



"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

## EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DEL PROCESO DE SALINIZACIÓN EN EL CORREGIMIENTO DE LA DOCTRINA, CÓRDOBA MEDIANTE MÉTODOS ESTADÍSTICOS E HIDROGEOQUÍMICOS



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



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

**NEIDER ANTONIO BURGOS ORTÍZ**

**ANGELA ISABEL VILLALBA LÓPEZ**

**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](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



## EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DEL PROCESO DE SALINIZACIÓN EN EL CORREGIMIENTO DE LA DOCTRINA, CÓRDOBA MEDIANTE MÉTODOS ESTADÍSTICOS E HIDROGEOQUÍMICOS



NEIDER ANTONIO BURGOS ORTÍZ

ANGELA ISABEL VILLALBA LÓPEZ

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

Director (es):

MÓNICA CECILIA CANTERO BENÍTEZ, M.Sc. Ciencias Agrarias

ZORAYA YASQUINE MARTÍNEZ LARA, M.Sc. Geomorfología y Suelos

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

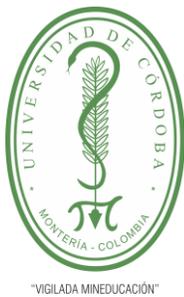
MONTERÍA-CÓRDOBA

2021



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# 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.**



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

## Nota de aceptación

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

*Dedico esta tesis a todas las personas que siempre creyeron en mí, en especial:*

*A mi padre Antonio Rafael Burgos Ballesteros.*

*A mi madre Nuris Lucia Ortiz Ortiz.*

*A mi hermana Ana Milena Burgos Ortiz.*

*Y a mi sobrino Alí David Núñez Burgos.*

*Sé que nunca se los he dicho personalmente, pero si están leyendo esto quiero que sepan que los amo más que a nada en este mundo y me siento orgulloso de haber nacido en esta familia, dicho lo anterior mi deseo es que quede plasmado en este escrito que todo esto fue por ustedes y para ustedes.*

*Neider Antonio burgos Ortiz*



***Por una universidad con calidad, moderna e incluyente***

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

### *Agradecimientos:*

Agradezco primeramente a toda mi familia en particular a mis padres por haberme dado la vida, educación apoyo y consejos. A mis compañeras Angela Villalba y Adriana Raciny, por su acompañamiento y amistad incondicional durante este largo proceso. A la profesora Mónica Cantero por su trabajo como directora, guiándonos en este proyecto.

### *Agradecimientos especiales a:*

Le agradezco inmensamente a nuestra asesora Zoraya Yasquine Martínez Lara, por su compromiso y entrega total con este trabajo, demostrando su alto nivel profesional y su calidad como ser humano en cada paso, probando el hecho de que no se puede pedir a un mejor tutor.

*Neider Antonio burgos Ortíz*



Certificado GP 134-1



ISO 9001

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](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

*A la niña que fui hace un tiempo,*

*Has surgido como nace el amanecer con cada rayo de sol, aferrándote desde las entrañas a las esperanzas que llevas inoculadas entre las sienas, todo el miedo que guardas entre las costillas el día menos esperado se convertirá en un mar lleno de risas, y a pesar de que hay tantas incógnitas tambaleándote los días, llegarás a despejarlas a lo largo de tu vida. Derrámate por completo entre tus folios, y no solo hablo de escribir poesía, sino simplemente derramarte, como sangre derramada en una guerra o en un combate a fuego-lento. Tienes tanto por lo que escribir, casi tanto como en que vivir. Porque la vida, mi niña, es aquí y ahora, ahora y siempre.*

*Angela Isabel Villalba López*



Certificado GP 134-1



ISO 9001

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](http://www.unicordoba.edu.co)



# 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 2010, vigencia: 4 años

"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

### *Agradecimientos especiales a:*

A la Universidad de Córdoba, por convertirse en mi segundo hogar, abrirme las puertas con entusiasmo y acogerme cálidamente en mi formación académica. Estoy muy orgullosa de pertenecer a tan excelente institución a la cual le debo mis mejores éxitos, experiencias y logros como estudiante.

A mis directoras Zoraya Martínez y Mónica Cantero, por su paciencia, dedicación, entrega y apoyo incondicional. Gracias a sus pautas, acompañamiento y su disposición por compartir sus conocimientos fue posible la elaboración de este trabajo. Les agradezco por alentarnos, animarnos y enseñarnos a vivir sin temores, gracias incluso por corregir con mucho amor nuestros errores.

A mis compañeros de estudio que se convirtieron en grandes amigos Neider Burgos y Adriana Raciny. Les doy las gracias por estar en mi vida, por ayudarme en momentos difíciles, por disfrutar conmigo los buenos instantes, por su confianza y comprensión, y por todo lo demás muchas gracias, los quiero con el alma.

### *Agradecimientos:*

Al amor de mi vida, Jesús Ángel Burgos. Por motivarme y apoyarme en la realización de esta tesis, has convertido todo en una hermosa sinfonía, gracias por el amor que de ti se despliega y que me ha hecho levantar las alas y apoyarme en ellas cada vez que quiero alzar el vuelo.

A mi hermana del alma María Correa, por brindarme una amistad verdadera y sincera a lo largo de los años. Gracias por escucharme, por estar siempre atenta por ser motivo de inspiración y admiración, por acompañarme incondicionalmente y con cariño desmedido.

*Angela Isabel Villalba López*



***Por una universidad con calidad, moderna e incluyente***

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS.....	18
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	19
4. ESTADO DEL ARTE.....	25
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
6.1. CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA, IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS Y EVOLUCIÓN DE LAS AGUAS.....	39
6.1.1. CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS .....	39
6.1.2. IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS .....	42
6.1.3. EVOLUCIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS .....	47
6.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	58
6.2.1. DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES .....	58
6.2.2. CORRELACIÓN DE SPEARMAN.....	60
6.2.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	62
6.2.4. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS MÚLTIPLES .....	64
6.3. MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	66
6.3.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	66
6.3.2. ESPECIACIÓN QUÍMICA.....	68
6.3.3. MODELO DE SOLUBILIDAD .....	80



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# 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 2010, vigencia: 4 años

6.4. TÉCNICAS DE MANEJO DE SUELO .....	83
7. CONCLUSIONES.....	85
8. RECOMENDACIONES.....	87
9. BIBLIOGRAFÍA.....	87
10. ANEXOS .....	95
10.1. ANEXO A .....	95
10.2. ANEXO B .....	98

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Relación de absorción sodio (RAS) .....	34
Tabla 2. Conductividad eléctrica (CE) .....	34
Tabla 3. Clasificación de Alekin.....	39
Tabla 4. Porcentaje de pozos por unidad geomorfológica y litológica .....	40
Tabla 5. Clasificación hidroquímica de las aguas por unidad geomorfológica .....	41
Tabla 6. Porcentajes de conductividad eléctrica y RAS .....	41
Tabla 7. Rangos de Spearman.....	60
Tabla 8. Correlación de Spearman .....	61
Tabla 9. Análisis de componentes principales .....	62
Tabla 10. Pesos de los componentes.....	62
Tabla 11. Error absoluto medio .....	66
Tabla 12. Resultados del modelo de especiación.....	69

## LISTADO DE FIGURAS



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# 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 2010, vigencia: 4 años

<b>Figura 1. Localización del área de estudio .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2. Diagrama de Piper delta lacustrino.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 3. Mapa de distribución temporal y espacial de la calidad del agua mediante diagramas de Stiff-Delta lacustrino .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 4. Diagrama de Piper plano de marea.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 5. Mapa de distribución temporal y espacial de la calidad del agua mediante diagramas de Stiff- Plano de marea.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 6. Diagrama de Piper terraza de acumulación .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 7. Mapa de distribución espacial de tipos de agua mediante Stiff- Terraza de acumulación .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 8. Diagrama de Piper Plano de inundación .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 9. Mapa de distribución espacial de tipos de agua mediante Stiff- Plano de inundación .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 10. Cajas y bigotes época seca .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 11. Cajas y bigotes época húmeda .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 12. Mapa de isoconcentración <math>MgSO_4</math> temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha) .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 13. Mapa de isoconcentración <math>Na_2SO_4</math> temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha) .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 14. Mapa de isoconcentración <math>NaCl</math> temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha) .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 15. Mapa de isoconcentración <math>MgCl_2</math> temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha) .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 16. Mapa de isoconcentración <math>NaHCO_3</math> temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha) .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 17. Concentraciones de Stiff- delta lacustrino .....</b>	<b>78</b>



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

Figura 18. Concentraciones de Stiff- plano de marea .....	96
Figura 19. Concentraciones de Stiff- Terraza de acumulación .....	97
Figura 20. Concentraciones de Stiff- plano de inundación.....	98

## LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Diagrama de Gibbs temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha) .....	43
Gráfico 2. Relación $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ vs CE que ilustra el proceso de evaporación .....	44
Gráfico 3. Relación $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ vs $(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{=4})$ que ilustra el proceso de intercambio iónico .....	45
Gráfico 4. Relación $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs CT que ilustra el proceso de disolución de silicatos ..	46
Gráfico 5. Relación $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ que ilustra el proceso de intrusión marina .....	47
Gráfico 6. Diagrama de Mifflin.....	49
Gráfico 7. Pesos de los componentes.....	64
Gráfico 8. Análisis de correspondencias múltiples .....	66
Gráfico 9. Regresión lineal con $\text{K}^+$ .....	67
Gráfico 10. Regresión lineal con $\text{Mg}^{++}$ .....	67
Gráfico 11. Regresión lineal con $\text{Na}^+$ .....	68
Gráfico 12. Regresión lineal con $\text{Cl}^-$ .....	68
Gráfico 13. Índices de saturación en temporada húmeda .....	81
Gráfico 14. Índices de saturación en temporada seca .....	82



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 2010, vigencia: 4 años

### 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 y sus herramientas, para describir la variabilidad espacial y temporal de la composición del agua freática, permitiendo simular las reacciones químicas y procesos de transporte. En zonas deltaico-estuarinas, se presenta el proceso de salinización y/o sodificación debido a causas naturales y a malas técnicas agrícolas, por lo tanto, en esta investigación se evaluó la dinámica espacial y temporal de este proceso en la zona deltaico-estuarina del río Sinú, en función de métodos hidrogeoquímicos y estadísticos. A partir del análisis de los datos mediante los diagramas hidroquímicos, se encontró que las aguas se clasifican de manera general como cloruradas sódicas y se identificaron los procesos hidrogeoquímicos dominantes, siendo la evaporación y el intercambio iónico los que controlan la dinámica del sistema. A través de los análisis estadísticos se dedujo que los iones cloruro y sodio estaban fuertemente relacionados. Con la modelación, se obtuvo que la principal sal presente en la zona es el  $MgSO_4$ , seguida del  $NaCl$  ya que presentaron las concentraciones más altas. Con los mapas de isoconcentración de las sales, se observó que la zona noreste del plano de inundación es la más afectada por el proceso de salinidad. 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: Salinidad, aguas freáticas, clasificación hidroquímica, procesos hidrogeoquímicos, análisis estadístico multivariado, modelación hidrogeoquímica.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# 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 2010, vigencia: 4 años

"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

## ABSTRACT

Within the processes of soil degradation, salinization has been defined as one of the most important in the territory. To study this phenomenon, it was necessary to use the hydrogeochemical and tools to describe the composition of spatial and temporal variability of groundwater, allowing us to simulate chemical reactions and transport processes. In the areas deltaico-estuarine, the process of salinization and/or sodification occurs due to natural causes and bad farming techniques, therefore, this research evaluated the spatial-temporal dynamics of this process in the area deltaico-estuary of the river Sinu according to methods hidrogeoquímicos and statistical. Through the analysis of the data using hydrochemical diagrams, it was found that the waters are generally classified as sodium chlorinated and the dominant hydrogeochemical processes were identified, where evaporation and ion exchange are those that control the dynamics of the system. With the use of statistical analyses, it was deduced that chloride and sodium ions were strongly related. Through the modeling, it was obtained that the main salt present in the area is  $MgSO_4$ , followed by  $NaCl$  since they presented the highest concentrations, with the isoconcentration maps of salts, it was observed that the northeast area of the flood plane is the most affected by the salinity process. The mineralogical species that generate increased salinity due to being modeled as subsaturated phases are halite, epsomite, mirabilite, nahcolite and thenardite.

Key Words: salinity, groundwater, hydrochemical classification, hydrogeochemical processes, multivariate statistical analysis, hydrogeochemical modeling.



Certificado GP 134-1

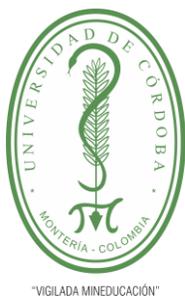


Certificado SC 5278-1



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



## 1. INTRODUCCIÓN

La salinización es un proceso químico de origen natural o inducido por las actividades antrópicas, mediante el cual ocurre el aumento, ganancia o acumulación de sales solubles en el suelo, lo cual tiene implicaciones negativas sobre los servicios y las funciones ecosistémicas y ambientales que ofrecen los suelos (IDEAM 2015).

La principal causa natural de salinidad de los suelos es el ascenso capilar de capa freática con características salinas, siendo la fuente de salinidad la meteorización del material original del suelo de naturaleza salina. En este caso el micro relieve juega un rol determinante en la presencia de mayor o menor cantidad de sales. Este fenómeno está asociado a regiones áridas, semiáridas y estepas, donde la precipitación es menor a la evapo-transpiración potencial, generando un balance hídrico negativo. Sin embargo, también puede aparecer en lugares con prolongados períodos de sequía, como en zonas climáticas templadas y tropicales secas. Otra causa natural de salinización de los suelos es la cercanía al mar. Zonas costeras que normalmente son inundadas con agua de mar, reciben constantemente aporte de sales, lo cual lleva a estos suelos a la salinización. Las principales causas antrópicas pueden ser: Riego con aguas salinas; mal uso del riego (aunque las aguas sean de buena calidad) que provocan ascensos de capas freáticas salinas; uso de fertilizantes (algunos fertilizantes contienen altos niveles de sales que son potencialmente perjudiciales, tales como cloruro de potasio o sulfato de amonio) y otros insumos, especialmente en zonas de agricultura intensiva en las que el suelo es poco permeable y las posibilidades de lixiviación son limitadas; contaminación de suelos por uso de agua y subproductos industriales salinos (por ejemplo, riego con vinaza); cambio brusco del uso de la tierra (por ejemplo, desmonte) que provoca revenimientos salinos desde profundidad hacia las capas superficiales del suelo (Courel 2019).



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Actualmente, la salinidad de los suelos es un problema que restringe las actividades agrícolas, sin importar si son grandes o pequeñas extensiones de tierra, ya que provoca la disminución de la capacidad productiva de los suelos y rendimiento de los cultivos, afectando la calidad ecológica del medio ambiente, principalmente en zonas donde la evaporación superficial y la absorción de agua por las plantas exceden el nivel de las precipitaciones, lo que origina un movimiento ascendente de las sales disueltas en las aguas subterráneas, desplazándose estas hacia la superficie del suelo, degradando con frecuencia las condiciones estructurales y químicas de los suelos (Hanay et al. 2004; Liang et al. 2005; Smith y Smith 2007; Mata et al. 2014).

De acuerdo con lo reportado en el manual técnico de mapeo de suelos afectados por salinidad expedido por la FAO en 2021, la salinización de los suelos es uno de los principales inconvenientes que se presentan en terrenos de uso agrícola extensivo, las sales retienen el agua en el suelo con un alto potencial osmótico que limitan un fácil intercambio de agua y nutrientes con las raíces de las plantas. Consecuentemente, retardan el crecimiento y desarrollo de muchas plantas. La literatura reciente a escala global, utiliza datos que mayormente fueron recolectados a finales de los setenta y que describen una distribución global de las áreas afectadas en aproximadamente 1.000 millones de hectáreas (FAO/IIASA/ISRIC/ISS- CAS/JRC, 2008; Wicke et al. 2011; Ivushkin et al. 2019).

Colombia no es ajena a este tipo de degradación, según el Mapa nacional de degradación de suelos por salinidad expedido por el IDEAM en 2017, el 12.3% (14,041.883 ha) de los suelos del área continental e insular de Colombia presentan algún grado de degradación por salinización, siendo más concentrada en las áreas hidrográficas del Caribe, Magdalena, Cauca y el área insular.

En cuanto a la zona de estudio analizada en este trabajo de investigación, esta se ubica al norte de Colombia, en el corregimiento La Doctrina, departamento de Córdoba, zona



***Por una universidad con calidad, moderna e incluyente***

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



agrícola que dista 594 kilómetros del mar Caribe. Una de las principales problemáticas que aqueja a sus habitantes, especialmente a los agricultores, es el avance en los procesos de salinización de los suelos que afecta el cultivo de arroz como principal actividad agrícola, disminuyendo su rendimiento y afectando la economía de las familias productoras.

De acuerdo con la dinámica de estos suelos, los máximos valores de salinidad se registran en periodo seco debido a la intensa evaporación, mientras que valores mínimos se presentan en la época húmeda cuando el aporte fluvial es mayor por efecto de las precipitaciones. La salinidad en las masas de agua cercanas a la costa es menor cuando existe aporte fluvial, como en el caso de los deltas actual y abandonado del río Sinú, de igual manera para el periodo lluvioso, el aporte del río Sinú reduce la salinidad a valores entre 26,5% y 31,8%. Para el periodo seco, el incremento en salinidad se hace evidente y los valores obtenidos alcanzan hasta un 34,5% (Bustamante y Cantero 2008).

En la zona de La Doctrina son diversas las causas, naturales y antrópicas, que se relacionan con la salinización de los suelos; naturales como geología y mineralogía de los depósitos recientes, pendiente, altura y cercanía a la costa; antrópicas, como la tala y sustitución de manglar por arroz, y el uso excesivo de agroquímicos (Bustamante y Cantero 2008).

Los suelos afectados por salinidad tienen un importante impacto sobre el medio, el agua y la agricultura. Influyen negativamente sobre la productividad agrícola y la calidad del suelo y el agua superficial pero también tienen un potencial económico significativo si son manejados correctamente. Es necesario un mejor conocimiento de su distribución, características y tendencias, para su manejo sustentable y su explotación económica (Wicke et al. 2011; Omuto et al. 2021).

En la actualidad, el análisis de la salinización en La Doctrina se relaciona con métodos clásicos de monitoreo convencional freaticométrico y de suelo, y con análisis estadísticos



***Por una universidad con calidad, moderna e incluyente***

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Para avanzar en el conocimiento del problema, y tomando en cuenta la validez de las herramientas hidrogeoquímicas en la caracterización de ciertos problemas ambientales, en esta investigación se adelantan estudios que mediante modelación hidrogeoquímica y análisis estadísticos, favorezcan la comprensión del sistema agua-suelo para el análisis de la salinidad en la zona de La Doctrina. Con este propósito se determinan los procesos hidrogeoquímicos que son responsables de la dinámica de las sales, las especies químicas y mineralógicas que condicionan la salinidad en los suelos de este sector, y la variación espacial de este proceso para las diferentes temporadas analizadas.

## 2. OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar la dinámica espacial y temporal de la salinización, en función de la especiación química y mineralógica, y los procesos hidrogeoquímicos presentes en las aguas freáticas en el corregimiento de la Doctrina, Córdoba, mediante la aplicación de métodos estadísticos e hidrogeoquímicos.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los procesos hidrogeoquímicos presentes en el sistema agua freática-suelo de la Doctrina, mediante el uso de diagramas hidroquímicos.
- Caracterizar las modificaciones de las principales fases minerales asociadas al proceso de salinidad, y su relación con los parámetros fisicoquímicos del sistema hidrogeológico, mediante métodos estadísticos e hidrogeoquímicos.
- Proponer estrategias que favorezcan la disminución del impacto del fenómeno en el sistema suelo- planta en la Doctrina, Córdoba.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La salinización es un proceso complejo que involucra el movimiento de sales y agua en los suelos durante los ciclos estacionales y las interacciones con las aguas subterráneas. El proceso de salinización 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).

La salinización es el proceso de acumulación de sales en el perfil del suelo, distinguiéndose dos tipos: primaria y secundaria (Amezqueta 2006; Zhou et al. 2013). La primera es resultado del proceso natural que se desarrolla en zonas donde el material parental es rico en sales y la tasa de evapotranspiración es mayor que la tasa de precipitación. Otros factores que pueden inducir la salinización son determinados patrones naturales de drenaje o rasgos topográficos, la estructura geológica o la distancia al mar. Por su parte, la acumulación de sales que se produce como consecuencia de las actividades antrópicas no sustentables es conocida como salinización secundaria. La acumulación de sales provenientes del agua subterránea dependerá de las propiedades hidráulicas del suelo y de las condiciones climáticas (Guida et al. 2017).

Los métodos hidroquímicos permiten, mediante el análisis de datos de calidad de agua y/o mineralogía del suelo, analizar los elementos y procesos que ocurren en un sistema acuoso-sólido como las aguas subterráneas, y que son fuente natural de salinidad para el suelo. Para su estudio se utilizan herramientas que permiten clasificar el agua en tipos químicos y modelar los procesos hidrogeoquímicos en el sistema agua-suelo, como los diagramas hidroquímicos, el cálculo de índices hidroquímicos y la modelación hidrogeoquímica.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://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 clasificación de Alekin toma en cuenta los aniones más importantes que son los que le dan la clase al agua: Bicarbonatadas ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=}$ ), Cloruradas ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfatadas ( $\text{SO}_4^{=}$ ) que, a su vez, se subdividen en tres grupos, los cuales están en función del catión dominante  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , o  $\text{Na}^+$ ; esto permite tener un conocimiento del medio por donde el agua transita, el tipo de roca que está lixiviando, las aguas que son de recién infiltración o si hay ahí una zona de recarga (Fernández 2009).

Para la clasificación de aguas y el análisis de procesos, comúnmente se utilizan una serie de diagramas tales como: Gibbs, relaciones de iones, Mifflin, Piper Hill y Stiff. que vienen incorporados en softwares como, por ejemplo, Aquachem y Diagrammes (Quan et al. 2005). Para el caso de la modelación hidrogeoquímica se pueden implementar modelos directos e inversos de conformidad con los fines que persiga el estudio; los directos, pueden favorecer la caracterización de especies químicas, y el cálculo de actividades; los modelos inversos, permiten la identificación de los procesos en el sistema objeto de análisis.

Gibbs sugirió que una gráfica simple de TDS versus la relación de ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+/\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{++}$ ) podría proporcionar información sobre la importancia relativa de los principales mecanismos naturales que controlan la química del agua subterránea. Por lo tanto, la gráfica de Gibbs se emplea en este estudio para comprender y diferenciar las influencias de la interacción roca-agua, la evaporación y la precipitación en la química del agua.

