

"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



DINÁMICA DE LA SALINIZACIÓN DE LA ZONA DELTÁICO-ESTUARINA DEL RÍO SINÚ, CÓRDOBA,
COLOMBIA. BAJO LA ÓPTICA DE LA INFLUENCIA HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS FREÁTICAS
ZONALES



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



ADRIANA SOFÍA RACINY SOTO

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA
2021



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente
Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920
www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

DINÁMICA DE LA SALINIZACIÓN DE LA ZONA DELTÁICO-ESTUARINA DEL RÍO SINÚ, CÓRDOBA,
COLOMBIA. BAJO LA ÓPTICA DE LA INFLUENCIA HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS FREÁTICAS
ZONALES



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

ADRIANA SOFÍA RACINY SOTO

Trabajo de grado presentado, en la modalidad de proyecto de Investigación y/o Extensión, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniera ambiental.

Director (es):

ZORAYA MARTÍNEZ LARA, M.sc. Geomorfología y Suelos.

MÓNICA CANTERO BENÍTEZ, M.sc. Ciencias Agrarias.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

MONTERÍA, CÓRDOBA

2021



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente
Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920
www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



La responsabilidad ética, legal y científica, de las ideas, conceptos, y resultados del proyecto de investigación, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 59, Acuerdo N° 022 del 21 de febrero de 2018 del Consejo Superior.

Tener en cuenta los Artículos y directrices establecidos la Resolución 1775, del 21 de agosto de 2019. En donde se establecen las directrices y las políticas de funcionamiento del repositorio institucional de la Universidad de Córdoba (Artículos tercero, octavo, once, entre otros).

“11 – BUENA FE: La universidad considera que la producción intelectual que, los profesores, funcionarios administrativos y estudiantes le presenten, es realizada por éstos, y que no han transgredido los derechos de otras personas. En consecuencia, la aceptará, protegerá, publicará y explotará, según corresponda y lo considere pertinente”. Artículo 1, Acuerdo N° 045 del 25 de mayo de 2018 del Consejo Superior.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado



Certificado GP 134-1



ISO 9001

Certificado



Certificado SC 5278-1



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía y brindarme salud, fortaleza y seguridad para continuar con mis objetivos sin desfallecer.

A mis padres Armando Raciny y Sandra Soto, por apoyarme incondicionalmente en alcanzar mis metas y sueños planteados.

A mi hermana Keila Raciny por ser una parte importante en mi vida.

A mis abuelos Lilia Betín y Andrés Soto, por inculcarme valores y principios, y depositar su confianza en mí para alcanzar todas mis metas.

A mis amigos Luis Ávila y Jorge Muñoz, por su amistad, por estar presente en los momentos más difíciles y darme apoyo cuando más lo he necesitado.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



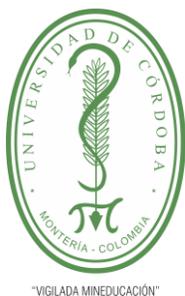
Agradecimientos especiales a:

A mis tutoras de tesis Zoraya Martínez y Mónica Cantero por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de investigación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para formarme profesionalmente.

A mis amigos de estudio Ángela Villalba y Neider Burgos que estuvieron presente en el desarrollo de esta tesis. Gracias por su apoyo y comprensión.

A mis jurados, por la guía, contribución y mejora de esta investigación mediante sus experiencias y conocimientos.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	17
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	18
4. ESTADO DEL ARTE.....	22
5. MATERIALES Y MÉTODOS	25
5.1 LOCALIZACIÓN	25
5.2 MATERIALES.....	26
5.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	27
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS MEDIANTE ALEKIN	36
6.2 IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS.....	43
6.2.1 Diagrama de Gibbs.....	43
6.2.2 Diagramas binarios	47
6.3 ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL A TRAVÉS DE DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF	50
6.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	72
6.4.1 CAJAS Y BIGOTES	72
6.4.2 CORRELACIÓN DE SPEARMAN	75
6.4.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	77





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

6.4.4	ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS MÚLTIPLES	80
6.5	MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	83
6.5.1	CALIBRACIÓN	83
6.5.2	MODELOS DE ESPECIACIÓN	86
6.5.3	ÍNDICES DE SATURACIÓN	101
6.6	TÉCNICAS DE MANEJO DE SUELO	103
7	CONCLUSIONES	106
8	RECOMENDACIONES	107
9	BIBLIOGRAFÍA	108
	ANEXOS	114
	ANEXO A- CONCENTRACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA FREÁTICA EN TODAS LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	114
	ANEXO B- CORRELACIÓN DE SPEARMAN.....	117
	ANEXO C- RESULTADOS DE LA REGRESIÓN SIMPLE	118
	ANEXO D- ÍNDICES DE SATURACIÓN DE MINERALES	120

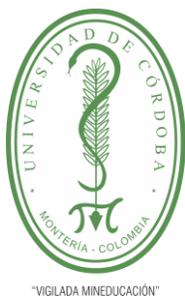


Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la relación de absorción de sodio.	28
Tabla 2. Clasificación de Alekin.	37
Tabla 3. Clasificación según geomorfología y relación de absorción de sodio.	39
Tabla 4. Clasificación de Alekin según la geomorfología.	42
Tabla 5. Rangos de Spearman.	75
Tabla 6. Composición química de las muestras.	77
Tabla 7. Análisis de Componentes Principales.....	78
Tabla 8. Pesos de los Componentes.	78
Tabla 9. Promedio de error absoluto medio en elementos conservativos.	83
Tabla 10. Concentración de especies químicas en temporada seca y húmeda.	87
Tabla 11. Correlación de Spearman para todas las muestras de agua freática en la zona de estudio.	117
Tabla 12. Resultados de la regresión simple para el catión sodio- Modelados vs Experimentales.....	118
Tabla 13. Resultados de la regresión simple para el catión magnesio- Modelados vs Experimentales.....	118
Tabla 14. Resultados de la regresión simple para el catión potasio- Modelados vs Experimentales.....	119
Tabla 15. Resultados de la regresión simple para el catión cloruro- Modelados vs Experimentales.....	119



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

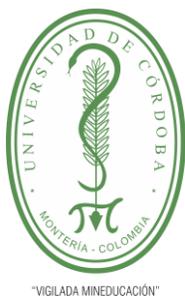
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona deltáico-estuarina nororiental y del área discretizada...	26
Figura 2. Mapa de síntesis de la metodología	35
Figura 3. Zona de estudio por unidad geomorfológica y puntos de muestreos.....	38
Figura 4. Relación de adsorción de sodio (SAR) por unidad geomorfológica en ambas temporadas climáticas.....	40
Figura 5. Clasificación de aguas mediante Alekin por unidad geomorfológica en ambas temporadas climáticas.....	42
Figura 6. Identificación del proceso hidrogeoquímico dominante en cada punto de muestreo- temporada seca.....	44
Figura 7. Identificación del proceso hidrogeoquímico dominante en cada punto de muestreo- temporada húmeda.....	45
Figura 8. Diagrama de Gibbs. a) Temporada seca. b) Temporada húmeda.....	46
Figura 9. Relación de $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3 - SO_4^{2-})$ vs $(Na^+ + K^+ - Cl^-)$ para determinar el proceso de intercambio iónico.	47
Figura 10. Relación Na^+/ Cl^- vs CE para determinar el proceso de evaporación.	49
Figura 11. Relación $Na^+ + K^+$ vs Cationes Totales para determinar el proceso de disolución de silicatos.....	50
Figura 12. Diagrama de Piper por unidad geomorfológica.....	52
Figura 13. Diagrama de Mifflin.....	53
Figura 14. Diagrama de Piper- Abanico y/o glaxis.....	54
Figura 15. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Abanico y/o glaxis.	56
Figura 16. Diagrama de Piper- Lomas y colinas.....	57
Figura 17. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Lomas y colinas.....	58





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Figura 18. Diagrama de Piper- Plano de marea.	59
Figura 19. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Plano de marea.	60
Figura 20. Diagrama de Piper- Plataforma costera.	61
Figura 21. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Plataforma costera.	62
Figura 22. Diagrama de Piper- Terraza.	63
Figura 23. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Terraza.	64
Figura 24. Diagrama de Piper- Plano de inundación.	66
Figura 25. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Plano de inundación.	67
Figura 26. Caja y bigotes- época seca.	74
Figura 27. Caja y bigotes- época húmeda.	74
Figura 28. Pesos de los componentes 1 y 2.	79
Figura 29. Análisis de correspondencias múltiple.	82
Figura 30. Calibración de los datos experimentales y modelados mediante un modelo lineal.	85
Figura 31. Mapa de isoconcentración de sulfato de magnesio en temporada húmeda.	89
Figura 32. Mapa de isoconcentración de sulfato de magnesio en temporada seca.	90
Figura 33. Mapa de isoconcentración de sulfato de sodio en temporada húmeda.	92
Figura 34. Mapa de isoconcentración de sulfato de sodio en temporada seca.	92
Figura 35. Mapa de isoconcentración de cloruro de sodio en temporada húmeda.	94
Figura 36. Mapa de isoconcentración de cloruro de sodio en temporada seca.	95
Figura 37. Mapa de isoconcentración de cloruro de magnesio en temporada húmeda.	96
Figura 38. Mapa de isoconcentración de cloruro de magnesio en temporada seca.	97
Figura 39. Mapa de isoconcentración de bicarbonato de sodio en temporada húmeda.	99





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Figura 40. Mapa de isoconcentración de bicarbonato de sodio en temporada seca. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 41. Concentraciones de diagramas de Stiff- Abanico y/o glacis.	114
Figura 42. Concentraciones de diagramas de Stiff- Lomas y colinas.	114
Figura 43. Concentraciones de diagramas de Stiff- Plano de marea.	114
Figura 44. Concentraciones de diagramas de Stiff- Plataforma costera.	115
Figura 45. Concentraciones de diagramas de Stiff- Terraza.	115
Figura 46. Concentraciones de diagramas de Stiff- Plano de inundación.	116
Figura 47. Índices de saturación de minerales en temporada húmeda.	120
Figura 48. Índices de saturación de minerales en temporada seca.	121
Figura 49. Índices de saturación de minerales en temporada húmeda.	122
Figura 50. Índices de saturación de minerales en temporada seca.	122



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



RESUMEN

Dentro de los procesos de degradación del suelo se ha definido que la salinización es uno de los más importantes en el territorio colombiano. Para estudiar este fenómeno, fue preciso el uso de la hidrogeoquímica como herramienta valiosa para describir la variabilidad de la composición del agua freática, permitiendo simular las reacciones químicas y procesos de transporte. En la zona deltaico-estuarina, se presenta el proceso de salinización y/o sodificación debido a causas naturales y a malas técnicas agrícolas como la tala, sustitución de manglar por arroz y uso excesivo de agroquímicos, por lo tanto, en esta investigación se evaluó la dinámica espacial y temporal de este proceso en función de métodos hidrogeoquímicos y estadísticos. A partir de la información recolectada se encontró que las aguas se clasifican como cloruradas sódicas y los procesos hidrogeoquímicos dominantes en el sistema son la evaporación y el intercambio iónico. A través de los análisis estadísticos se dedujo que los iones cloruro y sodio estaban fuertemente relacionados. Con la modelación de especiación y solubilidad, se obtuvo que la principal sal presente en la zona es el $MgSO_4$, seguida del $NaCl$, ya que presentaron las concentraciones más altas. En los mapas de isoconcentración de las sales, la zona central y sureste del plano de inundación fueron las más afectadas por el proceso de salinidad, debido a que en esa área se presentaban los mayores niveles de concentración. Las especies mineralógicas que generan aumento en la salinidad por encontrarse modeladas como fases subsaturadas son la halita, epsomita, mirabilita, nahcolita y thenardita.

Palabras Clave: Hidrogeoquímica, salinidad, dinámica, modelación.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



ABSTRACT

Within the processes of soil degradation it has been defined that salinization is one of the most important in the Colombian territory. To study this phenomenon, it was necessary to use hydrogeochemistry as a valuable tool to describe the variability of the composition of groundwater, allowing to simulate chemical reactions and transport processes. In the area deltaico-estuarine, we present the process of salinization and/or sodificación due to natural causes and poor agricultural techniques such as cutting, replacement of mangrove rice and excessive use of agrochemicals, therefore, in this research we evaluated the spatial-temporal dynamics of this process as a function of methods hidrogeoquímicos and statistical. From the information collected it was found that the waters are classified as sodium chlorinated and the dominant hydrogeochemical processes in the system are evaporation and ion exchange. Through statistical analyses it was deduced that chloride and sodium ions were strongly related. With the modeling of speciation and solubility, it was obtained that the main salt present in the area is $MgSO_4$, followed by $NaCl$, since they presented the highest concentrations. In the salt isoconcentration maps, the central and southeast areas of the flood plain were the most affected by the salinity process, due to the higher concentration levels in that area. The mineralogical species that generate increased salinity due to being modeled as subsaturated phases are halite, epsomite, mirabilite, nahcolite and thenardite.

Key Words: Hydrogeochemistry, salinity, dynamics, modeling.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de degradación del suelo se ha definido que la salinización es uno de los más importantes en el territorio colombiano (Otero et al 2002). La salinización se ha asociado a zonas secas y a procesos de desertificación, donde la lluvia es demasiado baja para mantener la percolación del agua a través del suelo y donde se practica el riego sin un sistema de drenaje natural o artificial (FAO 2013). Existen casos a nivel mundial donde zonas muy productivas se han degradado hasta convertirse en “desiertos”. Tal es el caso del mar de Aral en el Asia Central (antigua Unión Soviética), donde gracias a la facilidad de mecanización y de implementación de sistemas de riego se utilizaron estas tierras fértiles para extraer gran cantidad de alimentos. No obstante, en unas décadas este territorio se transformó en un “desierto” salino de más de dos millones de kilómetros cuadrados (casi dos veces el tamaño de Colombia), perdiéndose un cuerpo de agua del tamaño un poco más grande que Costa Rica (IDEAM et al. 2017).

Para Colombia, según el mapa de susceptibilidad a la degradación por salinización, el 45% (51'270.290 ha) de la superficie continental e insular presenta algún grado de susceptibilidad o propensión, para lo cual, los departamentos de Atlántico, Guajira, Magdalena, Sucre y Córdoba presentan más de un 30% de probabilidad (muy alta a alta) a dicho proceso (IDEAM et al. 2017).

La salinidad de los suelos en la zona deltáico-estuarina nororiental del río Sinú, Córdoba, es un proceso natural que va aumentando con el pasar de los años debido a causas antrópicas como las deficientes prácticas agropecuarias que se desarrollan y a otras naturales, como la vocación salina del área, la cual se debe a que es una zona de acumulación próxima al mar con suelos derivados de sedimentos fluvio-lacustre finos a medio.

A la fecha los estudios realizados en el área objetivo no se han enfocado desde el punto de vista de los procesos hidrogeoquímicos que intervienen en el proceso de salinización, por lo que se hace necesario comprender la hidrogeoquímica de la zona, además de sus





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



caracterización mediante técnicas estadísticas, para así analizar su dinámica espacial y temporal, puesto que la salinización afecta la productividad, ya que puede generar efecto osmótico, efecto de ion específico y efecto sobre el balance energético que interfiere negativamente en el crecimiento de las plantas y degrada el suelo, lo cual se podría ver reflejado en las áreas más alejadas a la costa y utilizadas para cultivos.

Este trabajo permitió evaluar el comportamiento de la salinidad mediante el análisis de los procesos hidrogeoquímicos que se presentan en las aguas freáticas de la zona por medio de la aplicación de diagramas hidroquímicos, métodos hidrogeoquímicos como el modelo de especiación y solubilidad, y métodos estadísticos. Lo anterior permite incrementar el conocimiento de la dinámica espacio-temporal de la salinización, en función de las especies y fases mineralógicas presentes en las aguas de la zona de estudio.

Con el desarrollo de este trabajo se encontró que los iones más abundantes del área de estudio son el cloruro y sodio, por ende, la clase de agua según la clasificación de Alekin más predominante es clorurada sódica. De igual manera, las sales solubles como sulfato de magnesio y cloruro de sodio y sus fases mineralógicas epsomita y halita respectivamente, son aquellas que más efectos perjudiciales provocan en el desarrollo de los cultivos, debido a sus altas concentraciones y asimismo a sus elevadas solubilidades. Por lo general, las mayores concentraciones de los diferentes iones se presentaron en temporada seca, puesto que el proceso de evaporación es mucho más importante en dicha época; estas concentraciones también aumentaron conforme a la cercanía que tuviese el pozo a la zona costera del área de estudio, principalmente por el proceso de intrusión salina.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



2. OBJETIVOS

Objetivo General:

- Evaluar mediante métodos hidrogeoquímicos y estadísticos, la dinámica espacio-temporal de la salinización, en función de las especies, y los procesos hidrogeoquímicos que se presentan en las aguas freáticas de la zona deltáico-estuarina nororiental, Córdoba.

Objetivos Específicos:

- Analizar por medio de la aplicación de diagramas hidroquímicos, los procesos hidrogeoquímicos en el sistema aguas freáticas:suelo.
- Caracterizar mediante una modelación de especiación las especies químicas y mineralógicas que generan problemas de salinización, y su relación con los parámetros fisicoquímicos del sistema.
- Analizar la dinámica del proceso de salinización que permita la proposición de estrategias técnicas que minimicen el impacto que pueden tener las sales solubles en la relación suelo:planta.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La salinización del suelo se ha convertido en un problema eco-sistémico altamente significativo que se encuentra en todo el mundo. La salinización grave del suelo conduce a su deterioro y tiene un impacto negativo en el desarrollo sostenible del ecosistema y la agricultura (Tian et al. 2019).

El origen de la salinidad puede ser explicado por dos vías: La primera es natural, ya sea por la cercanía y la altura sobre el nivel del mar, la intemperización y la existencia de sales como minerales constituyentes en la roca madre. Además, se deben considerar otros factores, como son: las aguas salinas, las tierras bajas cercanas a las costas, los pantanos y lagunas litorales, y las áreas cercanas a minas y bóvedas salinas (González et al. 2000). La segunda causa, es el resultado de las incorrectas prácticas agrícolas del suelo y el manejo irracional del agua para el riego, lo cual permite la movilidad de las sales dentro del suelo y el transporte de las mismas a nuevos sitios. Esto es conocido como proceso de salinidad antrópica o secundaria (Summer 1993), convirtiéndose la salinización de los suelos en una consecuencia del desarrollo de la sociedad humana (Álvarez et al. 2008).

Se han degradado grandes cantidades de terrenos con alto potencial productivo o de conservación y se ha tenido que trasladar y ampliar las fronteras agrícolas hacia zonas anteriormente no intervenidas o en muchos casos a zona con potencial de protección (Sánchez et al. 1985). A partir de esto, se ha evaluado detalladamente la dinámica evolutiva de las zonas salinizadas, ya que el conocimiento de las causas que generan un problema en específico da razones para fundamentar la toma de acciones en cuanto a medidas de manejo, prevención o mitigación.

Para conocer y comprender los procesos que determinan el comportamiento de la salinidad se utilizan herramientas gráficas como los diagramas de Gibbs y de dispersión. El diagrama de Gibbs fue desarrollado por Gibbs (1970), donde se refleja el análisis de





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



estudio del agua subsuperficial y actualmente se ha utilizado también para agua subterránea. Este diagrama grafica la concentración de los sólidos disueltos y la relación de $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, para cationes y para aniones $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$, con el fin de diferenciar las influencias de la interacción agua-roca, la evaporación y la precipitación en la química del agua.

Los diagramas de dispersión son métodos simples de interpretación de datos hidrogeoquímicos dado que permiten una evaluación preliminar con relación de iones y se puede establecer balances estequiométricos entre los iones e identificar procesos como el intercambio iónico, dilución y evolución de las aguas subterráneas en el sitio de estudio (Lloyd 1985).

La compilación y presentación de los datos de composición y características químicas referentes del estudio del agua subterránea, suelen realizarse mediante gráficos, principalmente por el diagrama triangular de Piper que ha sido universalmente usado para ilustrar diferencias y tendencias en la química del agua. Además, permite reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, procesos de precipitación e intercambio iónico, por lo tanto, las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Manzano 2008). El diagrama consiste de dos triángulos equiláteros, en uno de ellos se representan los cationes y en el otro los aniones, complementados con un rombo ubicado entre la porción superior de los triángulos que indica el tipo de agua predominante (Appelo y Postma 1996).

El uso de modelos hidrogeoquímicos es una herramienta valiosa para describir la variabilidad espacial y temporal de la composición del agua freática, puesto que permite simular las reacciones químicas y procesos de transporte tanto en aguas naturales o contaminadas. Estos modelos se facilitan por la ejecución de software que se emplean para calcular las especies químicas y mineralógicas en aguas superficiales, suelos y aguas marinas. Para el caso de especiación en aguas freáticas, los modelos que describen





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



la influencia de los procesos hidrogeoquímicos principalmente usados son: PHREEQC (Parkhurst 1999), WATEQ4F (Ball y Nordstrom 1991), MINTEQA2 (Allison et al. 1991), MINEQL+ (Schecher y McAvoy 1992), MODFLOW (Harbaugh 2005). Siendo el Phreeqc el que, por las características de proporcionar información geoquímica del sistema mediante modelación, permite la identificación de los procesos hidrogeoquímicos que se presentan en la zona deltáico-estuarina nororiental del río Sinú, Córdoba; por lo cual, será el que se implementará en este estudio.

Phreeqc es un programa orientado por líneas de código y sus archivos de entrada guardan la forma de listas con lenguaje reservado que define operaciones y datos cuya distribución brinda coherencia para que estos puedan ser procesados. Este se basa en la química de equilibrio de soluciones acuosas que interactúan con minerales, gases, soluciones sólidas, intercambiadores y las superficies de adsorción por lo que utiliza y crea distintos archivos que contienen información necesaria para la ejecución del modelo y la interpretación de los datos (Montoya 2017).

El uso de técnicas estadísticas es fundamental en la investigación. Se utilizan para facilitar la comprensión de fenómenos como la salinización, los procesos hidrogeoquímicos, y evaluar las relaciones entre las variables o parámetros implicados en el funcionamiento de un sistema suelo:agua. Es así como en el acuífero de Balanegra, SE de España, se iniciaron los procesos hidrogeoquímicos mediante el análisis de la composición química de las aguas subterráneas, la identificación de índices de saturación y simulaciones geoquímicas. Para el caso, se utilizaron los softwares AquaChem 2011.1 y Phreeqc 3.12; el primero con el fin de reconocer el tipo de agua en cada muestra, ayudando a esclarecer los procesos que actúan y las zonas donde se dan; y Phreeqc para el cálculo de concentraciones de equilibrio, molalidad, actividad de las diferentes especies químicas y mineralógicas, índices de saturación por medio de un modelo de especiación y por modelación inversa. También fueron implementadas técnicas estadísticas como estadística descriptiva, análisis multivariado y correlación de





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Spearman para establecer la relación entre diferentes parámetros fisicoquímicos (Fernández 2015).



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente
Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920
www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



4. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta que el aumento de sales solubles en las aguas freáticas genera incremento en la salinización del suelo, el uso de modelos hidrogeoquímicos es una herramienta valiosa para describir la variabilidad espacial y temporal de la composición del agua freática (Alley 1993). Es así como, para cuantificar las interacciones agua-roca y pronosticar su evolución espacio-temporal en el acuífero poco profundo de Sidi El Hani ubicado en el centro-este de Túnez en el año 2019, se utilizó el código numérico KIRMAT. Con base en los datos geológicos, mineralógicos, termodinámicos, cinéticos e hidrodinámicos disponibles, el modelo se construyó y calibró en dos transectos del acuífero orientados a lo largo de las líneas de flujo del agua subterránea. Los resultados numéricos muestran que las interacciones entre el agua y las rocas son responsables de la salinidad del agua subterránea, que está fuertemente dominada por cloruros, sulfatos y sodio (Soumaia et al. 2019).

Por otro lado, en un estudio realizado por Ramírez et al., 2005, se predijo la salinización de un suelo del valle de Quibor, Venezuela, con cultivo de cebolla bajo riego localizado, mediante la validación del modelo Leachm, como una herramienta de diagnóstico; este último fue de gran utilidad para predecir las áreas de acumulación de sales y para adecuar las prácticas de manejo más convenientes por el suelo, arrojando como resultado que las sales se desplazaron hacia los drenajes superficiales y a los estratos más profundos, según el alcance de la humedad. Así mismo, Xiaomin et al., 2018; realizó una investigación para determinar la dinámica y los cambios provocados por la salinización en tierras cultivadas y terrenos baldíos a largo plazo, dadas las prácticas actuales de riego y drenaje y bajo los diferentes escenarios de gestión del agua utilizando el software SaltMod en el distrito de riego Heta, China; los resultados de la predicción mostraron que la salinidad de la tierra cultivada exhibiría una ligera disminución en los próximos 10 años bajo las condiciones actuales de riego y drenaje, es decir, la salinidad del suelo disminuirá aproximadamente entre un 1,06% y un 10,92%, y el agua de riego





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



total disminuirá aproximadamente entre 50 y 295 m³/ha, lo que posiblemente contribuiría a mejorar el ahorro de agua y la desalinización del suelo (Xiaomin et al. 2018).

En un estudio desarrollado en los acuíferos del noreste de la Bahía de Guanabara, Río de Janeiro, Brasil, se analizaron los procesos geoquímicos responsables del considerable rango de salinidad (48 a 5651 $\mu\text{S. Cm}^{-1}$) a través de la composición química del agua subterránea. El modelo PHREEQC mostró que el pH alto y los valores bajos de potencial redox condicionaron los procesos principales que controlan la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en esa región (Gomes et al. 2019)

Igualmente, Russak y Sivan, 2010, realizaron un estudio para identificar la salinización o renovación de acuíferos costeros determinada a partir de trabajo de campo combinado, experimentos y modelado. Este estudio propuso una herramienta hidrogeoquímica para distinguir entre los eventos de salinización y renovación de un acuífero costero y cuantificar su efecto sobre las características del agua subterránea. Los resultados experimentales se modelaron utilizando el código PHREEQC y se compararon con los datos de campo del acuífero costero de Israel, indicando que el proceso principal que opera durante los eventos de salinización o renovación en los acuíferos costeros es el intercambio de cationes.

Para la identificación de las facies hidrogeoquímicas y la comprensión de los procesos hidrogeoquímicos en el Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena, Colombia, se utilizaron diagramas hidroquímicos y métodos estadísticos multivariados de Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Agrupamiento Jerárquico (Malagón 2017). Mediante el diagrama de Piper se identificó como facie hidrogeoquímica dominante el agua bicarbonatada cálcica, seguida por la bicarbonatada sódica y la clorurada sódica. La correlación estadística de los datos de calidad de agua, con la





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías

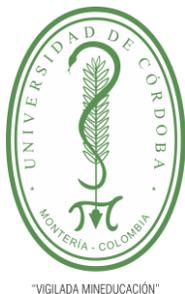


geología e hidrogeología del área de estudio, permitió identificar procesos como la disolución de silicatos, óxido-reducción y la contaminación antrópica.

Lozada (2018) identificó los procesos hidrogeoquímicos presentes en un sistema lagunar de México con geología kárstica, mediante el uso de la modelación por medio del software PHREEQC. Uno de los principales procesos identificados a través de la modelación y comprobado por la comparación con el sitio, fue la precipitación de yeso debido a su baja solubilidad, también, reacciones de oxidación y reducción de la materia orgánica, precipitación o disolución de elementos nitrogenados y sales provenientes de las descargas realizadas al cauce del río Grande que alimenta el sitio de estudio. Se identificó que las condiciones físicas y la temporada del año en que se colectaron los datos son factores importantes en la identificación y la variación de los procesos hidrogeoquímicos presentados.

Particularmente para zona deltaico estuarina del río Sinú, se han realizado estudios como la estimación de la salinidad en aguas freáticas del área de influencia de la desembocadura del río Sinú (Combatt et al. 2015), distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú (Narváez et al. 2014b); y un diagnóstico general del nivel de salinización edáfica y freática en la zona aledaña a la desembocadura del río Sinú y su impacto socioeconómico, como consecuencia del aprovechamiento hidroeléctrico Urrá I. Período: noviembre /2000 – noviembre/2008. (Bustamante y Cantero 2008), entre otros estudios. Los diferentes informes indican que los iones Cl, Na y Mg predominan en las principales sales de los suelos y las aguas freáticas de la zona, principalmente, en el periodo seco, y a su vez la migración de sales se da en la dirección del flujo freático, lo cual es responsable de la salinización progresiva. Los valores de conductividad eléctrica del suelo varían con la profundidad y los regímenes de precipitación, siendo mayor en el periodo seco, y en el agua freática son mayores en profundidades menores, lo cual representa un alto riesgo de salinidad para estos suelos. (Narváez et al. 2014a; Mercado et al. 2011; Narváez et al. 2014b).





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 LOCALIZACIÓN

La zona objeto del estudio se encuentra dentro de la región de planicie aluvial y de marismas del nivel de base del río Sinú (Figura 1). Se ubica entre los meridianos $75^{\circ} 47' 50''$ y $75^{\circ} 56' 40''$ de longitud oeste y los paralelos $9^{\circ} 16' 40''$ y $9^{\circ} 26' 40''$ de latitud norte, abarcando un área de 22324,68 ha. Está limitada al norte por el Océano Atlántico, al sur por las regiones de San Rafael de Pareja, Playa Rica, San Gregorio y Sicará, al este por las Ciénagas de Ostional, Corozo, El Tapado, Navío y El Garzal y al oeste por el complejo de manglares, ubicados al norte de la cabecera municipal de San Bernardo del Viento, departamento de Córdoba, Colombia (Bustamante y Cantero 2008). Para la delimitación del área de estudio se tuvo en cuenta la cantidad de información de la zona suministrada por el trabajo realizado por Bustamante y Cantero, 2008, por lo cual se procedió a escoger un área que tuviese una distribución homogénea de los pozos realizados y muestreados, tanto espacial, como en cantidad, con el objetivo de facilitar el manejo de la información y poder evaluarla de forma íntegra.



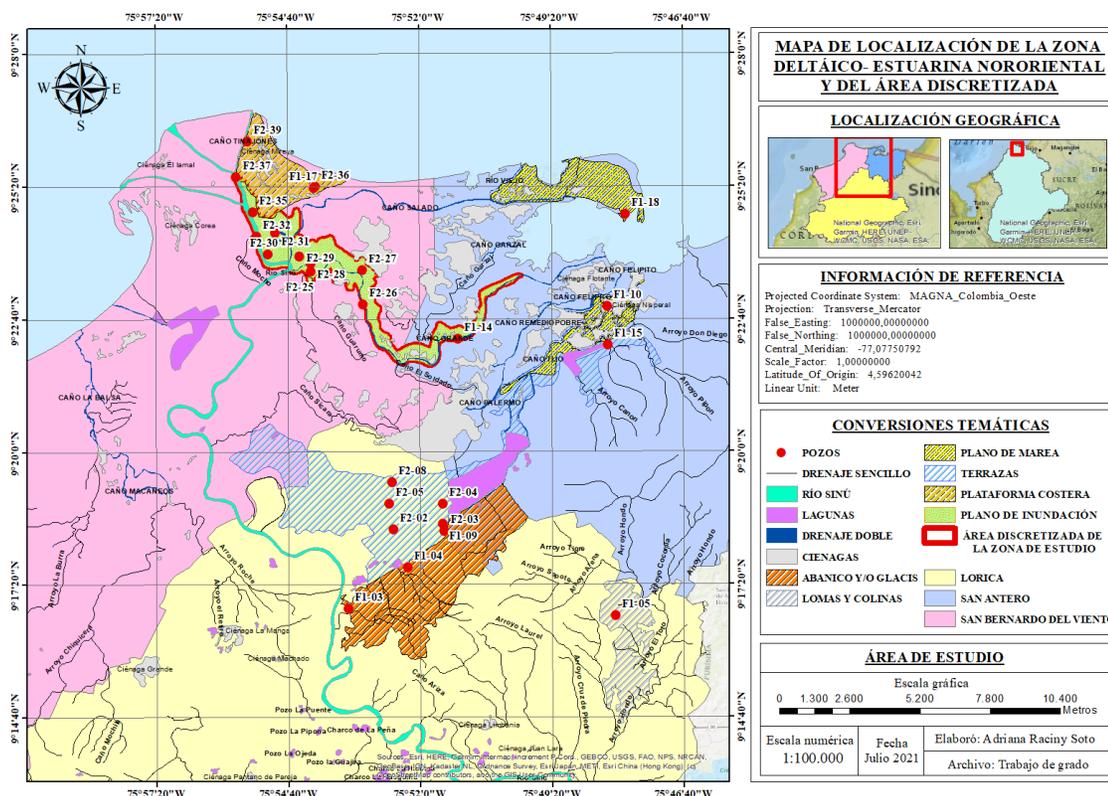


Figura 1. Localización de la zona deltáico-estuarina nororiental y del área discretizada.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 MATERIALES

Entre el material bibliográfico relativo al tema de salinización y estudios específicos de la zona, se usaron los datos de análisis de aguas de las muestras realizadas en el “Diagnóstico general del nivel de salinización edáfica y freática en la zona aledaña a la desembocadura del río Sinú y su impacto socioeconómico, como consecuencia del aprovechamiento hidroeléctrico Urrá I. Período: noviembre /2000 – noviembre/2008”. (Bustamante y Cantero 2008), los cuales corresponden a los parámetros de: pH, conductividad eléctrica (dS/m), sólidos totales disueltos (g/l), cationes solubles (calcio,





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



magnesio, sodio y potasio en mEq l^{-1}), y aniones solubles (cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos en mEq l^{-1}).

