rojas (1997). 1. Bajarigua; 2.Cumaraguas; 3.Salinas San Prudencio; 4.Salinas San Antonio; 5.Salinas el Palo; 6.Salinas Los Cobijitos y Ciénaga negra; 7. Salina de Guica; 8. Salina de Tura; 9.Salineta Honda de Barara; 10. Salina El Supi; 11. Laguna Evaporítica y salina.

Antecedentes

En esta sección serán discutidos una serie de trabajos e investigaciones realizadas en el estudio geológico y geoquímico de los ambientes evaporíticos, a nivel nacional e internacional



Eugster y Hardie (1978). Realizan una descripción de las características químicas y mineralógicas de los lagos salinos, origen de las variaciones químicas, clasificación, evolución química y procesos asociados a su desarrollo. Para ello utilizaron los datos químicos y mineralógicos de una serie de trabajos en su mayoría realizados por los autores, así como de algunos trabajos de otros autores. Estos datos consistían en los valores de los iones mayoritarios en las aguas (SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , HCO_3^- , SiO_2 , NO_3^- , Na^+ , Cl^-), así como también los valores de densidad de las salmueras y pH. En la parte final del trabajo describen una serie de ambientes evaporíticos utilizando los parámetros expuestos en la primera parte, entre los cuales se encuentran: lago Magadi (Kenya), lago Chad (África), lago Deep Spring (California, USA), el Great Salt Lake (Utah, Usa), lagos Basque (Canadá), y el mar Muerto (entre Israel y el río Jordán).

Eugster y Maglione (1979). Realizan una interpretación de la evolución de las salmueras y fases minerales encontradas en tres subambientes de formación de salmueras en la parte noreste del Lago Chad (África), aguas subterráneas de playas, lagos interdunales y lagos isla. Utilizaron los datos obtenidos por Maglione (1974), el cual realizó estudios en la playa natroniere de Liwa, que en la costa el agua es suficientemente fresca para beber pero 200m hacia su interior presenta 3000 g/l de sólidos disueltos y pH de 10,3. Los lagos isla estudiados fueron el Napal y el Kangallom, caracterizadas por salmueras ricas en sulfatos y cloro a diferencia de las salmueras alcalinas observadas en los demás ambientes estudiados. Utilizando el Cl como trazador durante el proceso evaporativo se realizaron gráficas de las concentraciones de Cl^- contra K^+ , $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, Na^+ , SO_4^{2-} y SiO_2 para poder establecer las diferencias evolutivas de las salmueras en los diferentes ambientes. El autor pudo determinar que a pesar de originarse de las mismas aguas parentales Na-Ca-Mg- HCO_3 del lago Chad, la concentración evaporativa produce tres tipos distintos de salmueras en los ambientes estudiados. Las aguas de las playas y los lagos interdunales producen salmueras (Na- CO_3). Por últimos determinan que las salmueras Na-Cl- SO_4 encontradas en la isla Napal son singulares tomando en cuenta la composición inicial de las aguas, ya que sugiere conservación de sulfatos en un ambiente oxidante con una pérdida



significativa de carbonatos y de sodio. Estas particularidades son explicadas en la oxidación de sulfuros en sedimentos de hace 5000 a 9000 años.

Rettig et al. (1980). Realizan un estudio de la evolución de las salmueras en el salar de Uyuni (Bolivia), con el fin de determinar los procesos que rigen la composición química de las salmueras del salar de Uyuni. Para ello tomaron 18 muestras de las salmueras del Salar de Uyuni a través de una serie de transectas toman 15 muestras en el área del delta del río Grande y 3 muestras del salar de Coipasa. Los cationes mayoritarios fueron determinados por Espectroscopia de absorción atómica, Cl^- fue determinado gravimétricamente, SO_4^{2-} fue determinado turbidimétricamente estabilizando el sulfato de bario con gelatina siguiendo el método propuesto por Tabatabai (1974). Por último el litio y el bromo fueron determinados por adición estándar y por oxidación con hipoclorito respectivamente. Los autores concluyen que la precipitación de calcita, yeso y halita produce la composición K-Mg-Cl-(SO_4) en el salar y observaron variaciones importantes en la composición de los lagos Poopo y las salmueras superficiales del salar de Coipasa. Comparando los resultados obtenidos entre el salar de Uyuni y Coipasa determinan que la pérdida de K, Mg y Li se debe principalmente a los precipitados formados o debido a sorción en ambos salares se produce la pérdida de B, y en el caso del salar Uyuni también es el caso para el Sr.

Risarcher y Fritz (1991). Determinaron el origen de los solutos y la evolución de las salmueras de los salares del altiplano boliviano. El trabajo se llevó a cabo estudiando la geoquímica de las salmueras de los distintos cuerpos salinos ubicados en el altiplano sur de Bolivia, para ello establecieron una clasificación morfológica de los distintos cuerpos y realizaron análisis químicos de las salmueras de los cuerpos salinos. Realizaron mediciones de temperatura y pH in-situ, los cationes fueron determinados por medio de la técnica de espectrometría de absorción atómica, cloruros, sulfatos y sílice fueron determinados por colorimetría, boro por medio de potenciometría, al igual que la alcalinidad, el resto de los elementos mayoritarios y traza fueron determinados por espectrometría atómica de emisión inductivamente acoplada a masa. Con los resultados



obtenidos realizaron una serie de gráficas de correlaciones elementales utilizando al Cl y Na como elementos inmóviles, así como la caracterización de las distintas salmueras utilizando el criterio de Eugster y Hardie (1978). Establecieron que el origen de los solutos se debía a dos fuentes principales, las aguas meteóricas y la alteración hidrotermal de rocas volcánicas produciendo aguas sódica-carbonatadas y la disolución de evaporitas atrapadas por debajo de las extensas estructuras volcánicas, produciendo aguas sódica-cloradas y logran establecer el origen individual de los solutos de los distintos salares estudiados. Establecen que la concentración evaporativa de las aguas de los salares producen preferencialmente salmueras neutras del tipo sódica –cloradas, o sódica-cloradas-sulfatadas, las cuales encuentran que están en contradicción con el desarrollo evolutivo esperado que daría origen a salmueras alcalinas, esta discrepancia la explican por medio de la oxidación en las aguas de azufre nativo transportado eólicamente, así como también pueden contribuir aguas drenando coluviones enriquecidos en azufre.

Rivas y Rojas (1997). Realizaron un modelo sedimentológico del delta del río Mitare, en base al análisis de fotografías aéreas, observaciones de campo, la descripción de aproximadamente 520 pies de núcleos, tomados con los sistemas “vibracore” y “shelby percusión”, y una serie de análisis de laboratorio que incluyeron: difracción de rayos X, granulometría, petrografía, microfauna, macrofauna y minerales pesados. Lograron identificar trece fases sedimentarias y describieron diez subambientes sedimentarios, entre los cuales se encontraban las salinas observadas en las zonas oeste del delta, donde la fase mineral predominante es la halita. Lograron identificar que durante el Holoceno se generó una retrogradación de depósitos fluvio-deltaicos con un alto contenido de evaporitas donde la fase mineral predominante era el yeso, lo cual señalaron como indicativo de condiciones áridas.

Garcés et al. (1998). Realizaron un estudio del comportamiento geoquímico y mineralógico del Salar de Llamara en Chile. Para ello recolectaron muestras de salmueras y capas salinas de manera sistemática en un lapso de dos años. Las



muestras de salmueras fueron tomadas a diferentes profundidades 10-20 cm, realizaron mediciones de pH, temperatura y densidad. Tomaron 20 muestras entre costras salinas y sedimentos de fondo de las salinas. Utilizaron difracción de rayos X para la determinación mineralógica de los sedimentos y las costras salinas y realizaron la determinación de los cationes utilizando la técnica de absorción atómica, aniones por gravimetría y volumetría. Realizaron los cálculos termodinámicos utilizando el código de modelación PHRQPITZ. Determinaron que las salmueras de Llamara son del tipo Na-Cl-(SO₄) a Na-Cl. Encontraron una muy buena relación entre el modelo de evolución teórico y el observado en el sistema por medio de los análisis químicos, las fases minerales más abundantes durante las campañas fueron el yeso y la halita, aunque por difracción de rayos x también se detectaron thenardita, mirabilita, glauberita, eugsterita y proberita. Pudieron determinar el efecto producido por la redisolución selectiva y rápida de las sales más solubles, restringiendo la presencia de los carbonatos a los extremos de la cuenca salina, así como también la relación de la presencia de la mirabilita y thenardita debido a la evaporación por capilaridad de aguas salinas subterráneas.

Harrington et al. (2008). Estudiaron los procesos hidrológicos y geoquímicos que controlan las variaciones en composición de salmueras subterráneas en el sureste de Australia, específicamente en cuenca Murray. Para el desarrollo de la investigación realizaron perfiles verticales detallados de las salmueras superficiales (menores a 3 m de profundidad) en cada uno de los tres lagos salinos estudiados la salina principal, la salina occidental y el denominado Salt Lake. Estos perfiles fueron realizados cada 5 a 10 cm en las paredes de las zanjas cavadas en los puntos de muestreo. Se realizaron perforaciones a profundidades de alrededor de 35 m y 20 m respectivamente en los bordes la salina occidental y salina principal, tomando los cortes de la perforación para análisis de cloruros en el agua porosa. Se instalaron piezómetros de PVC en todos los sitios de muestreo y en algunas zonas intermedias de recarga, se tomaron muestras dos veces al año entre 1998 y 2001. Determinaron que a pesar de las diferencias físicas y la presencia o no de capas salinas los diferentes cuerpos estudiados presentan muy poca variabilidad química, atribuyen esto al hecho de la homogeneidad de los



procesos que afectan la cuenca, concentración evaporativa de las aguas, mezclas de las aguas de alta y baja salinidad de los cuerpos, y precipitación de halita y yeso en la superficie subyacente. El otro factor dominante es la similitud química de las aguas subterráneas de la zona y por último que a excepción de la remoción de Ca^{2+} y SO_4^{2-} por la precipitación de yeso el resto de los solutos se comportan de manera conservativa en el sistema.

Méndez (2008). Realizó un estudio de las características geológicas y geoquímicas, la posible formación de facies de protodolomita o sedimentos calcáreos enriquecidos en Mg debido a procesos diagenéticos en ambientes de sabkha y lagunas hipersalinas localizados al nor-este del archipiélago de Los Roques. Para ello realizó el estudio de muestras de sedimentos del archipiélago pertenecientes a los ambientes mencionados. A las muestras le fueron determinadas la composición mineralógica por medio de difracción de rayos X, y se determinó la concentración de los elementos Ca, Mg, Sr, Ba, Na, K, Fe y Zn por medio de espectrometría de emisión atómica inductivamente acoplado a plasma. El autor determinó que en los ambientes de lagunas hipersalinas y sabkha del archipiélago debido a procesos diagenéticos se están formando facies enriquecidas en magnesio a partir de una mineralogía inicial de aragonito y calcita magnesiana, en lo que denominó un estado de protodolomita. Concluyó que dicho enriquecimiento en Mg está asociado a la alta evaporación de los fluidos y la formación de minerales evaporíticos permite el aumento de la relación Mg/Ca.

Bowen y Benison (2009). Determinaron las características geoquímicas de una serie de lagos salinos en el suroeste de Australia que presentan condiciones ácidas y alcalinas. Se plantean como objetivos el identificar las posibles fuentes de las condiciones de dichos lagos que presentan en promedio un pH de 4. Para lograr sus objetivos realizan un muestreo de 59 lagos en la zona suroeste de Australia durante 3 etapas de campo en 2001, 2005 y 2006 respectivamente. Realizaron mediciones en campo de pH, salinidad, sólidos disueltos totales y temperatura de las aguas superficiales de los lagos así como de aguas subterráneas. Adicionalmente efectuaron un estudio sedimentológico detallado



analizando la composición mineralógica, palinología, y análisis bacterial. Los análisis de iones fueron realizados mediante cromatografía iónica, posterior a una dilución 1/1000 de las muestras. Para algunos elementos se utilizó fluorescencia de rayos-x, el bicarbonato fue determinado mediante titulación. Se analizaron los isótopos de oxígeno e hidrógeno para determinar el origen de las aguas. Los autores concluyeron que las inusuales condiciones de las aguas de los lagos y subterráneas estudiadas reflejan una historia compleja y una gran variedad de procesos están afectando su química, entre los más importantes podemos mencionar disolución de las costras salinas producto de la interacción con aguas meteóricas que adicionalmente aportan solutos a los lagos, interacciones agua roca, transporte por el viento y aerosoles marinos de especies de S, y movilización de especies como Fe, Al, Si y el S mencionado anteriormente por sedimentos subyacentes.

METODOLOGIA

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este proyecto se llevó a cabo una metodología de trabajo distribuida en tres etapas que serán desarrolladas a continuación.

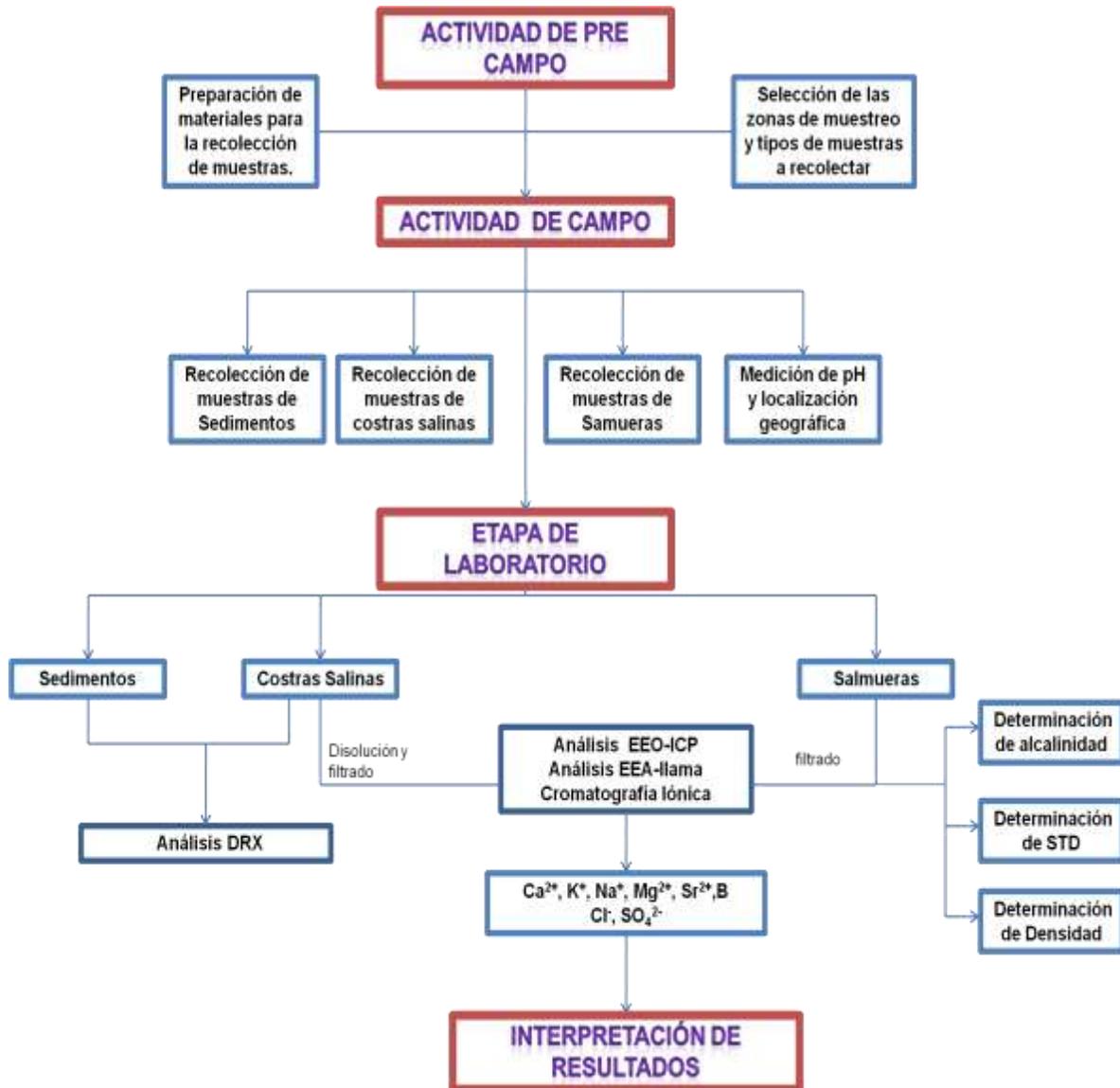


Fig. 21 Esquema de la metodología utilizada en el proyecto



Etapa de pre-campo

Se adquirió el material necesario para la toma de las muestras, que contempló la adquisición de bolsas plásticas para las muestras de sedimentos y costras salinas, y envases de polietileno de 0.5 L para las muestras de aguas.

Otra de las actividades realizadas en esta etapa fue la preparación de los equipos y el material a utilizar durante la etapa de campo, entre estas actividades destaca el lavado de los envases de polietileno de 0.5 L, fueron enjuagados con agua desionizada al menos dos veces y luego fueron lavados con una solución al 10 % (v/v) de HNO₃, para luego ser nuevamente enjuagados con agua desionizada.

Etapa de campo

Durante la etapa de campo se tomaron muestras de salmueras, costras salinas y sedimentos, correspondientes a la planicie costera del área de influencia del delta del río Mitare, ubicado en la costa nor-central del estado Falcón y las salinas de Bajarigua y Las Cumaraguas. La misma se llevó a cabo en el mes de junio del año 2010.

Es importante mencionar, que esta actividad estuvo precedida por una salida exploratoria realizada en el mes de febrero del mismo año, en donde se recolectaron algunas muestras de sedimentos (Bajarigua y planicie costera) y costras salinas (Las Cumaraguas y planicie costera), que sirven de referencia en este trabajo.

En total fueron recolectadas 13 muestras de salmueras, 7 muestras de costras salinas y 11 muestras de sedimentos superficiales.

Cada tipo de muestra fue recolectada y tratada en campo, empleando una metodología particular en función de su naturaleza. Las mismas se describen a continuación:

1. Sedimentos superficiales y costras salinas: para la toma de muestras de sedimentos superficiales y costras salinas se empleó un barreno de

aproximadamente 15 cm de profundidad y 6 cm de diámetro, éstas fueron almacenadas en bolsas plásticas debidamente rotuladas para luego ser transportadas al laboratorio.

2. Salmueras: en el caso de las muestras de salmueras se utilizaron envases de polietileno de 0,5 L para su almacenamiento y posteriormente se refrigeraron a una temperatura menor a 4°C. Igualmente en campo, se midió el parámetro de pH de las aguas.

Tabla 5. Leyenda de puntos de muestreo y muestras recolectadas.

Zona Muestra	Punto de muestreo	Ubicación (UTM)		Muestra	Tipo de muestra
		E	N		
Salina de Las Cumaraguas	1	403717	1335889	FCS1	Costra salina
				FCS2	Costra salina
				FCS3	Costra salina
				FCA1	Salmuera
				FCA2	Salmuera
Salina de Bajariguas	2	396838	1339104	FBS1	Sedimentos Superficiales
	3	396827	1339210	FBS2	Sedimentos Superficiales
				FBA1	Salmuera
				FBA2	Salmuera
	4	396638	1339057	FBS3	Sedimentos Superficiales
	5	396491	1338898	FBS4	Sedimentos Superficiales
	6	396528	1338917	FBA3	Salmuera
				FBA4	Salmuera
Planicie Costera	7	389295	1268534	FPS1	Costra salina
	8	19 389396 E	1268489 N	FPS2	Costra salina
	9	389369	1268501	FPS3	Costra salina
	10	386605	1272315	FPS4	Sedimentos Superficiales
				FPA1	Salmuera
				FPA2	Salmuera
				FPS5	Sedimentos Superficiales
	11	387673	1271391	FPS6	Sedimentos Superficiales
				FPA2	Salmuera
				FPA3	Salmuera
	12	389506	1266732	FPS7	Sedimentos Superficiales
				FPS8	Costra salina
				FPA4	Salmuera
FPA5				Salmuera	
13	386273	1272551	FGA	Salmuera	

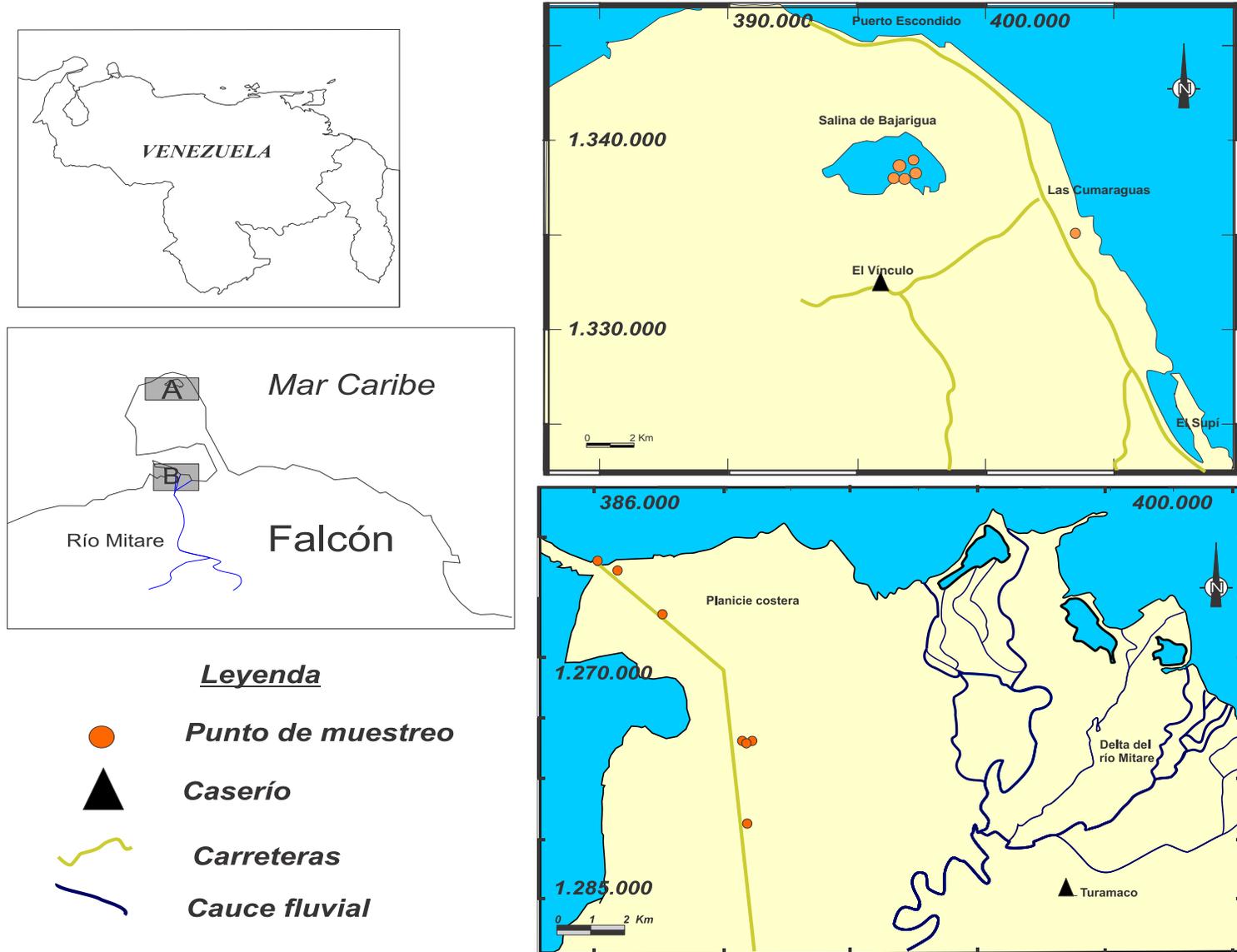


Fig. 22 Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.