Las interacciones agua-roca juegan un papel importante en la hidroquímica del agua subterránea. 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). Con el uso del diagrama de Mifflin se proporciona la suficiente información para identificar la presencia de flujos regionales, así como en la caracterización de algunos procesos evolutivos de origen geogénico o antropogénico.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



El diagrama de Piper-Hill es la combinación de un diagrama ternario de la composición catiónica principal ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{++}$ ) y un diagrama ternario de la composición aniónica principal ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{=}$ ) en un diamante central, lo convierten en una herramienta invaluable para identificar grupos o facies hidroquímicas e interpretar algunos procesos químicos que representa el conjunto de datos a analizar (Peeters 2014; Malagón 2017). Además, este diagrama permite reflejar las variaciones provocadas por la presencia de mezclas, precipitaciones, disoluciones, procesos de intercambio iónico que están ocurriendo en el comportamiento del agua, es decir, visualizar la evolución hidrogeoquímica del agua.

El diagrama de Stiff representa las concentraciones de los iones en un polígono cuyo lado izquierdo describe el contenido de cationes mayores y el lado derecho, los aniones mayores. La distancia desde el eje central es proporcional a las concentraciones en ( $\text{mEq l}^{-1}$ ) de iones individuales. La ventaja de este patrón es que el agua de composición química similar tiene geometría de forma similar (Tikhomirov 2016; Malagón 2017).

Los métodos estadísticos multivariados como el análisis de componentes principales (ACP), transforma las variables originales en algunas variables integradas, llamadas componentes principales (CP) (Bu et al. 2010), y se pueden extraer los CP con valores propios superiores a uno según el criterio de Kaiser (Cloutier et al. 2008), y el análisis de correspondencias múltiples (ACM) es simple de aplicar y puede proporcionar información sobre posibles patrones de asociación entre las variables (Silva et al. 2012).

La modelación hidrogeoquímica consiste en utilizar los datos de caracterización del sistema: mineralogía, composición de gases, datos isotópicos, fisicoquímicos, para intentar determinar que reacciones han ocurrido a lo largo de la trayectoria y tiempo de residencia del agua subterránea con su medio geológico (Fagundo et al. 2002); aplicando métodos numéricos, bases de datos y ecuaciones cinéticas y termodinámicas, que



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



proporcionan información detallada acerca del origen, interacción agua-roca y patrones de flujo (Hidalgo y Cruz Sanjulián 2001).

Muchos de estos estudios se realizan por medio de la especiación química, modelación directa que consiste en la distribución de un elemento químico particular entre las diferentes formas en las cuales puede existir (especies) en un medio determinado. Incluye tanto los elementos libres (en forma neutra o ionizada) como los variados complejos que pueden formarse con diferentes ligandos (Kreitler 1993); la especiación química en aguas superficiales refleja la complejidad química de ese medio.

Entre los programas de especiación más comúnmente utilizados a nivel internacional se tienen: MINEQL+(Schecher y McAvoy 1992), WHAM7 (Tipping 1994), MINTEQA2 (Brown y Hosseinipour 1991), CHESS, PHREEQC, WATEQ4F, HYDROQUAL, entre otros. PHREEQC calcula la partición de un elemento entre las diferentes especies acuosas y complejos para determinar el estado de saturación en la solución (Fagundo et al. 2012; Lozada 2018). El modelo se fundamenta en un conjunto de algoritmos de aproximación numérica, que acomodan una serie de principios termodinámicos y fisicoquímicos a los datos experimentales, utilizando los valores contenidos en las respectivas bases de datos (Morán 2016). PHREEQC, simula los procesos geoquímicos que resultan de las reacciones entre una fase acuosa con los minerales de la formación acuífera por la que circula.

En la actualidad, los modelos de especiación química para aguas, además de predecir la distribución las especies químicas en un sistema favorecen la comprensión de su toxicidad química, biodisponibilidad, destino ambiental y transporte (VanBriesen et al. 2010). Por lo anterior, la aplicación de los modelos y las técnicas hidrogeoquímicas son herramientas importantes que permiten analizar y responder ciertos interrogantes que se presentan en sistemas complejos, como es el caso de los acuíferos (superficiales, profundos o costeros) donde la salinidad es una consecuencia que puede ser analizada



***Por una universidad con calidad, moderna e incluyente***

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



como resultado de causas diversas como la intrusión salina, procesos hidroclimáticos y procesos hidrodinámicos (Zúñiga et al. 2010).

Para estimar la salinización se han utilizado diferentes métodos, desde los clásicos de monitoreo convencional freaticométrico y de suelo, modelos estadísticos como la regresión lineal múltiple, interpolación por el método del krigado, análisis y modelación hidrogeoquímica; las técnicas estadísticas multivariadas se utilizan ampliamente en todo el mundo en estudios de la calidad del agua subterránea para determinar las fuentes y los factores que afectan la química del agua subterránea (Wu et al. 2020) también se implementan herramientas de monitoreo con teledetección y sensores electromagnéticos móviles georreferenciados (SEMG) que favorecen el modelado espacial asistido por sistemas de información geográfico (SIG), lo cual permite mapear la salinidad del suelo directa e indirectamente sobre la vegetación, mediante la distancia inversa ponderada (IDW) calcula el valor de cada celda como la media ponderada de los valores del entorno en función del inverso de la distancia, por lo que se asume que los puntos más cercanos tendrán más influencia (Malagón 2017).

Los métodos hidroquímicos permiten, mediante el análisis de datos de calidad de agua y/o mineralogía del suelo, analizar los elementos y procesos que ocurren en un sistema acuoso-sólido como las aguas subterráneas, y que son fuente natural de salinidad para el suelo. Para su estudio se utilizan herramientas que permiten clasificar el agua en tipos químicos y modelar los procesos hidrogeoquímicos en el sistema agua-suelo, como los diagramas hidroquímicos, el cálculo de índices hidroquímicos y la modelación hidrogeoquímica. Para la clasificación de aguas y análisis de procesos, comúnmente se utilizan una serie de diagramas, que vienen incorporados en softwares como, por ejemplo, AQUACHEM Y DIAGRAMMES (Quan et al. 2005). Para el caso de la modelación hidrogeoquímica se pueden implementar modelos directos e inversos de conformidad con los fines que persiga el estudio; los directos, pueden favorecer la



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



caracterización de especies iónicas y químicas, y el cálculo de actividades; los modelos inversos, permiten la identificación de los procesos en el sistema objeto de análisis.

En la actualidad, los modelos de especiación química para aguas, además de predecir la distribución las especies químicas en un sistema favorecen la comprensión de su toxicidad química, biodisponibilidad, destino ambiental y transporte (VanBriesen et al. 2010). Por lo anterior, la aplicación de los modelos y las técnicas hidrogeoquímicas son herramientas importantes que permiten analizar y responder ciertos interrogantes que se presentan en sistemas complejos, como es el caso de los acuíferos (superficiales, profundos o costeros) donde la salinidad es una consecuencia que puede ser analizada como resultado de causas diversas como la intrusión salina, procesos hidroclimáticos y procesos hidrodinámicos (Zúñiga et al. 2010).



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://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

En las últimas décadas la hidrogeoquímica ha sido ampliamente utilizada en la investigación de sistemas hidrogeológicos complejos o difíciles de observar, destacando su importancia en el desarrollo sostenible y la gestión eficaz de los recursos de aguas subterráneas en diversos estudios a nivel mundial como los realizados por Yang et al. (2016), quienes estudiaron los principales iones de las aguas subterráneas en la región sur de la cuenca de Ordos, con el objetivo de evaluar los procesos hidrogeoquímicos que probablemente afecten a la calidad de las aguas subterráneas, para lo cual se utilizaron 150 muestras recolectadas en 2015. Las facies hidroquímicas prevalentes fueron identificadas mediante el análisis hidroquímico del diagrama trilineal de Piper, y las relaciones composicionales fueron utilizadas para evaluar el origen de solutos y los procesos hidrogeoquímicos predominantes responsables de los diversos iones en el agua Subterránea. Los resultados mostraron que los iones se derivan del efecto de lixiviación, evaporación y condensación, intercambio catiónico, efecto de mezcla y actividades humanas.

Barzegar et al. (2017), también identificaron los principales factores que afectan la hidrogeoquímica de los recursos de agua subterránea en la llanura de Marand, noroeste de Irán y evaluaron las fuentes potenciales de elementos principales y traza utilizando análisis estadístico multivariante como el análisis de agrupamiento jerárquico y análisis de factores. Para esto se recolectaron muestras de agua subterránea en tres períodos de muestreo en septiembre de 2013, mayo de 2014 y septiembre de 2014. Los diagramas de Piper mostraron que la mayoría de las muestras pertenecen al tipo de agua Na-Cl y son seguidos por Ca-HCO<sub>3</sub> y Ca-Na-HCO<sub>3</sub>. Las gráficas cruzadas muestran que la meteorización y la disolución de diferentes rocas y minerales, el intercambio iónico, el



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



intercambio iónico inverso y las actividades antropogénicas, especialmente las agrícolas, influyen en la hidrogeoquímica del área de estudio.

Así mismo, Liu et al. (2020), recogieron 80 muestras de agua subterránea de la península de Jiaodong para caracterizar los procesos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas y la idoneidad de las aguas subterráneas para uso doméstico y riego agrícola, y encontraron que las interacciones agua-roca, la evaporación, la disolución del silicato y el intercambio catiónico fueron los Procesos hidrogeoquímicos predominantes responsables de la química del agua subterránea. Cuatro muestras de agua mostraron intrusión de agua de mar y algunas indicaron contaminación de actividades antropogénicas como la industria, la agricultura y la descarga de aguas residuales domésticas.

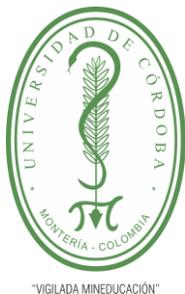
Entre las técnicas hidrogeoquímicas, la modelación, es una de las más útiles y aplicadas en la actualidad y teniendo en cuenta que la salinidad en el agua subterránea se debe a la interacción entre los procesos de precipitación y disolución, el uso de modelos hidrogeoquímicos es una herramienta valiosa para describir la variabilidad espacial y temporal de la composición del agua freática (Alley 1993; Gomes et al. 2019).

Ledesma et al. (2015) caracterizaron y analizaron las propiedades químicas del agua subterránea de la zona citrícola en el Estado de Nuevo León, México, para evaluar los procesos hidrogeoquímicos que controlan el agua subterránea mediante el uso de diferentes modelaciones hidrogeoquímicas y técnicas estadísticas. Mediante un análisis de correlación de Spearman se identificaron las asociaciones entre los componentes geoquímico, el análisis factorial permitió identificar las características químicas del agua; y el análisis de conglomerados jerárquico en combinación con un análisis post-hoc de varianza, permitió clasificar las muestras de agua en tres grupos hidroquímicos: aguas de recarga, aguas de transición y aguas de descarga. Los modelos geoquímicos inversos



***Por una universidad con calidad, moderna e incluyente***

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



se desarrollaron utilizando PHREEQC para dilucidar las reacciones químicas que controlan el sistema acuífero entre un período inicial y final.

Por otra parte, Lozada (2018) identificó los procesos hidrogeoquímicos presentes en un sistema lagunar de México con geología kárstica, mediante el uso de la modelación mediante el software PHREEQC. Uno de los principales procesos identificados mediante 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.

Los métodos estadísticos son herramientas complementarias importantes en la identificación y análisis de los procesos hidrogeoquímicos, ya que mediante su aplicación se pueden evaluar las variables implicadas en un proceso y relación con los procesos. Una aplicación de este tipo, se realizó en el distrito de Udaipur, India (Machiwala y Jhab 2015), donde se exploraron las variaciones espacio-temporales de quince parámetros de calidad del agua subterránea con modelado multivariante y geoestadístico integrado, mediante el software STATISTICA, para detectar y cuantificar las tendencias, y calcular el índice de calidad del agua subterránea basado en SIG. Mediante el uso de correlaciones de Kendall, Spearman, y la prueba de estimación de Sen, se identificaron y cuantificaron las tendencias en los parámetros de calidad del agua subterránea; también, mediante análisis jerárquico de conglomerados y análisis de componentes principales se clasificaron los sitios de muestreo según la naturaleza/fuente de contaminación.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



En estudios como el de Malagón (2017) 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 como el análisis de componentes principales y análisis de agrupamiento jerárquico. 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 geología e hidrogeología del área de estudio, permitió identificar procesos como la disolución de silicatos, óxido-reducción y la contaminación antrópica.

De igual manera Ren et al. (2021), utilizaron enfoques de análisis estadístico y multivariante para reconocer los procesos hidrogeoquímicos y los factores que afectan el agua subterránea en la parte central de la cuenca del Guanzhong. Se examinaron estadísticamente las correlaciones entre 14 parámetros hidroquímicos. Se aplicaron técnicas de análisis de componentes principales, análisis factorial y análisis de conglomerados jerárquicos para analizar las variables fisicoquímicas y comprender los factores que afectan la calidad del agua subterránea en el área de estudio. Los resultados del análisis de correlación indicaron que el intercambio de cationes es el proceso dominante que afecta la concentración de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{++}$  en el agua subterránea. Tanto el ACP como el AF indicaron que la disolución y precipitación de minerales y las actividades humanas son los factores clave que afectan la calidad del agua subterránea.

Para la zona de La Doctrina, entre otros estudios se resaltan, los que recientemente han favorecido el conocimiento de la salinidad. Autores como Combatt et al. (2015) estudiaron la tendencia de la salinidad de las aguas freáticas someras en el área de influencia de la desembocadura del río Sinú en Córdoba-Colombia. Para el muestreo de las aguas freáticas se definieron los periodos seco y húmedo. En las muestras se determinó la conductividad eléctrica (CE), pH,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$  y



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



$SO_4^{=}$ . Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza y pruebas de separación de medias, además análisis de correlación simple entre CE e iones solubles y la estimación de modelos de CE por el método de regresión por pasos, y la clasificación de las aguas freáticas basándose en la contribución de cada variable en los modelos. Los resultados indican que las aguas son marcadamente salinas en localidades próximas a la desembocadura del río Sinú y asociadas a los niveles de iones  $Cl^-$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{++}$ , igualmente se determinó que el tipo de aguas que predomina son las cloruradas en el periodo lluvioso y en el periodo seco no predomina ningún tipo de sal.

La distribución espacial de la salinidad (Narváez et al. 2014) el objetivo del trabajo fue estimar la clase, la magnitud y la distribución espacial de suelos salinos en los últimos 22 km de la desembocadura del río, en periodos secos y lluviosos. Se evaluó la conductividad eléctrica (CE),  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$  y  $SO_4^{=}$ . La información fue procesada en el programa ArcMap 10.6 utilizando el método de interpolación IDW, para estimar el área y la distribución espacial de los suelos salinos. Los datos de CE y de los iones en ambos periodos, para las diferentes profundidades, fueron sometidos a análisis de correlación simple (Pearson) y pruebas de separación de medias. Los resultados indicaron que, en el periodo seco, se acentúan los problemas de salinidad. Los iones  $Cl^-$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{++}$  presentaron correlaciones positivas y altamente significativas en el periodo seco; en el periodo lluvioso, la concentración de  $Na^+$  y  $Mg^{++}$  disminuyó, en tanto que, la concentración de los iones  $Cl^-$ ,  $Ca^{++}$  y  $SO_4^{=}$ , aumentó.

Para el diagnóstico general de la salinización en aguas y suelos, y su impacto socioeconómico (Bustamante y Cantero 2008) realizaron monitoreo periódico y sistemático de salinidad edáfica y de mantos freáticos en dicha zona. El estudio estuvo apoyado por el levantamiento geomorfológico del área, el cual sumado al conocimiento geológico de la misma dio base para una primera zonificación del área en cuanto a su riesgo de salinización. Además, con el objeto de apreciar la evolución del problema de salinidad, se efectuaron desde el año 2002 hasta el 2007 el análisis multitemporal de



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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

imágenes de satélite, de alta resolución, captadas antes y después de la puesta en marcha del proyecto. se pudo calificar el área discretizada de estudio como zona con marcada vocación salina y dinámica propia de salinización, dominada por el flujo convectivo freático, donde la generación de nuevas áreas con problemas de salinidad parece depender, más de factores ligados a los sistemas de producción que de la operación de la Central Hidroeléctrica Urrá I.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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

### 5. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde a la zona de La Doctrina, Córdoba, Colombia, 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, y comprende un área de 3.109,4 ha (Figura 1). Se encuentra dentro de la región de planicie aluvial y de marismas del río Sinú y está conformada por depósitos fluvio-lacustres de edad Cuaternaria con granulometría diversa; el relieve es fundamentalmente plano a plano cóncavo. Reporta una precipitación promedio 1.000 mm/año, una temperatura de 28 °C y una humedad relativa de 80% (Bustamante y Cantero 2008).

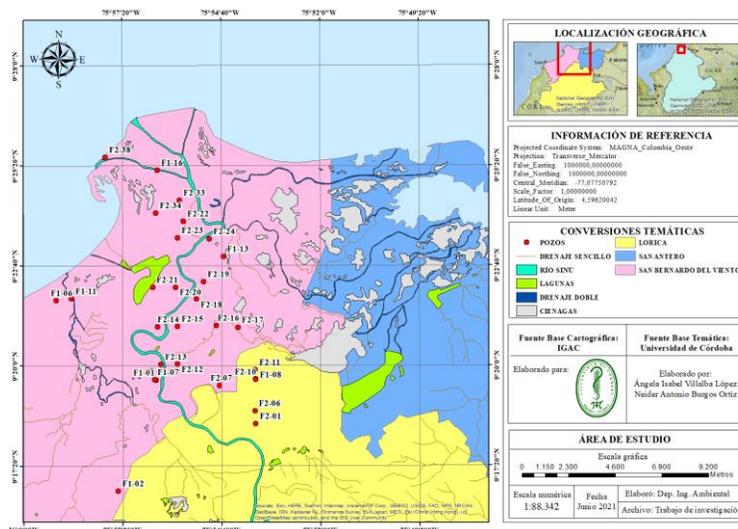


Figura 1. Localización del área de estudio

Fuente: Elaboración propia



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



### MATERIALES

Para la realización de la presente investigación se utilizaron los datos de calidad del agua freática de la zona de estudio, tomados de diferentes informes del proyecto “*Diagnóstico general del nivel de salinización en la zona aledaña a la desembocadura del río Sinú y su impacto socioeconómico (2008)*”, elaborado por Bustamante y Cantero entre los años 2000 a 2008. Los parámetros evaluados fueron: pH, conductividad eléctrica (CE en  $dSm^{-1}$ ), cationes solubles (calcio, magnesio, sodio y potasio en  $mEqL^{-1}$ ), aniones solubles (cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos en  $mEqL^{-1}$ ) y sólidos totales disueltos (STD en  $gl^{-1}$ ).

La toma de estos datos se realizó mediante el monitoreo periódico y sistemático de la salinidad en suelos y aguas freáticas. Las mediciones se realizaron en piezómetros de aguas freáticas con profundidades entre 2 y 3 metros, construidos con el objeto de determinar los niveles piezométricos y tomar muestras de agua para medir su calidad y parámetros de salinidad. Se requirieron datos de precipitación de la zona de estudio para el periodo 2001-2008, los cuales fueron tomados de la estación meteorológica de la Doctrina, Córdoba. Información que fue solicitada al instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM).

Otros materiales empleados en la presente investigación fueron:

- Software libre para la creación de diagramas hidrogeoquímicos diagrammes
- Software libre para la modelación hidrogeoquímica PHREEQC INTERACTIVE 3.2.
- Software para el procesamiento de la cartografía ARCMAP 10.6
- Software para el análisis estadístico de los datos STATGRAPHICS, IBM SPSS.
- Material bibliográfico referente a la zona de estudio.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Capa de geomorfología presente en el geovisor del SIMMA y mapa de suelos del territorio colombiano a escala 1: 100.000 del departamento de Córdoba presente en la sección de datos abiertos del IGAC.

## ASPECTOS METODOLÓGICOS

El proceso metodológico que se utilizó para llevar a cabo el presente estudio se dividió en tres etapas, de conformidad con los objetivos expuestos, en la primera fase se utilizaron diagramas hidrogeoquímicos y análisis estadístico para realizar la clasificación hidroquímica de las aguas, e identificar los principales procesos hidrogeoquímicos que dominan la química de las aguas freáticas; en la segunda fase se realizó una caracterización espacial y temporal de las especies químicas involucradas en el proceso de salinización, a través de modelación hidrogeoquímica; y en la tercera fase se establecieron posibles estrategias encaminadas a minimizar el impacto que produce la salinidad en los suelos.

### **OBJETIVO 1. Clasificación hidroquímica, identificación de procesos hidrogeoquímicos y evolución de las aguas.**

En la primera fase, se introdujeron un total de 446 muestras en el software DIAGRAMES, luego se descartaron las muestras del análisis de laboratorio que sobrepasaban el 20% del porcentaje de error del balance iónico (28 muestras que corresponden al 6,27% del total) quedando un total de 418 muestras. Posteriormente, con la ayuda de la cartografía de suelos de Córdoba se distinguieron las diferentes geomorfologías y litologías que tiene el área de estudio para establecer exactamente la ubicación de los distintos pozos y comprender qué diferencias en cuanto a tipos de agua y procesos hidrogeoquímicos surgieron a partir de su localización.

Para conocer la clasificación hidroquímica del agua freática presente en la zona de estudio se empleó la representación y clasificación de Alekin. Este método toma en



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

cuenta principalmente los aniones más importantes  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$  como clases que, a su vez, se subdividen en tres grupos, los cuales están en función del catión dominante  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , o  $\text{Na}^+$  de esta manera y tomando en cuenta la clase y el grupo de agua, se desprende la categorización de los tipos, siendo:

**Tipo I.**  $r\text{HCO}_3^- > r\text{Ca}^{++} + r\text{Mg}^{++}$

**Tipo II.**  $r\text{HCO}_3^- < r\text{Ca}^{++} + r\text{Mg}^{++} < r\text{HCO}_3^- + r\text{SO}_4^{=}$

**Tipo III.**  $r\text{HCO}_3^- + r\text{SO}_4^{=} < r\text{Ca}^{++} + r\text{Mg}^{++}$  o  $r\text{Cl}^- > r\text{Na}^+$

Se determinó el grado de salinidad de las aguas a partir de los indicadores Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y Conductividad Eléctrica (CE) y se tabularon los valores porcentuales de las siguientes categorías:

**Tabla 1. Relación de absorción sodio (RAS)**

$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$	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.**

**Tabla 2. Conductividad eléctrica (CE)**

C.E (dSm <sup>-1</sup> )	Calificación	Convención
<2,0	No salina	NS
2,0-4,0	Ligeramente salina	LS
4,0 -8,0	Moderadamente salina	MS
8,0-16,0	Fuertemente salina	FS
>16,0	Extremadamente salina	ES

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



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



A través de la interpretación del diagrama hidrogeoquímicos de Gibbs realizado en diagrammes, se comprendieron y diferenciaron las influencias de la interacción roca-agua, la evaporación y la precipitación en la química del agua. Seguidamente mediante gráficas de relación de iones llevadas a cabo en el software IBM SPSS, se corroboraron los procesos hidrogeoquímicos que se presentan en la zona de estudio, para esto se utilizaron las siguientes relaciones: 1) evaporación ( $\text{Na}/\text{Cl}$  vs  $\text{CE}$ ), 2) intercambio iónico ( $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{=}$ ) vs ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$ ), 3) disolución de silicatos ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  vs cationes totales) y 4) intrusión marina ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) y ( $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ ).