Por otro lado, se encuentran los datos de precipitación del área de estudio para el periodo 2001-2008. Estos datos fueron tomados de la estación meteorológica de La Doctrina, Córdoba, y suministrados por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). De igual forma, se empleó la Cartografía de suelos de Córdoba suministrada por los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Los Softwares utilizados durante el desarrollo del trabajo fueron: para la modelación hidrogeoquímica PHREEQC INTERACTIVE 3.2, elaboración de los diagramas hidroquímicos DIAGRAMMES, análisis estadístico STATGRAPHICS, fabricación de diagramas bivariados IBM SPSS y para el procesamiento de la cartografía con miras a su producción a escala 1:50.000 ARCGIS.

5.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

De las muestras tomadas en el estudio de Bustamante y Cantero del período 2001-2008, se tuvieron en cuenta 27 pozos de observación freaticométrica, con diámetro reducido (2–4'') con relación a su profundidad (2–3 m); estos pozos se construyeron con el objeto de determinar los niveles piezométricos y la toma de muestras de agua freática para análisis de salinidad y composición físico- química (Bustamante y Cantero 2008).

- **Caracterización química de aguas freáticas someras en la zona deltáico-estuarina nororiental del río Sinú, Córdoba.**

Antes de realizar la caracterización química, las muestras de aguas fueron analizadas según el balance de iones descartando las que presentaban un porcentaje de error mayor a 20% como datos incoherentes, dando como resultado un total de 362 muestras aceptables. Luego con la ayuda de la cartografía de suelos de Córdoba disponible en los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi se identificaron las diferentes





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

geomorfologías y litologías que tiene el área de estudio para establecer exactamente donde se ubicaron los diferentes pozos y comprender qué diferencias en cuanto a tipos de agua y procesos hidrogeoquímicos se dieron a partir de la localización.

Por lo anterior, se llevó a cabo una caracterización química del agua por medio de la clasificación de Alekin, con el objetivo de establecer el tipo y la composición de agua en la zona de estudio. Esta clasificación tomó en cuenta principalmente los aniones más importantes Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- como clases; que, a su vez, se subdividen en tres grupos, los cuales están en función del catión dominante Ca^{2+} , Mg^{2+} , o Na^+ . De esta forma y tomando en cuenta la clase y el grupo de agua, se desprende la categorización en tipos:

$$\text{Tipo 1. } rHCO_{3^-} > rCa^{2+} + rMg^{2+}$$

$$\text{Tipo 2. } rHCO_{3^-} < rCa^{2+} + rMg^{2+} < rHCO_{3^-} + rSO_4^{2-}$$

$$\text{Tipo 3. } rHCO_{3^-} + rSO_4^{2-} < rCa^{2+} + rMg^{2+} \text{ ó } rCl^- > rNa^+$$

En conjunto con las unidades geomorfológicas, se utilizó la Relación de Adsorción de Sodio (SAR) como indicador de salinidad, para determinar su porcentaje en las aguas freáticas de cada geomorfología. Para la clasificación de este indicador se utilizó la realizada por el US Salinity Laboratory (Richards 1954), como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la relación de adsorción de sodio.

$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$	Calificación	Convención
0-6	Baja	B
6-12	Media	M
12-25	Alta	A
25-35	Muy alta	MA
>35	Excesiva	E

Fuente: Bustamante y Cantero, 2008, tomado de USDA, 1954.



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Identificación de procesos hidrogeoquímicos mediante el uso de diagramas binarios e hidroquímicos

Para la determinación de procesos hidrogeoquímicos dominantes en la salinidad se utilizaron diagramas de Gibbs y binarios para analizar la concentración de diferentes elementos principales, su interrelación y para comprender e ilustrar los procesos hidrogeoquímicos y origen de las composiciones químicas. El diagrama de Gibbs compuesto por una gráfica simple de TDS vs la relación $(Na^+ + K^+ / Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ proporciona información sobre la importancia relativa de los principales mecanismos naturales que controlan la química del agua subterránea (Gibbs 1970). Esta relación permitió identificar los procesos ocurrientes en la dinámica del agua freática mediante su química, como son: el proceso de precipitación meteórica, es decir, la lluvia y su rápida infiltración, proceso de intemperismo en cuanto a la interacción agua:roca, y el proceso de evaporación – cristalización, tomando como factor la temperatura.

Las interacciones agua-roca juegan un papel importante en la hidroquímica del agua freática. Las gráficas de relación de iones son un método popular para estudiar las concentraciones de diferentes iones principales y para determinar los principales procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el agua subterránea (Yang et al. 2016; Liu et al. 2018). Por esta razón se utilizaron las relaciones $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- + SO_4^{2-} vs Na^+ + K^+ - Cl^-)$ para identificar el proceso de intercambio iónico; $(Na^+ / Cl^- vs CE)$ para evaporación y $(Na^+ + K^+ vs cationes totales)$ para disolución de silicatos.

Los softwares que se utilizaron para la elaboración y análisis de los diagramas bivariados e hidroquímico fueron: IBM SPSS, STATGRAPHICS y DIAGRAMMES, ya que son programas de uso libre y sencillos, el cual, además de realizar muchos gráficos de tipo hidrogeoquímicos, permitió combinar una gama importante de parámetros.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- **Análisis espacial y temporal por medio de diagrama de Mifflin, Piper y Stiff**

Se hizo una compilación y presentación de datos de composición y características químicas para obtener una visualización simple y lo más completa posible de las aguas freáticas someras del área de estudio, por medio de técnicas de representación gráfica, como los diagramas de Mifflin que ilustraron una clasificación de las muestras de aguas freáticas, basada en la creciente concentración de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , conforme el agua evoluciona. Otro diagrama fue el de Piper-Hill-Langelier el cual permitió reflejar las variaciones provocadas por la presencia de mezclas, disoluciones, procesos de intercambio iónico que ocurren en el comportamiento del agua freática, es decir, se visualizó la evolución hidrogeoquímica del agua.

También se utilizó los diagramas de Stiff que permitieron figurar la composición química del agua, además de compararla y apreciar de forma rápida los diferentes tipos de agua. Con este último diagrama se realizaron mapas que dividieron la zona de estudio en fracciones que dibujan cada unidad geomorfológica y se plasmó la representación gráfica de la composición química del agua con el objetivo de mostrar la distribución espacial de las aguas freáticas. Cabe resaltar que estas representaciones correspondieron al tipo de agua más representativo de ambas temporadas climáticas en cada uno de los puntos de muestreos, con el fin de darle un mejor manejo a los datos, ya que la cantidad de estos es muy amplia.

- **Análisis de la relación entre las propiedades físico-químicas y concentración de los iones e identificación de componentes que rigen el comportamiento de salinidad mediante técnicas estadísticas**

Se analizaron las concentraciones de los iones a través de los diagramas de caja y bigotes, para identificar los valores atípicos o anómalos.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Por otra parte, para el análisis de la relación entre las propiedades físico-químicas como la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, la precipitación, pH, la relación de adsorción de sodio y las concentraciones de los iones se empleó una matriz de correlación de Spearman, ya que es un método de análisis estadístico bivalente que busca determinar el grado de variación de una variable respecto a otra con la que se compara. Esto se determinó mediante un coeficiente de correlación que puede tomar valores entre -1 y 1. El valor cero indica una ausencia de asociación o variabilidad entre las variables, mientras que entre más cerca sea de 1, mayor es la fuerza de asociación de los parámetros estudiados, por su parte el valor -1 indica una correlación negativa. Lo anterior se realizó a través del programa Statgraphics, software diseñado para facilitar el análisis estadístico de datos.

Se empleó el análisis estadístico multivariado para tener un enfoque cuantitativo e independiente de la clasificación de las aguas freáticas someras que ayudó en el agrupamiento de muestras de aguas y la creación de correlaciones entre los parámetros químicos. El uso del análisis de componentes principales (ACP) se llevó a cabo según el criterio de Kaiser, 1960, el cual indica que hay que conservar los componentes principales cuyos valores propios son mayores que la unidad o que el porcentaje de varianza total acumulado sea lo suficientemente alto. Bajo estos criterios, solo los factores con valores propios mayores o iguales a 1 fueron aceptados como posibles fuentes de varianza en los datos (Belkhiri et al. 2010). El análisis de correspondencias múltiples (ACM) permitió valorar la interrelación entre los distintos parámetros dentro de un gran conjunto de datos y resumir la información en un conjunto más pequeño de componentes.

Para el desarrollo del segundo objetivo, en primer lugar, se hizo una discretización de la zona de estudio (Figura 1), abarcando sólo 953,663 ha de la geomorfología de plano de inundación, debido a que esta zona es de importancia económica, puesto que en ella se localiza gran parte de las actividades agrícolas y por ende es aquí donde se debe ejecutar



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



diferentes técnicas de manejo de suelo para lograr un mejor rendimiento y productividad de los cultivos. Además de esto, aquí se concentraron la mayor cantidad de pozos con relación al resto de geomorfologías.

- Calibración del modelo de especiación y solubilidad

Para la calibración se llevó a cabo una valoración a través del método del error absoluto medio, utilizando los iones Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Cl^- ya que estos son considerados elementos conservativos, en vista de que se encuentran presentes en proporciones constantes en la naturaleza y son influenciados por diversos procesos físicos, por lo tanto, se realizó un contraste entre los datos experimentales reportados por Bustamante y Cantero, 2008, y las arrojadas por el modelo. El método anterior se empleó debido a que este ayuda a comparar los ajustes en diferentes modelos de series de tiempo, donde los valores más cercanos a cero indican un mejor ajuste. El error absoluto medio es dado por:

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|E_i - M_i|}{|E_i|}}{n} \quad (1)$$

Donde: EAM= error absoluto medio; E_i = datos experimentales; M_i = datos modelados; n = número de datos.

De igual forma, con la ayuda del software Statgraphics se generó un modelo de regresión simple para explicar la relación lineal que existe entre los datos experimentales y los datos modelados, a través de la ecuación

$$Y = a + b * x \quad (2).$$

- Identificación de especies químicas mediante el software PHREEQC y elaboración de mapas de isoconcentración.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Se identificaron las especies químicas presentes en las aguas freáticas de la zona de plano de inundación, por medio de una modelación directa utilizando la especiación.

Esta modelación directa predijo la composición del agua y la transferencia de masa, que resulta de reacciones químicas hipotéticas, en respuesta a procesos naturales y perturbaciones del sistema. Es decir, mediante el uso del modelo de especiación se calculó las concentraciones de todas las especies químicas en solución, como lo son los iones libres, pares de iones y compuestos de coordinación, sus actividades y coeficientes de actividad. Una vez se identificaron esas especies químicas, se escogieron aquellas que exhibieron mayor concentración y que su vez, influyen en el aumento del proceso de salinidad, y luego se analizaron las concentraciones de cada sal soluble y de acuerdo a su comportamiento se escogió una muestra que representara su conducta general en cada punto de muestreo para cada temporada climática, y se representaron por medio de mapas de isoconcentración para establecer su distribución espacial y temporal, utilizando el programa ArcMap 10.6 específicamente la herramienta de geoprocésamiento de distancia inversa ponderada (IDW) el cual es un interpolador determinista espacial ampliamente utilizado, que da más peso a los puntos más cercanos en el espacio. La ventaja de este enfoque es estimar los valores de celda utilizando los valores promedio de los puntos más cercanos al centro de la celda cuyo valor se va a estimar (Myers 1994; Mitas y Mitasova 1999).

- **Identificación de especies mineralógicas en equilibrio y subsaturado y grados de saturación por medio del software PHREEQC**

Esta misma modelación directa de especiación y solubilidad mediante Phreeqc, permite caracterizar las especies o fases mineralógicas que se encuentran en equilibrio y subsaturado con las aguas freáticas, además de ser aquellas indicadoras de aumento de la salinidad. Como resultado de esta modelación, se definieron los índices de saturación (SI), respecto a los minerales de interés. Estos índices de saturación permitieron





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



pronosticar la evolución de la solución acuosa, debido a procesos de interacción agua:roca, mediante la siguiente ecuación:

$$SI = \log\left(\frac{IAP}{K}\right) \quad (3)$$

Dónde:

IAP: corresponde al producto de actividad iónica

K: corresponde a la constante de equilibrio del constituyente

Dadas los valores de SI se tuvo que sí $SI = 0$, se consideró que el sistema se encuentra en equilibrio de saturación; sí $SI < 0$, el sistema se encuentra en condiciones de subsaturación (disolución); y sí $SI > 0$, el sistema se encuentra en condiciones de sobresaturación (precipitación).

Se escogió Phreeqc porque es un programa libre el cual está diseñado para realizar una amplia variedad de cálculos geoquímicos acuosos. Se basa en un modelo acuoso de asociación de iones y tiene capacidades para cálculos de índice de saturación y especiación, que es el segundo objetivo de este estudio.

Una vez se obtuvieron los resultados de los anteriores objetivos, se analizó la información y se realizó una revisión bibliográfica referente al tema tratado para comprender el comportamiento de la salinidad. Así, al entender cómo se da el proceso de salinización en la zona deltáico-estuarina nororiental del río Sinú, Córdoba, se propuso estrategias con el fin de minimizar el impacto que éste genera en la relación suelo:planta, ya que este proceso afecta drásticamente los servicios ecosistémicos, sobre todo la producción de la gran mayoría de especies agrícolas de importancia económica para la producción de alimentos, materias primas, materiales genéticos y medicinales





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

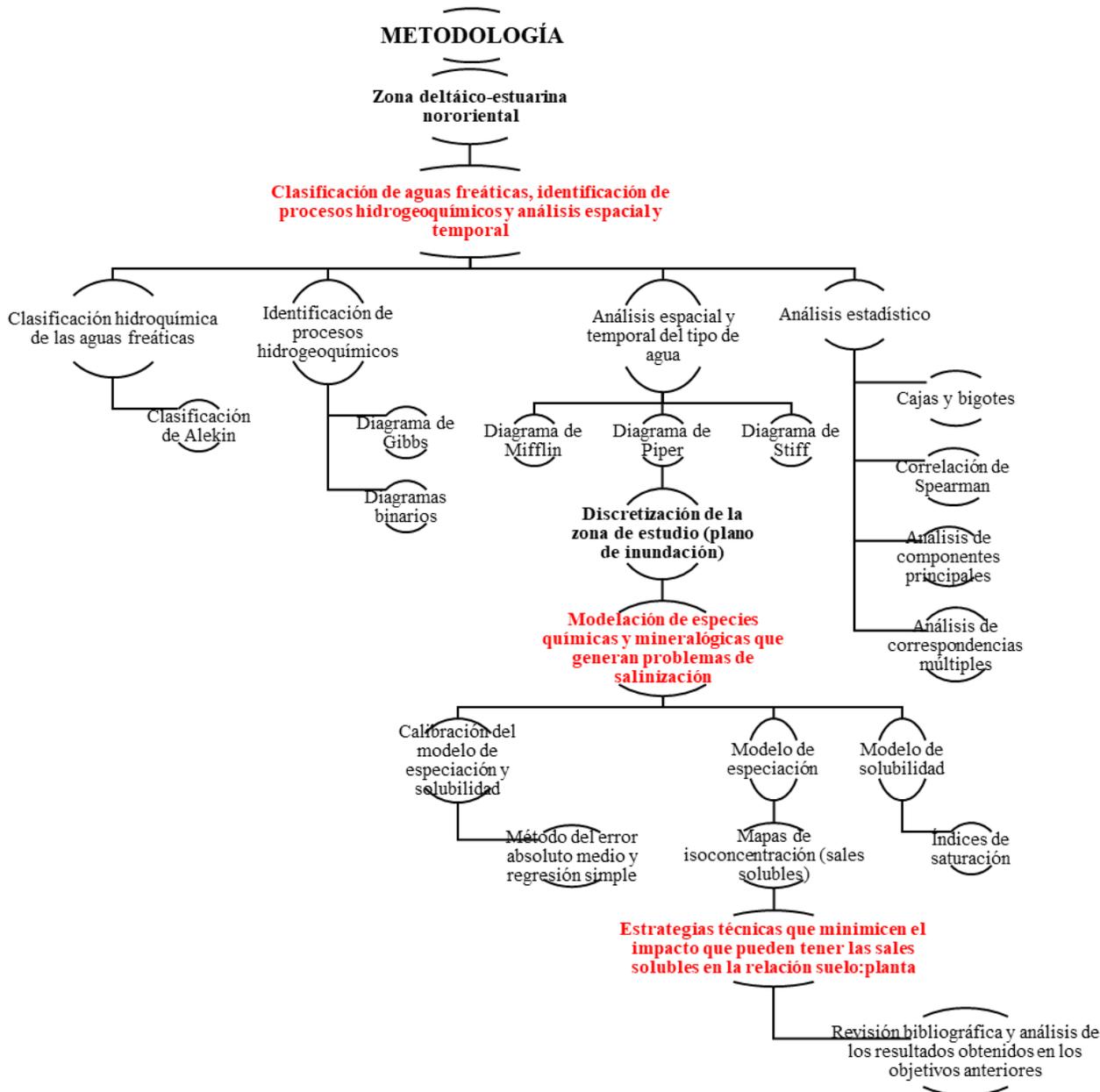


Figura 2. Mapa de síntesis de la metodología

Fuente: Elaboración propia



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la categorización de aguas mediante la clasificación de Alekin; la identificación de los procesos hidrogeoquímicos que establecen el comportamiento de las aguas freáticas por medio de diferentes diagramas y métodos estadísticos, y la variación espacial y temporal de los diferentes tipos de agua y de las principales sales solubles que generan aumento al proceso de salinidad en el área de estudio. De igual forma, se describen algunas estrategias o técnicas de manejo de suelo que contribuyan a minimizar el impacto de las sales solubles en las aguas freáticas de la zona.

6.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS MEDIANTE ALEKIN

Las aguas analizadas se clasificaron según su clase (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}), grupo (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y tipo (I, II, III) predominante en las muestras. A partir de esto y de forma general se obtuvo en la tabla 2 que:

- El orden de abundancia en la clase de las muestras es: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$
- El orden de abundancia en el grupo de las muestras es: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
- El orden de abundancia en el tipo de las muestras es: III > II > I

De lo anterior, el 72,4% de la totalidad de las muestras presentaron clase de agua clorurada, acompañado del grupo sódico con un 68,5% y tipo de agua III con 66,0%. A partir de esto y de forma más específica, la clasificación de Alekin arrojó que el 58,3% de datos son cloruradas sódicas, lo que indica una fuerte influencia del agua de mar en las zonas costeras dada su ubicación.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Tabla 2. Clasificación de Alekin.

Nombre	Cantidad de muestras	Porcentaje
Clase		
Clorurada	262	72,4%
Bicarbonatada	71	19,6%
Sulfatada	29	8,0%
Grupo		
Sódica	248	68,5%
Magnésica	97	26,8%
Cálcica	17	4,7%
Tipo		
I	55	15,2%
II	68	18,8%
III	239	66,0%
Clasificación de Alekin		
Clorurada sódica	211	58,3%
Clorurada magnésica	43	11,9%
Clorurada cálcica	8	2,2%
Bicarbonatada sódica	17	4,7%
Bicarbonatada magnésica	47	13,0%
Bicarbonatada cálcica	7	1,9%
Sulfatada sódica	20	5,5%
Sulfatada magnésica	7	1,9%
Sulfatada cálcica	2	0,6%

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se utilizó la capa de suelos de Córdoba del IGAC del 2017, para determinar la ubicación de los pozos en cuanto a su geomorfología (Figura 3) y se calculó el porcentaje de pozos por unidad geomorfológica (Tabla 3), donde el plano de inundación contiene el 38,46% de los pozos, ya que en él se localizan 10 pozos de observación.



Certificado SC 5278-1

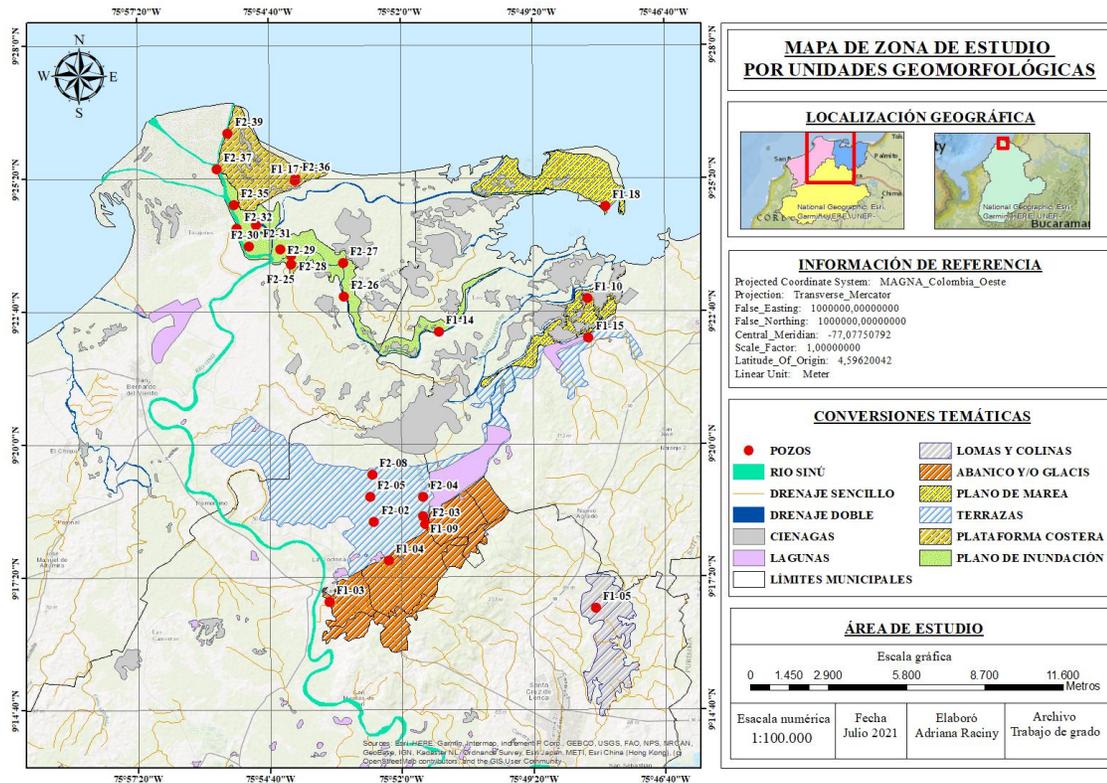


Figura 3. Zona de estudio por unidad geomorfológica y puntos de muestreos.

Fuente: Elaboración propia

Se midió el porcentaje de relación de adsorción de sodio (SAR) para cada unidad geomorfológica (Tabla 3, Figura 4), encontrándose que para los abanicos y/o glacis, lomas y colinas, plataforma costera y terrazas, los valores de SAR fueron bajos (52,2%, 90,9%, 39,0% y 60,2% respectivamente) en un alto porcentaje de las muestras, lo que permite analizar que los contenidos de calcio y magnesio fueron más elevados con respecto al sodio, lo que implica que la estructura microscópica del suelo no está tan debilitada.

La geomorfología del plano de inundación tuvo un SAR alto en el 33,3% de las muestras y en la geofoma de plano de marea el SAR fue excesivo en un 37,5%. Estas



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



clasificaciones indicaron elevados contenidos de sodio que alteran la condición fisicoquímica del suelo, puesto que el sodio desflocula, altera y dispersa su estructura, alterando su porosidad, lo que genera una disminución en la capacidad de movimiento del agua y aire dentro del suelo, dando como resultado un drenaje deficiente, y a su vez dificultando la posibilidad del buen desarrollo fisiológico de los cultivos que se establezcan en esta zona.

Tabla 3. Clasificación según geomorfología y relación de adsorción de sodio.

Geomorfología	Porcentaje	Litología	N° del pozo	SAR	Total muestras
Abanico y/o glacis	7,69%	Sedimentos mixtos	F1-03, F1-04	Bajo: 52,2%	23
				Medio: 30,4%	
				Alto: 17,4%	
				Muy alto: --	
				Excesivo: --	
Lomas y colinas	3,85%	Arcillolitas con intercalaciones de areniscas y materiales calcáreos	F1-05	Bajo: 90,9%	11
				Medio: 9,1%	
				Alto: --	
				Muy alto: --	
				Excesivo: --	
Plano de inundación	38,46%	Sedimentos finos y moderadamente finos	F1-14, F2-25, F2-26, F2-27, F2-28, F2-29, F2-30, F2-31, F2-32, F2-35	Bajo: 27,8%	162
				Medio: 22,8%	
				Alto: 33,3%	
				Muy alto: 8,0%	
				Excesivo: 8,0%	
Plano de marea	7,69%	Sedimentos finos y gruesos con capas de material orgánico	F1-10, F1-18	Bajo: 25,0%	24
				Medio: 12,5%	
				Alto: 20,8%	
				Muy alto: 4,2%	
				Excesivo: 37,5%	
Plataforma costera	15,38%	Sedimentos gruesos	F1-17, F2-36, F2-37, F2-39	Bajo: 39,0%	59
				Medio: 20,3%	
				Alto: 8,5%	
				Muy alto: 6,8%	



				Excesivo: 25,4%	
Terrazas	26,92%	Sedimentos mixtos con materiales calcáreos	F1-09, F1-15, F2-02, F2-03, F2-04, F2-05, F2-08	Bajo: 60,2%	83
				Medio: 16,9%	
				Alto: 8,4%	
				Muy alto: 8,4%	
				Excesivo: 6,0%	

Fuente: Elaboración propia.

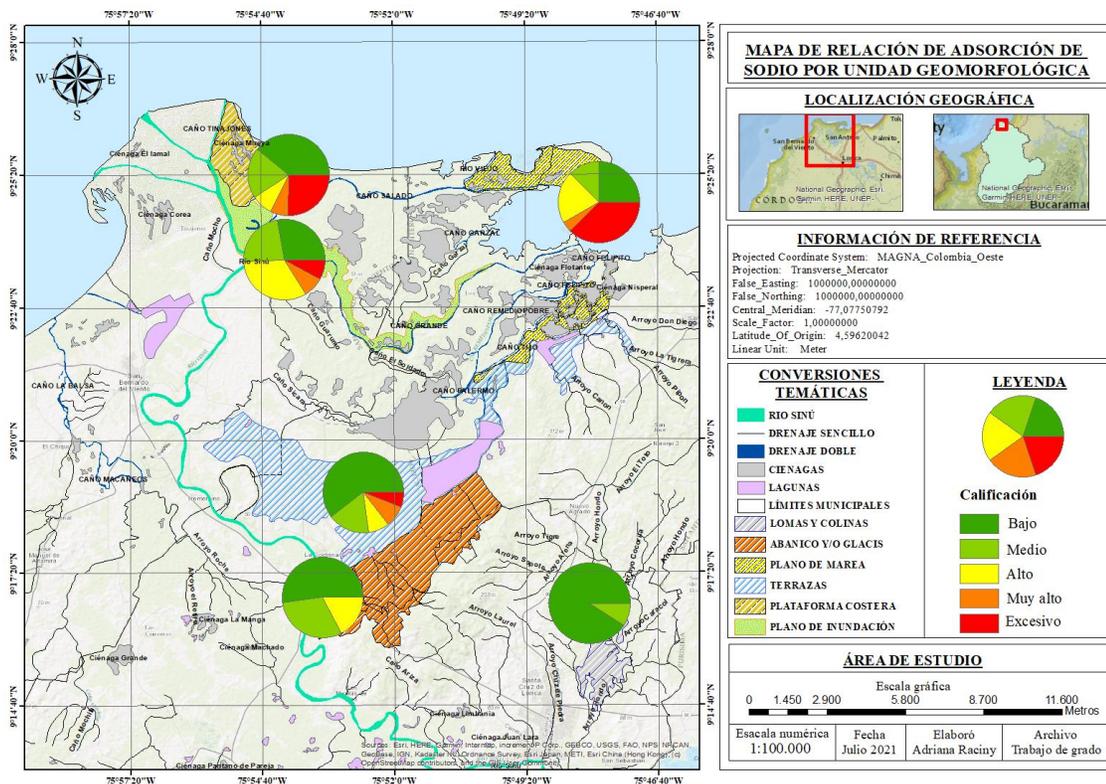


Figura 4. Relación de adsorción de sodio (SAR) por unidad geomorfológica en ambas temporadas climáticas.

Fuente: Elaboración propia

Con la clasificación de Alekin se calculó el porcentaje del tipo de agua predominante en cada geomorfología (Figura 5 y Tabla 4). Así, abanico y/o glacis, plano de inundación,



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



plano de marea, plataforma costera y terraza, mostraron una composición de aguas cloruradas sódicas con un 43,5%, 69,8%, 58,3%, 66,1% y 39,8% respectivamente, donde normalmente este tipo de aguas se asocia a altas salinidades, ya que los iones cloruro y sodio forman sales de solubilidad muy elevada y difíciles de precipitar, lo cual genera un efecto perjudicial para las plantas, debido a que tienden a impermeabilizar los suelos.

En la unidad geomorfológica de lomas y colinas una gran cantidad de sus muestras fueron bicarbonatada cálcica con un 27,2%. Esta clasificación puede estar indicando presencia de aguas con menor salinidad, puesto que su composición es adquirida principalmente de la iluviación del CO₂ de la lluvia y del suelo. La geomorfología de terrazas, aunque su tipo de agua predominante fue clorurada sódica, detrás de ella estuvo muy cerca las aguas bicarbonatadas magnésica con un 38,6%, reflejando posibles procesos de intercambio iónico.



