

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CATIONES Y SU EFECTO EN  
LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA SURESTE  
DEL ESTADO DE COAHUILA DE ZARAGOZA MÉXICO.**

**POR**

**VICENTE SAUL AVILA PERALTA**

**TESIS**

Presentado como requisito parcial para obtener el título profesional de

**INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION**

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CATIONES Y SU EFECTO EN LA CALIDAD  
DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA SURESTE DEL ESTADO DE COAHUILA  
DE ZARAGOZA MÉXICO.**

POR:

**VICENTE SAUL AVILA PERALTA**

TESIS

PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

APROBADA POR EL COMITÉ DE ASESOR:

MC. AARÓN I. MELENDRES ÁLVAREZ

ASESOR PRINCIPAL

ING. GIL FREDY CLEMENTE SOLIS

ASESOR

DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ HERRERA

ASESOR



MC. SERGIO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Marzo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE  
**DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CATIONES Y SU EFECTO EN LA  
CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA SURESTE DEL ESTADO  
DE COAHUILA DE ZARAGOZA MÉXICO.**

POR:

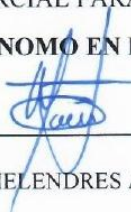
VICENTE SAUL AVILA PERALTA

TESIS

QUE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO

PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**



MC. AARÓN I. MELENDRES ÁLVAREZ

PRESIDENTE DEL JURADO



ING. GIL FREDY CLEMENTE SOLIS

VOCAL



DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ HERRERA

VOCAL



ING. JOSÉ ENRIQUE MANDUJANO ÁLVAREZ

VOCAL SUPLENTE



MC. SERGIO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Marzo 2026

## DECLARACION.

El autor quién es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar el autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio del texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Autor principal



Vicente Saúl Ávila Peralta

## **AGRADECIMIENTOS.**

**A Dios:** Por la vida, por la salud y la fuerza para enfrentar cada día con optimismo y fe.

**A mi alma terra mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro:** Por ser el lugar donde crecí académica y personalmente, fortaleciendo mis conocimientos, valores, disciplina y compromiso profesional, gracias a la orientación y herramientas brindadas para una formación integra y darme la oportunidad de culminar mi carrera profesional.

**A mi familia:** Por su constante comprensión y estímulo durante todo mi proceso de formación académica. Su respaldo emocional y moral resultó fundamental para la culminación de mis estudios. Expreso mi profundo agradecimiento por acompañarme en este significativo logro profesional.

**Al Doctor Luis Samaniego Moreno:** A la memoria de mi asesor principal, le agradezco por su apoyo orientación dedicación y paciencia para la culminación de este trabajo de investigación.

**Al MC. Aarón I. Melendres Álvarez:** Por aceptar retomar la dirección de mi tesis en un momento tan difícil. Su intervención garantiza la continuidad del proyecto y me brinda la oportunidad de concluir esta etapa académica.

## **DEDICATORIA.**

**A mi madre Elvira Peralta López.** Un ser maravilloso que ha sido mi mayor bendición, mi refugio y la fuerza que me impulsa a seguir adelante. Gracias, mamá, por confiar en mí; tu amor, sacrificio y apoyo constante hicieron posible culminar esta etapa académica. Gracias por ser ejemplo de vida, perseverancia y entrega incondicional. Todo lo que soy y cada logro alcanzado llevan tu nombre y tu amor.

**A mi padre Urbano Avila Hernández** Gracias por brindarme confianza y fortaleza para alcanzar mis metas.

**A mis hermanos: Oscar Avila Peralta, Celestino Avila Peralta** quienes con su presencia marcaron de manera significativa mi desarrollo académico y personal. Gracias por su paciencia y motivación constante, más que hermanos han sido una figura paterna que me ha brindado orientación, disciplina y protección constante.

**Blanca Avila Peralta, Urbano avila Peralta,** los quiero mucho, gracias por su apoyo moral que nunca me faltó.

**A mis amigos:** Josué Isaías Maldonado, Saúl Adán Montalvo, Fredy Iván Santiago, Miguel Angel Sánchez por su amistad y hacerme mucho más amena mi estancia en la universidad

**A la profesora Eréndira Morales Cano** quien con su vocación, compromiso y palabras de aliento me motivó a continuar mis estudios universitarios. Su ejemplo y orientación fueron fundamentales para creer en mis capacidades.

## INDICE DE CONTENIDO.

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>VI</b>
<b>INDICE DE CUADROS.....</b>	<b>XI</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>I. INTRODUCCION .....</b>	<b>2</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	3
1.3 HIPOTESIS .....	4
<b>II. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 USOS DE AGUA EN MEXICO.....	5
2.1.1 USO AGRICOLA.....	5
2.1.2 USO ABASTECIMIENTO PUBLICO.....	5
2.1.3 USO EN LA INDUSTRIA.....	6
2.2 ACUIFEROS.....	6
2.2.1 ACUIFERO KARSTICO.....	7
2.2.2 ACUIFERO FRACTURADO.....	7
2.2.3 ACUIFERO GRANULAR.....	8
2.3 LA PRESENCIA DE IONES POSITIVOS DISUELTOS EN EL AGUA SUBTERRANEA.....	8
2.3.1 ORIGEN DE LAS SALES SOLUBLES EN LAS AGUAS.....	8
2.3.2 ION SODIO.....	9
2.3.3 ION CALCIO.....	9

2.3.4 ION MAGNESIO.....	10
2.3.5 ION POTASIO. ....	10
2.4 LA IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE AGUA.....	11
2.4.1 CALIDAD DEL AGUA. ....	11
2.4.2 CALIDAD AGUA DE PARA RIEGO AGRICOLA. ....	11
2.4.2.1 CRITERIOS DE SALINIDAD.....	12
2.4.2.2 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA. ....	12
2.4.2.3 CRITERIOS DE SODICIDAD.....	14
2.4.2.4 RELACIÓN DE ABSORCIÓN DE SODIO (RAS). ....	14
2.4.3 CALIDAD DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL EN BASE A SU CONCENTRACION DE CALCIO Y MAGNESIO. ....	17
2.4.3.1 LA DUREZA EN EL AGUA. ....	18
2.4.3.2 ORIGEN DE LA DUREZA DEL AGUA.....	18
2.4.3.3 DUREZA TEMPORAL. ....	19
2.4.3.4 DUREZA PERMANENTE.....	19
2.4.3.5 CALCULO DE LA DUREZA DEL AGUA.....	19
2.4.4 CALIDAD DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN BASE A SU DUREZA.....	20
2.4.4.1 IMPACTOS DEL AGUA DURA EN EL USO DOMESTICO.....	20
2.4.4.2 AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	21
<b>III. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>24</b>
3.1 DESCRIPCION DE LA REGION DE ESTUDIO.....	24
3.1.1 ZONA DE ESTUDIO.....	24
3.1.2 UBICACION GEOGRAFICA.....	25

3.1.3 FISIOGRAFIA.....	25
3.1.4 SUELOS.....	25
3.1.5 USO DE SUELO.....	26
3.1.6 HIDROGRAFIA. ....	26
3.1.7 CLIMA. ....	26
3.1.8 VEGETACION. ....	27
<b>3.2 ArcMap 10.5.4.....</b>	<b>27</b>
3.3 DATOS.....	27
3.4 INTERPOLACION. ....	28
3.5 ELABORACION DE MAPAS.....	28
3.5.1 PREPARACION Y EJECUCION DE DATOS.....	30
3.5.2 CLASIFICACION DE RANGOS Y NUMERO DE CLASES. ....	36
3.5.3 TRANSFORMACION DE DATOS DE INTERPOLACION A FORMATO RASTER.....	39
3.5.4 TRANSFORMACION DE FORMATO RASTER A FORMATO DE POLIGONOS.....	45
3.5.5 NUEVO FORMATO A LA TABLA DE ATRIBUTOS DEL FORMATO DE POLIGONOS.....	48
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>53</b>
4.1 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE INTERPOLACION CON LOS VALORES QUIMICOS POR PARAMETRO Y SU POSIBLE ORIGEN. ....	53
4.1.1 CALCIO (Ca).....	53
4.1.2 MAGNESIO (Mg).....	55
4.1.3 SODIO (Na).....	56
4.1.4 POTASIO (K).....	58

4.2 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA.....	59
4.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUA EN BASE A LA SALINIZACION. ...	59
4.2.2 CLASIFICACION DE LAS AGUAS CON BASE A SU SODICIDAD... ..	62
4.3 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL.....	67
4.3.1 CLASIFICACION DE CALIDAD DE AGUA EN BASE A SU DUREZA PARA USO INDUSTRIAL. ....	67
4.4 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO Y USO HUMANO.....	69
4.4.1 CLASIFICACION DE CALIDAD DE AGUA BASE A CALCIO Y MAGNESIO PARA USO Y CONSUMO HUMANO. ....	69
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>75</b>

## INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1. Clasificación de agua en base a su dureza.....	20
Cuadro 2. Parámetros máximos permisibles en agua para consumo humano ..	22
Cuadro 3. Altitud y coordenadas geográficas de las cabeceras municipales de la región (seccoahuila, 2025).....	25
Cuadro 4. Localización geográfica de los pozos, así como los valores de las concentraciones de cationes (Ca, Mg, Na, y K).....	29
Cuadro 5. Escala de colores con sus respectiva clasificación en base a las concentraciones de cationes. ....	35
Cuadro 6. Pozos con mayores concentraciones de Calcio Ca. ....	54
Cuadro 7. Pozos con mayores concentraciones de Magnesio Mg. ....	55
Cuadro 8. Pozos con mayores concentraciones de Sodio Na .....	57
Cuadro 9. Pozos con mayores concentraciones de Potasio K. ....	58
Cuadro 10. Clasificación de acuerdo con la conductividad eléctrica, de las aguas subterráneas de zona sureste de Coahuila. ....	60
Cuadro 11. Valores de relación de adsorción de sodio, así como la clasificación en base al sodio.....	62
Cuadro 12. Clasificación de los tipos de agua en base a su peligro de salinidad y sodicidad en la zona sureste de Coahuila de Zaragoza México. ....	64
Cuadro 13. Distribución de los 6 tipos de agua en zona sureste de Coahuila de Zaragoza México. ....	67
Cuadro 14. Clasificación de las aguas en base a la dureza en la zona del sureste de Coahuila de Zaragoza México. ....	68
Cuadro 15. Clasificación de uso y consumo humano en la zona sureste de Coahuila de Zaragoza México. ....	70

## **INDICE DE FIGURAS.**

Figura 1. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego. Normas Riverside. .....	17
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio (Sureste) Coahuila de Zaragoza México (Elaboracion propia).....	24
Figura 3. Exportación de la base de datos de los pozos al software ArcMap. ...	31
Figura 4. Caja de diálogo donde se cargan los datos de Excel. ....	31
Figura 5. Localización de los pozos en la aplicación de ArcMap. ....	32
Figura 6. Ubicación de la herramienta customize. ....	33
Figura 7. Ubicación de la herramienta Geostatiscal Wizard. ....	34
Figura 8. Apertura de la caja de diálogo de Kriging, así como la selección de los valores de calcio para interpolar. ....	34
Figura 9. Interpolación final con la ayuda del Kriging.....	35
Figura 10. Ubicación de la pestaña de Symbology dentro de la caja de propiedades. ....	36
Figura 11. Apertura de la caja de diálogo de la opción de Classify. ....	37
Figura 12. Clasificación manual de los rangos. ....	38
Figura 13. Exportación del mapa a un documento Raster. ....	39
Figura 14. Apertura de la caja de diálogo, donde se transforma el mapa de interpelación a un documento Raster.....	40
Figura 15. Nuevo documento Raster. ....	41
Figura 16. Ubicación y selección de las herramientas Reclass y Reclassify.....	42
Figura 17. Elección del nuevo documento Raster, así como la selección del botón classify. ....	42

Figura 18. Ubicación de la pestaña Classes, así como la elección de 5 clases a trabajar.....	43
Figura 19. Colocación manual de los 5 rangos máximos a trabajar.....	44
Figura 20. Mapa Raster finalizado y reclasificado.....	44
Figura 21. Ubicación y selección de las herramientas From Raster y Raster to Polygon.....	45
Figura 22. Caja de diálogo de Raster to Polygon, así como la selección del mapa reclasificado.....	46
Figura 23. Mapa con los polígonos de interpolación a interpretar.....	47
Figura 24. Ubicación de la pestaña Fields dentro de la caja de propiedades y desactivación de los campos Length y Área.....	47
Figura 25. Ubicación de la opción Open Attribute Table.....	48
Figura 26. Ubicación y selección de la opción Add Field.....	49
Figura 27. Elección de las propiedades del nuevo campo.....	49
Figura 28. Clasificación ascendente de la columna Gridcode.....	50
Figura 29. Explicación de la selección de los polígonos clasificados con un Gridcode "1", así como la elección de la herramienta Field Calculator.....	50
Figura 30. Apertura de la caja de diálogo de la herramienta Field Calculator.....	51
Figura 31. Ubicación de la pestaña symbology, Value Fields dentro de la caja de herramientas, así como la clasificación de colores en la opción color Ramp.....	52
Figura 32. Distribución de la concentración de cationes.....	52
Figura 33. Distribución de la concentración de calcio (mg/L) (Elaboración propia). .....	54
Figura 34. Distribución de la concentración de magnesio (mg/L) (Elaboración propia).....	56

Figura 35. Distribución de la concentración de sodio (mg/L) (Elaboración propia).  
..... 57

Figura 36. Distribución de la concentración de potasio (mg/L) (Elaboración propia)..... 59

## RESUMEN.

En el presente estudio analiza la calidad del agua subterránea en la región sureste del estado de Coahuila de Zaragoza, considerando la importancia estratégica de este recurso en zonas áridas y semiáridas donde el abastecimiento depende principalmente de acuíferos. Se evaluaron 67 pozos, determinando las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y potasio, con el fin de establecer su impacto en el riego agrícola, procesos industriales y uso doméstico. Se realizó una revisión teórica sobre usos del agua en México, tipos de acuíferos y criterios de calidad del agua (salinidad, conductividad eléctrica, RAS y dureza). Mediante herramientas de sistemas de información geográfica (ArcMap 10.5.4) y el método de interpolación Kriging, se generaron mapas digitales para visualizar la distribución espacial de los cationes. Los resultados confirmaron que existen variaciones importantes en la concentración de cationes, asociadas a las características geológicas regionales. En términos agrícolas, algunos pozos presentan riesgo de salinización y sodificación del suelo, lo que puede afectar la infiltración, disponibilidad de nutrientes y rendimiento de cultivos. Para uso industrial, se identificaron pozos con alta dureza. En el ámbito doméstico, ciertas concentraciones superan valores recomendados, lo que implica la necesidad de procesos de potabilización y tratamiento. Se concluye que la caracterización geoquímica y del agua subterránea es una herramienta esencial para la toma de decisiones en el manejo del recurso hídrico, permitiendo establecer estrategias de tratamiento.

**Palabras Clave:** Calidad del agua, Salinidad, Sodicidad, Conductividad eléctrica, Relación de Adsorción de Sodio (RAS), Kriging.

## I. INTRODUCCION

Las aguas subterráneas representan una fuente estratégica para el desarrollo de México, debido a que más de la mitad del territorio nacional presenta condiciones áridas o semiáridas, lo que hace que el suministro de agua dependa en gran medida de estos recursos. Cerca de una tercera parte del consumo total de agua proviene de los acuíferos. Estos recursos se destinan al riego de más de dos millones de hectáreas, lo que equivale a aproximadamente un tercio de la superficie agrícola bajo riego; además, satisfacen alrededor del 70% de la demanda del sector público-urbano, beneficiando a unos 60 millones de habitantes en ciudades. Asimismo, abastecen a la mayoría de las industrias y cubren casi por completo las necesidades de agua de la población rural, estimada en cerca de 20 millones de personas (IMTA, 2022).

A pesar de lo mencionado, el aumento de la población y la expansión de las actividades económicas continúan elevando la demanda de los recursos hídricos. Es decir, cada vez resulta más complejo abastecer de agua a las grandes ciudades, sin embargo, la población urbana continúa creciendo. Además, la rentabilidad de la agricultura que depende del bombeo se ve afectada debido al encarecimiento de los costos de extracción (CONAGUA, 2013).

En Coahuila, la disponibilidad de agua superficial es limitada debido a las condiciones climáticas desfavorables, marcadas por bajas precipitaciones. Por ello, el agua subterránea constituye la principal fuente de suministro para cubrir los distintos usos, como el público, doméstico, agrícola e industrial. No obstante, este mismo clima seco también reduce la presencia de agua subterránea y restringe su recarga natural. En cuanto a la distribución del recurso en el estado, aproximadamente el 77% se destina al sector agrícola, el 13% al abastecimiento público y el 10% a la industria que se autoabastece, destacando que cerca del 85% del agua utilizada proviene de fuentes subterráneas (Reyes, 2005).

Es decir, prácticamente la mayoría de agua que está disponible es agua subterránea, sin embargo, estas aguas pueden estar afectadas por las altas concentraciones de salinidad o altos niveles de sodio, dureza en el agua (MKILIMA,2023).

Con todo lo anterior resulta importante conocer la predominancia de cationes en el agua con el fin de predecir su calidad para su uso en procesos agrícolas, desarrollos industriales, y abastecimiento para la población. Por tal motivo el presente estudio pretende evaluar la distribución y origen de las altas concentraciones de cationes presentes en las aguas subterráneas de la región sureste del estado de Coahuila, con el fin de determinar la calidad de esta y sus posibles fuentes de contaminación para dar posibles técnicas de uso en base a la calidad del recurso hídrico la zona de estudio.

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la distribución y origen de la concentración de cationes en las aguas subterráneas de 67 pozos de la zona sureste de Coahuila de Zaragoza México, con el fin de determinar su calidad para uso agrícola industrial y doméstico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Comparar los resultados obtenidos de cationes en aguas subterráneas con los límites establecidos por las normas oficiales mexicanas referentes a la calidad del agua.
- Caracterizar las condiciones químicas del agua de los acuíferos de la región sureste del estado de Coahuila.
- Determinar el impacto de las concentraciones de cationes en la calidad del agua utilizada para riego, incluyendo su efecto en la disponibilidad de nutrientes en el suelo y en el crecimiento de cultivos, en función de la calidad del agua.

- Caracterizar como las variaciones en los niveles de cationes influyen en la calidad del agua utilizada en procesos industriales.
- Evaluar como los niveles de cationes pueden afectar en la calidad de uso doméstico y su posible consumo humano.

### **1.3 HIPOTESIS**

La geología del acuífero (granular fracturado o kárstico) influye en las concentraciones de cationes en el agua subterránea de la zona sureste de Coahuila de Zaragoza.

## **II. REVISION DE LITERATURA.**

### **2.1 USOS DE AGUA EN MEXICO.**

#### **2.1.1 USO AGRICOLA.**

El mayor uso de este sector que concentra la mayor proporción del volumen concesionado para uso consuntivo es el agrícola, con un 75.7%. Para esta actividad, la principal fuente de abastecimiento es el agua superficial, que representa el 63.4% del volumen asignado. Durante el ciclo agrícola 2017–2018, considerando cultivos perennes y modalidades de riego y temporal, la superficie sembrada fue de 21.16 millones de hectáreas, mientras que la superficie cosechada alcanzó 20.27 millones de hectáreas (CONAGUA, 2019).

Para la actividad agrícola se utilizan como fuentes de abastecimiento tanto las aguas superficiales como las subterráneas. El agua destinada al riego debe extraerse de su fuente, generalmente mediante bombeo, y conducirse a través de un sistema de distribución que puede ser de tipo abierto o cerrado (Neira, 2006).

#### **2.1.2 USO ABASTECIMIENTO PUBLICO**

Comprende todo el volumen de agua suministrado mediante las redes de agua potable, tanto a usuarios domésticos como a los sectores industrial y de servicios conectados a ellas. La fuente principal de abastecimiento es el agua subterránea, que aporta el 56.7% del volumen total. Entre 2009 y 2018, el volumen de agua superficial destinado a este uso aumentó en un 31.6% (CONAGUA, 2019).

El sistema de abastecimiento de agua está conformado por la infraestructura y los servicios necesarios para proporcionar agua potable a la población. En México, según el artículo 115 constitucional, los municipios son responsables de este servicio. Para garantizarlo, deben identificar y proteger las fuentes de agua, realizar su captación y conducción, potabilizarla, supervisar su calidad, operar y mantener las redes de distribución y brindar atención adecuada a los usuarios (Meza, 2020).

### **2.1.3 USO EN LA INDUSTRIA.**

Corresponde a las industrias que obtienen agua directamente de fuentes naturales como ríos, arroyos, lagos o acuíferos. Entre las actividades más destacadas se encuentran la industria química, azucarera, petrolera, así como la de celulosa y papel. El uso industrial autoabastecido concentra el 4.9% del volumen concesionado para uso consuntivo. Entre 2009 y 2018, el volumen concesionado proveniente de aguas subterráneas registró un aumento del 36.5% (CONAGUA, 2019).

El agua es ampliamente utilizada en el sector industrial, donde desempeña diversas funciones, como la producción de energía a través del vapor, la transferencia térmica, el traslado de insumos, la fabricación de bienes y las labores de limpieza, entre otras. Por esta razón, la presencia de calcio y magnesio en el agua industrial resulta relevante, ya que puede ocasionar incrustaciones o procesos de corrosión en las tuberías y equipos. Debido a ello, es común que el agua sea sometida a tratamientos de acondicionamiento o ablandamiento para optimizar el funcionamiento de los sistemas y disminuir los costos operativos (Neira, 2006).

### **2.2 ACUIFEROS.**

Un acuífero es una formación geológica compuesta por una o varias capas de roca que tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua. Se localiza en el subsuelo, específicamente en la zona saturada. Cuando el agua circula a través de él, funciona como un medio de conducción hacia áreas de descarga o aprovechamiento, como lagos, humedales, manantiales, pozos u otras obras de captación. Por otro lado, al encontrarse con materiales impermeables, favorece la acumulación y almacenamiento del agua subterránea (Valdivielso, 2025). Dentro de las formaciones geológicas que actúan como acuíferos, se pueden encontrar diferentes tipos, como lo son los acuíferos kársticos, fracturados y granulares.