Etapa de Laboratorio

La actividad de laboratorio estuvo constituida por una serie de procedimientos en el tratamiento de las muestras, como el secado de las muestras de sedimento y costras salinas, para luego proceder a la disolución de estas últimas, así como el filtrado de las muestras de salmueras luego de la medición conductividad y alcalinidad. Posteriormente se llevaron a cabo las determinaciones químicas que involucraron el análisis por EEO-IAP, EEA-llama, Cromatografía iónica, determinación de STD y densidad. A continuación se describen en detalle los procedimientos antes mencionados.

Tratamiento físico

Secado y disolución: El tratamiento de las muestras dio inicio con la extracción de las muestras de sedimentos superficiales y de costras de las bolsas plásticas donde fueron colectadas, se rotularon adecuadamente para el trabajo en el laboratorio y se colocaron en poncheras plásticas individuales lavadas previamente con agua desionizada donde se dejaron secar a temperatura ambiente por el periodo de tiempo necesario (dependiente principalmente del grado de humedad de las muestras), aisladas de humedad y de partículas. En el caso de las costras salinas se procedió a la disolución de parte de las muestras en agua desionizada para los análisis químicos a realizar, para ello se pesaron aproximadamente 8 g de cada una de las muestras las cuales previamente se colocaron en una estufa a 110°C y posteriormente colocados en un desecador, se pesaron los 8 g se procedió a su disolución en agua desionizada (18 MΩ.cm) y su posterior filtrado para llevar la disolución a un balón aforado de 100 mL de capacidad.

Análisis químicos

Determinación de la alcalinidad

La alcalinidad fue determinada mediante una titulación potenciométrica, donde el titulante fue una solución de H₂SO₄ 0,016 M y la alícuota de la muestra fue de 10



mL. Para esta valoración fue utilizada una bureta automática de 50 mL, y un pH-metro marca Orión 250 A. el método utilizado en la titulación es el método de Gran, caracterizado por identificar el punto en el que estequiométricamente toda la alcalinidad ha sido consumida y la concentración de iones hidronio libres comienza a aumentar (Drever, 1997). Este método se basa en graficar la función de Gran: $(V+v) 10^{-pH}$ (siendo V el volumen inicial de la muestra y v, el volumen de titulante añadido) en función del volumen de ácido añadido v. Este método fue aplicado a cada una de las muestras por triplicado y se utilizó el promedio de los resultados para hacer los cálculos de alcalinidad, reportados como mg/L de HCO_3^- . Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación utilizando el volumen de ácido determinado por la gráfica de Gran (Kehew 2001).

$$Alk = \frac{mL_{\text{ácido}} \times N_{\text{ácido}} \times \text{Peso equivalente } HCO_3^{2-} \times 1000 \text{ mg/g}}{mL_{\text{muestra}}}$$

Determinación gravimétrica de sólidos totales disueltos y densidad:

Para la determinación de estos parámetros se realizó un ensayo gravimétrico, para ello se tomaron 10mL de cada una de las salmueras y luego de pesar la masa de agua transferida se determinó la densidad a la temperatura experimental, que en este caso fue de 26°C.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}(T^{\circ})}$$

En el caso de los sólidos totales disueltos, se colocaron los 10mL transferidos a las fiolas en una estufa a 110°C hasta alcanzar peso constante y luego por medio de la siguiente fórmula se realizó el cálculo de los sólidos totales disueltos (Rainwater 1960).

$$STD_{\text{ppm}} = \frac{1}{\text{Densidad}} \times \frac{1000}{\text{mL muestra}} \times \text{mg residuo}$$



Espectroscopía de emisión óptica inductivamente acoplada con fuente de plasma (/EEO-IAP): Las concentraciones de los cationes mayoritarios (Ca, Mg), y elementos traza (Al, Fe, Si, Li, B, Sr, Ba), fueron determinadas a través la técnica EEO-IAP. Para ello, se empleó el equipo modelo *Ultima 2*, marca *HORIBA Jobin Yvon*. Las condiciones de trabajo y el rango espectral abarcado, se presentan en el apéndice I. Para su análisis fue necesaria la obtención de curvas de calibración para los elementos aquí mencionados y una dilución de 20 veces de las muestras de salmueras y diluciones de costras salinas.

Espectroscopía de emisión atómica con llama, EEA-llama: A través de EEA-llama se determinaron las concentraciones de los elementos Na y K. Se empleó el instrumento modelo 200, marca *Perkin Elmer*. De igual manera que para el instrumental anterior, las condiciones de trabajo y el rango espectral abarcado, se presentan en los apéndices. Para realizar los análisis fue necesario el realizar una variedad de diluciones a las muestras, estas diluciones abarcan desde 10 y 25 veces hasta 4000 y 5000 veces.

Cromatografía Iónica: a través de al cromatografía iónica fueron determinados los aniones SO_4^{2-} y Cl^- , utilizando un cromatografo iónico marca *DIONEX* modelo *DX-100*, las condiciones de trabajo se encuentran en los apéndices al igual que con los instrumentales anteriores. Para realizar las determinaciones al igual que con la espectroscopia de emisión atómica a la llama fue necesario utilizar una variedad de diluciones distintas para las determinaciones, utilizando diluciones de 25, 50, 200 y 4000 veces.

Tratamiento de Datos

De los procedimientos anteriores se obtuvieron una serie de datos, y para cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación se utilizaron una serie de herramientas estadísticas y gráficas para facilitar el manejo de los datos, así como también las interpretaciones pertinentes.

Para evaluar la validez y calidad de los distintos análisis químicos realizados, se utilizaron las herramientas del balance iónico, relación cationes y aniones,



correlación entre la conductividad teórica y de campo, con sus interpretaciones y observaciones pertinentes en el caso de las muestras de salmueras. Adicionalmente se realizó la determinación de los índices de saturación (IS), de una serie de fases minerales en base a los datos obtenidos en las determinaciones químicas.

Se elaboraron diagramas ternarios para la clasificación de las salmueras estudiadas. Se elaboraron gráficas de relaciones interelementales para el estudio del comportamiento químico de los solutos en las aguas, y para la determinación e identificación de procesos que estén afectando a las salmueras estudiadas durante el proceso evaporativo.

El tratamiento de los datos se llevó a cabo empleando los programas STATISTICA 8, MICROSOFT OFFICE EXCEL 2007, GRAPHER 8 y PHREEQC INTERACTIVE versión 2.17.4137.



PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan, describen e interpretan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la metodología empleada en el presente trabajo de investigación. Para su fácil comprensión primero se presentarán las descripciones de campo realizadas durante la etapa de muestreo, las determinaciones mineralógicas realizadas a las muestras de sedimentos y costras salinas. Posteriormente se presentan una serie de parámetros que nos permiten establecer la calidad de los análisis químicos realizados a las muestras de salmueras y las disoluciones de las costras salinas, seguido de las gráficas para la clasificación de salmueras y relaciones interelementales. Por último se presentarán los resultados de índices de saturación de minerales por medio del modelado geoquímico y una integración y visión general de los resultados obtenidos.

Descripciones de campo

Salina de Las Cumaraguas: se encuentra ubicada en el flanco este de la costa de la Península de Paraguaná, está caracterizada por presentar una serie de "piscinas" de evaporación donde entra el agua del mar Caribe y como producto de su evaporación se produce la acumulación de sales en las mismas. Cabe mencionar que los estrechos canales de entrada de agua a estas piscinas de evaporación han sido modificadas por el hombre, para la explotación de las sales

Estas salinas se caracterizan por la presencia de una capa rígida y compacta de sales de aproximadamente 3-4 cm de espesor, unos 5cm por debajo del nivel de agua dentro de las piscinas de evaporación, no se observan diferencias significativas en el ambiente entre los meses de Febrero durante la salida exploratoria y el mes de Julio durante la campaña de muestreo. Estas piscinas se caracterizan por presentar una coloración roja, esto se debe a la presencia de un alga en las aguas, la cual origina la coloración. Durante la campaña de muestreo se pudo observar que aproximadamente los primeros 35-40cm de la capa de sales estaban conformados por cristales individuales de sales de aproximadamente 2cm

en promedio y que a partir de esta profundidad la capa de sal presentaba una cantidad importante de otros sedimentos y materia orgánica presente, que se evidencia en una coloración gris observada en los sedimentos.



Figura 23. Salina Las Cumaraguas. A) vista punto de muestreo 1. B) sales precipitadas en la salina. C) vista de las piscinas de evaporación, nótese la coloración rojiza de las mismas.

Salina de Bajarigua: se encuentra ubicada al norte de la Península de Paraguaná, entre la población de El Vínculo y Cabo San Román. Se caracteriza por representar una depresión significativa en relación a sus alrededores, presenta en su periferia algunos cuerpos de dunas y vegetación abundante, especialmente al norte. Se encuentra ubicada entre dos sistemas de fallas, el de la falla Las Cumaraguas al sur y un sistema perpendicular a las fallas de Cabo San Román y Puerto Escondido al norte.

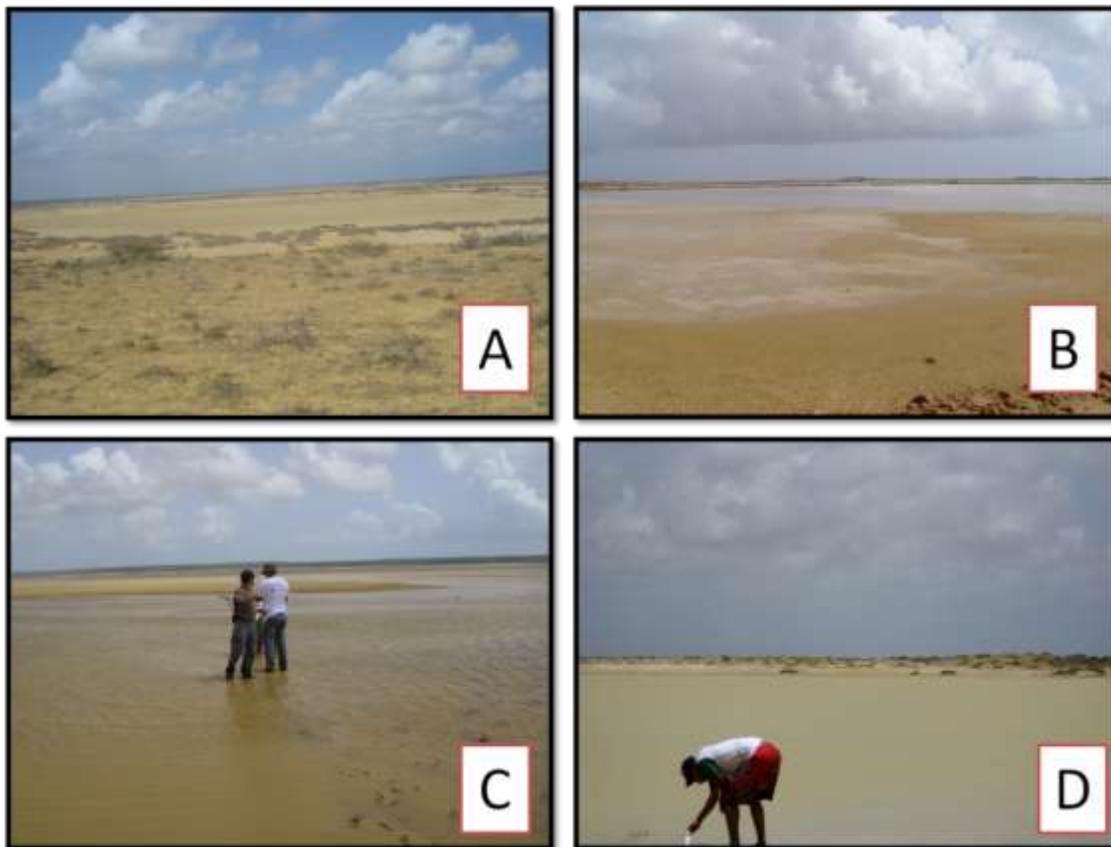


Figura 24. Salina de Bajarigua. A) Febrero 2010. B) Julio 2010. C) Vista punto de muestreo 3. D) Vista campos de dunas desde punto de muestreo 6.

Una particularidad de esta zona de muestreo fue la ausencia de agua durante el mes de febrero, aunque se apreciaron sales precipitadas. En contraste durante la campaña de muestreo en el mes de Julio, al menos el 40% del lugar se encontraba inundado con agua. La zona se caracteriza por la presencia de sales precipitadas a lo largo de toda su extensión, aunque en promedio no presentan un tamaño superior a 1mm, a excepción de una acumulación importante de cristales de yeso encontrados en el punto de muestreo cinco, que alcanzaban un tamaño máximo de 5cm. Adicionalmente se pueden observar emanaciones de gases desde el subsuelo, posiblemente por procesos de desgasificación de las aguas, y en la zona sur de la salina en el punto de muestreo seis se observaron algas en las aguas acumuladas en esta zona.

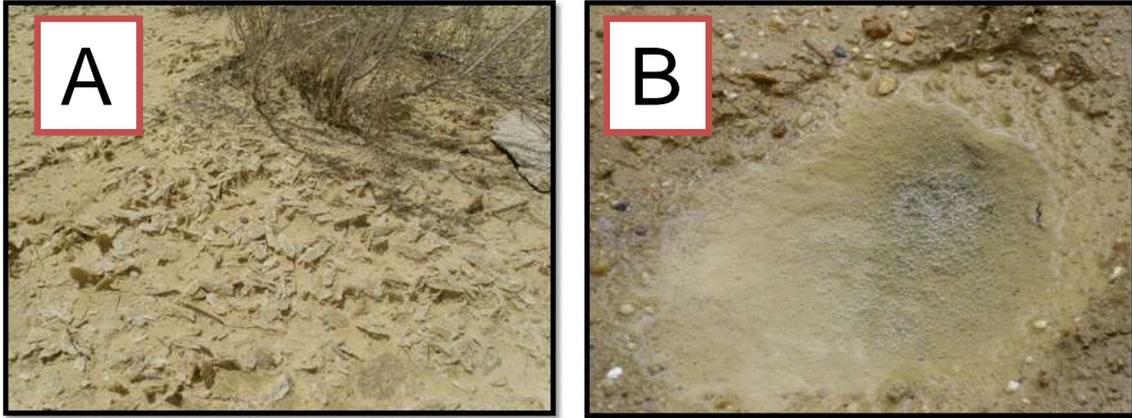


Fig. 25 (A). Cristales de yeso. (B) Emanación de gas observado en las aguas de la salina de Bajarigua.

Planicie costera del río Mitare: la última zona de muestreo fue la planicie costera influenciada por el delta del río Mitare. Esta se caracteriza por presentar una topografía predominantemente plana y presentar escasa vegetación y campos de dunas en las zonas proximales al delta. Durante la salida exploratoria se pudieron observar acumulaciones de sales a lo largo de la planicie, sin embargo no se encontraba agua en contacto con las costras de sales, estas variaban en espesor de 1 y 2 mm en los puntos de muestreo siete y ocho hasta un máximo de 2cm en el punto 9 de muestreo, y cercanas a los campos de dunas no se observaron acumulaciones de sales. El factor eólico puede presentar una importancia en la distribución de sedimentos en la planicie debido a la fuerza y velocidad observada.

Durante la campaña de muestreo se observó una menor acumulación de sales en la planicie, aunque en la zona donde se observaron las acumulaciones tenía una extensión de alrededor de 1Km de largo, esto en el punto de muestreo número doce, el más alejado del golfete de Coro (punto de muestreo 13). La cantidad de agua encontrada en la planicie fue mucho mayor en comparación a la observada en el mes de Febrero en los puntos de muestreo del siete a nueve, aunque la extensión de terreno de la planicie que presentaba capas importantes de sales era mucho menor que las encontradas en el mes de febrero.



Fig. 26. Campos de dunas en la zona proximal al delta del río Mitare



Fig. 27. Imágenes de costras salinas en la planicie costera (febrero 2010)

Es importante mencionar la presencia de algas con formas hexagonales, restos de conchas marinas en los sedimentos más cercanos al golfete y de peces muertos en algunas partes de la planicie producto de la baja de las mareas. El contenido de materia orgánica en algunas zonas de la planicie es realmente importante, produciendo en algunas muestras olores fuertes y colores negros en los

sedimentos. También se evidenció en esta zona el proceso de desgasificación al observar burbujas en las aguas acumuladas en la planicie, principalmente en las zonas adyacentes al punto de muestreo diez.

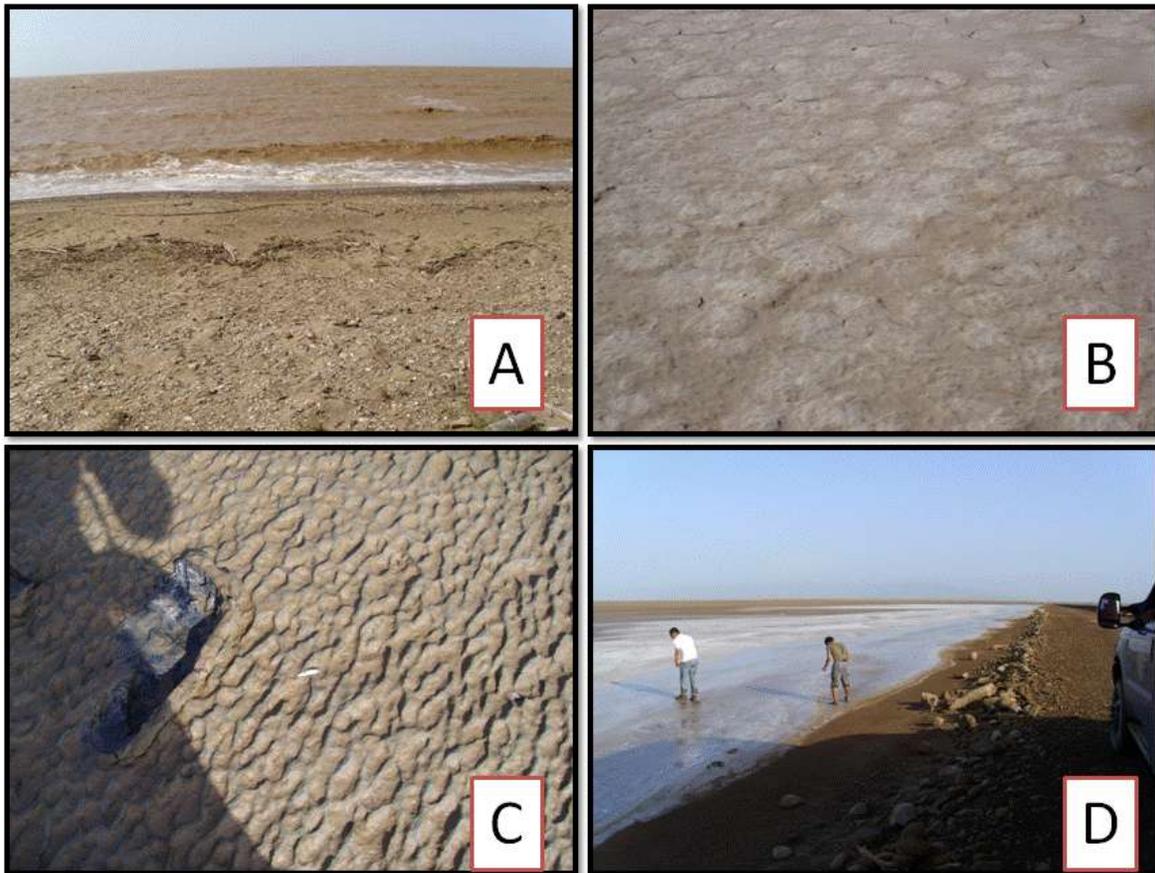


Fig. 28. Planicie costera durante campaña de muestreo (julio 2010). A) vista del golfete de Coro (punto de muestreo 13). B) sales acumuladas en punto de muestreo 11. C) algas observadas en el punto de muestreo 10. D) capas de sales acumuladas en el punto de muestreo 12.