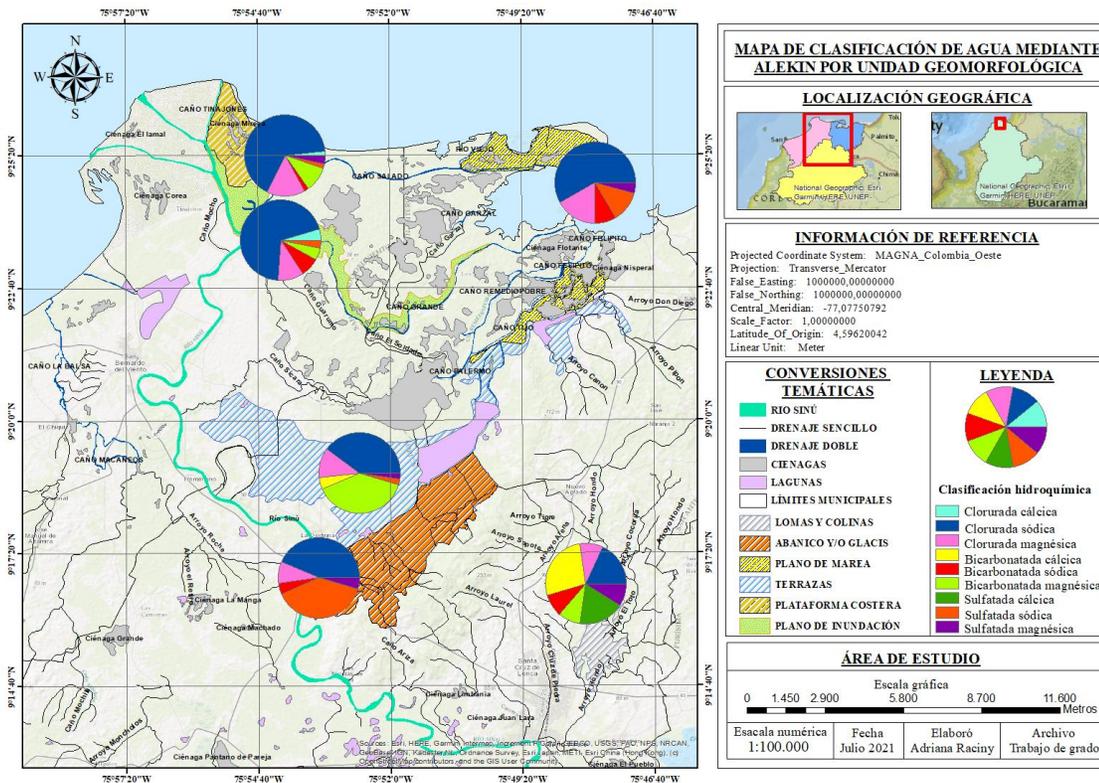


Figura 5. Clasificación de aguas mediante Alekin por unidad geomorfológica en ambas temporadas climáticas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Clasificación de Alekin según la geomorfología.

Clasificación de Alekin	Abanico y/o glacis	Lomas y colinas	Plano de inundación	Plano de marea	Plataforma costera	Terraza
Clorurada cálcica	--	--	4,3%	--	1,7%	--
Clorurada sódica	43,5%	18,2%	69,8%	58,3%	66,1%	39,8%
Clorurada magnésica	8,5%	9,1%	10,5%	16,7%	15,3%	12,0%
Bicarbonatada cálcica	--	27,2%	--	--	--	4,8%



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Bicarbonatada sódica	4,3%	9,1%	7,4%	8,3%	1,7%	--
Bicarbonatada magnésica	--	9,1%	4,9%	--	10,2%	38,6%
Sulfatada cálcica	--	18,2%	--	--	--	--
Sulfatada sódica	39,2%	--	3,1%	12,5%	1,7%	2,4%
Sulfatada magnésica	4,3%	9,1%	--	4,2%	3,4%	2,4%

Fuente: Elaboración propia.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS

6.2.1 Diagrama de Gibbs

De las Figura 6 y 8, se pudo estimar que los procesos predominantes que determinan la evolución de la composición del agua son la evaporación del agua freática y la humedad de la zona no saturada y la interacción agua-roca determinado por el intercambio iónico.

En temporada seca la mayoría de las muestras de las diferentes unidades geomorfológicas indicaron una alta presencia de evaporación, donde las bajas precipitaciones provocaron que el agua restante se concentrara, conduciendo a la precipitación y la deposición de evaporados que eventualmente son lixiviados a la zona saturada. Esto se espera ya que, la evaporación incrementa las concentraciones de los iones disueltos derivados del intemperismo químico, provocando una mayor salinidad de las aguas freáticas someras. Recordando que la zona de estudio posee un clima cálido subhúmedo-seco (Bustamante y Cantero 2008), es de esperarse que los procesos químicos del agua se vean influenciados por la evaporación. De igual forma, las actividades antrópicas también influyen en el proceso de evaporación, incrementando las concentraciones de Na^+ y Cl^- y, por consiguiente, los sólidos disueltos totales (SDT) (Hem 1989). En este caso, existen áreas en la geomorfología de plano de inundación



donde hay influencia de cultivos y por ende manejo de fertilizantes que pueden estar aumentando las concentraciones de estos iones.

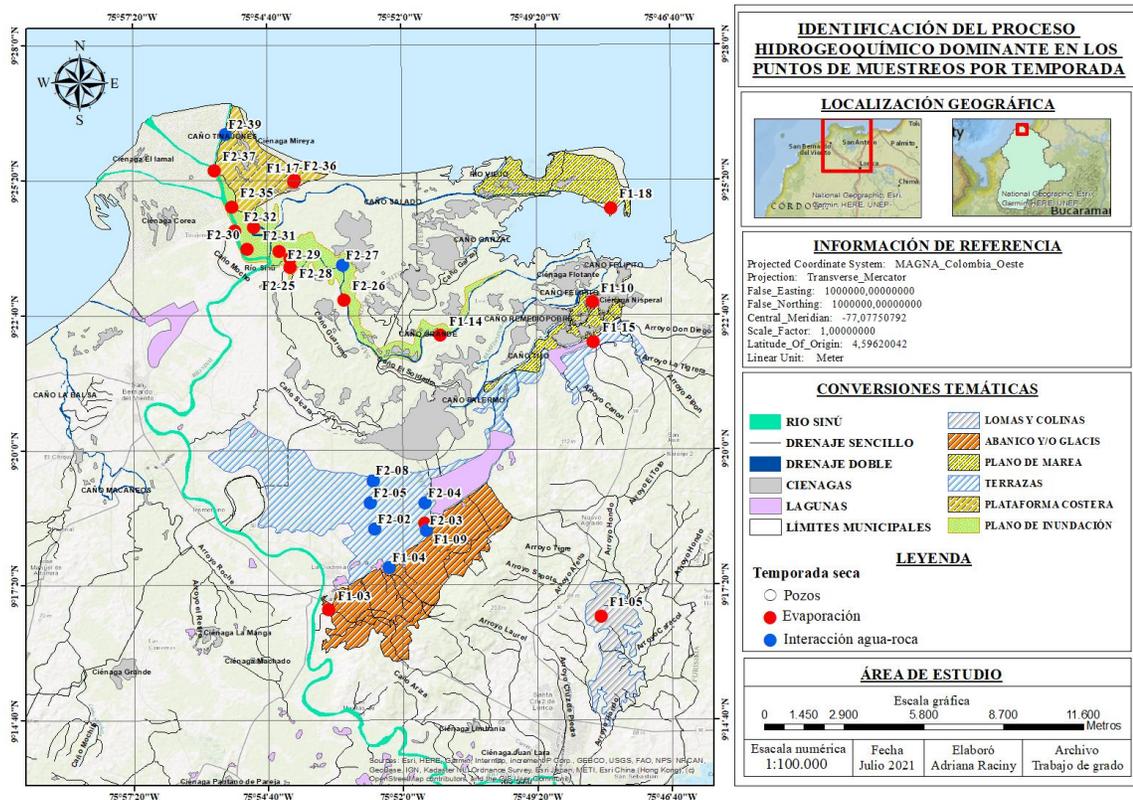


Figura 6. Identificación del proceso hidrogeoquímico dominante en cada punto de muestreo- temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.

En temporada húmeda siguió dominando el proceso de evaporación, no obstante, la interacción agua-roca/suelo ejerce una influencia muy marcada debido a los procesos de disolución de minerales e intercambio iónico. Esto puede llevarse a cabo, debido a que en esta temporada climáticas la dilución de material geológico es mucho mayor.



"VIGILADA MINEUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

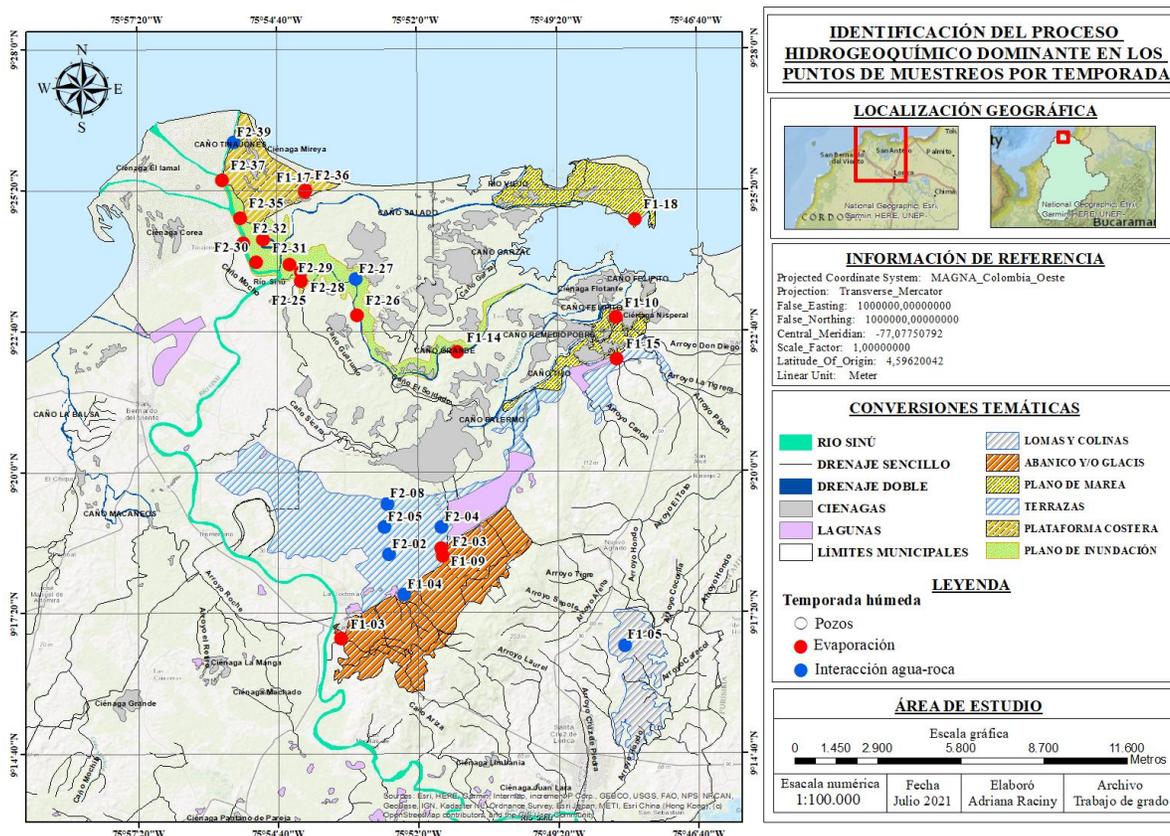


Figura 7. Identificación del proceso hidrogeoquímico dominante en cada punto de muestreo- temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

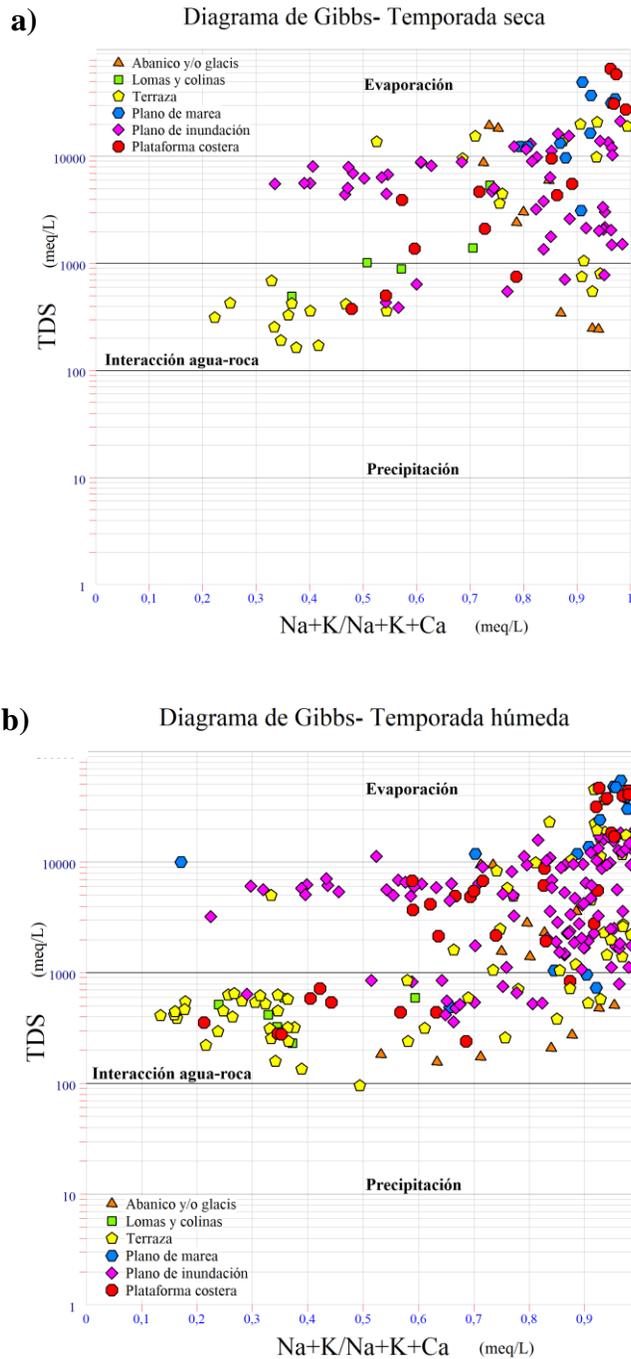


Figura 8. Diagrama de Gibbs. a) Temporada seca. b) Temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.



6.2.2 Diagramas binarios

La relación de $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3 - SO_4^{2-})$ vs $(Na^+ + K^+ - Cl^-)$ ha sido ampliamente utilizado para analizar el posible papel del intercambio iónico en las aguas subterráneas. Las proporciones calculadas para las muestras de agua deben caer en una línea con una pendiente de -1,0 si el intercambio catiónico es el proceso dominante (Li et al. 2018). En este caso, de forma general para la mayoría de las muestras la pendiente fue de -0,88 indicando que el intercambio de cationes es un proceso importante de control de la composición hidroquímica del agua freática, como se muestra en la Figura 9. Por otro lado, se evidenció que hubo algunos puntos dispersos por encima y por debajo de la línea -1,0 sugiriendo un aumento en Ca^{2+} y Mg^{2+} relacionado con la disminución de Na^+ y K^+ o un aumento en Cl^- .

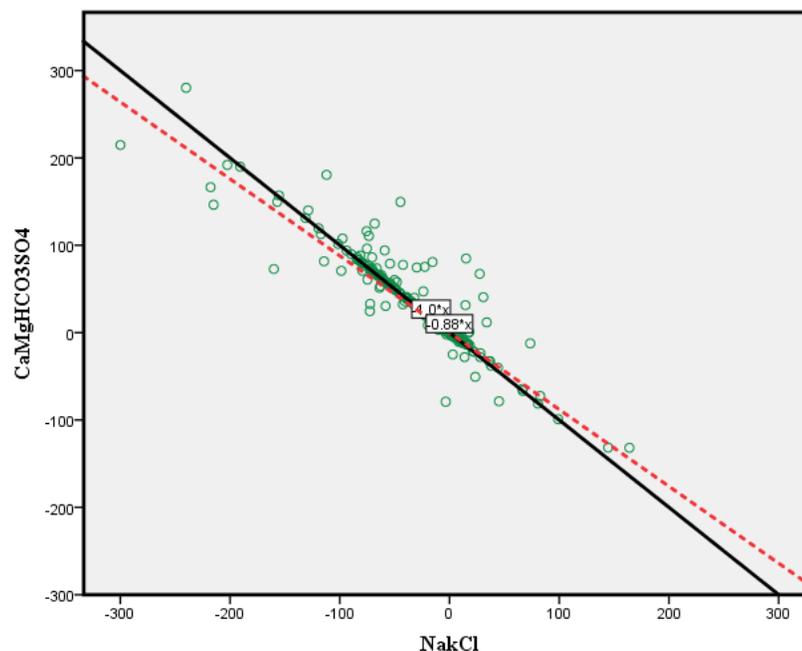


Figura 9. Relación de $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3 - SO_4^{2-})$ vs $(Na^+ + K^+ - Cl^-)$ para determinar el proceso de intercambio iónico.

Fuente: Elaboración propia.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



La relación, $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ se puede utilizar para identificar el proceso de evaporación. La evaporación aumentará la concentración de sólidos disueltos totales en el agua freática. Si la evaporación es el proceso dominante, la relación $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ debe ser constante cuando la CE aumenta (Jankowski y Acworth 1997). Por lo tanto, en la relación ($\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ vs CE) se presentarían las muestras con una tendencia a formar una línea horizontal, que sería un indicador efectivo de concentración por evaporación y evapotranspiración. Para esta ocasión, la mayoría de las muestras principalmente en época seca y en menor proporción en época húmeda, se ubicaron en una línea de tendencia horizontal, como lo indica la Figura 10, lo que sugiere un aumento en las concentraciones de Na^+ y Cl^- causado por el proceso de evaporación. Lo anterior indica una influencia del agua de mar que podría haber aumentado la concentración de sodio en las aguas localizadas en unidades geomorfológicas como plano de marea, plataforma costera y en menor medida en el plano de inundación. En las otras geomorfologías el aumento de estos iones puede estar determinado por las actividades antrópicas.

Los puntos ubicados en la relación $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ superior a 1 pertenecieron en su mayoría a la temporada húmeda e indicaron que el sodio procedió de una reacción de disolución de silicatos, ya que según Meybeck (1987) si la disolución de la halita es responsable del sodio, la relación molar $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ debe ser aproximadamente igual a 1, mientras que una relación superior a 1 se suele interpretar como Na^+ liberado de una reacción de meteorización de silicatos. Por otro lado, aquellos puntos dispuestos en la relación $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ menor a 1 denotaron que el intercambio iónico fue el proceso principal y de igual manera los puntos hacían parte de la temporada húmeda.





"VIGILADA MINERÍA"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías

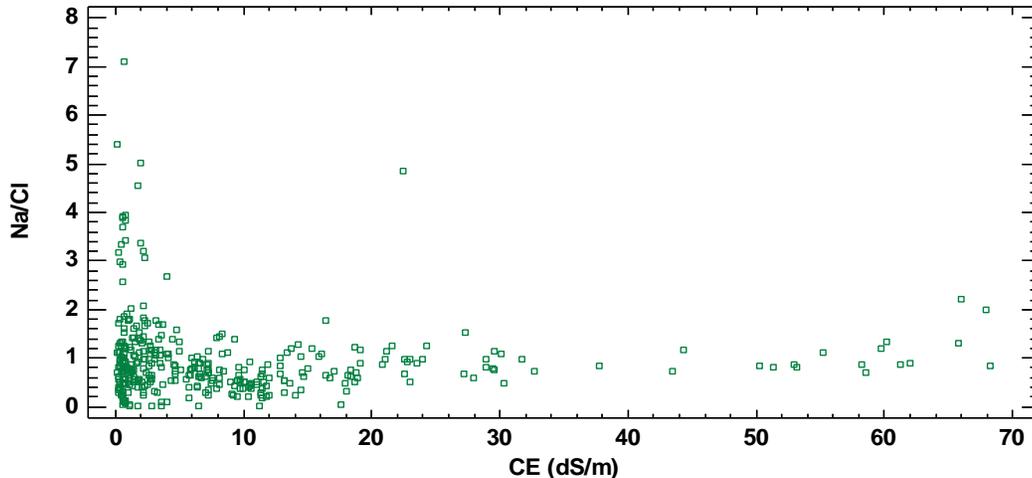


Figura 10. Relación Na^+/Cl^- vs CE para determinar el proceso de evaporación.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 11 de $(\text{Na}+\text{K})$ frente a cationes totales (CT) del área de estudio muestra puntos que caen tanto a lo largo como por encima y por debajo de $(\text{Na}+\text{K}) = 0.76 \text{ CT}$. Esto sugiere que un grupo grande de cationes en el agua freática no presentaron como proceso dominante la disolución de silicatos, sin embargo, en el gráfico también se apreció una cantidad considerable de puntos localizados en la línea de 0,5 indicando que dicho proceso sí es el dominante, puesto que, Datta y Tyagi (1996) observaron que la contribución de cationes puede derivarse de la meteorización del silicato cuando $(\text{Na} + \text{K}) = 0,5 \text{ CT}$. La concentración ligeramente más baja de $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ posiblemente sea provocada por el proceso de intercambio por parte de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} , que podría haber reducido la cantidad de Na^+ en el agua freática.



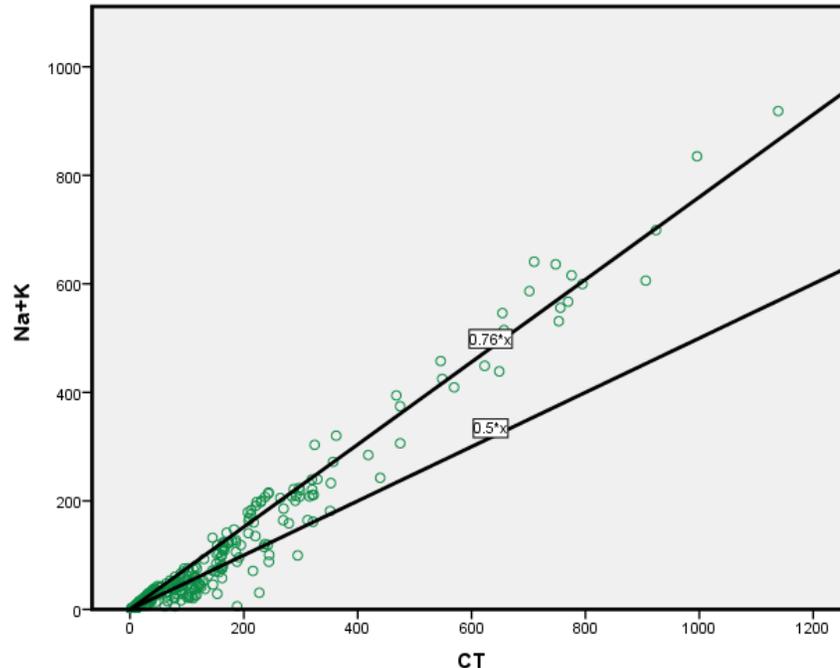


Figura 11. Relación $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs Cationes Totales para determinar el proceso de disolución de silicatos.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las relaciones anteriores, se puede afirmar que los procesos hidrogeoquímicos dominantes fueron intercambio iónico y evaporación, siendo este último el principal con un porcentaje del 58% del número total de pozos, seguido del intercambio iónico con un 42%. Por otra parte, el proceso de disolución de silicatos, aunque no fue dominante, se presentó en ciertos pozos corroborando el proceso de intercambio catiónico (interacción agua-roca) que se relaciona con la disolución de silicatos, y por ende cumpliendo un papel relevante en la hidroquímica del agua freática.

6.3 ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL A TRAVÉS DE DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF

Una vez obtenido y analizado los procesos hidrogeoquímicos presentes en la zona de estudio, se detallaron las características espaciales de todas las muestras de aguas de



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



conformidad con su ubicación geomorfológica, y se identificaron los cambios temporales para todos los pozos que representaron el comportamiento promedio de la calidad del agua para cada unidad geomorfológica.

El diagrama de Piper obtenido para todas las muestras captadas en la zona de estudio, es presentado en la figura 12. Se identificaron cuatro tipos de agua: la primera corresponde al tipo Clorurada sódica (Cl-Na), ubicadas principalmente en las geomorfologías de plano de marea y plataforma costera, zonas cercanas a las franjas costeras en donde la influencia de agua salada marina es importante; y en gran parte del plano de inundación donde se localiza la zona de cultivos. El segundo tipo fue mixto (clorurada y/o sulfatada – magnésica y/o cálcica), localizadas prioritariamente a la geoforma de lomas y colinas y en menor medida en las demás unidades geomorfológicas; esta presenta un aporte de cloruros y sulfatos que pueden provenir de aerosoles marinos arrastrados por los vientos y precipitados mediante lluvia para luego infiltrarse en el suelo; fertilizantes en la zona por presencia de cultivos; así mismo, pueden estar ubicadas en zonas con altos contenidos de minerales constituido de silicatos de calcio y/o magnesio. Un tercer tipo de agua se localizó especialmente en la geoforma de terrazas y se refiere a la bicarbonatada magnésica-cálcica que obedecen a recarga reciente y/o incorporación de sustancias a través del material geológico con el cual están en contacto, ubicadas en zonas donde prevalecen materiales calcáreos y silicatos de magnesio y/o calcio. Por último, se observó un tipo bicarbonatada sódica, donde ocurre un intercambio catiónico y por ende una evolución del agua y estuvo ubicada en una pequeña porción en el plano de inundación.

Las muestras de aguas freáticas someras que se han analizado en la zona de estudio a lo largo del tiempo y espacio han evolucionado y experimentado cambios en su composición química, ya que durante su trayectoria desde la zona de recarga hasta la zona de descarga ocurrieron reacciones con los distintos componentes de la matriz geológica del área. Así, las aguas tuvieron varias trayectorias de reacción. Una primera



trayectoria parte de las zonas de recarga a una posible presencia de procesos de intercambio iónico. En la segunda trayectoria, la presencia de aguas bicarbonatada cálcica en zonas altas cercanas a la zona de recarga, evolucionaron a la disolución de minerales, principalmente de silicatos, y que pasa finalmente a una posible mezcla con aguas marinas. La tercera trayectoria va directamente al aumento de aguas cloruradas sódicas, ya sea por la influencia del agua de mar o por las actividades antrópicas.

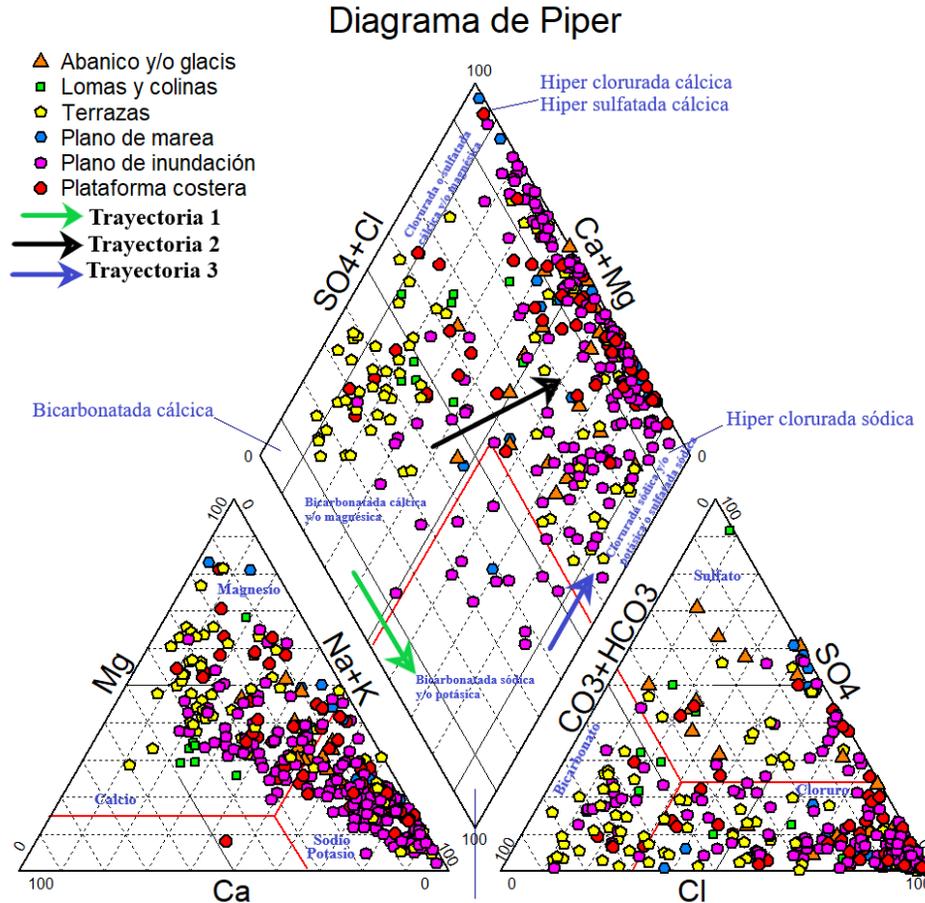


Figura 12. Diagrama de Piper por unidad geomorfológica.

Fuente: Elaboración propia.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Con la Figura 13, también se identificaron los tipos de agua pertenecientes a cada geomorfología en ambas temporadas climáticas. Para las unidades geomorfológicas de plano de marea, plano de inundación y plataforma costera en ambas épocas fue visible la evolución en cuanto a los constituyentes mayoritarios del agua freática, ya que la mayoría de las muestras se localizaron a lo largo del flujo intermedio y flujo regional, que indican aguas compuestas de aniones de sulfato a cloruro, y cationes de magnesio a sodio. Para las geomorfologías de abanico y/o glacis, lomas y colinas y terraza la evolución del agua freática estuvo determinada por flujos locales e inicios de flujos intermedios, puesto que las concentraciones de Cl^- y SO_4^{2-} en estas muestras de agua fueron muy bajas, denotando que las concentraciones de HCO_3^- fueron más altas.

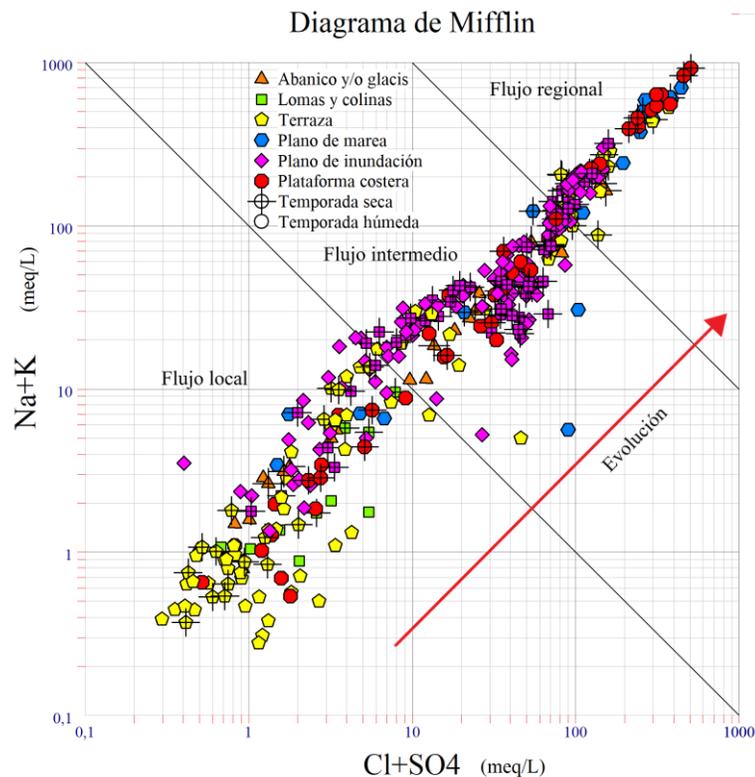


Figura 13. Diagrama de Mifflin.

Fuente: Elaboración propia.



De manera más detallada, para la geomorfología de abanico y/o glacis (Figura 14) se obtuvo que para el pozo F1-03; en temporada seca las muestras de agua eran de tipo clorurada magnésica a clorurada sódica, y en temporada húmeda las muestras tuvieron un comportamiento entre clorurada magnésica a sulfatada sódica y clorurada sódica. Para el pozo F1-04, en temporada seca las aguas eran de tipo sulfatada sódica a clorurada magnésica, y en temporada húmeda hubo variaciones hacia bicarbonatada magnésica, sulfatada sódica y clorurada sódica.