Por medio del diagrama de Mifflin, se identificó la presencia de flujos regionales, así como la caracterización de algunos procesos evolutivos de origen geogénico o antropogénico. Piper-Hill se empleó para la visualización y exploración grafica de los datos químicos del agua subterránea. Y los diagramas de Stiff, se situaron sobre mapas, en los cuales fue posible visualizar la disposición espacial de las familias hidrogeoquímicas. Los diagramas descritos anteriormente se crearon en el software diagrammes.

### Análisis estadístico

Se crearon diagramas de cajas y bigotes de los elementos analizados mediante el software STATGRAPHICS, con el fin de identificar los pozos con concentraciones más extremas. Se analizaron los datos anómalos del conjunto de muestras y se observó su variación entre las diferentes temporadas (época lluviosa y seca); se utilizó este método estadístico debido a que permitió analizar un número considerable de datos, haciendo sencilla su visualización e interpretación, y la identificación de anomalías.

En IBM SPSS se realizaron correlaciones estadísticas de Spearman entre las variables ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{CE}$ ,  $\text{SDT}$ ,  $\text{RAS}$ ,  $\text{pH}$  y la precipitación), para analizar la relación existente entre estas variables. Se decidió utilizar el coeficiente de Spearman porque es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



continuas, además no se ve afectado por los cambios en las unidades de medida y al ser una técnica no paramétrica, es libre de distribución probabilística, por lo que puede ser usado cuando los datos presentan valores extremos o ante distribuciones no normales.

En análisis estadísticos como el análisis de componentes principales (ACP) se emplearon las concentraciones de los iones y el pH, se seleccionaron los componentes principales según el criterio de Kaiser, donde sólo los factores con valores propios mayores o iguales a 1 fueron aceptados como posibles fuentes de varianza en los datos, con la más alta prioridad atribuida al factor que tiene la suma más grande del eigenvalor (Belkhir et al. 2010). En el análisis de correspondencias múltiples (ACM) se utilizaron las variables cualitativas de unidad geomorfológica, litología, categoría del RAS, CE, y clasificación hidroquímica del agua, donde se obtuvo una descripción del comportamiento químico y resumió la información geoquímica basados en variables categóricas. Ambos análisis estadísticos se realizaron a través de STATGRAPHICS.

### **OBJETIVO 2. Modelación hidrogeoquímica**

En esta segunda fase, se discretizó la zona de estudio abarcando el área de la unidad geomorfológica de plano de inundación, ya que en esta se sitúa gran parte de las actividades agrícolas y es de mucha importancia económica, además de que en esta geoforma se encuentra la mayor densidad de pozos con relación al resto de geomorfologías, por lo que se puede estudiar con mayor detalle.

### **Calibración**

Para validar la modelación hidrogeoquímica, primero se realizó la calibración del modelo mediante la comparación de las especies iónicas conservativas ( $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $Cl^-$ ), medidas experimentalmente y las arrojadas por el modelo. La bondad de ajuste del modelo se calculó mediante el error medio absoluto, debido a que este ayuda a comparar los ajustes en diferentes modelos de series de tiempo, donde los valores más cercanos a



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



cero indican un mejor ajuste. El cálculo del error absoluto medio está dado por la siguiente ecuación.

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

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

Adicionalmente, para verificar que tan bien se ajustaban los datos teóricos y experimentales a un modelo lineal se realizó una regresión simple en el software STATGRAPHICS.

### Modelo de especiación

Se implementó una modelación directa con el software PHREEQC para el cálculo de las especies maestras químicas y minerales presentes en el sistema. Se utilizó el modelo de especiación que permite calcular las especies acuosas para analizar el comportamiento de la distribución de las especies. Para ejecutar la modelación se utilizaron los parámetros: temperatura, pH, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, y bicarbonatos.

Se eligieron las especies que tuvieron mayor concentración y que estaban relacionadas con el proceso de salinización, para ser representadas por medio de mapas de isoconcentración. Para la cartografía se usó el software ArcMap 10.6 y se construyeron mapas de isolíneas con las concentraciones de las especies maestras identificadas, para tener una mejor apreciación de la dinámica espacial y temporal de la salinidad en las aguas freáticas de la Doctrina. Dada la distribución espacial de los datos, la interpolación se realizó utilizando el método de distancia inversa ponderada (IDW).

### Modelo de solubilidad



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Con los resultados arrojados por la modelación se identificaron las fases minerales presentes en las aguas freáticas, así como su estado de saturación, es decir, si los minerales se encuentran disueltos, precipitados o en equilibrio con el sistema; y se escogieron las fases minerales importantes, como aquellas que se encontraron en estado de equilibrio y subsaturado, y que además estaban relacionadas con la composición mineralógica de los suelos y con el proceso de salinización.

### **OBJETIVO 3. Recomendaciones relativas al manejo de los suelos.**

En esta última fase metodológica se recolectó, organizó, clasificó y analizó toda la información referente al área de estudio, tal como: geología, geomorfología, hidrografía, clima y las características de los suelos. Así como la información obtenida en las primeras dos fases de este estudio, como lo son: la clasificación hidroquímica del agua y sus procesos, los tipos de sales presentes y sus concentraciones, las fases minerales más predominantes y su estado de saturación, así como el comportamiento espacial y temporal de las sales.

Después de haber estudiado y analizado toda esta información y con el propósito de contribuir a proponer ideas para mitigar el impacto de la salinización en el sistema suelo-planta, se plantearon posibles estrategias que se consideran pertinentes para el manejo de los suelos con problemas de salinización, según la situación de salinidad encontrada.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



### 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la clasificación hidroquímica de las aguas por medio de la representación de Alekin; la identificación de los procesos hidrogeoquímicos que controlan la dinámica del sistema, a través de diagramas y métodos estadísticos y la variación tanto espacial como temporal de la química de las aguas freáticas y de las principales sales solubles que están directamente relacionadas con el proceso de salinización de los suelos de esta área, mediante el uso de diagramas, modelación hidrogeoquímica y representación cartográfica. Adicionalmente, también se describen algunas posibles estrategias para el manejo de los suelos, encaminadas a minimizar el impacto de estas sales en el sistema suelo-planta.

#### 6.1. CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA, IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS Y EVOLUCIÓN DE LAS AGUAS.

##### 6.1.1. CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS

Las muestras de agua freática analizadas se clasificaron de acuerdo con su clase ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{=4}$ ), grupo ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) y tipo (I, II, III). La Tabla 3 muestra que el anión predominante es el  $\text{Cl}^-$  y el catión dominante el  $\text{Na}^+$ , por lo que las aguas se clasificaron de manera general como cloruradas sódicas.

Tabla 3. Clasificación de Alekin

Clase	Numero de muestras	%
Clorurada	299	71,53
Bicarbonatada	81	19,37
Sulfatada	38	9,09
<b>Grupo</b>	-	-
Sódica	295	70,57
Magnésica	102	24,40
Cálcica	21	5,02
<b>Tipo</b>	-	-
I	248	59,33
II	145	34,69
III	25	5,98



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



<i>Clasificación hidroquímica</i>	-	-
Clorurada Sódica	239	57,17
Clorurada Magnésica	52	12,44
Bicarbonatada Magnésica	40	9,56
Bicarbonatada sódica	32	7,65
Sulfatada Sódica	24	5,74
Sulfatada Magnésica	10	2,39
Bicarbonatada Cálcica	9	2,15
Clorurada cálcica	8	1,91
Sulfatada Cálcica	4	0,95

**Fuente: Elaboración propia**

Como se muestra en la Tabla 4 la unidad geomorfológica de plano de inundación es la que abarca la mayor parte del área de estudio y por lo tanto la que cuenta con la mayor cantidad de pozos (60%), debido a que esta área está muy discretizada y presenta una alta densidad de pozos se puede estudiar con mayor detalle.

**Tabla 4. Porcentaje de pozos por unidad geomorfológica y litológica**

<b>Geomorfología</b>	<b>Litología</b>	<b># de pozos</b>	<b>%</b>
Plano de marea	Sedimentos finos y gruesos con capas de material orgánico	2	6,7
Delta lacustrino	Sedimentos gruesos	3	10,0
Terraza de acumulación	Sedimentos mixtos con material calcáreo	7	23,3
Plano de inundación	Sedimentos finos	2	6,7
	Sedimentos finos y moderadamente finos	16	53,3

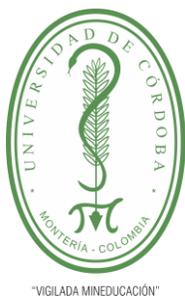
**Fuente: Elaboración propia**

Se hace evidente el predominio de las aguas cloruradas sódicas en todas las unidades geomorfológicas, (ver Tabla 5), sin embargo, también se puede apreciar el dominio de otras aguas que también ejercen una influencia en el sistema, aunque en menor proporción, como las aguas bicarbonatadas sódicas en la geofoma del delta lacustrino, las cloruradas magnésicas en el plano de inundación y las bicarbonatadas magnésicas en el plano de marea y terraza de acumulación.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 5. Clasificación hidroquímica de las aguas por unidad geomorfológica**

	Delta lacustrino	Plano de inundación	Plano de marea	Terraza de acumulación
Clorurada sódica	64,00 %	55,46 %	48,00 %	60,41 %
Clorurada magnésica	10,00 %	16,59 %	8,00 %	4,16 %
Clorurada cálcica	0,00 %	2,83 %	0,00 %	1,04 %
Bicarbonatada sódica	20,00 %	5,26 %	0,00 %	9,37 %
Bicarbonatada magnésica	6,00 %	8,09 %	16,00 %	13,54 %
Bicarbonatada cálcica	0,00 %	2,83 %	8,00 %	0,0 %
Sulfatada sódica	0,00 %	6,07 %	4,00 %	8,33 %
Sulfatada magnésica	0,00 %	2,02 %	12,00 %	2,08 %
Sulfatada cálcica	0,00 %	0,80 %	4,00 %	1,04 %

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se tiene que la mayoría de las muestras de agua analizadas se clasifican como no salinas y presentan un RAS bajo, aun así, un buen número de ellas se categorizan como moderada y fuertemente salina y muestran un RAS alto.

**Tabla 6. Porcentajes de conductividad eléctrica y RAS**

CE	%
No salina	39,23
Moderadamente salina	16,75
Extremadamente salino	16,51
Ligeramente salina	14,11
Fuertemente salina	13,40
RAS	%
Bajo	44,50
Alto	22,97
Medio	14,11
Excesivo	10,05
Muy alto	8,37

Fuente: Elaboración propia



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](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



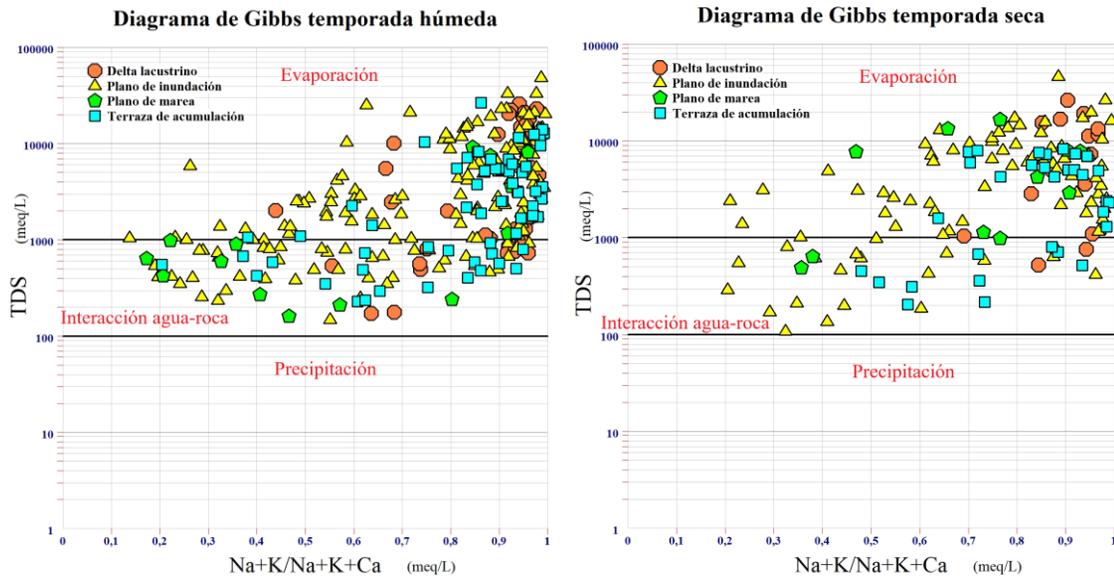
### 6.1.2. IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS

El Gráfico 1 señala que la mayoría de las muestras de agua freática, están trazadas en la sección superior del diagrama de Gibbs, lo cual sugiere que la evaporación es el proceso natural más importante que controla la química del agua subterránea en el área de estudio, siendo más intensa durante la temporada seca, especialmente en las unidades geomorfológicas de delta lacustrino y plano de inundación. Autores como Kuldip (2011) afirman que la evaporación concentra el agua restante y conduce a la precipitación y la deposición de evaporados que eventualmente son lixiviados a la zona saturada. Esto se espera, ya que la evaporación aumenta las concentraciones de los iones disueltos derivados del intemperismo químico, lo que conduce a un incremento de los STD, provocando una mayor salinidad de las aguas freáticas someras. Sin embargo, la presencia de muestras que se sitúan en la zona central del diagrama de Gibbs, nos indica la influencia que ejercen los procesos de interacción agua-roca en la composición del agua subterránea, los cuales se observan más marcados en la temporada húmeda, principalmente en las geofomas de plano de marea y algunas zonas del plano de inundación y terraza de acumulación. Por otra parte, la nula presencia de muestras en la parte inferior del diagrama, es evidencia de la poca incidencia que tiene la precipitación dentro de los procesos hidrogeoquímicos.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Gráfico 1. Diagrama de Gibbs.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

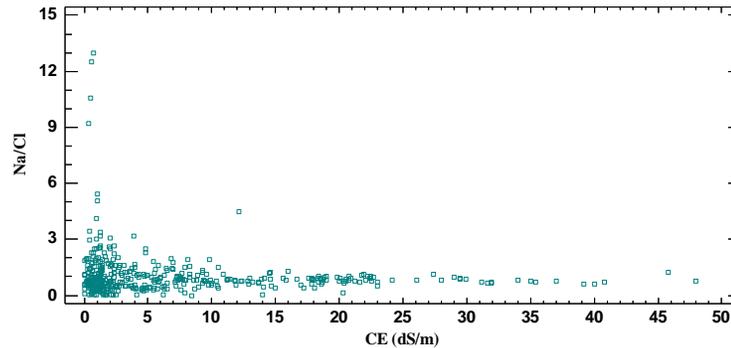
En el Gráfico 2 se puede apreciar que la mayoría de las muestras caen sobre una línea de tendencia horizontal indicando que la relación  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  se mantiene constante a medida que aumenta la conductividad eléctrica lo cual según Jankowski y Acworth (1997) es un indicador efectivo de concentración por evaporación y evapotranspiración. Confirmando que la evaporación es el principal mecanismo que gobierna la evolución de las aguas freáticas en el área de estudio.



# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



**Gráfico 2. Relación ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) vs (CE) que ilustra el proceso de evaporación  
Fuente: Elaboración propia.**

En el Gráfico 3 se muestra como la mayoría de los puntos caen en una línea con pendiente de -0,91, Lo que sugiere que el intercambio iónico no es el principal proceso que impulsa la dinámica del agua freática en la zona de estudio, ya que según Liu et al. (2018) las proporciones calculadas para las muestras de agua deberían caer en una línea con una pendiente de -1 si el intercambio iónico fuera el proceso dominante. lo cual coincide con lo visto anteriormente en el diagrama de Gibbs, que los procesos de interacción agua-roca/suelo como el intercambio iónico no son los dominantes, no obstante, si tiene un impacto importante en la química del agua subterránea.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

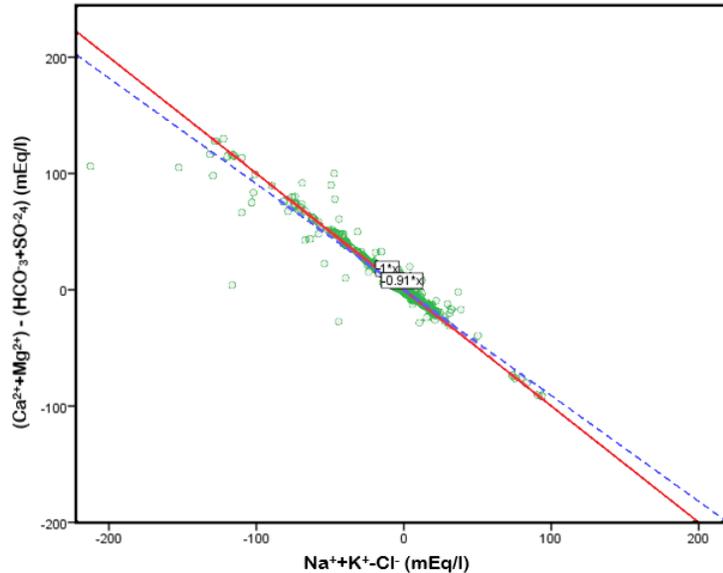
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

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



**Gráfico 3. Relación  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$  vs  $(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{=})$  que ilustra el proceso de intercambio iónico**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Datta y Tyagi (1996) señalan que la contribución de cationes puede derivarse de la meteorización del silicato cuando  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) = 0,5 \text{ CT}$ , en el Gráfico 4 se puede observar cómo algunas muestras se ubican cerca de esta relación, no obstante la mayoría de los puntos caen a lo largo de la línea  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) = 0,7 \text{ CT}$ , indicando que la disolución de silicatos no es uno de los procesos dominantes, aun así, contribuye de manera directa en el aporte de cationes a las aguas freáticas de la zona de estudio.

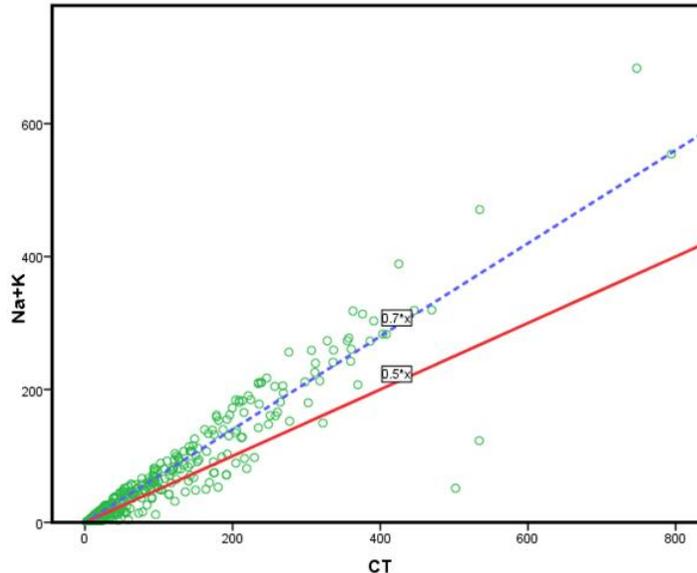


Certificado GP 134-1

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](http://www.unicordoba.edu.co)



**Gráfico 4. Relación ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) vs (CT) que ilustra el proceso de disolución de silicatos**

**Fuente: Elaboración propia**

Como se muestra en el Gráfico 5 hay un gran número de muestras que se ubican sobre la línea de relación  $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 0,86$  lo cual según Klassen (2014) es un valor típico del agua de mar, lo que estaría indicando la influencia de posibles procesos de intrusión marina, así mismo, la presencia de muestras que se localizan por encima de la relación  $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1$  sugiere la presencia de contaminación antropogénica en las aguas freáticas del área de estudio, derivada posiblemente por el uso de agroquímicos como el KCl que se usa comúnmente como fertilizante en los cultivos de arroz presentes en esta zona.

La relación  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  también ha sido ampliamente utilizada para evaluar procesos de intrusión salina, de acuerdo con Custodio y Llamas (1983) este índice es especialmente útil en la caracterización de la intrusión marina, ya que en aguas continentales tiene normalmente un valor entre 0,1 y 5 y en el agua de mar varía entre 20 y 50. En el área de estudio, la unidad geomorfológica de delta lacustrino presenta valores promedios de 21 en temporada húmeda y de 28 en la seca, para el plano de inundación los valores promedios fueron de 16 en época húmeda y 17 en la seca, en el plano de marea se



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

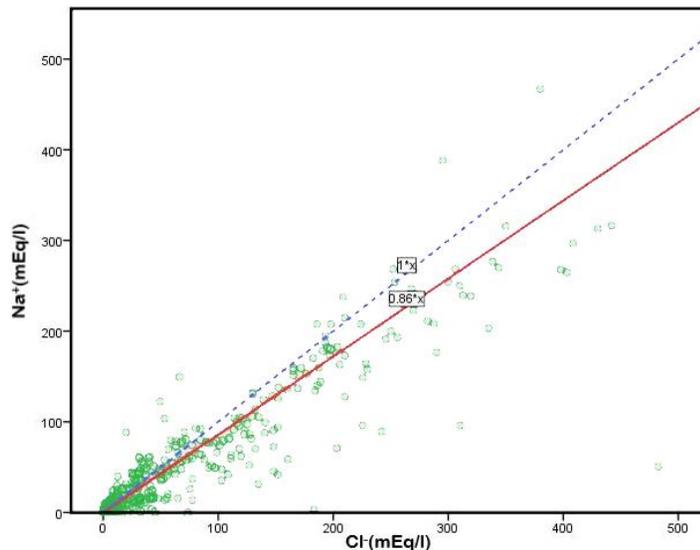
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



presentaron valores de de 3 y 7 para las temporadas húmeda y seca respectivamente y en la geomorfología de terraza de acumulación se observaron valores de 10 en época húmeda y de 11 en seca. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Combatt et al. (2015), que encontró evidencia de la influencia del proceso de intrusión marina en las aguas freáticas de esta zona, especialmente durante el periodo seco, en las localidades más cercanas a la costa como lo es la geoforma de delta lacustrino.



**Gráfico 5. Relación  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  que ilustra el proceso de intrusión marina**  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.3. EVOLUCIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS

De manera general en el Gráfico 6 se tiene que la mayoría de las muestras se ubican en la zona inferior y central del diagrama de Mifflin, por lo cual se categorizan como de flujo local e intermedio, considerándose así, como aguas poco evolucionadas. Particularmente hablando de la unidad geomorfológica de delta lacustrino, en la temporada húmeda presenta cierta homogeneidad en la distribución de las muestras a través de las diferentes secciones del diagrama, aun así, se nota una preferencia hacia la parte inferior y superior, que corresponden a los flujos de tipo local y regional, mientras



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



que en la temporada seca es evidente que la mayoría de los puntos se sitúan en los flujos intermedio y regional, específicamente los pozos F2-33 y F2-34 mostrando un grado de evolución de las aguas mucho más avanzado que el pozo F2-38 que se localiza en la sección correspondiente a los flujos locales.