Análisis mineralógico

Fue determinada la composición mineralógica de las muestras de sedimentos superficiales y de las muestras de costras salinas recolectadas. En la tabla seis se presenta un resumen de los resultados mineralógicos obtenidos para las muestras analizadas, los difractogramas individuales de las muestras se encuentran en el apéndice II.

Tabla. 6. Resultados análisis mineralógicos.

Zona Muestra	Código	Punto de muestreo	Tipo de muestra	Mineralogía
Salina de Las Cumaraguas	FCS1	1	Costra salina	Halita
	FCS2		Costra salina	Halita
	FCS3		Costra salina	Halita , Yeso
Salina de Bajarigua	FBS1	2	Sedimentos Superficiales	Halita, Cuarzo, Calcita, Caolinita
	FBS2	3	Sedimentos Superficiales	Halita, Cuarzo, Calcita, Caolinita, Albita, Dolomita.
	FBS3	4	Sedimentos Superficiales	Yeso, Cuarzo, Calcita
	FBS4	5	Sedimentos Superficiales	Halita, Yeso, Cuarzo, Calcita
Planicie Costera	FPS1	7	Costra salina	Halita, Yeso, Cuarzo
	FPS2	8	Costra salina	Halita, Yeso, Cuarzo
	FPS3	9	Costra salina	Halita, Yeso
	FPS4	10	Sedimentos Superficiales	Halita, Cuarzo, Caolinita.
	FPS5	10	Sedimentos Superficiales	Halita, Cuarzo, Calcita.
	FPS6	11	Sedimentos Superficiales	Halita, Cuarzo, Caolinita.
	FPS7	12	Sedimentos Superficiales	Halita, Yeso, Cuarzo, Caolinita.
	FPS8		Costra salina	Halita

/

Determinaciones químicas

Se puede observar en la figura 29 los errores de balance iónico calculados con el programa PHREEQC. Para cada una de las muestras de salmueras estudiadas, el porcentaje de error es alto, en su mayoría presentan un exceso de carga negativa. La fuente de estos grandes errores en el balance pueden atribuirse a una amplia gama de factores.

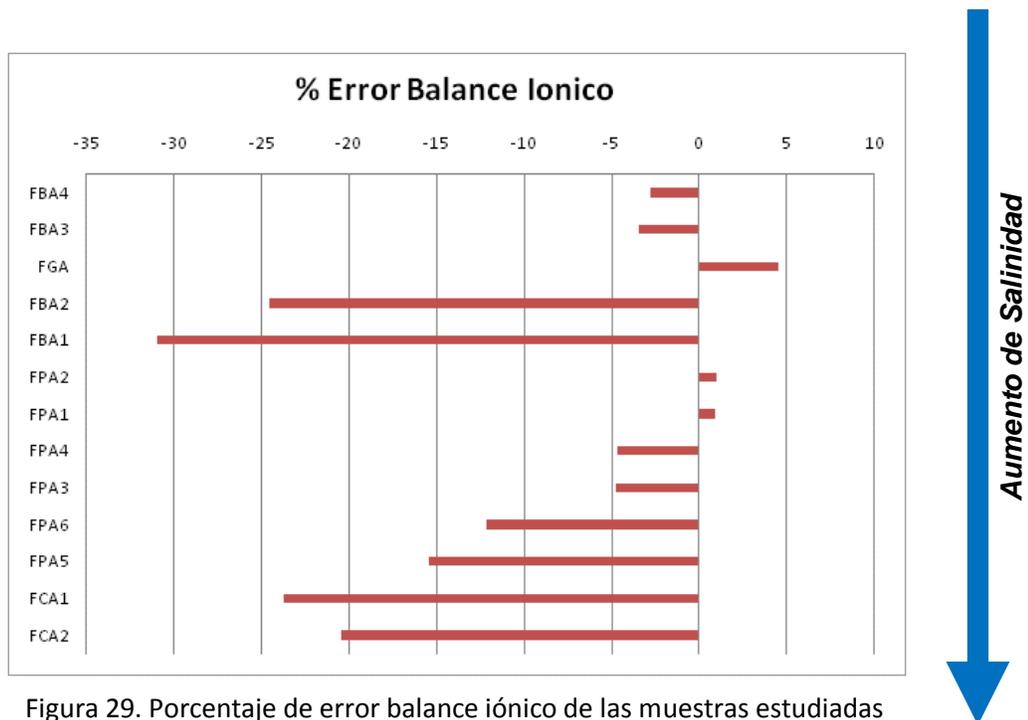


Figura 29. Porcentaje de error balance iónico de las muestras estudiadas

Entre estos factores encontramos el efecto matriz producido en los análisis EEO-IAP, relacionado a concentraciones iónicas concomitantes mayores a 500-1000 ppm, este efecto produce una reducción considerable en la señal emitida por los elementos (Skoog, 2001). Tomando en consideración el alto contenido de iones Na^+ , y Cl^- de las aguas estudiadas, sería razonable considerar que la señal de los demás elementos estaría siendo disminuida por estas altas concentraciones, lo cual sugiere que los valores obtenidos para cationes como Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , K^+ , se encuentran por debajo de su concentración real. Como prueba de ello podemos

observar como para la mayoría de las muestras al aumentar la salinidad también aumentan el porcentaje de error de las mismas. Otra evidencia que respalda esta fuente de error es el exceso de carga negativa observada en la mayoría de las muestras estudiadas (figura 29). De manera generalizada el porcentaje de error neto aumenta a medida que aumenta la salinidad de las mismas. Este efecto matriz puede haber contribuido en gran medida con los errores observados, otro factor determinante pueden ser las diluciones utilizadas para la medición de algunos aniones y cationes, encontradas en el rango entre 200-4000 veces, adicionando una incertidumbre considerable en los valores finales.

Otro factor que puede originar errores al momento de calcular el balance iónico es la presencia de moléculas orgánicas que afecten dicho parámetro, sin embargo en este caso no consideramos sea dominante este efecto. Por último la no determinación de algunos cationes, producto de las diluciones utilizadas en el trabajo, pueden estar originando el exceso de cargas negativas observadas en la mayoría de las muestras.

Otra manera de estimar estos errores mencionados es el graficar la concentración total de aniones contra la concentración total de cationes, la cual debería mantener una buena correlación lineal y una pendiente cercana a la unidad.

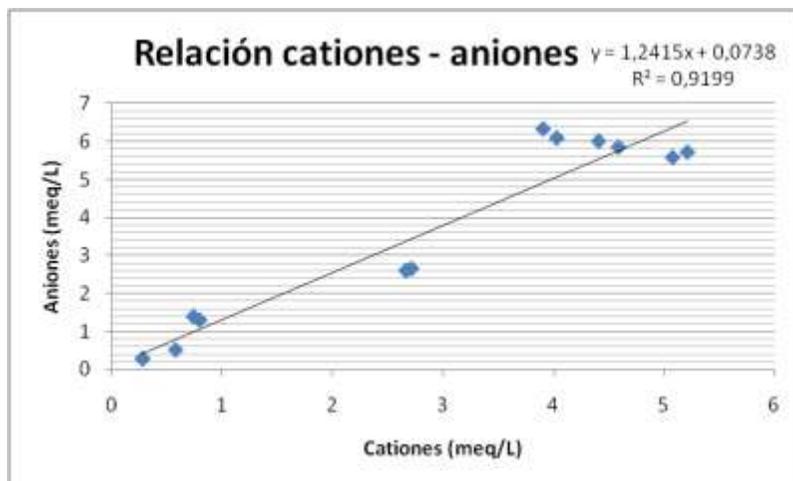


Figura 30. Relación entre cationes y aniones de muestras de salmueras

Como se observa la pendiente es un poco superior a la unidad y aunque no presenta una correlación ideal muy cercana a la unidad, se puede apreciar una

buena linealidad de dicha curva, permitiéndonos ver que a pesar de los errores analíticos mencionados anteriormente los datos reflejan en buena medida las condiciones reales de las aguas estudiadas.

Por último otro parámetro utilizado para estimar la validez de resultados obtenidos en análisis de aguas es el graficar la conductividad de campo contra la conductividad teórica calculada para las distintas muestras de aguas. Esta correlación lineal debería presentar un valor muy cercano a la unidad, como se observa en la gráfica, esta relación presenta un ($R^2=0,92$), esto nos sugiere la presencia de errores en los resultados obtenidos, principalmente en las muestras que se alejan significativamente de la tendencia general. Al observar estos dos parámetros podemos observar dos tendencias, un grupo dominado por las muestras de mayor salinidad a la derecha y otro conformado por el resto de las muestras, estas diferencias en las tendencias podrían sugerirnos diferencias en el comportamiento químico de ambos grupos, posiblemente debido al avance del proceso evaporativo.

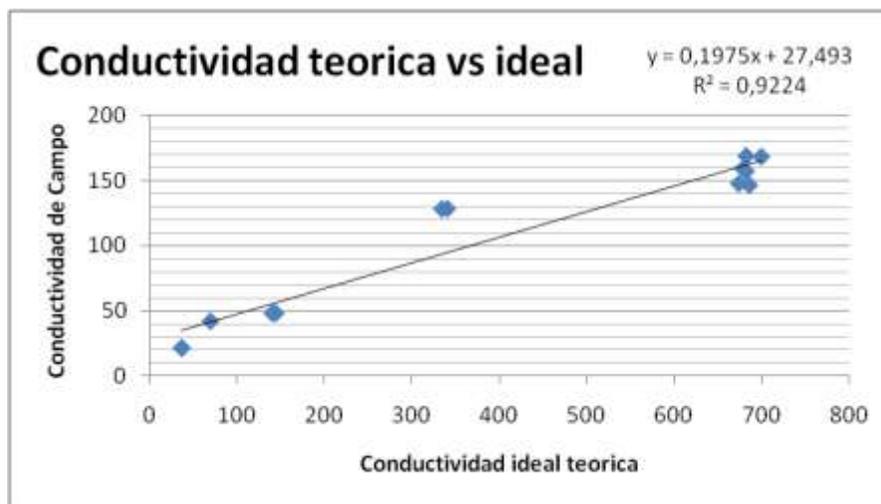


Figura 31. Relación conductividad teórica vs conductividad de campo

A continuación se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos en campo y las determinaciones químicas en las salmueras estudiadas.



Tabla. 7. Parámetros fisicoquímicos, y determinaciones químicas muestras de salmueras analizadas.

Muestra	mS/cm			g/mL	ppm	mg/L								
	Conductividad*	pH	Balance Iónico %error	Densidad	STD	HCO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	B	Sr ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	± 10%			± 1%(**)	± 4%	±10%	±10%	±8%	±5%	±10%	±20%	±10%	±4%	±3%
FCA1	146,3	6,86*	-23,84	1,23	368277	1883	187	9708	69756	7444	101	16	38723	195065
FCA2	147,5	6,86*	-20,48	1,24	374703	1717	208	9862	72683	7353	108	17	37328	187656
FPA1	128,3	7,9	0,92	1,10	158753	203	1482	1626	50244	4982	<Ld	43	5892	89929
FPA2	128,1	7,9	0,96	1,10	158625	217	1535	1635	48780	5113	<Ld	44	6042	87994
FPA3	168,5	7,1	-4,8	1,21	331871	674	471	2923	99024	8169	<Ld	56	16368	185720
FPA4	168,1	7,1	-4,71	1,21	330531	652	415	3013	99024	9804	<Ld	52	15752	191042
FPA5	156,9	7,0	-15,45	1,21	366494	705	451	5123	83415	7594	<Ld	68	13791	202728
FPA6	158,8	7,0	-12,19	1,21	344525	688	482	4532	87805	7616	<Ld	70	13184	197619
FGA	42,4	7,4	4,57	1,02	39439	268	508	384	9268	1662	<Ld	10	2798	10587
FBA1	48,5	8,00	-30,98	1,03	45891	90	1555	315	13171	947	<Ld	31	3292	47107
FBA2	-	8,00	-24,56	1,03	43330	74	1487	325	14634	887	<Ld	29	3192	44003
FBA3	-	7,5	-3,43	1,01	18429	168	875	84	4564	375	<Ld	28	1842	9017
FBA4	22	7,5	-2,77	1,01	18110	204	841	85	4564	394	<Ld	28	1892	8817

(Ld= limite de detección). (Fórmula para cálculo del error del balance iónico en Apéndice) (* Dato de laboratorio.)(** Error relativo porcentual).



Gráficas de clasificación de las salmueras

Con los datos obtenidos de los análisis elementales llevados a cabo, se construyeron los diagramas ternarios propuestos por Eugster y Hardie (1978), para su clasificación (figura 9). En estos diagramas ternarios se llevan a moles los distintos aniones y cationes y luego en base al %molar que representa cada uno se gráficán en los diagramas en donde de acuerdo a la zona del gráfico donde se ubiquen los puntos pertenecientes a cada muestra se le asigna una etiqueta química (ver figura 11).

El anión dominante en todas las aguas es el Cl^- , y los cationes en mayor proporción son el Na^+ y el K^+ , siendo el primero el que se encuentra en mayor proporción. Se pueden diferenciar fácilmente las tres zonas en las cuales lleva lugar el presente trabajo de investigación, viendo como se mantienen agrupadas las diferentes muestras de la planicie costera y por otro lado las muestras de las salinas de Bajarigua y Las Cumaraguas. Se observa como en las muestras de la planicie costera el Cl^- es el anión dominante en todas y mantiene una proporción relativamente similar en todas las muestras, en este grupo también se encuentran la muestra de agua del golfete de Coro y una muestra colocada como referencia que es el promedio mundial de agua de mar.

Planicie costera: las muestras pertenecientes a esta zona de estudio se encuentran agrupadas en la zona delimitada por un contenido del noventa al noventa y cinco por ciento de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Las muestras de la planicie costera mas cercanas al golfete de Coro, presentan un contenido relativo de Mg^{2+} mayor que el encontrado en el resto de las salmueras de la zona, posiblemente asociado a la precipitación de fases carbonáticas debido al proceso evaporativo en las muestras a medida que se alejan del golfete, reflejándose en un aumento de los sólidos totales disueltos como prueba de ello. También puede asociarse a procesos de adsorción de estos cationes en los suelos.

Los aniones de las aguas de esta zona están dominados por el cloruro, aunque en el caso del agua perteneciente al golfete el contenido de sulfatos y carbonatos es



mayor que en el resto de las aguas donde estos disminuyen de manera relativa en las demás muestras.

Se puede observar como el agua del golfete de Coro en comparación al promedio mundial del agua de mar, es relativamente más rico en calcio, magnesio y carbonatos. Se infiere que esto se debe a la gran cantidad de conchas marinas observadas en la costa y que indica una alta presencia de fuentes carbonáticas en estas aguas.

Salina de Bajarigua: estas salmueras se distinguen por presentar un contenido relativo de calcio mayor que las aguas del resto de las zonas de estudio, variando de valores cercanos al diez por ciento en las muestras más al sur de la salina, a un valor menos al seis por ciento en las muestras ubicadas en la zona norte, esto a pesar de que las últimas presentan un valor de sólidos disueltos que triplica el presentado por las primeras, significando una madurez evaporativa mayor de las muestras. Esto nos sugiere el efecto de procesos que alteran el proceso de concentración evaporativa en las aguas en base a esto se infiere que la precipitación de fases minerales sea la causante.

En lo referente a los aniones, observamos un contenido relativamente alto de sulfatos en comparación al resto de las muestras en las muestras ubicadas al sur de Bajarigua. Este contenido disminuye alrededor de un cuatro por ciento en las muestras ubicadas al norte, inferimos que por la misma causa que disminuye el contenido de calcio en las mismas, lo cual concuerda con las observaciones de campo, donde se encontraron cristales de yeso en las cercanías del punto donde fueron muestreadas las muestras ubicadas al sur.

Salina de las Cumaraguas: las muestras pertenecientes a esta zona presentan un contenido de magnesio similar al encontrado en las muestras pertenecientes a la planicie costera, posiblemente relacionado al origen marino de estas salmueras y las encontradas en la planicie costera.

El contenido de aniones de estas aguas en contraste a sus cationes, se encuentra enriquecido en sulfatos en comparación a las aguas de la planicie costera y



empobrecida en cloruros, esto último debido a la precipitación abundante de halita en las piscinas de evaporación de estas salinas.

A continuación se presenta la etiqueta química determinada para cada muestra estudiada, en base a su ubicación dentro de los diagramas ternarios de Eugster y Hardie (1978).

Tabla. 8. Etiqueta Química muestras basados en la Clasificación de Eugster y Hardie (1978). (Ver figuras 11 y 26)

Muestras	Etiqueta Química
FCA1	Na-(Mg)-Cl-(SO ₄)
FCA2	Na-(Mg)-Cl-(SO ₄)
FPA1	Na-(Mg)-Cl
FPA2	Na-(Mg)-Cl
FPA3	Na-(Mg)-Cl
FPA4	Na-(Mg)-Cl
FPA5	Na-(Mg)-Cl
FPA6	Na-(Mg)-Cl
FGA	Na-(Mg)-Cl-(SO ₄)
FBA1	Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO ₄)
FBA2	Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO ₄)
FBA3	Na-(Ca)-(Mg)-Cl
FBA4	Na-(Ca)-(Mg)-Cl
Agua de Mar	Na-Mg-Cl

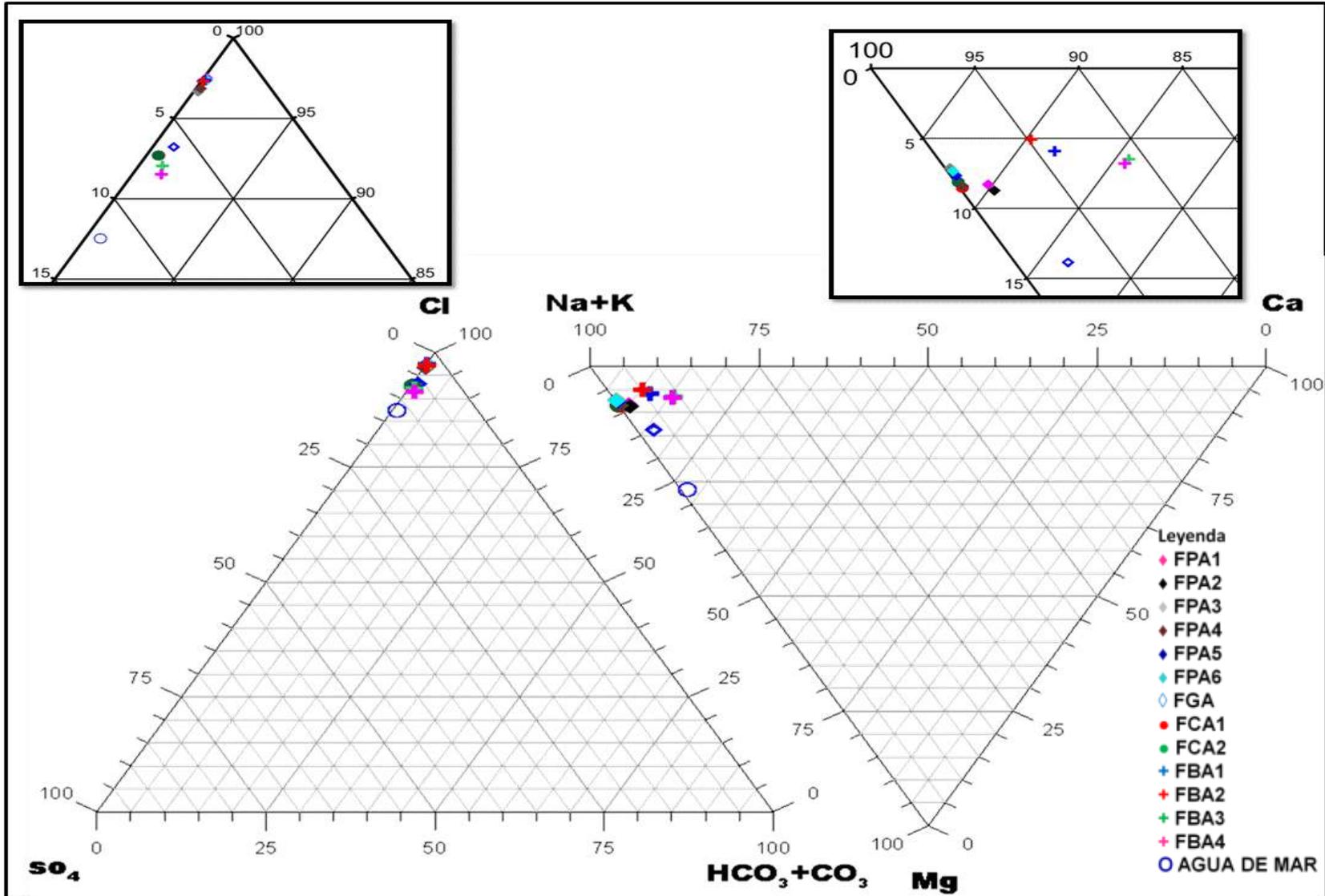


Fig.32. Gráficos ternarios de clasificación de salmueras según Eugster y Hardie (1978).