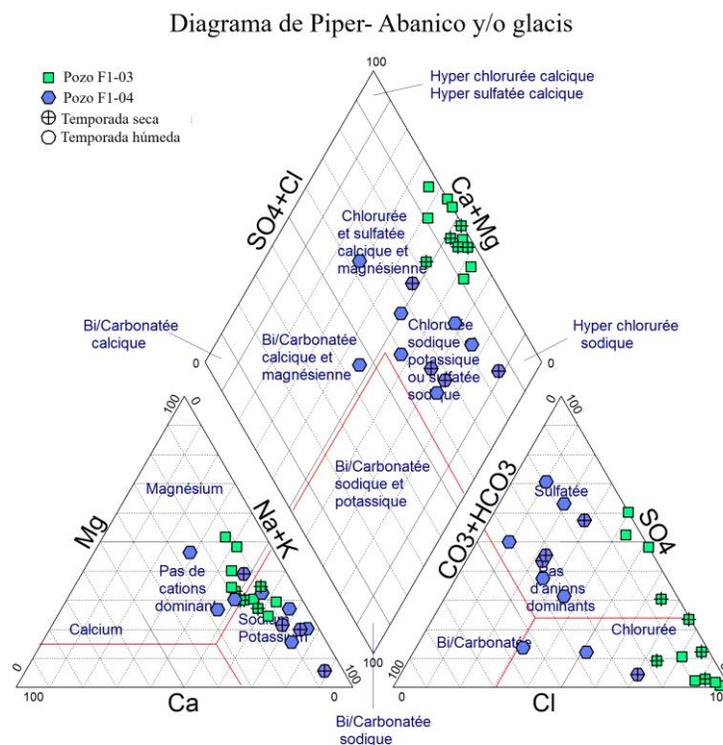


Figura 14. Diagrama de Piper- Abanico y/o glacis.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los diagramas de Stiff de la Figura 15 se corroboró la presencia de los tipos de agua clorurada sódica y sulfatada sódica que se mostraron en los diagramas de Piper.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



no obstante, se apreció una gran diferencia en cuanto a las concentraciones de cada una de ellas, donde el pozo F1-03 presentó los valores más altos para cada tipo de agua (65mEq l^{-1} – 90mEq l^{-1}) y el pozo F1-04 los más bajos (1.5mEq l^{-1} – 5.0mEq l^{-1}). Esta diferencia de concentraciones se pudo deber a los procesos hidrogeoquímicos, especialmente el de evaporación que ocurre en el pozo F1-03, donde en temporada seca el agua freática disminuye su volumen haciendo que las sales disueltas queden concentradas cada vez más. (Ver anexo A)

A pesar de pertenecer a la misma geomorfología estos pozos se comportan diferentes, ya que el pozo F1-03 se ubica más cerca al río Sinú y el pozo F1-04 se sitúa cerca de una laguna. Espacialmente se identificaron diferentes procesos hidrogeoquímicos que dan lugar a la evolución del agua: el pozo F1-03 presentó evaporación, disolución de silicatos e intercambio iónico, y el pozo F1-04, intercambio iónico y disolución de silicatos.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

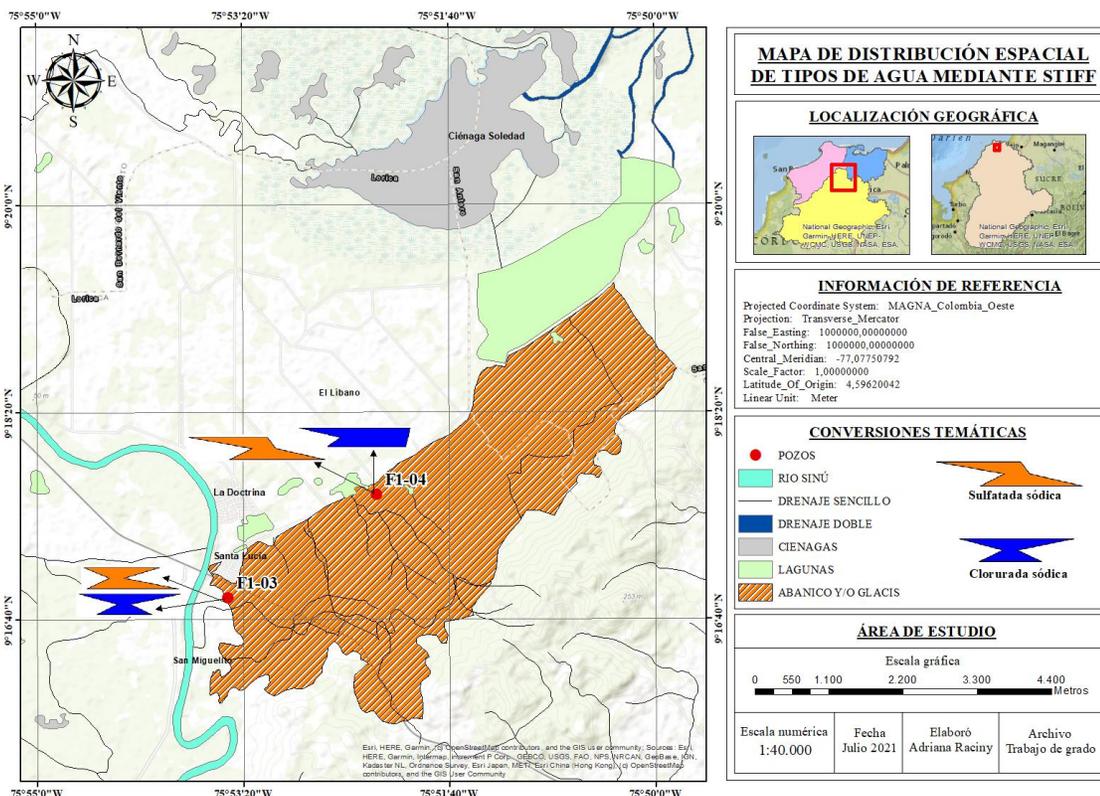


Figura 15. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Abanico y/o glacia.

Fuente: Elaboración propia.

Para la geomorfología de lomas y colinas en la Figura 16, el pozo F1-05 en temporada seca presentó aguas de tipo sulfatada magnésica a clorurada sódica, y en temporada húmeda las aguas migraron hacia tipos bicarbonatada cálcica, sulfatada cálcica, sulfatada magnésica y clorurada magnésica. En esta última temporada se evidencia que el magnesio y el calcio, son los cationes predominantes en la caracterización del agua. De ahí que el agua catiónicamente evolucione desde el tipo cálcico, pasando al magnésico, para posteriormente finalizar en sódico. En cuanto a su evolución aniónica, lo hace de bicarbonatadas a sulfatadas, para finalizar en cloruradas.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

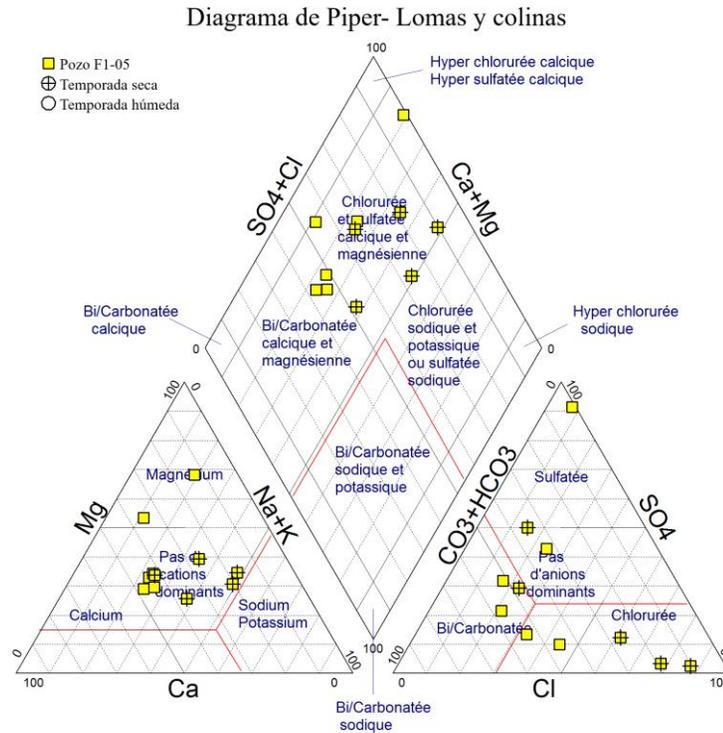


Figura 16. Diagrama de Piper- Lomas y colinas.

Fuente: Elaboración propia.

Los tipos de agua dominante según los diagramas de Stiff en la Figura 17 fueron bicarbonatada cálcica, sulfatada cálcica y clorurada sódica, evidenciando el proceso de intercambio iónico (catiónico y aniónico) y evolución del agua. La abundancia del catión calcio puede ser influenciado por la litología de materiales calcáreos presentes en la formación de lomas y colinas. Por otra parte, las concentraciones en el pozo F1-05 fueron muy bajas en los diferentes tipos de agua, no sobrepasando los 14mEq l^{-1} . (Ver anexo A)



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1

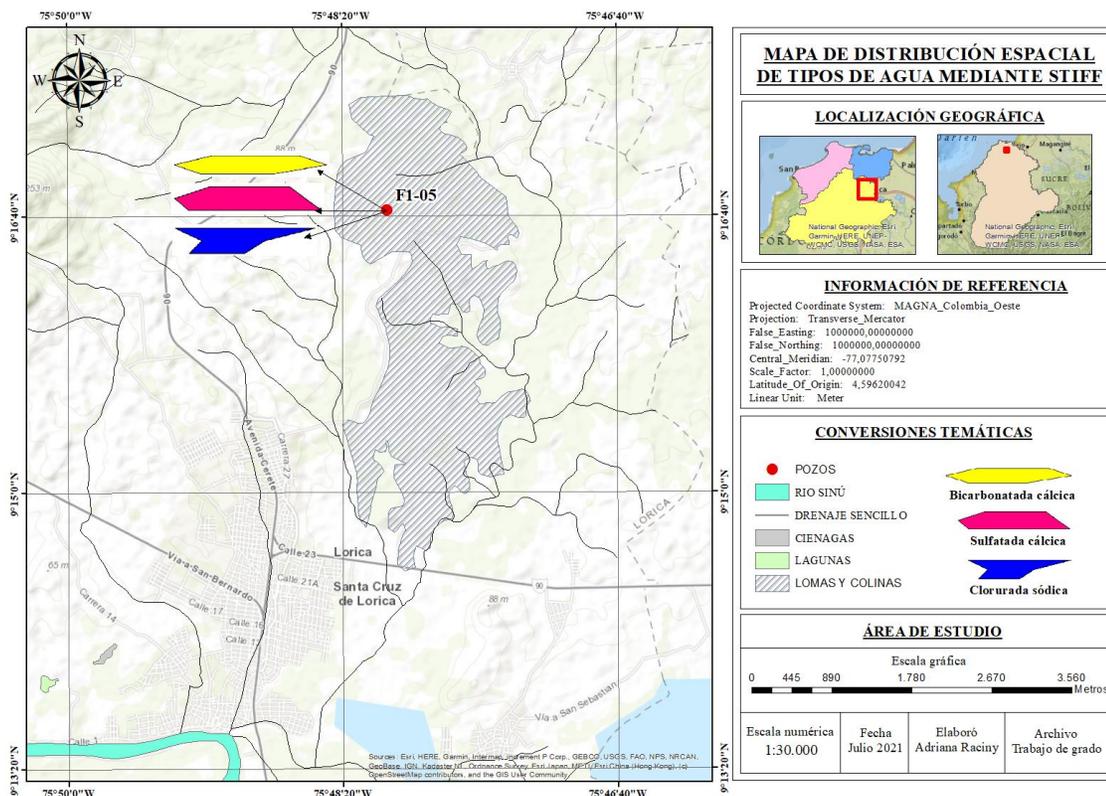


Figura 17. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Lomas y colinas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 de plano de marea, el tipo de agua prevalente en época seca, para ambos pozos, fue clorurada sódica, y en época húmeda para el pozo F1-10 varió hacia diversos tipos como bicarbonatada magnésica, bicarbonatada sódica, sulfatada magnésica, sulfatada sódica, clorurada magnésica y clorurada sódica; en el pozo F1-18 las aguas en época húmeda fueron de tipos clorurada magnésica, sulfatada sódica y clorurada sódica.

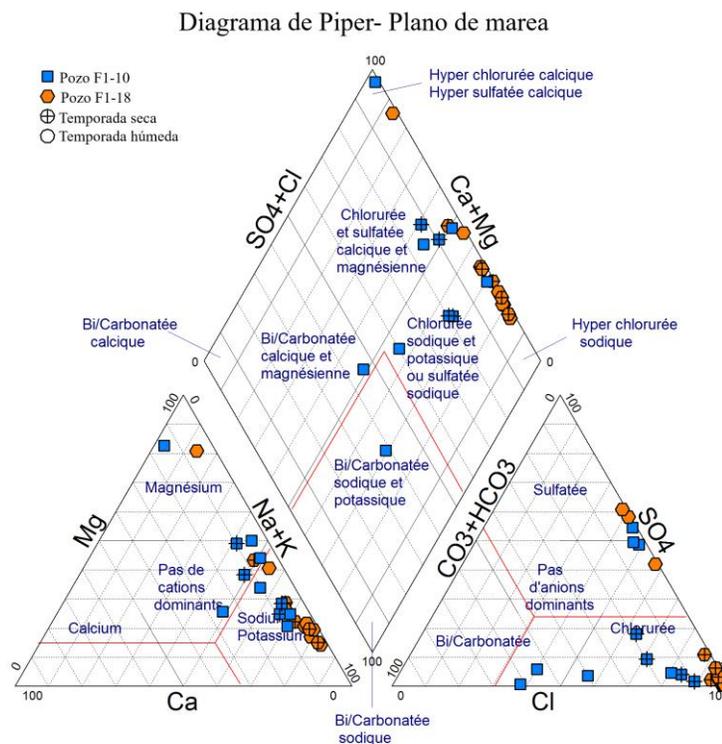


Figura 18. Diagrama de Piper- Plano de marea.

Fuente: Elaboración propia.

Con el empleo de la Figura 19 se ratificaron los principales tipos de agua que presentaron ambos pozos. Las concentraciones para las aguas cloruradas fueron muy altas con rangos desde 100mEq^{-1} hasta 600mEq^{-1} , donde la ubicación es un factor determinante, ya que el primer pozo (F1-10) se ubicó cerca de la ciénaga Nisperal donde los procesos hidrogeoquímicos de evaporación, disolución de silicatos e intercambio iónico condicionaron altas concentraciones, en cambio, el segundo pozo (F1-18) se localizó continuo a la Bahía de Cispatá, en el que la intrusión marina y la evaporación pueden estar incidiendo en un aumento desmesurado de las concentraciones. (Ver anexo A)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

La localización espacial de estos pozos también justifica la variabilidad de tipos de agua en temporada húmeda, ya que el pozo F1-10 al estar situado cerca de la ciénaga Nisperal y con el aumento de las precipitaciones se genera mayor aporte de los diferentes iones logrando un alza en las concentraciones.

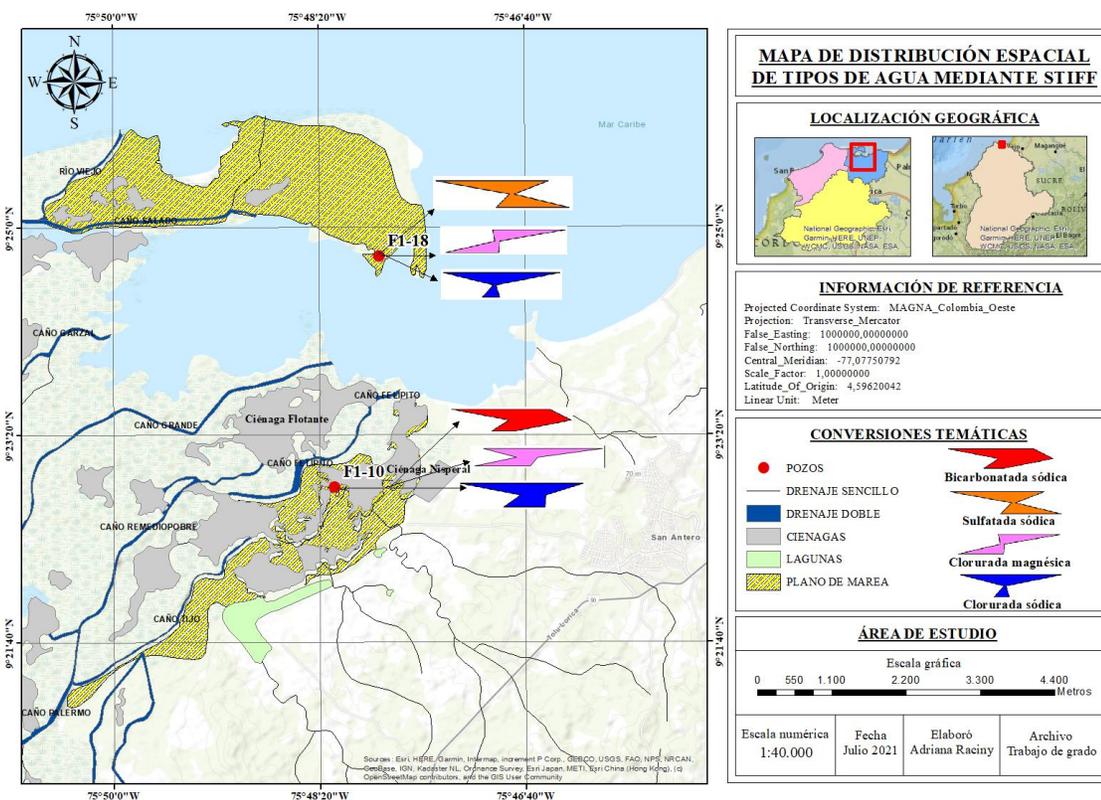


Figura 19. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Plano de marea.

Fuente: Elaboración propia.

En la plataforma costera (Figura 20); los pozos F1-17 y F2-36 en ambas temporadas presentaron tipo de agua clorurada sódica. Los pozos F2-37 y F2-39 en temporada seca tuvieron aguas desde el tipo clorurada magnésica a clorurada sódica, y en temporada húmeda las aguas variaron de bicarbonatada magnésica a clorurada magnésica y clorurada sódica.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

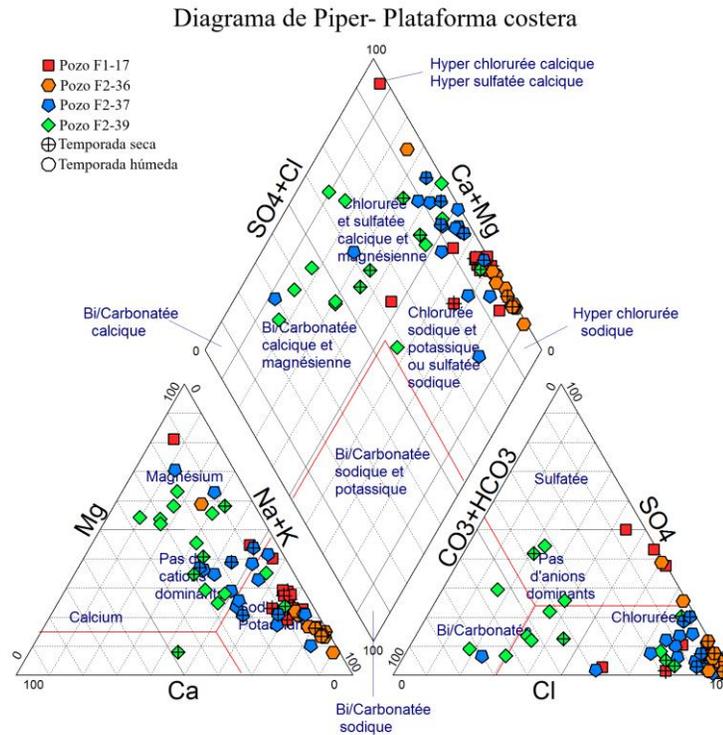


Figura 20. Diagrama de Piper- Plataforma costera.

Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia en el mapa de distribución espacial de tipos de agua mediante diagramas de Stiff en la Figura 21, las aguas más predominantes fueron clorurada sódica, clorurada magnésica y bicarbonatada magnésica. Las mayores concentraciones se localizaron en los pozos F1-17 y F2-36 con valores entre $100\text{mEq l}^{-1} - 500\text{mEq l}^{-1}$, los cuales se encuentran muy cerca de la línea de costa. Este comportamiento está sujeto al proceso hidrogeológico de evaporación y su ubicación geográfica, donde la intrusión marina puede estar influyendo en las altas concentraciones de los iones Cl^- , Na^+ y Mg^{2+} .

Los pozos F2-37 y F2-39 tuvieron valores de concentraciones intermedias a relativamente altas, pero mucho menor en comparación con los dos pozos descritos



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



anteriormente, ya que su dinámica se ve afectada por su posición espacial la cual está próxima al río Sinú y a los procesos de intercambio iónico y evaporación (Ver anexo A). En general, las aguas de tipo clorurada están presentes a lo largo de la geomorfología de plataforma costera, ya que es una zona que está en continuo contacto con agua de mar.

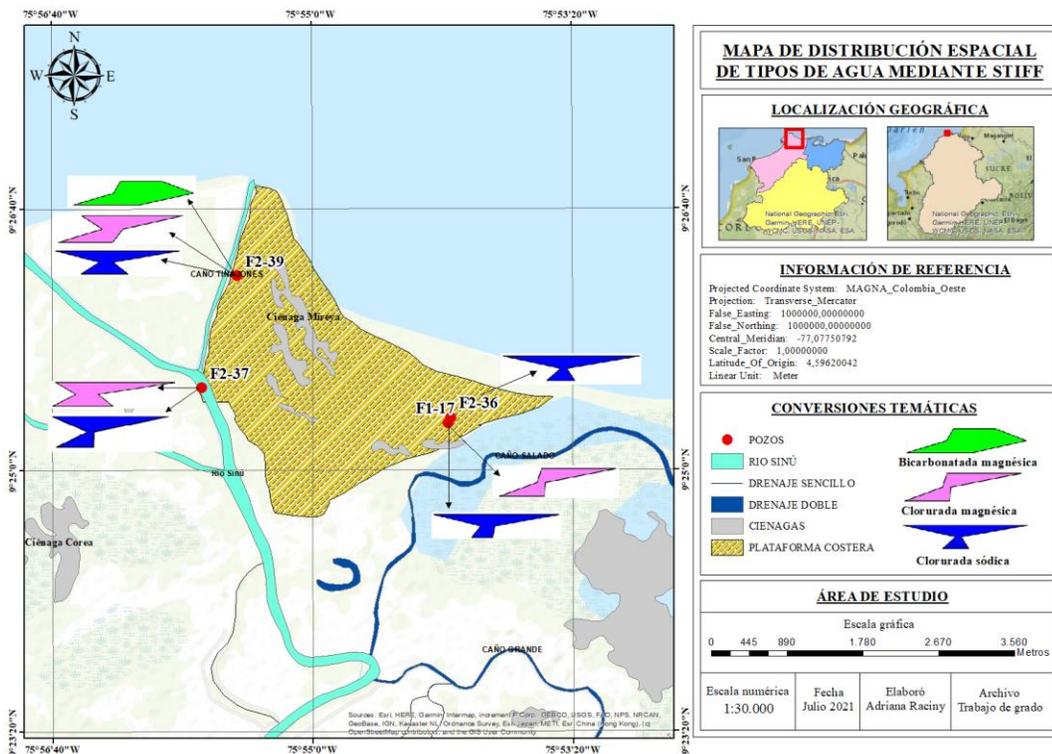


Figura 21. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Plataforma costera.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la geomorfología de terrazas en la Figura 22, los pozos F2-02, F2-04, F2-05 y F2-08 en la temporada seca y húmeda el tipo de agua predominante fue bicarbonatada magnésica, y en menor cantidad bicarbonatada cálcica. Estas aguas obedecen a recarga reciente e incorporación de sustancias a través del material geológico con el cual están en contacto. Lo anterior se relaciona con la litología de sedimentos mixtos con materiales calcáreos presentes en las terrazas, lo cual explica la presencia de altos

contenidos de carbonatos e igualmente el proceso de intercambio iónico corrobora este comportamiento. Para los pozos F1-09 y F2-03, tanto en temporada seca como húmeda el tipo de agua fue clorurada sódica. Este tipo de aguas no se puede asociar a intrusión marina, ya que la ubicación de los pozos está alejada del mar, no obstante, se presentan procesos de evaporación e intercambio iónico que determinaron su condición. Por otra parte, el pozo F1-15, en ambas temporadas el tipo de agua fue clorurada magnésica a clorurada sódica, donde su anión se mantuvo a lo largo de los años.

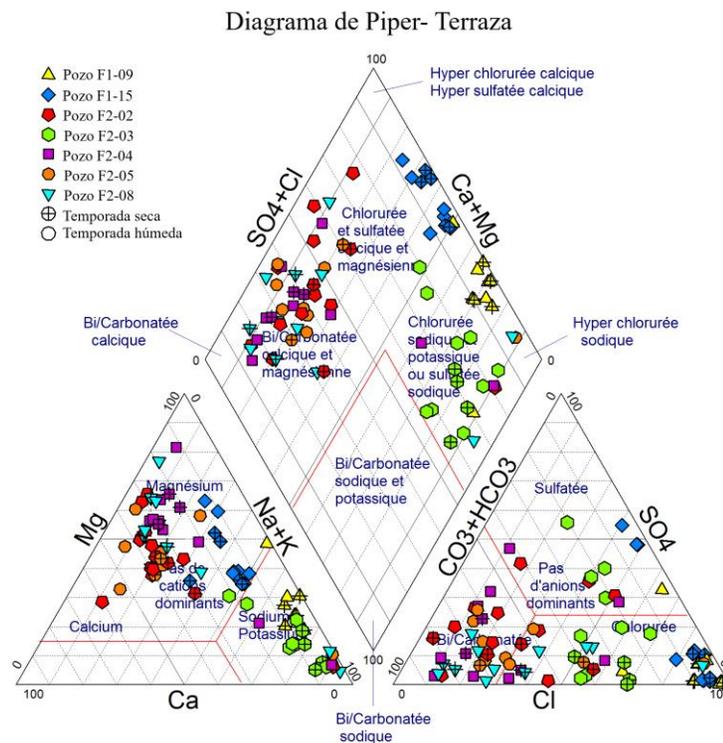


Figura 22. Diagrama de Piper- Terraza.

Fuente: Elaboración propia.

De manera general, las concentraciones de los pozos F2-02, F2-04, F2-05 y F2-08 son muy bajas con rangos desde $2,0\text{mEq l}^{-1}$ hasta $8,0\text{mEq l}^{-1}$ en los distintos tipos de agua.

donde su litología de materiales calcáreos y el intercambio iónico explican el predominio de los iones HCO_3^- , Mg^{+2} y Ca^{+2} . En las muestras de los pozos F1-09 y F1-15, las concentraciones fueron entre 30mEq l^{-1} hasta 300mEq l^{-1} donde se le atribuye este comportamiento al proceso de evaporación; en comparación a las del pozo F2-03 que sólo tiene valores de 14mEq l^{-1} (Ver anexo A).

Espacialmente en la Figura 23, las aguas de tipo bicarbonatada se sitúan más al sur y en cercanía al río Sinú.

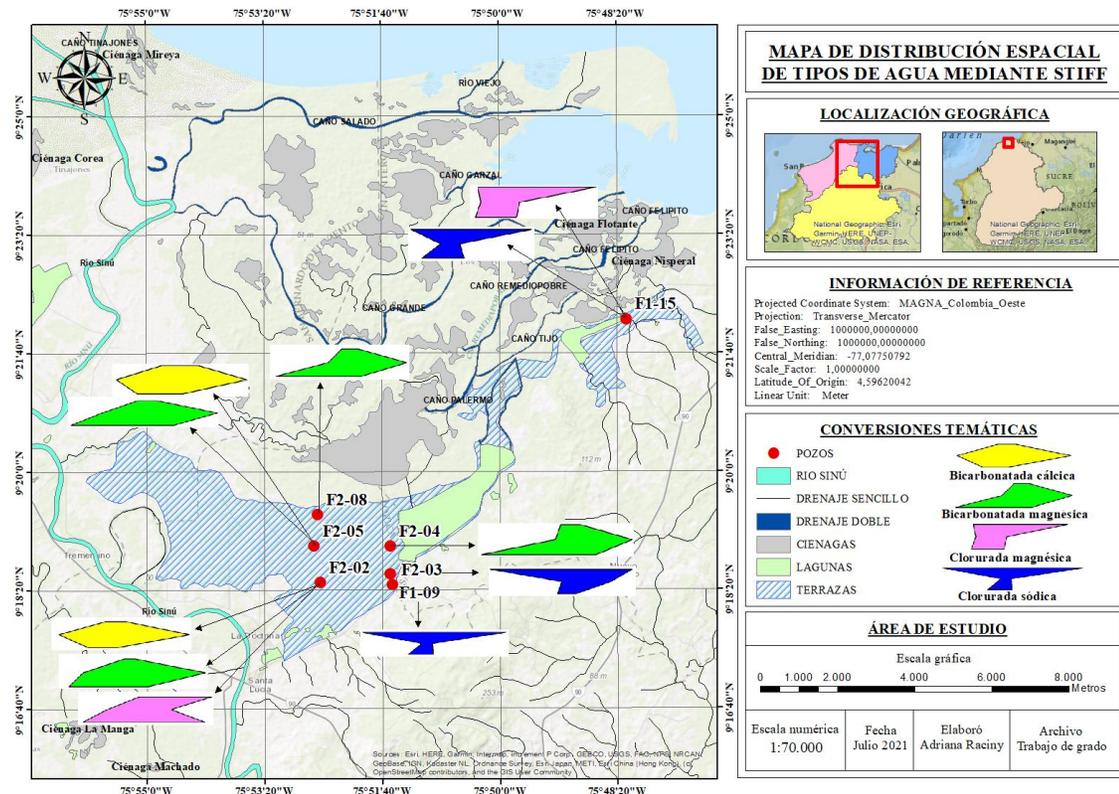


Figura 23. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Terraza.

Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de la Figura 24 y Figura 25, en el plano de inundación gran parte de las muestras de los pozos F1-14, F2-25, F2-26, F2-30, F2-31, F2-35 tuvieron aguas de tipo



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



clorurada sódica en ambas temporadas, las concentraciones fueron altas a excepción de los pozos F2-30 y F2-35 que fueron mucho más bajas. La conducta en los pozos F2-30 y F2-35 se asocia a su ubicación espacial, ya que están contiguos al río Sinú. En los pozos F2-28 y F2-32 las aguas fueron cloruradas en ambas temporadas y evolucionaron catiónicamente desde el tipo cálcica, pasando por magnésica, hasta sódica; las concentraciones en los diferentes tipos de agua fueron constante y medianamente altas, asociándose al proceso de evaporación, puesto que genera aumento en las concentraciones de los iones formados por la meteorización química, lo que conduce a una alta salinidad; y al proceso de intercambio iónico donde ocurre cambios de cationes monovalentes por cationes divalentes.

El pozo F2-27, en temporada seca comprendió el tipo de agua clorurada sódica y en temporada húmeda bicarbonatada magnésica, seguido de bicarbonatada sódica hasta clorurada sódica, en el que las concentraciones de las aguas bicarbonatadas fueron muy bajas en comparación a las cloruradas. Esta discrepancia puede deberse a los procesos de intercambio iónico y disolución de silicatos que genera un aumento de concentración por el aporte principalmente de Na^{2+} . El pozo F2-29, en ambas temporadas tuvo variación de bicarbonatada sódica a clorurada sódica, con concentraciones que no sobrepasaron los 25mEq l^{-1} , a pesar de ello, la mitad de las muestras de tipo clorurada sódica tenían concentraciones de hasta 300mEq l^{-1} y las otras no excedían los 20mEq l^{-1} , esto debido a que los valores más altos se dieron en temporada seca donde el proceso de evaporación es mucho mayor y las más bajas en temporada húmeda (Ver anexo A).