### **2.2.1 ACUIFERO KARSTICO.**

Los acuíferos kársticos, pueden almacenar y transportar volúmenes significativos de agua, constituyen una de las fuentes más importantes de agua potable en diversas regiones del mundo. Están formados por rocas solubles químicamente, en cuyo interior se desarrollan amplios conductos, galerías y cavernas, lo que les confiere una alta permeabilidad. Gracias a estas características, tienen una gran capacidad para captar y conducir agua, por lo que las zonas kársticas presentan un elevado potencial para abastecer de agua dulce a la población (Karhor et al.,2019)

En los acuíferos kársticos, la recarga se origina a partir de corrientes subterráneas, de la infiltración difusa que ocurre a través del epikarst y del escurrimiento de lluvia que se concentra en dolinas. La descarga se realiza principalmente mediante manantiales de gran tamaño, cuyos caudales suelen reaccionar con rapidez ante eventos de crecida. El agua subterránea circula por los conductos en régimen turbulento y, durante los periodos de lluvia, generalmente arrastra sedimentos en su trayecto (White, 2019).

### **2.2.2 ACUIFERO FRACTURADO.**

Los acuíferos fracturados son estructuras geológicas subterráneas en las que el agua se desplaza principalmente por medio de grietas, fracturas o diaclasas presentes en una roca cuya matriz tiene baja permeabilidad. Esto la diferencia de otros acuíferos, donde el flujo ocurre a través de los espacios intergranulares entre los acuíferos. (Fernández, 2020). Este tipo de acuíferos está formado por estratos de roca compacta en los que el agua subterránea se almacena y circula a través de fracturas, uniones o fisuras. Pueden presentarse en diversas clases de rocas, entre ellas el granito y el basalto (Sajb, 2025).

Un acuífero en roca fracturada es aquel que se localiza en formaciones rocosas consolidadas cuya capacidad de almacenar agua no proviene de los espacios originales de la roca, sino de un conjunto de fracturas desarrolladas después de su formación, lo que se conoce como porosidad secundaria. En estos sistemas,

la permeabilidad está determinada por las características del entramado de fracturas, como su orientación, separación, densidad, extensión, grado de interconexión y el tipo de material que las rellena (Toro, 2022).

### **2.2.3 ACUIFERO GRANULAR.**

Un acuífero granular es una formación geológica subterránea que retiene y conduce agua mediante los poros existentes entre partículas de sedimentos no consolidados, como la arena y la grava (Heliodoro, 2012).

En un acuífero granular predominan los espacios abiertos entre las partículas que permiten el almacenamiento de agua. Estos poros se forman durante el proceso de depósito del sedimento, por lo que se consideran de origen primario o intergranular. En este tipo de acuíferos, la permeabilidad, es decir, la capacidad de permitir el paso de un fluido depende de la cantidad de poros, su forma y el grado en que estén interconectados. Asimismo, el tamaño y la uniformidad de los granos influyen de manera importante en esta propiedad (Toro, 2022).

## **2.3 LA PRESENCIA DE IONES POSITIVOS DISUELTOS EN EL AGUA SUBTERRANEA.**

### **2.3.1 ORIGEN DE LAS SALES SOLUBLES EN LAS AGUAS.**

La presencia de sales presentes en los suelos y en las aguas destinadas al riego proviene del proceso continuo de intemperismo geoquímico que actúa sobre las rocas ubicadas en las capas superficiales de la corteza terrestre, fenómeno que ocurre de manera constante a lo largo del tiempo geológico (Juarez, 2021).

Los cambios en las concentraciones de iones en el agua subterránea dependen del tipo, la cantidad y el origen de los minerales que se disuelven de las rocas y suelos con los que el agua interactúa a lo largo de su recorrido dentro del ciclo hidrológico. Aunque la composición iónica puede variar notablemente según la ubicación y el momento, ciertos iones se presentan de manera recurrente y en mayores concentraciones, por lo que se clasifican como iones principales o

dominantes (Moran,2012). En este estudio se evaluarán específicamente los que se describen a continuación.

### **2.3.2 ION SODIO.**

Se presenta en las plagioclasas en asociación con el calcio, en proporciones variables; en este grupo mineral, la albita constituye el extremo composicional que contiene exclusivamente sodio (Padilla, 2014).

El sodio ( $\text{Na}^+$ ) presente en el agua de riego, al interactuar con el suelo, favorece la dispersión de las arcillas o coloides y sustituye a cationes divalentes como el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Este proceso disminuye la capacidad del suelo para permitir el paso de agua y oxígeno a través de su perfil, lo que repercute negativamente en su fertilidad. Como consecuencia, se reduce la aireación, aumenta el pH y se limita la disponibilidad de micronutrientes como el hierro (Fe) y el zinc (Zn) (Castellanos, 2000).

Presenta una solubilidad muy alta y es complicado que precipite. Se ve influido con facilidad por los procesos de intercambio de bases. Generalmente se encuentra asociado al ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), aunque no en todos los casos. Las aguas naturales con altos niveles de sodio suelen contener también concentraciones elevadas de fluoruro ( $\text{F}^-$ ). Cuando el sodio está presente en grandes cantidades, puede resultar dañino para las plantas, ya que disminuye la permeabilidad del suelo, efecto que se agrava cuando los contenidos de calcio y magnesio son bajos (Gonzales, 2023).

### **2.3.3 ION CALCIO.**

El calcio es el ion predominante en la mayoría de las aguas superficiales y ocupa el segundo lugar en concentración, después del sodio, en las aguas de formación. Las sales de calcio se caracterizan por su solubilidad en el agua:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , se concentran en las aguas naturales y, conforme estas circulan, son transportadas hacia cuencas cerradas, así como hacia mares y océanos. Una fracción del calcio, debido a la evaporación del agua y a procesos

de intercambio químico, se deposita en forma de calcita. ( $\text{CaCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , Forma parte de la composición de las rocas máficas y se presenta en proporciones menores en las rocas félsicas. En los basaltos, el contenido de calcio puede llegar aproximadamente al 6.4%, mientras que en los granitos su concentración es más baja hasta 1.55% (Padilla, 2014).

#### **2.3.4 ION MAGNESIO.**

Presenta características semejantes a las del ion calcio; sin embargo, posee mayor solubilidad y es un poco más resistente a la precipitación. Su fuente principal proviene de minerales presentes en rocas cristalinas, como olivino, biotita, piroxenos y anfíboles, especialmente en rocas de composición básica. Por lo general, las calcitas contienen pequeñas cantidades de magnesio. Cuando el agua tiene concentraciones elevadas de este elemento, puede perjudicar el rendimiento de los cultivos, ya que favorece el aumento de la alcalinidad del suelo (Gonzales, 2023).

El magnesio representa aproximadamente el 2.07% de la composición de la corteza terrestre. Al igual que el calcio, se encuentra en cantidades importantes dentro del magma. Es abundante en rocas máficas y ultramáficas; en el basalto su concentración es cercana al 3.77%, mientras que en los piroxenos puede alcanzar hasta un 10.9%. En contraste, en las rocas félsicas su proporción es menor en comparación con la del calcio (Padilla, 2014).

#### **2.3.5 ION POTASIO.**

La corteza terrestre posee alrededor de 2.3% de potasio. Al igual que el sodio, forma parte de la composición tanto de rocas félsicas como máficas. En las rocas félsicas se presenta en mayor proporción que el sodio, mientras que en las máficas su concentración es menor en comparación con este elemento. En los basaltos, su contenido aproximado es de 1.26%. El potasio integra minerales

como la ortoclasa y la muscovita, y también aparece en pequeñas cantidades dentro de las plagioclasas y la albita (Padilla, 2014).

## **2.4 LA IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE AGUA.**

### **2.4.1 CALIDAD DEL AGUA.**

El concepto de calidad del agua hace referencia al conjunto de características y parámetros que determinan si el agua es apta para distintos usos, como el consumo doméstico, el riego agrícola y las actividades industriales (Landeró, 2019).

La calidad del agua se refiere a las propiedades que presenta en función del uso al que se destine. Se determina principalmente por la presencia de sus componentes mayoritarios, como calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y en menor proporción los de B N y P (Juárez, 2021).

### **2.4.2 CALIDAD AGUA DE PARA RIEGO AGRICOLA.**

La calidad del agua utilizada para riego está determinada principalmente por su composición química, en particular por la clase y cantidad de minerales disueltos que contiene. Los criterios para valorar su aptitud varían según el cultivo, ya que cada especie presenta distintos niveles de tolerancia frente a ciertos minerales y características del agua. Los parámetros más relevantes para definir su adecuación al riego son: La salinidad, dureza y la relación entre sodio, calcio y magnesio (Relación de Adsorción de Sodio, RAS) (Sela, 2025). Para analizar la calidad del agua destinada al riego es imprescindible considerar dos aspectos principales: el nivel de salinidad y el grado de sodicidad.

#### **2.4.2.1 CRITERIOS DE SALINIDAD.**

La salinidad del agua se refiere a la cantidad total de sales que se encuentran disueltas en ella, sin detallar su composición específica. Cuando el agua de riego contiene elevadas concentraciones salinas, se reduce la disponibilidad de agua para las plantas debido al efecto osmótico; por ello, aunque el suelo parezca húmedo, el cultivo puede experimentar estrés por falta de agua y ver afectado su rendimiento. Una vez que se supera cierto nivel crítico, la disminución en la producción aumenta en proporción al incremento de la salinidad. Asimismo, cada cultivo tiene distinta capacidad de tolerancia, por lo que los valores límite y el grado de afectación en el rendimiento varían entre especies (Sela, 2025).

#### **2.4.2.2 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.**

La conductividad eléctrica del agua empleada en el riego es un parámetro fundamental para evaluar su calidad. Valores elevados indican una mayor cantidad de sales disueltas, lo que puede dificultar la absorción de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, generando desequilibrios que reducen tanto la calidad como el rendimiento de los cultivos. En contraste, una conductividad baja puede reflejar escasez de estos nutrientes indispensables, afectando igualmente el crecimiento y desarrollo de las plantas (FERTIC, 2025).

García (2015), menciona que para el diagnóstico y clasificación de las aguas de riego existe una clasificación con cuatro clases de agua de acuerdo con su CE en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

- a. Aguas con CE  $< 250 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Este tipo de aguas resultan satisfactorias para el riego en lo que respecta a la concentración de sales.
- b. Aguas con CE entre 250 y  $750 \mu\text{S cm}^{-1}$ . El uso de estas aguas afecta a los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa.
- c. Aguas con CE entre 750 y  $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Se emplean con frecuencia y permiten un desarrollo adecuado de los cultivos, siempre que el suelo sea

manejado correctamente y disponga de un drenaje eficiente. Si el lavado y el drenaje no se realizan de manera apropiada, pueden generarse problemas de salinidad.

d. Aguas con  $CE > 2250 \mu S \text{ cm}^{-1}$ . El empleo de este tipo de aguas es una excepción y en pocas ocasiones se tienen buena. Solo los cultivos con mayor tolerancia a la salinidad logran desarrollarse de manera adecuada.

Es importante mencionar que, cuando se presentan variaciones significativas respecto al valor promedio de alguna de estas variables, el uso del agua puede volverse riesgoso, aun cuando en condiciones normales se consideraría de buena calidad. Por el contrario, dichas variaciones también pueden hacer que un agua sea clasificada como apta, cuando en condiciones medias esta agua sería de dudosa calidad. Es por ello las aguas se clasifican en cuatro categorías según su conductividad eléctrica, siendo los puntos de división entre las clases antes mencionadas, los valores de 250; 250-750; 750-2250 y 2250-5000  $\mu S \text{ cm}^{-1}$  (Juárez 2021). De esta manera Lomelí (2009), mencionan que las aguas en base en la conductividad eléctrica se dividen en las siguientes cuatro clases.

Aguas de baja salinidad (C1). Este tipo de aguas pueden utilizarse en el riego agrícola en la mayor parte de los cultivos, y en cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que en estos suelos se desarrolle la acumulación de sales. Sin embargo, se requiere de alguna fracción de lavado, esto se logra en condiciones normales de riego, con excepción de suelos con muy baja permeabilidad.

Aguas de salinidad media (C2). Estas aguas se pueden usar siempre y cuando se tenga un grado moderado de lavado. Se pueden establecer cultivos moderadamente tolerables a las sales.

Aguas altamente salinas (C3). No es posible emplearlas en suelos con mal drenaje. Incluso cuando el drenaje sea adecuado, pueden necesitarse medidas

específicas para controlar la salinidad, por lo que es recomendable optar por cultivos con alta tolerancia a las sales.

Aguas muy altamente salinas (C4). No son nada apropiadas para riego bajo condiciones comunes, pero pueden utilizarse ocasionalmente en condiciones muy especiales. Los suelos deben presentar buena permeabilidad y contar con un drenaje eficiente; además, es necesario aplicar un volumen adicional de agua para asegurar un lavado adecuado. En estas condiciones, se recomienda seleccionar cultivos con alta resistencia a las sales.

#### **2.4.2.3 CRITERIOS DE SODICIDAD.**

El ion sodio afecta negativamente las propiedades físicas del suelo, reduciendo su permeabilidad e infiltración. Este efecto está relacionado con la proporción de sodio en comparación con el calcio y el magnesio, la cual se evalúa mediante la Relación de Adsorción de Sodio (RAS). El exceso de sodio provoca la dispersión de las partículas, especialmente las arcillas, provocando la obstrucción de los poros y aumentando el riesgo de encharcamiento. Como resultado, el suelo se vuelve más compacto y con menor aireación, lo que dificulta que las plantas absorban agua y nutrientes de manera adecuada (Lopez, 2025).

#### **2.4.2.4 RELACIÓN DE ABSORCIÓN DE SODIO (RAS).**

El sodio ( $\text{Na}^+$ ) contenido dentro del agua de riego al entrar en contacto con el suelo da como resultado dispersión de los coloides o arcillas, asimismo desplaza a cationes divalentes como calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ). El fenómeno anterior disminuye la facilidad con la que el suelo conduce el agua y oxígeno dentro de su perfil, afectando negativamente sobre la fertilidad del suelo al reducir la aireación, incrementar el pH y disminuir la disponibilidad de Hierro (Fe) y Zinc (Zn) (Castellanos, 2000).

Este parámetro se calcula con la ayuda de la siguiente ecuación tomando en cuenta a los cationes en meq/l.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Un alto contenido de sodio en el agua de riego afecta negativamente la permeabilidad del suelo y dificulta la infiltración del agua. Esto se debe a que el sodio puede intercambiarse con otros cationes presentes en el suelo. El calcio y el magnesio son elementos clave para mantener la estabilidad de la estructura del suelo, ya que favorecen una disposición granular adecuada para el crecimiento de los cultivos. Cuando el sodio se encuentra en exceso, sustituye al calcio (Ca) y al magnesio (Mg), provocando la dispersión y desagregación de las partículas. Como consecuencia, el suelo tiende a endurecerse y compactarse cuando está seco, reduciendo la entrada de agua y la circulación de aire en sus poros (Lenntech,2025).

Juárez (2021), menciona que la clasificación del agua con respecto al RAS queda como:

Aguas bajas en sodio (S1):  $RAS < 10$ . Pueden emplearse en el riego agrícola en la mayoría de los tipos de suelo, ya que existe una baja probabilidad de que se presenten concentraciones peligrosas de sodio intercambiable. Sin embargo, ciertos cultivos más sensibles, como algunos árboles frutales y el aguacate, pueden llegar a acumular niveles de sodio que resulten dañinos.

Aguas medias en sodio (S2):  $10 < RAS < 18$ . En los suelos de textura fina, el sodio representa un riesgo importante, particularmente cuando presentan una elevada capacidad de intercambio catiónico y cuando el drenaje o lavado es insuficiente, salvo que exista presencia de yeso en el suelo. Por ello, este tipo de aguas únicamente se recomienda para suelos de textura gruesa o para suelos orgánicos que tengan buena permeabilidad.

Aguas con altos contenidos en sodio (S3):  $18 < RAS < 26$ . Este tipo de aguas puede generar niveles elevados de sodio intercambiable en la mayoría de los

suelos, por lo que será necesario aplicar prácticas de manejo específicas, como un buen drenaje, un lavado eficiente y el aporte adecuado de materia orgánica.

En el caso de los suelos con presencia de yeso, es posible que no se alcancen niveles dañinos de sodio intercambiable al regarlos con estas aguas. No obstante, podría ser necesario utilizar enmiendas químicas para reemplazar el sodio intercambiable; sin embargo, su aplicación puede resultar poco rentable cuando se trata de aguas con salinidad muy elevada.

Aguas con muy altos contenidos de sodio (S4):  $RAS > 26$ . Estas aguas son pésimas para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo o la aplicación de yeso u otros mejoradores no encarezca demasiado su utilización.

Las clasificaciones del Laboratorio de salinidad de RIVERSIDE (U.S.) vistas anteriormente tanto como la clasificación entre CE y el RAS se resumen en el siguiente diagrama de clasificación de aguas (Figura 1).

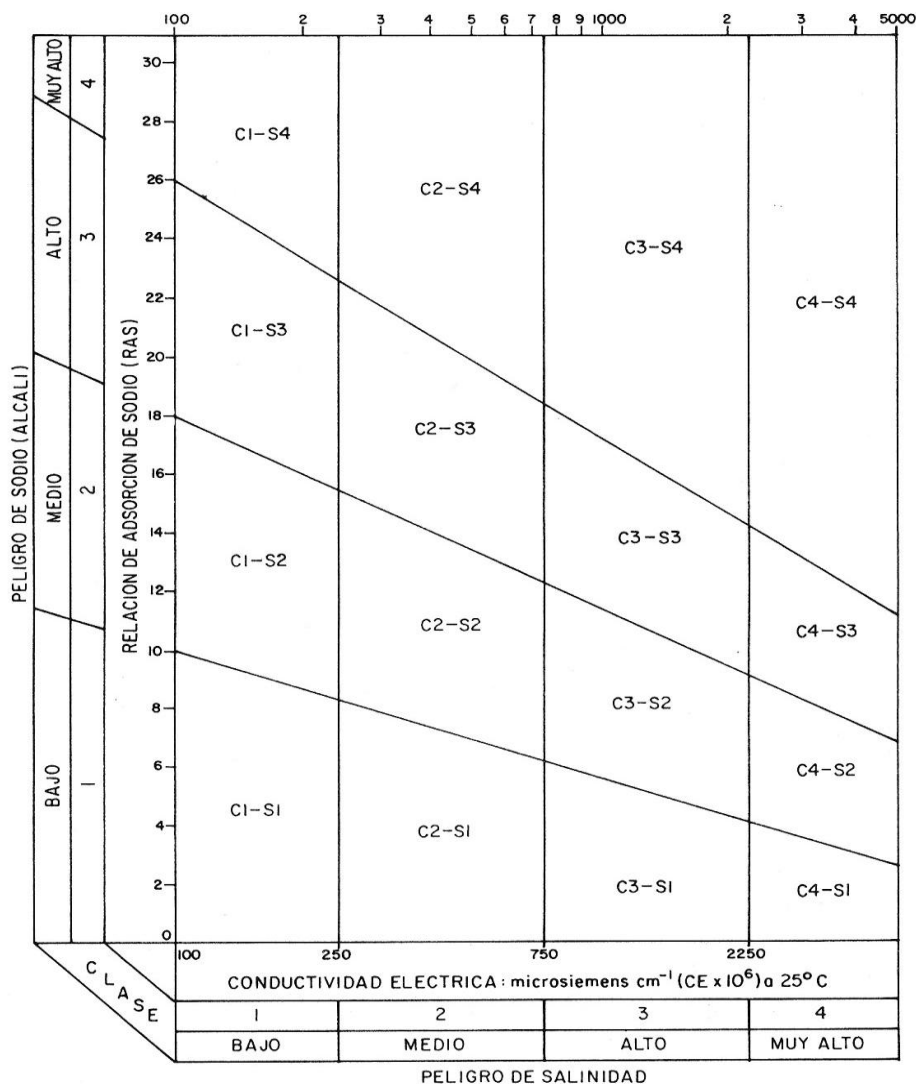


Figura 1. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego. Normas Riverside.

### 2.4.3 CALIDAD DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL EN BASE A SU CONCENTRACION DE CALCIO Y MAGNESIO.

El agua es uno de los insumos fundamentales en las actividades industriales, tanto para la fabricación de productos como para la conservación y funcionamiento de maquinaria y equipos. Su utilización es común en todos los sectores, desde la industria alimentaria hasta la producción de dispositivos electrónicos (Carbotecnia, 2023).

Neira (2006) menciona que determinados contaminantes pueden generar inconvenientes en diversos procesos industriales. En este sentido, el calcio y el magnesio son los principales causantes de la formación de incrustaciones en la mayoría de las aguas crudas. Por esta razón, la mayor parte de los tratamientos aplicados al agua para calderas se enfocan en evitar o reducir la acumulación de depósitos producidos por estos elementos. Ambos iones originan, sobre las superficies de intercambio térmico y en otras partes internas de las calderas, depósitos pesados y de gran volumen, que pueden ir desde incrustaciones compactas hasta precipitados más blandos. Cuando una caldera opera con agua sin tratamiento, las superficies de transferencia de calor se cubren rápidamente de incrustaciones.

#### **2.4.3.1 LA DUREZA EN EL AGUA.**

La dureza del agua corresponde a la cantidad total de calcio y magnesio presentes en ella. Estos iones favorecen la formación de incrustaciones de carbonato de calcio y magnesio, que se adhieren al interior de las tuberías y reducen su diámetro, disminuyendo así la capacidad de flujo. Asimismo, estos depósitos afectan el rendimiento de equipos como calderas y torres de enfriamiento, ya que el carbonato de calcio es difícil de eliminar mecánicamente y actúa como un aislante térmico, reduciendo la eficiencia en la transferencia de calor (Villagran, 2018).