Relaciones interelementales

Para lograr una mejor comprensión de los procesos que están afectando la química de las aguas estudiadas, las concentraciones de los iones son gráficas contra la concentración de cloruro (figura 13). Este método fue propuesto por Eugster y Jones (1979), tomando como base el comportamiento conservativo que presenta el Cl^- en las aguas ya que el mismo no interviene en las reacciones redox que pueden ocurrir en las aguas, no forma solutos complejos ni tampoco sales que sean poco solubles (Hem, 1985), es por ello que se puede utilizar como monitor del efecto de concentración evaporativa de las salmueras estudiadas.

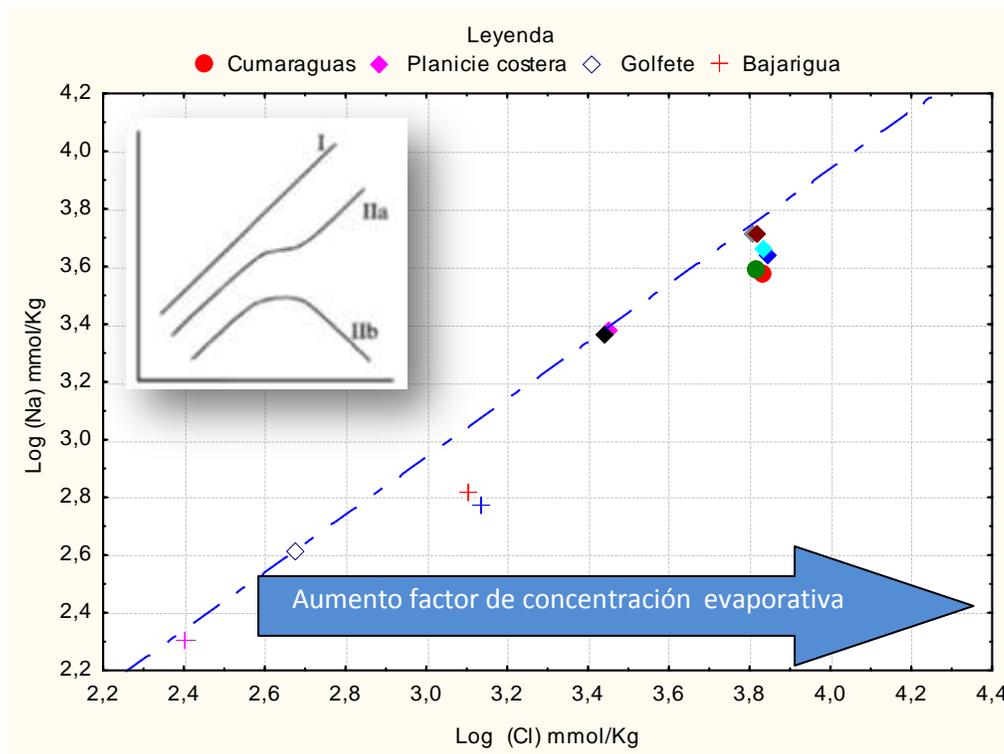


Figura 33. Gráfico Na vs Cl

La figura 33 muestra la relación cloruro contra sodio. Se dibujo una línea intermitente que representa el proceso ideal conservativo de los solutos de las aguas del golfete de Coro producto del proceso de concentración evaporativa. Se aprecia en la gráfica como las muestras pertenecientes a la planicie costera se



encuentran prácticamente alineadas con esta línea recta dibujada y entre ellas mismas. Esto nos indica que el sodio se está comportando de manera conservativa y presentando un comportamiento tipo I como lo plantean Eugster y Hardie (ver figura 13), se observa como a medida que aumenta el proceso evaporativo también lo hace el contenido de sodio, cabe destacar que este efecto concuerda también con la lejanía de las muestras al golfete de Coro, aunque observamos como las últimas 2 muestras presentan una concentración menor a la de las muestras anteriores, esto asociado a la precipitación de halita, produciendo el declive en la concentración de sodio en las aguas. Esto se comprueba al encontrar halita en los sedimentos en contacto con estas muestras como se puede apreciar en la tabla 6, siendo los sedimentos del punto de muestreo 12 y las muestras de agua FPA5 y FPA

.Las muestras pertenecientes a la salina de Bajarigua presentan un comportamiento similar al observado en las salmueras de la planicie pero presentan una pendiente menor, esto indica algún proceso que está afectando de manera considerable el proceso conservativo, entre los cuales hemos mencionado a la precipitación mineral o interacciones con minerales de arcilla. Como se observa en los datos mineralógicos los sedimentos presentes aquí contienen arcillas y halita.

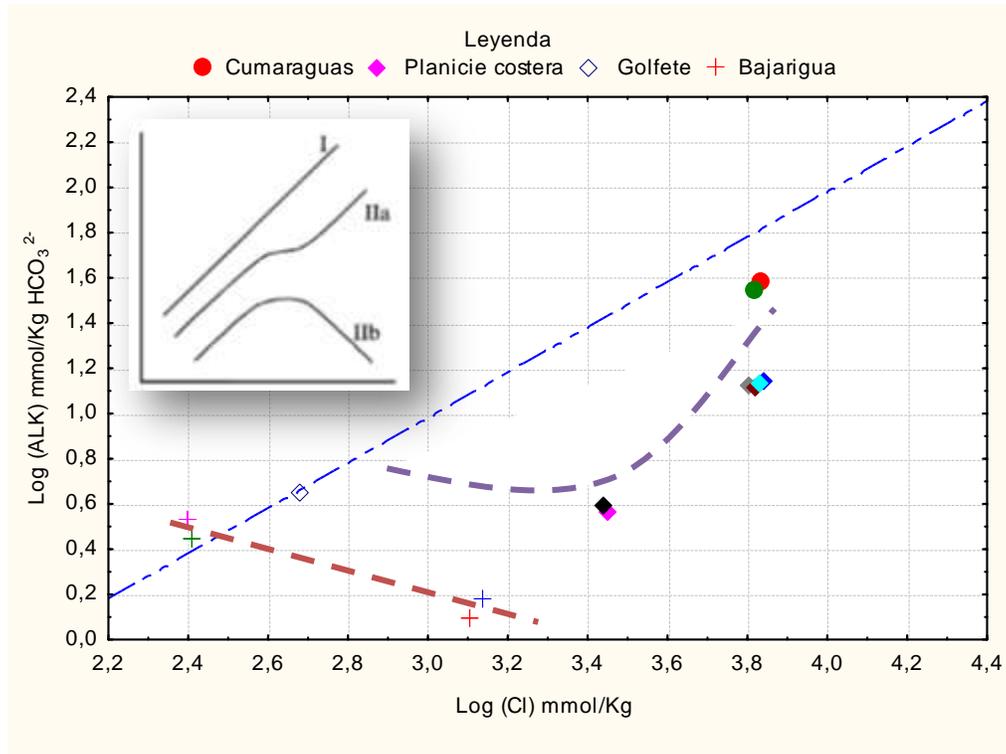


Figura 34. Grafico ALK vs Cl

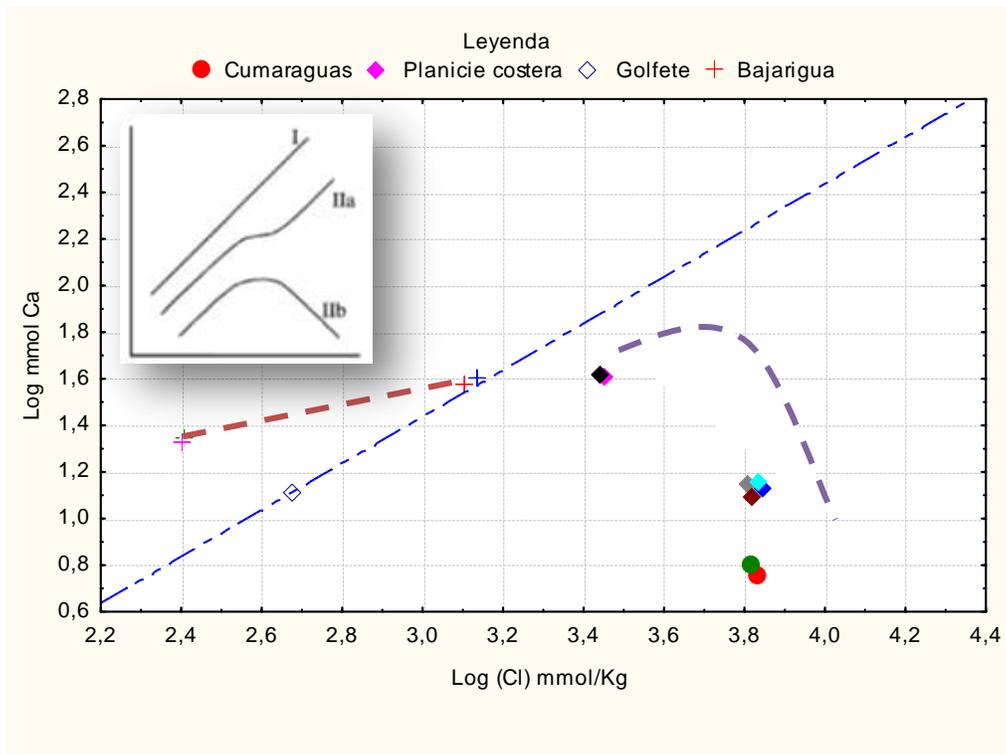


Figura 35. Grafico Ca vs Cl



Las figuras 34 y 35 respectivamente muestran las relaciones alcalinidad contra cloruro y calcio contra cloruro respectivamente. Las muestras pertenecientes a la planicie costera presentan un aumento sostenido de la alcalinidad, pero con una tendencia exponencial, esta se aleja considerablemente del comportamiento ideal expresado por la línea punteada. Esto indica la presencia de un proceso que este removiendo parcialmente el contenido carbonatico de las aguas. En la gráfica 30 se observa como el calcio de las muestras de la planicie presentan un comportamiento inverso al observado en la gráfica de alcalinidad, esto indica que el calcio está siendo removido de las aguas muy probablemente por la precipitación de una fase mineral carbonatica. El comportamiento observado por estos solutos nos permite inferir que el comportamiento de estos solutos en este ambiente responde a las tendencias IIa en el caso de la alcalinidad y IIb de parte del calcio de las propuestas por Eugster y Hardie (figura 13).

Las muestras pertenecientes a la salina de Bajarigua presentan un comportamiento inverso al observado en la planicie costera, es decir el calcio se comporta de manera conservativa, mientras que la alcalinidad se agota rápidamente. De esta manera concluimos que en la salina de Bajarigua estos solutos presentan un comportamiento del tipo IIa en el caso del calcio y IIb en el caso de la alcalinidad.

Por último, las gráficas sugieren que las muestras de las Cumaraguas presentan un comportamiento similar a las muestras de la planicie costera donde el calcio se agota de las salmueras y las especies asociadas a los carbonatos merman parcialmente su concentración pero no llegan a agotarse.

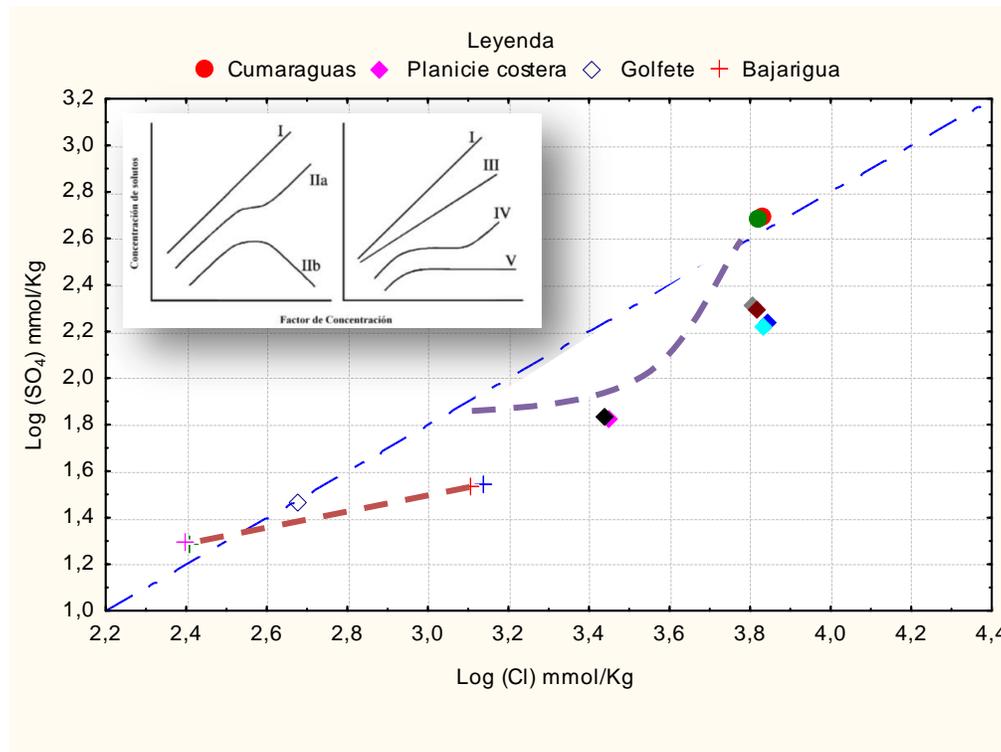


Figura 36. Grafico SO₄ vs Cl

En la figura 36 se observa la relación sulfatos contra cloruros, ésta presenta una tendencia similar a la observada en la alcalinidad. Las muestras pertenecientes a la planicie presentan un comportamiento tipo IIa, aunque en esta oportunidad se encuentran más cercanas a la línea de concentración evaporativa ideal del golfete de Coro. Esto nos sugiere que el proceso de precipitación de sulfatos no es tan eficiente para removerlos de las salmueras en comparación a los carbonatos.

Las muestras pertenecientes a la salina de Bajarigua presentan un comportamiento en los sulfatos similar al observado anteriormente en el calcio, lo cual sugiere un comportamiento semi-conservativo producto de la precipitación de una fase mineral y un comportamiento IIa o III.

Las muestras pertenecientes a las Cumaraguas presentan un comportamiento similar al de las muestras de la planicie, con una alta concentración de sulfatos en sus aguas, asociado a lo avanzado del proceso evaporativo en estas aguas.

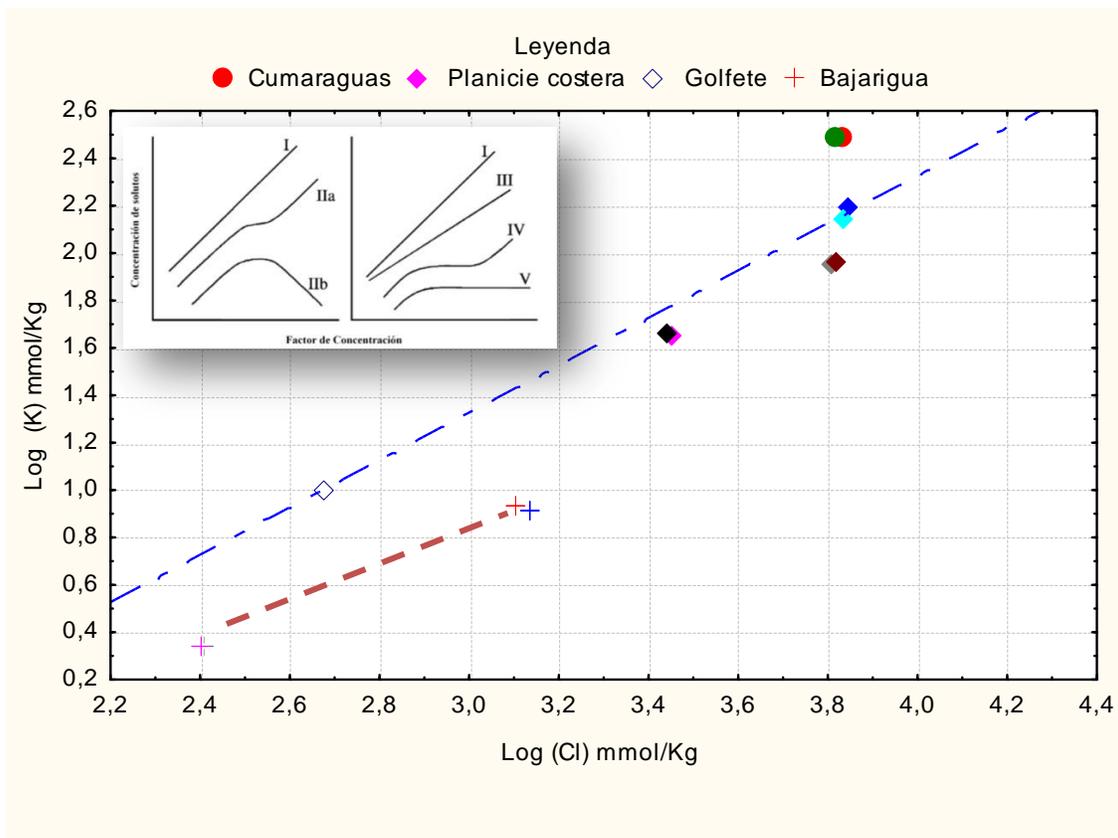


Figura 37. Grafico K vs Cl

La figura 37 nos muestra el comportamiento del potasio al gráficarlo contra el cloruro. Se observa un comportamiento conservativo tipo I en la salina de Bajarigua. En las muestras de la planicie costera se observa cómo se mantiene conservativo con una pequeña desviación de la tendencia, la cual se infiere es debida a procesos de interacción con minerales de arcilla en el caso de las primeras cuatro muestras para luego en las muestras de mayor numero de solidós totales disueltos, debido a la precipitación de alguna fase mineral que contenga sodio presentando un cambio de tendencia a una tipo IV.

Las muestras de la salina de Bajarigua presentan un comportamiento conservativo a semi-conservativo por lo cual su comportamiento puede clasificarse como Tipo I o posiblemente sea del tipo III, viéndose afectado por varios procesos.

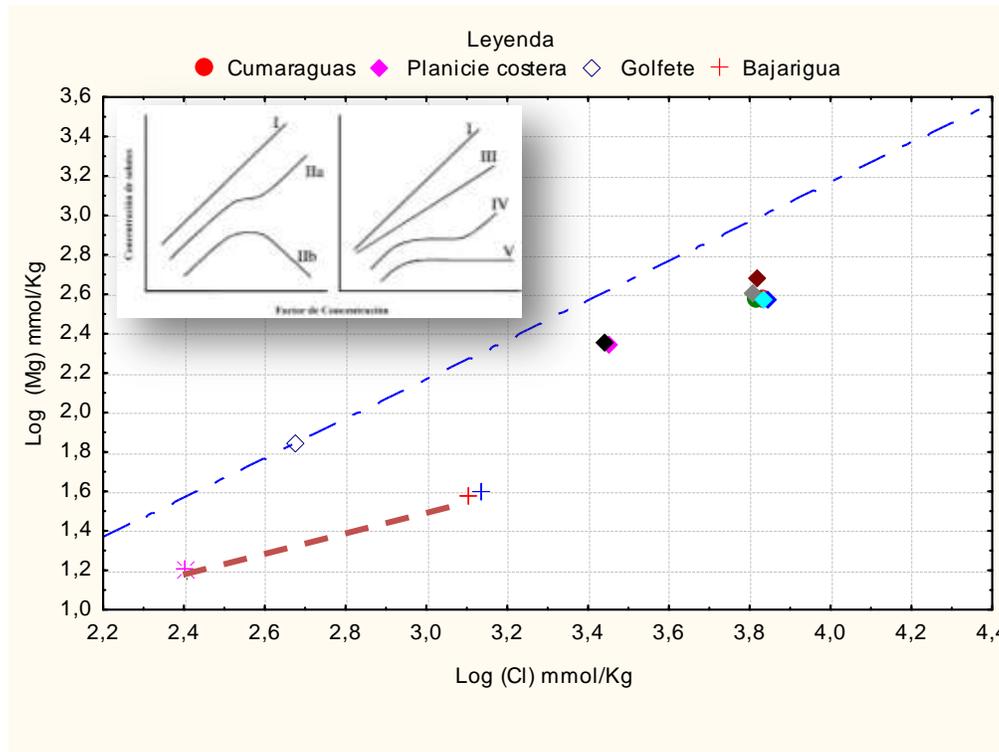


Figura 38. Gráfico Mg vs Cl

En la figura 38 se observa la relación magnesio contra el cloruro de las muestras de salmuera estudiadas, se observa un comportamiento semi conservativo. Se observó que las muestras pertenecientes a la planicie costera mantienen una concentración relativamente igual entre las muestras más alejadas del golfete. Esto podría estar indicando un proceso que mantenga constante el contenido de magnesio en las salmueras. Se proponen dos procesos que pueden dar origen a este comportamiento, la precipitación de fases carbonáticas que presenten un contenido importante de magnesio, siendo calcita magnésica o dolomita. Otra posible explicación es que tanto el magnesio como el calcio se encuentren en equilibrio con sus fases minerales, produciendo una variación pequeña en su contenido. Sin embargo, al observar detenidamente ambas gráficas se observa

como en el magnesio de las muestras de mayor salinidad presentan un contenido mayor que el presentado por las otras muestras, que en principio presentan sólidos totales disueltos mayores y al encontrarse en una etapa más avanzada del proceso evaporativo su contenido debería ser mayor. Este efecto puede ser consecuencia de procesos de dolomitización singenéticos, comunes en ambientes de sabkhas donde la relación Mg/Ca es cercana a 10/1 (Méndez, 2008). Si se observa la figura 30, se aprecia un comportamiento inverso al observado en la figura 33, donde las muestras de mayor salinidad presentan un contenido de calcio ligeramente mayor al encontrado en las otras, producto de la sustitución de calcio por magnesio en los carbonatos.