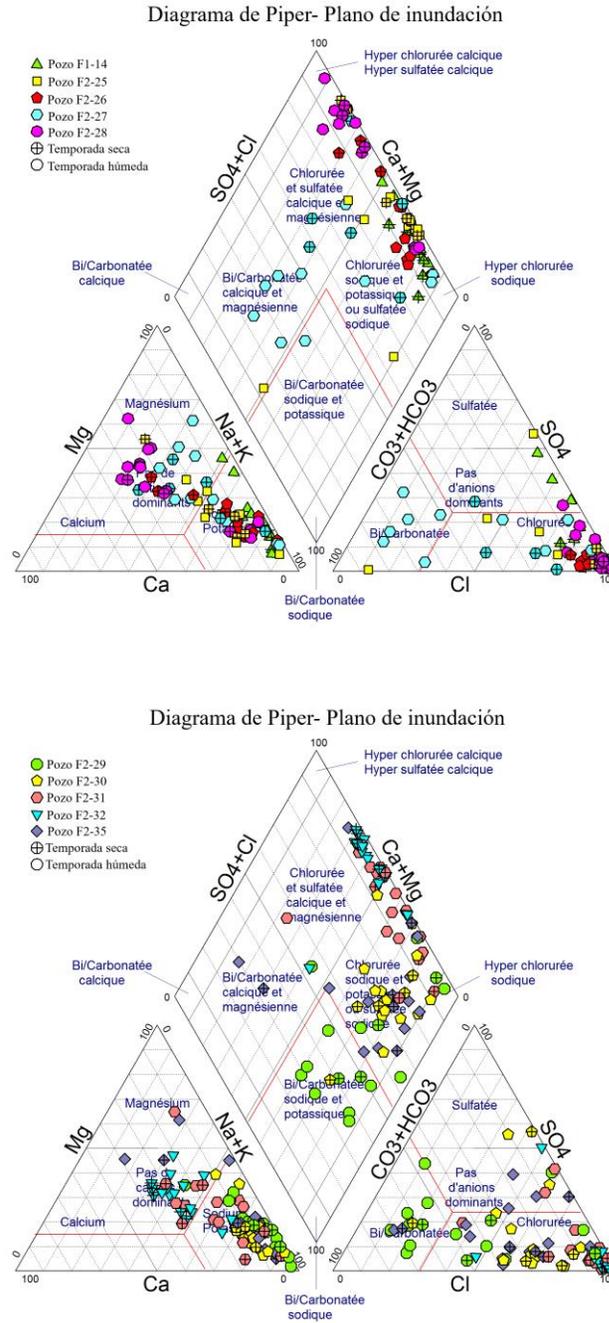


Figura 24. Diagrama de Piper- Plano de inundación.

Fuente: Elaboración propia.

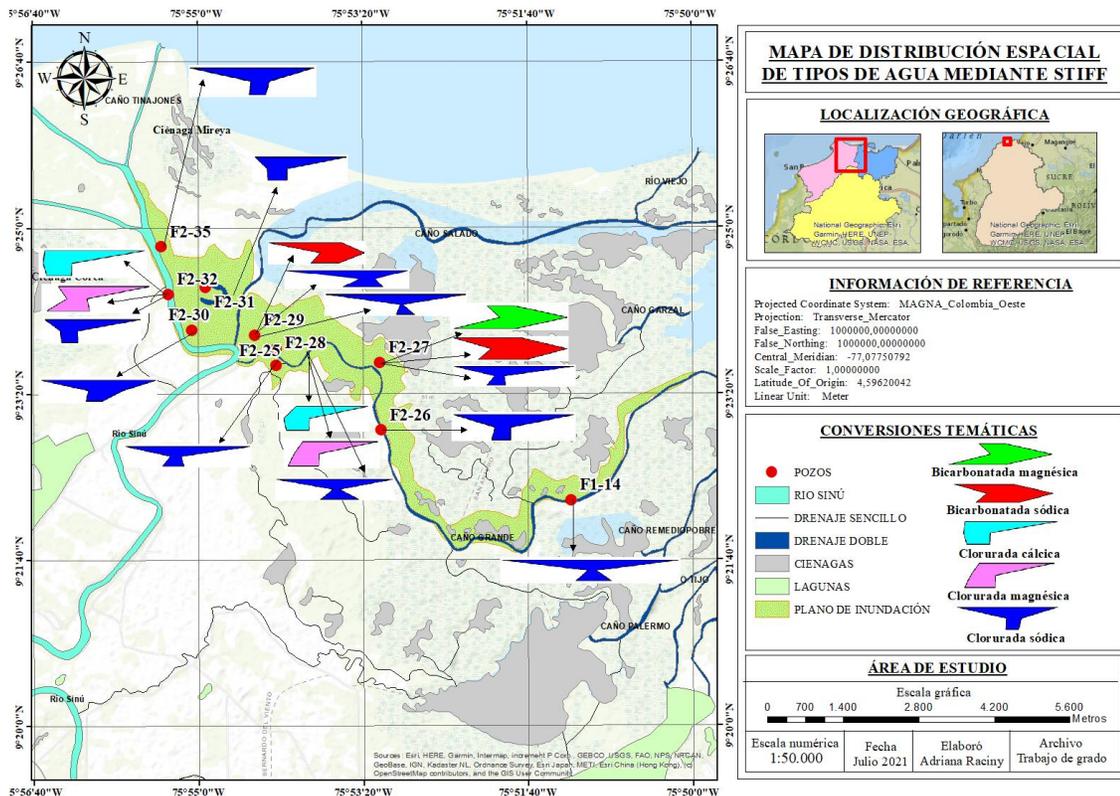


Figura 25. Mapa de distribución espacial mediante Stiff- Plano de inundación.

Fuente: Elaboración propia.

Con la clasificación de Alekin se estableció que los iones Na^+ y Cl^- son los más abundantes en las aguas freáticas someras de la zona. Una fuente importante de los iones sodio y cloruro puede estar constituida por los aportes de agua del mar Caribe, tanto por fenómenos de intrusión; así como, por la infiltración del agua de lluvia que contiene dichos iones, principalmente en las unidades geomorfológicas de plano de marea, plataforma costera y un área de plano de inundación. La localización espacial de la zona objeto permite intuir que la salinidad es principalmente de origen natural, como la vocación salina del área, puesto que es una zona de acumulación próxima al mar, con suelos derivados de sedimentos fluvio-lacustre finos a medio. Por esta razón, se puede



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



establecer que posiblemente una parte de los altos contenidos de cloruro se derivan de la intrusión marina, ya que el agua salada contiene aproximadamente 35.000 mg/l de sólidos disueltos; de los cuales 19.000 mg/l es cloruro (Lyles 2000), y en el estudio de Scheidleder (2003) afirmó que la principal causa del alto contenido de cloruro (Cl^-) en los acuíferos costeros probablemente se atribuya a la intrusión de agua salada.

Las correlaciones de Na^+/Cl^- son normalmente bajas en pozos con intrusión de agua de mar con respecto al propio mar; por lo cual, según Bear (1999) la relación de Na^+/Cl^- menor a 0,86 puede indicar pozos afectados por intrusión marina, y las proporciones mayores que 1 son características de las aguas freáticas contaminadas por actividades antrópicas. En este trabajo, la correlación de Na^+/Cl^- en los pozos F1-18, F1-17, F2-36, F2-37 y F2-39 con aguas cloruradas sódicas de las geomorfologías de plano de marea y plataforma costera en su mayoría fueron menor a 0,86, señalando la presencia del proceso mencionado anteriormente. En el plano de inundación una gran cantidad de muestras de aguas de los pozos F2-29, F2-30 y F2-35 mostraron una proporción de Na^+/Cl^- mayor a 1; de igual manera, en los pozos F1-09 y F2-03 de la geomorfología de terrazas y el pozo F1-04 de abanico y/o glacis, también manifestaron dicho valor; demostrando la influencia de las actividades antrópicas como las deficientes técnicas agropecuarias, en el aumento de los iones sodio y cloruro que contribuyen en el proceso de salinidad.

La relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ también se puede utilizar para identificar la intrusión salina. Según Custodio y Llamas (1983), el ion cloruro es dominante en agua de mar, mientras que solamente se encuentra en pequeñas cantidades en agua dulce. Mientras tanto, el ion bicarbonato usualmente está en grandes cantidades en aguas categorizadas como dulces, mientras que es difícil encontrar valores significativos en el agua de mar. Para esta relación se determinó que en ambas temporadas la geomorfología de terraza presentó valores menores a 4,4 señalando que esta zona presenta niveles particulares de agua dulce, ya que se encuentra en un rango entre 0,1 a 5,0. En los pozos F2-29, F2-30 y F2-





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



35 del plano de inundación esta relación en las aguas freáticas dio valores inferiores a 4,5 en ambas temporadas; sin embargo, los pozos F1-14, F2-25, F2-26, F2-28, F2-31 y F2-35 de esta misma geoforma presentaron una relación mayor a 20, indicando aguas de mar. El pozo F2-27, en época lluviosa las aguas mostraron valores menores a 5,0 y en época seca fueron superiores a 15, lo que corresponde a aguas de transición entre aguas del río y de mar. En plataforma costera para ambas temporadas las aguas denotaron una relación mayor a 20, característico de aguas de mar.

En esta misma zona de estudio, Combatt et al. (2015) utilizaron esta misma relación como indicador de la intrusión salina, donde obtuvieron que en el periodo lluvioso las localidades L1, L2, L3 y L4 que representan las geomorfología de terraza, plano de inundación, finales del plano inundable y plataforma costera en orden creciente, presentaron valores de 4,57; 16,74; 18,26; 19,45 respectivamente, indicando que solamente en la localidad más alejada a la desembocadura (L1) presenta niveles característicos de agua dulce (0,1 a 5,0) y el resto de localidades (L2 a L4) presentan valores próximos a los de aguas de mar (20 a 50). Para el periodo seco las localidades más próximas a la desembocadura del río Sinú (L3 y L4) presentaron valores Cl/HCO_3 , típicos de aguas de mar (21,7 y 27,7) y las localidades L1 y L2 mostraron valores de 2,7 y 15,6, los que corresponden a aguas dulces y transición entre aguas de río y de mar respectivamente. Esto permite evidenciar que los resultados obtenidos en ambos estudios son muy similares en cuanto al proceso de intrusión salina.

Otros procesos hidrogeoquímicos presentes en la zona que establecen la química de las aguas son evaporación, intercambio de iones y disolución de silicatos. En el diagrama de Gibbs se observó que la presencia de los iones Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- y HCO_3^- provienen principalmente del proceso de evaporación, mucho más en temporada seca con relación a la temporada húmeda. Esto se reafirma con la Figura 10, donde se distingue que la mayoría de las muestras forman una línea con tendencia horizontal denotando que la relación Na^+/Cl^- se mantiene constante a medida que incrementa la conductividad





"VIGILADA MINEUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



eléctrica, y a su vez aumenta la salinidad. En este diagrama de Gibbs, también se identificó que la interacción agua-roca y el material geológico de la zona desempeñan un papel importante en la evolución de la química del agua, especialmente en temporada húmeda. Esto se ratifica con la Figura 9 donde la relación $(Na^+ + K^+ - Cl^-)$ vs $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-})$ arroja una pendiente de -0,88 señalando que el proceso de intercambio es indicador de fenómenos de dilución de material geológico durante época lluviosa. El proceso de disolución de silicatos en este estudio no fue dominante, sin embargo, no se desestima su importancia, ya que ayuda en el intercambio catiónico, cumpliendo un papel en la química de las aguas freáticas.

El empleo de los diagramas de Piper y Stiff permitieron establecer la distribución temporal y espacial del comportamiento de la salinidad en las diferentes muestras tomadas a lo largo de la zona de estudio. Se pudo establecer que, en temporada seca, las concentraciones de las aguas freáticas en su mayoría fueron muy altas con un rango entre $60mEq l^{-1}$ hasta $450mEq l^{-1}$, comprendida principalmente por los tipos de agua clorurada sódica y clorurada magnésica. Las aguas cloruradas cálcicas también tuvieron altas concentraciones con valores entre $100mEq l^{-1}$ a $120mEq l^{-1}$, y las aguas bicarbonatadas sódicas permanecieron en un rango de $15mEq l^{-1}$.

En temporada húmeda, las concentraciones de los tipos de agua bicarbonatada cálcica, bicarbonatada magnésica, bicarbonatada sódica y sulfatada cálcica fueron muy bajas, con rango de $1 mEq l^{-1}$ a $6 mEq l^{-1}$. Las aguas cloruradas sódicas y magnésicas y sulfatadas sódicas reflejaron niveles más altos, donde el primer tipo de agua exhibió concentraciones entre $100mEq l^{-1}$ a $500mEq l^{-1}$; las cloruradas magnésicas entre $100-240mEq l^{-1}$, y las sulfatadas sódicas desde $90mEq l^{-1}$ a $450mEq l^{-1}$.

Los iones cloruro, sodio y magnesio son principalmente los que determinan la salinidad, en las diferentes unidades geomorfológicas. En el plano de inundación y plataforma costera las aguas en ambas temporadas climáticas fueron clasificadas como cloruradas





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



sódicas y en terraza fueron categorizadas principalmente como bicarbonatadas magnésicas en las muestras de aguas freáticas de los pozos F2-02, F2-04, F2-05 y F2-08; a excepción del pozo F2-03 que fue clorurada sódica. Al respecto, Combatt et al (2015) identificaron diferentes tipos de agua en cuanto a su composición iónica en esta misma zona de estudio. Para el periodo lluvioso las aguas fueron clasificadas como cloruradas en todas las localidades, es decir, todas las unidades geomorfológicas, y mediante el modelo de regresión lineal múltiple también se estimaron aguas cloruradas, mientras que para el periodo seco en las localidades L1, L2, L3 y L4 que hacen referencia a las geomorfologías de terraza, plano de inundación, finales de plano inundable y plataforma costera, sus aguas freáticas presentaron diferentes clasificaciones entre ellas, aguas cloruradas, sódicas, magnésicas y potásicas respectivamente.

La evolución química representada en los diagramas de Piper muestra puntos en una primera trayectoria, la cual está determinada solamente por el intercambio catiónico, donde el agua freática tiene una composición Ca-HCO_3^- que refleja la evapotranspiración y la disolución de minerales silicatados durante la recarga. Sin embargo, debido a que Na^+ continúa para ser liberado a través del intercambio catiónico con Ca^{2+} , el agua freática evoluciona naturalmente a una composición de Na-HCO_3^- . En otra ruta se observó que el tipo de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica siguió una trayectoria de intercambio iónico con un aumento de cloruro. La tercera ruta de salinización se refleja con el incremento de cloruro, pero sin un intercambio catiónico significativo.

Especialmente las aguas cloruradas sódicas y cloruradas magnésicas se situaron por toda el área de estudio, sin embargo, las más concentradas de iones cloruro, sodio y magnesio se encontraron al norte y noreste en las unidades geomorfológicas de plano de marea, plataforma costera y plano de inundación, las cuales están más cerca de la línea de costa. Las cloruradas cálcicas se localizaron en el plano de inundación, especialmente en los pozos más próximos al río Sinú. Las aguas bicarbonatadas cálcicas se ubicaron al sur y





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



sureste, principalmente en la geomorfología de lomas y colinas y terrazas. En esta última geoforma, las aguas bicarbonatadas magnésicas abundan con relación a las otras unidades geomorfológicas. El tipo de agua bicarbonatada sódica se presentó especialmente en la zona centro de la zona de estudio, y la sulfatada sódica en abanico y/o glacis.

6.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

6.4.1 CAJAS Y BIGOTES

A partir de la concentración de los diferentes iones muestreados se pudo obtener las Figuras 26 y 27 de caja y bigotes para todas las unidades geomorfológicas en ambas temporadas climáticas. De lo anterior se obtuvo que, tanto en época seca como en época húmeda, los iones cloruro y sodio presentaron las mayores concentraciones, seguido de los iones magnesio, sulfato, bicarbonato y calcio con contenidos intermedios; y los iones potasio y carbonato obtuvieron las menores concentraciones.

Estos diagramas arrojaron un conjunto de datos atípicos y extremos que pueden representar un comportamiento específico y diferente al de los datos dentro del diagrama de caja, como la causa principal del aumento de la salinidad. En temporada seca, los puntos extremos de los iones Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} están determinados por los pozos F1-10 y F1-18 de la unidad geomorfológica de plano de marea, y F1-17, F2-36, F2-37 y F2-39 de plataforma costera, señalando que la principal contribución de estos iones sea por el aporte de aguas con importante influencia marina, y dada la ubicación espacial de dichos pozos, se cree que esto sea así. Los valores atípicos de los iones Ca^{2+} , HCO_3^- y CO_3^- hacen parte de los pozos F1-03 de abanico y/o glacis; F1-09 y F1-15 de terraza, y F1-14, F2-29 y F2-30 de la geomorfología de plano de inundación, localizados más cerca al río Sinú y a una distancia mayor del mar Caribe.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



En temporada húmeda, los datos extremos de los iones Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} representaron a los mismos pozos y geomorfologías de la temporada seca, sin embargo, también se encontraron los pozos F1-09, F1-15 y F2-08 de la geoforma de terraza, y los pozos F1-14, F2-25, F2-27, F2-29, F2-30, F1-31, F2-32 y F2-35 de plano de inundación. El incremento de las precipitaciones y aerosoles que vienen del mar Caribe, pueden ser los responsables de los altos contenidos de estos iones, en conjunto con las actividades antrópicas que se realizan, como la tala, sustitución de manglar por arroz y uso excesivo de agroquímicos que se implementan en la zona, debido a la presencia de cultivos.

Los valores atípicos de los iones Ca^{2+} , HCO_3^- y CO_3^- correspondieron tanto a los mismos pozos como a las unidades geomorfológicas de la época seca. No obstante, se incorporaron los pozos F2-25, F2-26, F2-28, F2-31, F2-32 y F2-35 del plano de inundación, y F2-02, F2-03 y F2-08 de la geoforma de terraza. El aporte del ion HCO_3^- puede ocurrir de las reacciones químicas, donde el CO_2 atmosférico se disuelve en el agua de lluvia, reaccionando con ella para formar H_2CO_3 , luego este ácido se disocia parcialmente y se forma el ion HCO_3^- que queda disuelto en el agua de lluvia, y con el aumento de las precipitaciones la proporción es mayor. Las condiciones de lluvia también permiten que ocurra un aporte del calcio, debido a la disolución de minerales de silicatos que están disponibles en la zona de estudio.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

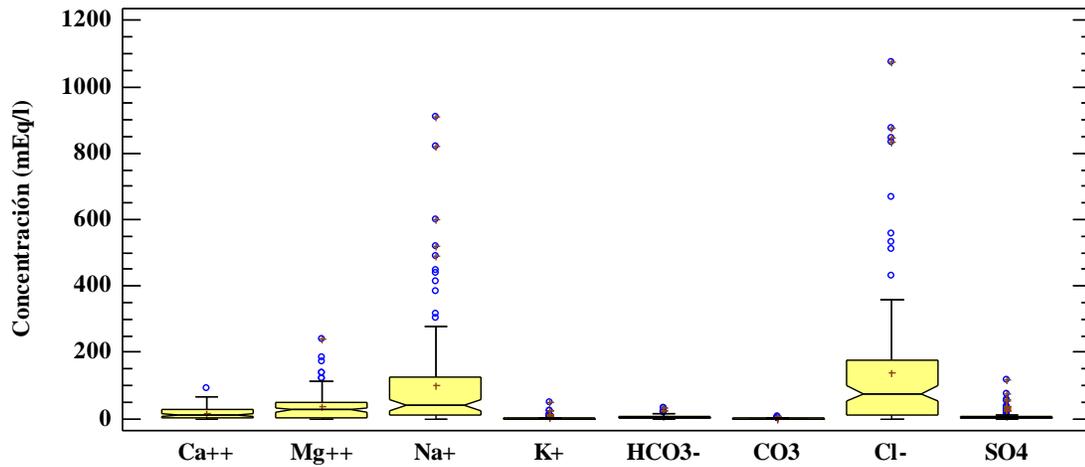


Figura 26. Caja y bigotes- época seca.

Fuente: Elaboración propia.

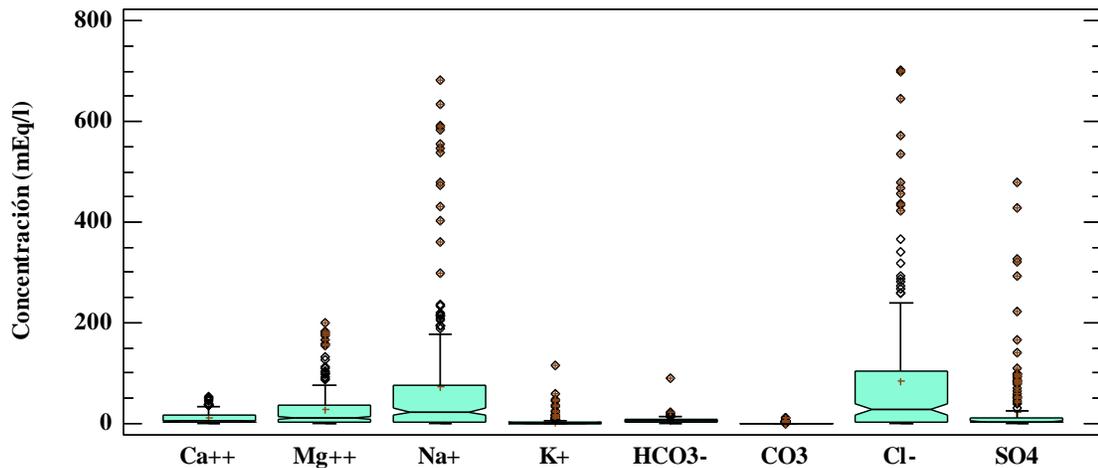


Figura 27. Caja y bigotes- época húmeda.

Fuente: Elaboración propia.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



6.4.2 CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Como algunos de los parámetros sobrepasaron el supuesto de normalidad debido a sus valores aberrantes, las correlaciones entre cada par de parámetros se evaluaron mediante estadísticas no paramétricas empleando los coeficientes de correlación de Spearman. El umbral de significación se situó en valores de ρ por debajo de 0,05 *, con un valor de ρ adicional y más significativo de 0,01** (Kumar et al. 2006). Así, en esta correlación de Spearman se tuvo en cuenta la siguiente clasificación:

Tabla 5. Rangos de Spearman.

0 – 0,25	Nula o escasa
0,26 – 0,50	Débil
0,51 – 0,75	Entre moderada y fuerte
0,76 – 1,0	Entre fuerte y perfecta

Fuente: Martínez, R. et al., 2009

El análisis de las categorías fuerte a perfecta indica que Ca^{2+} y Na^+ con Mg^{2+} se agrupan muy bien, donde se evidencia que el magnesio tiene una idoneidad mucho mayor con el calcio que con el catión sodio, lo cual se puede asociar a que los dos primeros cationes son divalentes y el sodio es monovalente, además estos cationes son representativos de suelos salino-sódicos.

Seguido de Cl^- con Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , donde existe una perfecta conveniencia entre el cloruro y los cationes magnesio y sodio, aunque con este último catión es mucho más perfecta, en comparación a la correlación con el catión calcio que se puede considerar solo fuerte. El primer conjunto de correlaciones se da debido a la alta presencia de aguas tipo clorurada sódica en el área con un 69,8%, seguida de aguas cloruradas magnésicas.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



con un 10,5%. El segundo grupo representa una pequeña minoría de aguas cloruradas cálcica con un porcentaje de 4,3.

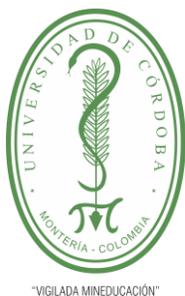
Finalmente, sólidos disueltos totales (SDT) con Mg y Cl, donde el primer parámetro es indicador de salinidad, puesto que son el residuo que queda después de evaporar una muestra de agua, asimismo incluyen las sales, los minerales, los metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico que se encuentra disuelto en el agua. Los iones con los cual está relacionado por lo general presentan altas concentraciones y como se demuestra en el diagrama los SDT se acoplan un poco más con el cloro.

De la correlación entre moderada y fuerte hacen parte Na^+ con Ca^{2+} ; K^+ con Mg^{2+} y Na^+ ; Cl^- con K^+ ; SO_4^{2-} con Na^+ ; CE con Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} ; y SDT con Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y CE, y todas son positivas.

La categoría débil muestra una relación muy tenue entre las variables, como el K^+ con Ca^{2+} ; HCO_3^- con Na^+ y K^+ ; CO_3^{2-} con Ca^{2+} y Mg^{2+} ; SO_4^{2-} con Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- y SDT; CE con K^+ ; y SAR con Na^+ , Cl^- , CE y SDT. La mayoría de los parámetros son positivos lo que da a entender que son directamente proporcionales.

La clasificación nula o escasa significa que no existe una correlación principalmente lineal; en este caso, las variables de temperatura, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , CE, SDT y SAR, no tienen una asociación lineal con las variables de precipitación, temperatura y pH; al igual que los parámetros HCO_3^- con Ca^{2+} y Mg^{2+} ; CO_3^{2-} con Na^+ , K^+ y HCO_3^- ; Cl^- , SO_4^{2-} , CE, SDT con HCO_3^- y CO_3^{2-} ; y la RAS con Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} . Como se observa muchos coeficientes son positivos, lo que significa que una variable aumenta acorde la otra también lo haga o viceversa; y otros negativos, lo que quiere decir que, un parámetro incrementa a medida que la otra disminuye o, al contrario (ver anexo B).





UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

6.4.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El resumen de la estadística descriptiva de la composición química de las aguas freáticas someras se presenta en la Tabla 6. Las muestras de agua de la zona de estudio estuvieron en un rango de pH de 3.00-9.01 con una media 7.50 y una desviación estándar de 0.74, lo cual indicó que el agua freática fue alcalina. El orden de abundancia de los cationes mayores fue $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ y la de los aniones mayores fue $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^-$.

Tabla 6. Composición química de las muestras.

Parámetro	Unidad	Nº de muestras	Media	Desviación estándar
pH	--	362	7,50	0,742
Ca^{2+}	mEq l^{-1}	362	12,055	14,347
Mg^{2+}	mEq l^{-1}	362	30,811	40,973
Na^+	mEq l^{-1}	362	81,249	137,870
K^+	mEq l^{-1}	362	2,916	8,861
HCO_3^-	mEq l^{-1}	362	5,655	6,447
CO_3^-	mEq l^{-1}	362	0,625	1,465
Cl^-	mEq l^{-1}	362	101,945	154,013
SO_4^{2-}	mEq l^{-1}	362	17,019	49,699

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis de componentes principales para los datos hidrogeoquímicos se resumen en la Tabla 7. En este estudio se tomaron los componentes con magnitudes mayores a 1, identificando dos componentes principales que explican el 55.13% de la varianza acumulada, los cuales se asocian a los procesos hidrogeoquímicos dominantes en el área de estudio.

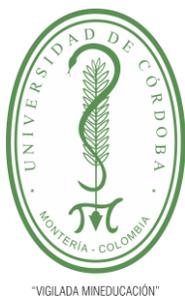
En términos de la varianza total y el eigenvalor, se observa una amplia diferencia entre el componente 1 con respecto al componente 2. El componente 1 explica el 40.31% de la varianza en los datos y se encuentra diferenciado positivamente por los iones Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} ; es visible que este componente está relacionado con el aumento de la salinidad de las aguas freáticas, debido a que la acumulación de iones en los horizontes



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



superiores del suelo aumenta dicho proceso, particularmente cuando la tasa de evaporación y evapotranspiración es muy alta. Además, este componente puede llegar a indicar mezclas con agua marina, evaporación, contaminación antrópica por la aplicación de fertilizantes y un posible proceso de intercambio iónico como fuente enriquecedora del ion Na^+ .

El componente 2 explica el 14.81% de la varianza de los datos y está caracterizado por las variables positivas y de mayor peso CO_3^- y pH, lo que indica posible afluencia de distintas sales en las aguas freáticas (Tabla 8).

De acuerdo con los resultados obtenidos, los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la región de estudio fueron: evaporación e intercambio iónico.

Tabla 7. Análisis de Componentes Principales.

Componente Número	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	3,62838	40,315	40,315
2	1,3337	14,819	55,134
3	0,993886	11,043	66,177
4	0,874623	9,718	75,895
5	0,783401	8,704	84,600
6	0,714537	7,939	92,539
7	0,484311	5,381	97,920
8	0,181377	2,015	99,936
9	0,00577961	0,064	100,000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Pesos de los Componentes.

Variable	Componente 1	Componente 2
Ca^{2+}	0,325423	-0,377572
Cl^-	0,483814	-0,0167239
CO_3^-	0,00380472	0,620691
HCO_3^-	0,133773	0,274859
K^+	0,272685	0,1318
Mg^{2+}	0,477667	-0,120841





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Na ⁺	0,486782	0,104299
Ph	0,0519928	0,585665
SO ₄ ²⁻	0,31612	0,102467

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 28 de pesos del componente se encuentra constituido por las componentes 1 y 2, donde las correlaciones CO₃⁻, pH, HCO₃⁻, K⁺, SO₄⁻ y Na⁺ son positivas y las variables Cl⁻, Mg²⁺ y Ca²⁺ son negativas. En el eje X se puede observar que este reúne el mayor porcentaje de la varianza y separa las variables de izquierda a derecha, donde el Cl⁻, Na⁺ y Mg²⁺ tienen los mayores pesos, seguido de los iones SO₄²⁻, Ca²⁺ y K⁺ y las variables HCO₃⁻, pH, CO₃ tienen los menores valores. En este caso todos los parámetros se posicionaron del lado derecho indicando mineralización.

En el eje Y, las variables son separadas de abajo a arriba, siendo la parte de arriba donde se ubicaron la mayor cantidad de parámetros, y en la parte de abajo se localizaron las variables Cl⁻, Mg²⁺ y Ca²⁺.

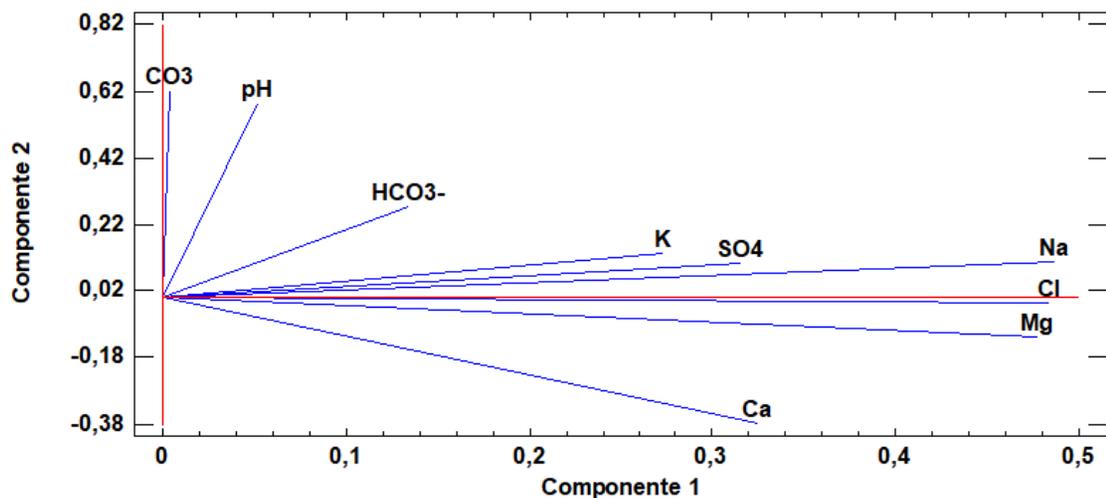


Figura 28. Pesos de los componentes 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



6.4.4 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS MÚLTIPLES

Este análisis permite reducir la cantidad de datos analizados en dos o tres dimensiones, situando la posición relativa de las categorías de todas las variables del análisis en la Figura 29, donde las categorías muy cercanas están más asociadas.

Cerca al origen se encuentran varias categorías conformando tres grupos importantes. El primer grupo está conformado por aguas con la categoría del SAR muy alta y las clases de agua sulfatada sódica (SS) y clorurada sódica (CS), esto indica que los pozos que presentan las clases de agua mencionadas anteriormente tienen una SAR muy alta indistintamente de la geomorfología o litología, sumado a esto, la unión del catión sodio con los aniones cloruro y sulfato señala la presencia de aguas de mayor evolución ya sea por estar en zonas de descarga, por intrusión marina o por contaminación antrópica.