En la geoforma de plano de inundación se puede observar que, tanto para la época húmeda como seca, predominan las aguas con flujo de tipo intermedio y local, aunque cabe resaltar que los pozos F2-16 y F2-24 muestran las aguas más evolucionadas de esta geomorfología ya que presentan flujos regionales. Para el plano de marea, el diagrama de Mifflin señala que las aguas son en general poco evolucionadas, debido, a que en ambas temporadas las muestras correspondientes al pozo F1-06 presentan flujos locales y las del pozo F1-11 flujos intermedios.

En la zona de terraza de acumulación se encontró que para ambas épocas climáticas la gran mayoría de los pozos exhibían el mismo comportamiento (flujos locales e intermedios), a diferencia del pozo F2-23 cuyas aguas mostraron un mayor grado de evolución al situarse sobre flujos regionales. De conformidad con lo enunciado por Bustamante (2017) las aguas subterráneas pertenecientes al flujo local corresponden a aguas poco evolucionadas y de reciente infiltración; las pertenecientes al flujo intermedio se sitúan con una mayor evolución hidrogeológica dada así por el tiempo de permanencia con el medio geológico y la profundidad a la cual se infiltraron, mientras que las aguas subterráneas de flujo regional corresponden a una zona de depósito de solutos, donde la composición química del agua tiende a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones a lo largo de la trayectoria recorrida, caracterizando a estas aguas como las de mayor evolución, al ser aquellas que han mantenido mayor tiempo de residencia con el medio circundante.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

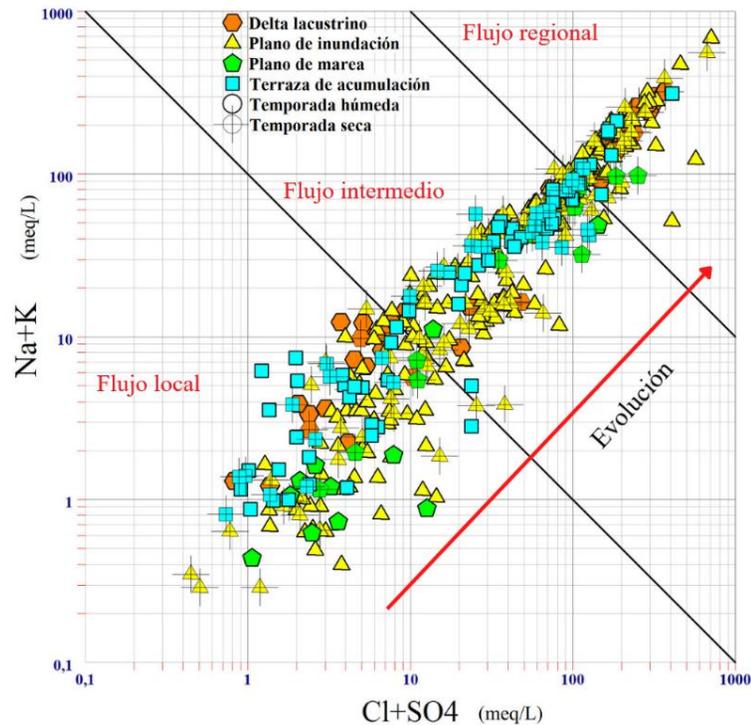
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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



**Gráfico 6. Diagrama de Mifflin**  
**Fuente: Elaboración propia**

La Figura 2 muestra que en la unidad geomorfológica de delta lacustrino los pozos F2-33 y F2-34 presentan la misma dinámica, ya que en ambas temporadas climáticas es evidente el dominio de las aguas cloruradas sódicas, con concentraciones mucho más altas que las del pozo F2-38 (ver anexo B. Figura 22), que también hace parte de esta misma geoforma, sin embargo, tanto en época húmeda como seca se observa un marcado predominio de las aguas bicarbonatadas sódicas sobre las cloruradas sódicas.

Este comportamiento puede explicarse debido a que los pozos F2-33 y F2-34 presentan como proceso dominante la evaporación, el cual se puede ver en el diagrama de Piper ya que las muestras de agua permanecen casi sin modificaciones, mientras que en las aguas del pozo F2-38 el proceso más representativo fue el intercambio iónico, que da lugar a las variaciones entre aguas cloruradas y bicarbonatadas sódicas. También fue visible la



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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

prevalencia que tiene el  $\text{Na}^+$  como catión dominante en esta geoforma, que puede ser atribuible a la incidencia costera como son los fenómenos de intrusión marina y la influencia de los aerosoles marinos, ya que estos pozos se localizan relativamente cerca de la línea de costa como se muestra en la Figura 3.

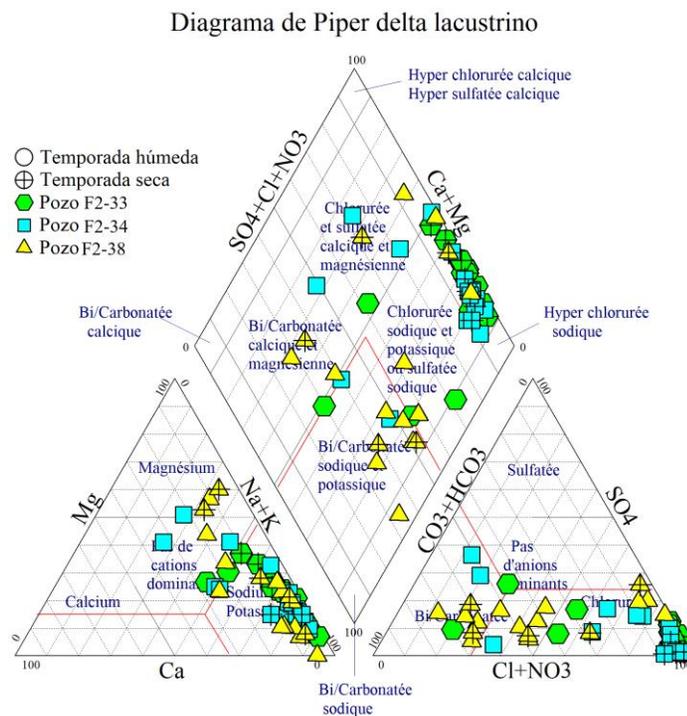


Figura 2. Diagrama de Piper delta lacustrino  
Fuente: Elaboración propia.



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

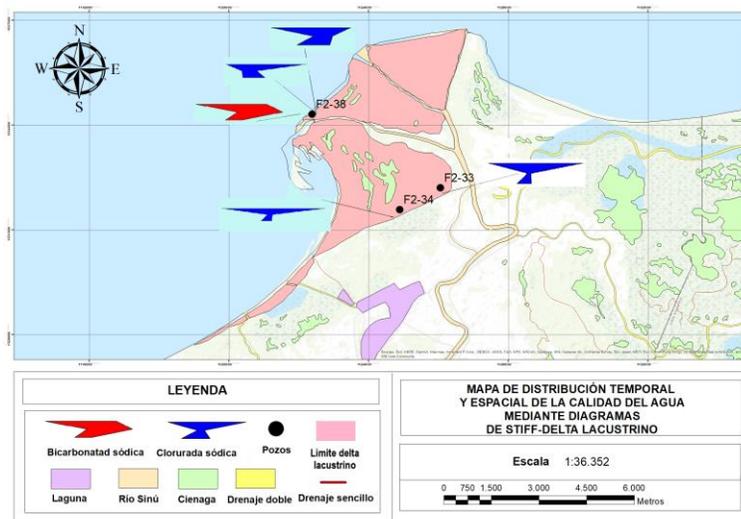
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

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 3. Mapa de distribución temporal y espacial de la calidad del agua mediante diagramas de Stiff-Delta lacustrino**

**Fuente: Elaboración propia**

En la Figura 4 se observa que en el plano de marea el pozo F1-06 en temporada húmeda indica cierta dominancia de las aguas bicarbonatadas magnésicas y en la seca varían entre bicarbonatadas y cloruradas magnésicas, mostrando una clara contribución del  $Mg^{++}$  como catión preponderante, de forma general las concentraciones de estas aguas se mantuvieron muy bajas en comparación con las del pozo F1-11 (ver anexo B. Figura 23), en el cual en ambas temporadas predominaron las aguas cloruradas sódicas. Aunque estos dos pozos se encuentran relativamente cerca, presentan dinámicas diferentes, lo cual puede ser atribuible a los procesos de intercambio iónico que se dan en el pozo F1-06 que puede incidir en las modificaciones que sufren sus aguas y al proceso de evaporación en el pozo F1-11, responsable de las altas concentraciones de los iones y de la poca variabilidad de las aguas, esta condición también puede ser influenciada por la cercanía que tiene este pozo con el caño La Balsa (Figura 5), el cual comunica directamente con el mar, pudiendo generar un posible proceso de mezcla con aguas marinas.



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

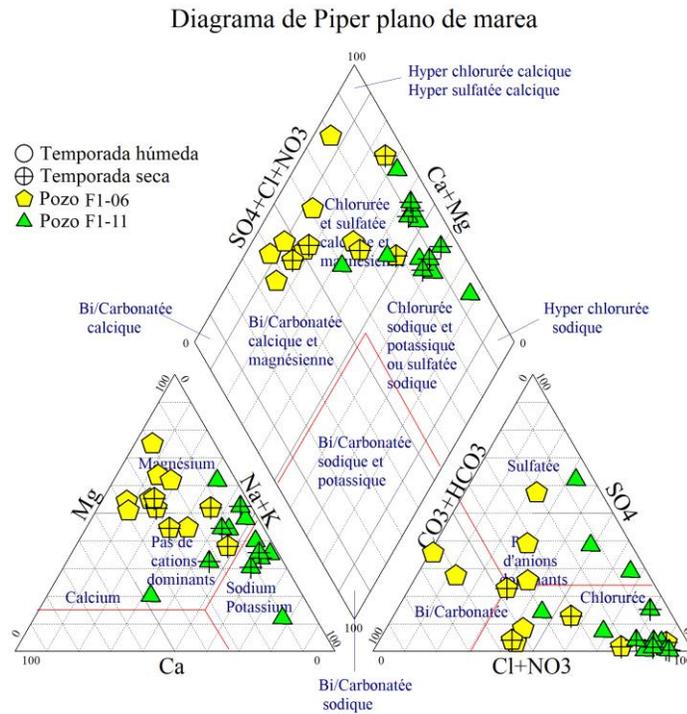
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

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 4. Diagrama de Piper plano de marea**

**Fuente: Elaboración propia.**

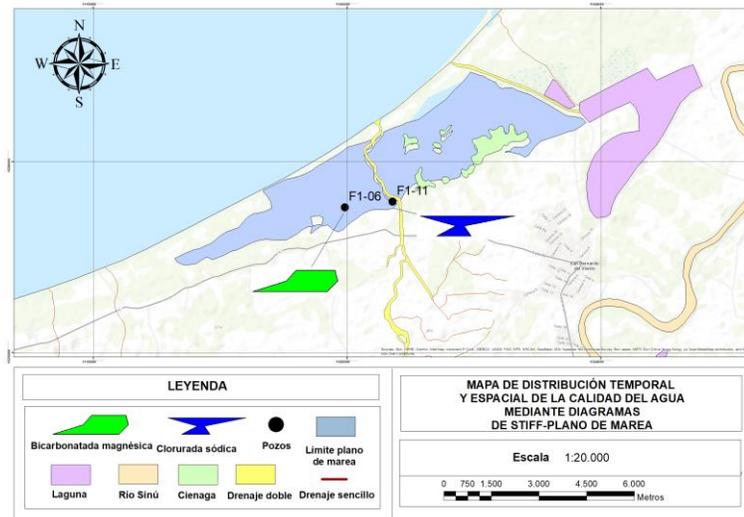


Certificado GP 134-1

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](http://www.unicordoba.edu.co)



**Figura 5. Mapa de distribución temporal y espacial de la calidad del agua mediante diagramas de Stiff- Plano de marea**  
**Fuente: Elaboración propia**

La geoforma de terraza de acumulación (Figura 6) presenta una gran diversidad de aguas, que se puede observar en la amplia distribución que presentan los puntos sobre las diferentes secciones del diagrama de Piper, siendo evidente el predominio de las cloruradas sódicas y bicarbonatadas magnésicas (Figura 7), ejemplo de esto son los pozos F2-01 y F2-10, que tanto en época húmeda como seca mostraron una dinámica similar, fluctuando entre estos tipos de agua, otros como el pozo F2-06 exhibieron un comportamiento distinto, alternando entre bicarbonatadas magnésicas y sódicas, mientras que en el pozo F1-02, se observó una extensa variación en la composición hidroquímica de las aguas, pasando de bicarbonatadas magnésicas y sódicas a cloruradas magnésicas y sódicas, otros por el contrario manifestaron muy pocas modificaciones en la composición de sus aguas, como es el caso de los pozos F1-07, F1-08 y F2-23 que para ambas temporadas permanecieron como cloruradas sódicas, también cabe resaltar el hecho de que las mayores concentraciones se presentaron en este tipo de aguas, como se muestra en el anexo B. Figura 24. La vasta composición hidroquímica de las aguas



"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

puede ser influenciada conjuntamente por los procesos de intercambio iónico, que daría lugar a los cambios en la constitución de las aguas, pasando de bicarbonatadas a cloruradas y de magnésicas a sódicas y la disolución de minerales, puesto que en esta geomorfología abundan los sedimentos mixtos con materiales calcáreos, que explicaría la riqueza de bicarbonatos, además el proceso de evaporación presenta una importante incidencia en aquellos pozos cuyas aguas permanecieron casi sin modificaciones en su comportamiento, y en general con altas concentraciones de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ .

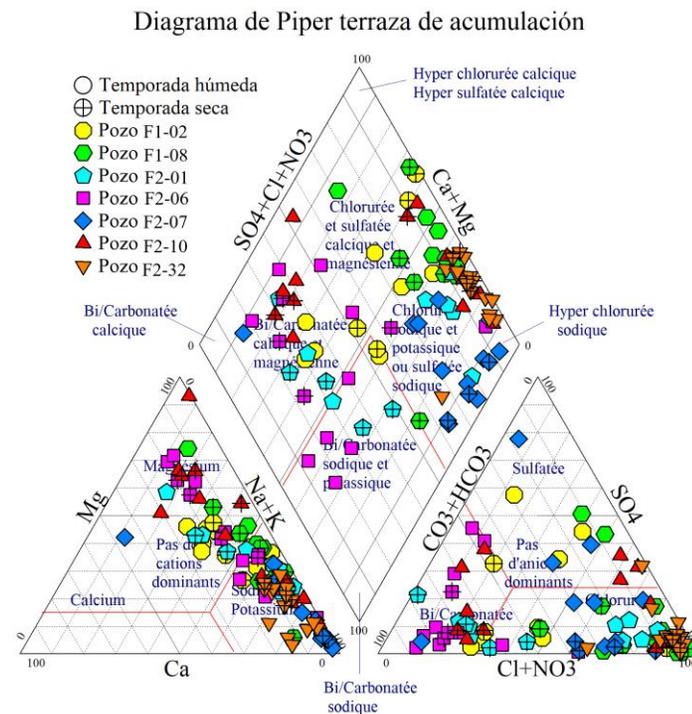


Figura 6. Diagrama de Piper terraza de acumulación  
Fuente: Elaboración propia



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

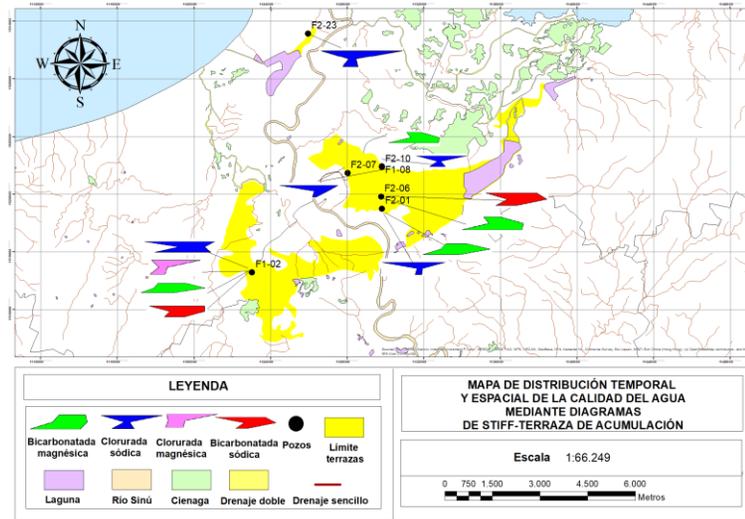
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

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 7. Mapa de distribución espacial de tipos de agua mediante Stiff- Terraza de acumulación**

**Fuente: Elaboración propia**

En la Figura 8 se observa como las aguas freáticas características del plano de inundación, presentan una movilidad entre cloruradas y bicarbonatadas y de magnésicas a sódicas, siendo evidente la dominancia de las aguas cloruradas sódicas y magnésicas, como se puede apreciar en la Figura 9, particularmente los pozos F1-13, F2-12, F2-16, F2-17, F2-18, F2-19, y F2-24 permanecieron casi sin modificaciones exhibiendo el mismo tipo de agua (clorurada sódica) en ambas temporadas y en general con concentraciones mucho más altas que las del resto de los pozos que se localizan en esta unidad geomorfológica (ver anexo B. Figura 25). Por otra parte, en los pozos F1-12, F1-16, F2-13, F2-14, y F2-20 fue visible la presencia de guas cloruradas sódicas y magnésicas, seguidamente los pozos F1-01, F2-11, F2-15 y F2-21 indicaron un predominio de las aguas bicarbonatadas magnésicas, de manera particular en el pozo F1-07 se evidenció el tipo de agua sulfatada sódica, y en el pozo F2-22 las bicarbonatadas sódicas. La presencia de altas concentraciones específicamente en los iones  $Cl^-$  y  $Na^+$  puede ser atribuida a la marcada influencia que tiene el proceso de evaporación en esta



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

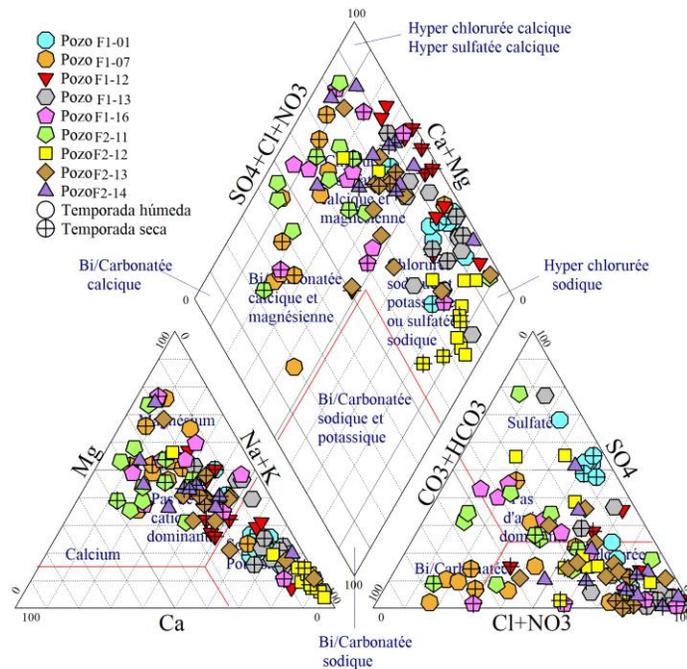
### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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

zona, por otro lado, los procesos de intercambio iónico que también se dan en esta área pueden incidir en los cambios que sufren las aguas de bicarbonatadas a cloruradas y de magnésicas a sódicas.

Diagrama de Piper plano de inundación



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

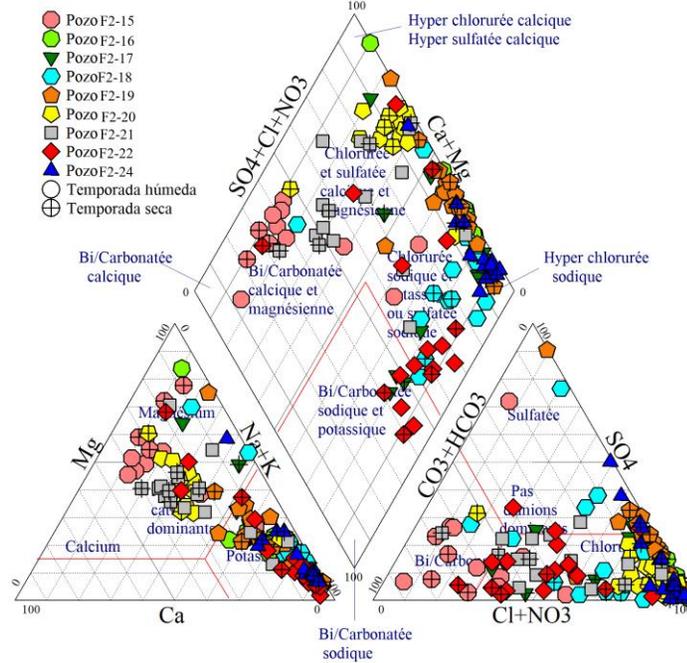
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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

Diagrama de Piper plano de inundación



**Figura 8. Diagrama de Piper Plano de inundación**  
Fuente: Elaboración propia



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

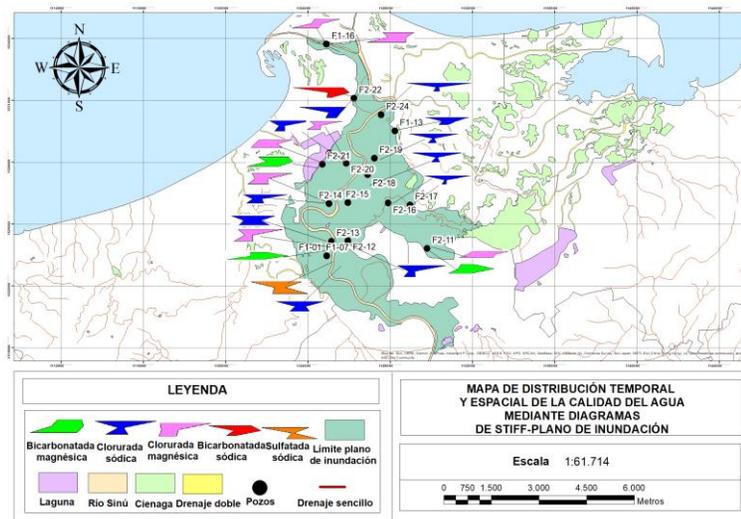
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

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 9. Mapa de distribución espacial de tipos de agua mediante Stiff- Plano de inundación**

**Fuente: Elaboración propia**

## 6.2. ANALISIS ESTADISTICO

### 6.2.1. DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES

A partir de la concentración de los diferentes iones muestreados se pudieron obtener las Figuras 10 y 11 correspondientes a cajas 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 finalmente 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 las temporadas seca y húmeda, los puntos extremos de los iones  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $Ca^{++}$ ,  $HCO_3^-$  y



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



$\text{CO}_3^{=}$  están determinados por los pozos F2-33 y F2-34 de la unidad geomorfológica de delta lacustrino, seguido de los pozos F1-11 de plano de marea, y en la geoforma de plano de inundación localizados más cerca al río Sinú y a una distancia mayor del mar Caribe hicieron parte los pozos F2-16 y F2-24 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. La unidad geomorfológica de terraza de acumulación en época húmeda los pozos F2-23 y F2-10 presentaron valores anómalos y en la época seca fueron los pozos F1-08 y F1-02.