#### **2.4.3.2 ORIGEN DE LA DUREZA DEL AGUA.**

La dureza del agua depende principalmente de las características geológicas del entorno. Los minerales que la originan provienen del suelo, por lo que su composición influye en que el agua presente mayor o menor dureza. Las aguas con altos niveles de calcio y magnesio, conocidas como aguas duras, suelen encontrarse en zonas donde predominan rocas sedimentarias, especialmente calizas y cretas. En cambio, las aguas blandas, con bajas concentraciones de estos elementos, generalmente han estado en contacto con rocas impermeables como el granito (Neira, 2006).

#### **2.4.3.3 DUREZA TEMPORAL.**

La dureza originada por los bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio se conoce como dureza temporal, ya que puede eliminarse al hervir el agua, proceso que además contribuye a su desinfección. En términos más técnicos, cuando el valor de la dureza supera la suma de las alcalinidades debidas a carbonatos y bicarbonatos, la fracción equivalente a esa suma se denomina dureza carbonatada o temporal. Esto se debe a que, al llevar el agua hasta el punto de ebullición, el calcio y el magnesio precipitan en forma de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio, respectivamente (Valverde, 2017).

#### **2.4.3.4 DUREZA PERMANENTE.**

La dureza residual, también llamada dureza no carbonatada o permanente, es aquella que no se elimina mediante la ebullición del agua. Generalmente se debe a la presencia de sales como los sulfatos y cloruros de calcio y magnesio. Estas sustancias tienden a aumentar su solubilidad con el incremento de la temperatura hasta cierto punto; sin embargo, a partir de ese límite, su solubilidad comienza a disminuir conforme la temperatura continúa elevándose (Valverde, 2017).

#### **2.4.3.5 CALCULO DE LA DUREZA DEL AGUA.**

Según Rodríguez (2010), menciona que el contenido de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se refiere de dureza total. Se calcula, genéricamente, a partir de la suma de las concentraciones de calcio y magnesios existentes en miligramos por cada litro de agua; que puede ser expresado en concentraciones de  $\text{CaCO}_3$ , puede utilizar la siguiente formula que se muestra a continuación:

$$\text{Dureza (mg/l de CaCO}_3) = 2,50 [\text{Ca}^{++}] + 4,16 [\text{Mg}^{++}].$$

Donde:

- $[\text{Ca}^{++}]$ : Concentración de ión  $\text{Ca}^{++}$  expresado en mg/l.
- $[\text{Mg}^{++}]$ : Concentración de ión  $\text{Mg}^{++}$  expresado en mg/l.

Los coeficientes se obtienen de las proporciones entre el peso molecular del  $\text{CaCO}_3$  y los pesos moleculares respectivos: 100/40 (para el  $\text{Ca}^{++}$ ); y 100/24 (para el  $\text{Mg}^{++}$ ). En el siguiente ejemplo se explica como la dureza expresada como equivalente de carbonato de calcio es calculada para un agua que contiene 285 ppm de Ca y 131 ppm de Mg.

- Para Ca:  $285 \times \text{CO}_3 \text{ Ca} / \text{Ca} = 285 \times 100/40.1 = 711 \text{ ppm Ca}$  como equivalente Carbonato de Ca.
- Para Mg:  $131 \times \text{CO}_3 \text{ Ca} / \text{Mg} = 131 \times 100/24.3 = 539 \text{ ppm Mg}$  como equivalente Carbonato de Ca.

Dureza total (como equivalente  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) =  $711 \text{ ppm} + 539 \text{ ppm} = 1250 \text{ ppm}$

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la clasificación de la dureza del agua en mg/l  $\text{CaCO}_3$  se muestra en Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de agua en base a su dureza (Proain 2020).

Dureza (mg/l $\text{CaCO}_3$ )	Tipos de agua
0-60	Blanda
61-120	Moderadamente dura
121-180	Dura
>180	Muy dura

#### **2.4.4 CALIDAD DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN BASE A SU DUREZA.**

##### **2.4.4.1 IMPACTOS DEL AGUA DURA EN EL USO DOMESTICO.**

Uno de los efectos más comunes del agua dura en las actividades domésticas se relaciona con su interacción con los jabones. El jabón, que es una sal sódica de ácidos grasos de cadena larga (usualmente de 16 a 18 átomos de carbono), al emplearse en aguas con alta dureza, reacciona con los iones de calcio, magnesio y hierro presentes. Como resultado, se generan compuestos insolubles, ya que

los iones de calcio se combinan con los componentes del jabón formando sales que precipitan (Cupisuma, 2021).

Este fenómeno consume el jabón, dificulta la generación de espuma y origina un residuo sólido indeseable que no tiene utilidad alguna. Con agua dura, puede desperdiciarse hasta dos terceras partes del detergente empleado; además, la ropa sufre mayor desgaste debido a la aspereza que se genera en los tambores de las lavadoras. Asimismo, se forman depósitos de cal en utensilios, grifos y sanitarios (Salinas, 2021).

El agua que presenta una dureza mayor a 200 mg/L puede favorecer la formación de depósitos sólidos en los sistemas de conducción, fenómeno que también depende de otros factores como el pH y la alcalinidad. Estas acumulaciones pueden afectar las instalaciones y tuberías de distribución en los hogares (Neira, 2006).

La Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-2020 establece que el agua destinada al uso y consumo humano, sin importar si proviene de fuentes superficiales o subterráneas, debe pasar por procesos de potabilización para proteger la salud pública. Esto permite reducir la probabilidad de enfermedades infecciosas, parasitarias y aquellas ocasionadas por la ingesta de compuestos tóxicos que puedan estar presentes en el agua. Asimismo, la supervisión sanitaria del agua suministrada a la población debe fundamentarse en un enfoque basado en la evaluación de riesgos, dando prioridad a la caracterización inicial de sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, y al monitoreo constante de los parámetros de control establecidos (DOF, 2020).

#### **2.4.4.2 AGUA PARA CONSUMO HUMANO.**

González (2023), menciona que el acceso al agua potable y a servicios de saneamiento constituye un derecho humano fundamental, reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas. Por esta razón, es indispensable analizar sus características físicas, químicas y biológicas, con el fin de evaluar su

calidad y determinar si es apta para los distintos usos que se le puedan dar. El agua potable segura se define como agua que no representa ningún riesgo significativo para la salud durante toda la vida de consumo porque es un recurso vital para la supervivencia humana a continuación, en el Cuadro 2 se muestran los límites máximos permisibles para consumo humano de acuerdo con varias fuentes: la NOM-127-SSA1-2021 agua para uso y consumo humano.

Cuadro 2. Parámetros máximos permisibles en agua para consumo humano (González 2023).

parámetro	SSA (2022)	EPA (2022)	WHO (2022)
PH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> ) mg/l	500	300-500	500
Solidos totales disueltos, mg/l	1000	500	600
Cloruro, mg/l	400	250	250
Sulfato, mg/l	400	250	250
Nitrato, mg/l	11	10	50
Nitrito, mg/l	0.90	1	3
Sodio, mg/l			200
Potasio, mg/l			
Calcio, mg/l			
Magnesio, mg/l			
Fluoruro, mg/l	1.5	4	1.5

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Determina los valores máximos permitidos de calidad que debe cumplir el agua destinada al uso y consumo humano. Esta Norma es obligatoria en todo el país y aplica a los

organismos encargados de los sistemas de suministro de agua, tanto públicos como privados, donde se establecen los criterios y requisitos sanitarios de carácter químico que deben cumplirse, donde señala que para el parámetro de Dureza Total como  $\text{CaCO}_3$  un límite permisible de 500 mg/L (Baeza, 2024).

### III. MATERIALES Y METODOS.

#### 3.1 DESCRIPCION DE LA REGION DE ESTUDIO.

##### 3.1.1 ZONA DE ESTUDIO.

La Región Sureste es una de las cinco regiones que conforman al estado de Coahuila. Como su nombre lo indica, está ubicado al sureste del estado, y está compuesto por 5 municipios: Parras, General Cepeda, Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo. En esta región se encuentra la capital del estado, la ciudad de Saltillo. En total, la región cubre una superficie de 27,271 km<sup>2</sup> equivalente al 18% de la superficie estatal (Ruiz, 2025).

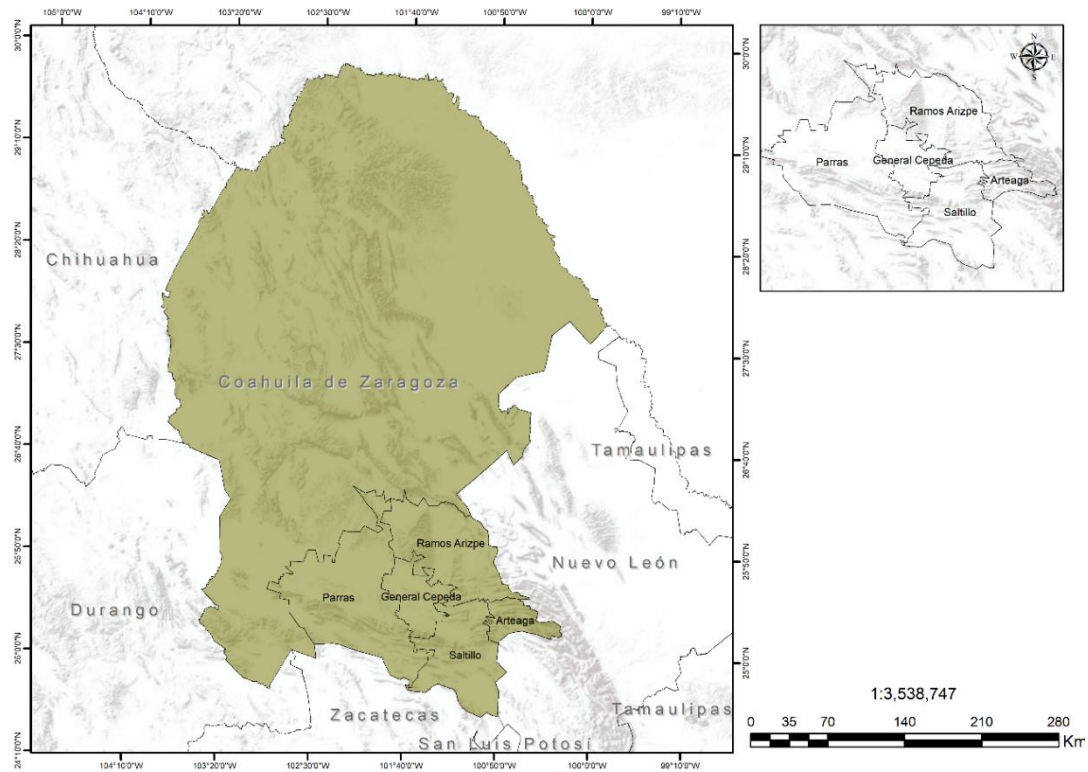


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio (Sureste) Coahuila de Zaragoza México (Elaboración propia).

### 3.1.2 UBICACION GEOGRAFICA.

Cuadro 3. Altitud y coordenadas geográficas de las cabeceras municipales de la región (seccoahuila, 2025).

MUNICIPIO	ALTITUD m	LATITUD	LONGITUD
Arteaga	1,660	25° 50' 48"	100° 50' 48"
General cepeda	1,468	25° 22' 35"	101° 28' 302
Parras de la fuente	1,533	25° 26' 13"	102° 11' 01"
Ramos Arizpe	1,392	25° 32' 37"	100° 57' 01"
Saltillo	1,560	25° 26' 00"	101° 00' 00"

### 3.1.3 FISIOGRAFIA.

Naranjo (2025), menciona que la región está asentada entre la vertiente noroccidental de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental y el sureste de la provincia fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte. A su vez la región está dividida en seis subprovincias fisiográficas las cuales son: La subprovincia Laguna de Mayrán, la subprovincia Sierras y Llanuras Coahuilenses, la subprovincia Sierra de La Paila, la subprovincia Pliegues Saltillo-Parras, la subprovincia Gran Sierra Plegada y de la subprovincia Sierras Transversales.

### 3.1.4 SUELOS.

Fernández (2025), menciona que la variedad de relieves y procesos de formación provocan diversidad de suelos. Los más representativos son los siguientes:

Calcisol: presente en los 5 municipios, su fertilidad depende del riego y drenaje por sus limitantes de aridez y horizonte petrocálcico.

Leptosol: común en todas las zonas montañosas por la alta erosionabilidad en relieves escarpados.

Regosol: Se desarrolla sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Aparece en cualquier zona climática y a cualquier altitud.

Xerosol: Suelo de color claro y pobre en materia orgánica, y el subsuelo es rico en arcilla o carbonatos, con baja susceptibilidad a la erosión.

Kastanozem: principalmente en los valles al norte de la sierra La Concordia y al norte del municipio. Se asocia a regiones con un clima seco y cálido.

Phaeozem: principalmente en la sierra de Paila. Su capa superficial es suave y rica en materia orgánica y nutrientes.

También se hallan otros tipos de suelos como solonchok, chernozem, gypsisol, cambisol, arenosol fluvisol, luvisol, vertisol.

### **3.1.5 USO DE SUELO.**

El uso predominante es el matorral xerófilo en 4 municipios. Le sigue el forestal, sobre todo en las sierras, principalmente en Arteaga debido a que el 60% del municipio está cubierto por bosques de coníferas y de pino-encino. La agricultura está limitada por las condiciones climáticas, pero existe gracias al riego en áreas no siempre aptas para esto. Se concentra en General Cepeda, Ramos Arizpe y noroeste de Saltillo. En el sur de Saltillo hay pastizales ganaderos (Ruiz, 2025).

### **3.1.6 HIDROGRAFIA.**

La región tiene escasos ríos superficiales debido a las bajas precipitaciones que limitan la recarga de mantos acuíferos. Todos son clasificados como intermitentes al secarse fuera del periodo de lluvias.

Pertenece a 2 vertientes, 4 Regiones Hidrográficas, 7 Cuencas y 12 Subcuencas. Las aguas subterráneas provienen de mantos como Cañón de Derramadero, Saltillo-Ramos Arizpe y Región Manzanera Zapalinamé, sobreexplotados y con deterioro en su calidad (Ruiz, 2025)

### **3.1.7 CLIMA.**

Como resultado de la amplia variedad de sistemas montañosos, la Región Sureste presenta también una gran diversidad de climas y microclimas, aunque

predominan las condiciones secas. En las áreas situadas por debajo de los 2000 metros sobre el nivel del mar prevalecen los climas Seco Semicálido y Muy Seco Semicálido, caracterizados por temperaturas medias anuales superiores a 18 °C y precipitaciones menores a 400 mm al año. Estas condiciones climáticas se presentan con mayor frecuencia en los municipios de Parras, General Cepeda y Ramos Arizpe (Naranjo, 2025).

### **3.1.8 VEGETACION.**

Ruiz (2025), dice que la Región Sureste de Coahuila posee una notable diversidad biológica gracias a la variedad de ecosistemas presentes en su territorio. En las zonas dominadas por matorral xerófilo, que abarcan la mayor parte de la superficie en cuatro de los cinco municipios, las condiciones de aridez extrema han favorecido la adaptación y desarrollo de especies propias de estos ambientes, como distintos tipos de matorrales, crasuláceas y cactáceas, además de árboles aprovechables como el mezquite y la gobernadora.

### **3.2 ArcMap 10.5.4.**

ArcGIS es un sistema muy completo el cual permite: reunir, organizar, distribuir, analizar y compartir información geográfica, es considerado como una plataforma líder a nivel mundial. ArcGIS permite que la información geográfica que se publique sea accesible para cualquier usuario y que esté disponible en cualquier lugar del mundo ya sea a través de dispositivos móviles y de escritorio (Pino, 2018).

### **3.3 DATOS.**

Se descargó la cartografía desde la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) donde se logró encontrar el marco geoestadístico desde el enlace <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>, correspondiente al año 2024.

### **3.4 INTERPOLACION.**

Las técnicas de interpolación IDW (distancia inversa ponderada) y Spline se clasifican como métodos determinísticos, ya que se fundamentan directamente en los datos observados o en ecuaciones matemáticas concretas que controlan el grado de suavidad de la superficie generada. Por otro lado, existe otro grupo de métodos conocidos como geoestadísticos, entre los que destaca el kriging, el cual se apoya en modelos estadísticos que consideran la autocorrelación, es decir, la relación estadística entre los puntos muestreados (Desktop, 2021).

### **3.5 ELABORACION DE MAPAS.**

Con los datos mostrados en el Cuadro 4 proporcionados por INEGI sobre los pozos ubicados en los municipios de Saltillo, Arteaga, Ramos Arizpe General Cepeda y Parras, la cual incluía sus coordenadas geográficas y UTM, así como diversos parámetros fisicoquímicos, la profundidad y las concentraciones de cationes y aniones, se llevaron a cabo los procesos de análisis e interpretación de datos. Las coordenadas de los pozos y los valores de los parámetros medidos en el agua se organizaron en una base de datos y posteriormente se analizaron en ArcMap 10.5.4. Se aplicó un análisis de interpolación geoestadística mediante el método Kriging para estimar la distribución espacial de las variables evaluadas. Esta técnica permitió inferir valores en ubicaciones no muestreadas a partir de los datos disponibles.

Cuadro 4. Localización geográfica de los pozos, así como los valores de las concentraciones de cationes (Ca, Mg, Na, y K).

Pozo	UTM Longitud X	UTM Latitud Y	Municipio	Ca(mg/L)	Mg (mg/L)	Na(mg/L)	K (mg/L)
A-01	301893	2817110	Saltillo	69.66	44.30	155.85	2.22
A-02	311682	2818794	Arteaga	121.48	38.09	36.37	6.61
A-03	311986	2820449	Ramos Arizpe	112.23	37.95	30.25	2.45
A-04	312156	2820990	Ramos Arizpe	119.26	36.27	29.26	5.59
A-05	304760	2815852	Saltillo	163.13	39.04	36.29	3.70
A-06	311433	2811514	Arteaga	74.26	22.47	13.74	1.89
A-07	306596	2809233	Saltillo	75.01	21.16	14.00	1.94
A-08	265901	2900809	Ramos Arizpe	87.91	54.05	223.61	5.26
A-09	263526	2884194	Ramos Arizpe	61.11	67.36	98.04	5.28
A-10	272144	2867059	Ramos Arizpe	13.21	6.91	468.41	5.26
A-11	275409	2875162	Ramos Arizpe	160.49	83.36	520.01	3.39
A-12	284181	2866580	Ramos Arizpe	363.94	69.19	320.98	4.94
A-13	312484	2864127	Ramos Arizpe	391.45	71.02	358.74	54.77
A-14	312666	2864145	Ramos Arizpe	484.46	84.72	408.59	64.98
A-15	275346	2816332	Saltillo	267.60	14.96	125.44	4.76
A-16	264251	2823169	General Cepeda	77.81	14.22	73.52	4.20
A-17	253107	2818856	General Cepeda	86.18	25.75	97.80	3.33
A-18	257864	2827991	General Cepeda	212.10	41.37	247.70	5.62
A-19	243964	2836202	General Cepeda	164.11	69.40	245.67	8.21
A-20	222642	2845000	General Cepeda	34.91	12.31	465.71	6.30
A-21	269085	2843055	Ramos Arizpe	79.64	23.64	84.27	7.18
A-22	255629	2840762	Ramos Arizpe	23.46	2.98	11.98	11.71
A-23	247845	2813111	General Cepeda	121.67	16.47	84.60	4.05
A-24	240605	2815893	General Cepeda	464.69	29.78	142.49	4.50
A-25	228580	2823465	General Cepeda	285.71	38.29	174.38	4.83
A-26	221683	2829103	General Cepeda	108.86	40.91	130.07	3.08
A-27	300900	2855140	Ramos Arizpe	390.87	100.60	326.78	16.15
A-28	300738	2855432	Ramos Arizpe	144.57	41.83	165.63	37.87
A-29	304285	2859958	Ramos Arizpe	208.07	36.55	171.83	3.31
A-30	289380	2853187	Ramos Arizpe	258.58	37.41	152.39	5.08
A-31	287143	2858296	Ramos Arizpe	308.41	30.30	125.07	4.80
A-32	297169	2846185	Ramos Arizpe	288.12	60.60	150.17	7.68
A-33	294147	2849069	Ramos Arizpe	392.32	55.98	194.66	6.35
A-34	301090	2839509	Ramos Arizpe	130.09	39.95	183.54	46.38
A-35	335139	2814144	Arteaga	75.34	35.79	31.66	3.37
A-36	336557	2817831	Arteaga	64.44	23.42	16.20	1.69

A-37	327269	2816595	Arteaga	44.24	21.39	39.25	3.65
B-01	294626	2788086	Saltillo	62.89	24.01	16.91	2.45
B-02	295586	2791834	Saltillo	58.74	22.31	12.76	2.04
B-03	299614	2803705	Saltillo	51.97	23.07	10.18	1.83
B-04	296102	2800616	Saltillo	48.45	19.20	8.88	1.61
B-05	299991	2810900	Saltillo	74.94	27.05	49.56	2.21
B-06	305502	2825406	Ramos Arizpe	124.58	44.26	138.23	17.71
B-07	312053	2830473	Ramos Arizpe	196.82	38.27	37.94	7.87
B-08	302846	2827155	Ramos Arizpe	259.65	136.69	286.84	6.60
B-09	286406	2810779	Saltillo	243.74	27.69	183.36	1.93
B-10	274998	2808327	Saltillo	230.84	22.12	127.54	3.98
B-11	262242	2808762	General Cepeda	246.54	19.41	150.84	6.03
B-12	298577	2812180	Saltillo	95.43	18.38	18.72	1.93
B-13	295923	2805185	Saltillo	71.37	21.86	15.57	2.43
B-14	299346	2778553	Saltillo	240.86	57.90	35.76	6.76
B-15	280191	2792082	Saltillo	106.31	22.13	30.30	3.39
B-16	276615	2795060	Saltillo	91.85	25.54	19.37	3.42
B-17	255754	2801530	General Cepeda	1.50	0.33	271.84	4.58
B-18	240457	2808054	General Cepeda	204.00	31.13	76.11	6.07
B-19	250471	2809427	General Cepeda	167.96	37.53	90.06	5.18
B-20	234926	2800641	General Cepeda	85.08	9.61	23.76	3.54
B-21	224966	2796291	Parras	78.11	17.39	5.14	1.63
B-22	212562	2803116	Parras	84.62	15.00	3.90	1.29
B-23	280295	2830358	Ramos Arizpe	399.20	0.35	89.33	6.22
B-24	292081	2824292	Ramos Arizpe	79.03	14.44	42.06	4.02
B-25	291083	2830711	Ramos Arizpe	42.75	2.86	8.12	7.25
B-26	292634	2835653	Ramos Arizpe	105.58	13.56	73.13	4.33
B-27	287500	2847199	Ramos Arizpe	229.17	20.96	104.77	4.58
B-28	297859	2827095	Ramos Arizpe	119.50	38.78	102.58	3.24
B-29	309372	2795959	Saltillo	57.43	13.00	1.12	1.14
B-30	312167	2806271	Arteaga	40.91	24.62	18.55	1.98

### 3.5.1 PREPARACION Y EJECUCION DE DATOS.

1. Se cargaron los datos de todos los pozos en formato (xlsx.) posteriormente se convierte en formato CSV (delimitado por comas). Para luego agregar la capa de todos los puntos en el software siguiendo estos pasos > **add data** > **Add xy data** (Figura 3).