El segundo grupo está constituido por aguas ubicadas en la geomorfología plano de inundación (PI) con litología de sedimentos finos y moderadamente finos (SF MF), clases de agua clorurada magnésica (en adelante CM) y clorurada cálcica (CC), categoría del SAR media y alta y conductividad eléctrica con condiciones ligeramente salino (LS), moderadamente salino (MS) y fuertemente salino (FS). La presencia de estas aguas en la zona indica alta salinidad, debido al gran aporte de cloruros ya sea por parte de actividades antrópicas como el mal manejo de los suelos y la aplicación de fertilizantes en los cultivos dispuestos en el plano de inundación, presencia de aerosoles marinos precipitados mediante las lluvias y/o mezclas de aguas de una formación diferente. La salinidad y la conductividad están relacionadas porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas y en este caso, la condición de salinidad va desde ligeramente salino hasta fuertemente salino. Dicha alza está dada por la presencia de altas concentraciones de sodio en relación a los contenidos de calcio y magnesio, provocando una alteración en la condición fisicoquímica del suelo.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



El tercer grupo está formado por la geomorfología de terrazas (T), litología sedimentos mixtos con materiales calcáreos (SMMC), clases de agua bicarbonatada cálcica (BC) y bicarbonatada magnésica (BM), categoría del SAR baja y conductividad eléctrica con una condición no salino (NS). La presencia de clases de agua bicarbonatadas cálcicas y magnésicas significa que son aguas de reciente infiltración o aguas de recarga, así mismo, el aporte de los cationes calcio y magnesio se debe a su litología de materiales calcáreos haciendo que la SAR sea baja. La condición no salina por parte de la conductividad eléctrica puede deberse a bajas concentraciones de los diferentes cationes y aniones en esta unidad geomorfológica.

Las categorías más alejadas del origen son geomorfología lomas y colinas (LC) que está muy asociada a la litología arcillolitas con intercalaciones de areniscas y materiales calcáreos (AIAMC) y la unidad geomorfológica de plano de marea (PM) que igualmente tiene una gran relación con la litología sedimentos finos y gruesos con capas de material orgánico (SFGCMO). También la geomorfología de abanico y/o glacis (A-G) y la litología sedimentos mixtos (SM) tienen la misma posición y por ende están muy relacionadas. Así mismo, la unidad geomorfológica de plataforma costera (PC) está en el mismo punto de litología sedimentos gruesos (SG), sin embargo, muy cerca de ellos se encuentran la categoría del SAR excesivo y la conductividad eléctrica con una condición extremadamente salino (ES), lo cual se relacionan ya que, las dos últimas categorías indican suelos con una alta salinización y algunos de estos son propios de zonas donde hay gran influencia de intrusión marina como es el caso de la geomorfología de plataforma costera.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías

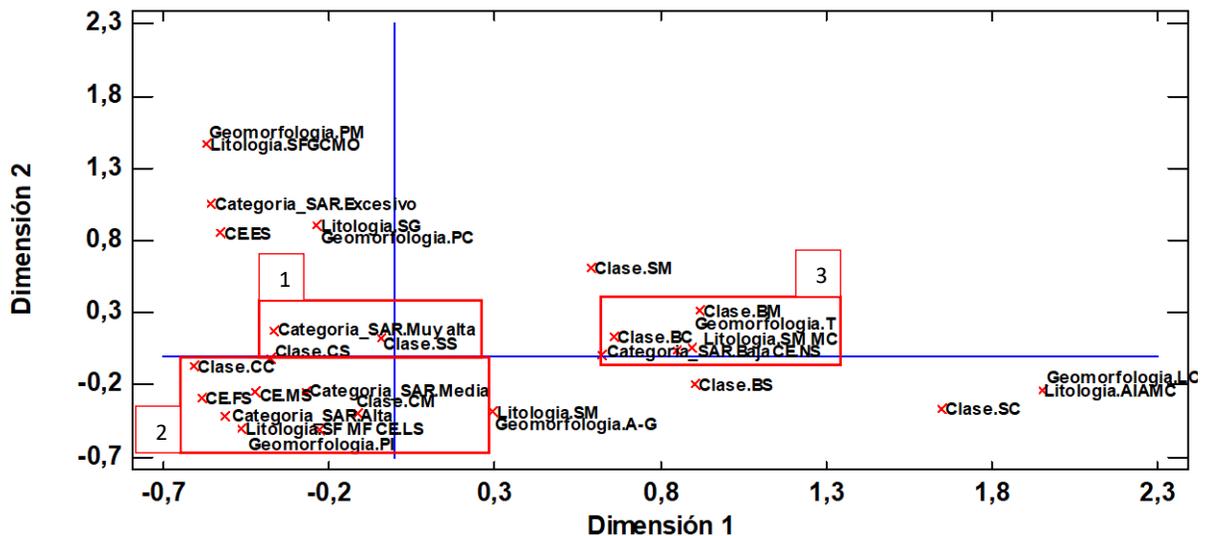


Figura 29. Análisis de correspondencias múltiple.

Geomorfología: PM-Plano de marea; PC-Plataforma costera; PI-Plano de inundación; A-G-Abanico y/o glacis; T-Terraza; LC-Lomas y colinas. **Litología:** SFGCMO-Sedimentos finos y gruesos con capas de material orgánico; SG-Sedimentos gruesos; SFMF- Sedimentos finos y moderadamente finos; SM-Sedimentos mixtos; SM MC-Sedimentos mixtos con materiales calcáreos; AIAMC-Arcillolitas con intercalaciones de areniscas y materiales calcáreos. **Clase de agua:** CS-Clorurada sódica; CM-Clorurada magnésica; CC-Clorurada cálcica; BS-Bicarbonatada sódica; BM-Bicarbonatada magnésica; BC-Bicarbonatada cálcica; SS-Sulfatada sódica; SM-Sulfatada magnésica; SC-Sulfatada cálcica. **Conductividad eléctrica (CE):** NS-No salina; LS-Ligeramente salina; MS-Moderadamente salina; FS-Fuertemente salina; ES-Extremadamente salina. **Categoría SAR:** B-Baja; M-Media; A-Alta; MA-Muy alta; E-Excesiva.

Fuente: Elaboración propia.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



6.5 MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

6.5.1 CALIBRACIÓN

Para verificar la calibración se empleó el método de error absoluto medio con la finalidad de establecer qué tan ajustado quedó dicho proceso, donde los valores más cercanos a cero indican un buen ajuste.

Como se puede apreciar en la Tabla 9, los valores del error absoluto medio calculados con los datos teóricos y experimentales de cada elemento conservativo son muy bajos, es decir, menor a 1, demostrando que el modelo se ajustó muy bien a la realidad, por lo que no precisa de ningún arreglo, ya que sus resultados ofrecen un nivel de confiabilidad muy alto.

Tabla 9. Error absoluto medio en elementos conservativos.

Elementos conservativos	Error absoluto medio
Na ⁺	4,34E-03
Mg ²⁺	4,67E-03
K ⁺	5,98E-03
Cl ⁻	3,08E-03

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente los valores experimentales y los modelados se ajustaron de manera casi perfecta en el modelo lineal, señalando que existe una alta confiabilidad de los resultados obtenidos en la modelación y representan muy bien la realidad, como se refleja en la Figura 30:





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

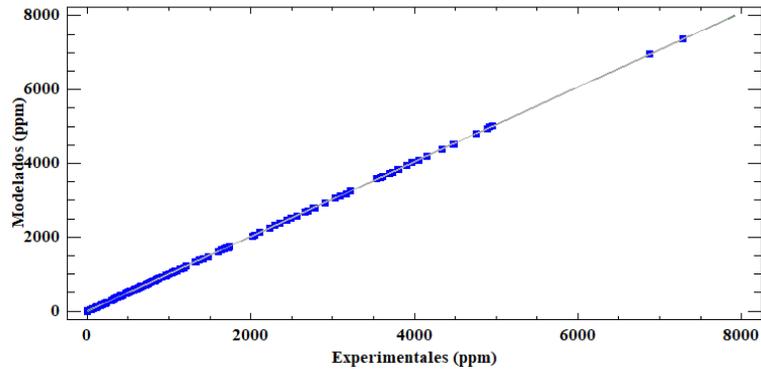
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

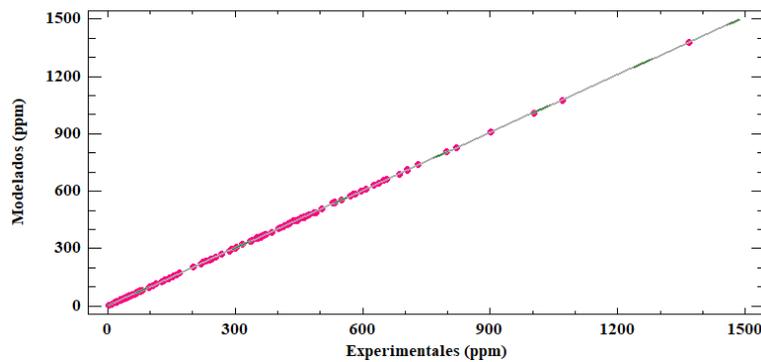
a)

Gráfico del Modelo Ajustado- Sodio
Modelados = $-5,57099 + 1,01126 \cdot \text{Experimentales}$



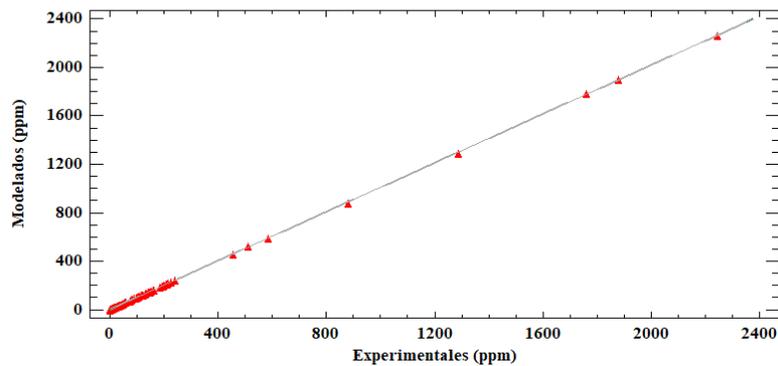
b)

Gráfico del Modelo Ajustado- Magnesio
Modelados = $-0,521318 + 1,0086 \cdot \text{Experimentales}$



c)

Gráfico del Modelo Ajustado- Potasio
Modelados = $-0,0876367 + 1,00957 \cdot \text{Experimentales}$



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías

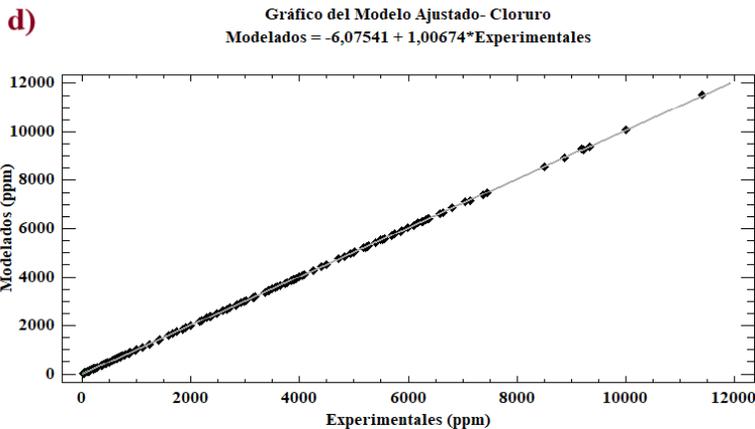


Figura 30. Calibración de los datos experimentales y modelados mediante un modelo lineal.

a) Sodio; b) Magnesio; c) Potasio; d) Cloruro.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre datos modelados y experimentales de los iones sodio (4), magnesio (5), potasio (6) y cloruro (7) estuvieron dada por las ecuaciones:

$$\text{Modelados} = -5,57099 + 1,01126 * \text{Experimentales} \quad (4)$$

$$\text{Modelados} = -0,521318 + 1,0086 * \text{Experimentales} \quad (5)$$

$$\text{Modelados} = -0,0876367 + 1,00957 * \text{Experimentales} \quad (6)$$

$$\text{Modelados} = -6,07541 + 1,00674 * \text{Experimentales} \quad (7)$$

Puesto que el valor-P fue menor que 0,05 en cada uno de los resultados de la regresión simple del modelo lineal de los diferentes iones (ver anexo C), existe una relación estadísticamente significativa entre los datos modelados y experimentales con un nivel de confianza del 95,0%.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



El estadístico R-Cuadrada indicó que el modelo ajustado explica 99,99% de la variabilidad en los datos modelados, para los iones Na^+ , Mg^{2+} , K^+ y Cl^- . El coeficiente de correlación de los cationes y aniones fue igual a 0,99, señalando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado mostró que la desviación estándar de los residuos es 5,55 para el catión Na^+ ; 1,47 para Mg^{2+} ; 1,33 para el ion K^+ ; y 9,6 para el anión Cl^- .

El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P de Na^+ , Mg^{2+} y Cl^- fue menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%. Este valor para K^+ fue mayor que 0,05, lo cual significa que no hay una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

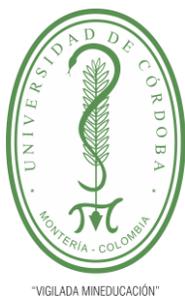
6.5.2 MODELOS DE ESPECIACIÓN

La última fase del estudio en lo que a interpretación hidrogeoquímica se refiere, conlleva el empleo de la modelación, con el fin de determinar las especies químicas de las aguas freáticas someras ubicadas a lo largo del plano de inundación.

Los patrones de distribución de las especies estuvieron estructurados bajo las características que se describen a continuación:

- Predominaron las formas iónicas libres en los elementos Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} , y a su vez, presentaron baja disponibilidad para formar complejos asociándose con los diferentes iones.
- La distribución de los elementos alcalinotérreos estuvo controlada principalmente por formas libres, seguido de complejos tipo sulfato y cloruro. Las formas combinadas con HCO_3^- fueron frecuentes para los elementos Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Los aniones tuvieron el siguiente orden de importancia $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, siendo HCO_3^- el más débil, ya que no forma complejos con todos los cationes y sus concentraciones no fueron altas (Martínez 2008).
- Las sales solubles presentes en la zona de estudio son MgSO_4 , NaCl , NaSO_4 , MgCl_2 y NaHCO_3 , como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Concentración mínima y máxima de especies químicas en temporada seca y húmeda.

Especies químicas	Concentración temporada seca (mEqL ⁻¹)		Concentración temporada húmeda (mEqL ⁻¹)	
	menor	mayor	menor	mayor
MgSO ₄	0,033	1,650	0,072	10,720
NaCl	0,018	2,559	0,006	3,067
NaSO ₄	0,015	1,151	0,007	5,613
MgCl ₂	0,005	0,862	0,007	1,121
NaHCO ₃	0,032	0,368	0,005	0,182

Fuente: Elaboración propia.

- **Sodio (Na⁺)**

El catión sodio presentó mayores concentraciones en el sistema de agua freática y estuvo asociado principalmente al ion cloruro. Las fuentes dominantes de sodio en el área probablemente están determinadas por el agua de lluvia, disolución de feldespatos, intercambio iónico con arcillas y aportes de agua marina en zonas costeras mediante intrusión marina (Shand et al. 2007).

La presencia de sodio en cantidades muy prominentes es demasiado perjudicial para los cultivos ya que las sales compuestas de sodio son de solubilidad muy elevada y difíciles





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



de precipitar, lo cual genera impermeabilización en los suelos, especialmente en zonas de drenaje deficiente (Porrás et al. 1985), como en el plano de inundación donde el drenaje es pobre a imperfecto.

- **Magnesio (Mg^{2+})**

El magnesio fue el segundo catión más abundante en la zona de estudio, uniéndose a los cloruros, sulfatos y en menor proporción a los bicarbonatos. Este ion tiene propiedades similares al catión calcio, no obstante, sus sales son más solubles y difíciles de precipitar. En el plano inundable sus fuentes pueden estar determinadas por agua de lluvia, disolución de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, mezclas de aguas de una formación diferente (Shand et al. 2007) y los procesos de intercambio iónico también pueden contribuir en las concentraciones de Mg^{2+} en aguas freáticas. En ellas el Mg^{2+} es retenido con preferencia al Ca^{2+} en suelos y rocas (Porrás et al. 1985).

- **Sulfato (SO_4^{2-})**

El ion sulfato corresponde a sales moderadamente solubles a muy solubles. Procede del agua lluvia y del lavado de terrenos formados en ambientes marinos como los de la zona de estudio, de la oxidación de sulfuros que se encuentran dispersos en rocas ígneas, sedimentarias, o por oxidación de piritita formada en condiciones anaérobicas en humedales o depósitos aluviales; también por la descomposición de sustancias orgánicas. Normalmente la disolución de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y anhidrita ($CaSO_4$) y otros tipos de sulfatos representan frecuentemente el aporte más elocuente de este ion a las aguas subterráneas (Hem 1989), sin embargo, en el área de estudio esto no ocurre, debido a que las especies mineralógicas más abundantes son los silicatos.



➤ MgSO₄

En el plano de inundación, los sulfatos mostraron altas concentraciones, principalmente el MgSO₄ en temporada húmeda. Esta sal soluble a lo largo del área estudiada manifestó bajas concentraciones (0,072 – 0,424 mEq l⁻¹). Sin embargo, en la figura 31 se observó que dos pozos exhibieron concentraciones intermedias; el aumento de esta sal soluble en estas áreas puede deberse a la cercanía que tienen los pozos F2-25 y F2-32 a los caños Guarumo y Mocho respectivamente, puesto que el incremento de las precipitaciones y el constante lavado de los terrenos de la zona de estudio provocan un aporte de sulfatos, y de igual forma el aumento del proceso de disolución de minerales silicatados compuestos principalmente de magnesio ocasionan la formación del MgSO₄. Por otro lado, al sureste de la zona, el pozo F1-14 reportó los mayores contenidos de sulfato de magnesio, ya que su localización es muy susceptible en temporada húmeda a inundaciones ocasionales y encharcamientos periódicos, generando un alto aporte y afectación por parte de las sales solubles.

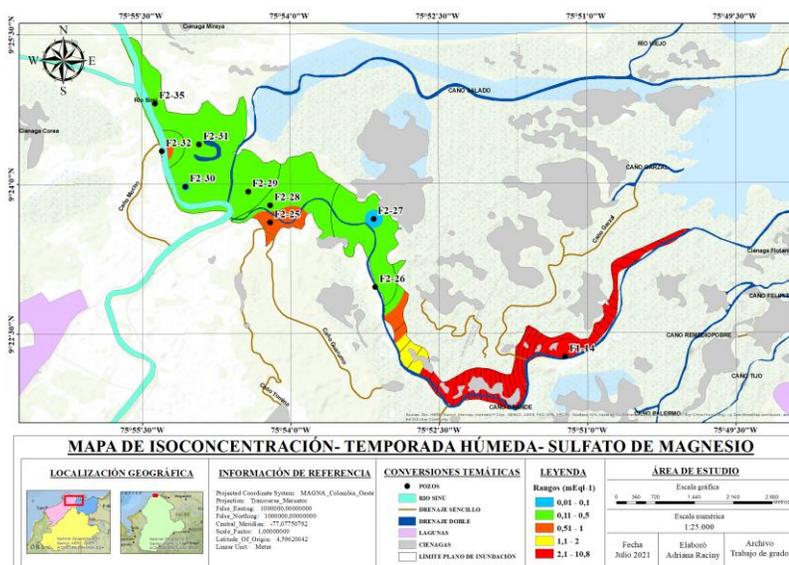


Figura 31. Mapa de isoconcentración de sulfato de magnesio en temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



En temporada seca, la distribución espacial del sulfato de magnesio cambia un poco, ya que las bajas concentraciones entre los rangos $0,033\text{mEq l}^{-1}$ a $0,392\text{mEq l}^{-1}$ hicieron parte de los pozos F2-27, F2-28, F2-29, F2-30, F2-31, F2-32 y F2-35. Los valores intermedios de MgSO_4 estuvieron dados por el pozo F2-25, igual que en la temporada húmeda, sólo que el área disminuyó significativamente. Las concentraciones incrementaron en dirección sureste y se dieron en las muestras de agua del pozo F2-26 y F1-14, como se observa en la Figura 32. En esta temporada el proceso de evaporación es mayor haciendo que las sales se concentren mucho más debido a la falta de agua en los suelos. Los pozos F1-14 y F2-26 se ubican contiguos al efluente Caño Grande del río Sinú que llega directo a la bahía de Cispatá, por lo cual se infiere que el descenso de este efluente por las bajas precipitaciones hace que el aporte de agua de mar sea mucho mayor, ya que después del cloro y el sodio, el magnesio es el elemento más abundante en aguas marinas y se combina con otros elementos como el sulfato presente en el río formando sulfato de magnesio.

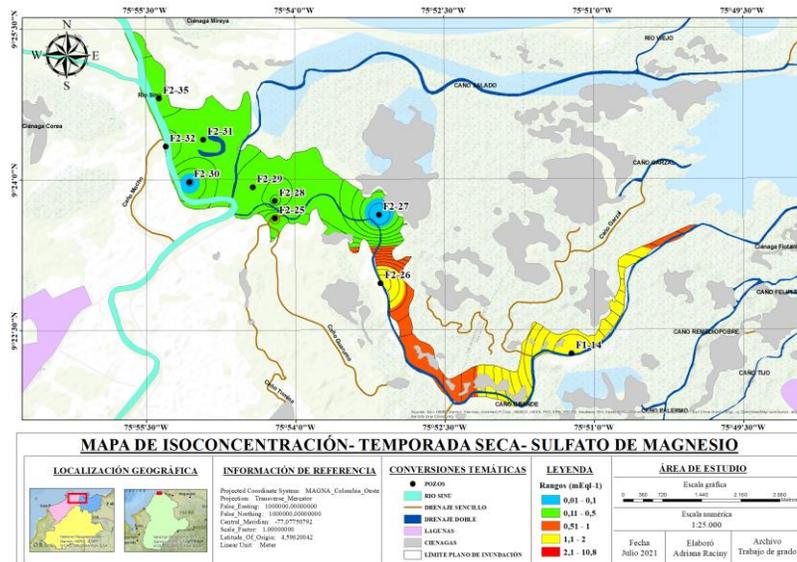


Figura 32. Mapa de isoconcentración de sulfato de magnesio en temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



➤ NaSO₄

El comportamiento y la distribución espacial del NaSO₄, fue similar al del MgSO₄. En la Figura 33 se evidenció que en temporada húmeda los pozos F2-27, F2-28, F2-30 y F2-35 marcaron bajas concentraciones con 0,007 – 0,048 mEqL⁻¹. En la Figura 34 se observó que la mayoría de estos pozos mantuvieron sus rangos de concentraciones, a excepción del pozo F2-35 que alcanzó concentraciones intermedias (0,051 mEqL⁻¹) de NaSO₄.

En época lluviosa los pozos F2-29, F2-31 y F2-32 indicaron contenidos de NaSO₄ entre los 0,051 – 0,1 mEqL⁻¹, no obstante, en época seca estas concentraciones para los pozos F2-29 y F2-31 aumentaron un poco a 0,13 mEqL⁻¹ y para el pozo F2-32 disminuyeron a 0,041 mEqL⁻¹. En el caso de los pozos F2-25 y F2-26, en ambas temporadas mantuvieron las concentraciones de NaSO₄ entre el rango de 0,11 - 0,5 mEqL⁻¹.

La dinámica del pozo F1-14 resaltó, debido a que presentó elevadas concentraciones con respecto a los demás pozos, sin embargo, en época húmeda su concentración fue de 5,613mEqL⁻¹ y en época seca disminuyó a 1,151 mEqL⁻¹, indicando que en temporada húmeda las lluvias traen consigo altos contenidos de sodio probablemente por los vientos cargados de aerosoles marinos, que al infiltrarse quedan disponibles en la solución del suelo para formar sales como el sulfato de sodio.



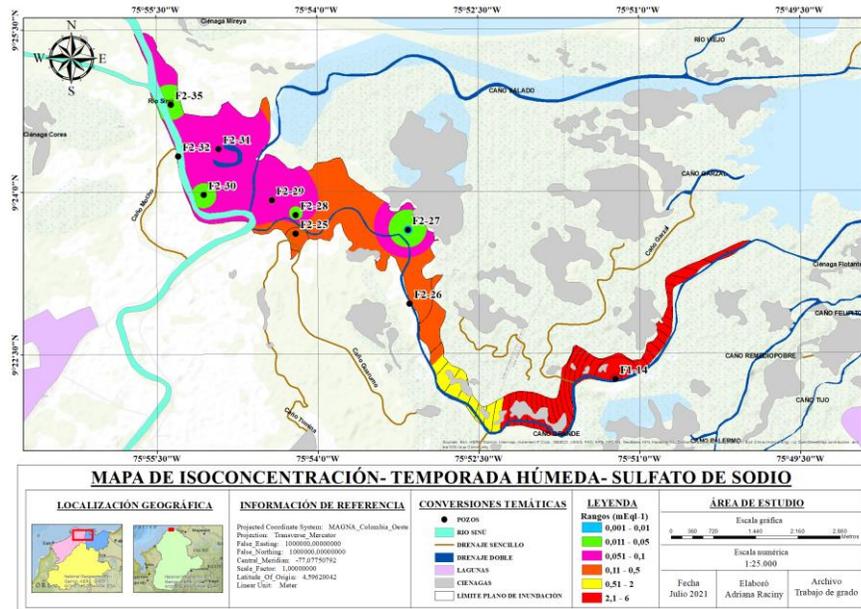


Figura 33. Mapa de isoconcentración de sulfato de sodio en temporada húmeda.

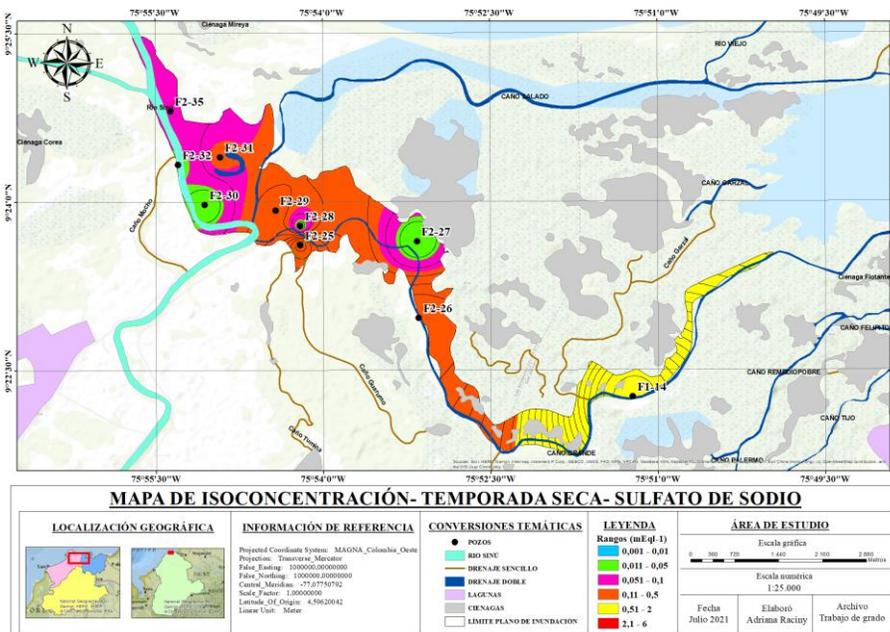


Figura 34. Mapa de isoconcentración de sulfato de sodio en temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- **Cloruro (Cl⁻)**

El ión cloruro forma sales muy solubles y está presente en varios tipos de roca en concentraciones más bajas (Hem 1989). El aporte significativo de este ion en la zona de estudio se debe probablemente a varias fuentes como el agua de lluvia, debido a que el plano de inundación se encuentra en zonas cercanas al mar o mezclas con agua de una formación diferente. Las principales causas que controlan la concentración de cloruros en aguas subterráneas son la evaporación y la mezcla de aguas (Carrillo et al. 2007).

- **NaCl**

La Figura 35 mostró que el NaCl en temporada húmeda, los pozos F2-27, F2-29 y F2-35 exhibieron bajas concentraciones entre 0,006mEqL⁻¹ a 0,030mEqL⁻¹, a pesar de esto, en temporada seca ocurrió un aumento de las concentraciones en los pozos F2-27 y F2-35 (Figura 36). En el área del pozo F2-30 en época lluviosa su concentración fue mayor con respecto a la época seca. Por otro lado, los pozos F2-28, F2-31 y F2-32 mostraron contenidos de NaCl entre los 0,11 – 0,5 mEqL⁻¹ en temporada de lluvias, pero en la siguiente temporada las concentraciones de los pozos F2-28 y F2-32 se elevaron un poco al rango entre 0,51 – 1 mEqL⁻¹.

El pozo F2-26 exhibió contenidos de cloruro de sodio de 0,512mEqL⁻¹ en época húmeda, pero en temporada seca las concentraciones se elevaron a 1mEqL⁻¹, sin embargo, estas concentraciones quedaron en el mismo rango representados en los mapas de isoconcentración. De igual manera, las aguas freáticas del pozo F2-25 incrementaron en la temporada seca. La principal causa del acrecentamiento de cloruros en la zona de estudio puede deberse al proceso de evaporación donde las bajas precipitaciones causan que el agua se concentre. Al respecto, Combatt et al. (2015) indican que en el estuario del río Sinú bajo condiciones normales en la época seca se presentan las mareas más altas y la intrusión de aguas salobres al continente es mayor, pues se reducen los flujos hídricos fluviales. Esto ocasiona que se presenten los máximos valores de salinidad





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

debido a la intensa evaporación. Además, otro factor determinante puede ser la presencia de cultivos en la zona, donde la aplicación de agroquímicos y el mal manejo de los suelos puede aumentar los niveles de cloruros.

Por otro lado, el pozo F1-14 en temporada húmeda exhibió mayores contenidos de cloruro de sodio ($3,067\text{mEq l}^{-1}$) con relación a la temporada seca ($2,559\text{mEq l}^{-1}$). La localización espacial de este pozo puede explicar los altos contenidos de NaCl, ya que esta es una zona de manglares con aguas mixohalinas y se encuentra muy cerca de un efluente que desemboca en la bahía de Cispatá.

Espacialmente, los niveles de cloruro de sodio aumentan desde el centro de la zona de estudio hacia el sureste del plano de inundación.