En las muestras pertenecientes a la salina de Bajarigua se observa un comportamiento semiconservativo, de este modo se plantea que su comportamiento se ajusta al tipo III establecido por Eugster y Hardie como se observó en el potasio.

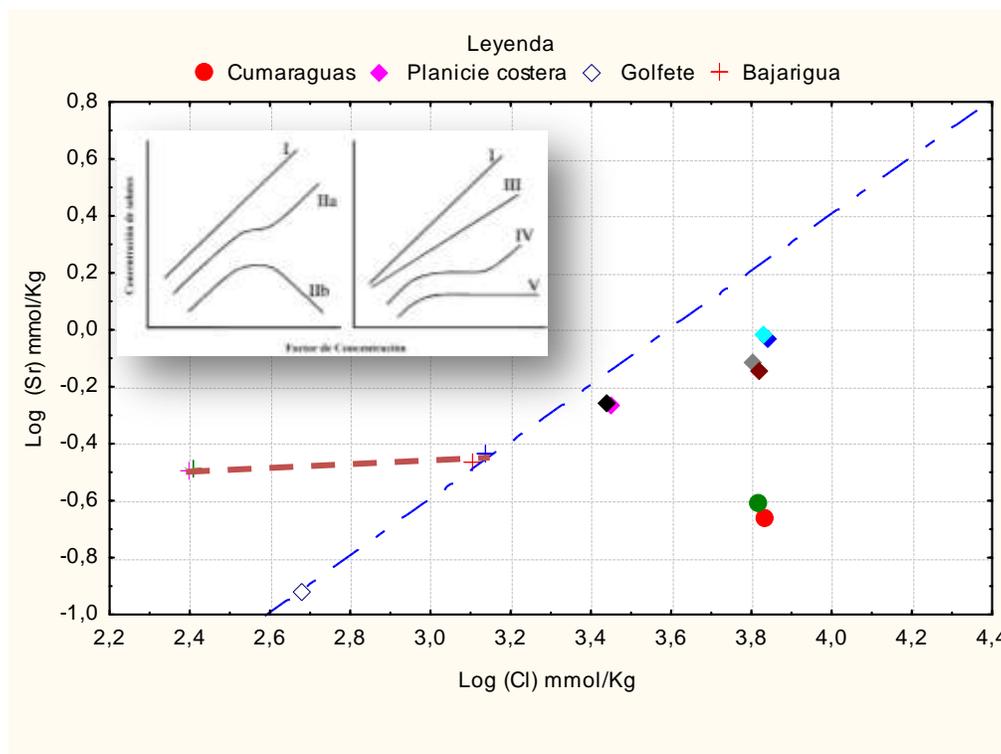


Figura 39. Grafico Sr vs Cl



La figura 39 muestra el comportamiento del estroncio en las muestras estudiadas, se observó un comportamiento semi-conservativo en las muestras de la planicie costera. De su comportamiento inferimos un proceso de remoción de estroncio de las aguas, posiblemente la precipitación de alguna fase mineral. La tendencia presentada por este ión puede describirse como una tendencia del tipo IIa o tipo IV.

En contraste las muestras de la salina de Bajarigua presentan concentraciones más bajas que las observadas en la planicie costera y con una pendiente muy baja, prácticamente presentan la misma concentración se infiere que el poco estroncio que hay está formando parte de las fases minerales precipitadas y mantiene su concentración relativamente constante.

De esta gráfica se concluye que las muestras de la salina de las Cumaraguas a pesar de presentar un comportamiento similar a las muestras de la planicie costera en las relaciones elementales aquí expuestas, se evidencia una diferencia fundamental en la composición química de las aguas que originan ambas salmueras al observar un comportamiento distintito al observado anteriormente por la muestras de Las Cumaraguas, respecto a las de la planicie costera. Siendo el contenido de estroncio mucho menor en la planicie que en las Cumaraguas, aunque indudablemente las aguas que las originan presentan similitudes importantes en su composición química, esto posiblemente asociado a su origen marino común.

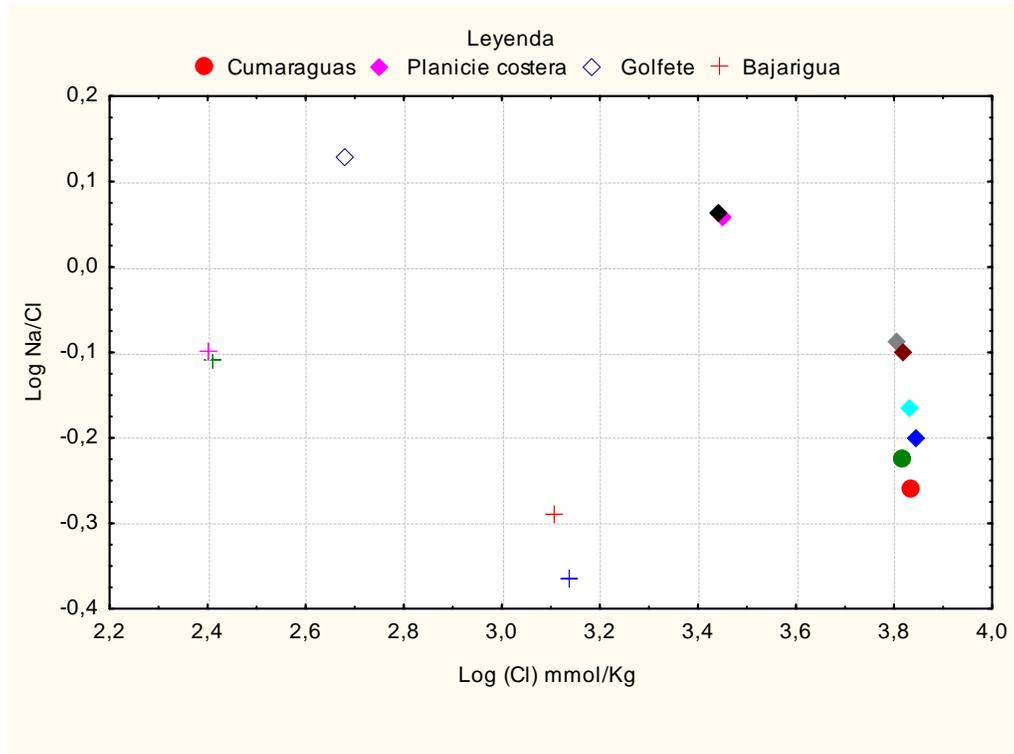


Figura 40. Grafico Na/Cl vs Cl

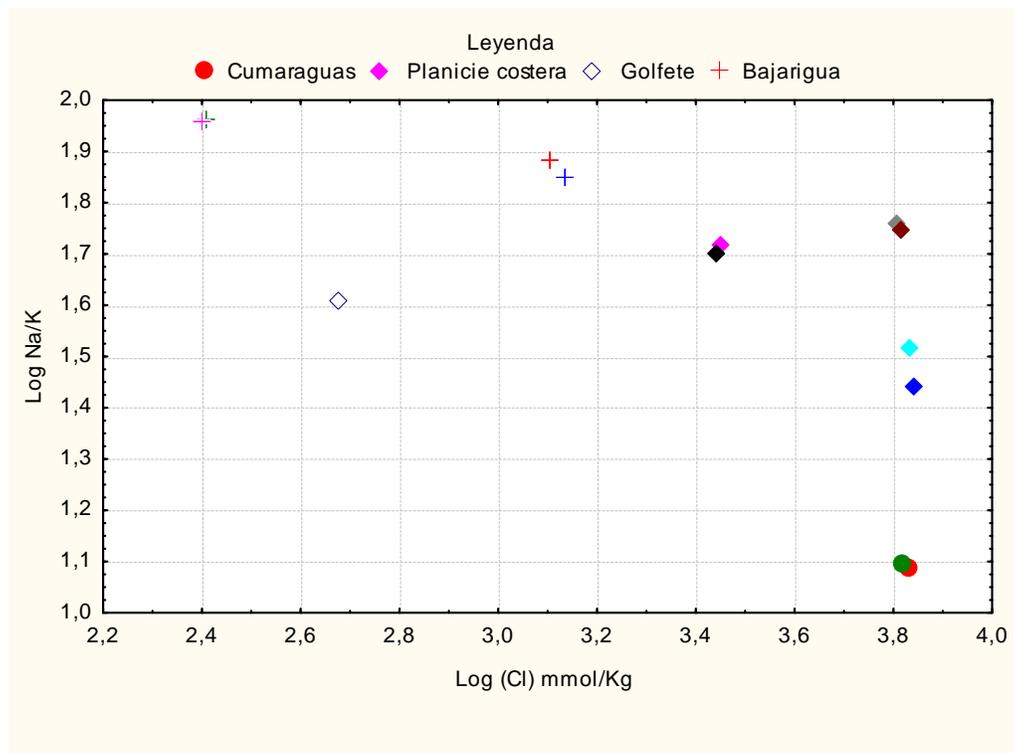


Figura 41. Grafico Na/K vs Cl



En las figuras 40 y 41 se encuentran gráficas de dos relaciones elementales en función de la cantidad de cloruro en las muestras estudiadas. La figura 35 muestra la relación Na/Cl. Se aprecia una disminución de la relación Na/Cl con el aumento del contenido de cloruro, que puede asociarse al avance en el proceso de evolución evaporativa de las aguas, corroborando el comportamiento conservativo que le atribuyo en este trabajo de investigación. Este comportamiento es indiferente del sector donde esta se encuentre la salmuera.

La figura 36 muestra la relación Na/K, en la cual se observan diferencias contrastantes en las distintas zonas estudiadas. En las muestras de la planicie costera se observa un aumento de esa relación de la muestra del golfete a las muestras del segundo de la planicie, produciéndose una disminución importante en las últimas dos muestras, de este comportamiento se puede concluir que el sodio se estaba concentrado en un mayor grado en las aguas producto del proceso evaporítico hasta que la precipitación de alguna fase mineral en este caso halita, produce una caída importante en esta relación Na/K, más aún tomando en cuenta que los procesos de remoción del potasio son mucho menos efectivos que la precipitación mineral, ya que estaríamos hablando de adsorción en minerales de arcilla, por ejemplo.

En las muestras de la salina de Bajarigua se aprecia una disminución en esta relación de lo cual se puede concluir que en estas aguas esperaríamos que el índice de saturación de la halita ya se haya alcanzado y por lo tanto este precipitando esta fase mineral.

Índices de saturación de minerales

Por medio del programa de modelado PHREEQC interactive, fueron obtenidos los índices de saturación de una gama de fases minerales. En la figura 42 se gráfican los índices de saturación obtenidos de las fases minerales más comunes en los ambientes evaporíticos. En los apéndices se puede encontrar una

tabla con todos los índices de saturación obtenidos, de aquellas fases minerales que se encuentren sobresaturados al menos en una de las muestras estudiadas.

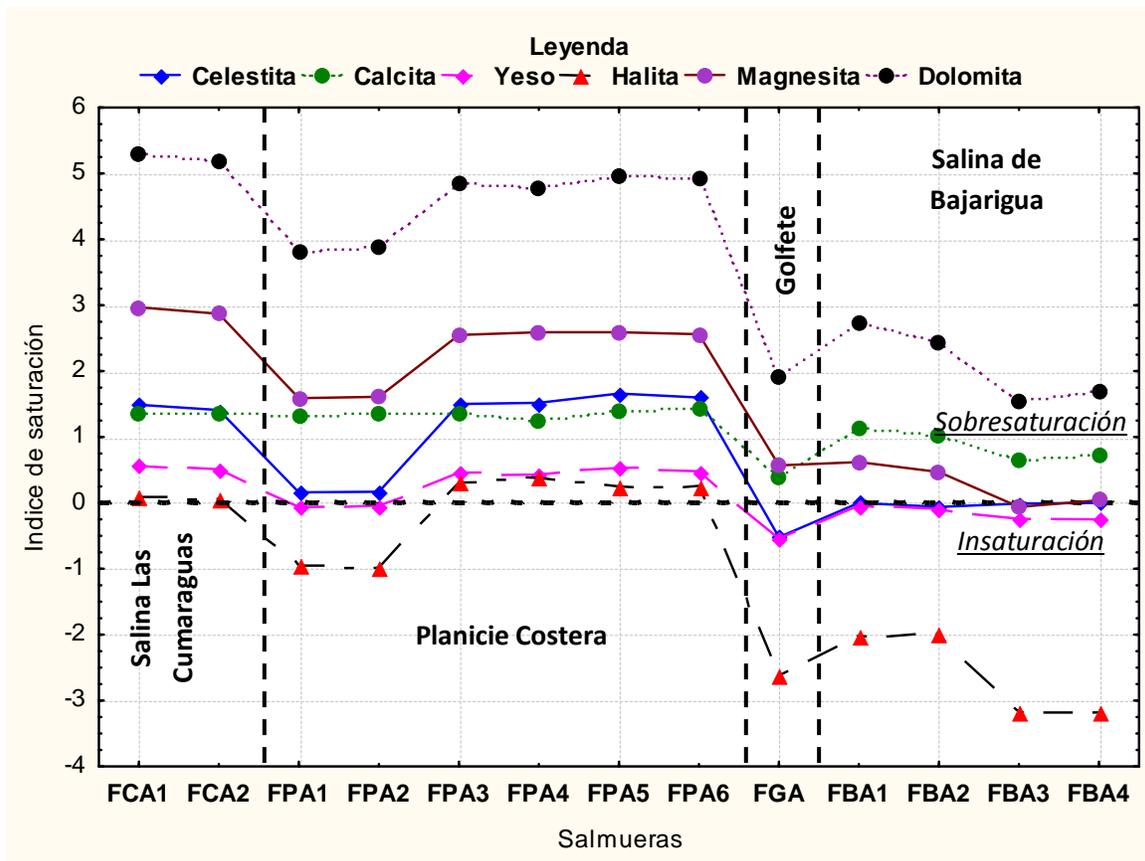


Figura 42. Índices de saturación para fases minerales más comunes en salmueras estudiadas.

Se observa en la gráfica anterior que las muestras pertenecientes a la salina de las Cumaraguas, se encuentran sobresaturadas en todas las fases minerales allí descritas. Al comparar estos resultados con la mineralogía encontrada en los resultados de difracción encontramos que ciertamente en estos sedimentos encontramos abundante halita y también ha sido determinado yeso. Sin embargo, no se pudo detectar calcita, dolomita, celestita (SrSO_4), siendo muy probable que los dos primeros se encuentren entre los sedimentos de la salina si tomamos en cuenta que esta se origina por la evaporación del agua del mar Caribe y siendo la calcita la fase que precipita previa a el yeso y la halita durante el proceso de concentración evaporativa. Aunque no se encontró en los sedimentos analizados,



estas muestras se muestran altamente sobresaturadas en una fase mineral menos común, la polihalita (ver apéndice).

En las muestras de la salina de Bajarigua, se aprecia que se encuentran sobresaturadas en halita y yeso, y sobresaturadas en calcita, dolomita y otras fases carbonáticas. Estos resultados son un poco inconsistentes con los resultados observados en los sedimentos de la salina. Por ejemplo las muestras FBA1 y FBA2, se encuentran saturadas en carbonatos como calcita, dolomita y magnesita y en los sedimentos en contacto con estas salmueras encontramos las dos primeras fases minerales mencionadas. En el caso de la halita es totalmente opuesto, los resultados indican que se encuentran subsaturadas pero la halita es una de las fases identificadas en estos sedimentos. Por otro lado las muestras FBA3 y FBA4, se encuentran subsaturadas en prácticamente todas las fases minerales excepto calcita y dolomita, pero en los sedimentos adyacentes a estas salmueras encontramos abundantes cristales de yeso precipitados en la superficie y los análisis e difracción reportan halita, yeso y calcita. Esto puede explicarse a que estos sedimentos se encuentren con la precipitación de estas fases minerales especialmente la halita producto de la evaporación de las aguas de poro, las cuales son llevadas a la superficie por acción capilar provocando la precipitación de estas fases minerales de etapas avanzadas de evaporación.

Las muestras de la planicie costera se encuentran sobresaturadas en su mayoría en todas las fases minerales estudiadas. Las muestras FPA1 y FPA2, se muestran subsaturadas en halita y yeso, y sobresaturadas en todas las fases carbonáticas, sin embargo en los análisis mineralógicos se determina la presencia de halita y calcita, de lo cual se infiere que como en la salina de Bajarigua las aguas intersticiales se encuentran relacionadas a la presencia de halita.

El resto de las muestras de la planicie no presentan ningún índice de saturación por debajo de la línea que indica la sobresaturación en alguna de las fases minerales y en los análisis mineralógicos las únicas fases que no se logran determinar son los carbonatos, aunque no hay dudas que se encuentren



presentes en los sedimentos en base a las observaciones de campo y los resultados observados en las relaciones interelementales.

Integración de Resultados

En la tabla 9 se presentan, de manera resumida, las características más importantes que se obtuvieron en este estudio para los cuerpos evaporíticos estudiados. En donde se incluye el tipo de sabkha en base al modelo de Yechiely y Wood (2002), la clasificación evolutiva y química de las salmueras en función de lo propuesto por Eugster y Hardie (1978) y Warren (2006), la mineralogía dominante y el posible origen de las salmueras.

Tabla. 9. Resumen de las características de las zonas estudiadas.

Características	Salina Las Cumaraguas	Planicie costera	Salina de Bajargua
Tipo de sabkha⁽¹⁾	Sabkha costero	Sabkha costero	Playa de descarga
Origen de las salmueras	Agua de mar	Agua de mar	Aguas superficiales y subterráneas
Clasificación evolutiva salmueras⁽²⁾	Supersalina	Mesohalina (FGA) Penesalina	Aguas tipo IIA
Clasificación química salmueras⁽³⁾	Na-(Mg)-Cl-(SO ₄)	Na-(Mg)-Cl Na-(Mg)-Cl-(SO ₄)	Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO ₄) Na-(Ca)-(Mg)-Cl
Mineralogía predominante	Halita , Yeso	Halita, Yeso, Cuarzo, Caolinita.	Halita, Cuarzo, Calcita, Caolinita, Albita, Dolomita, Yeso

(1)Yechiely y Wood (2002)

(2) Ver tabla 3 y figura 12.

(3) Eugster y Hardie (1978)

Salina Las Cumaraguas: en base a los resultados obtenidos se infiere que el proceso determinante en las características químicas y mineralógicas de estas salinas es fundamentalmente la evaporación restringida de las aguas del mar Caribe. En los resultados no se observa ningún indicio de otro proceso que tenga un efecto significativo sobre las características de estas aguas. En base a sus características estas aguas fueron clasificadas como supersalinas (ver tabla 3), ya que presentan una salinidad mayor que 350 ‰. Químicamente fueron clasificadas



como aguas Na-(Mg)-Cl-(SO₄), de acuerdo con la clasificación propuesta por Eugster y Hardie (1978), con un contenido mayor de 5% de los cationes totales de magnesio y en el caso de los aniones del sulfato, sin embargo ninguno supera el 10%. Se observa una coherencia entre los datos obtenidos, ya que al observar el comportamiento de los solutos en las salmueras, sugieren procesos de precipitación mineral, los índices de saturación obtenidos por medio de modelado geoquímico respaldan esta conclusión junto a las fases minerales encontradas en la salina, siendo estas fases la halita y el yeso.

Salina de Bajarigua: esta salina ha sido clasificada como un sabkha tipo playa en base a las características hidrológicas y geológicas asociadas a su formación. Se infiere que sea del tipo playa de descarga, ya que presenta agua en su superficie exclusivamente luego de la época de lluvia, en base a lo cual se infiere que el nivel freático normal de la zona no se encuentra suficientemente cercano a la superficie para producir la inundación de la salina durante todo el año, a pesar de observar manantiales en las zonas cercanas a la salina. Debido a esto se propone que las aguas superficiales tienen una mayor relevancia en el origen de las salmueras de esta salina, enriqueciéndose en iones producto de la meteorización de las rocas circundantes a la salina. Sin embargo, no se descarta que aguas subterráneas o marinas se estén infiltrando por los sistemas de fallas circundantes a la salina, aunque nunca dominando la química de las aguas.

Se propone en base a lo propuesto por Eugster y Hardie en la evolución de los diferentes tipos de salmueras no marinas (figura 12), que las aguas encontradas en esta salina se ajustan al camino II, originando una salmuera final tipo IIA. En base a sus características químicas, se presenta una visión de este proceso. En principio se tiene un flujo de aguas insaturadas, en este caso representadas por las aguas de escorrentía superficial, de lluvia y subterráneas que pueden estar acumulándose en la salina, las cuales presentan una relación baja a media, entre 1 o 2 por ejemplo. Se produce por el efecto de concentración evaporativa la precipitación de fases carbonáticas, como calcita, aragonito, dolomita. Producto de la precipitación de estas fases minerales se promueve un enriquecimiento en

metales alcalinos en las aguas, produciendo una salmuera Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO₄), muy empobrecida en bicarbonato, con un aumento relativo del contenido de sulfatos, aunque sin ser mayor que el contenido de metales alcalinos. Posterior a la precipitación de yeso, producto del efecto de concentración evaporativa, se produce una salmuera final del tipo Na-Ca-(Mg)-Cl.