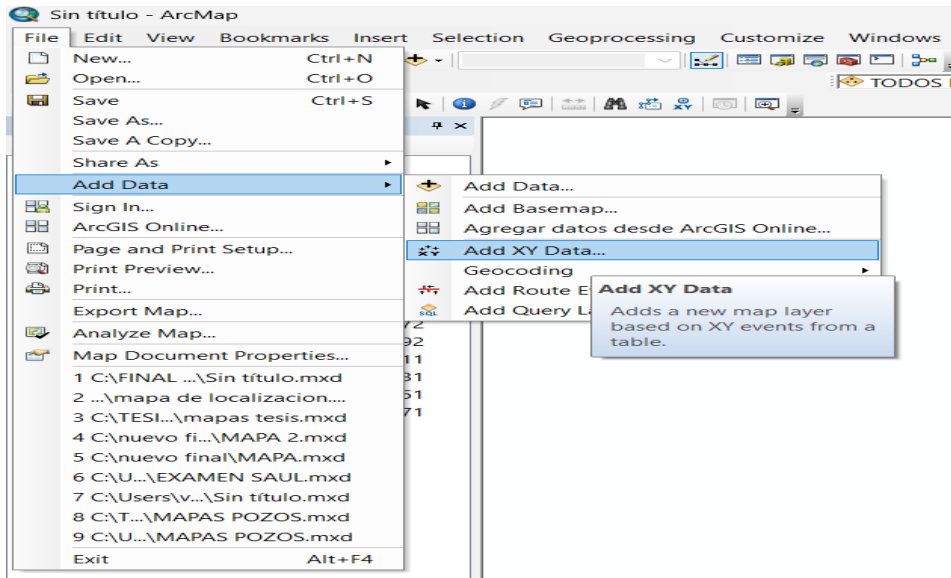


Figura 3. Exportación de la base de datos de los pozos al software ArcMap.

2. Se selecciona el documento donde se tienen los datos de todos los pozos, se identificaron los campos de x, y, z ahí mismo se especifican las coordenadas geográficas con las que se trabajaran, para nuestro caso fue en la zona 14 (Figura 4), se procesan los datos con la opción **ok**. La Figura 5 muestra cómo se representan los datos que se cargan en este caso son los pozos de la zona de estudio.

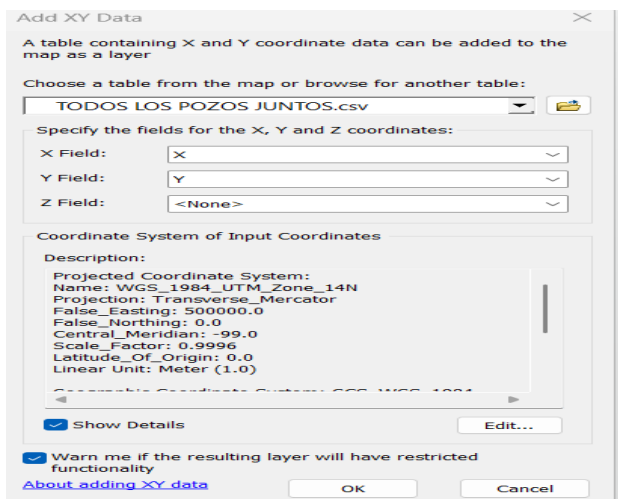


Figura 4. Caja de diálogo donde se cargan los datos de Excel.

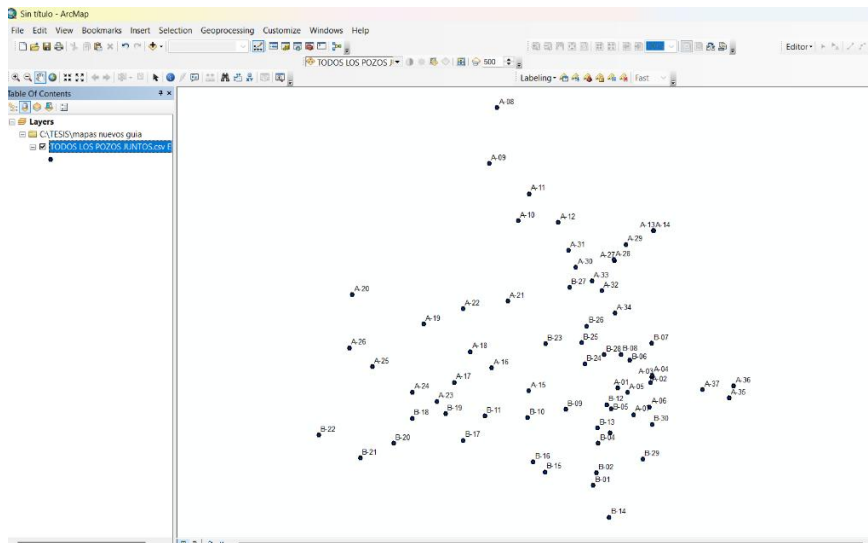


Figura 5. Localización de los pozos en la aplicación de ArcMap.

3. Se ubica el apartado de Customize donde se enlistará una serie de extensiones y se elegirá la de Geostatistical Analyst (Figura 6). Posteriormente al elegir la herramienta Geostatistical Analyst aparecerá la opción Geostatistical Wizard la cual se selecciona (Figura 7). La Figura 8 muestra la caja de diálogo donde se especifica la capa de puntos de entrada. El campo con los valores a interpolar se hizo con el catión de calcio y se procesa con el botón de finalizar, finalmente se muestra en la Figura 9 el mapa de interpolación de todos los pozos.

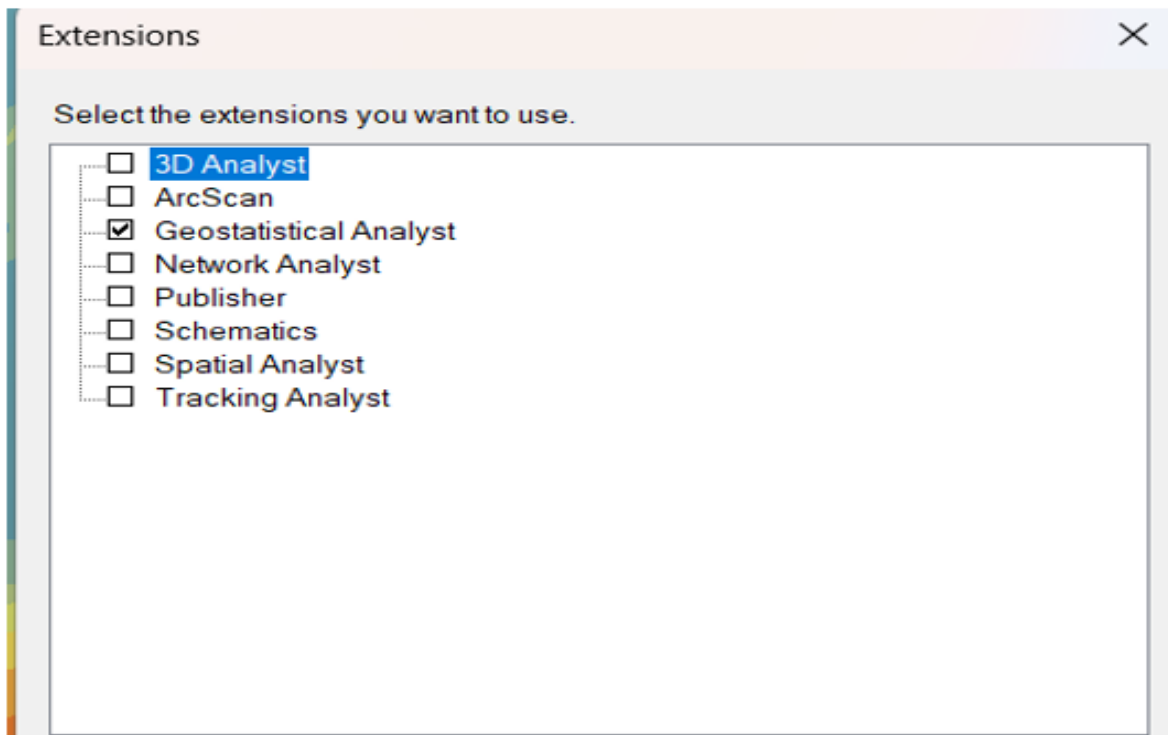
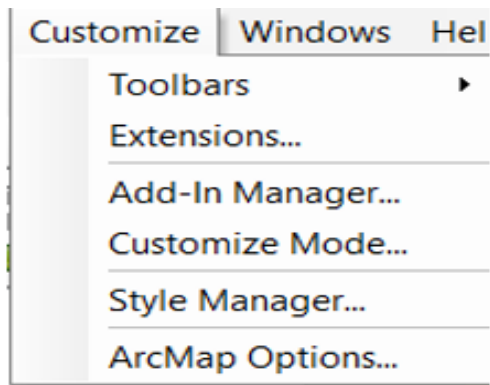


Figura 6. Ubicación de la herramienta customize.

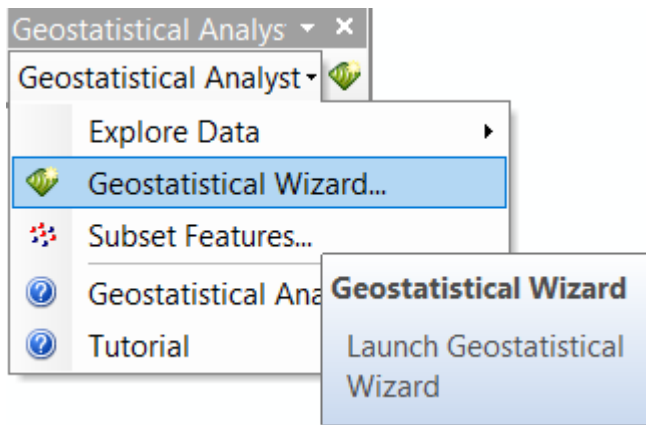


Figura 7. Ubicación de la herramienta Geostatiscal Wizard.

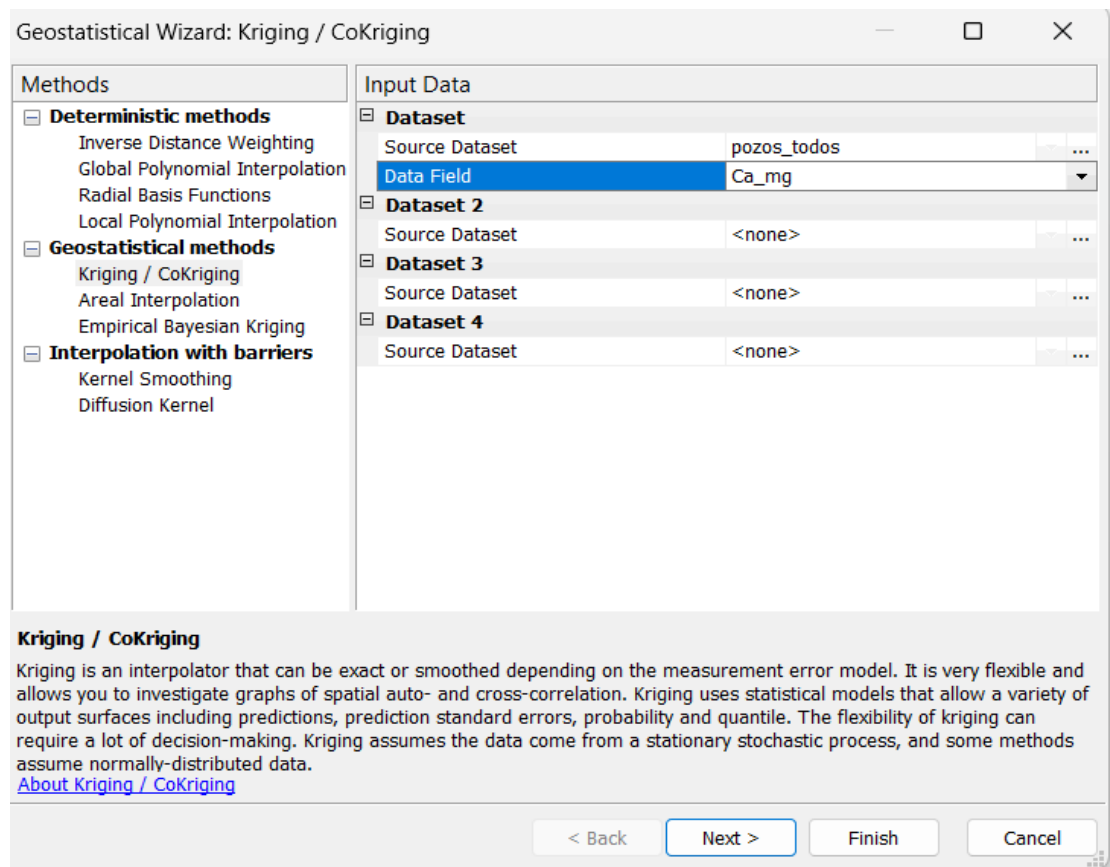


Figura 8. Apertura de la caja de diálogo de Kriging, así como la selección de los valores de calcio para interpolar.

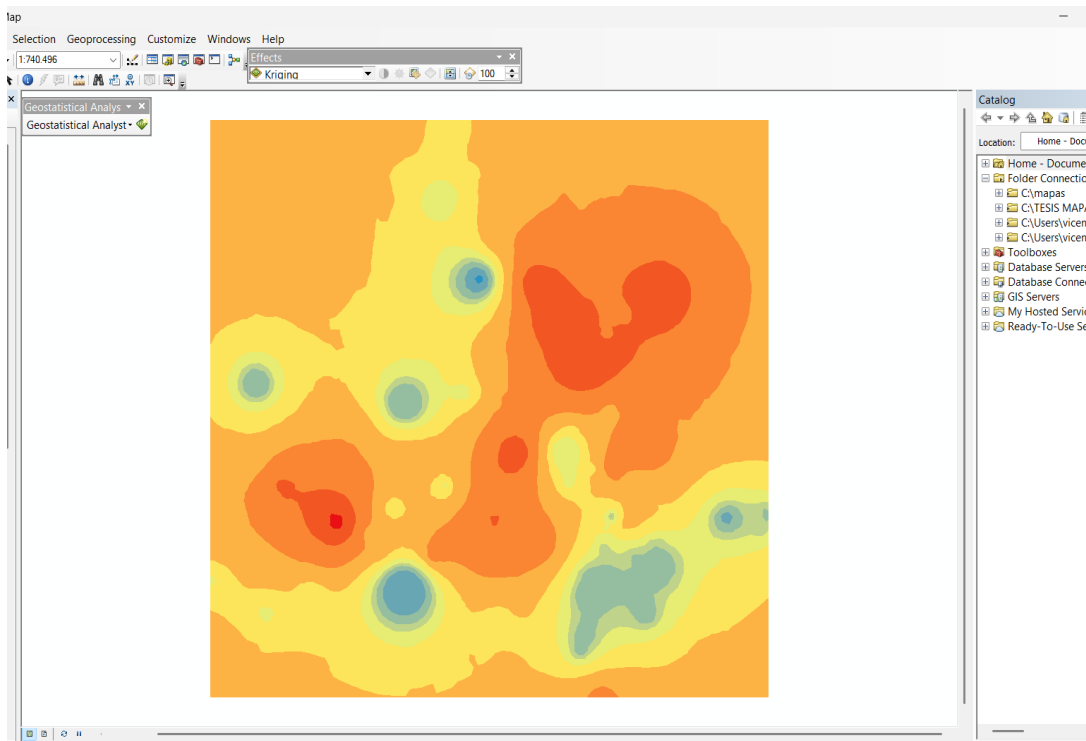







Figura 9. Interpolación final con la ayuda del Kriging.

4. Como se muestra en la Figura 9 se obtiene la interpolación final de todos los pozos, posteriormente para este trabajo se optó por clasificar los valores en 5 clases obteniendo 5 regiones y así fundamentar los resultados y discusiones, se clasificaron las clases en 5 diferentes colores (Cuadro 5). Este esquema de colores se utilizó en todos los mapas, así como el procedimiento. Obteniendo los respectivos mapas para Ca, Mg, Na, y K

Cuadro 5. Escala de colores con su respectiva clasificación en base a las concentraciones de cationes.

COLOR	CLASIFICACION
	concentraciones muy altas
	concentraciones altas
	concentraciones medias
	concentraciones bajas
	concentraciones muy bajas

### 3.5.2 CLASIFICACION DE RANGOS Y NUMERO DE CLASES.

1. Para realizar la clasificación dar click derecho en el mapa de salida dar click en **propiedades> symbology>classify** (Figura 10).

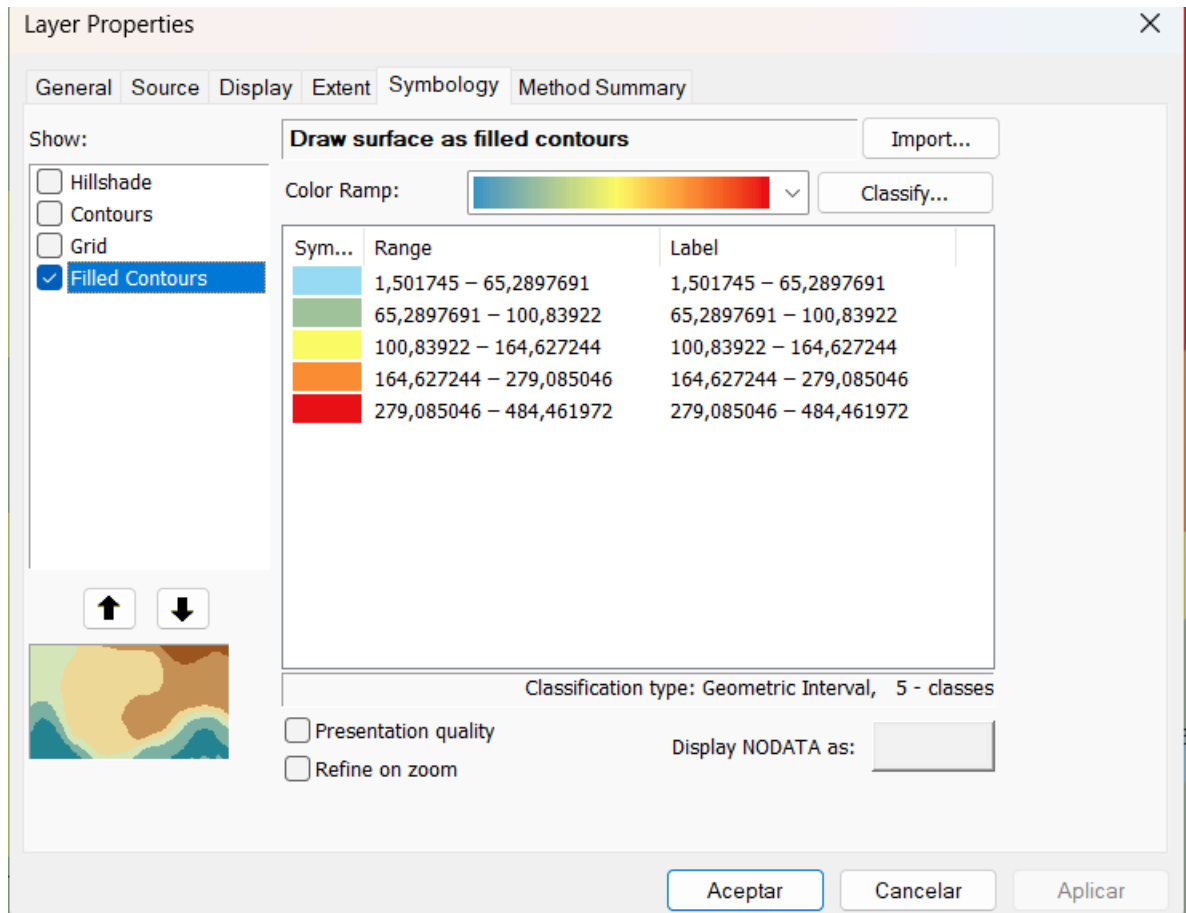


Figura 10. Ubicación de la pestaña de Symbology dentro de la caja de propiedades.

2. Se desplegó la caja de diálogo de la opción **classify** en seguida se localiza el apartado de **classes** donde se colocan las 5 clases con las que se trabajarán y se procesa con la opción **ok** (Figura 11).