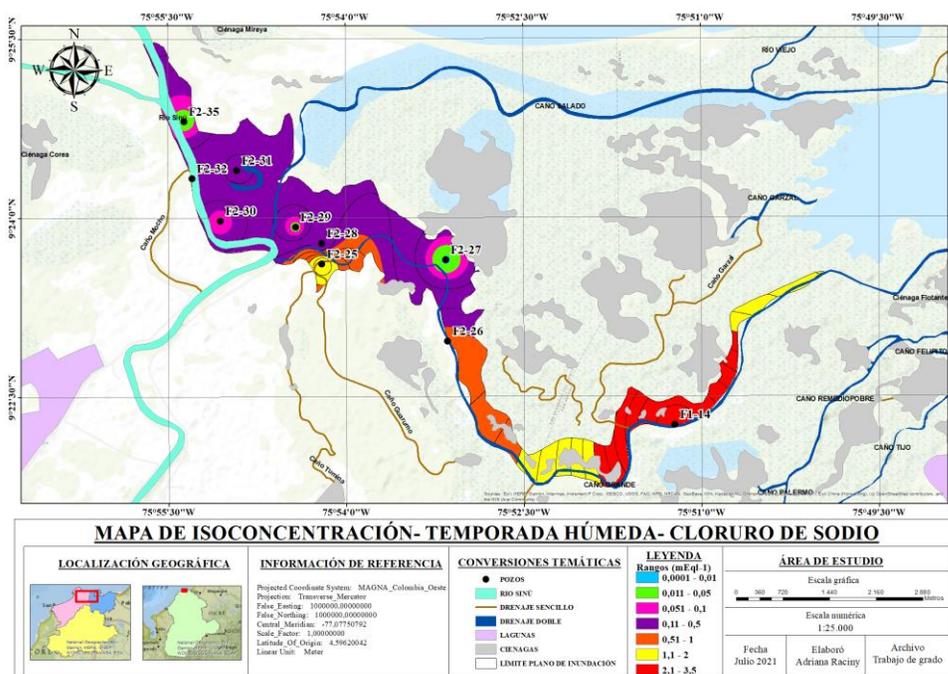


Figura 35. Mapa de isoconcentración de cloruro de sodio en temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

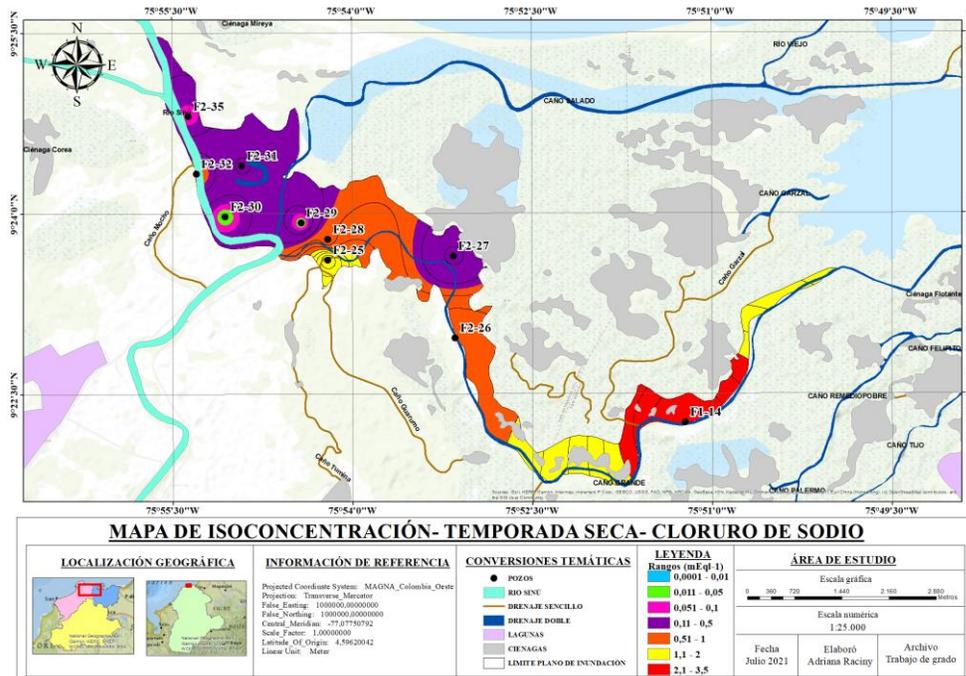


Figura 36. Mapa de isoconcentración de cloruro de sodio en temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.

➤ MgCl₂

En época húmeda como se indica en la Figura 37, el MgCl₂ comprendió rangos entre 0,007mEq⁻¹ – 1,121mEq⁻¹, donde las concentraciones aumentaron en sentido norte - sur y oeste - este. Los niveles más bajos estuvieron dados por las aguas freáticas de los pozos F2-27, F2-29, F2-30 y F2-35; seguido de los pozos F2-26, F2-31 y F2-32 con concentraciones entre los rangos 0,11 – 0,5 mEq⁻¹.

Los pozos F2-25 y F2-28 mostraron contenidos de MgCl₂ mayores entre 0,51 – 1 mEq⁻¹ de esta sal soluble; y el pozo F1-14 señaló los niveles más altos de cloruro de magnesio en 1,121mEq⁻¹.



La distribución espacial de esta sal soluble ocurre en sentido norte-sur y se concentran principalmente en el área central conformado por los pozos F2-25 y F2-28 y al sureste en dirección a la bahía de Cispatá.

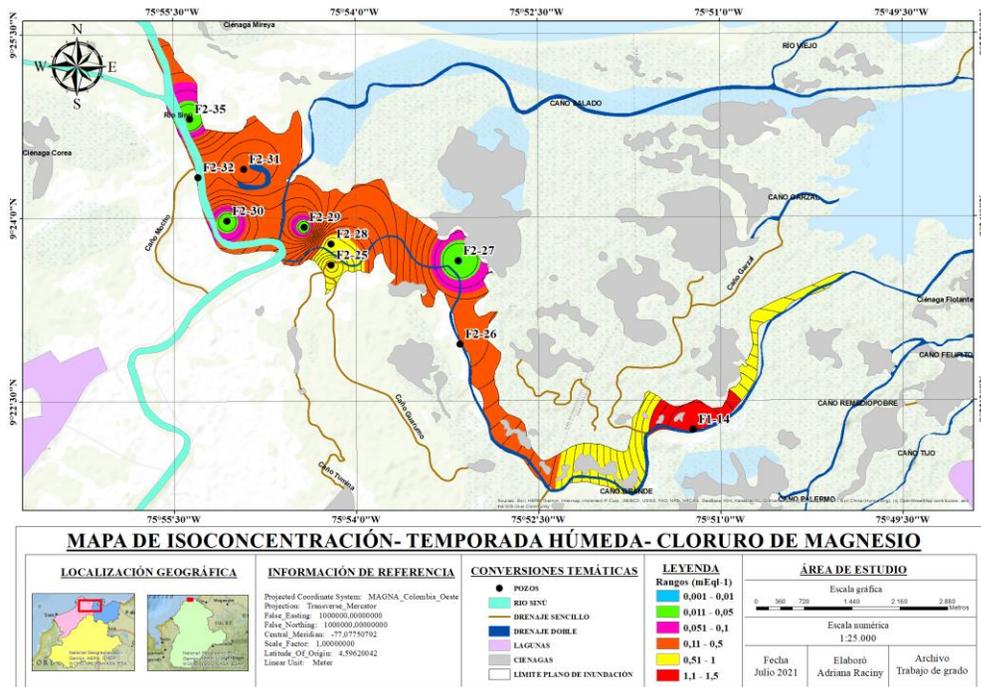


Figura 37. Mapa de isoconcentración de cloruro de magnesio en temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38 se muestra un cambio un poco más significativo en las concentraciones del $MgCl_2$. Las aguas freáticas del pozo F2-27 incrementaron con respecto a la temporada anterior y las de los pozos F2-29, F2-30 y F2-35 se mantuvieron en el mismo rango de $0,011 - 0,05 \text{ mEq l}^{-1}$. En los pozos F2-26 y F2-32 las concentraciones de las aguas freáticas aumentaron y en el F2-31 disminuyeron en comparación a la época lluviosa.

En esta temporada seca, los pozos que indicaron máximas concentraciones fueron el F1-14, F2-26, F2-28 y F2-32. Esto puede deberse a la ejecución de actividades antrópicas como los cultivos establecidos en la zona, donde la aplicación de agroquímicos y su cercanía al río Sinú y a uno de sus afluentes pueden estar explicando este comportamiento, ya que con la disminución de los niveles de agua del río en períodos secos existe un mayor aporte de agua de mar.

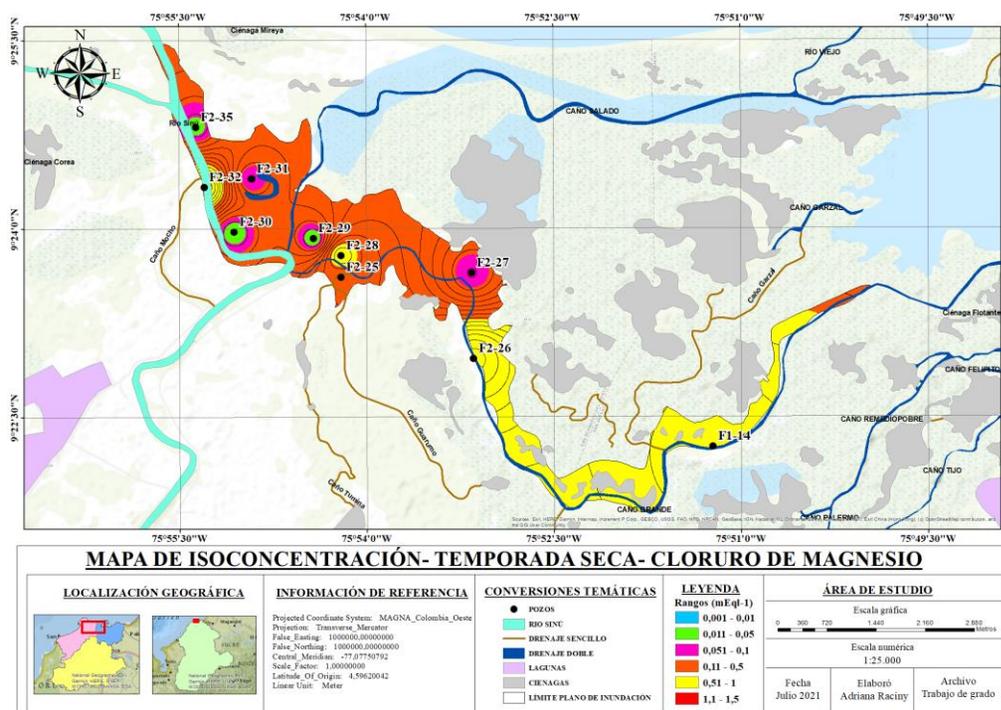
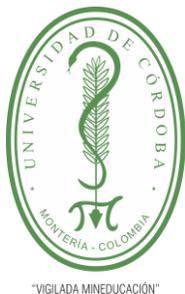


Figura 38. Mapa de isoconcentración de cloruro de magnesio en temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.

- Bicarbonatos (HCO_3^-)

La presencia de bicarbonato en la zona de estudio puede estar determinada principalmente por disoluciones de silicatos o disolución de CO_2 atmosférico o del suelo, también por hidrólisis y oxidación de materia orgánica.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



➤ NaHCO_3

Las concentraciones del bicarbonato de sodio en temporada seca fueron ligeramente más elevadas con respecto a la temporada húmeda, como se muestran en las Figuras 39 y 40.

En temporada húmeda las aguas de los pozos F2-27, F2-28, F2-31, F2-32 y F2-35 presentaron bajas concentraciones entre $0,005\text{mEq l}^{-1}$ y $0,045\text{mEq l}^{-1}$. Dentro del área que conforman estos contenidos de NaHCO_3 , los pozos F2-25, F2-26, F2-29 y F2-30 indicaron leve aumento de concentración, expresado por el rango entre los $0,051 - 0,1\text{mEq l}^{-1}$.

En temporada seca las concentraciones cambian, ya que los contenidos de NaHCO_3 en los pozos F2-27, F2-28, F2-31 y F2-35 aumentaron, al igual que en los pozos F2-25 y F2-29.

El pozo F1-14 al igual que en las sales solubles descritas anteriormente, indicó la más alta concentración en ambas temporadas climáticas como lo señala la Figura 24. Especialmente en ambas temporadas el bicarbonato de sodio aumentó desde el oeste hacia el sureste del plano de inundación.



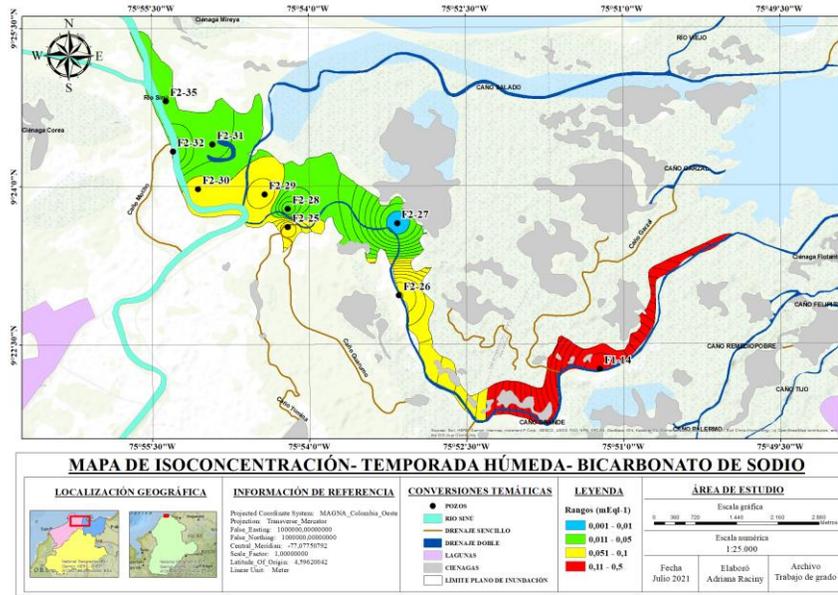


Figura 39. Mapa de isoconcentración de bicarbonato de sodio en temporada húmeda.

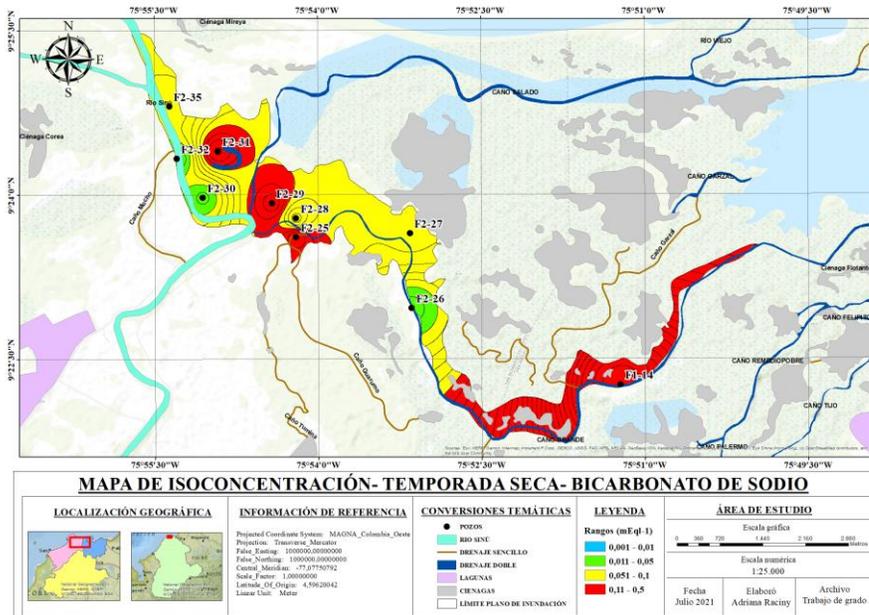


Figura 40. Mapa de isoconcentración de bicarbonato de sodio en temporada seca. Fuente: Elaboración propia.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Esta sal fue la que menor concentración tuvo con relación a las sales de $MgSO_4$, $NaSO_4$, $NaCl$ y $MgCl_2$. Esto pudo deberse a que la presencia de otras sales solubles en la solución del suelo limita la formación del bicarbonato sódico y en presencia de $NaCl$, la solubilidad del bicarbonato sódico disminuye por efecto del ion común.

De manera general las concentraciones de las sales analizadas fueron ligeramente más altas en períodos secos con relación a periodos lluviosos. Probablemente esto ocurrió, ya que normalmente durante ciertas épocas del año la evaporación y la evapotranspiración potencial es mayor que el aporte de precipitaciones; en esos períodos de tiempo no se produce recarga alguna y las sales aportadas por la lluvia se acumulan en el suelo. Por otro lado, las sales presentes en la solución del suelo se cristalizan por la evaporación del agua, aumentando la cristalización de la sal, lo que genera que se concentren y se eleve la cantidad de sales que pueden llegar a ser adsorbidas a las partículas de arcillas.

Algunos pozos mostraron un comportamiento diferencial que el general, donde en temporada lluviosa las concentraciones fueron más elevadas. Esto puede deberse al establecimiento de cultivos en la zona, ya que según Custodio (1974) si la evapotranspiración real es menor que la pluviometría, el agua de las precipitaciones no alcanza a los acuíferos subyacentes y las sales proporcionadas por ella misma o tomadas de la parte superior del terreno se acumulan en el mismo pudiendo llegar a generar costras. Así, después de fuertes precipitaciones, parte del agua infiltrada puede llegar a evitar la evapotranspiración y alcanza el acuífero, pero con una mayor concentración de sales, puesto que recoge las sales solubles aportadas por lluvias anteriores. De igual manera, las primeras partes de esa infiltración pueden ser notablemente más salinas que las siguientes debido al lavado de las sales depositadas en la época seca precedente.

La presencia de estas sales solubles en las aguas freáticas del plano de inundación se reafirma con el estudio de Bustamante y Cantero (2008), donde establecieron que las





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



sales predominantes en tales aguas son: Cloruro de sodio, cloruro de magnesio, sulfato de sodio y magnesio y sales bicarbonatadas de sodio y magnesio.

6.5.3 ÍNDICES DE SATURACIÓN

Para la zona de plano de inundación se calcularon los índices de saturación (SI) de las fases mineralógicas aragonita, calcita, dolomita, dolomita (d), magnesita, epsomita, halita, mirabilita, nahcolita y thenardita en ambas temporadas, de conformidad con los valores reportados en un rango de +5 a -5.

En el anexo D se presenta la evolución de los principales carbonatos. En ambas temporadas la calcita (CaCO_3) y aragonita (CaCO_3) se encontraron en equilibrio; sin embargo, estos minerales en el pozo F2-35 en época seca mostraron un estado de subsaturación indicando que tienden a la dilución. La dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] en ambas épocas climáticas mostró una tendencia a la sobresaturación o formación de fases sólidas y en menor proporción al equilibrio. La dolomita(d) [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] en temporada seca se situó en condiciones de equilibrio, a excepción de algunas muestras en los diferentes pozos; para la temporada húmeda una gran cantidad de las muestras de agua estuvieron sobresaturadas con respecto al mineral y en algunos momentos se localizó en equilibrio. La magnesita (MgCO_3) siempre se reportó en equilibrio a lo largo del tiempo en los distintos pozos. La solubilidad de la magnesita en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita (CaCO_3) por lo que, en condiciones normales, el MgCO_3 no precipita directamente de la disolución de modo que, para un período dilatado de tiempo puede producirse cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos (Porrás et al. 1985)

Cabe resaltar que, aunque estos minerales tuvieron una variación con respecto a los estados de subsaturación, saturación y sobresaturación de las aguas, son ellos los que en su mayoría se encuentran casi en un sistema de equilibrio. Todas estas fases mineralógicas tienen una composición química fundamentalmente de carbonato de





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



magnesio y carbonato de calcio los cuales son poco solubles y, por ende, no afectan o generan aumento en la salinidad de las aguas. Los carbonatos son más susceptibles, en general, a los cambios diagenéticos como reemplazamiento, disolución y recristalización que la mayoría de los silicatos.

Además de los minerales escogidos anteriormente, se eligieron las fases mineralógicas de las especies químicas arrojadas por la modelación. La epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) y nahcolita ($NaHCO_3$) en ambas temporadas climáticas siguieron un comportamiento similar, ya que se encontraban con una tendencia a disolverse, debido a que las aguas de las diferentes muestras estaban subsaturadas con respecto a estos minerales. Los otros pares de minerales que mantuvieron su condición a lo largo de las distintas muestras fueron la mirabilita ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) y thenardita (Na_2SO_4), e igualmente a los minerales descritos anteriormente sus índices de saturación (IS) se establecieron en la zona subsaturada, sin embargo, la thenardita fue el mineral que presentó más alto valores de IS. Para el caso de la halita ($NaCl$), la mayoría de las muestras se encontraron con tendencia a la dilución con valores en el rango de -3,0 a -4,5 para ambas temporadas; no obstante, en época seca hubo algunas excepciones donde exhibieron índices de saturación más altos.

La epsomita, nahcolita, mirabilita, halita y thenardita pueden llegar a aportar cantidades significativas de sales como $MgSO_4$, $NaHCO_3$, Na_2SO_4 y $NaCl$ a la solución del suelo. Dichas sales minerales al estar constituidas principalmente de iones de sodio y magnesio presentan altas solubilidad y esto conlleva a un efecto perjudicial para los cultivos, y asimismo a un aumento de la salinidad.

En suelos con unidad correspondiente al paisaje de planicie fluvio-marina, y al tipo de relieve de plano de inundación los análisis mineralógicos de la fracción arcilla afirman que los minerales dominantes son caolinita, interstratificados y vermiculita, en pequeñas cantidades micas, integrados y cuarzo. En la fracción arena, el cuarzo domina





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



con mínimo 62% posteriormente se encuentran granos alterados, fragmentos líticos, feldspatos y calcita (IGAC 2009).

6.6 TÉCNICAS DE MANEJO DE SUELO

Los resultados obtenidos del capítulo anterior permitieron identificar y conocer las sales solubles que más influencia tienen en la zona de estudio y generan aumento al proceso de salinidad. Esto contribuye a la elección de técnicas de manejo de suelo que ayuden a la reducción de acumulación de sales.

Como se definió en apartados anteriores, las sales presentes en el área objeto de estudio son $MgSO_4$, $NaSO_4$, $NaCl$, $MgCl_2$ y $NaHCO_3$, las cuales tienen altas solubilidades y generan efectos en la relación suelo:planta como: aumento de la presión osmótica de la solución del suelo, desequilibrio en el metabolismo de nutrientes y alteración en el balance energético que interfieren negativamente en el desarrollo de las plantas, ya que retrasa el crecimiento, las hojas nacen más pequeñas y puede ocurrir el proceso de clorosis. Estas sales se distribuyeron por toda la zona, no obstante, se encontraron puntos críticos donde las concentraciones son altas, conformado principalmente por los pozos F2-25, F2-26, F2-28 y F2-32. Por lo anterior, se precisa la implementación de estrategias que minimicen el impacto de estas sales en la relación suelo:planta.

Se recomienda la preparación adecuada de las tierras, la aplicación de riego o prácticas de drenaje y la fertilización, ya que constituyen condiciones requeridas de manejo para su utilización óptima; estos suelos requieren prácticas de mecanización controladas según el nivel de humedad respondiendo adecuadamente a labores de subsolado profundo y al gradual manejo bajo una agricultura consistente en baja tecnología.

Las prácticas de manejo en los suelos deben estar dirigidas a incrementar la tasa de infiltración, reducir la erosión potencial y al uso óptimo del agua recomendándose para este caso el sistema de aspersión mediana o ligera. En la zona de estudio, las principales





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



sales responsables del proceso de salinización son NaCl y MgSO_4 , puesto que sus concentraciones son más elevadas en relación a otras sales solubles.

- Para disminuir la concentración de la sal NaCl en estos puntos, se recomienda agregar sulfato de calcio como enmienda química, ya que es un fertilizante utilizado en la producción de cultivo, con el objeto de desplazar el sodio del perfil del suelo y disminuir la conductividad eléctrica. Con la aplicación de esta enmienda se espera la absorción de otros elementos en el suelo como el calcio, que permitan la formación de sales poco solubles y menos tóxicas para los cultivos, favoreciendo la oxigenación y reproducción de los microorganismos en el suelo. Este fertilizante es idóneo para usarse en este caso, puesto que los cultivos de arroz bajo inundación son la principal fuente económica de la zona.

La mejora de los suelos con MgSO_4 es difícil en vista del efecto de dilución de valencia; el Mg^{2+} tenderá a ocupar los lugares de intercambio desplazando los iones monovalentes durante el lavado. Por esta razón debe examinarse el tipo de fertilización y se sugiere el uso de fuentes poco móviles y estables en el suelo, en lo posible sin contenidos de Mg^{+2} evitando la pérdida de nutrimentos.

La adición de materiales orgánicos es importante para mejorar la aireación de estos suelos, incrementar el movimiento del agua, suministrar N (Nitrógeno) a las plantas y facilitar el desplazamiento del Mg^{2+} y del Na^+ .

- Realizar lavado en los suelos con agua de buena calidad, ya que las aguas freáticas de la zona de estudio son principalmente cloruradas sódicas.
- Sustituir la aplicación de fertilizantes inorgánicos como el KCl por compuestos orgánicos como vermicompost (humus de lombriz) y compost mesófilo, ya que estos facilitan la lixiviación de sales de sodio como NaCl , NaSO_4 y NaHCO_3 presentes en la zona de estudio. Estos compuestos orgánicos permitirán la





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



estimulación de la microbiota bacteriana del suelo y, por lo tanto, la producción de CO₂, facilitando la solución de cationes como magnesio y calcio, los cuales sustituyen el sodio, disminuyendo el exceso de las sales encontradas.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente
Carrera 6^a. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920
www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



7 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación se permite establecer:

1. El orden de abundancia de los cationes en las aguas freáticas es $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ y el de los aniones es $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$. En cuanto a los tipos de agua, el orden de predominancia es Clorurada sódica > Bicarbonatada magnésica > Clorurada magnésica > Sulfatada sódica > Bicarbonatada sódica.
2. Los procesos hidrogeoquímicos dominantes en el sistema son en orden descendentes la evaporación, intercambio iónico, intrusión marina y disolución de silicatos; los cuales favorecen el incremento de la salinidad.
3. La evolución de las aguas freáticas someras en cuanto a tipos de agua en la zona de estudio está determinada en su mayoría por flujos locales e intermedios. Las unidades geomorfológicas de terraza, abanico y/o glacis y lomas y colinas reportan flujos locales y las de plano de inundación, plano de marea y plataforma costera indican la presencia de flujos intermedios más evolucionados.
4. Los pozos con mayores concentraciones identificados a partir de los diagramas de Stiff son F1-10 y F1-18 ubicados en la geomorfología de plano de marea, y el pozo F1-14 situado en el plano de inundación.
5. La dinámica temporal indica que en la mayoría de los pozos las concentraciones de iones y salinidad se da en temporada seca. De forma espacial, a medida que los pozos se acercaban a la línea de costa o al norte de la zona de estudio, las concentraciones fueron mayores, especialmente para los iones cloruro y sodio.
6. Las concentraciones de las sales solubles de NaSO_4 , NaCl , MgCl_2 y NaHCO_3 , son ligeramente más elevadas en temporada seca, principalmente en las muestras de agua de los pozos F1-14, F2-25, F2-26, F2-28 y F2-32. En el caso de la sal MgSO_4 las concentraciones son más altas en temporada húmeda.



Certificado SC 5278-1



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



7. Las especies químicas predominantes son el sulfato de magnesio y el cloruro de sodio en ambas temporadas climáticas, representando un alto efecto perjudicial para el desarrollo fisiológico de las plantas, ya que son sales solubles de alta toxicidad. Las especies mineralógicas que generan aumento en la salinidad por encontrarse modeladas como fases subsaturadas son la halita, epsomita, mirabilita, nahcolita y thenardita.

8 RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuros proyectos:

- Para un estudio más detallado y exhaustivo se pauta incluir tomas de muestras de silicio para identificar los minerales más abundantes en la zona y de la mano del estudio de isotopía hidrológica corroborar las direcciones de flujos, los procesos hidrogeoquímicos y el origen de fuentes de contaminación.
- Recurrir a la zona de estudio para a hacer muestreos recientes y con esto verificar cómo ha sido la evolución del proceso de salinidad a lo largo del tiempo y el espacio, por medio de sistemas de información geográfica (SIG).
- Analizar cómo la población se ha adaptado a los cambios que se han efectuado en el sistema suelo:planta debido a las practicas antropogénicas y amenazas naturales.
- Para evitar un próximo proceso de desertificación en estos suelos, se sugiere hacer estudios encaminados a detallar las zonas con mayor incremento de salinidad aplicando técnicas efectivas que contrarresten la pérdida de los servicios ecosistémicos.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



9 BIBLIOGRAFÍA

Alarcón, J., y Pabón, J. (2016). The effects of climate change on arid and semi-arid areas of Colombia. InterCarto. InterGIS.

Alley, W. 1993. Regional Ground-Water Quality. Van Nostrand Reinhold, New York, 634p.

Álvarez, A., Baños, R. y Otero, L. 2008. Salinidad y uso de aguas salinas para la irrigación de cultivos y forrajes en Cuba. Ciencia y Tecnología Ganadera 2(1):1-12.

Appelo, C.J. y Postma, D. (1996). Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam: A.A.Balkema.

Bear, J. (1999) Intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: conceptos, métodos y prácticas. Bostón. Misa: Kluwer Academic.

Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., 2010. Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain, Algeria. African Journal of Environmental Science and Technology, 4(8), 526-534. [https://10.4314 / ajest.v4i8.71307](https://10.4314/ajest.v4i8.71307)

Bustamante, I. y Cantero, M. 2008. Diagnostico general del nivel de salinización en la zona aledaña a la desembocadura del Río Sinú y su impacto socioeconómico. Fase VII. Período: noviembre/2000 – noviembre/2008. (Contrato pre – 0496 – 2008) tomo I: Informe final. Montería.

Carrillo, C., Varsányi., Ó., Kovács., Cardona, C., 2007. Tracing Groundwater Flow Systems with Hydrogeochemistry in Contrasting Geological Environments. Water Air Soil Pollut, 184 págs. 77–103.

Combatt, E., Narváez, H., Bustamante, I. 2015. Estimación de la salinidad en aguas freáticas del área de influencia de la desembocadura del río Sinú-Córdoba, Colombia, Idesia (Arica), ISSN: 0718-3429





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

Custodio, E.; Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. Tomo II. Segunda edición. Omega, Barcelona, España. 2350 pp.

Datta, PS., Tyagi, SK., 1996. Química de iones principales de agua subterránea en el área de Delhi: Procesos de meteorización química y régimen de flujo de agua subterránea: Revista de la Sociedad Geológica de India, págs. 179–188.

Fagundo, J. y Gonzáles, P. 2012. Hidrogeoquímica: química del agua subterránea. Editorial Académica Española, España, p148-149.

FAO, 2013. El sistema de información global sobre el agua de la FAO-AQUASTAT.

Fernández, D. 2015. Procesos hidrogeoquímicos en el acuífero de Balanegra (SE, España). Tesis Geólogo, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Gibbs, RJ, 1970. Mecanismos que controlan la química mundial del agua tratar. Ciencia, 170, 870.

Gomes, O., Marques, D., Kütter, V., Aires, J., Travi, Y., Silva-Filho, E. 2019. Origin of salinity and hydrogeochemical features of porous aquifers from northeastern Guanabara Bay, Rio de Janeiro, SE – Brazil. Journal of Hydrology: Regional Studies, ISSN: 2214-5818

González, L., Zamora, A. y Céspedes, N. 2000. Análisis de la tolerancia a la salinidad en variedades de *Vigna unguiculata* (L) sobre la base de caracteres agronómicos, la acumulación de iones y el contenido de proteínas. Cultivos Tropicales 21(1):47-52.

Hem, JD, 1989. Study and Interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey. Water-Supply Paper 2254. U.S Government printing Office. Washington, D.C. Third edition, pág. 263.

IDEAM, CAR y UDCA. 2017. Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización. Puntoaparte Bookvertising, Colombia p36-41.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



IGAC. 2009. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Córdoba. Bogota: Imprenta Nacional de Colombia.

Jankowski J., Acworth R.I, 1997. Impacto de depósitos de privación en los procesos hidrogeoquímicos y el desarrollo de la salinidad de las tierras secas en la cuenca del río Yass, Nueva Gales del Sur, Australia. *Hydrogeol*, págs. 71–88.

Kaiser, H.F, 1960. The application of electronic computers to factor analysis: *Educational and Psychological Measurement* 20, 141-151.

Kumar, M., Ramanathan, A., Rao, MS., Kumar, B. (2006) Identificación y evaluación de procesos hidrogeoquímicos en el medio ambiente de agua subterránea de Delhi, India. *Environ Geol*, 50, 1025–1039 <http://doi.org/10.1007/s00254-006-0275-4>

Li, XY, Wu, H., Qian, H. y Gao, YY (2018). Química del agua subterránea regulada por procesos hidroquímicos y estructuras geológicas: un estudio de caso en Tongchuan, China. *Agua*, 10, 338.

Liu, J.T., Gao, Z.J., Wang, M., Li, Y.Z., Ma, Y.Y., Shi, M.J., Zhang, H.Y. (2018). Study on the dynamic characteristics of groundwater in the valley plain of Lhasa City. *Environ Earth Sci* 77, 646. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7833-4>

Lloyd, J. W., Heathcote, J. A, 1985. *Chemistry Of Groundwater*. Oxford University Press, New York, 293 pp.