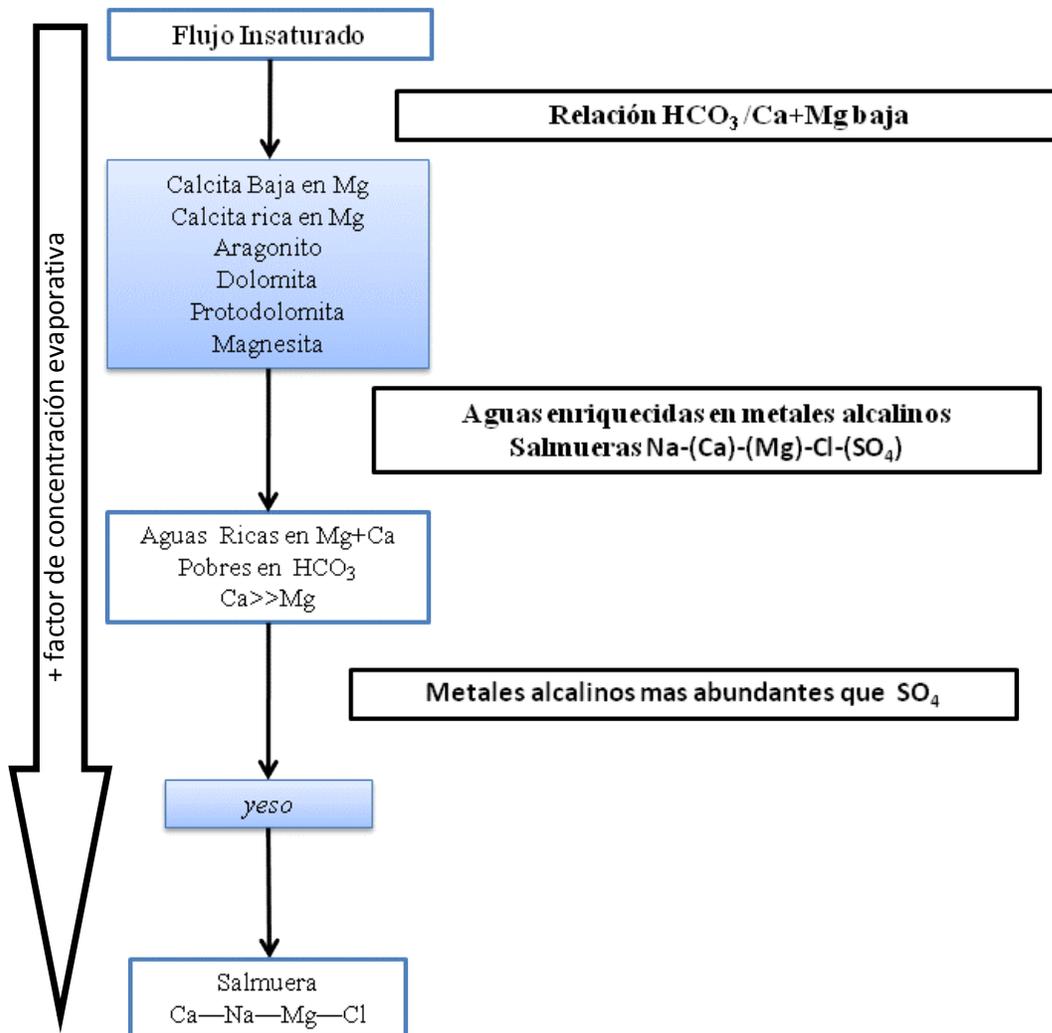


Figura 43. Modelo de evolución de las salmueras de la salina de Bajarigua.

Como consecuencia de este proceso la mineralogía de la salina debe estar dominada por la presencia de carbonatos y yeso, lo cual es perfectamente acorde con lo encontrado tanto en las descripciones de campo como en los análisis mineralógicos realizados en diferentes puntos de esta salina. Al observar con



mayor detalle las salmueras FBA1y FBA2, estas presentan una clasificación química Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO₄), y los sedimentos en contacto con ellas presentan halita, cuarzo, calcita, dolomita y en las muestras FBA3 y FBA4 con etiqueta química Na-(Ca)-(Mg)-Cl, presentan en los sedimentos adyacentes halita, yeso, cuarzo y calcita, lo cual se ajusta adecuadamente al modelo aquí propuesto. Los índices de saturación encontrados en las muestras de salmueras de esta salina igualmente se corresponden a los resultados mineralógicos esperados.

Adicionalmente hay otras fases identificadas como albita, caolinita y cuarzo, de lo que se infiere que representan parte de los minerales originales de la zona que han resistido el proceso de meteorización, o sedimentos movilizados de manera eólica, esto último respaldado por la presencia de campos de dunas en las adyacencias de la salina.

Planicie costera: las manifestaciones evaporíticas descritas en esta zona se han clasificado como pertenecientes a un sabkha costero, que abarca toda la línea de costa perteneciente a esta planicie y parte del delta del río Mitare. Las manifestaciones evaporíticas aquí depositadas son formadas por la evaporación de las aguas pertenecientes al golfete de Coro. De igual forma que en la salina de las Cumaraguas, las salmueras pertenecientes a esta zona fueron clasificadas con la nomenclatura observada en la tabla tres como aguas mesohalinas, en el caso de la muestra perteneciente al golfete de Coro y penesalinas para el resto de las muestras de salmueras. De acuerdo a los análisis mineralógicos realizados en los sedimentos de esta zona se encuentran halita, yeso, cuarzo y caolinita, estos minerales concuerdan con los minerales esperados de acuerdo a la etapa de evolución evaporativa que presentan. Al observar la mineralogía de la planicie se observa que el único mineral encontrado que no es alguno de los minerales evaporíticos esperados es la caolinita, a partir de lo cual se infiere la importancia de los procesos costeros en la evolución sedimentaria del lugar, que, a diferencia de la salina de las Cumaraguas, no presentan efecto alguno sobre su acumulación al encontrarse aislados en su mayoría de estos procesos por las piscinas de evaporación. En la planicie se observan variaciones en la composición química de



las costras salinas encontradas (ver apéndice IV), el grosor y la extensión de capas acumuladas y la ausencia de agua en gran parte de la superficie y en contacto con las capas de sales acumuladas, durante la época de la salida exploratoria, a diferencia de lo observado durante la campaña de muestreo. Esto es un indicativo de la variabilidad dentro del sistema producto de los procesos inherentes en las zonas costeras.

De las tres zonas estudiadas en este trabajo de investigación, esta resalta debido a que se ha recabado más información sobre el comportamiento de los solutos durante la concentración evaporativa de sus salmueras, ya que está representada por una mayor cantidad de muestras. En las gráficas interelementales realizadas se evidencia y se pudo inferir el comportamiento presentado por cada uno de sus solutos, y sirvieron como referencia para inferir el comportamiento de los solutos de la salina de las Cumaraguas, debido a la similitud entre las aguas que las originan, sin embargo se observó un origen distinto de ambas al exponer el comportamiento del estroncio. En cuanto a la correlación de la mineralogía encontrada en los sedimentos y el resto de análisis llevados a cabo, esta se encuentra en sintonía con el comportamiento observado en los solutos, así como también con los resultados obtenidos para los índices de saturación de minerales.



CONCLUSIONES

Del conjunto de resultados obtenidos en este trabajo se extraen las siguientes conclusiones.

1. Los cuerpos evaporíticos de la región nor-central del estado Falcón son sabkhas costeros, caracterizados por la evaporación del agua de mar y altamente influenciados por los procesos costeros.
2. La salina de Las Cumaraguas es un sabkha costero, con salmueras supersalinas, clasificadas químicamente como Na-(Mg)-Cl-(SO₄), producto de la evaporación del agua del mar Caribe. Su mineralogía está dominada principalmente por los minerales halita y yeso.
3. La salina de Bajarigua es un sabkha tipo playa de descarga, con salmueras clasificadas como tipo II de acuerdo a la clasificación de Eugster y Hardie (1978), con composiciones químicas, Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO₄) y Na-(Ca)-(Mg)-Cl, producto de la evaporación de aguas superficiales y posiblemente aguas subterráneas. Su mineralogía está dominada por las fases minerales halita, calcita, dolomita y yeso.
4. Se propone que la evolución de las salmueras de la salina de Bajarigua, evolucionan de acuerdo al proceso número II propuesto por Eugster y Hardie (1979). Aguas ricas en Ca+Mg, pobres en HCO₃. Donde Ca>>Mg y producto de la precipitación de yeso, se obtiene una salmuera Ca-Na-Mg-Cl.
5. La planicie costera representa un ambiente de sabkha costero, con salmueras mesohalina y penesalinas, producto de la evaporación de las aguas encontradas en el golfete de Coro. Se clasifican químicamente como



salmueras Na-(Mg)-Cl. Su mineralogía está dominada por los minerales halita, yeso, cuarzo.

6. La salina de Las Cumaraguas y la planicie costera presentan semejanzas en la evolución de sus salmueras, debido a su origen marino. Sin embargo, presentan características químicas diferentes como puede apreciarse en su contenido de estroncio.



RECOMENDACIONES

Se presentan a continuación una serie de recomendaciones que pueden complementar la presente investigación y reforzar los resultados obtenidos:

1. Efectuar un muestreo sistemático en cada uno de los ambientes estudiados, con una cantidad de muestras de aguas y salmueras mucho mayor e individual, que incluyan aguas subterráneas, superficiales y salmueras en época de sequía y de lluvia, que permitan establecer con mayor detalle las características químicas y comportamiento de los solutos en cada uno de los ambientes estudiados.
2. Efectuar un estudio, en base a la metodología aplicada en este trabajo de investigación a las otras manifestaciones evaporíticas encontradas en la península de Paraguaná y establecer características regionales de estos ambientes.
3. Emplear un patrón estándar certificado de aguas para evaluar la exactitud de la metodología empleada en este trabajo de investigación.
4. Evaluar la posibilidad de aplicar metodologías alternativas para la obtención de los datos químicos, para disminuir sus costos, poder realizar estudios con mayor cantidad de muestras y que no afecte la calidad de los resultados.



BIBLIOGRAFÍA

Audemard, F. (1995). La Cuenca Terciaria de Falcón, Venezuela noroccidental: síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica. FUNVISIS. Caracas. 18 p.

Audemard, F.A.. (1998). Evolution géodynamique de la facade nord sud-Americaine: Nouveaux apports de l'histoire géologique du bassin de Falcón, Vénézuéla. In: Presented at the 14th Caribb. Geol. Conference, Port of Spain, Trinidad, 1995.

Audemard, F. (1999). Neotectonic and paleosismicity studies on the Urumaco Fault, northern Falcón Basin, Northwestern Venezuela. *Tectonophysics* 308: 23-35.

Bezada, M. J., Schmitz, M., Jacome M. I., Rodríguez J., Audemard F. y Izarra C. (2008). Crustal structure in the Falcón Basin area, northwestern Venezuela, from seismic and gravimetric evidence. *Journal of Geodynamics*. Vol. 45, pp. 191-200.

Blatt, H. (1992). *Sedimentary Petrology*. 2da. Edición. W. H. Freeman and Company. New York. 514 p.

Bloom, A. L. (1998). *Geomorphology a sistematic analysis of Late Cenozoic Landforms*. 3ra. Edición. Waveland Press, Inc., pp. 482.

Bowen, B. B y Benison, K. C. (2009). Geochemical characteristics of naturally acid and alkaline saline lakes in southern Western Australia. *Applied Geochemistry*, Vol. 24, pp. 268-284.

Braitsch, O. (1971). *Salt Deposits, their origin and composition*. New York: Springer-Verlag. 297p.

Bronlow, A.H. (1996). *Geochemistry*. 2da Edicion. Editorial Prentice Hall. New Jersey. 580 p.



Brueren, J.(1949). Geological report CPMS-310. Paraíso-Maraure (central Falcón). Reporte sin publicar. MARAVEN S.A. 20 p.

Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, COPLANARH. (1975). Inventario nacional de tierras: estudio geomorfológico de las regiones Costa Noroccidental, Centro Occidental y Central. Caracas. V. 1 y V.2. 216 p.

Custudio, E., Bruggeman, G.A., Cotecchia, V. (1987). Groundwater problems in coastal areas. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO, Paris, vol. 35.

Dean, W. E. (1978). Theoretical versus observed successions from evaporation of seawater. En Marine Evaporites. SEPM Short Course No. 4. Ed. W. E. Dean, B. C. Schreiber. Pp. 74-85. Tulsa, Oklahoma: Soc. Econ. Paleontol. Mineral.

Drever, James I., 1997. The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments. Prentice Hall, Third Edition, New Jersey, 437 p.

Eugster, H.P. (1980). Geochemistry of Evaporitic Lacustrine Deposits. Annual Review of Earth Planetary Sciences. Vol. 8, pp. 35-63.

Eugster, H.P. y Hardie, L. A (1978). Saline Lakes. En: Lerman A.(Ed). Lakes: Chemistry, Geology, Physics. Springer-Verlag, New York, pp. 237-293

Eugster, H. P. y Jones, B. (1979). Behavior of Major Solutes during closed-basin brine evolution. American Journal of Science, Vol. 279, 609- 631

Galloway, W. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system. En : M.L. Broussard (editor), Deltas, Models for exploration. Houston Geological Society, pp. 87-98.

Garcés I, Chong G, López P. y Auque L. (1998). Comportamiento Geoquímico y Mineralógico del Salar de Llamara (Chile): origen de sus solutos y evolución de sus salmueras. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, Vol. 43. pp. 417- 433.



González de Juana, C., J.M. Iturralde y X. Picard. (1980). Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. 3era. Edición. Editorial FONVIVES. Caracas. 1031 p.

Hackey, P.C., Urbani, P., Karlsen, A.W., Garrity, C.P. (2006). Mapa geológico de Venezuela a Escala 1:750000. U.S. Geological Survey Open File Report

Handford, C.R. (1981). A process-sedimentary framework for characterizing recent and ancient sabkhas. *Sedimentary Geology*. Vol. 30, pp. 255-265.

Hardie, L.A. (1991). On the significance of evaporites. *Annual review of earth planetary sciences*. Vol 19, pp. 131-168.

Hardie, L.A., Eugster, H.P. (1970). The evolution of closed basin brines. *Mineral. Soc. Am. Spec. Publ.* Vol. 3, pp. 273–290.

Harrington, N. M, Herczeg, A.L. y La Salle, C. Le Gal. (2008). Hydrological and geochemical processes controlling variations in Na^+ - Mg^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-} groundwater brines, south-eastern Australia. *Chemical Geology*. Vol. 251, pp. 8-19.

Hay, H. W., (1996). Tectonics and Climate: *Geologische Rundschau*, Vol. 85, pp. 409-437.

Hem, H.D. (1985). Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters, USGS, Water-supply paper, no. 2254.

Holland, H.D, Turekian Karl K. (2003) *Treatise on geochemistry*. Elsevier.

Kehew, A.E., 2001, *Applied Chemical Hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc., 368p.

Kinsman, D. J. (1969) Modes of formation, sedimentary associations, and diagnostic features of shallow-water supratidal evaporites. *American Association of Petrology Geological Bulletin*. Vol. 53, pp. 830-840.

Mendez, J.A. (2008). Características geológicas y geoquímicas de dolomitas, dolomías y otras facies calcáreas del CRETACICO y HOLOCENO en Venezuela.



Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela.

Mendi, D. y Rodríguez, E. (2005). Integración geológica de la península de Paraguaná, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.

Muessig, K. (1984). Structure and cenozoic tectonics of the Falcon basin, Venezuela and adjacent areas. In: Bonini, W.E. (Ed.), The Caribbean South American Plate Boundary and Regional Tectonics, vol. 162. Geol. Soc. Am. Mem., pp. 217–230.

Patterson, R.J., Kinsman, D.J.J. (1981). Hydrologic framework of a sabkha along Arabian Gulf. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. Vol. 65, pp. 1457– 1475.

Quintero, A. y Terejova, G. (2008). Influencia de las corrientes marinas sobre el transporte de sedimentos en la boca del Golfo de Coro, Venezuela. Boletín Instituto Oceanográfico de Venezuela. Cumaná. Vol. 47, núm. 1, p. 77-87.

RAINWATER. F. H. y THATCHER. L. (1960) Methods for collection and analysis of water samples. U.S. **Geol.Survey**. Water **Supply Paper 1454, 301** pp.

Rettig, S.L, Jones, B.F y Risacher, (1980). F. Geochemical Evolution of brines in the salar de Uyuni, Bolivia. Chemical Geology. Vol. 30, pp. 57-79.

Risacher, F. y Fritz, B. (1991). Geochemistry of Bolivian salars, Lipez, southern Altiplano: Origin of solutes and brine evolution. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 55, pp. 687-705.

Rivas, D. y Rojas T. (1997). Modelo sedimentológico, análisis de facies y estratigrafía del delta del río Mitare, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Escuela de geología, minas y geofísica, Caracas.



Robinson, B.W., Gunatilaka, A. (1991). Stable isotope studies and hydrological regime of Sabkhas in southern Kuwait, Arabian Gulf. *Sedimentary Geology*. Vol. 73 (1/2), pp. 141– 159.

Rosen, M.R. (1994). The importance of groundwater in playas: a review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. *Geological Society of America*, Special paper 289, pp. 1-18

Sanford, W.E., Wood, W.W. (1991). Brine evolution and mineral deposition in hydrologically open evaporite basins. *American Journal of Science*. Vol. 291, pp. 687– 710.

Skoog, Douglas A. (2001). *Principios de Analisis Instrumental*. Editorial Mc Graw hill. Quinta Edición.

Usiglio, J. (1849). Analyse de l'eau de la mediterrane sur cotes de France. *Ann. Chim. Phys.* Vol. 27, pp. 92-107, 177-191.

Warren, J. K. (2006). *Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons*. 1ra. Edición. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Alemania.

Warren, J. K. (2010). Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-science reviews*. vol 98, pp. 217-268.

Warren, J. K. y Kendall, C. (1985). Comparison of sequences formed in marine Sabkha (subaerial) and salina (subaqueous) settings; modern and ancient. *Bulletin American Association of Petroleum Geologist*. Vol. 69, pp. 1013-1023.

Yechieli, Y. y Wood, W.W. (2002). Hydrogeologic processes in saline systems: playas, sabkhas, and saline lakes. *Earth sciences reviews*. Vol. 58, pp. 343-365.



APÉNDICE I

Condiciones Experimentales

Tabla 10. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEO-IAP (HORIBA Jobin Yvon, modelo ultima 2)

Componente	Característica
Gas plasmógeno	Argón
Flujo del gas de plasma	12 L/min
Nebulizador	Concéntrico
Flujo en el nebulizador	0,8 L/min
Flujo del gas de arrastre (sheet gas)	0,2 L/min
Potencial generador	1100 W
Cámara	Ciclónica
Flujo de muestra	1,0 mL/min
Rango espectral	160-800 nm
Velocidad de la bomba	20 RPM
Montaje óptico	Czerny Turner
Distancia focal	50 cm

Tabla 11. Longitudes de onda utilizadas en el análisis de EEO-IAP (HORIBA Jobin Yvon, modelo ultima 2)

Elemento	Longitud de Onda
Ca	422,673
Fe	259,94
Mg	279,553
Sr	407,771
Li	670,784
B	208,959
Ti	324,199
Ba	455,403
Al	396,152



Tabla 12. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEA-llama (marca Perkin Elmer, modelo 200)

Componente	Característica
Gas oxidante	Aire
Flujo de Aire	10 L/min
Gas combustible	Acetileno
Flujo gas combustible	2,5 L/min
Nebulizador	concentrico
Potencial generador	1100 W
Cámara	Ciclónica
Flujo de muestra	1,0 mL/min
Rango espectral	160-800 nm
Velocidad de la bomba	20 RPM
Longitudes de onda utilizadas	
Elemento	Longitud de onda (nm)
Na	294
K	384

Tabla 13. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de Cromatografía ionica (DIONEX modelo DX-100)

Componente	Característica
Conductividad total	280 μ S
Ganancia	0,005
Rango (μ S x 10)	50
Polaridad	+
mL/s	1,2
Presión Promedio	1400
Composición fase móvil (1 L)	
Componente	Cantidad
Glicerina	125 mL
Agua deionizada	875 mL
Gluconato de sodio	16 g
Acido bórico	18 g
Tetraborato de sodio	25 g



Tabla 14. Límites de detección elementos analizados

Elemento	Límite de detección (mg/L)
Ca	1,23271852
Fe	0,07743563
Mg	6,93507552
Sr	0,04068428
Li	0,30168293
B	3,95426546
Ti	0,04017834
Ba	0,01309403
Al	0,00334904