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 el mal manejo de técnicas agropecuarias que se implementan en la zona, debido a la presencia de cultivos.

El aporte del ion  $\text{HCO}_3^-$  puede ocurrir de las reacciones químicas, donde el  $\text{CO}_2$  atmosférico se disuelve en el agua de lluvia, reaccionando con ella para formar  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , luego este ácido se disocia parcialmente y se forma el ion  $\text{HCO}_3^-$  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.

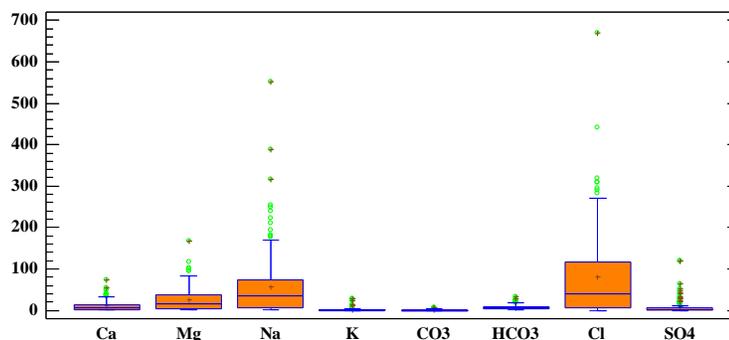


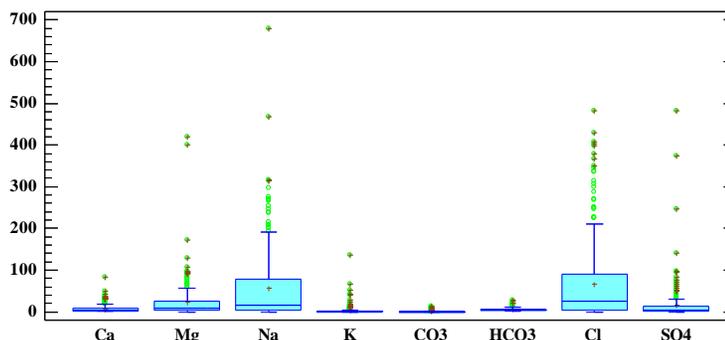
Figura 10. Cajas y bigotes época seca

Fuente: Elaboración propia



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Figura 11. Cajas y bigotes época húmeda**  
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2. CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Como algunos de los parámetros violaron el supuesto de normalidad debido a sus valores atípicos y extremos, las correlaciones entre cada par de parámetros se evaluaron mediante estadísticas no paramétricas utilizando los coeficientes de Spearman. El umbral de significación se fijó en valores de  $\rho$  por debajo de 0,05 \*, con un valor de  $\rho$  adicional y más significativo de 0,01 \*\* (Kumar et al. 2006). Los rangos de la correlación de Spearman se tomaron del artículo de Martínez et al. 2009, estos se situaron en las categorías que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7. Rangos de Spearman**

0-0,25	Escasa o nula
0.26-0,50	Débil
0,51-0,75	Entre moderada y fuerte
0,76-1,0	Entre fuerte y perfecta

Para la zona discretizada de estudio (plano de inundación) se analizó que la correlación de los iones más fuertes fue entre el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$  y a su vez estos dos iones también



"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

presentaron una correlación muy alta con las variables CE, STD y RAS, estos resultados reflejan que los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  son los que presentan las mayores concentraciones y por lo tanto contribuyen a la salinidad del agua freática y están muy vinculados con el RAS, CE y SDT que son indicadores de esta condición. También se observó que el ion  $\text{Cl}^-$  mostro una correlación entre fuerte y perfecta con los iones  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Na}^+$  como se muestra en la Tabla 8, sin embargo, con este último la relación fue mucho más fuerte, evidenciando una mayor afinidad entre estos dos al ser ambos iones monovalentes, esta relación también se puede ver en los resultados de la clasificación de Alekin en la cual el tipo de agua clorurada sódica represento el 57,17% y la clorurada magnésica solo el 12,44%.

**Tabla 8. Correlación de Spearman**

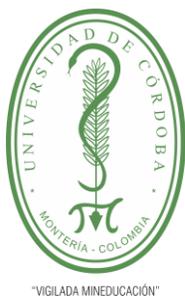
Precipitación	T°C	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO3	CO3	Cl	SO4	CE	SDT	RAS	
Precipitación	1	0,08	-0,12	-0,05	-0,04	0,03	0,135*	0,01	0,01	0,00	0,128*	0,01	-0,04	0,07
T°C	1	0,159*	-0,06	-0,15	0,03	0,04	-0,09	-0,07	-0,03	-0,11	0,06	-0,02	0,09	
pH		1	-0,33	-0,26	-0,02	0,18**	0,17**	0,22**	-0,09	-0,14	-0,05	-0,11	0,12*	
Ca			1	0,86**	0,53**	0,39**	0,14*	-0,25	0,72**	0,52**	0,58**	0,57**	0,25**	
Mg				1	0,71**	0,47**	0,24**	-0,07	0,85**	0,63**	0,70**	0,66**	0,44**	
Na					1	0,51**	0,30**	0,24**	0,90**	0,67**	0,80**	0,75**	0,93**	
K						1	0,32**	-0,08	0,58**	0,47**	0,53**	0,47**	0,46**	
HCO3							1	0,15*	0,27**	0,21**	0,25**	0,21**	0,31**	
CO3								1	0,11	0,05	0,13*	0,00	0,38**	
Cl									1	0,62**	0,83**	0,76**	0,76**	
SO4										1	0,56**	0,55**	0,57*	
CE											1	0,71**	0,70**	
SDT												1	0,64**	
RAS													1	

Fuente: elaboración propia



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

### 6.2.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Se analizaron las variables pH,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{CO}_3^{=}$ , posteriormente se tomaron las componentes principales según el criterio de Kaiser, de esta manera se seleccionaron las tres primeras componentes las cuales corresponden al 65,07% de la varianza total de los datos analizados como se muestra en la Tabla 9 y los pesos de los componentes para cada uno de los parámetros analizados se representan en la Tabla 10.

**Tabla 9. Análisis de componentes principales**

<i>Componente</i> Número	<i>Eigenvalor</i>	<i>Porcentaje de</i> Varianza	<i>Porcentaje</i> Acumulado
1	3,22525	35,836	35,836
2	1,46373	16,264	52,100
3	1,16792	12,977	65,077
4	0,895186	9,947	75,023
5	0,766694	8,519	83,542
6	0,717378	7,971	91,513
7	0,471946	5,244	96,757
8	0,286173	3,180	99,936
9	0,0057159	0,064	100,000

Fuente: elaboración propia

**Tabla 10. Pesos de los componentes**

	<i>Componente</i> 1	<i>Componente</i> 2	<i>Componente</i> 3
pH	0,103252	0,549096	0,171364
$\text{Ca}^{++}$	-0,410865	-0,150625	-0,283643
$\text{Mg}^{++}$	-0,442935	-0,109384	-0,0778171
$\text{Na}^+$	-0,479764	0,0931624	0,245119
$\text{K}^+$	-0,0926465	0,536553	-0,34779
$\text{HCO}_3^-$	-0,0857432	0,555487	-0,279264
$\text{CO}_3^{=}$	-0,0467578	0,2247	0,780449
$\text{Cl}^-$	-0,508547	0,0684989	0,0668156
$\text{SO}_4^{=}$	-0,342669	-0,0593703	0,107383

Fuente: elaboración propia.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://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 componente número 1, describe el 35,83 % de la varianza, y se encuentra caracterizados negativamente por los iones  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$  y positivamente por el pH. El mayor peso se concentra en el ion cloruro, seguido de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Ca}^{++}$ . Este componente tiene una posible representación de la influencia de procesos naturales comunes en la hidroquímica de las aguas subterráneas, incluida la meteorización, la disolución de rocas y minerales.

La componente número 2, explica un porcentaje de varianza total del 16,26%, y se distinguen positivamente los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y el pH. Esto indica que dicha secuencia se debe posiblemente a la solubilidad y abundancia de distintas sales en el subsuelo (Rojas 2018). Y negativamente los iones  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{SO}_4^-$ . En este caso, el ion con mayor peso es el  $\text{HCO}_3^-$ , seguido por el  $\text{K}^+$  y el pH. Y con menor peso en valor estaría el ion  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^-$

Por ultima la componente número 3, hace representación de un porcentaje de varianza total del 12,97%, diferenciado positivamente por los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$  y el pH. Y distinguidos negativamente por los iones  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{CO}_3^-$ . La mayor carga la presenta el  $\text{CO}_3^-$ , seguido del  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ . Y los caracterizados por tener menor peso están pH,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Cl}^-$ .

El plano factorial que se muestra en el Gráfico 7, se encuentra constituido por las componentes número 1 y 2. A partir del eje X (componente 1) se puede observar que este reúne el mayor porcentaje de varianza, y separa las variables de izquierda a derecha. La división se realiza con la finalidad de obtener una mejor interpretación, permitiendo observar la distribución de las variables, mostrando que en la región izquierda se encuentran las aguas más diluidas, mientras que la región derecha corresponde a aguas mineralizadas. En el eje Y (componente 2) las variables son separadas de abajo hacia arriba, siendo el lado de arriba donde se ubican la mayoría de los parámetros. Las variables que están representadas arriba del plano factorial se distinguen por poseer alto



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

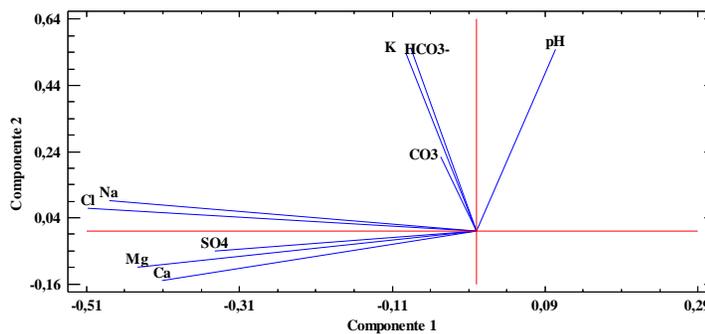
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



contenido de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  y bajo contenido de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{CO}_3^{=}$ . Las variables que se ubican por debajo del plano factorial poseen alto contenido de  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Ca}^{++}$  seguido del ion  $\text{SO}_4^{=}$ .



**Gráfico 7. Pesos de los componentes**  
Fuente: elaboración propia

#### 6.2.4. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS MÚLTIPLES

El ACM se llevó a cabo para detallar las relaciones de las variables discretas en la zona de estudio, el análisis se realizó utilizando cinco variables de tipo cualitativo tales como: geomorfología, litología, tipo de agua, categoría del RAS, y conductividad eléctrica (CE) para un total de 418 muestras. Las variables se proyectaron en el diagrama de dispersión de ACM, representado en el Gráfico 8, que consto de dos dimensiones que explicaron una variabilidad del 33,7%. Se observó que hay un grupo que encierra las variables que más se encontraban relacionadas y estas fueron las del tipo de agua con predominancia en el ion sodio (clorurada sódica, sulfatada sódica y bicarbonatada sódica). El tipo de agua clorurada sódica se relaciona con la categoría del RAS excesiva y la CE fuertemente salina y moderadamente salina que de igual modo se relaciona con la sulfatada sódica, y esta se asocia con la CE ligeramente salina y con la categoría del RAS muy alta que simultáneamente integra al tipo de agua bicarbonatada sódica. Finalmente, la geomorfología de delta lacustrino y litología de sedimentos gruesos se vincula con este grupo de aguas sódicas.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

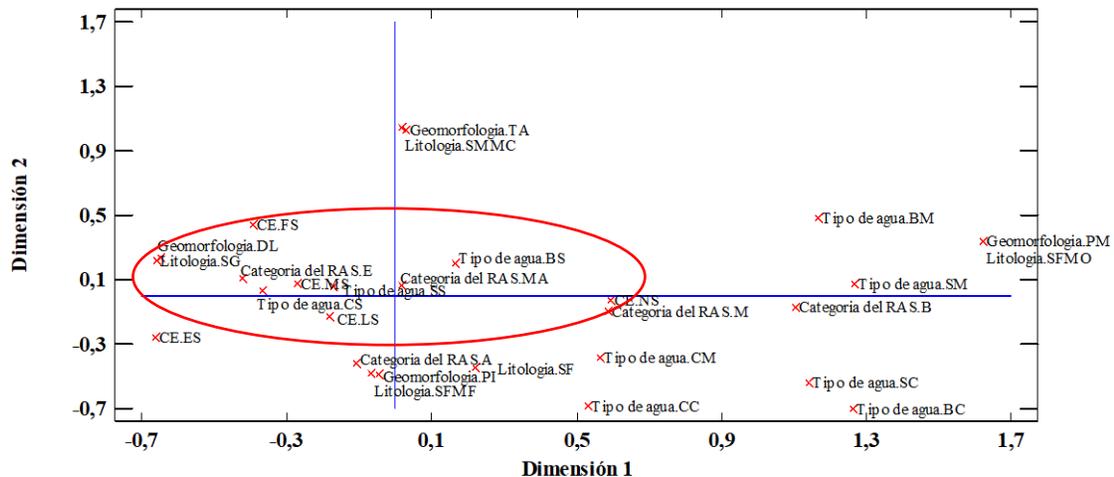
### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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

Un segundo grupo mostró correspondencia entre la unidad geomorfológica de plano de inundación, una litología de sedimentos finos y moderadamente finos y una categoría RAS alta. De manera más dispersa fue visible que había distintos grupos conformados por la asociación de dos variables, tales como: RAS moderada y CE no salina, litología de sedimentos mixtos con materiales calcáreos y terraza de acumulación, seguido de litología de sedimentos finos y gruesos con capas de material orgánico y geoforma plano de marea, y posteriormente, los tipos de agua bicarbonatada y clorurada con predominio en el ion sodio, y el tipo de agua sulfatada magnésica y RAS baja.

Finalmente hubo cuatro variables que no tuvieron ninguna relación aparente: los tipos de agua bicarbonatada magnésica, clorurada magnésica, clorurada cálcica y CE excesivamente salina. Se dedujo que en general los tipos de agua mencionados anteriormente no están condicionados a una unidad geomorfológica y litología específica.



**Litología**  
 SG-Sedimentos gruesos  
 SF-Sedimentos finos  
 SFMO- Sedimentos finos con capas de material orgánico  
 SFMF-Sedimentos finos y moderadamente finos

**Geomorfología**  
 DL- Delta lacustrino  
 TA-Terraza de acumulación  
 PM-Plano de marea  
 PI-Plano de inundación

**Leyenda**  
**Tipo de agua**  
 CS-Clorurada sódica  
 CC-Clorurada cálcica  
 CM-Clorurada magnésica  
 BS-Bicarbonatada sódica

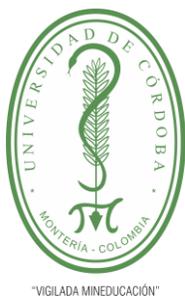
**CE**  
 ES-Excesivamente salino  
 FS-Fuertemente salino  
 MS-Moderadamente salino  
 LS-Ligeramente salino

**RAS**  
 E-Excesivo  
 MA-Muy alto



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



SMMC-Sedimentos mixtos con materiales cálcicos.

BC-Bicarbonatada cálcica  
BM-Bicarbonatada magnésica  
SS-Sulfatada sódica  
SS-Sulfatada cálcica  
SM-Sulfata magnésica

NS-No salino

B-Bajo

### Gráfico 8. Análisis de correspondencias múltiples Fuente: elaboración propia

## 6.3. MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

### 6.3.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Como se puede apreciar en la Tabla 11, los valores del error absoluto medio calculados a partir de la comparación entre los datos teóricos y experimentales de cada elemento conservativo son muy bajos (<1%), demostrando que el modelo se ajusta de manera casi perfecta a la realidad, por lo que no precisa de ningún arreglo, ya que sus resultados ofrecen un nivel de confiabilidad muy alto. Adicionalmente los Gráficos 9, 10, 11 y 12 indican que la relación de los datos modelados y los experimentales se puede describir por medio de un modelo lineal, debido a que se adapta muy bien a este, lo cual se puede ver claramente en el anexo B, donde el valor p es inferior a 0,05, lo que sugiere la existencia de una relación estadísticamente significativa entre los datos modelados y experimentales, mostrando un nivel de confianza del 95%, además el R cuadrado indica que el modelo explica más del 99,99% de la variabilidad y también el coeficiente de correlación es >0,999, lo que demuestra una relación relativamente fuerte entre las variables.

Tabla 11. Error absoluto medio

Elementos conservativos	Error absoluto medio	
	10 <sup>x</sup>	%
K <sup>+</sup>	5,56E-03	0,56
Mg <sup>++</sup>	5,22E-03	0,52
Na <sup>+</sup>	3,89E-03	0,39
Cl <sup>-</sup>	3,20E-03	0,32



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

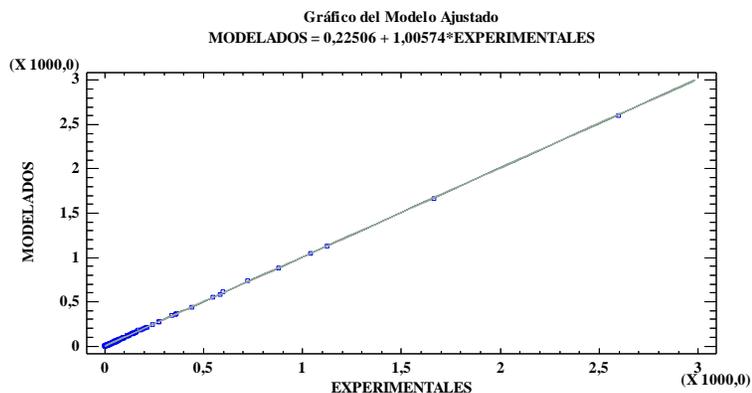
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías

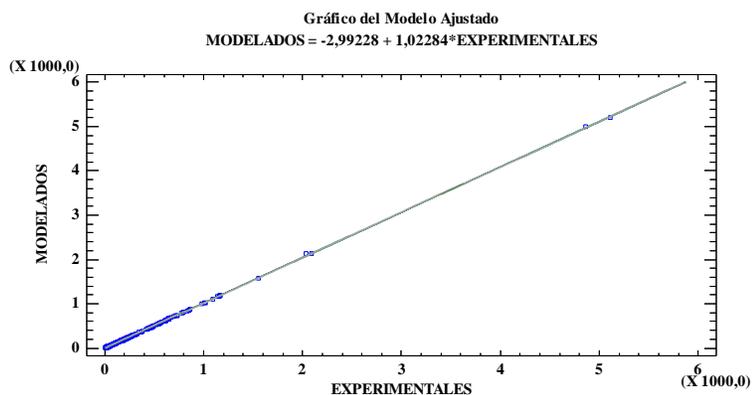


**acreditada**  
INSTITUCIONALMENTE  
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Fuente: elaboración propia



**Gráfico 9. Regresión lineal con  $K^+$**   
Fuente: elaboración propia



**Gráfico 10. Regresión lineal con  $Mg^{++}$**   
Fuente: elaboración propia

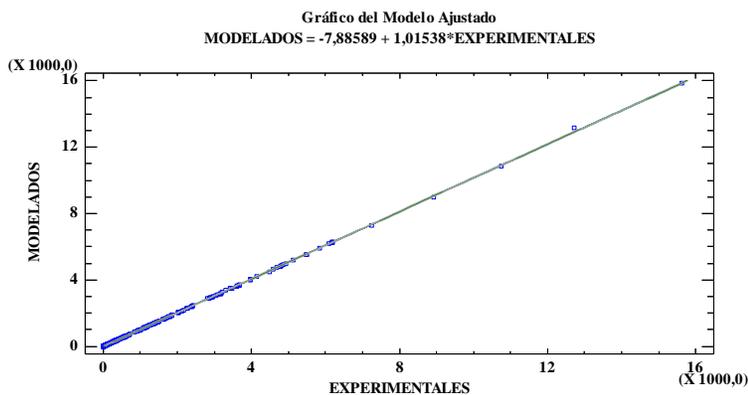


Certificado GP 134-1

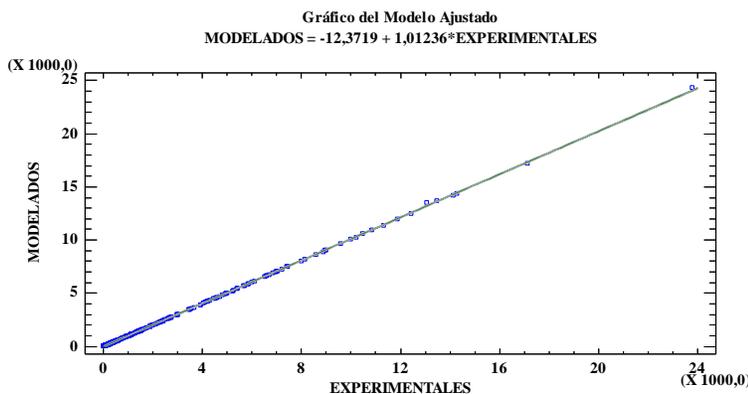
Certificado SC 5278-1

*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Gráfico 11. Regresión lineal con  $\text{Na}^+$**   
Fuente: elaboración propia



**Gráfico 12. Regresión lineal con  $\text{Cl}^-$**   
Fuente: elaboración propia

### 6.3.2. ESPECIACIÓN QUÍMICA

En la Tabla 12 se describe el comportamiento de la distribución de las especies, que se estructura bajo las siguientes características:

- Predominan las formas iónicas libres en el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=4}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Ca}^{++}$ , en porcentajes de  $>90\%$ ,  $>50\%$ ,  $>70\%$ ,  $>90\%$ ,  $>70\%$  y  $>80\%$ , respectivamente, estos valores son relativamente más altos en la temporada seca indicando una baja disponibilidad para enlazarse y formar complejos, debido a que están más disociados, lo que sugiere que en la época de lluvias los iones se encuentran más



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



dispuestos a acoplarse, repercutiendo en la formación de compuestos con mayores concentraciones.