Lozada, J. 2018. Identificación de los procesos hidrogeoquímicos en el sistema lagunar montebello, mediante la modelación inversa en phreeqc. Tesis Ingeniero Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, ciudad de México.

Lyles, JR (2000). ¿La intrusión de agua de mar está afectando el agua subterránea en la isla López, Washington? Serie numerada de USGS, Servicio geológico de EE. UU. Hoja informativa FS-057-00

Malagón, J. (2017). Análisis hidrogeoquímico-multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena – Colombia.





UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Martínez, Z. (2008) Influencia de los niveles freáticos en la manifestación de la acidez por sulfuros en un área piloto del bajo Sinú, Córdoba. [Trabajo de grado Maestría, Universidad Nacional de Colombia].

Mercado, T., Ortega, M., Arenas, A., Combatt, E. 2011. Dinámica de sales en el distrito de riego La Doctrina, Colombia, Idesia (Arica), ISSN: 0718-3429

Meybeck, M., 1987. Meteorización química global del sur fi rocas ciales estimadas a partir de Cargas disueltas del río. Soy. J. Sci. J. 287 (5), 401. 428.

Mitas, L., Mitsova, H., 1999. Interpolación espacial. En: Longley, P., Goodchild, KF, Maguire, DJ, Rhind, DW (Eds.), Sistemas de información geográfica: principios, técnicas, gestión y aplicaciones. Wiley, Obra nueva, págs. 481 - 492.

Molano J., 1964: Zonas áridas de Colombia. Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia. V. XXII, No 83-84, (http://www.sogeocol.edu.co/documentos/084_zon_arid_de_col.pdf).

Montoya, S. 2017. Tutorial de Especiación de Componentes Químicos del Agua con Phreeqc. Internet, <http://gidahatari.com/ih-es/tutorial-de-especiacion-de-componentes-quimicos-del-agua-con-phreeqc> [30 abril 2020].

Myers, DE, 1994. Interpolación espacial: una visión general. Geoderma 62, 17 -28.

Narváez, H., Bustamante, I., Combatt, E. 2014. Estimación de la salinidad en suelos del delta del río Sinú en Colombia, mediante modelos de regresión lineal múltiple. Idesia (Arica), ISSN: 0718-3429

Narváez, H., Combatt, E., Bustamante, I. 2014. Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río sinú (córdoba, colombia). Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, ISSN: 0123-4226

Otero, J., Gómez, C. y Sánchez, R. 2002. Zonificación de los procesos de salinización de los suelos de Colombia. Subdirección de Geomorfología y Suelos, IDEAM, Colombia, p44.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Porras, J., López, P., Álvarez, C., Fernández, A., Gimeno, V. 1985. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. IGME & EPTISA.

Ramírez, L., Grismaldo, J., Rosales, J., Romero E., Hernández, J. 2005. Validación del modelo leachm para predecir la salinidad en un suelo del valle de quibor, con cultivo de cebolla bajo riego localizado, Revista forestal latinoamericana, pág 38.

Regional Salinity Laboratory (U.S.). 1954. Agriculture handbook (United States. Department of Agriculture). En: Richards, LA. (Ed.). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States: Department of Agriculture.

Russak, A., Sivan, O., 2010. Hydrogeochemical Tool to Identify Salinization or Freshening of Coastal Aquifers Determined from Combined Field Work, Experiments, and Modeling, Environmental science & technology, 44(11).

Sánchez, N. Richards, L. y EE.UU. Dpto de agricultura. 1985. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos, Laboratorio de Salinidad de los EE.UU. Ed Limusa, México.

Scheidleder, A. (2003) Hoja de datos del indicador (WQ03b) intrusión de agua salada. Medio ambiente europeo Agencia. Obtenido de: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/saltwaterintrusion/saltwater-intrusion> Consultado: 18 de octubre de 2013.

Shand, P., Edmunds, WM., Lawrence, AR., Smedley, PL., Burke, S, 2007. La calidad natural del agua subterránea en Inglaterra y Gales, Servicio Geológico Británico, Nottingham, Inglaterra, Tech. Rep.

Soumaia, M., Yann, L., Gerhard, S., Lotfi, D., Rajouene, M., Coupled. 2019. hydrogeochemical modelling using KIRMAT to assess water-rock interaction in a saline aquifer in central-eastern Tunisia, Applied Geochemistry, pág 102.

Summer, E., 1993. Sodio soils: New perspectives. Australian Journal Soil Research 31:683-750.





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Tian, A., Fu, C., Su, X., Yau, H. y Xiong, H. 2019. Classifying and Predicting Salinization Level in Arid Area Soil Using a Combination of Chua's Circuit and Fractional Order Sprott Chaotic System. *Sensors (Basel)* 19(20): 4517.

Villegas, P. 2011. Tutorial de diagrammes (hidroquímica de aguas subterráneas). Internet, <https://aguaysig.com/tutorial-de-diagrammes-hidroquimica-de-aguas-subterraneas/>

Xiaomin, C., Zhanyi, G., Shaoli, W. y Haoriu, C. 2018. Modelling long-term soil salinity dynamics using SaltMod in Hetao Irrigation District, China. *Computers and Electronics in Agriculture* 156:447-458.

Yang, Q.C., Li, Z.J., Ma, H.Y., Wang, L.C., Martín, J.D. (2016). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic integrated geochemical methods in the Southeastern part of Ordos basin, China. *Environmental Pollution*, 218, 879–888. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.017>





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

ANEXOS

ANEXO A- CONCENTRACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA FREÁTICA EN TODAS LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

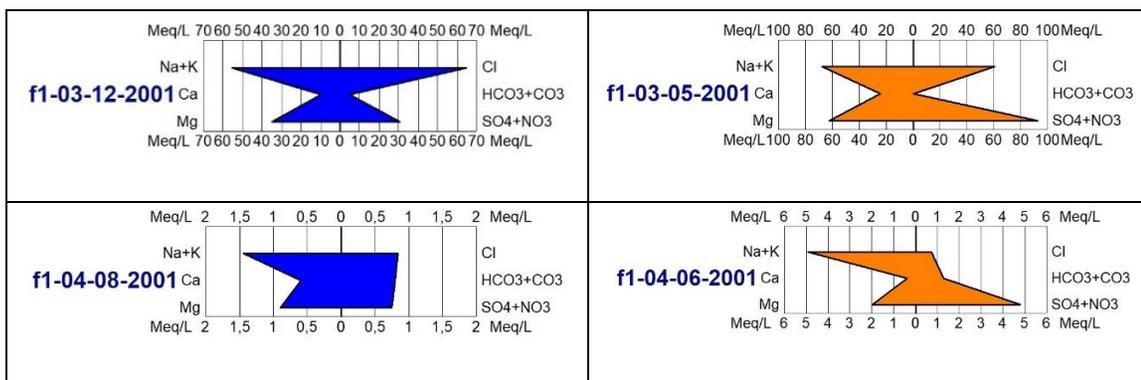


Figura 41. Concentraciones de diagramas de Stiff- Abanico y/o glacis.

Fuente: Elaboración propia.

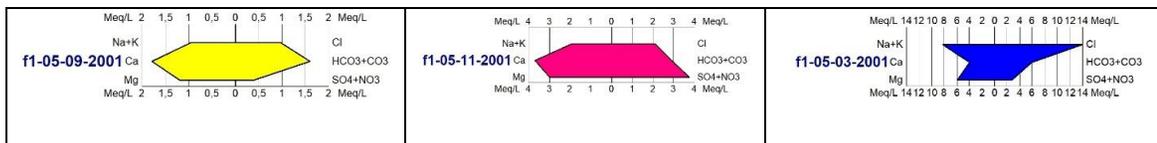


Figura 42. Concentraciones de diagramas de Stiff- Lomas y colinas.

Fuente: Elaboración propia.

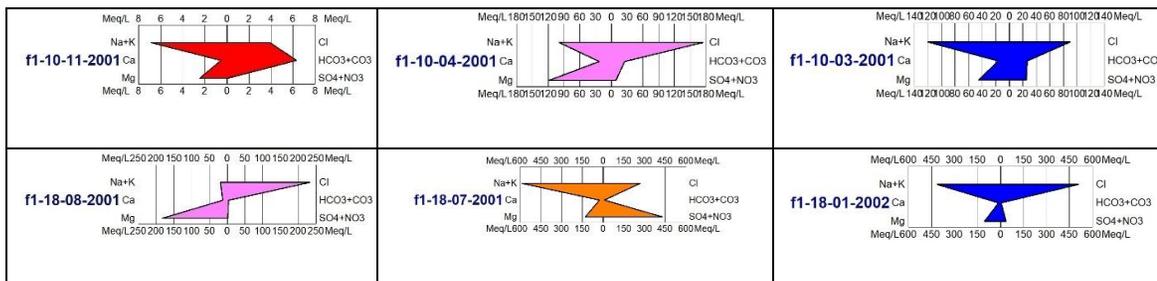


Figura 43. Concentraciones de diagramas de Stiff- Plano de marea.

Fuente: Elaboración propia.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



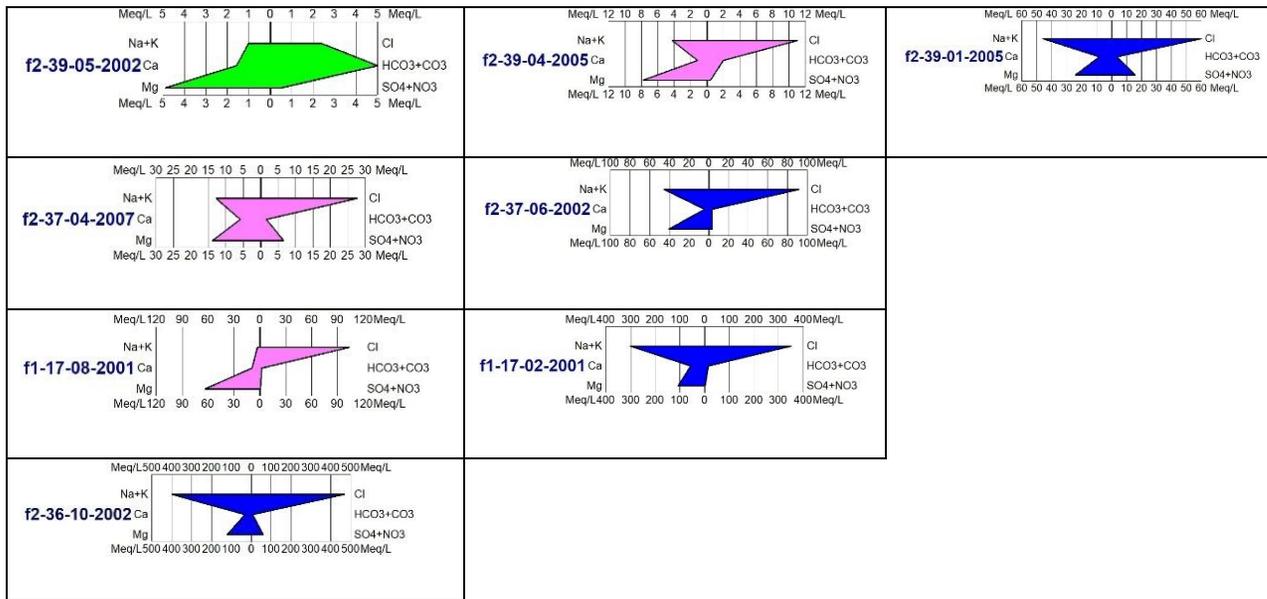


Figura 44. Concentraciones de diagramas de Stiff- Plataforma costera.

Fuente: Elaboración propia.

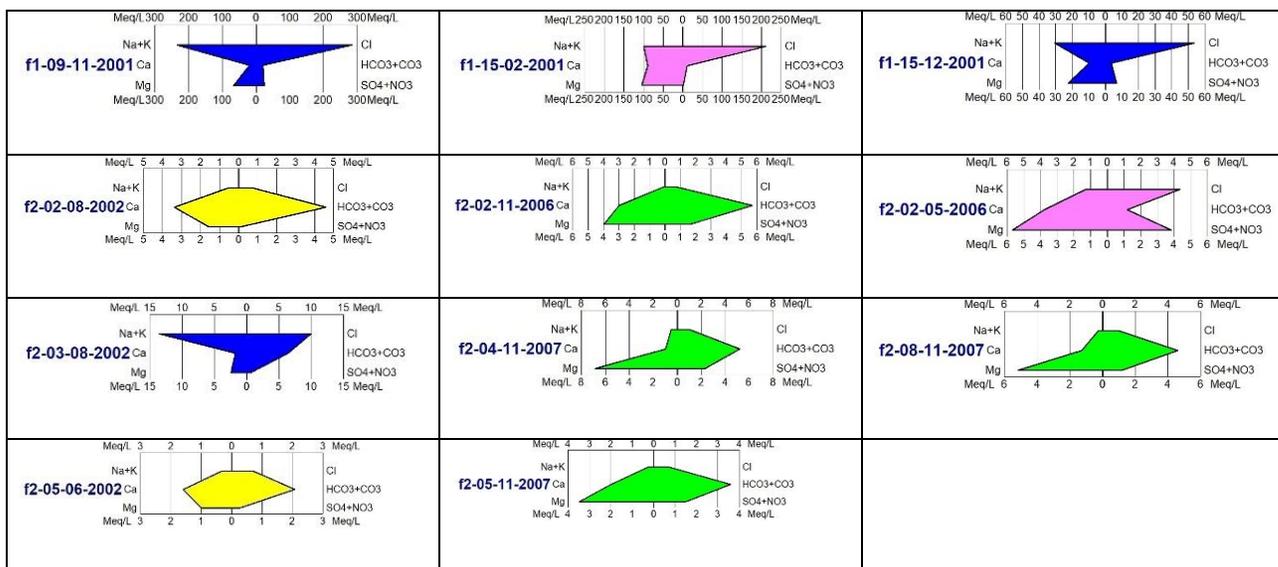


Figura 45. Concentraciones de diagramas de Stiff- Terraza.

Fuente: Elaboración propia.



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

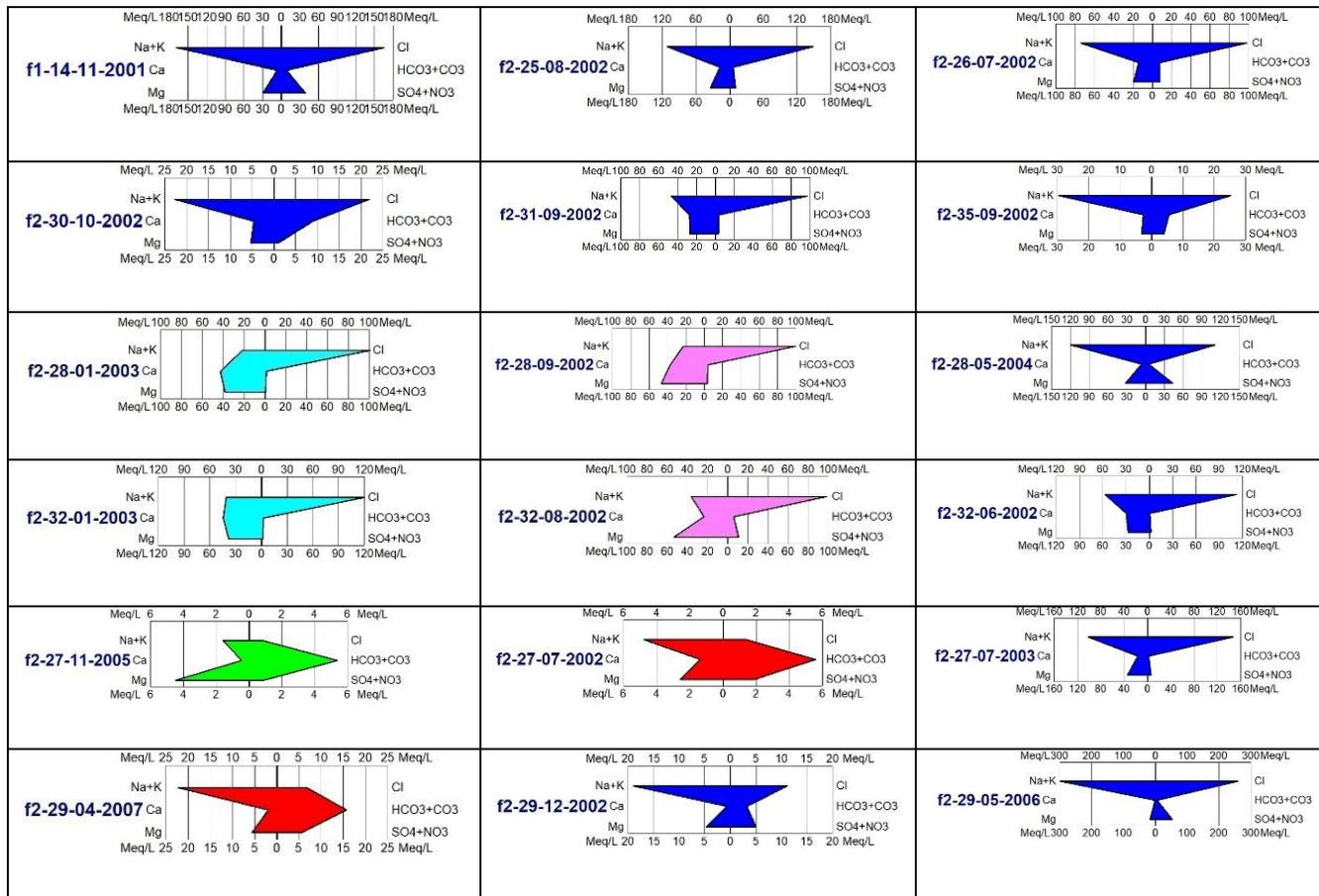


Figura 46. Concentraciones de diagramas de Stiff- Plano de inundación.

Fuente: Elaboración propia.





UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

ANEXO B- CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Tabla 11. Correlación de Spearman para todas las muestras de agua freática en la zona de estudio.

	Precipitación	T°C	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO3	CO3	Cl	SO4	CE	SDT	SAR
Precipitación	1	0,18**	-,106*	-,165**	-,117*	-,113*	0,05	-0,02	0,00	-,107*	-0,07	-,104*	-,116*	-,161**
T°C		1	0,16**	-0,05	-0,08	-0,04	-0,03	-0,09	-0,10	-0,04	-0,10	0,05	-0,02	0,00
pH			1	-0,07	-0,04	0,04	0,14**	0,20**	0,19**	0,04	-0,02	0,07	0,03	0,08
Ca				1	0,85**	0,67**	0,42**	0,14**	-,204**	0,80**	0,54**	0,69**	0,68**	0,40**
Mg					1	0,78**	0,56**	0,26**	-0,09	0,89**	0,62**	0,71**	0,78**	0,46**
Na						1	0,58**	0,34**	0,10	0,92**	0,71**	0,75**	0,78**	0,52**
K							1	0,35**	0,01	0,64**	0,51**	0,49**	0,57**	0,32**
HCO3								1	0,19**	0,29**	0,27**	0,22**	0,24**	0,18**
CO3									1	0,01	0,13*	0,11*	-0,03	0,22**
Cl										1	0,64**	0,78**	0,82**	0,54**
SO4											1	0,59**	0,58**	0,40**
CE												1	0,69**	0,64**
SDT													1	0,50**
SAR														1

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Fuente: Elaboración propia.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

ANEXO C- RESULTADOS DE LA REGRESIÓN SIMPLE

Tabla 12. Resultados de la regresión simple para el catión sodio- Modelados vs Experimentales.

Coeficientes- Sodio				
Parámetro	Mínimos cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Estadístico Valor-P
Intercepto	-5,57099	0,604714	-9,21261	0,0000
Pendiente	1,01126	0,000301309	3356,22	0,0000
Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,48102E8	3,48102E8	11264216,55	0,0000
Residuo	4944,54	30,9034		
Total (Corr.)	3,48107E8			
Coefficiente de correlación (0,999993)	R-cuadrada 99,9986 %	Error estándar del estimado 5,55908	Error absoluto medio 3,92122	Estadístico Durbin-Watson 1,45177 (P=0,0002)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Resultados de la regresión simple para el catión magnesio- Modelados vs Experimentales.

Coeficientes- Magnesio				
Parámetro	Mínimos cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Estadístico Valor-P
Intercepto	-0,521318	0,174879	-2,98102	0,0033
Pendiente	1,0086	0,000463375	2176,63	0,0000
Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,02911E7	1,02911E7	4737739,40	0,0000
Residuo	347,544	2,17215		
Total (Corr.)	1,02914E7			
Coefficiente	R-cuadrada	Error	Error	Estadístico Durbin-



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

de correlación (0,999983)	99,9966 %	estándar del estimado 1,47382	absoluto medio 0,9174	Watson 1,45517 (P=0,0002)
------------------------------	-----------	-------------------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados de la regresión simple para el catión potasio- Modelados vs Experimentales.

Coeficientes- Potasio				
Parámetro	Mínimos cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Estadístico Valor-P
Intercepto	-0,0876367	0,11103	-0,789309	0,4311
Pendiente	1,00957	0,000355375	2840,87	0,0000
Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,43653E7	1,43653E7	8070519,66	0,0000
Residuo	284,796	1,77998		
Total (Corr.)	1,43656E7			
Coefficiente de correlación (0,99999)	R-cuadrada 99,998 %	Error estándar del estimado 1,33416	Error absoluto medio 0,467917	Estadístico Durbin-Watson 1,90154 (P=0,2663)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Resultados de la regresión simple para el catión cloruro- Modelados vs Experimentales.

Coeficientes- Cloruro				
Parámetro	Mínimos cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Estadístico Valor-P
Intercepto	-6,07541	1,14731	-5,29533	0,0000
Pendiente	1,00674	0,00029542	3407,84	0,0000
Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,07273E9	1,07273E9	11613362,69	0,0000



Certificado SC 5278-1



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Residuo	14779,2	92,37		
Total (Corr.)	1,07274E9			
Coefficiente de correlación (0,999993)	R-cuadrada 99,9986 %	Error estándar del estimado 9,61093	Error absoluto medio 6,98655	Estadístico Durbin-Watson 1,25669 (P=0,0000)

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D- ÍNDICES DE SATURACIÓN DE MINERALES

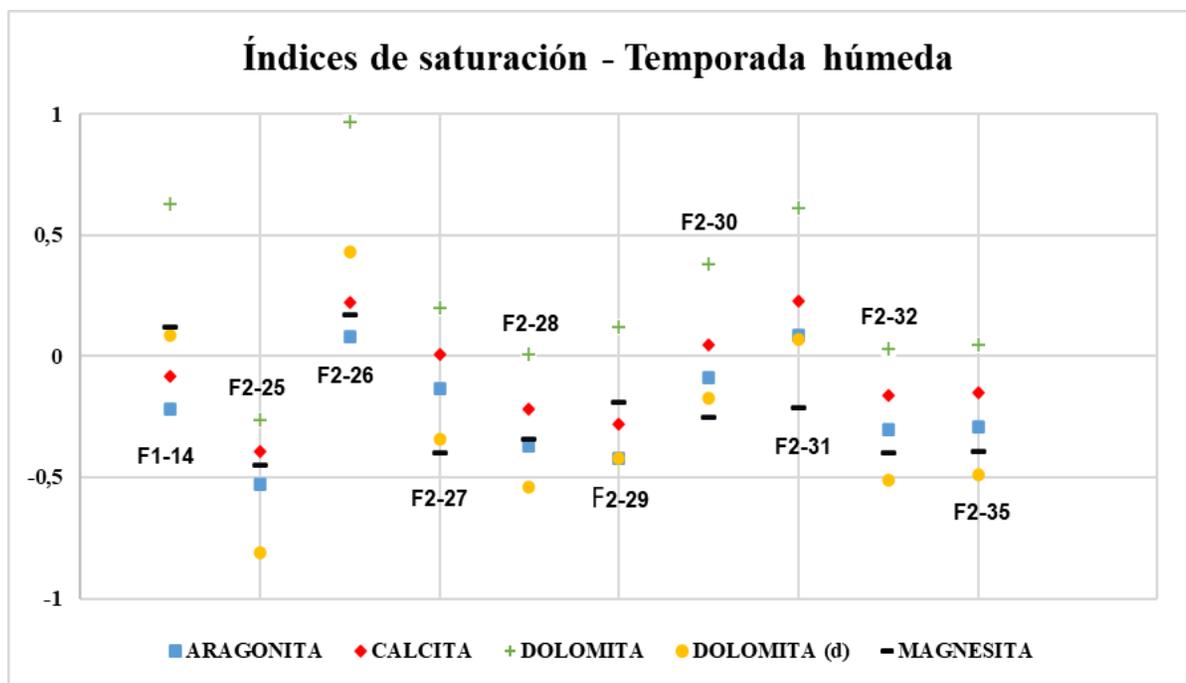


Figura 47. Índices de saturación de minerales en temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1

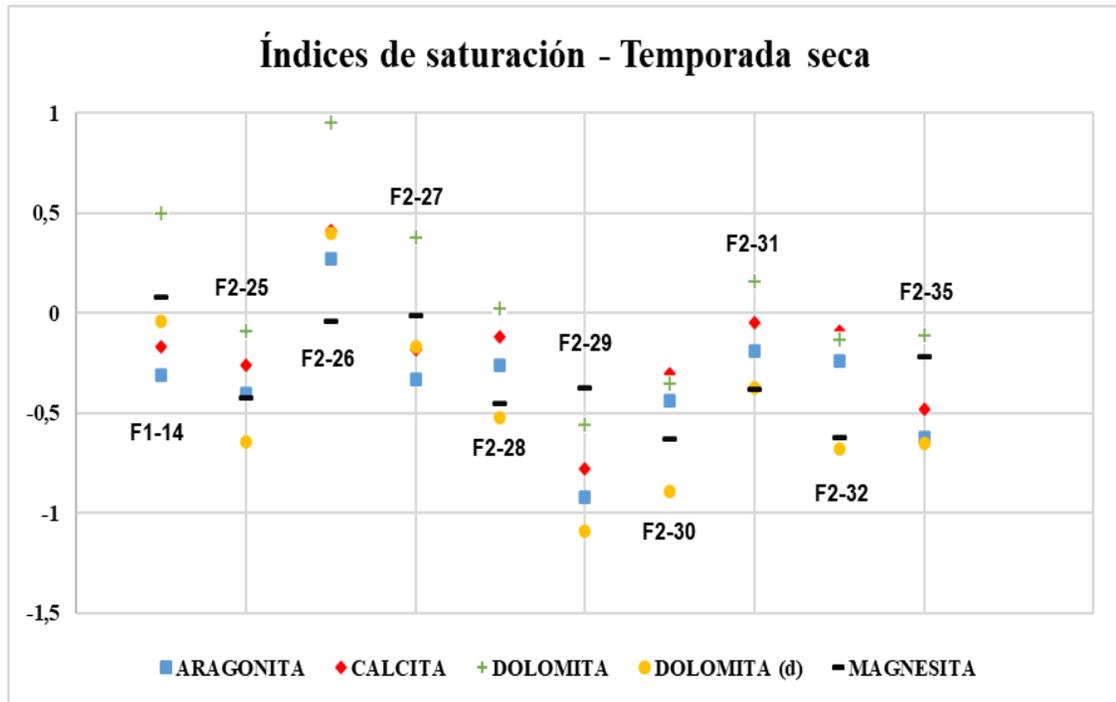


Figura 48. Índices de saturación de minerales en temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.

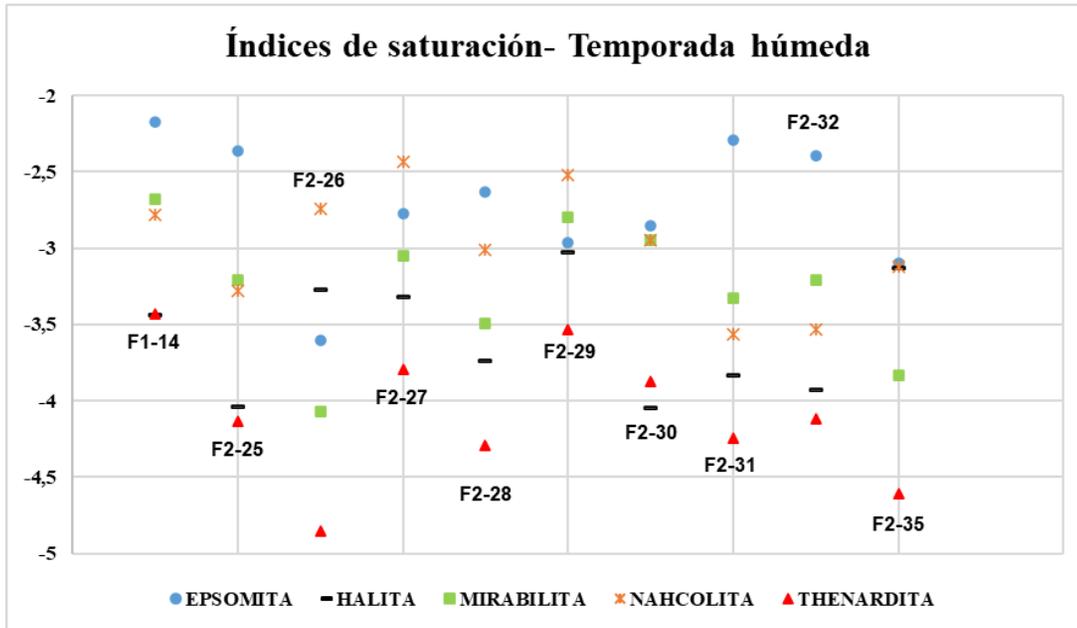


Figura 49. Índices de saturación de minerales en temporada húmeda.

Fuente: Elaboración propia.

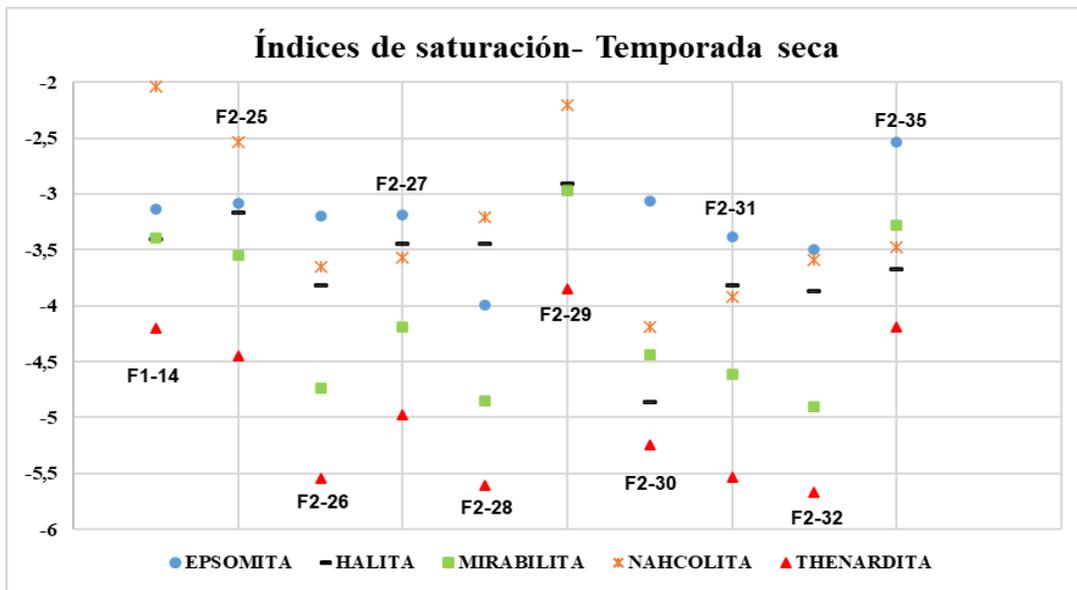


Figura 50. Índices de saturación de minerales en temporada seca.

Fuente: Elaboración propia.