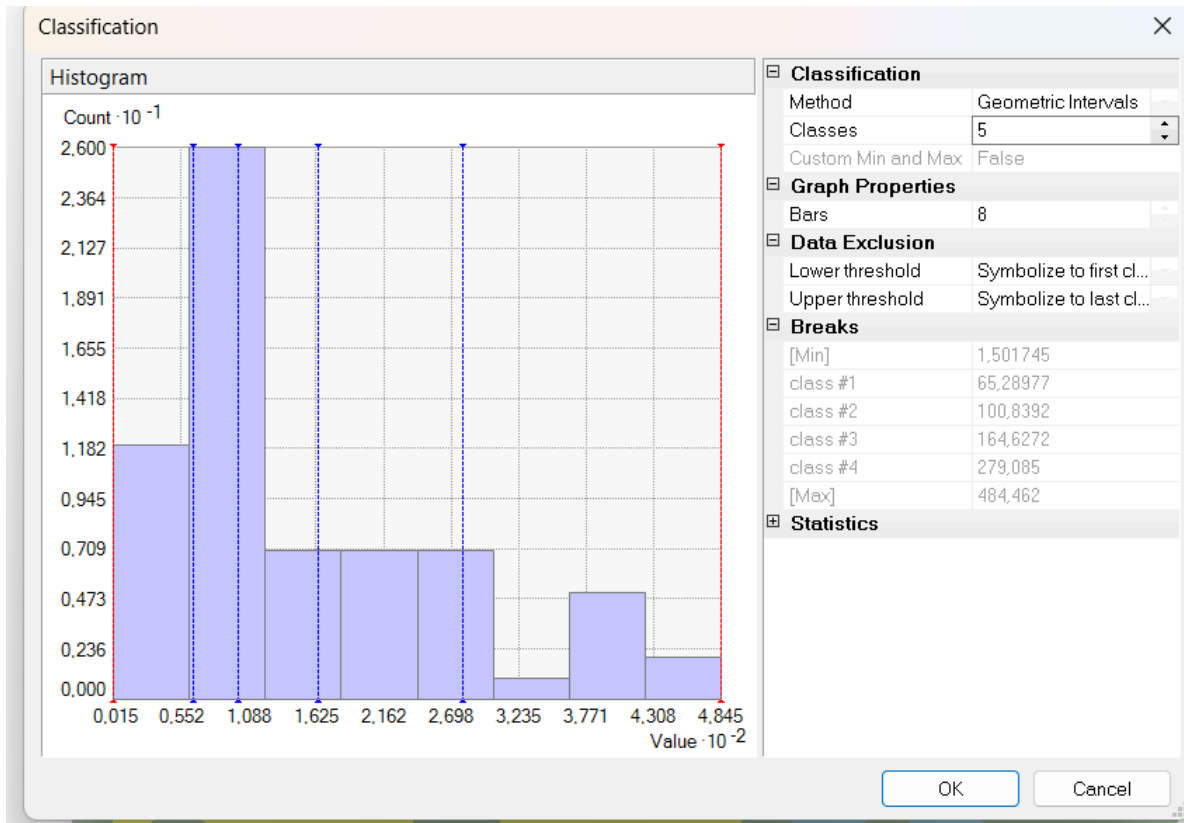


Figura 11. Apertura de la caja de diálogo de la opción de Classify.

3. Al seleccionar la opción de **ok** se retorna a la caja de Properties, donde ya se encuentran las 5 clasificaciones sin embargo el programa arroja los rangos que el considera, por lo que fue necesario ajustar de manera manual a los rangos de 0-50, 50-100, 100-200, 200-300 y 300-500 para procesar la información se elige la opción **aplicar** y **aceptar** (Figura 12).

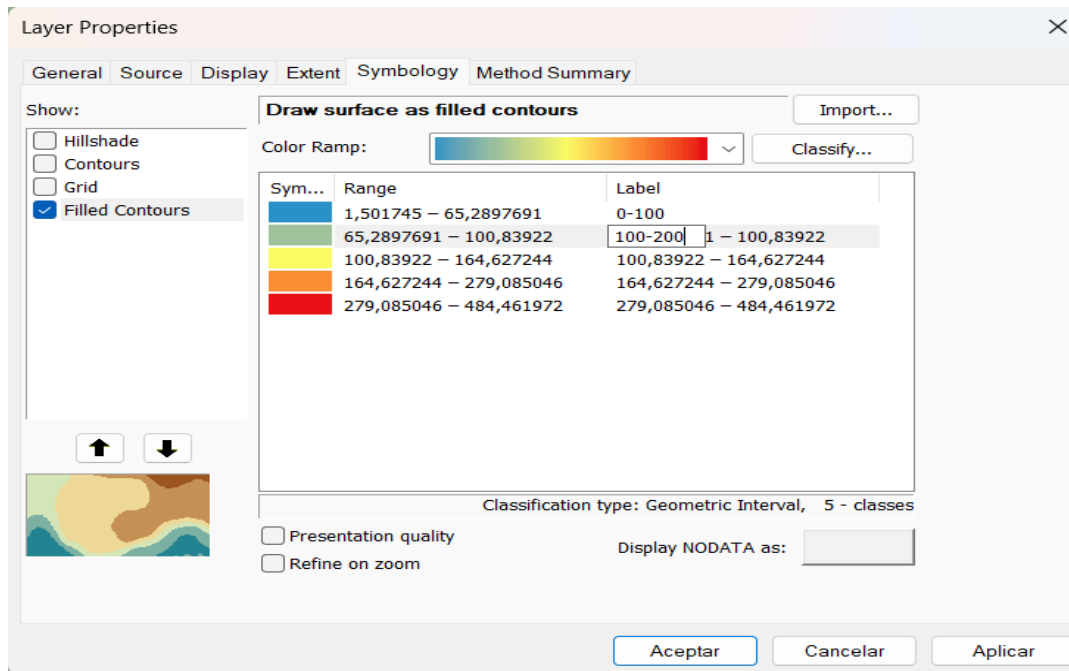


Figura 12. Clasificación manual de los rangos.

### 3.5.3 TRANSFORMACION DE DATOS DE INTERPOLACION A FORMATO RASTER.

1. Cuando se obtuvo el mapa clasificado se procedió a dar click derecho en el documento >Data>Export To Raster (Figura 13). se abre la caja de diálogo donde se selecciona el documento reciente, por lógica el programa siempre siguió una secuencia, es decir cada vez que se hace un proceso nuevo selecciona en automático el documento anterior o reciente. Por lo que no hay problemas en llevar a cabo el proceso (Figura 14).

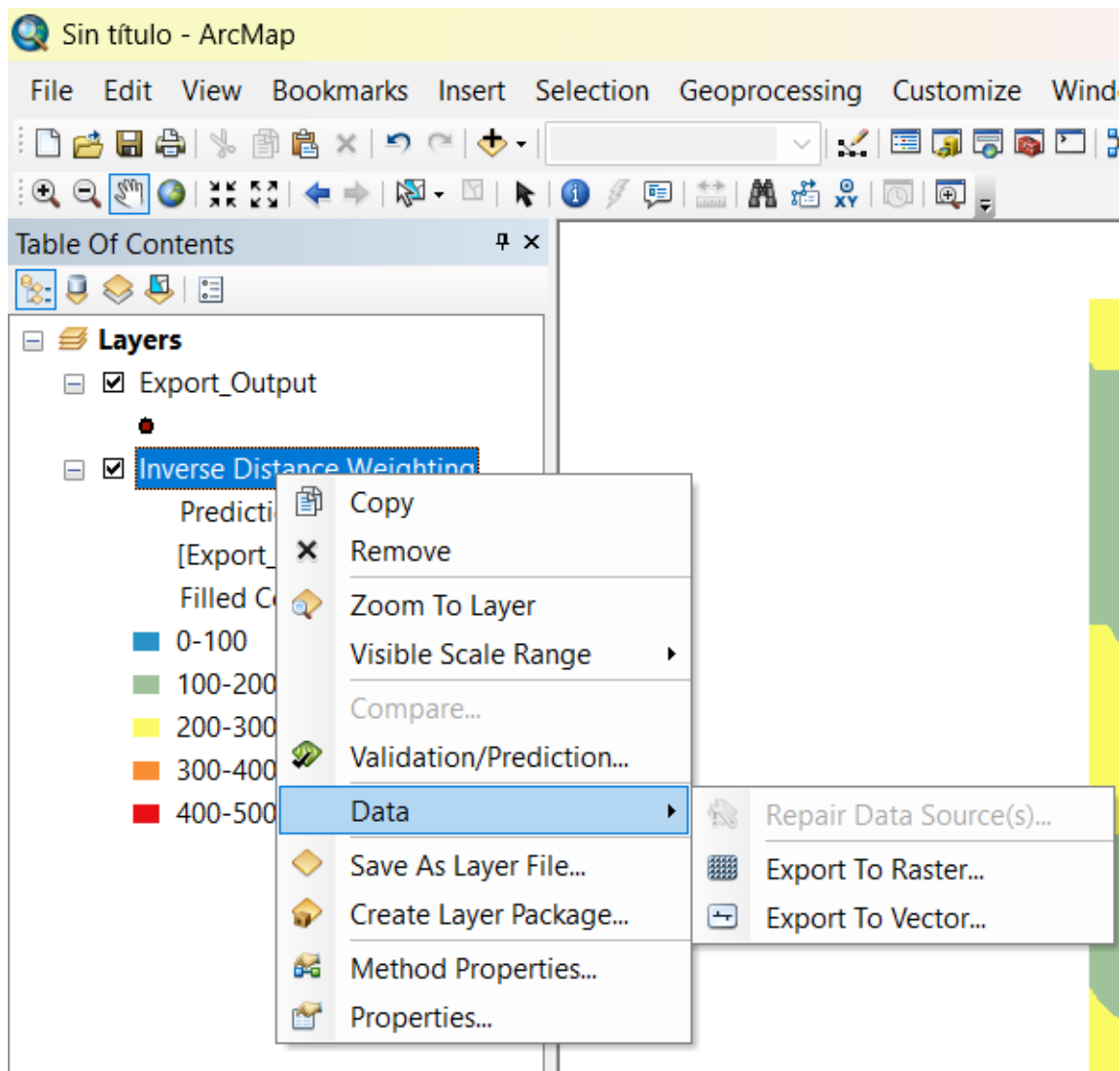


Figura 13. Exportación del mapa a un documento Raster.

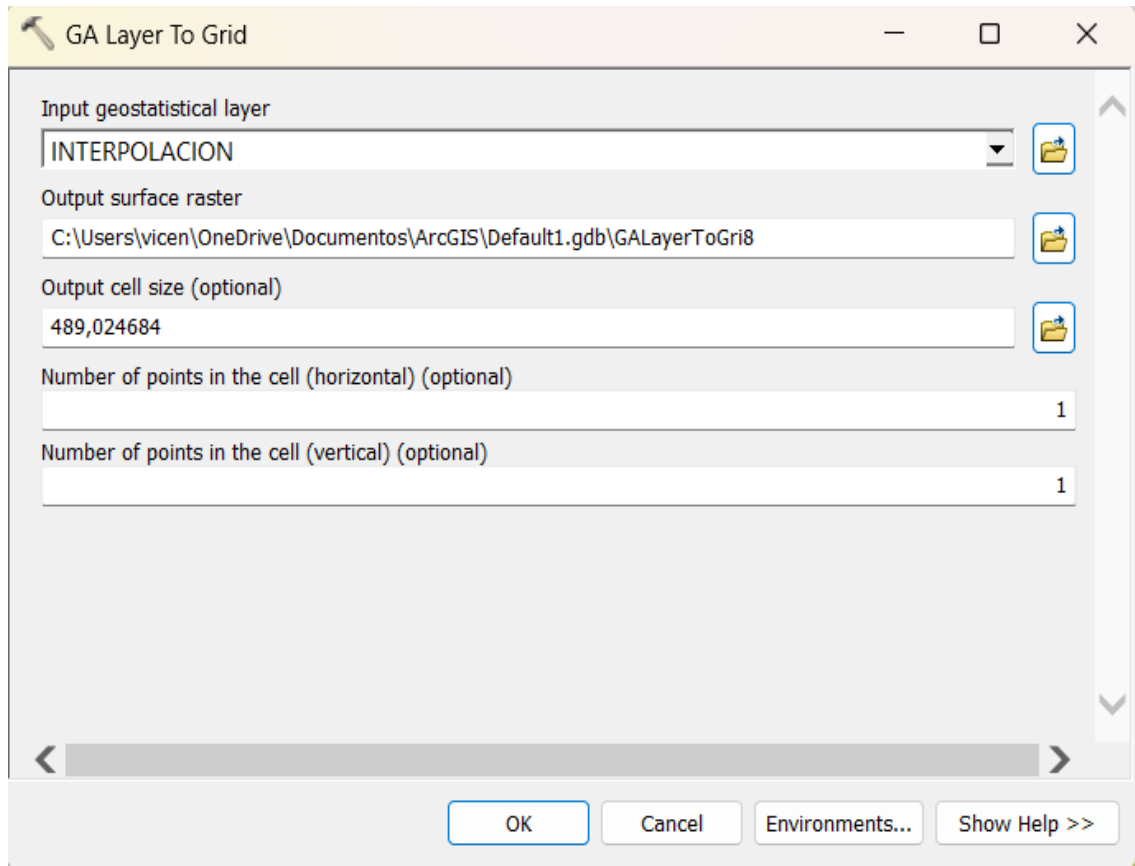


Figura 14. Apertura de la caja de diálogo, donde se transforma el mapa de interpolación a un documento Raster.

2. En la Figura 15 se muestra el nuevo formato, por lo que este nuevo mapa se reclasificó, para este proceso se utilizó la caja de herramientas **ArcToolbox>Reclass>Reclassify** (Figura 16). Se abre la caja de dialogo de **reclassify** seleccionar el archivo reciente. Tambien en la parte inferior arroja un cuadro con el rango de valores y su enumeración aquí es donde se reclasifica por lo que se da click en **Classify** (Figura 17).



Figura 15. Nuevo documento Raster.

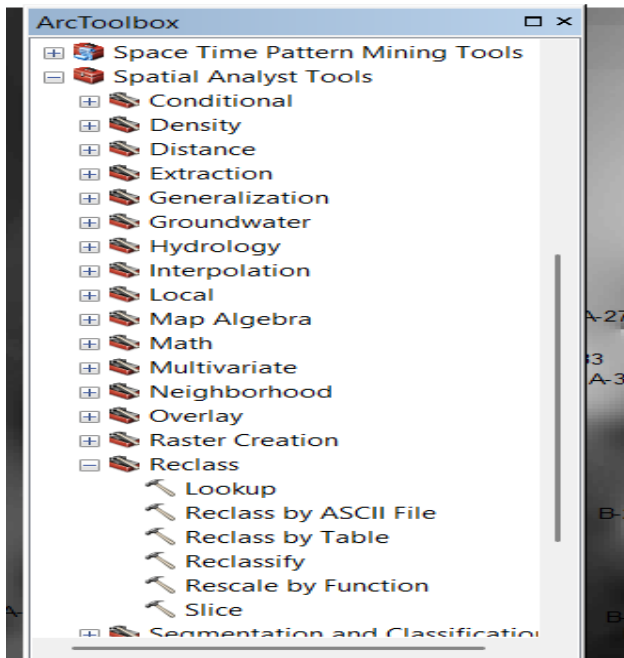


Figura 16. Ubicación y selección de las herramientas Reclass y Reclassify.

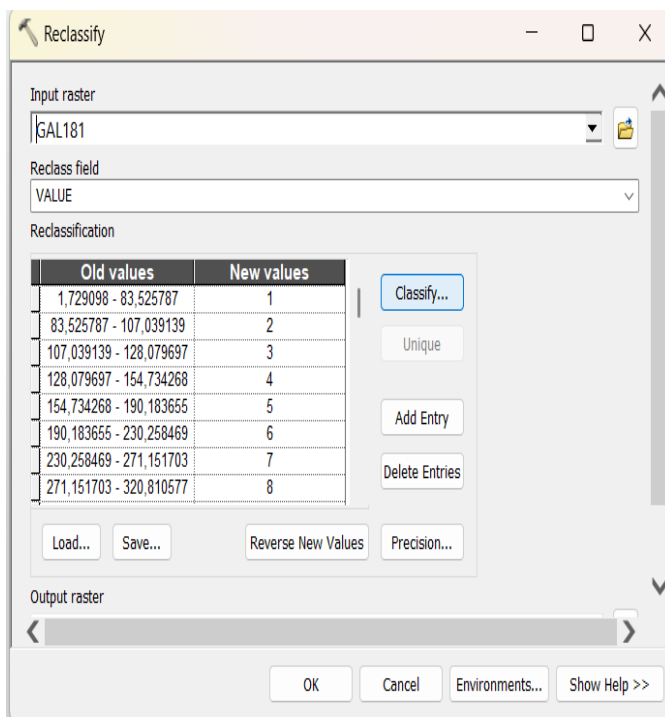


Figura 17. Elección del nuevo documento Raster, así como la selección del botón classify.

2. En la caja de diálogo de Classification se encuentra el cuadro de **Classes** ahí mismo se coloca el número 5 (Figura 18), también se ubica el cuadro de **Break Values** donde se colocan los límites de los rangos máximos con los que se trabajarán, para esta muestra se utilizaron los rangos 50, 100, 200, 300, y 469 (Figura19). Dar click en **ok** y listo arroja un nuevo mapa por lo tanto un nuevo documento de salida (Figura 20).

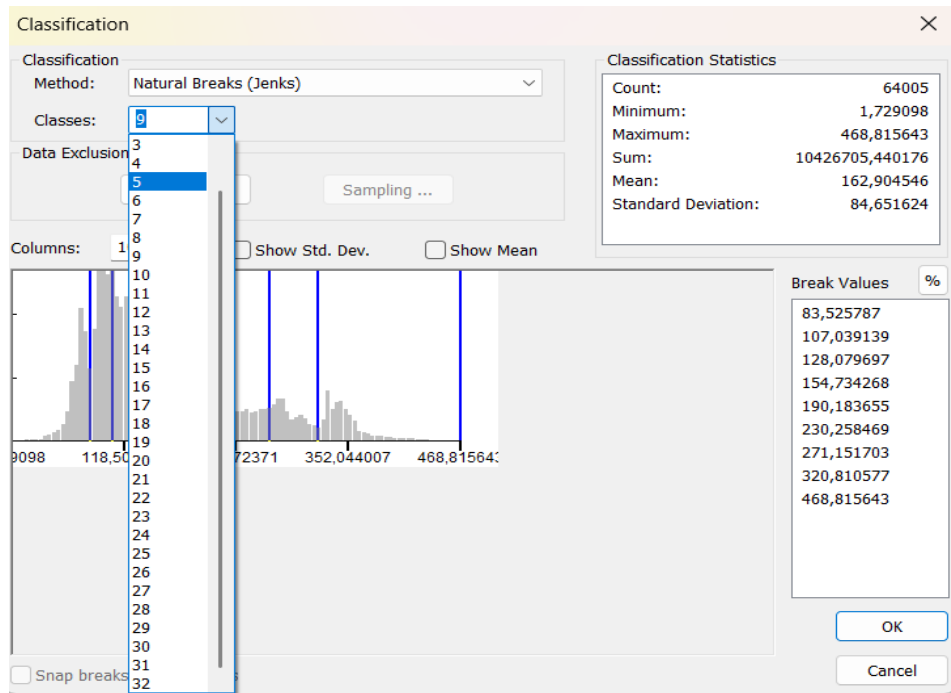


Figura 18. Ubicación de la pestaña Classes, así como la elección de 5 clases a trabajar.

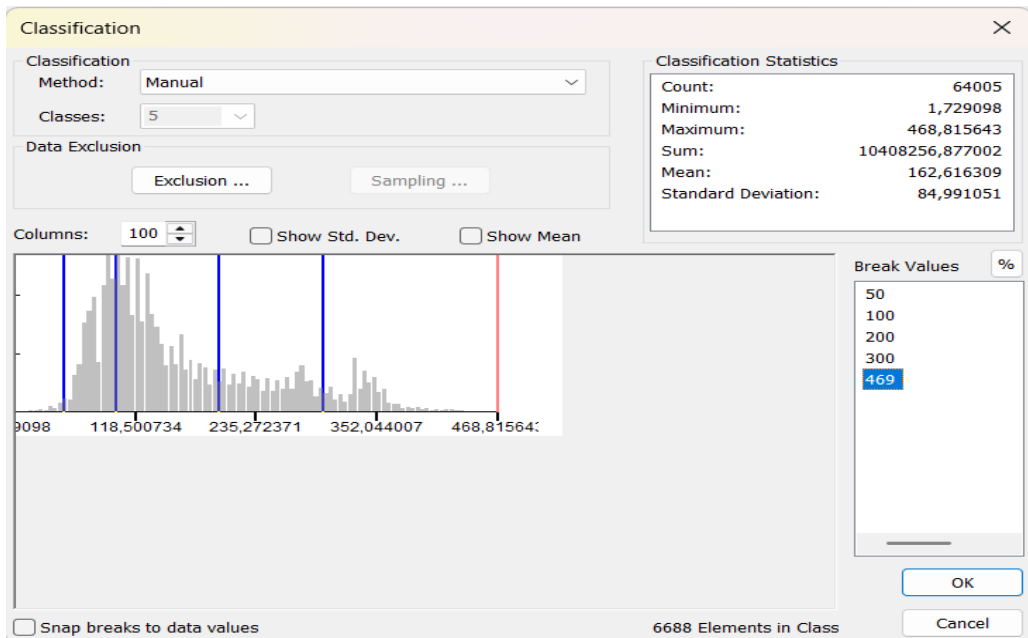


Figura 19. Colocación manual de los 5 rangos máximos a trabajar.