- La distribución de los aniones está dominada principalmente por formas libres, y sucesivamente en asociaciones con el magnesio para el caso del  $\text{SO}_4^-$  y el  $\text{HCO}_3^-$  y con el sodio en el caso del  $\text{Cl}^-$ .
- La distribución de los cationes está gobernada por sus formas libres, seguida de complejos tipo sulfatos para el caso del  $\text{Mg}^{++}$  y el  $\text{Ca}^{++}$  y cloruros para el  $\text{Na}^+$ .
- Aunque de forma general el  $\text{Cl}^-$  presenta las mayores concentraciones dentro de los aniones, su baja afinidad para unirse a los cationes, conlleva a la formación de sales de muy baja concentración como el  $\text{NaCl}$ , en contraste, el sulfato a pesar de no exhibir concentraciones muy altas, su gran facilidad para juntarse con los cationes en particular con el  $\text{Mg}^{++}$ , le permite formar sales con mayores concentraciones como el  $\text{MgSO}_4$ .

**Tabla 12. Resultados del modelo de especiación**

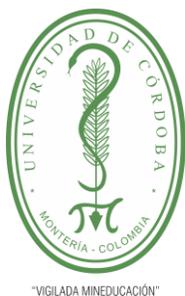
Temporada seca					
Aniones					
<b>Cl</b>	171,300	<b>SO<sub>4</sub></b>	15,740	<b>HCO<sub>3</sub></b>	5,060
$\text{Cl}^-$	168,500	$\text{SO}_4^-$	9,054	$\text{HCO}_3^-$	3,969
$\text{NaCl}$	1,992	$\text{MgSO}_4$	3,371	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	0,276
$\text{MgCl}_2$	0,700	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1,719	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	0,168
$\text{CaCl}_2$	0,110	$\text{CaSO}_4$	1,569	$\text{NaHCO}_3$	0,155
Cationes					
<b>Na</b>	138,600	<b>Mg</b>	21,460	<b>Ca</b>	12,450
$\text{Na}^+$	134,700	$\text{Mg}^{++}$	16,970	$\text{Ca}^{++}$	10,460
$\text{NaCl}$	1,992	$\text{MgSO}_4$	3,371	$\text{CaSO}_4$	1,569
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1,719	$\text{MgCl}_2$	0,700	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	0,168
$\text{NaHCO}_3$	0,155	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	0,276	$\text{CaCl}_2$	0,110

Temporada húmeda					
Aniones					
<b>Cl</b>	229,300	<b>SO<sub>4</sub></b>	23,940	<b>HCO<sub>3</sub></b>	5,080



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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

Cl <sup>-</sup>	224,500	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	11,720	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,625
NaCl	2,683	MgSO <sub>4</sub>	7,996	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,531
MgCl <sub>2</sub>	1,901	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,156	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,175
CaCl <sub>2</sub>	0,163	CaSO <sub>4</sub>	2,005	NaHCO <sub>3</sub>	0,143
<b>Cationes</b>					
<b>Na</b>	151,300	<b>Mg</b>	48,280	<b>Ca</b>	15,240
Na <sup>+</sup>	146,300	Mg <sup>++</sup>	37,840	Ca <sup>++</sup>	12,890
NaCl	2,683	MgSO <sub>4</sub>	7,996	CaSO <sub>4</sub>	2,005
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,156	MgCl <sub>2</sub>	1,901	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,175
NaHCO <sub>3</sub>	0,143	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,531	CaCl <sub>2</sub>	0,163

Fuente: Elaboración propia.

### Sulfato de magnesio (MgSO<sub>4</sub>)

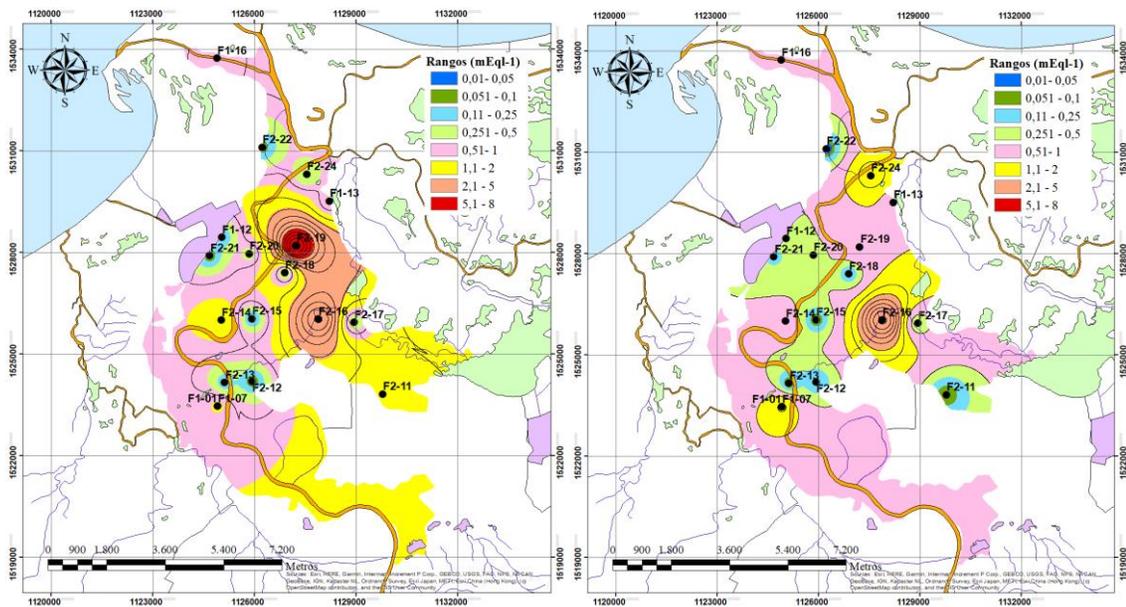
La distribución espacial de las concentraciones del sulfato de magnesio en época húmeda se representa en la Figura 12, teniéndose principalmente dos áreas con un comportamiento significativo, donde se pudo evidenciar la dinámica espacial de esta sal a lo largo de la zona de estudio. Entre la zona noreste y sureste se encontraron concentraciones intermedias a muy altas alrededor del pozo F2-19 en un rango de [1,1–8 mEq<sup>l</sup><sup>-1</sup>] y fue visible que las concentraciones intermedias se desplazaron hacia el pozo F2-16 donde hubo variación en el intervalo de [1,1–5 mEq<sup>l</sup><sup>-1</sup>]. Las concentraciones más bajas con valores de [0,05–1 mEq<sup>l</sup><sup>-1</sup>] en esta temporada se ubicaron al noroeste y suroeste de la región.

Los valores de concentraciones del sulfato de magnesio registrados en la época seca se muestran en la Figura 12, donde el pozo F2-16 ubicado al sureste de la zona de estudio, reportó intermedias a altas concentraciones que fluctúan entre [1,1–5 mEq<sup>l</sup><sup>-1</sup>] y en sus cercanías se ubica el caño sicara donde es posible que haya presencia de iones de sulfato en el agua y esto contribuya de manera directa a los valores de concentraciones hallados. Por otro lado, en los pozos F1-01, F1-07 y F2-24, situados al suroeste y noreste respectivamente, las concentraciones tendieron a encontrarse en su mayoría en valores de bajos a medios llegando hasta 1,5 mEq<sup>l</sup><sup>-1</sup>.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Figura 12. Mapa de isoconcentración  $MgSO_4$  temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha)  
Fuente: elaboración propia.**

### Sulfato de sodio ( $Na_2SO_4$ )

Las concentraciones del sulfato de sodio en temporada húmeda se representan en la Figura 13, donde esencialmente se refleja la dinámica de esta sal en el área comprendida entre los pozos F2-16 y F2-19 localizados al noreste de la zona. En comparación con el comportamiento descrito anteriormente del  $MgSO_4$  en época húmeda ilustrado en la Figura 12, y el  $Na_2SO_4$  en la misma temporada, fue notable que las concentraciones contenidas en los pozos que se detallaron fueron contrarias en esta sal, ya que, el primer pozo mencionado presentó los mayores valores de concentración entre  $[2,51-4 mEq/l]$  y los valores intermedios a bajos se extendieron hacia el segundo pozo antes expuesto encontrándose en un rango de  $[1,1-2,5 mEq/l]$ . Las concentraciones más bajas se hallaron en los sectores del noroeste y suroeste de la zona estudiada con valores de



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



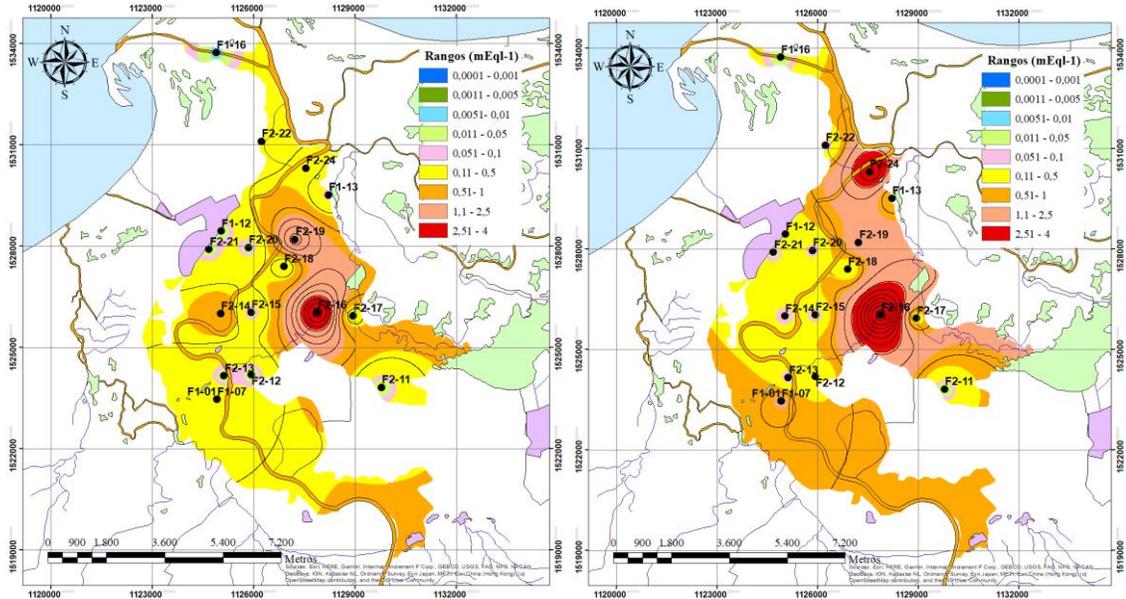
[0,0051–1 mEqL<sup>-1</sup>]. Teniendo en cuenta lo examinado en esta temporada, fue distinguible que en particular el pozo F2-16 y F2-19 tuvieron un comportamiento similar al descrito en el sulfato de magnesio representado en la Figura 14, debido a que mantuvo su desplazamiento hacia la misma área, sin embargo en el MgSO<sub>4</sub> fueron visibles valores mayores de concentración en ambos pozos.

De acuerdo a los resultados arrojados para el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en la temporada seca, fue evidente que la región abarcada por los pozos F2-16, F2-19 y F2-24 ubicados al noreste, encierran concentraciones medias y tienden a aumentar significativamente ubicándose entre el rango [1,1–4 mEqL<sup>-1</sup>]. Al suroeste de la región se hallaron localizados los pozos F1-01 y F1-07, los cuales presentaron valores intermedios oscilando a concentraciones de [0,51–1 mEqL<sup>-1</sup>], en cuanto a los menores valores encontrados se registró un rango de [0,011–0,5 mEqL<sup>-1</sup>] al oeste y al norte del área analizada como se muestra en la Figura 13. En contraste con lo encontrado en el MgSO<sub>4</sub> de esta temporada, el pozo F2-16 mantuvo una dinámica similar en cuanto al área abarcada a nivel de concentraciones intermedias y altas.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Figura 13. Mapa de isoconcentración  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha)  
Fuente: elaboración propia.**

En términos generales para las temporadas climáticas analizadas la distribución de las concentraciones de los sulfatos se ubicó en diversos sectores, indicando que los altos valores hallados se pueden atribuir a la disolución de sales sulfatadas representando el aporte más importante, también puede deberse a la procedencia del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros y de la descomposición de sustancias orgánicas (Mariño y García 2018). En especial, el pozo F2-16 presentó muy altas concentraciones en esta sal, esto puede asociarse a que la cobertura en la que se encuentra ubicado hace parte de zonas pantanosas, y los pantanos pueden llegar a ser contribuyentes a la salinidad de los suelos, un ejemplo son los pantanos de sal que por lo general están situados entre la transición de suelo y ambiente marino, y su salinidad depende de las mareas, reteniendo estas sales debido al constante movimiento del mar, sobre todo en zonas áridas la salinidad presente es muy alta debido a la evaporación constante del agua. La evaporación de agua y la transpiración realizada por las hojas de



# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



plantas autóctonas de estos ecosistemas dejan sal en el suelo que por largos periodos tienen a acumular cada vez más sales.

Al igual que otras sales la solubilidad de los sulfatos depende de la temperatura, un claro ejemplo de esto es el sulfato sódico, ya que esta sal durante el periodo seco se acumula en la superficie del suelo donde forma eflorescencias blancas y en la época húmeda puede ser lavada si la temperatura y las características del suelo favorecen esta situación. El sulfato sódico es un componente frecuente en los suelos salinos, en forma de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Tenartita) en desiertos y periodos de sequía, y  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Mirabilita) en la estación húmeda.

### Cloruro de sodio (NaCl)

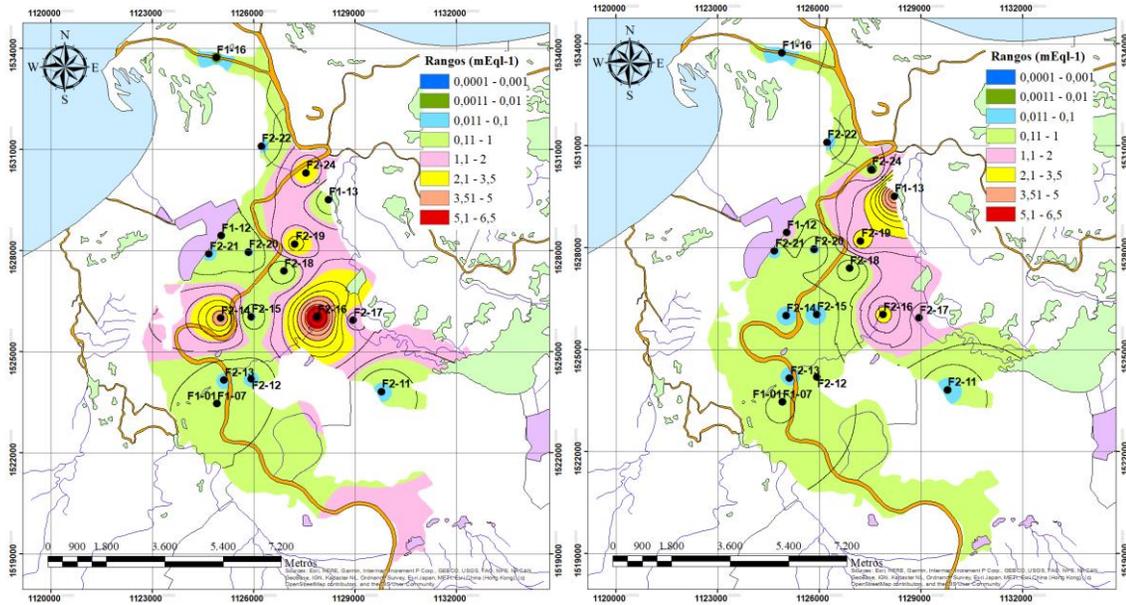
En referencia al cloruro de sodio, se puede apreciar en el mapa con claridad que en la totalidad del área representada por los pozos F2-14 y F2-16 hallados en la parte central de la zona de estudio, el rango de concentraciones varió desde intermedias a muy altas con valores desde  $[2,1-6,5 \text{ mEq l}^{-1}]$ . El área comprendida entre los pozos F2-19 y F2-24 ubicados al noreste de la región, registró pequeñas fluctuaciones de concentraciones medias con valores entre  $[1,1-2,1 \text{ mEq l}^{-1}]$ , y finalmente, se encontró un rango de bajas a muy bajas concentraciones  $[0,011-1 \text{ mEq l}^{-1}]$  para ciertos sectores ubicados al noroeste y suroeste en el periodo húmedo como se ilustra en la Figura 14.

Las concentraciones de NaCl del periodo seco evidenciado en la Figura 14, mostraron que el valor más alto fue de  $4,6 \text{ mEq l}^{-1}$  y se ubicaba al noreste en el área cubierta por el pozo F1-13. Se percibió que al noreste y este de la región los pozos F2-24, F2-19, F2-16 y F2-17 tuvieron un desplazamiento de las concentraciones entre valores medios a bajos  $[1,1-3,5 \text{ mEq l}^{-1}]$ . Y la gran mayoría de los demás pozos que se situaban al oeste y sur de la zona presentaron muy bajas concentraciones en el intervalo de  $[0,011-1 \text{ mEq l}^{-1}]$ .



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



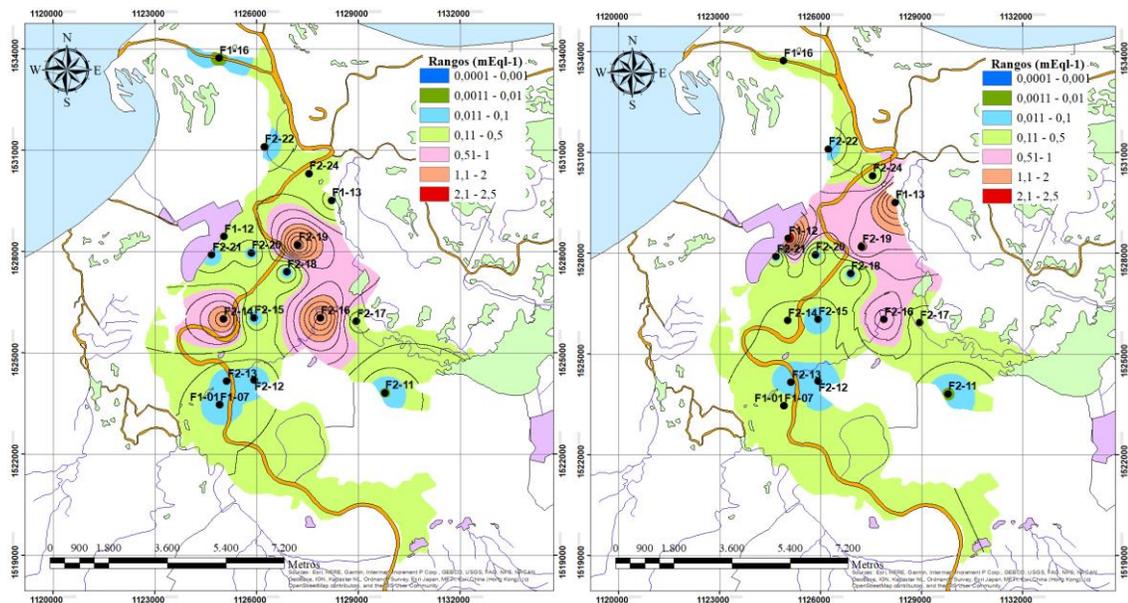
**Figura 14. Mapa de isoconcentración NaCl temporada húmeda (izquierda);  
temporada seca (derecha)  
Fuente: elaboración propia.**

### Cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ )

El cloruro de magnesio en el periodo húmedo tuvo un comportamiento espacial de un intermedio a alto nivel de concentración en los sectores oeste y noreste de la zona de estudio donde se hallaban los pozos F2-16, F2-19 y F2-14 con valores entre  $[0,51-2 \text{ mEq l}^{-1}]$  respectivamente. Y exhibió concentraciones bajas  $[0,0011-0,5 \text{ mEq l}^{-1}]$  en términos generales al sur, sureste y una parte del noroeste de la región mostradas en la Figura 15. Con respecto a los pozos F2-16 y F2-14, estos tuvieron la tendencia a permanecer en la misma área tanto en el NaCl como en el  $MgCl_2$ , aunque las concentraciones de cloruro de sodio fueron aproximadamente cinco veces mayores en comparación a las descritas en el cloruro de magnesio para esta temporada.

En relación con la temporada seca, esta sal a lo largo de la zona estudiada reveló en su mayoría bajas concentraciones situadas al sureste y suroeste con valores de  $[0,011-0,5$

mEq $l^{-1}$ ] sin embargo, esta estuvo interrumpida por zonas de concentración intermedias al noreste, con valores que oscilaban en el rango de [0,51–1 mEq $l^{-1}$ ] donde se ubicaron los pozos F2-16, F2-19 y F2-24 y una zona de intermedia a alta concentración que está ubicada al este y al oeste con valor de [1,1–2,5 mEq $l^{-1}$ ] donde se localizan el pozo F1-12 y F1-13 ilustrado en la Figura 15. Especialmente la dinámica que presentó este último pozo mencionado en cuanto al área abarcada fue similar a la del NaCl, no obstante, el valor de concentraciones fue el doble en relación al MgCl $_2$  en esta época.



**Figura 15. Mapa de isoconcentración MgCl $_2$  temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha)  
Fuente: elaboración propia**

Teniendo en cuenta lo examinado en ambas temporadas, se pudo establecer que la principal causa del incremento en concentraciones de cloruros en la zona de estudio puede derivarse por distintos factores, uno de ellos se debe a que en la época húmeda se produce disolución de sales presentes en sedimentos. Por otro lado, puede deberse al proceso de evaporación donde las bajas precipitaciones causan que el agua se concentre,



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



al respecto Combatt et al. (2015), indican que en el estudio 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, por consiguiente, esto ocasiona que se presenten los máximos valores de salinidad debido a la intensa evaporación.

Concretamente, el cloruro de sodio es la sal más frecuente que constituye en las épocas secas eflorescencias con gusto salado, la presencia de NaCl afecta la solubilidad de otras sales por efecto del ion común (Kovda y Cools 1967), autores como Harries (1915) indican que los cloruros son más tóxicos que los sulfatos para la germinación de las plantas. Así mismo, la acumulación de cloruros de magnesio se produce en los suelos con salinidad extremadamente alta. Es una sal altamente tóxica y muy perjudicial para las plantas, el  $MgCl_2$  se puede formar si el suelo recibe aguas ricas en iones de  $Cl^-$  y  $Na^+$ , los que reaccionan con el  $Mg^{++}$  intercambiable del suelo. La presencia de cloruros de magnesio en el suelo hace que su superficie se mantenga húmeda por mucho tiempo después de una lluvia o un riego. Esto se debe a que esta sal es muy higroscópica y puede absorber agua del aire.

Además, otro factor determinante puede resultar de las malas prácticas agrícolas, el mal manejo de la irrigación con aguas de baja calidad, el uso de fertilizantes sintéticos, la deforestación, y la variedad de químicos usados en la agricultura que terminan en procesos de degradación afectando tanto al suelo como a las aguas freáticas que se encuentren en la zona, aumentando la salinidad en estas áreas.