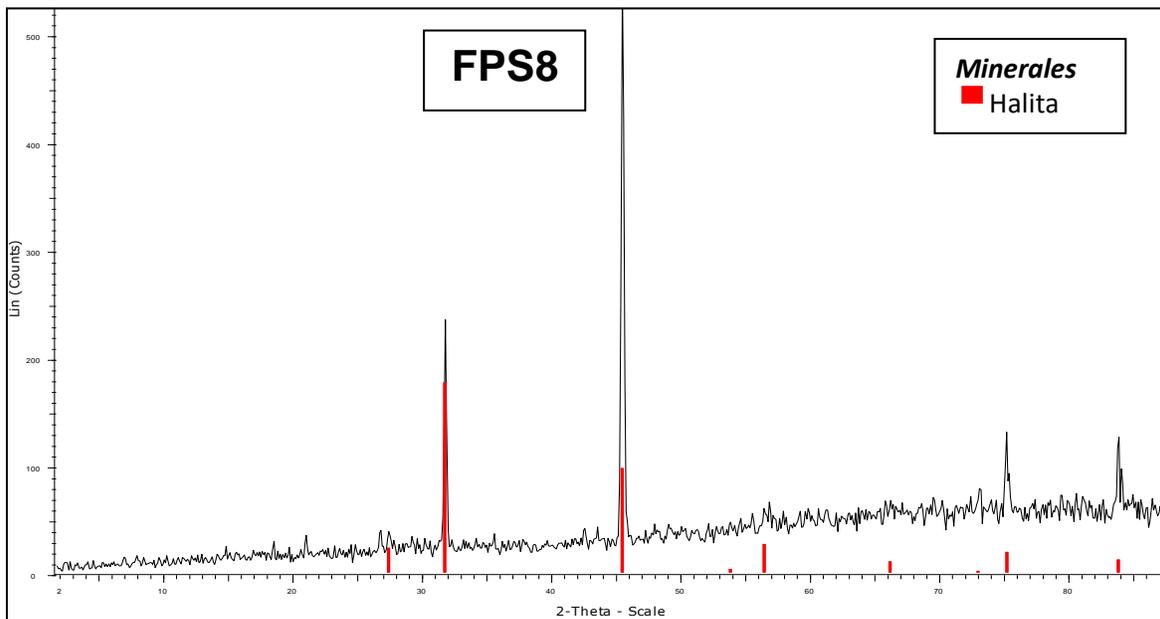
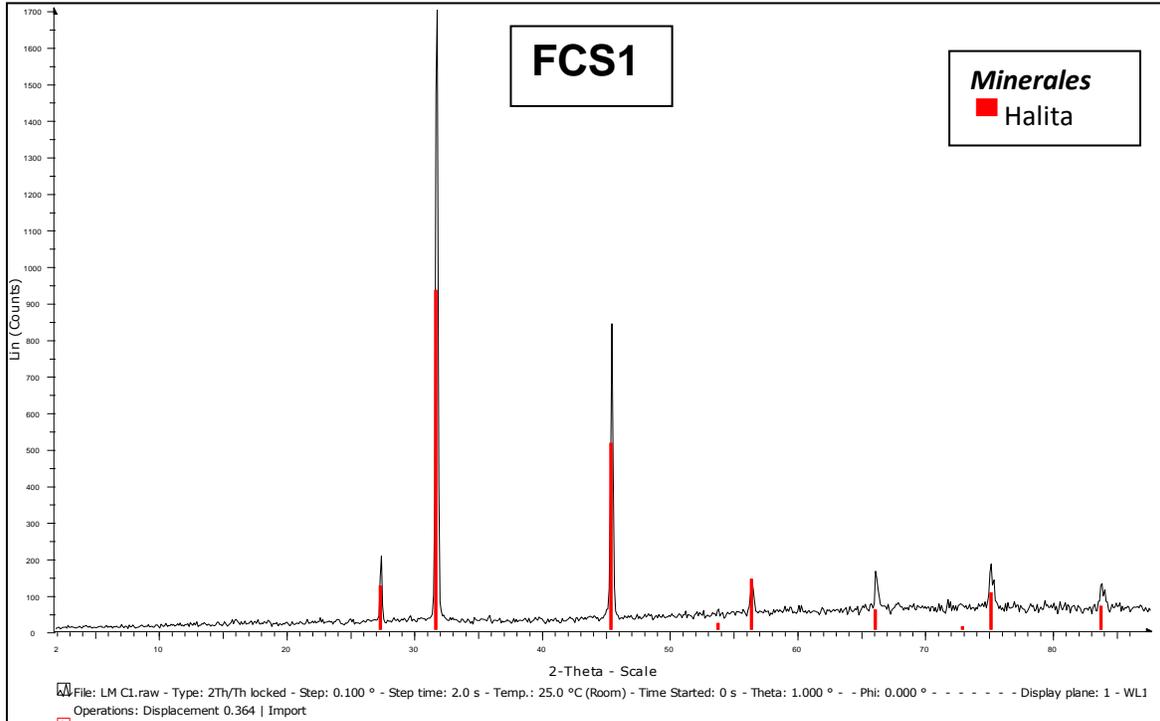
Tabla 15. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de Difracción de Rayos X (Bruker Advance D8)

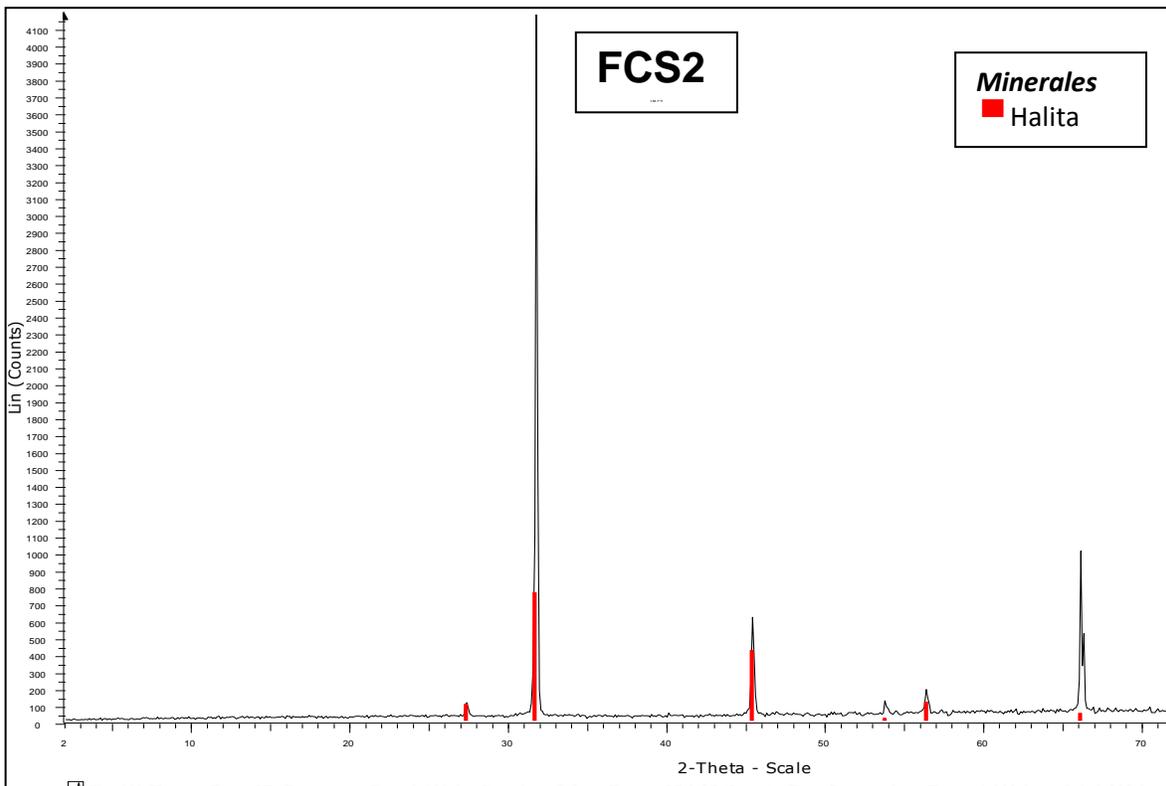
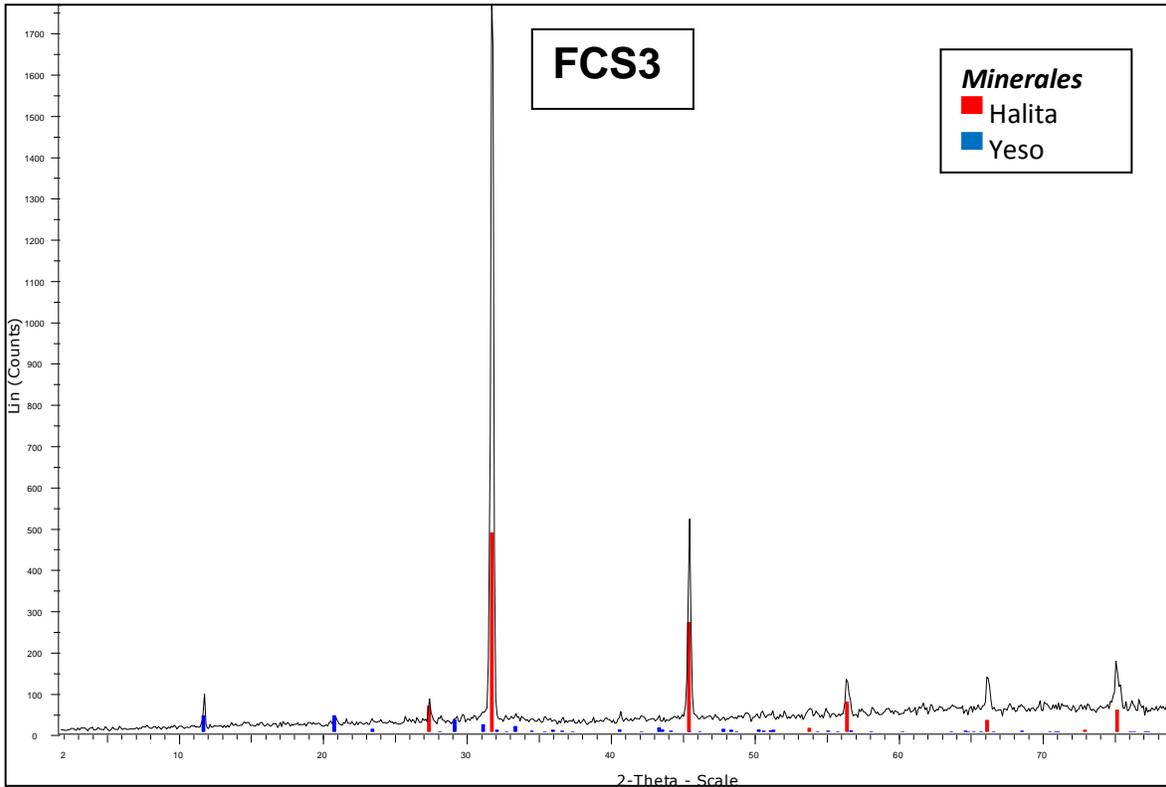
Componente	Característica
Angulo de Barrido (2θ)	2-88
Anticátodo	Cobre
Rango ($\mu\text{S} \times 10$)	35Kv , 20mA

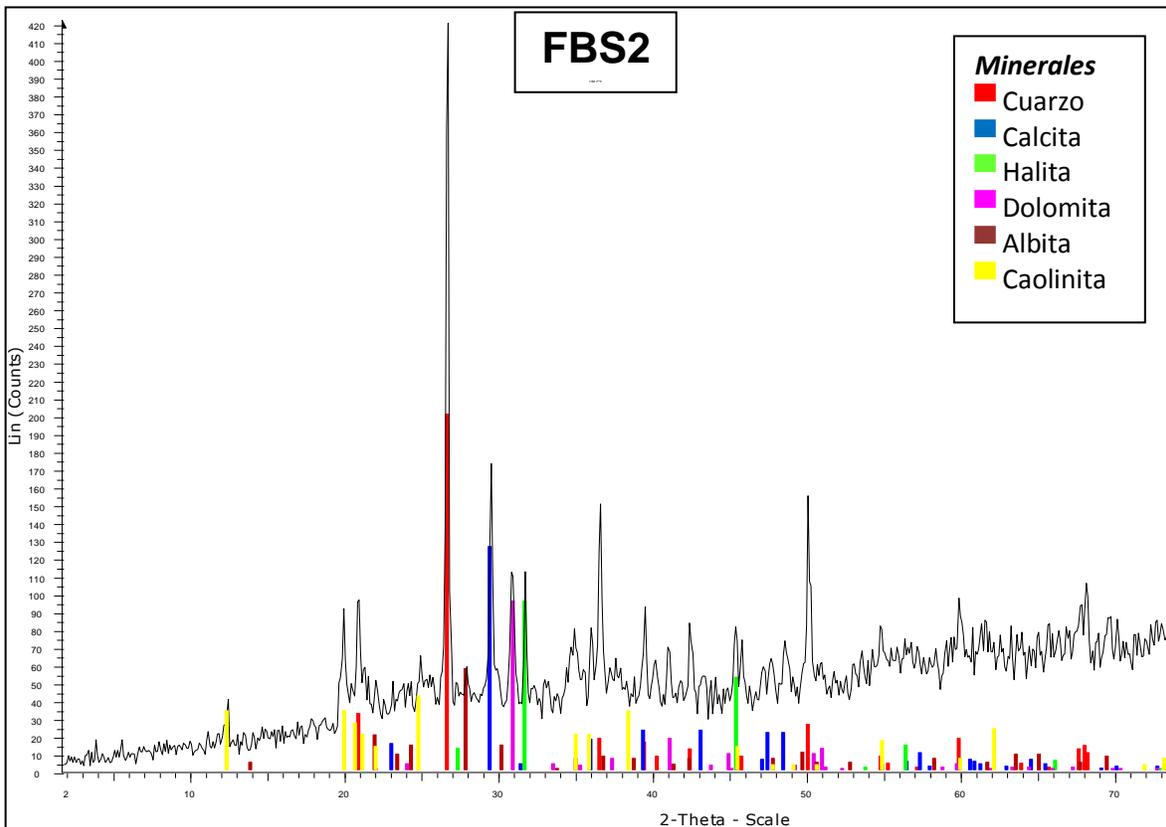
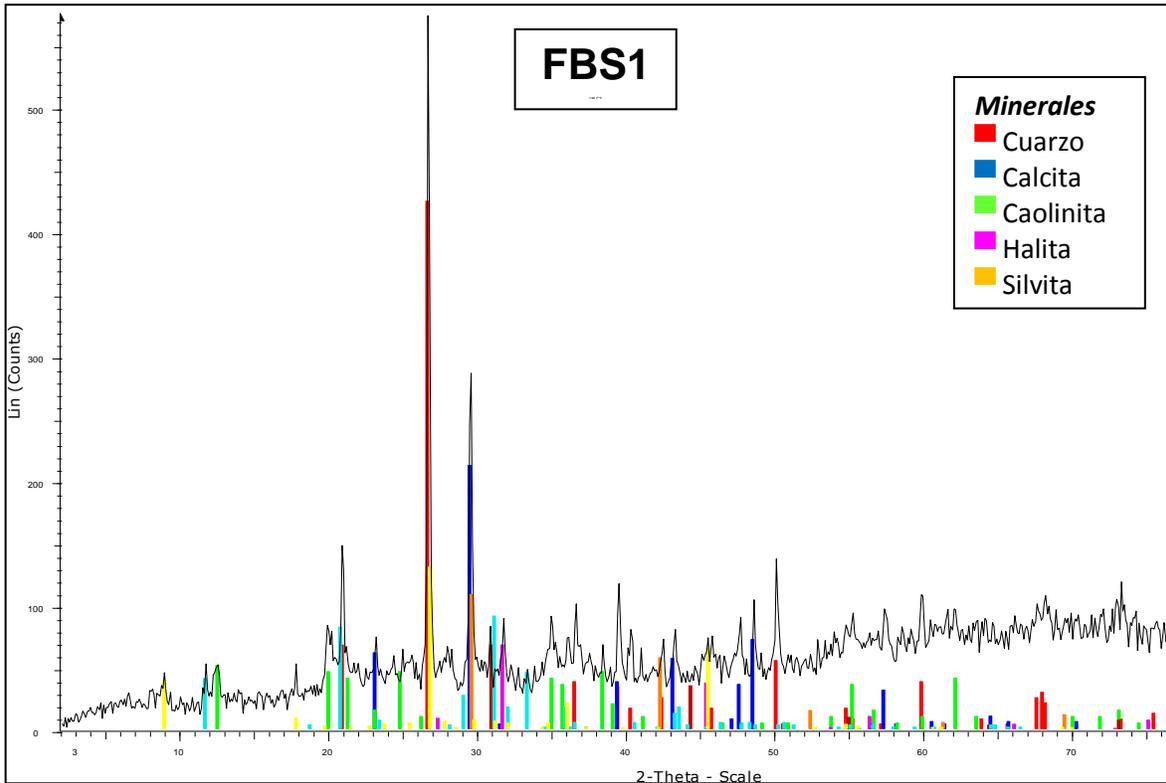


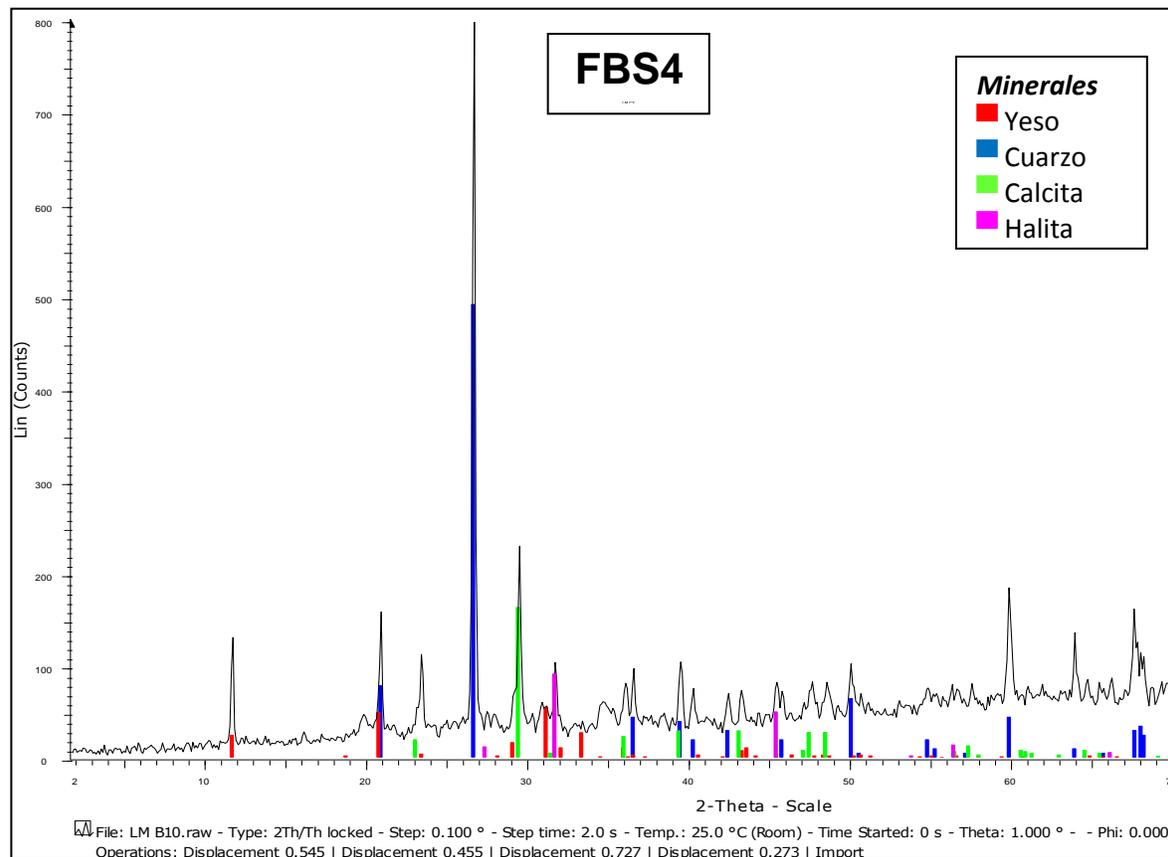
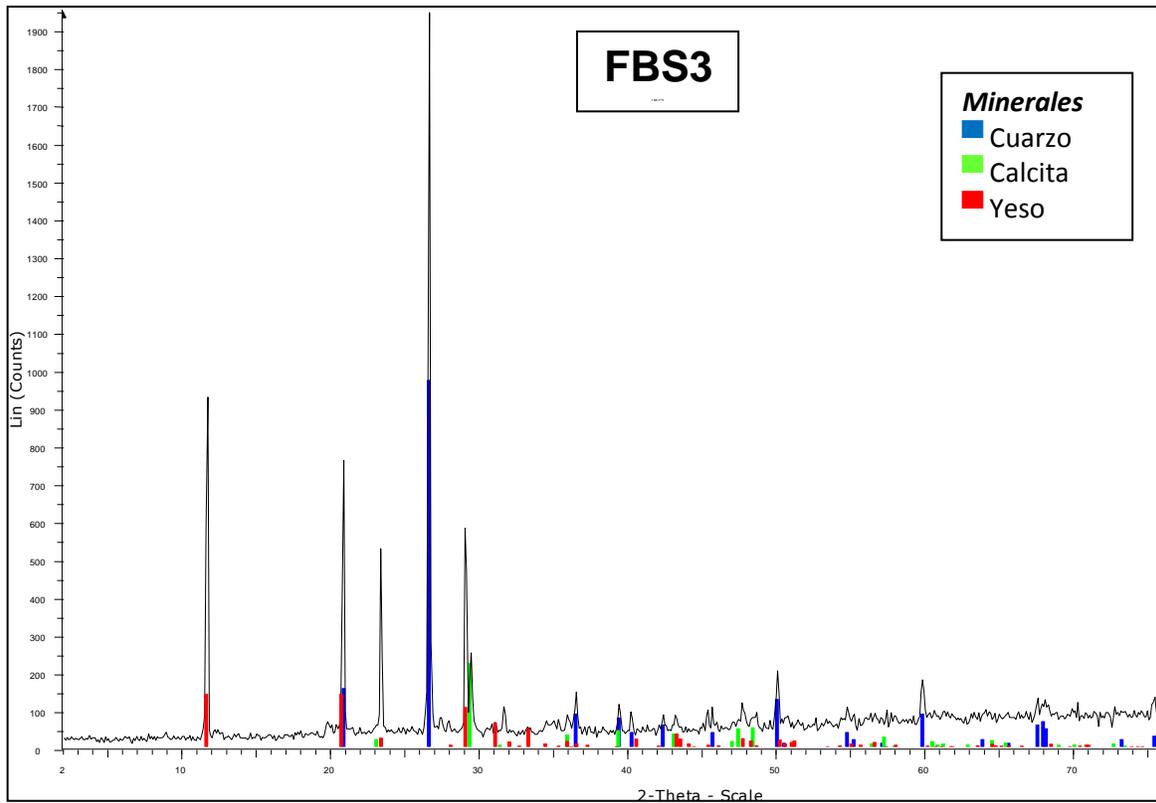
APÉNDICE II