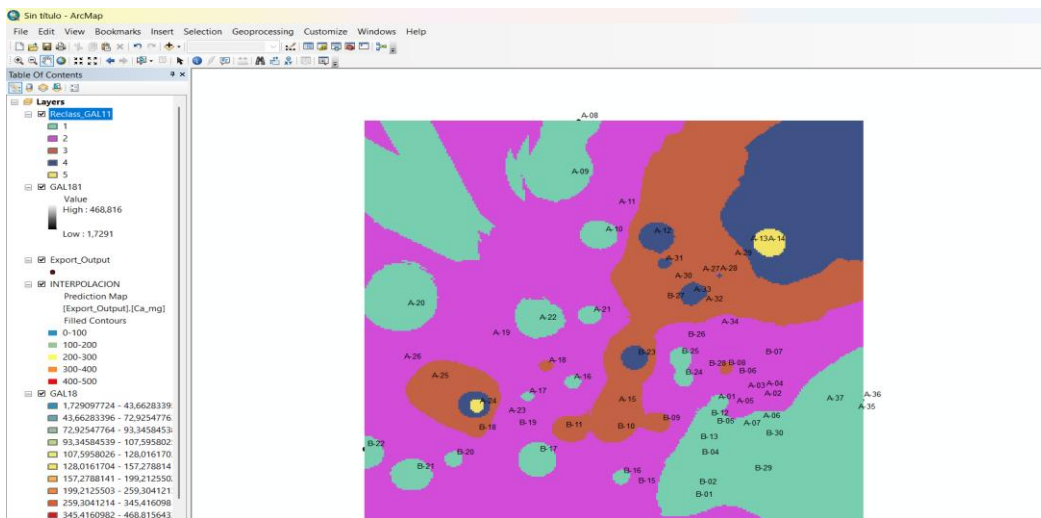


Figura 20. Mapa Raster finalizado y reclasificado.

### 3.5.4 TRANSFORMACION DE FORMATO RASTER A FORMATO DE POLIGONOS.

1. El mapa reclasificado se tiene que convertir en un mapa con polígonos para dar los colores de clasificación y así interpretar las concentraciones en base a cada catión. Para esto se selecciona la caja de herramientas **ArcToolbox** seguido de **Conversión Tools**, posteriormente **From ráster** y en **Raster to polygon** (Figura 21). Se abrirá la caja de diálogo, se elige el documento de reclass, posteriormente se elige la opción de **ok** (Figura 22).

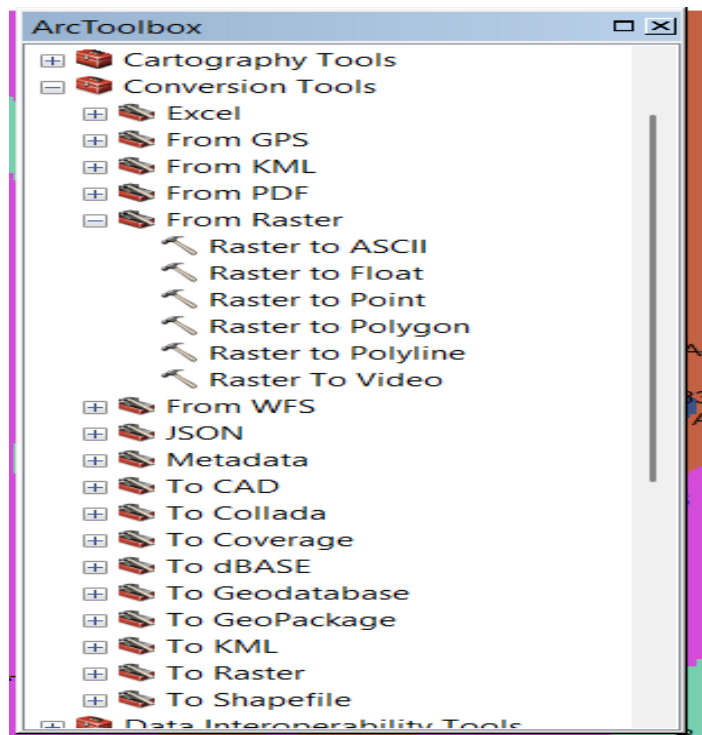


Figura 21. Ubicación y selección de las herramientas From Raster y Raster to Polygon.

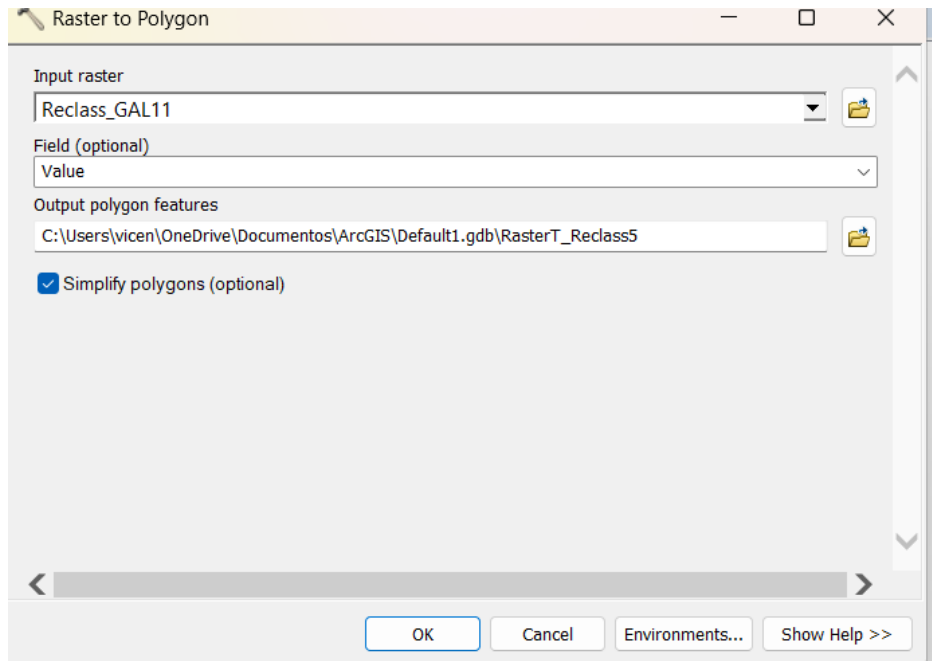


Figura 22. Caja de diálogo de Raster to Polygon, así como la selección del mapa reclasificado.

2. Se obtiene el nuevo mapa con polígonos (Figura 23). En el archivo de salida se óprime click derecho se localiza la opcion de propiedades y en el apartado de **Fields** se desactivan los campos de **Shape\_Lenght y Shape\_Area** y se procesa con la opción **aceptar** (Figura 24) .

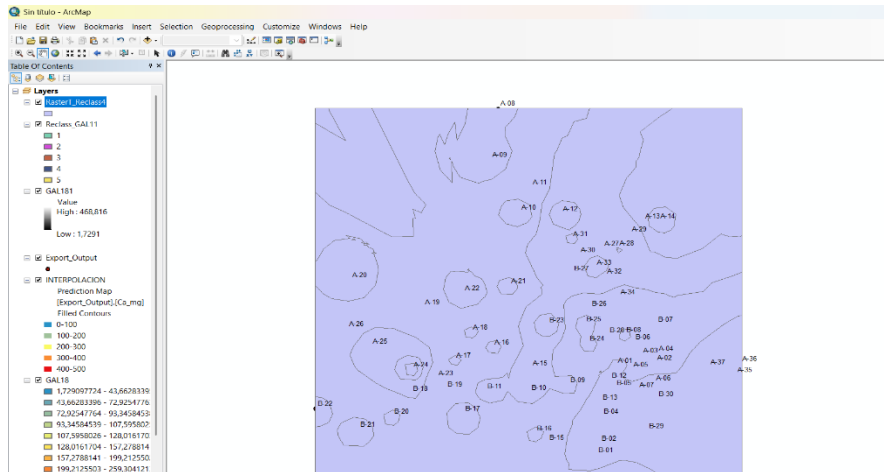


Figura 23. Mapa con los polígonos de interpolación a interpretar.

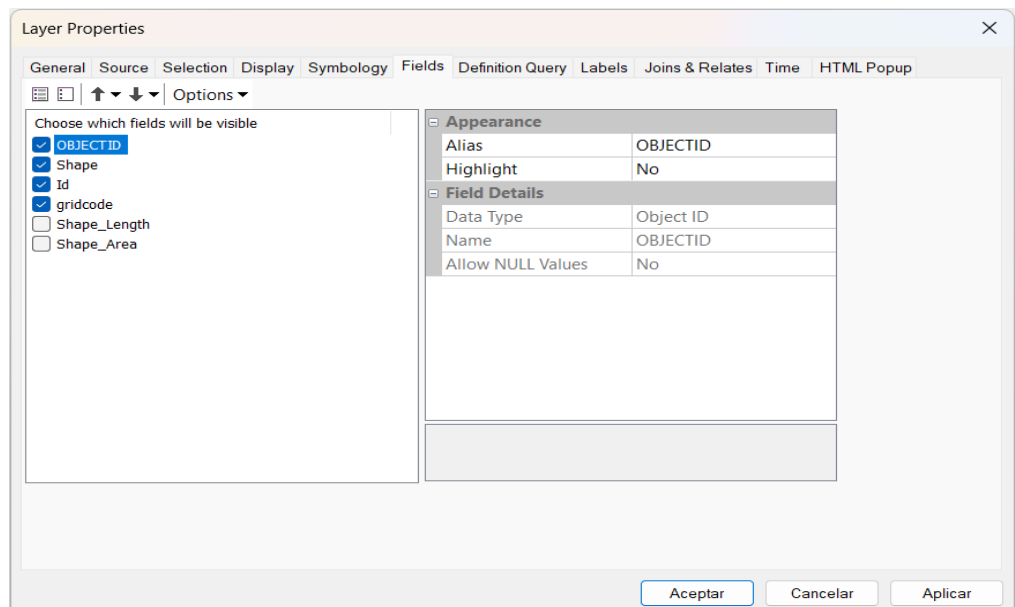


Figura 24. Ubicación de la pestaña Fields dentro de la caja de propiedades y desactivación de los campos Length y Área.

### 3.5.5 NUEVO FORMATO A LA TABLA DE ATRIBUTOS DEL FORMATO DE POLIGONOS.

1. Para darle el tono de color a los diferentes polígonos se da click derecho en el documento > **open Attribute Table** (Figura 25). Una vez dentro de la tabla ir a opciones de tabla donde se elige la opción de **Add Field** (Figura 26). En la caja de diálogo colocar nombre del campo nuevo para nuestro caso se etiquetó como concentraciones, el **Type** debe ser Text, dar en en la opción **ok** (Figura 27).

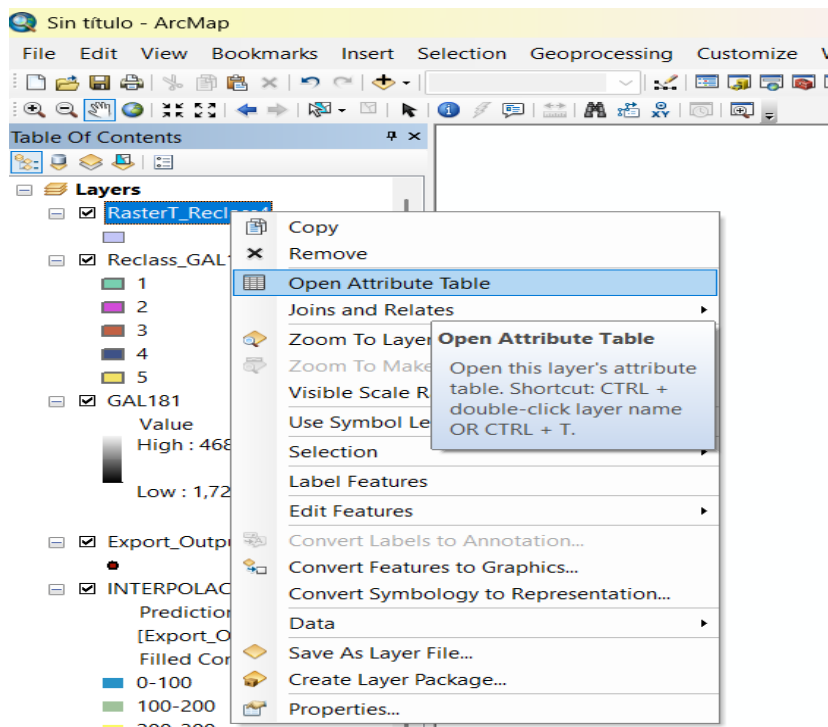


Figura 25. Ubicación de la opción Open Attribute Table.

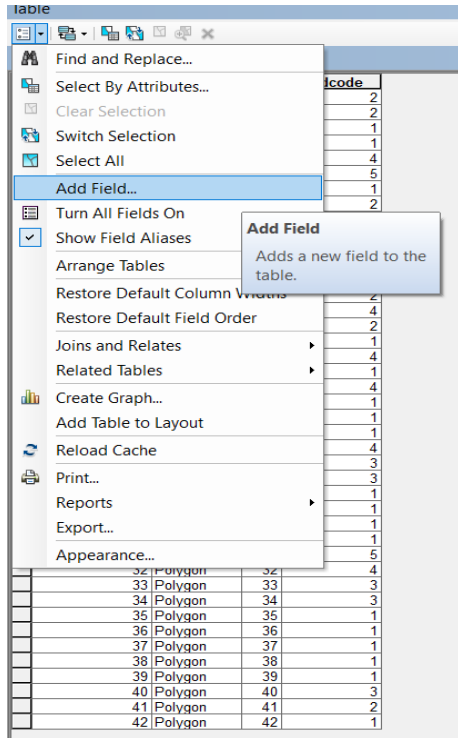


Figura 26. Ubicación y selección de la opción Add Field.

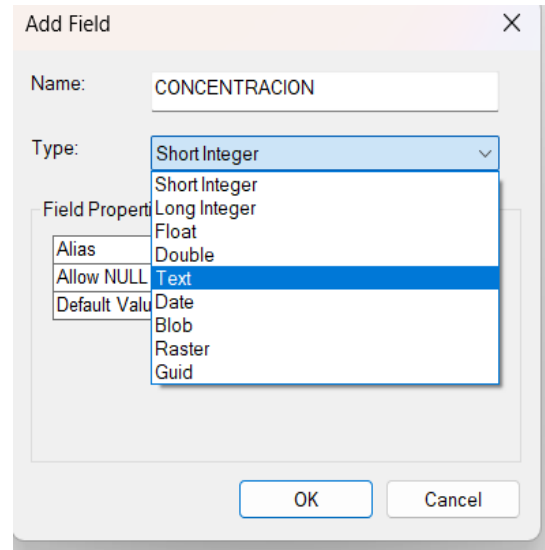


Figura 27. Elección de las propiedades del nuevo campo.

2. Se ordenaron los polígonos debido a que estaban de manera aleatoria por toda la tabla para ello dar click derecho en la opción **gridcode** y seleccionar la opción de **Sort Ascending** para que se ordene de manera ascendente (Figura 28). Ahora seleccionar todos los cuadros que tengan el mismo número por ejemplo el número **1** al seleccionarlos se debe de poner en color azul, y ahora en el título del campo **Concentraciones** dar clic derecho y seleccionar **Field Calculator** (Figura 29).

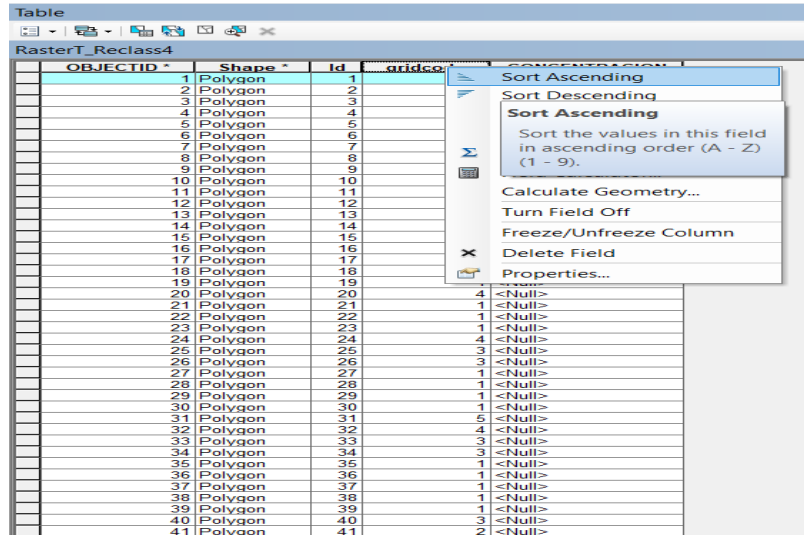


Figura 28. Clasificación ascendente de la columna Gridcode

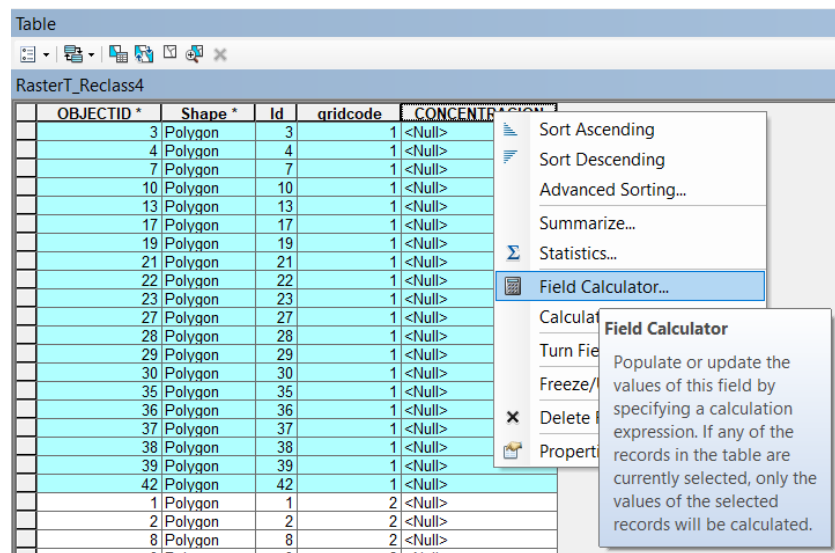


Figura 29. Explicación de la selección de los polígonos clasificados con un Gridcode "1", así como la elección de la herramienta Field Calculator.

3. En la Figura 30, se muestra como se despliega la caja de diálogo de la calculadora de la herramienta **Field Calculator** donde se coloca el valor de “50”, en seguida con los cuadros del número 2 para este caso será el número “100”, y así sucesivamente con todos valores máximos de los rangos con los que se trabajarán.

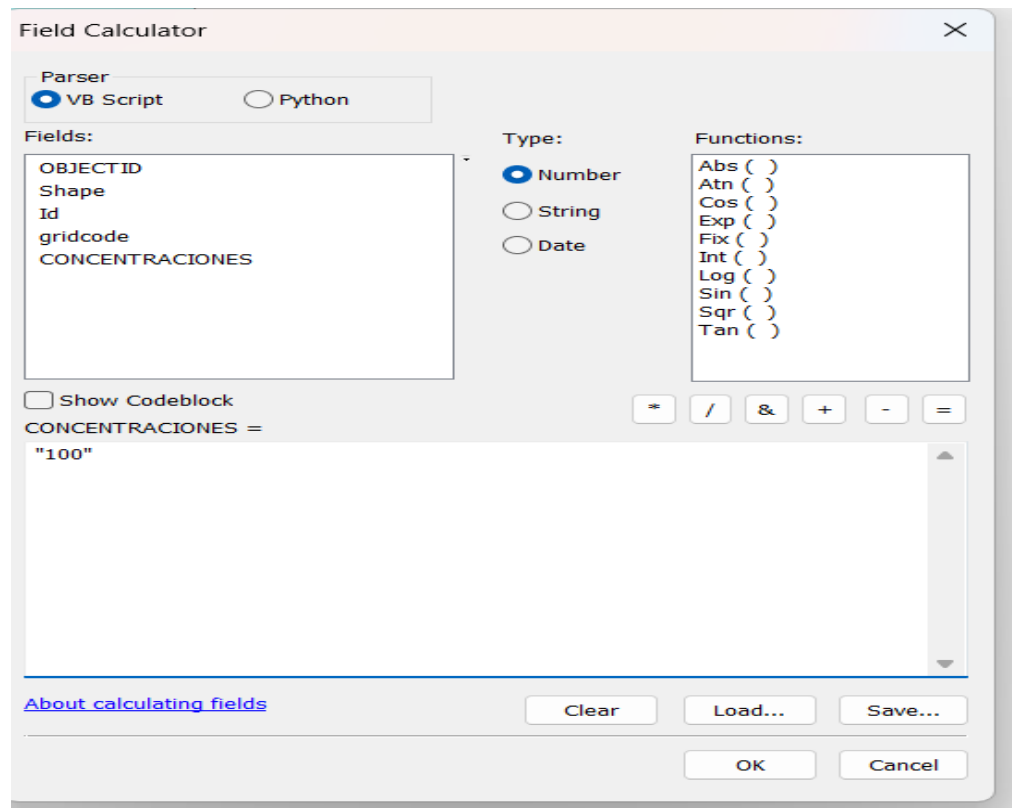


Figura 30. Apertura de la caja de diálogo de la herramienta Field Calculator.

4. Por último dar click derecho en el archivo abrir la caja de propiedades, buscar la opción de **Symbology** oprimir la opción de **categories** ahí mismo se encuentra la pestaña de **Value Field**, se despliegan las opciones y se selecciona el campo que se había añadido en la tabla, es decir para esta muestra sería el campo de **concentraciones**, dar click en **Add All Valores** y se cambia el tono siguiendo la escala de colores, dar **aplicar** y luego **aceptar** (Figura 31). Es así como finalmente se obtiene el mapa final de interpolación (Figura 32).