### **Bicarbonato de sodio ( $NaHCO_3$ )**

Esta sal en época húmeda se presentó con concentraciones relativamente bajas en comparación con las concentraciones de las demás sales, fluctuando hacia la parte noreste de la zona de estudio alcanzando valores máximos de  $0,3 \text{ mEq l}^{-1}$  rodeando un área poco dispersa entre los pozos F2-16, F2-17, F2-19, F2-22 y F2-24 como se muestra en la Figura 16. En los sectores situados al oeste y al sureste de la región, se encontraron



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



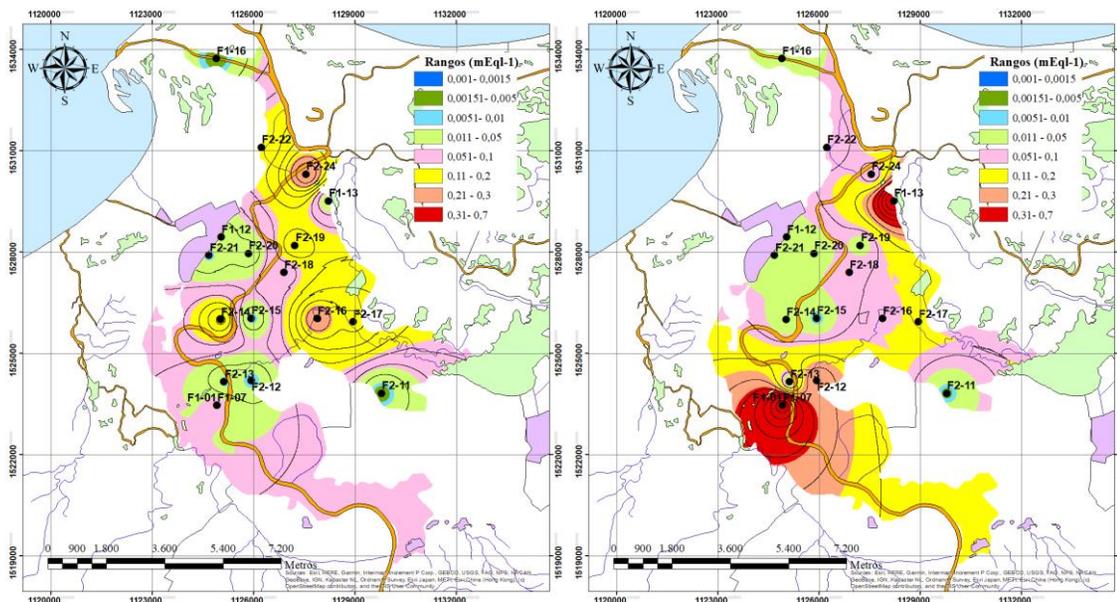
concentraciones intermedias abarcando distintos pozos, en especial el pozo F2-14 que contuvo el mayor valor intermedio de  $0,15 \text{ mEq l}^{-1}$  aproximadamente, y muy particularmente hubo muy bajas concentraciones en ciertos puntos que se distinguen en el mapa con valores de  $[0,0051-0,05 \text{ mEq l}^{-1}]$ .

Conforme a la distribución espacial del bicarbonato de sodio en época seca representada en la Figura 16, fue visible que los mayores valores de concentración se ubicaban en los pozos F1-01, F1-07 y F2-12 que abarcan gran parte de la zona sur oeste de la región, y el pozo F1-13 en el sector noreste, exhibiendo concentraciones de  $[0,2-0,7 \text{ mEq l}^{-1}]$ . En el sector noroeste se localizaron concentraciones más bajas a con un rango de  $[0,011-0,1 \text{ mEq l}^{-1}]$ .



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Figura 16. Mapa de isoconcentración  $\text{NaHCO}_3$  temporada húmeda (izquierda); temporada seca (derecha)  
Fuente: elaboración propia.**

Durante la infiltración de agua de lluvia y agua de riego, los minerales de carbonato disponibles a lo largo del camino se disolverán dependiendo de la disponibilidad de agua disuelta por ende la distribución espacial de esta sal con valores de concentraciones fluctuando entre intermedias a altas se distingue por la dispersión y desplazamiento sobre distintas áreas donde la disponibilidad del agua es abundante.

La presencia de bicarbonato en la zona de estudio y su distribución puede estar determinada principalmente por disoluciones de silicatos o disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico o del suelo, también por hidrólisis y oxidación de materia orgánica. La presencia de otras sales solubles en la solución del suelo limita la formación del bicarbonato sódico y en presencia de  $\text{NaCl}$ , la solubilidad del bicarbonato sódico disminuye por efecto del ión común. (West Analítica y Servicios S.A. de C.V. sf) De igual modo el alto contenido puede ser un indicativo de mayor grado de disolución de calcita, debido a procesos de intercambio iónico provocados por un mayor tiempo de



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

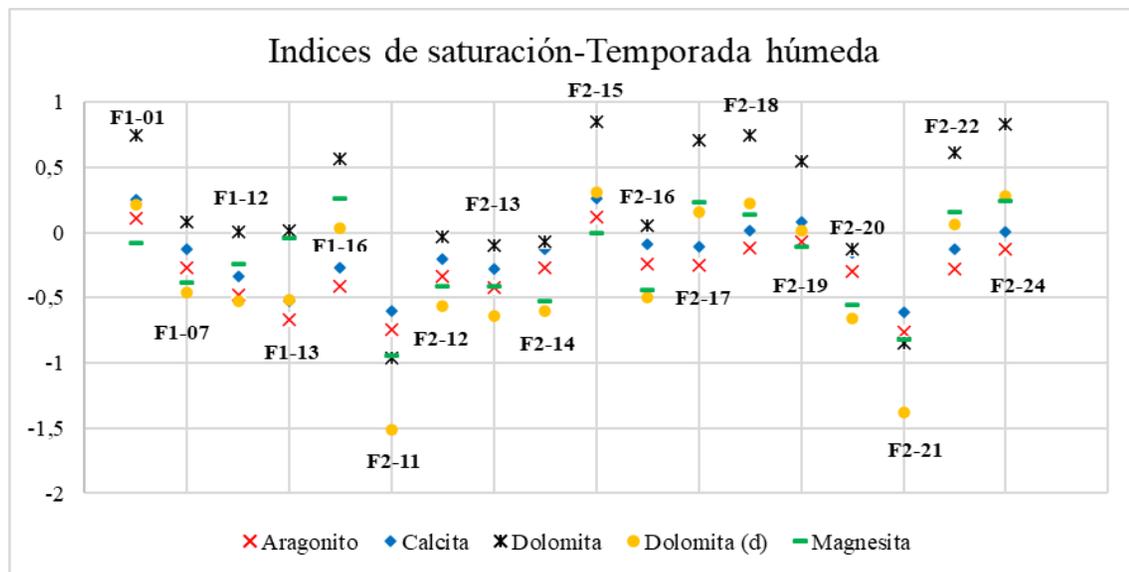
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



almacenamiento en el agua subterránea, Esto se encuentra directamente relacionado con la profundidad de almacenamiento debido al movimiento realizado por infiltración (Bortolin et al. 2014).

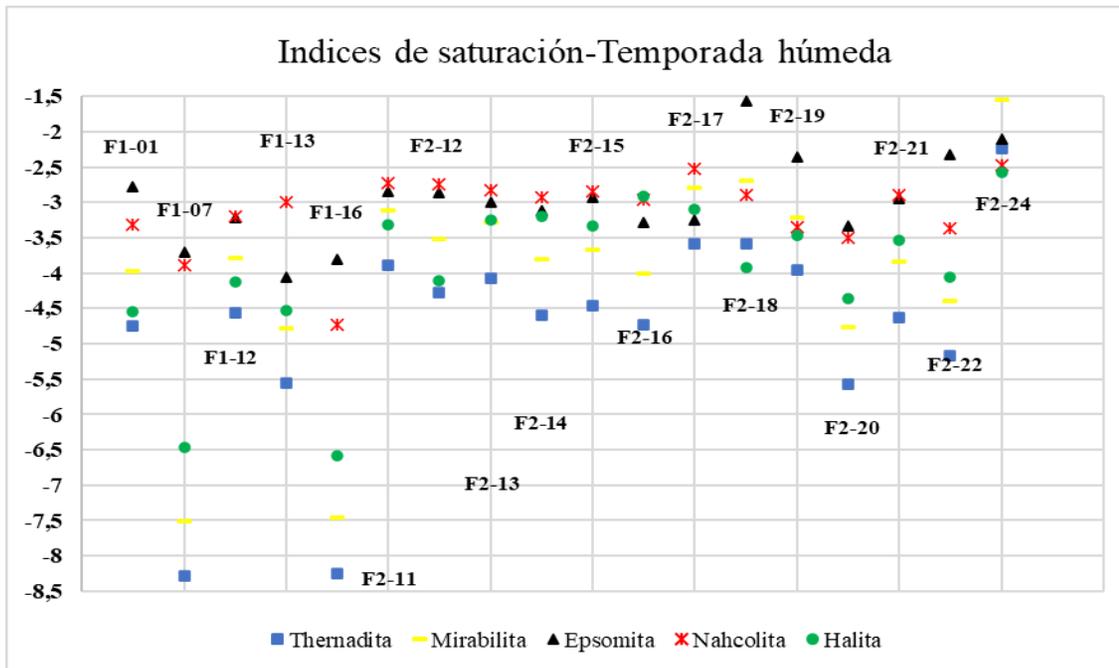
### 6.3.3. MODELO DE SOLUBILIDAD

El cálculo de los índices de saturación se utilizó para determinar el estado de equilibrio de las fases mineralógicas del sistema. Es por esto que, en el Gráfico 13 y el Gráfico 14, se muestran los valores de saturación para diversos minerales obtenidos por medio de la modelación efectuada en PHREEQC e indican el grado de saturación de los minerales más comunes de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos introducidos al programa para los diversos cálculos.

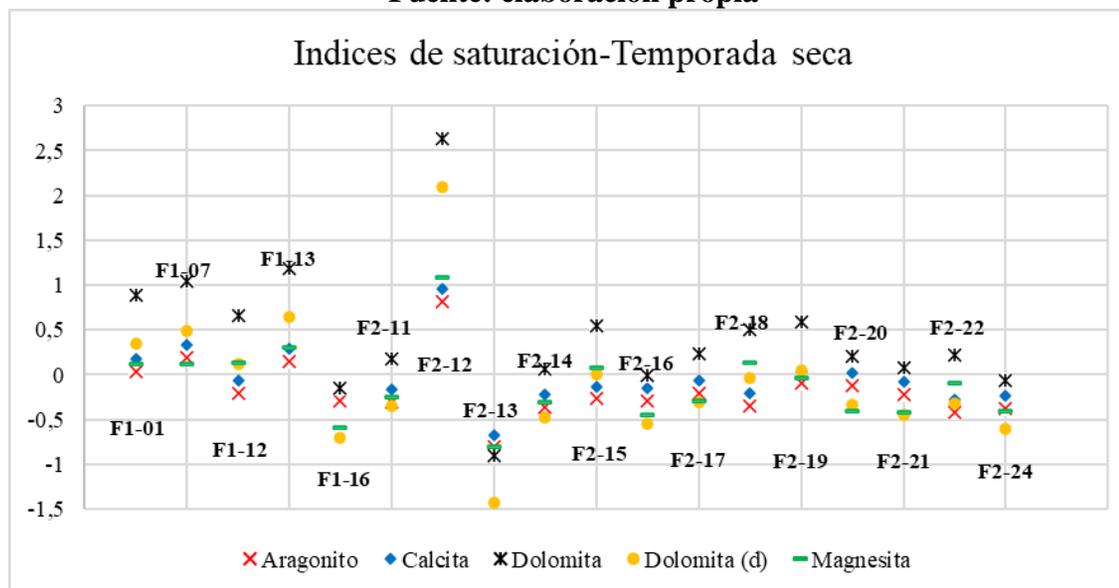


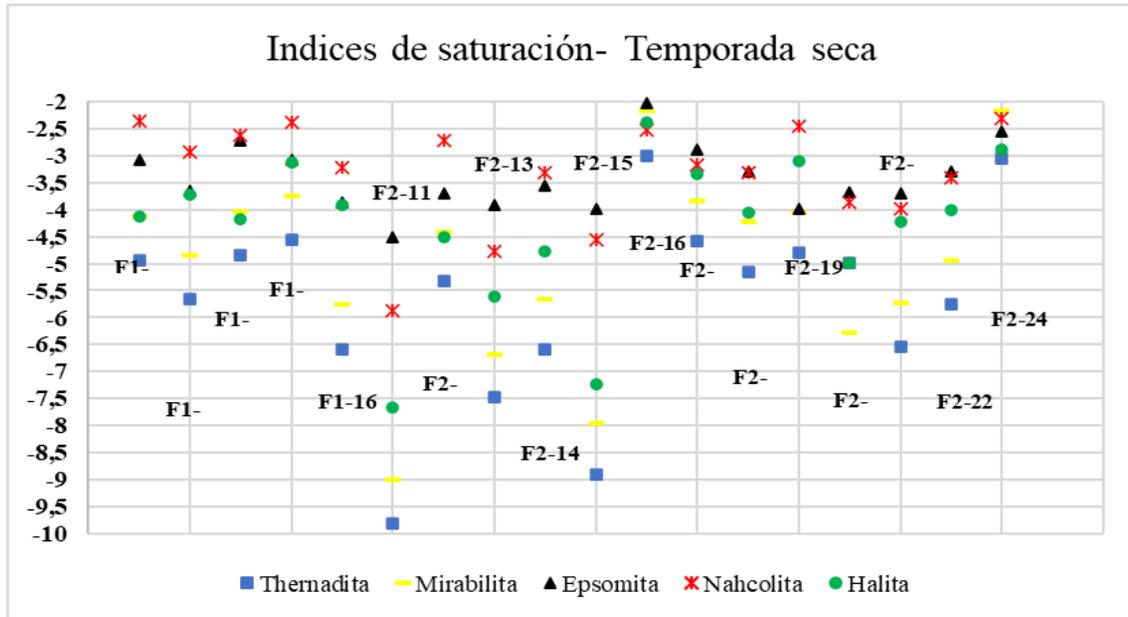
*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



**Gráfico 13. Índices de saturación en temporada húmeda**  
Fuente: elaboración propia





**Gráfico 14. Índices de saturación en temporada seca**  
Fuente: elaboración propia

En la temporada húmeda fue notorio que los minerales aragonito, calcita, dolomita y magnesita se ubicaban en un estado de equilibrio, siendo la dolomita la fase mineralógica que se situaba en un estado sobresaturado en la mayoría de las muestras. Por otra parte, teniendo en cuenta la temporada seca se observó que los minerales aragonito y calcita se encontraban en estado de equilibrio con el sistema, seguido de la dolomita que la mayoría de las muestras se situaron en estado sobresaturado y una muy mínima parte estuvo en equilibrio.

En la dolomita(d) en temporada seca se situó en condiciones de equilibrio a excepción de algunas muestras en los diferentes pozos, en contraste a la temporada húmeda una gran cantidad de las muestras de agua estuvieron sobresaturadas con respecto al mineral, finalmente para la fase mineralógica magnesita el mayor contenido de las muestras se encontraron en equilibrio. Estas fases mineralógicas que en gran parte se situaron en un



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



estado de equilibrio están compuestas en su gran mayoría por carbonatos de calcio y magnesio, los cuales tienen baja solubilidad y por ende no repercuten directamente sobre el aumento de la salinidad. La nahcolita y la epsomita tuvieron un comportamiento cercano a la franja de equilibrio en ambas temporadas, en cuanto a la thernadita y la mirabilita con respecto a los demás minerales en la mayor parte de los pozos tuvieron un alto grado de subsaturación. La halita, en época húmeda las aguas se encontraron mucho más subsaturadas con respecto al mineral descrito, en comparación a la época seca donde el rango era mucho menor, estos minerales son dominantes a partir de la evaporación de salmueras por efecto de la intrusión marina en el agua freática.

Estas fases mineralógicas pueden llegar a aportar cantidades significativas de sales a la solución del suelo, estas son: carbonatos, cloruros y sulfatos. Específicamente, las sales cloruradas y sulfatadas al estar constituidas principalmente por iones de sodio y magnesio presentan alta solubilidad y esto conlleva a un efecto perjudicial para los cultivos ya que podrían generar problemas de toxicidad en las plantas, e influye directamente en el incremento de la salinidad.

#### 6.4. TÉCNICAS DE MANEJO DE SUELO

Los resultados obtenidos del capítulo anterior permitieron identificar y conocer las sales solubles que mayor 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  $MgSO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $NaCl$ ,  $MgCl_2$  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



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



críticos donde las concentraciones son altas, conformado principalmente por los pozos F2-16, F2-19, F2-14, F2-24, F1-13, F1-01 y F1-07. 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 aspersion mediana o ligera. En la zona de estudio, las principales sales responsables del proceso de salinización son NaCl y MgSO<sub>4</sub>, puesto que sus concentraciones son más elevadas en relación con otras sales solubles.

Para disminuir la concentración de la sal NaCl en estos puntos, se recomienda agregar sulfato de amonio, el cual tiene características ácidas, con el objeto de disminuir el pH y de desplazar el sodio intercambiable del complejo de cambio del suelo, para producir sulfato de sodio, el cual tiene mayores posibilidades de ser removible del suelo. 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. Su aplicación normalmente se realiza al voleo y luego se incorporan al suelo mediante disco o arado. 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, por lo cual en este medio anaeróbico el amonio se mantendrá disponible para las plantas.

La mejora de los suelos con MgSO<sub>4</sub> es difícil en vista del efecto de dilución de valencia; el Mg<sup>++</sup> tenderá a ocupar los lugares de intercambio desplazando los iones monovalentes



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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  $Mg^{++}$  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  $Mg^{++}$  y del  $Na^{+}$ .

Se debe realizar lavado en los suelos con aguas de buena calidad, ya que las aguas freáticas de la zona de estudio son principalmente cloruradas sódicas. Y 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,  $Na_2SO_4$  y  $NaHCO_3$  presentes en la zona de estudio. Estos compuestos orgánicos permitirán la estimulación de la microbiota bacteriana del suelo y, por lo tanto, la producción de  $CO_2$ , facilitando la solución de cationes como magnesio y calcio, los cuales sustituyen el sodio, disminuyendo el exceso de las sales encontradas.

## 7. CONCLUSIONES

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



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



1. El orden de abundancia de los cationes en las aguas freáticas es  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++}$  y el de los aniones es  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{=}$ . 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 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 de acumulación y plano de marea, reportan flujos locales y las de plano de inundación y delta lacustrino indican la presencia de flujos intermedios más evolucionados.
4. Los pozos con mayores concentraciones identificados a partir de los diagramas de Stiff son F2-16, F2-19 y F2-24 ubicados en la geomorfología de 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  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{NaHCO}_3$ , son ligeramente más elevadas en temporada húmeda, principalmente en las muestras de agua de los pozos F2-16, F2-19, F2-24, F2-14, F1-13, F1-01 y F1-07.
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



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CORDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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 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 prácticas antropogénicas y amenazas naturales.
- Para evitar un proceso de mayor degradación por salinización 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.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Alley, W. M. (Ed.). (1993). *Regional ground-water quality*. John Wiley y Sons.
- Amezketa, E. (2006). An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*, 67(4), 594-606.



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Barzegar, R., Moghaddam, A. A., Tziritis, E., Fakhri, M. S., y Soltani, S. (2017). Identification of hydrogeochemical processes and pollution sources of groundwater resources in the Marand plain, northwest of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 76(7), 1-16.
- Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., y 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.
- Bortolin, T. A., Reginato, P. A. R., Leão, M. I., y Schneider, V. E. (2014). Hidrogeología e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). *Revista Ambiente y Água*, 9, 55-67.
- Brown, KP y Hosseinipour, EZ (1991). Modelización de especiación, transporte y transformación de metales a partir de residuos mineros. *Modelización ecológica*, 57 (1-2), 65-89.
- Bu, H., Tan, X., Li, S. y Zhang, Q. (2010). Evaluación de la calidad del agua del río Jinshui (China) mediante técnicas estadísticas multivariadas. *Ciencias ambientales de la tierra*, 60 (8), 1631-1639.
- Bustamante, E. 2017. Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero soconusco, Chiapas [Tesis de maestría en geociencias aplicadas, Instituto potosino de investigación científica y tecnológica, A.C].
- 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, Córdoba.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., y Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



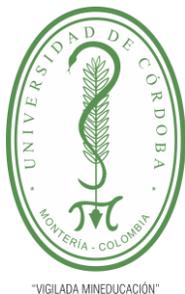
evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3-4), 294-313.

- Combatt, E., y Narváez, H. (2015). Estimación de la salinidad en aguas freáticas del área de influencia de la desembocadura del río Sinú-Córdoba, Colombia. *Idesia (Arica)*, 33(3), 55-63.
- Courel, G. (2019). Guía de estudio Suelos Salinos y Sódicos. *Cátedra de Edafología-Facultad de Agronomía y Zootecnia-Universidad Nacional de Tucumán (Ed.)*, 2-3.
- Custodio, E.; Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. Tomo II. Segunda edición. Omega, Barcelona, España.
- Datta, P. S., y Tyagi, S. K. (1996). Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: chemical weathering processes and groundwater flow regime. *Journal of Geological Society of India (Online archive from Vol 1 to Vol 78)*, 47(2), 179-188.
- Fagundo, J. R. (2002). Procesos geoquímicos naturales e inducidos por el hombre en acuíferos kársticos costeros. Caso de estudio: Sector hidrogeológico Güira Quivicán (Cuenca Sur de La Habana). *Hidrogeología*, 2.
- Fagundo-Castillo, J. R., Alconada-Magliano, M. M., Carrillo-Rivera, J. J., & González-Hernández, P. (2014). Caracterización de los flujos de agua subterránea a partir de su salinidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(3), 63-80.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CSA and JRC. 2008. *Harmonized World Soil Database (version 1.0)*, FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fernández Escalante, E. (2009). Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas 1.
- Gomes, O. V., Marques, E. D., Kütter, V. T., Aires, J. R., Travi, Y., y Silva-Filho, E. V. (2019). Origin of salinity and hydrogeochemical features of porous aquifers from northeastern Guanabara Bay, Rio de Janeiro, SE-Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, 100-601.



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Guida-Johnson, B., Abraham, E. M., y Cony, M. A. (2017). Salinización del suelo en tierras secas irrigadas: perspectivas de restauración en Cuyo, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(1), 205-215.
- Hanay, A., Büyüksönmez, F., Kiziloglu, F. M., y Canbolat, M. Y. (2004). Reclamation of saline-sodic soils with gypsum and MSW compost. *Compost Science y Utilization*, 12(2), 175-179.
- Harries, E. 1915. Effect of alkali salts in soils on the germination and crops.
- Hidalgo, M. C., y Cruz-Sanjulián, J. (2001). Groundwater composition, hydrochemical evolution and mass transfer in a regional detrital aquifer (Baza basin, southern Spain). *Applied Geochemistry*, 16(7-8), 745-758.
- IDEAM, CAR y UDCA, 2017. Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2017). *Mapa nacional de degradación de suelos por salinidad*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- IGAC, 2009. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Córdoba. ISBN: 978-958-83-23-32-9. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, AK, Pulatov, A., Kempen, B. y De Sousa, L. (2019). Mapeo global del cambio de salinidad del suelo. *Teledetección del medio ambiente*, 231, 111260.
- Jankowski, J., y Acworth, R. I. (1997). Impact of debris-flow deposits on hydrogeochemical processes and the development of dryland salinity in the Yass River Catchment, New South Wales, Australia. *Hydrogeology Journal*, 5(4), 71-88.
- Klassen, J., Aleen, DM y Kirtse, D. (2014). Indicadores químicos de intrusión de agua salada para las Islas del Golfo, Columbia Británica. *Informe final*. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simon Fraser.