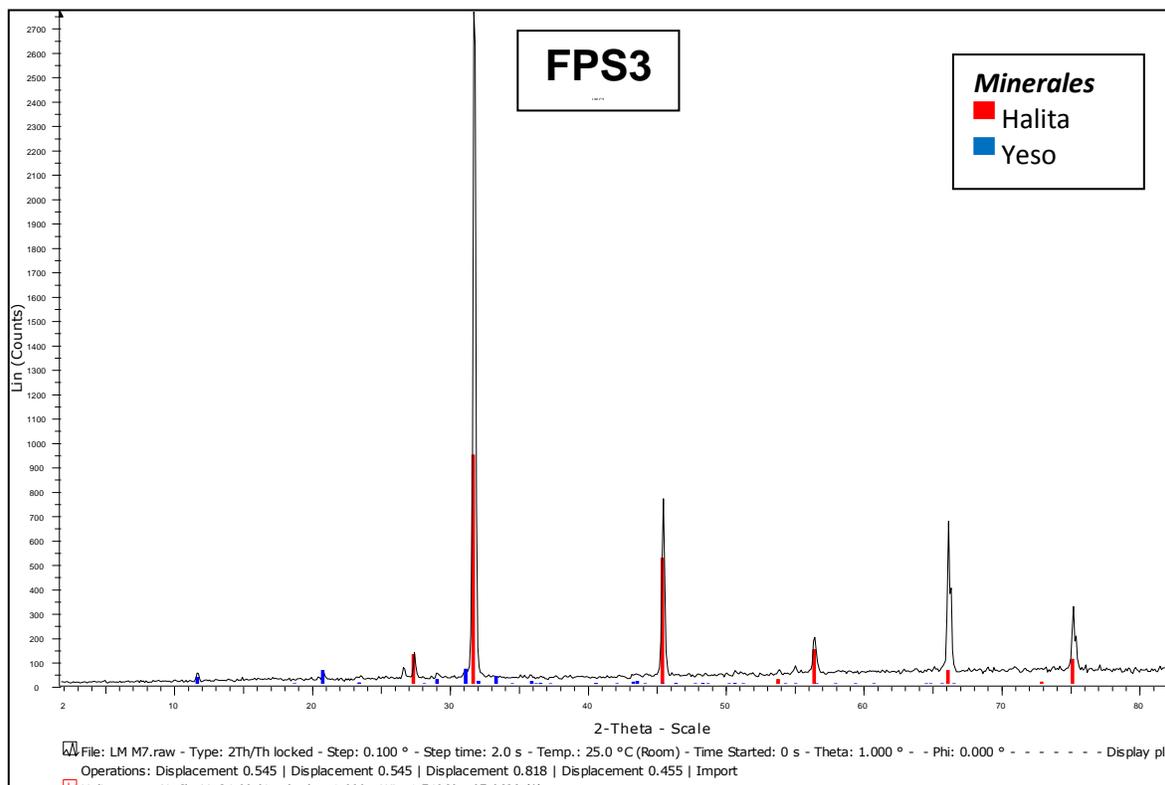
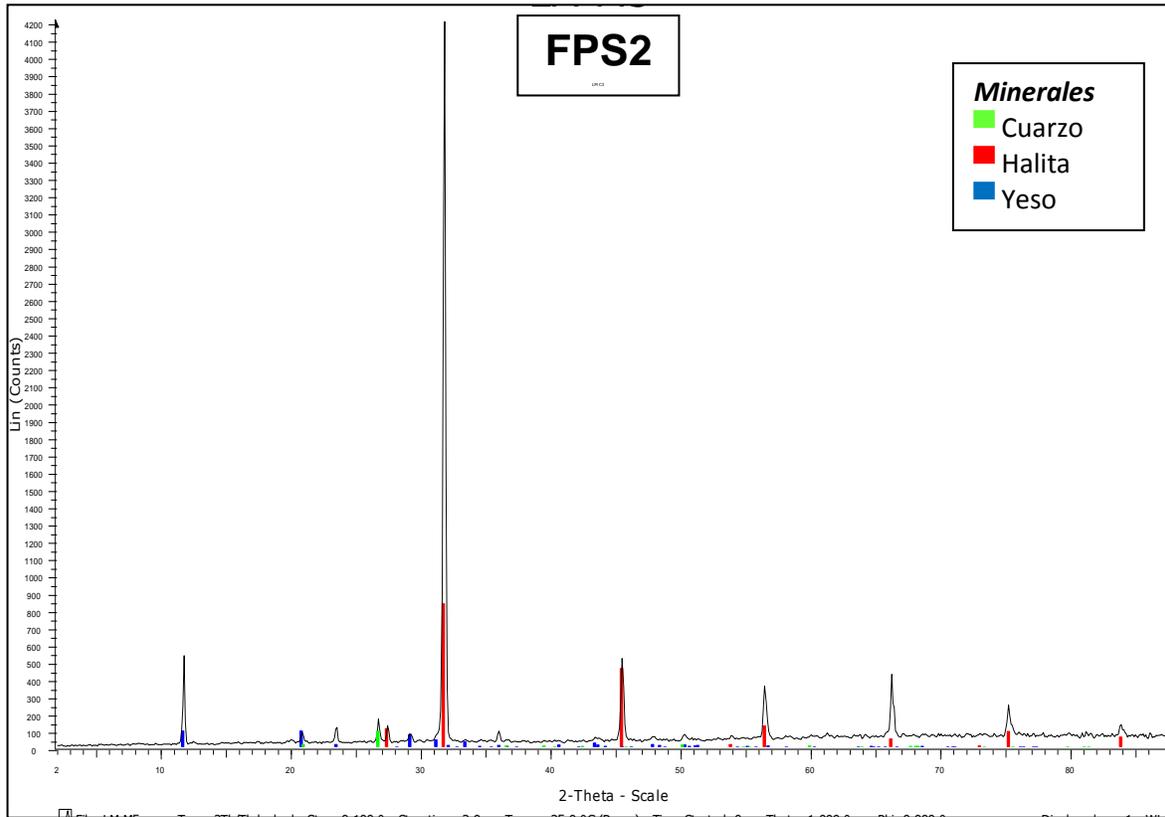
Difractogramas muestras de sedimentos y costras salinas analizadas.

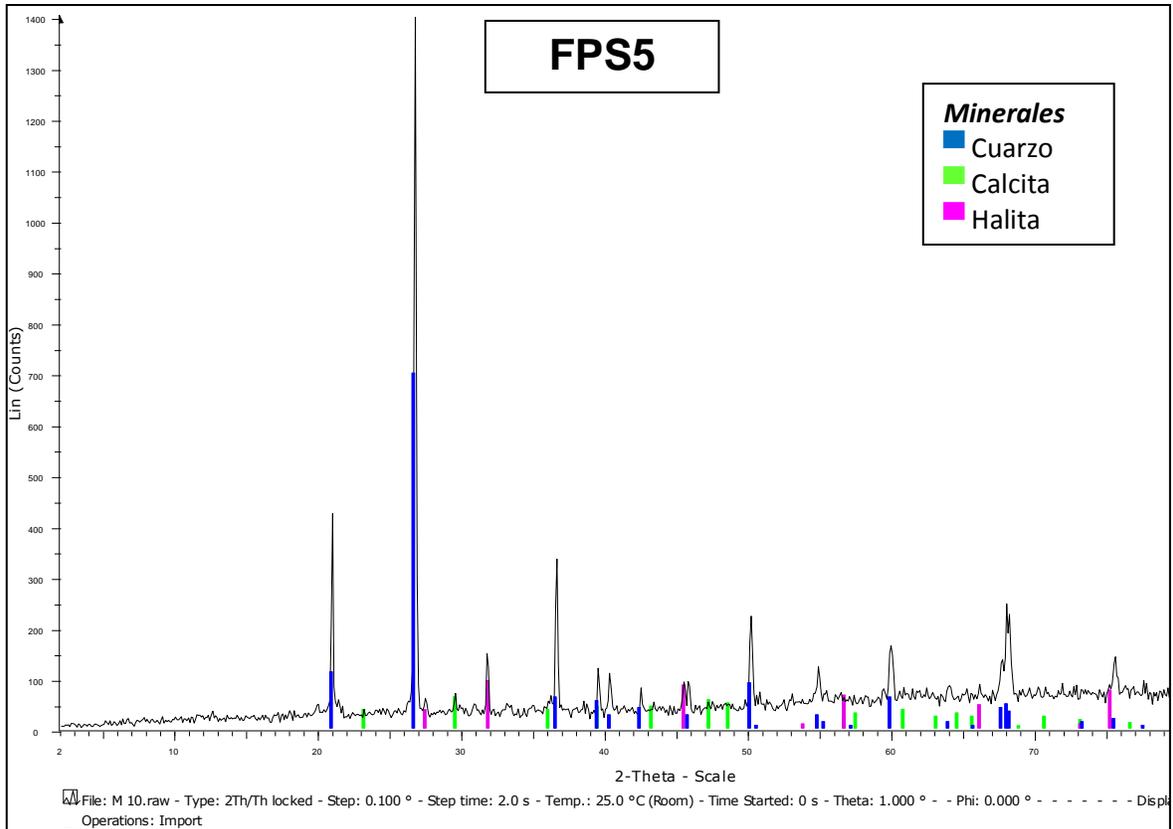
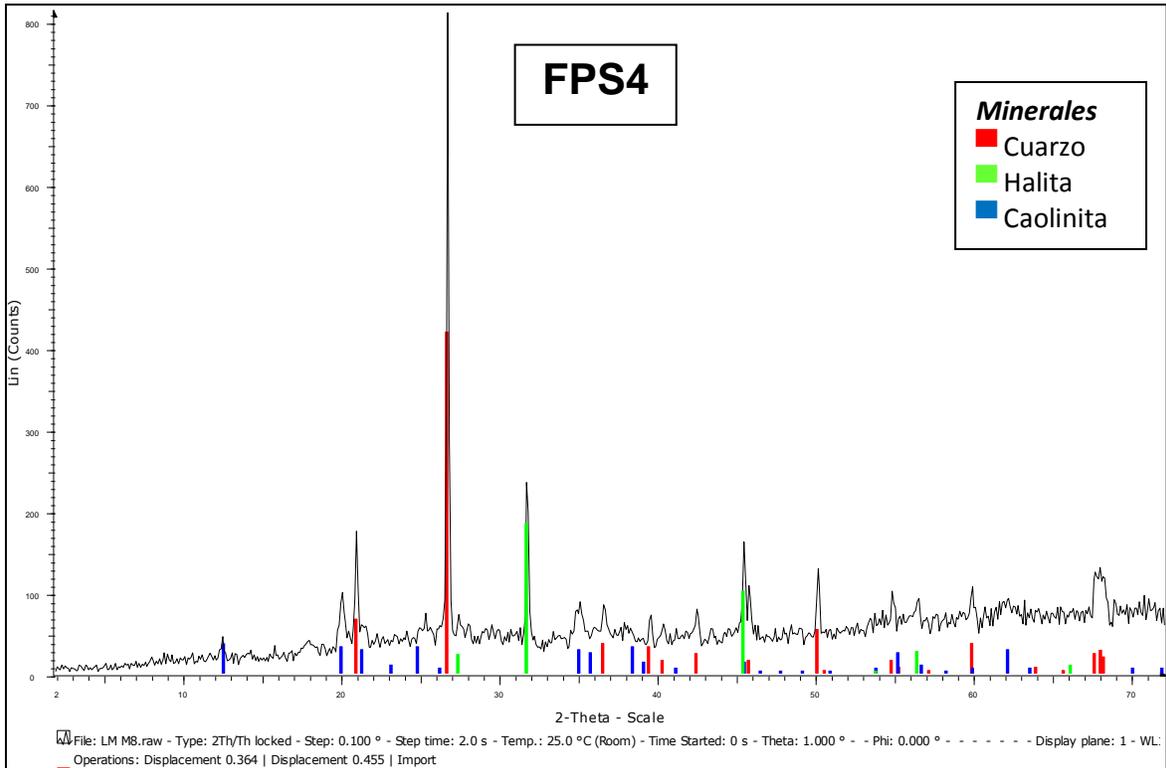


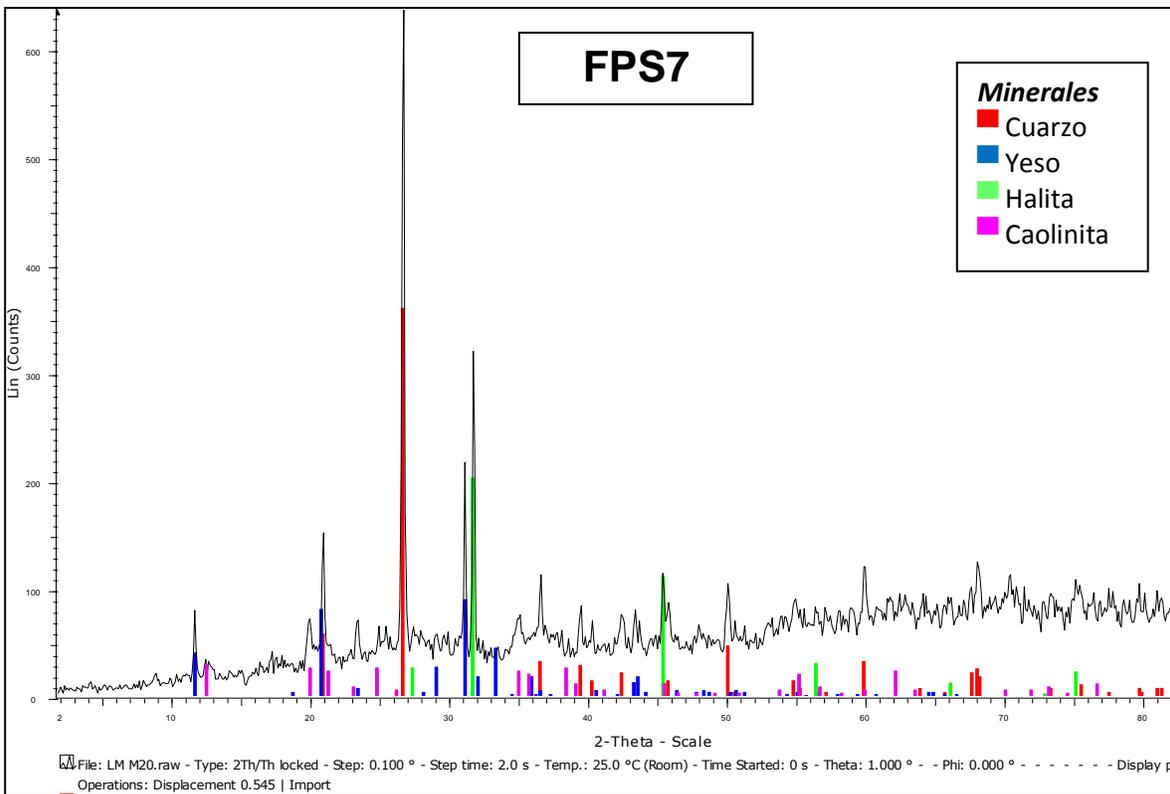
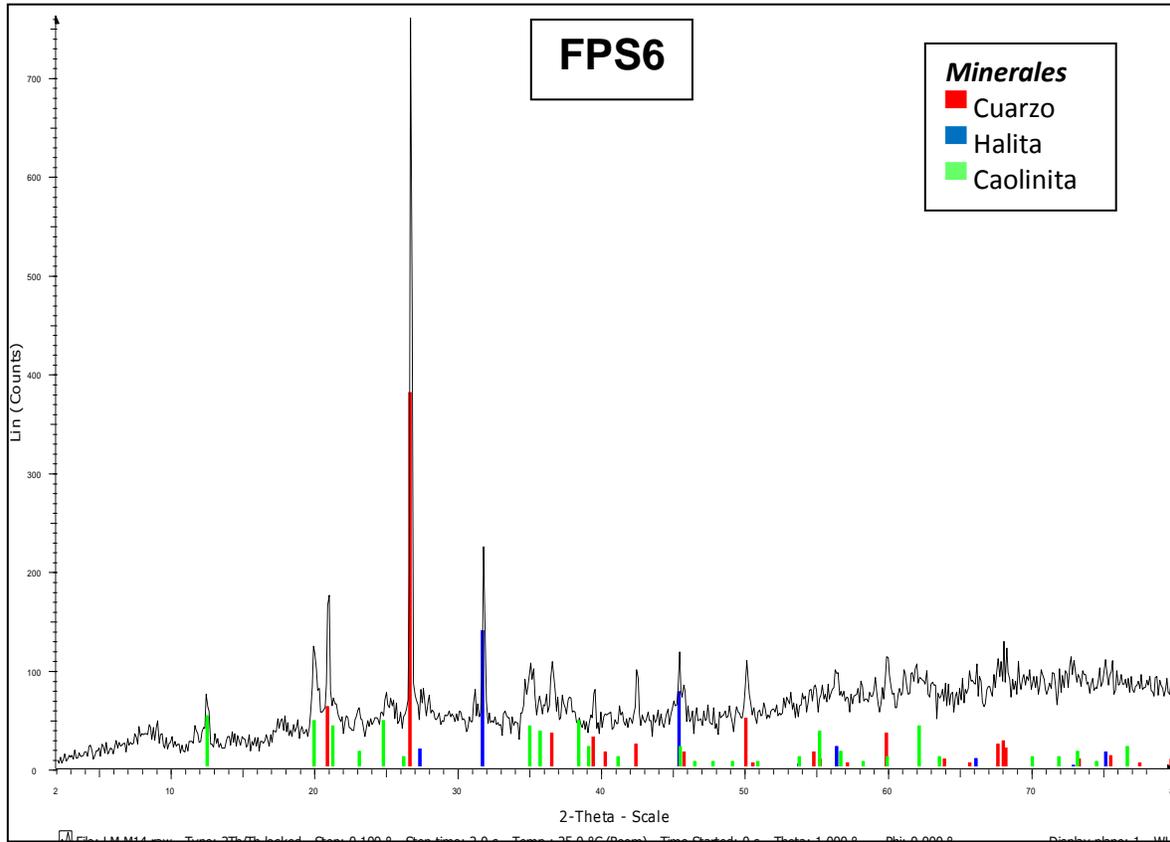














APÉNDICE III

Tabla 16. Índices de saturación de minerales obtenidas mediante el programa PHREEQC interactive.

Muestra	T° (°C)	Anhidrita	Aragonito	Calcita	Celestita	Dolomita	Glauberita	Yeso	Halita	Eugsterita	Magnesita	Polihalita
		CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃	SrSO ₄	(Ca,Mg) ₂ CO ₃	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	CaSO ₄ *2H ₂ O	NaCl	Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ *2H ₂ O	MgCO ₃	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ *2H ₂ O
FCA1	34,9	0,7	1,19	1,37	1,49	5,31	0,97	0,56	0,09	0,59	2,97	0,95
FCA2	34,9	0,68	1,17	1,35	1,41	5,19	0,90	0,51	0,07	0,48	2,87	0,70
FPA1	30,5	-0,13	1,13	1,31	0,16	3,82	-1,43	-0,06	-0,95	-3,24	1,59	-5,00
FPA2	30,5	-0,11	1,16	1,34	0,17	3,87	-1,43	-0,04	-0,98	-3,26	1,61	-4,94
FPA3	31,2	0,63	1,19	1,37	1,5	4,84	0,86	0,46	0,31	0,35	2,55	-1,14
FPA4	31,2	0,63	1,08	1,26	1,52	4,77	0,88	0,43	0,38	0,39	2,59	-1,02
FPA5	32,7	0,71	1,23	1,41	1,66	4,95	0,71	0,53	0,25	0,01	2,59	-0,53
FPA6	32,7	0,66	1,24	1,42	1,60	4,92	0,68	0,48	0,26	-0,01	2,56	-0,83
FGA	31,7	-0,68	0,22	0,40	-0,52	1,90	-3,50	-0,54	-2,63	-6,72	0,57	-7,77
FBA1	33,8	-0,14	0,96	1,14	0	2,72	-2,80	-0,04	-2,01	-5,86	0,62	-7,28
FBA2	33,8	-0,19	0,83	1,01	-0,06	2,43	-2,76	-0,09	-2,00	-5,73	0,47	-7,42
FBA3	32,6	-0,38	0,48	0,66	-0,01	1,54	-3,81	-0,24	-3,17	-7,63	-0,06	-9,06
FBA4	32,6	-0,39	0,54	0,73	0	1,71	-3,81	-0,25	-3,18	-7,61	0,04	-9,01



APÉNDICE IV

Tabla 17. Composición química de las costras salinas analizadas.

Muestra	Zona Muestra	Punto de muestreo	Na	Ca	K	Mg	Sr	SO ₄	Cl
			µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
FCS1	Salina de Las Cumaraguas	1	346758	832	36922	7073	34	9703	497383
FCS2	Salina de Las Cumaraguas	1	371072	712	1069	2873	43	5600	514516
FCS3	Salina de Las Cumaraguas	1	351610	3564	2378	8194	87	16396	484815
FPS1	Planicie costera	7	366850	-	2111	-	-	10789	534882
FPS2	Planicie costera	8	280708	4899	2135	n.d.	110	12992	373987
FPS3	Planicie costera	9	430850	6084	2495	n.d.	161	14419	631501
FPS8	Planicie costera	12	280994	2274	489	9713	89	9703	366936