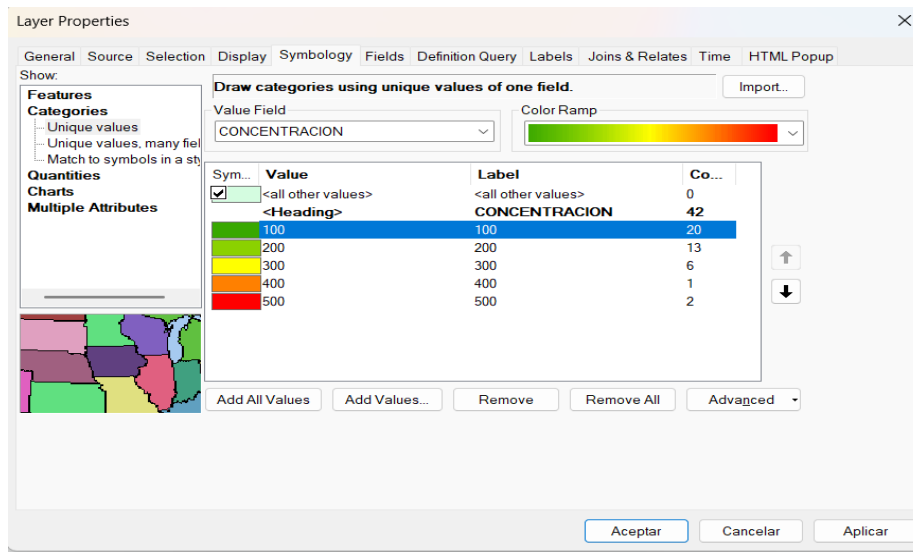


Figura 31. Ubicación de la pestaña symbology, Value Fields dentro de la caja de herramientas, así como la clasificación de colores en la opción color Ramp.

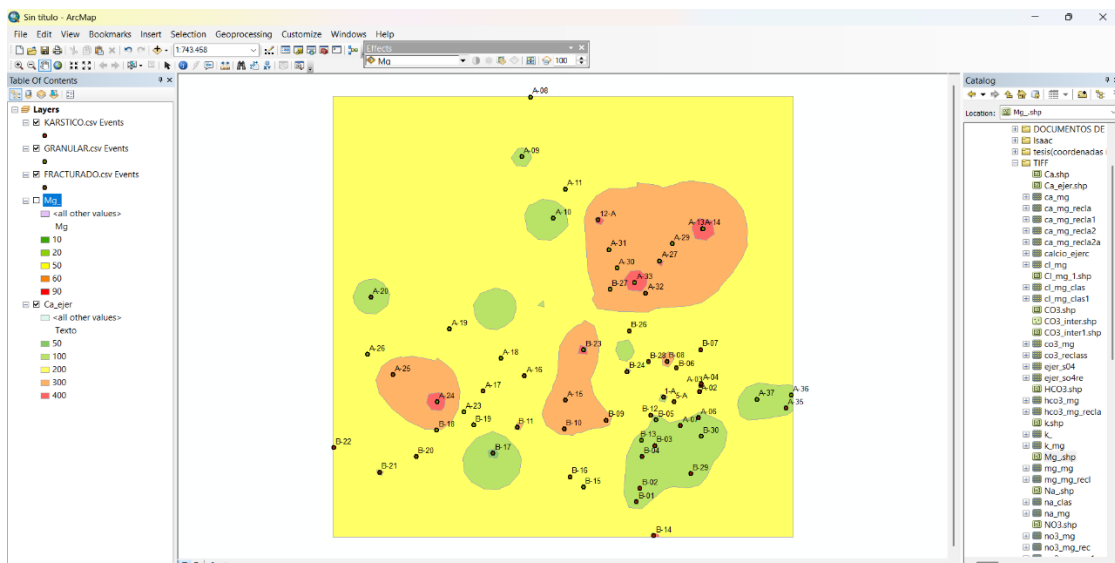


Figura 32. Distribución de la concentración de cationes.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION.

Los sitios de muestreo se encuentran en la región sureste del Estado de Coahuila de Zaragoza, en los cuales se analizaron los datos de **67 pozos de agua subterránea**, distribuidos en los municipios de: **Parras (2)**, **Saltillo (17)**, **Ramos Arizpe (28)**, **General Cepeda (14)** y **Arteaga (6)**, El análisis se realizó con la ayuda de los procesos de interpolación del Arc Map, obteniendo cuatro mapas que muestran las concentraciones de cationes, esto con la finalidad de discutir sus posibles fuentes de presencia en base al material geológico, así mismo complementando con la clasificación de la calidad de agua de la zona de estudio.

### **4.1 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE INTERPOLACION CON LOS VALORES QUIMICOS POR PARAMETRO Y SU POSIBLE ORIGEN.**

#### **4.1.1 CALCIO (Ca).**

El calcio presenta gran variabilidad entre pozos (1.5 – 484.46 mg/L) con una media de 155.66 mg/L, posiblemente por diferencias litológicas (calizas, yesos), mezclas de acuíferos y procesos de disolución. Hay pozos con Ca muy alto, posiblemente asociados a acuíferos carbonatados.

Para consumo humano, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-2021), el calcio no tiene un límite máximo permitido específico, pero valores tan altos contribuyen a dureza extrema del agua y afectación del sabor. Los 10 pozos con las mayores concentraciones se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Pozos con mayores concentraciones de calcio (Ca).

Pozo	Ca mg/L	MUNICIPIO	X	Y	TIPO DE ACUÍFERO
A-14	484.46	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97	Granular
A-24	464.69	General Cepeda	240605	2815892.96	Granular
B-23	399.20	Ramos Arizpe	280294.64	2830358.01	Granular
A-33	392.32	Ramos Arizpe	294146.98	2849069.01	Granular
A-13	391.45	Ramos Arizpe	312484.09	2864126.95	Granular
A-27	390.87	Ramos Arizpe	300900.16	2855140.01	Granular
A-12	363.94	Ramos Arizpe	284181.03	2866579.91	Fracturado
A-31	308.41	Ramos Arizpe	287143.05	2858295.9	Granular
A-32	288.12	Ramos Arizpe	297168.95	2846184.95	Fracturado
A-25	285.71	General Cepeda	228580.09	2823464.91	Fracturado

Las concentraciones altas de calcio se encuentran en: **Pozo A-14 (484.46 mg/L)** – Ramos Arizpe y **Pozo A-24 (464.69 mg/L)** – General Cepeda. Estos dos pozos superan los **450 mg/L**, lo cual es muy alto para agua subterránea y podría indicar interacción fuerte con calizas o yesos (Figura 33).

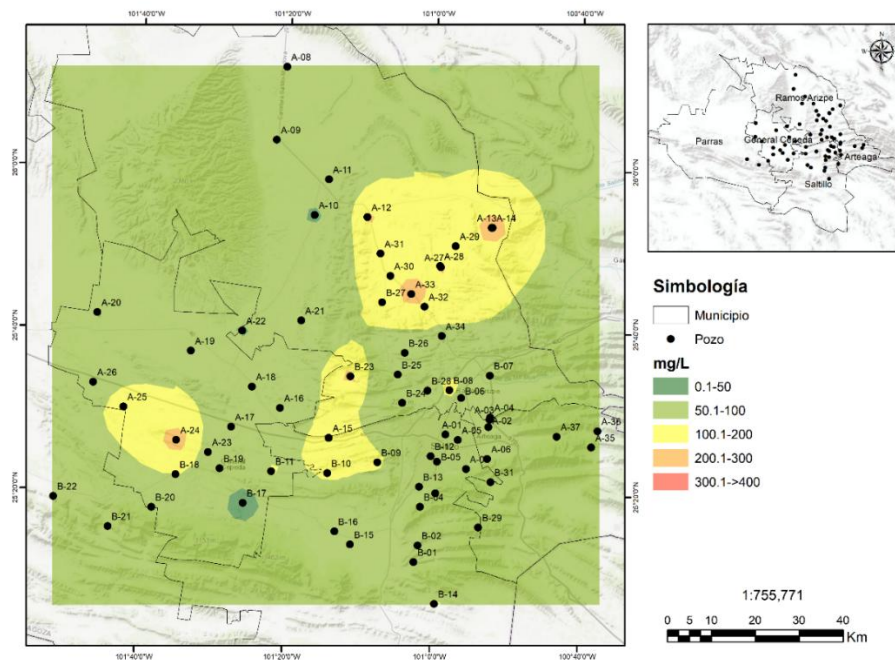


Figura 33. Distribución de la concentración de calcio (mg/L) (Elaboración propia).

#### 4.1.2 MAGNESIO (Mg).

De los pozos se tiene una media de 34.02 mg/L, con rango de 0.33 – 136.69 mg/L. El Mg tiene una dispersión elevada y presencia de pozos ubicados en zonas con rocas ultramáficas, evaporitas, o influencia de aguas más antiguas o concentradas los valores indican aguas duras a muy duras, características de acuíferos confinados profundos, los pozos con altos contenidos de magnesio se muestran el en Cuadro 7.

Cuadro 7. Pozos con mayores concentraciones de Magnesio Mg.

Pozo	Mg mg/L	MUNICIPIO	X	Y	TIPO DE ACUIFERO
B-08	136.69	Ramos Arizpe	302845.82	2827155.47	Fracturado
A-27	100.60	Ramos Arizpe	300900.16	2855140.01	Granular
A-14	84.72	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97	Granular
A-11	83.36	Ramos Arizpe	275409.04	2875161.89	Granular
A-13	71.02	Ramos Arizpe	312484.09	2864126.95	Granular
A-19	69.40	General Cepeda	243964.06	2836201.99	Granular
A-12	69.19	Ramos Arizpe	284181.03	2866579.91	Fracturado
A-09	67.36	Ramos Arizpe	263526.1	2884193.95	Granular
A-32	60.60	Ramos Arizpe	297168.95	2846184.95	Fracturado
B-14	57.90	Satillo	299346.07	2778552.76	Kárstico

Estos dos pozos B-08 (136.69 mg/L) y A-27 (100.60 mg/L) ambos en Ramos Arizpe, presentan concentraciones magnesio muy alto, lo cual sugiere interacción con formaciones ricas en dolomita o procesos de evaporación concentrada. La NOM-127 no establece límite para Mg, para concentraciones mayores a 50 mg/L, pero altas concentraciones de magnesio incrementan fuertemente la dureza del agua, generan problemas en tuberías y calentadores (Figura 34).

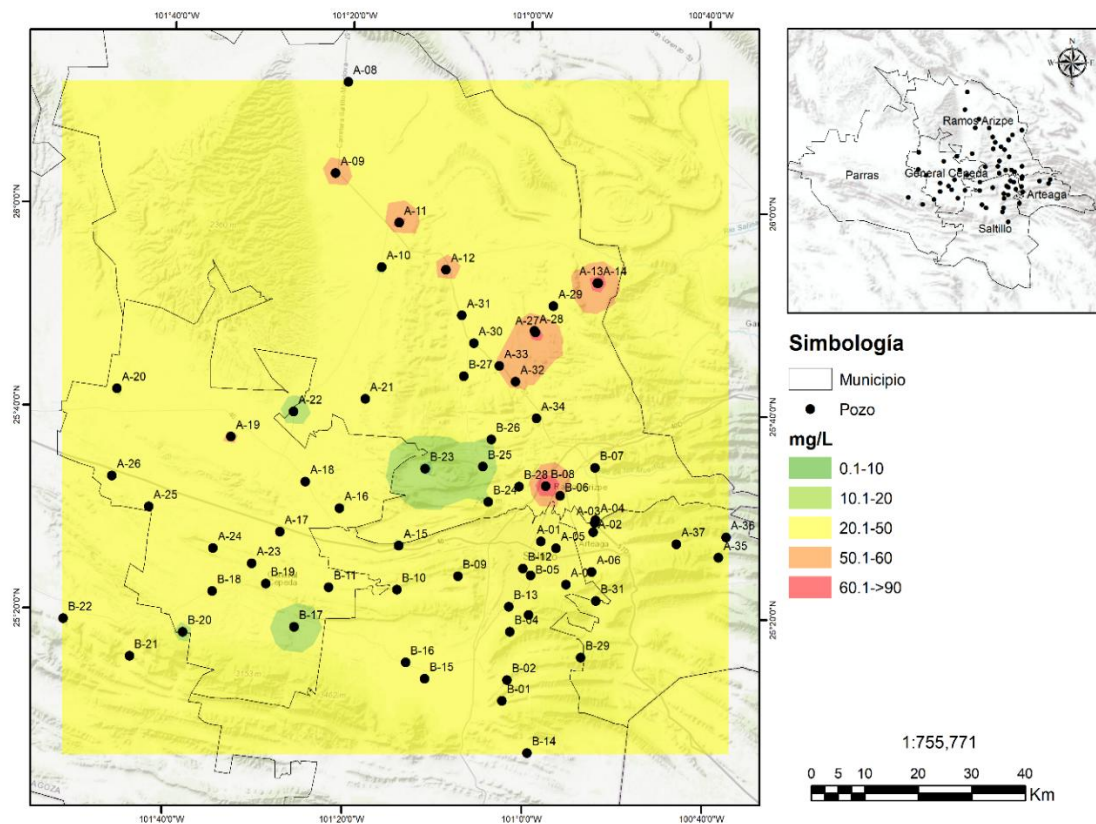


Figura 34. Distribución de la concentración de magnesio (mg/L) (Elaboración propia).

#### 4.1.3 SODIO (Na).

Las concentraciones son 1.12 – 520.01 mg/L con una media 122.51 mg/L. El sodio es el catión con una de las mayores variaciones, lo que indica: zonas con evaporación intensa y escasa recarga, los procesos de intercambio catiónico Na–Ca y aporte de sales sódicas o mezclas con aguas más profundas, los pozos con niveles más altos de sodio se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Pozos con mayores concentraciones de Sodio Na

Pozo	Sodio mg/L	MUNICIPIO	X	Y	TIPO DE ACUIFEO
A-11	520.01	Ramos Arizpe	275409.04	2875161.89	Granular
A-10	468.41	Ramos Arizpe	272144.09	2867058.98	Granular
A-20	465.71	General Cepeda	222641.95	2844999.99	Fracturado
A-14	408.59	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97	Granular
A-13	358.74	Ramos Arizpe	312484.09	2864126.95	Granular
A-27	326.78	Ramos Arizpe	300900.16	2855140.01	Granular
A-12	320.98	Ramos Arizpe	284181.03	2866579.91	Fracturado
B-08	286.84	Ramos Arizpe	302845.82	2827155.47	Fracturado
B-17	271.84	General Cepeda	255753.95	2801530.27	Fracturado
A-18	247.70	General Cepeda	257864.02	2827990.9	Granular

Los pozos con sodio muy elevados son A-11 (520.01 mg/L) y A-10 (468.41 mg/L) ambos en Ramos Arizpe (Figura 35). El agua de los pozos para consumo humano (NOM-127-SSA1-2021), aunque la norma no establece un límite directo para Na en salud, sí indica que concentraciones >200 mg/L afectan fuertemente el sabor. Todos los pozos que superan los 200 mg/L, donde el agua tendría sabor salado y puede generar problemas en personas con dietas restringidas en sodio.

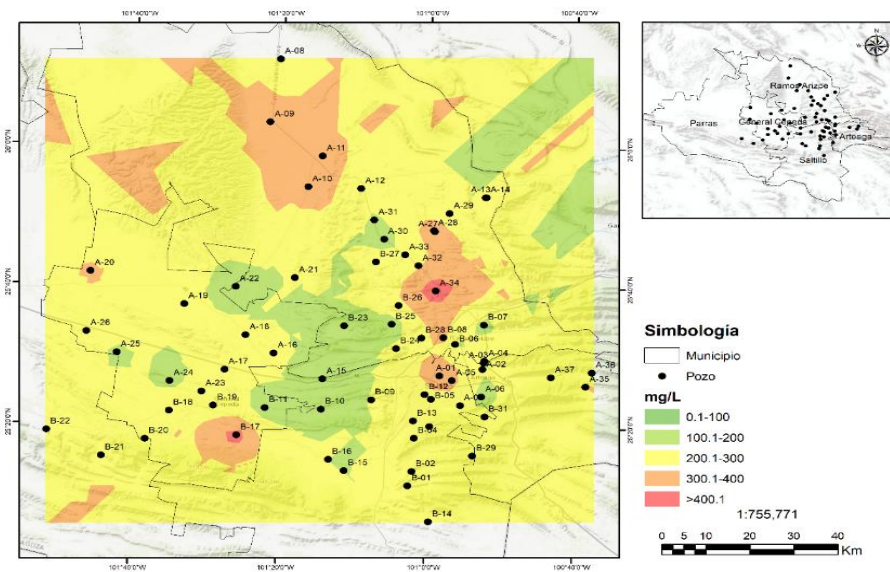


Figura 35. Distribución de la concentración de sodio (mg/L) (Elaboración propia).

#### 4.1.4 POTASIO (K).

Las aguas de pozos tienen una concentración media de 7.46 mg/L, y los datos indican que los valores menores son de 1.14 mg/L. y las mayores concentraciones de 64.98 mg/L, de igual manera los pozos con más contenido de potasio se presentan en Ramos Arizpe.

El potasio en aguas subterráneas profundas normalmente se encuentra entre 1 y 10 mg/L. Aquí, los valores llegan hasta 65 mg/L, lo cual es muy elevado y poco común. Los pozos con valores extremos son: A-14 (64.98 mg/L), A-13 (54.77 mg/L), A-34 (46.38 mg/L) y A-28 (37.87 mg/L), todos se ubican todos en Ramos Arizpe, lo que sugiere un origen geológico compartido (Cuadro 9).

Cuadro 9. Pozos con mayores concentraciones de Potasio K.

Pozo	K_mg/l	MUNICIPIO	X	Y	TIPO DE ACUIFERO
A-14	64.98	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97	Granular
A-13	54.77	Ramos Arizpe	312484.09	2864126.95	Granular
A-34	46.38	Ramos Arizpe	301089.96	2839509.04	N/A
A-28	37.87	Ramos Arizpe	300738.06	2855431.89	Granular
B-06	17.71	Ramos Arizpe	305502.07	2825405.72	Fracturado
A-27	16.15	Ramos Arizpe	300900.16	2855140.01	Granular
A-22	11.71	Ramos Arizpe	255629.06	2840761.96	N/A
A-19	8.21	General Cepeda	243964.06	2836201.99	Granular
B-07	7.87	Ramos Arizpe	312053.34	2830472.79	Kárstico
A-32	7.68	Ramos Arizpe	297168.95	2846184.95	Fracturado

El potasio generalmente es bajo en acuíferos, pero aquí aparecen pozos con K elevado, probablemente por: desintegración de feldespatos/potasa, presencia de fertilizantes en zonas agrícolas, aportes antrópicos (Figura 36).

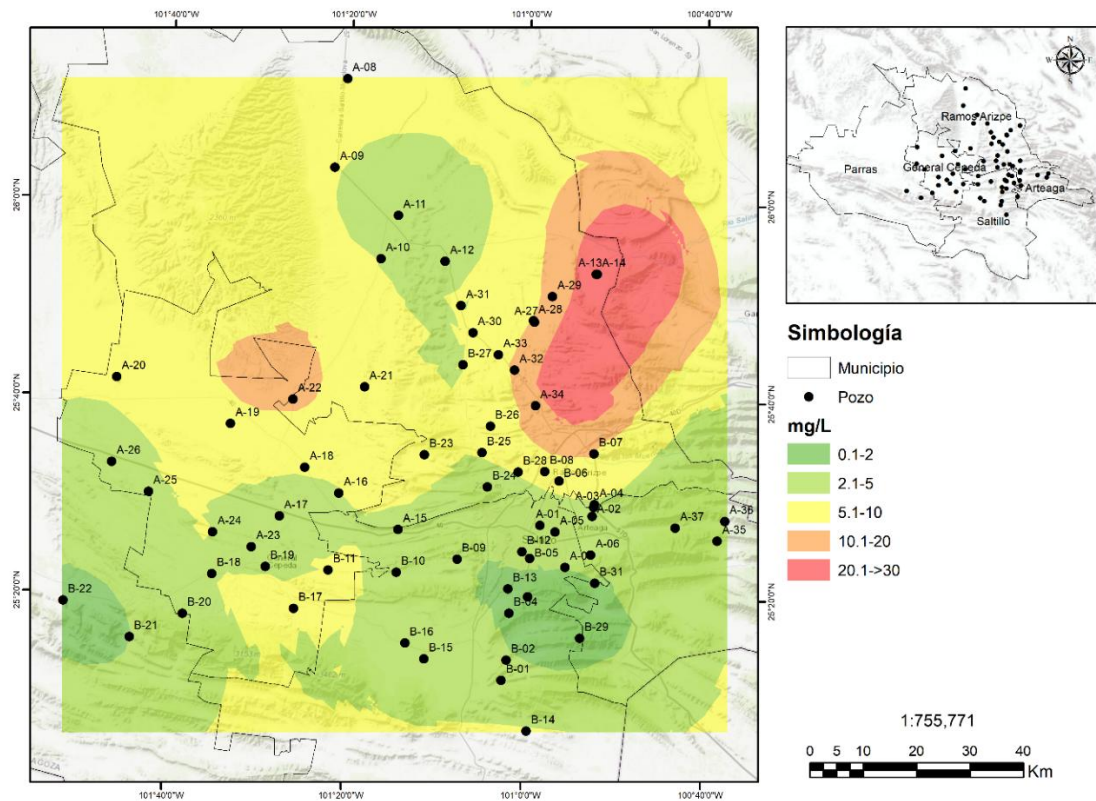


Figura 36. Distribución de la concentración de potasio (mg/L) (Elaboración propia).

## 4.2 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA.

### 4.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUA EN BASE A LA SALINIZACION.

La salinidad del suelo se cuantifica en términos de la concentración total de las sales solubles según lo medido por la Conductividad Eléctrica de la solución expresada en  $\text{dS m}^{-1}$

Generalmente, el parámetro más importante para evaluar calidad de agua para riego es la concentración total de sales, usualmente medida como CE.

En el Cuadro 10 se muestra la clasificación en base a la conductividad eléctrica de los diferentes sitios de muestreo siendo así que los resultados indican que el 0% se encuentra en la clasificación C1 ( $\text{CE} < 250 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), Mientras que el 5.97

% son aguas de salinidad media C2 (CE 250 - 750  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), es decir las aguas de estos pozos pueden usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado y cultivos moderadamente tolerantes a las sales.