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Kovda, A y Cools, 1967. International source-book on irrigation and drainage of aridlands in relation to salinity and alkalinity. FAO-UNESCO.
- Kreitler, C. W. (1993). *Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization*. CRC press.
- Kuldip-Singh, Hundal, H.S. y Dhanwinder-Singh (2011). Geochemistry and assessment of hydrogeochemical processes in groundwater in the southern part of Bathinda district of Punjab, northwest India. *Environ Earth Sci* 64, 1823–1833 <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0989-9>
- Kumar, M., Ramanathan, A. L., Rao, M. S., y Kumar, B. (2006). Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *Environmental geology*, 50(7), 1025-1039.
- Ledesma-Ruiz, R., Pastén-Zapata, E., Parra, R., Harter, T., y Mahlknecht, J. (2015). Investigation of the geochemical evolution of groundwater under agricultural land: a case study in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 521, 410-423.
- Liang, Y., Nikolic, M., y Peng, Y. C. W., Jiang, Y. 2005. El abono orgánico estimula la actividad biológica y el crecimiento de la cebada en materia de suelo a la salinización secundaria. *Biol. Suelo. Biochem*, 37, 1185-1195.
- Liu, J., Gao, Z., Wang, M., Li, Y., Ma, Y., Shi, M., y Zhang, H. (2018). Study on the dynamic characteristics of groundwater in the valley plain of Lhasa City. *Environmental Earth Sciences*, 77(18), 1-15.
- Liu, J., Gao, Z., Wang, Z., Xu, X., Su, Q., Wang, S., ... y Xing, T. (2020). Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-17.
- Lozada Trujillo, José Abel. (2018). *Identificación de los procesos hidrogeoquímicos en el Sistema Lagunar Montebello, mediante la modelación*



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



*inversa en PHREEQC. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México,]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/438212>*

- Machiwal, D., y Jha, M. K. (2015). Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 80-110.
- Malagón, J. P. (2017). Análisis Hidrogeoquímico Multivariado del Agua Subterránea del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena-Colombia. *Universidad Nacional de Colombia, Bogotá*.
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., y Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 0-0.
- Mata-Fernández, I., Rodríguez-Gamiño, M. L., López-Blanco, J., y Vela-Correa, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, 1(5), 26-35.
- Mercado Fernández, T., Ortega Escobar, M., Arenas Tawil, A., y Combatt Caballero, E. (2011). Dinámica de sales en el distrito de riego La Doctrina, Colombia. *Idesia (Arica)*, 29(1), 83-90.
- Morán-Ramírez, J. (2016). *Modelación Hidrogeoquímica en Tres Ambientes Naturales en México: Cárstico, Volcánico y Cuenca Sedimentaria. [Tesis Doctoral. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT)].*
- Narváez, H., Combatt, E., y Barrera, I. B. (2014). Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú (Córdoba, Colombia). *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 17(2), 433-443.



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Omuto, C. T., Vargas, R. R., El Mobarak, A. M., Mohamed, N., Viatkin, K., y Yigini, Y. (2021). *Mapeo de suelos afectados por salinidad-Manual técnico*. Food y Agriculture Org..
- Peeters, L. (2014). A background color scheme for piper plots to spatially visualize hydrochemical patterns. *Groundwater*, 52(1), 2-6.
- Quan, A. L., Llano, E. G., y Ruiz, M. E. (2005). Estimación de la salinidad de los suelos utilizando una imagen espectrozonal y el sistema de información geográfica TELEMAT. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 14(1), 47-54.
- Ren, X., Li, P., He, X., Su, F., y Elumalai, V. (2021). Hydrogeochemical processes affecting groundwater chemistry in the central part of the Guanzhong Basin, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80(1), 74-91.
- Richards, LA (1954). Diagnóstico y mejora de suelos salinos y alcalinos, Manual Agrícola No. 60. USDA. *Servicio de Investigación Agrícola, Subdivisión de Investigaciones sobre Conservación del Agua y el Suelo, Washington, DC, EE . UU .*
- Rojas, J. 2018. Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del valle medio de la Magdalena en el área de Villa de Leiva- El Pescado, Colombia: análisis cuantitativo de la calidad del agua. [Trabajo de Tesis pregrado, Universidad de los Andes].
- Schecher, WD y McAvoy, DC (1992). MINEQL +: un entorno de software para el modelado del equilibrio químico. *Computadoras, medio ambiente y sistemas urbanos*, 16 (1), 65-76.
- Silva, E., Mendes, MP, Ribeiro, L. y Cerejeira, MJ (2012). Evaluación de la exposición de plaguicidas en aguas subterráneas poco profundas de la zona vulnerable del Tajo (Portugal): un enfoque estadístico multivariado (JCA). *Investigación en ciencias ambientales y contaminación*, 19(7), 2667-2680.



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



- Smith TM, Smith RL. 2007. Ecología. Ed. Pearson-Addison Wesley. Madrid España. 776 p.
- Tian, A., Fu, C., Su, X. Y., Yau, H. T., 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*, 19(20), 4517.
- Tikhomirov, VV (2016). *Fundamentos y avances de la hidrogeoquímica, composición y química de las aguas subterráneas* (Vol. 1). John Wiley e hijos.
- Tipping, E. (1994). WHAMC—A chemical equilibrium model and computer code for waters, sediments, and soils incorporating a discrete site/electrostatic model of ion-binding by humic substances. *Computers & Geosciences*, 20(6), 973-1023.
- VanBriesen, J. M., Small, M., Weber, C., y Wilson, J. (2010). Modelling chemical speciation: thermodynamics, kinetics and uncertainty. *Modelling of pollutants in complex environmental systems*, 2(1), 133-149.
- West Analítica y Servicios S.A. de C.V. (1 de mayo de 2021) Salinidad y sales solubles en suelo-importancia, medición y control. <https://westanalitica.com.mx/wp-content/uploads/2018/04/Salinidad-y-Sales-Solubles-en-Suelo.pdf>.
- Wicke, B., Smeets, E., Dornburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W., y Faaij, A. (2011). The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy y Environmental Science*, 4(8), 2669-2681.
- Wu, J., Li, P., Wang, D., Ren, X. y Wei, M. (2020). Técnicas estadísticas y estadísticas multivariadas para rastrear las fuentes y los factores que afectan la contaminación de las aguas subterráneas en una ciudad de rápido crecimiento en la meseta china de Loess. *Evaluación de riesgos humanos y ecológicos: una revista internacional*, 26 (6), 1603-1621.
- Yang, Q., Li, Z., Ma, H., Wang, L., y Martín, J. D. (2016). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic



**Por una universidad con calidad, moderna e incluyente**

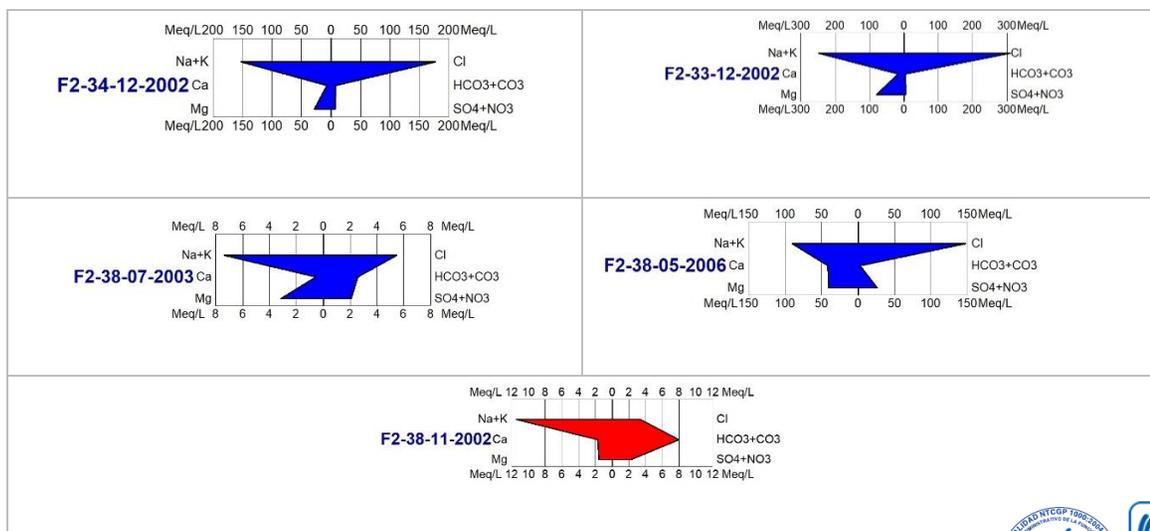
Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)

integrated geochemical methods in the Southeastern part of Ordos basin, China. *Environmental Pollution*, 218, 879-888.

- Zhou, D., Lin, Z., Liu, L., y Zimmermann, D. (2013). Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework. *Journal of environmental management*, 128, 642-654.
- Zúñiga, V. P., Azofeifa, I. V., Quintero, M. C. V., y Hartig, F. A. (2010). Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje bananero de Urabá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 51-61.

## 10. ANEXOS

### 10.1. ANEXO A



**Figura 17. Concentraciones de Stiff- delta lacustrino**  
Fuente elaboración propia.



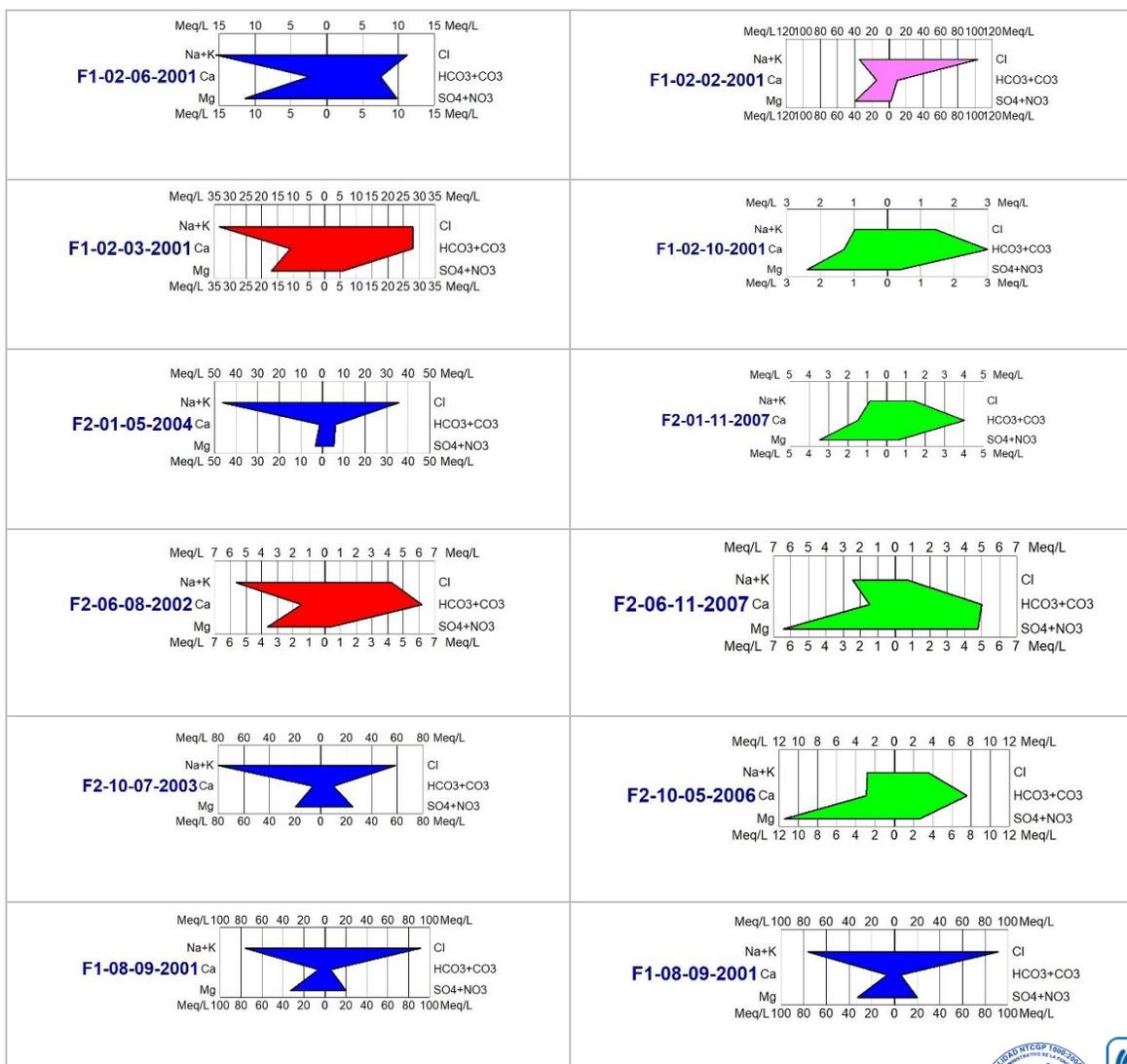
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



**Figura 18. Concentraciones de Stiff- plano de marea**  
Fuente elaboración propia.



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

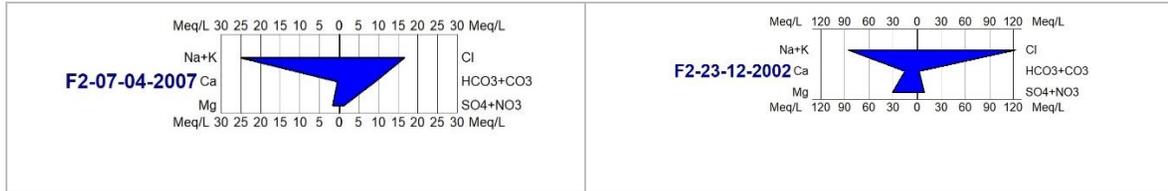
# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

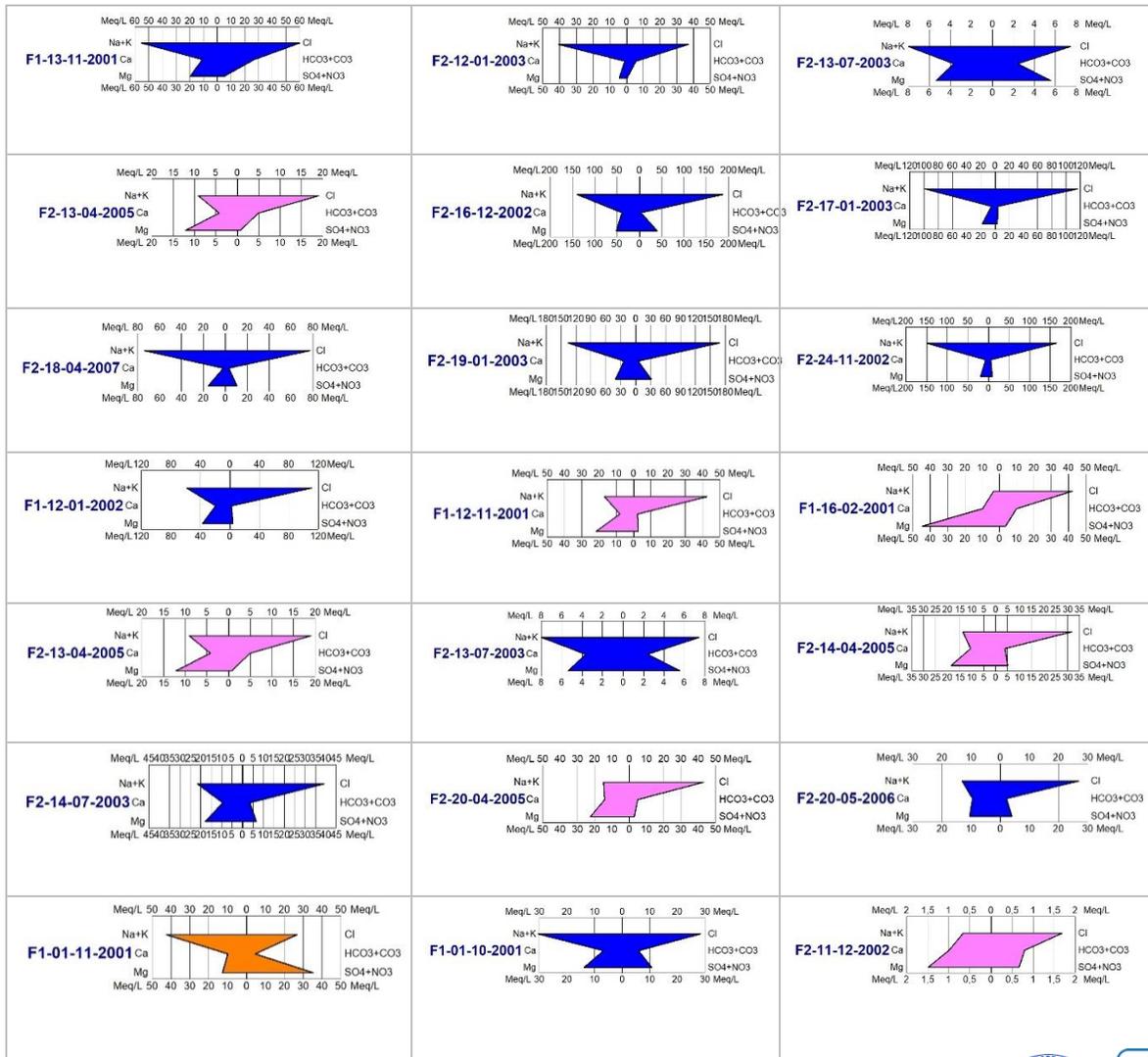
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



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



**Figura 19. Concentraciones de Stiff- Terraza de acumulación**  
Fuente elaboración propia.



Certificado SC 5278-1

*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

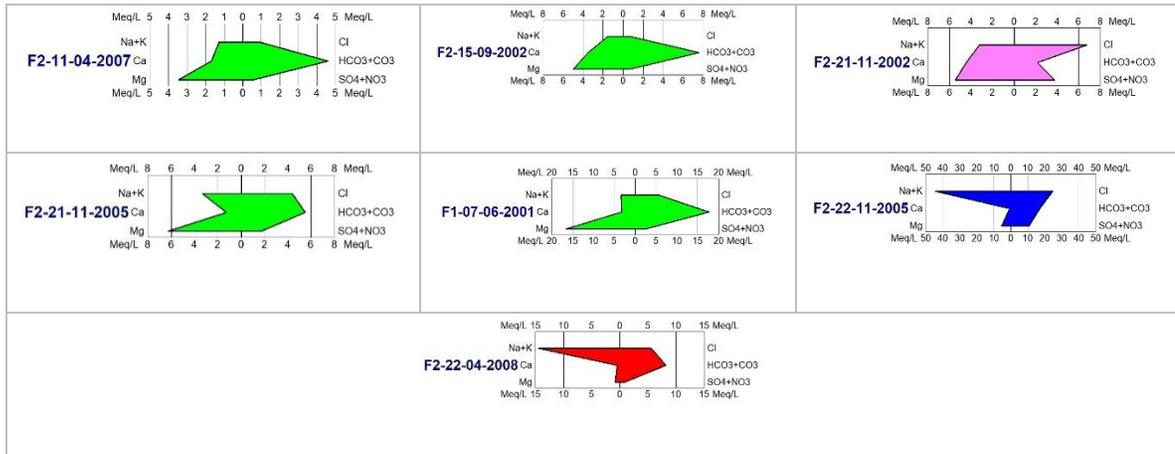
Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

### Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



**Figura 20. Concentraciones de Stiff-plano de inundación**  
Fuente elaboración propia.

## 10.2. ANEXO B

### Tabla de regresión lineal con $K^+$

Coeficientes				
	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0,22506	0,0935246	2,40642	0,0168
Pendiente	1,00574	0,000371101	2710,16	0,0000
Análisis de Varianza				
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,42286E7	1,42286E7	7344976,66	0,0000
Residuo	478,486	1,93719		
Total (Corr.)	1,42291E7			
Coeficiente de Correlación = 0,999983 R-cuadrada = 99,9966 por ciento R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,9966 por ciento Error estándar del est. = 1,39183 Error absoluto medio = 0,587397 Estadístico Durbin-Watson = 1,17429 (P=0,0000) Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,412769				



*Por una universidad con calidad, moderna e incluyente*

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 [www.unicordoba.edu.co](http://www.unicordoba.edu.co)



"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 regresión lineal con Mg<sup>++</sup>**

Coeficientes				
	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-2,99228	0,388215	-7,7078	0,0000
Pendiente	1,02284	0,000637461	1604,56	0,0000
Análisis de Varianza				
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	7,33531E7	7,33531E7	2574597,57	0,0000
Residuo	7037,3	28,4911		
Total (Corr.)	7,33601E7			

Coeficiente de Correlación = 0,999952  
R-cuadrada = 99,9904 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,9904 por ciento  
Error estándar del est. = 5,3377  
Error absoluto medio = 2,89431  
Estadístico Durbin-Watson = 1,98153 (P=0,4422)  
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,00845318

**Tabla de regresión lineal con Na<sup>+</sup>**

Coeficientes				
	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-7,88589	1,52379	-5,1752	0,0000
Pendiente	1,01538	0,000616577	1646,81	0,0000
Análisis de Varianza				
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,10329E9	1	1,10329E9	2711976,68
Residuo	100485,	247	406,823	
Total (Corr.)	1,10339E9	248		

Coeficiente de Correlación = 0,999954  
R-cuadrada = 99,9909 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,9909 por ciento



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](http://www.unicordoba.edu.co)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

## INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Error estándar del est. = 20,1698  
 Error absoluto medio = 9,49715  
 Estadístico Durbin-Watson = 1,63777 (P=0,0020)  
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,179929

### Tabla de regresión lineal con CI

Coeficientes				
	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-12,3719	2,51463	-4,91996	0,0000
Pendiente	1,01236	0,000582853	1736,9	0,0000
Análisis de Varianza				
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3,14084E9	3,14084E9	3016820,62	0,0000
Residuo	257154,	1041,11		
Total (Corr.)	3,1411E9			

Coeficiente de Correlación = 0,999959  
 R-cuadrada = 99,9918 por ciento  
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,9918 por ciento  
 Error estándar del est. = 32,2662  
 Error absoluto medio = 15,6407  
 Estadístico Durbin-Watson = 1,50961 (P=0,0000)  
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,244502



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](http://www.unicordoba.edu.co)