Por otro lado, en la clasificación C3 (CE 750 - 2250  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), se tiene el 52.23% son aguas altamente salinas por lo que no se pueden utilizar en suelos cuyo drenaje sea deficiente, además los cultivos deben ser muy tolerantes a las sales.

Por último, el 41.80% son aguas muy altamente salinas C4 (CE >2250  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), por lo tanto, no son apropiadas para el riego bajo condiciones normales, sin embargo, se pueden utilizar ocasionalmente cuando los suelos son permeables y seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

**Cuadro 10. Clasificación de acuerdo con la Conductividad Eléctrica, de las aguas subterráneas de zona sureste de Coahuila.**

Pozo	CE ( $\mu\text{S CM}^{-1}$ )	CLASIFICACION
A-01	1896.875	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-02	1351.5625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-03	1348.4375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-04	1437.5	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-05	1664.0625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-06	845.3125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-07	889.0625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-08	2337.5	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-09	1628.125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-10	3012.5	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-11	4684.375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-12	4873.4375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-13	5298.4375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-14	6189.0625	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-15	2267.1875	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-16	1185.9375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-17	1437.5	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-18	3190.625	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-19	3132.8125	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-20	2934.375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-21	1418.75	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-22	271.875	C2 AGUA DE SALINIDAD MEDIA

A-23	1509.375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-24	3343.75	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-25	3110.9375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-26	1964.0625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-27	5009.375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-28	2779.6875	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-29	2750	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-30	2968.75	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-31	2890.625	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-32	3443.75	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-33	4065.625	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-34	2918.75	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
A-35	1151.5625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-36	900	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
A-37	795.3125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-01	900	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-02	828.125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-03	759.375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-04	656.25	C2 AGUA DE SALINIDAD MEDIA
B-05	1239.0625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-06	2256.25	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-07	1895.3125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-08	7284.375	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-09	2893.75	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-10	3021.875	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-11	4490.625	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-12	1034.375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-13	909.375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-14	2406.25	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-15	1203.125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-16	1162.5	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-17	1718.75	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-18	2156.25	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-19	2207.8125	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-20	884.375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-21	784.375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-22	814.0625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-23	2867.1875	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-24	1089.0625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-25	448.4375	C2 AGUA DE SALINIDAD MEDIA
B-26	1373.4375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA
B-27	2470.3125	C4 AGUA MUY ALTAMENTE SALINA
B-28	1860.9375	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA

B-29	540.625	C2 AGUA DE SALINIDAD MEDIA
B-30	751.5625	C3 AGUA ALTAMENTE SALINA

#### 4.2.2 CLASIFICACION DE LAS AGUAS CON BASE A SU SODICIDAD.

Las elevadas concentraciones de sodio, con respecto a las concentraciones de los iones calcio y magnesio en las soluciones de los suelos, causan un deterioro de las propiedades físicas de los suelos y efectos de toxicidad en los cultivos. Los valores de relación de absorción de sodio se encuentran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Valores de relación de adsorción de sodio, así como la clasificación en base al sodio.

Pozo	RAS	CLASIFICACION
A-01	3.59243066	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-02	0.73782018	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-03	0.63009825	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-04	0.60207173	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-05	0.66244623	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-06	0.35851372	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-07	0.3677103	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-08	4.62747453	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-09	2.05725917	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-10	26.0023124	S4 AGUA CON MUY ALTO CONTENIDO EN SODIO
A-11	8.29546918	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-12	4.04261619	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-13	4.38052834	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-14	4.50346985	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-15	2.02049579	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-16	2.0117355	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-17	2.37427221	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-18	4.07395462	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-19	4.05332013	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-20	17.2603899	S2 AGUA MEDIA EN SODIO
A-21	2.13043809	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-22	0.61934416	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-23	1.90951708	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-24	1.7310853	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-25	2.57100247	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-26	2.69731443	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-27	3.81357359	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-28	3.12116006	S1 AGUA BAJA EN SODIO

A-29	2.88857998	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-30	2.34482682	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-31	1.81933115	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-32	2.09920538	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-33	2.43489695	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-34	3.61034138	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-35	0.75207986	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-36	0.43934109	S1 AGUA BAJA EN SODIO
A-37	1.21218083	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-01	0.45983265	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-02	0.35949159	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-03	0.29557676	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-04	0.27324754	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-05	1.2481023	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-06	2.70810111	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-07	0.64802846	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-08	3.58631983	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-09	2.96800888	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-10	2.14812154	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-11	2.48883879	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-12	0.45972533	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-13	0.41380046	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-14	0.53694283	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-15	0.69826237	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-16	0.46079502	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-17	52.4175233	S4 AGUA CON MUY ALTO CONTENIDO EN SODIO
B-18	1.31159479	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-19	1.63582103	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-20	0.65125382	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-21	0.13685929	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-22	0.10258259	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-23	1.19584	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-24	1.14218263	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-25	0.3243933	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-26	1.78029711	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-27	1.77645067	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-28	2.08558476	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-29	0.03488007	S1 AGUA BAJA EN SODIO
B-30	0.56574958	S1 AGUA BAJA EN SODIO

---

De acuerdo con las normas del laboratorio de Riverside se determinó la calidad de agua de riego, obteniendo como resultado 6 tipos de clases de agua, en el Cuadro 12 se distribuyen los pozos, de acuerdo con su conductividad eléctrica y al cálculo de relación de adsorción de sodio.

Cuadro 12. Clasificación de los tipos de agua en base a su peligro de salinidad y sodicidad en la zona sureste de Coahuila de Zaragoza México.

Pozo	CLASIFICACION DE RIVERSIDE
A-01	C3-S1
A-02	C3-S1
A-03	C3-S1
A-04	C3-S1
A-05	C3-S1
A-06	C3-S1
A-07	C3-S1
A-08	C4-S1
A-09	C3-S1
A-10	C4-S4
A-11	C4-S1
A-12	C4-S1
A-13	C4-S1
A-14	C4-S1
A-15	C4-S1
A-16	C3-S1
A-17	C3-S1
A-18	C4-S1
A-19	C4-S1
A-20	C4-S2
A-21	C3-S1
A-22	C2-S1
A-23	C3-S1
A-24	C4-S1
A-25	C4-S1
A-26	C3-S1
A-27	C4-S1
A-28	C4-S1
A-29	C4-S1
A-30	C4-S1

A-31	C4-S1
A-32	C4-S1
A-33	C4-S1
A-34	C4-S1
A-35	C3-S1
A-36	C3-S1
A-37	C3-S1
B-01	C3-S1
B-02	C3-S1
B-03	C3-S1
B-04	C2-S1
B-05	C3-S1
B-06	C4-S1
B-07	C3-S1
B-08	C4-S1
B-09	C4-S1
B-10	C4-S1
B-11	C4-S1
B-12	C3-S1
B-13	C3-S1
B-14	C4-S1
B-15	C3-S1
B-16	C3-S1
B-17	C3-S4
B-18	C3-S1
B-19	C3-S1
B-20	C3-S1
B-21	C3-S1
B-22	C3-S1
B-23	C4-S1
B-24	C3-S1
B-25	C2-S1
B-26	C3-S1
B-27	C4-S1
B-28	C3-S1
B-29	C2-S1
B-30	C3-S1

---

El Cuadro 13, muestra que en la clase C2-S1 se encuentran 4 pozos, con un porcentaje del 5.97%. Esta clasificación sugiere que el agua es de buena calidad para riego en la mayoría de los suelos por tener una conductividad eléctrica (CE)

moderada, pero podría tener problemas con cultivos sensibles a la salinidad en suelos de baja permeabilidad. Es decir que el sodio no debería ser un problema significativo para la estructura del suelo en la mayoría de los casos. Sin embargo, en suelos de baja permeabilidad, puede haber un peligro de sodicidad en la superficie.

El mayor número de pozos está en la clase C3-S1 con un porcentaje del 50.74%. Esto es un agua de alta salinidad y con un bajo peligro de sodio. Lo que significa que el agua es alta en sales, pero tiene un bajo potencial para dañar la estructura del suelo debido a su bajo contenido de sodio. Por lo tanto, el agua solo es adecuada para el riego de cultivos que son muy tolerantes a la salinidad, especialmente en suelos con muy buen drenaje.

Solo el pozo B-17 ubicado en General Cepeda se encuentra en la clase C3-S4 se refiere a un agua altamente salina y con un alto peligro en sodio, la clasificación menciona que este tipo de agua no es recomendable para el riego, especialmente en suelos con drenaje deficiente, ya que el alto sodio puede dañar el suelo y las plantas. Se clasifica como un agua con alto peligro de salinidad y sodio, lo que requiere precauciones especiales o alternativas para el riego.

Para el caso de la agricultura, el pozo B-17 no es recomendable para el riego en la mayoría de los cultivos. Por lo que, si no se toman medidas con el manejo del agua de este sitio, puede afectar en la degradación del suelo y la reducción de la productividad agrícola.

Por otro lado, el 38.8% de los pozos se encuentran en la clase C4-S1, lo cual indica un agua muy altamente salina, pero con bajo peligro en sodio, por lo tanto, en la agricultura puede ser usada con precaución en suelos muy permeables y con buen drenaje, ya que el riesgo de que se acumule sodio en el suelo es bajo.

El pozo A-20 tiene un agua tipo C4- S2, es decir que tiene una alta salinidad, y a su vez un contenido medio de sodio. En el sector agronómico este tipo de agua debe usarse con precaución, preferentemente en suelos con buena

permeabilidad, pero también teniendo en cuenta que se deben realizar riegos de lavado frecuentemente, para prevenir la acumulación de sales en la zona de las raíces.

Finalmente, el pozo A-10 presenta una clasificación C4-S4, lo que indica un agua con salinidad extremadamente alta y una concentración de sodio muy elevada. En el ámbito agrícola, este tipo de agua no es adecuada para el riego bajo condiciones normales, debido a sus altos niveles de sales y sodio. Su utilización solo es posible de manera ocasional y bajo condiciones muy específicas, como suelos con alta permeabilidad, sistemas de drenaje eficientes y un manejo técnico especializado, además de la elección de cultivos con elevada tolerancia a la salinidad.

Cuadro 13. Distribución de los 6 tipos de agua en zona sureste de Coahuila de Zaragoza México.

	C2-S1	C3-S1	C3-S4	C4-S1	C4-S2	C4-S4
NUMERO DE MUESTRAS	4	34	1	26	1	1
%	5.97	50.74	1.5	38.8	1.5	1.5

### **4.3 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL.**

#### **4.3.1 CLASIFICACION DE CALIDAD DE AGUA EN BASE A SU DUREZA PARA USO INDUSTRIAL.**

Los pozos A-10, A-22, B-17 y B-25 pueden emplearse en actividades industriales sin necesidad de un tratamiento previo de ablandamiento. En contraste, el 94 % del agua presenta elevados niveles de dureza, por lo que su uso sin un proceso de ablandamiento puede generar la formación de incrustaciones minerales (sarro) que obstruyen tuberías, calderas y torres de enfriamiento, por lo que disminuyen la eficiencia operativa, incrementan el consumo de energía y ocasionan fallas, así como altos costos de mantenimiento (Cuadro 14).

Cuadro 14. Clasificación de las aguas en base a la dureza en la zona del sureste de Coahuila de Zaragoza México.

Pozo	DUREZA	CLASIFICACION
A-01	358.4247	AGUA MUY DURA
A-02	462.1576796	AGUA MUY DURA
A-03	438.4629454	AGUA MUY DURA
A-04	449.0198308	AGUA MUY DURA
A-05	570.2401578	AGUA MUY DURA
A-06	279.1248066	AGUA MUY DURA
A-07	275.5306422	AGUA MUY DURA
A-08	444.644714	AGUA MUY DURA
A-09	433.0080744	AGUA MUY DURA
A-10	61.77295536	AGUA MODERADAMENTE DURA
A-11	748.0167495	AGUA MUY DURA
A-12	1197.68122	AGUA MUY DURA
A-13	1274.047298	AGUA MUY DURA
A-14	1563.586856	AGUA MUY DURA
A-15	731.2092243	AGUA MUY DURA
A-16	253.7019853	AGUA MUY DURA
A-17	322.5999821	AGUA MUY DURA
A-18	702.3372258	AGUA MUY DURA
A-19	698.9830219	AGUA MUY DURA
A-20	138.459802	AGUA DURA
A-21	297.4608325	AGUA MUY DURA
A-22	71.0333073	AGUA MODERADAMENTE DURA
A-23	372.7142666	AGUA MUY DURA
A-24	1285.615057	AGUA MUY DURA
A-25	873.5401088	AGUA MUY DURA
A-26	442.3560796	AGUA MUY DURA
A-27	1395.649324	AGUA MUY DURA
A-28	535.4242397	AGUA MUY DURA
A-29	672.2138976	AGUA MUY DURA
A-30	802.0875739	AGUA MUY DURA
A-31	897.0802747	AGUA MUY DURA
A-32	972.3915076	AGUA MUY DURA
A-33	1213.668902	AGUA MUY DURA
A-34	491.415607	AGUA MUY DURA
A-35	337.2397664	AGUA MUY DURA
A-36	258.5091633	AGUA MUY DURA
A-37	199.5689104	AGUA MUY DURA
B-01	257.102092	AGUA MUY DURA
B-02	239.6633431	AGUA MUY DURA

B-03	225.8965405	AGUA MUY DURA
B-04	201.0121993	AGUA MUY DURA
B-05	299.8869393	AGUA MUY DURA
B-06	495.5749796	AGUA MUY DURA
B-07	651.2367713	AGUA MUY DURA
B-08	1217.747314	AGUA MUY DURA
B-09	724.5590459	AGUA MUY DURA
B-10	669.1172884	AGUA MUY DURA
B-11	697.0887029	AGUA MUY DURA
B-12	315.0398771	AGUA MUY DURA
B-13	269.3454013	AGUA MUY DURA
B-14	843.0333286	AGUA MUY DURA
B-15	357.8272651	AGUA MUY DURA
B-16	335.859159	AGUA MUY DURA
B-17	5.1108137	AGUA BLANDA
B-18	639.5229184	AGUA MUY DURA
B-19	576.008568	AGUA MUY DURA
B-20	252.688504	AGUA MUY DURA
B-21	267.6293405	AGUA MUY DURA
B-22	273.9546229	AGUA MUY DURA
B-23	999.442305	AGUA MUY DURA
B-24	257.625396	AGUA MUY DURA
B-25	118.7783569	AGUA MODERADAMENTE DURA
B-26	320.372172	AGUA MUY DURA
B-27	660.1401996	AGUA MUY DURA
B-28	460.0623583	AGUA MUY DURA
B-29	197.6552473	AGUA MUY DURA
B-30	204.6782257	AGUA MUY DURA

#### **4.4 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO Y USO HUMANO.**

##### **4.4.1 CLASIFICACION DE CALIDAD DE AGUA BASE A CALCIO Y MAGNESIO PARA USO Y CONSUMO HUMANO.**

Los resultados del Cuadro 15 indican que únicamente los pozos A-20, A-22, A-37, B-17, B-25 y B-29 son aptos para uso doméstico, ya que sus concentraciones no superan los 200 mg/L. Exceder este límite puede ocasionar incrustaciones en sistemas de agua caliente, hervidores, planchas eléctricas y otros electrodomésticos. En consecuencia, el agua proveniente de estos pozos es la

más adecuada para el uso doméstico; no obstante, solo representa el 8.95 % de los pozos de la zona de estudio.

33 pozos, que representan el 49.25 % del total, se mantienen dentro de los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, al no exceder los 500 mg/L. Esto significa que el agua puede considerarse apta para el consumo humano, aunque con ciertas limitaciones para personas que siguen dietas especiales.

Por otro lado, el 41.80 % corresponde a pozos con niveles de dureza extremadamente altos, por lo que no se recomienda su uso para consumo humano ni para actividades domésticas. La presencia de incrustaciones en las resistencias eléctricas reduce la eficiencia de los electrodomésticos y acorta su vida útil. Además, el agua dura genera menor formación de espuma con jabones y detergentes, lo que provoca la aparición de manchas en lavabos, fregaderos, bañeras e inodoros. No obstante, dado que existe una alta demanda del recurso, su utilización requeriría la aplicación de procesos de ablandamiento del agua.

Cuadro 15. Clasificación de uso y consumo humano en la zona sureste de Coahuila de Zaragoza México.

Pozo	DUREZA	CLASIFICACION EN BASE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021
A-01	358.4247	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-02	462.1576796	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-03	438.4629454	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-04	449.0198308	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-05	570.2401578	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-06	279.1248066	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-07	275.5306422	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-08	444.644714	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-09	433.0080744	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-10	61.77295536	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-11	748.0167495	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-12	1197.68122	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-13	1274.047298	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-14	1563.586856	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-15	731.2092243	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO

A-16	253.7019853	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-17	322.5999821	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-18	702.3372258	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-19	698.9830219	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-20	138.459802	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-21	297.4608325	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-22	71.0333073	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-23	372.7142666	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-24	1285.615057	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-25	873.5401088	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-26	442.3560796	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-27	1395.649324	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-28	535.4242397	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-29	672.2138976	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-30	802.0875739	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-31	897.0802747	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-32	972.3915076	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-33	1213.668902	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
A-34	491.415607	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-35	337.2397664	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-36	258.5091633	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
A-37	199.5689104	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-01	257.102092	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-02	239.6633431	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-03	225.8965405	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-04	201.0121993	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-05	299.8869393	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-06	495.5749796	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-07	651.2367713	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-08	1217.747314	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-09	724.5590459	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-10	669.1172884	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-11	697.0887029	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-12	315.0398771	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-13	269.3454013	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-14	843.0333286	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-15	357.8272651	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-16	335.859159	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-17	5.1108137	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-18	639.5229184	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-19	576.008568	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-20	252.688504	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-21	267.6293405	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO

B-22	273.9546229	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-23	999.442305	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-24	257.625396	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-25	118.7783569	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-26	320.372172	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-27	660.1401996	AGUA NO APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-28	460.0623583	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO
B-29	197.6552473	AGUA APTA PARA USO DOMESTICO Y CONSUMO HUMANO
B-30	204.6782257	AGUA APTA PARA CONSUMO HUMANO

---

## V. CONCLUSIONES

El tipo de acuífero si afecta en las elevadas concentraciones, ya que en los cuadros 6,7,8 y 9, donde se muestran los 10 pozos con las concentraciones más altas de cada catión, se observó una clara predominancia del acuífero granular. Esto probablemente se deba a una mayor interacción entre el agua y la roca, pues al tratarse de materiales porosos, proporcionan una superficie de contacto más amplia que facilita la disolución de minerales en el agua.

La calidad de agua de los pozos A-22, B-04, B-25, B-29 presentaron una excelente clasificación, es decir, la fuente hídrica de estos pozos es la mejor y se recomienda para uso agrícola, lamentablemente solo representa el 6% de los pozos analizados.

El 90% de los pozos analizados en la zona de estudio presenta una agua con alta peligrosidad salina, pero con una baja peligrosidad sódica, manteniéndose en las clases C3-S1, C4-S1, es inevitable utilizar esta agua, afortunadamente la calidad de esta es aceptable para uso agrícola, siempre y cuando los suelos sean permeables, así como un excelente sistema de drenaje, es muy importante que se tengan las precauciones de lavados frecuentes, así como la selección de cultivos tolerantes a la salinidad.

Por otro lado, los pozos A-10, A-20 y B-17 tienen una clasificación de agua de pésima calidad debido a sus altos contenidos de salinidad y sodio, por lo que el agua de estos pozos no es nada recomendable para uso agrícola.

Para el sector industrial, la calidad del agua en el área de estudio se considera deficiente, principalmente por sus elevados niveles de dureza. Esta condición puede generar incrustaciones en tuberías y calderas, lo que, si no se aplican las medidas preventivas adecuadas, puede ocasionar daños en los equipos. No obstante, debido a la alta demanda de agua en las zonas industriales, es

necesario hacer uso de este recurso hídrico, por lo que se recomienda implementar procesos de ablandamiento del agua.

El 90 % de los pozos presentan una calidad de agua deficiente para uso doméstico y, aunque 32 de los pozos pueden destinarse al consumo humano, es indispensable aplicar procesos de ablandamiento y potabilización del recurso hídrico. Solo el 9 % puede utilizarse sin restricciones, debido a sus bajas concentraciones de sales y otros compuestos.

Los análisis indican que al menos 7 pozos, de los 67 analizados, cuentan con una calidad excelente para usos industriales, agrícolas y doméstico, por ello, el 90 % restante debe emplearse considerando limitaciones y condiciones específicas de uso.

## VI. BIBLIOGRAFIA.

- BAEZA, E. G. (2024). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Obtenido de La dureza del agua: efectos, directrices de la Organización Mundial de la salud (OMS) y regulaciones en otros países. En línea en: [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36257/1/Informe\\_Aguas\\_Duras\\_\\_F\\_.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36257/1/Informe_Aguas_Duras__F_.pdf). Consultado en 2025.
- CARBOTECNIA. (de 2023). Agua para procesos industriales. En línea en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/agua-para-procesos-industriales/>. Consultado en 2025.
- CASTELLANOS, J. (2000). Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. Guanajuato México: Segunda edición. Intagri, S.C. 221 p.
- CONAGUA. (2013). Aguas subterráneas. En línea en: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/LibreAlumbramiento.html>. Consultado en agosto 2025.
- CONAGUA. (2019). Clasificación de usos del agua: En línea en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>. Consultado en octubre de 2025.
- CUPISUMA, S, Y. (2021). AGUA DURA: En línea en: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-agraria-de-la-selva/ingenieria-de-alimento/agua-dura-fisica-es-bueno-para-consumir/63783243>. Consultado en agosto 2025.
- DESKTOP. (2021). ArcMap. ¿Qué es kriging?. En línea en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.html>. Consultado en agosto de 2025.

- RUIZ, F. J. J. (2025). Atlas de los Municipios de la Región Sureste del Estado de Coahuila de Zaragoza. Consejo para la planeación estratégica de largo plazo de la Región Sureste del Estado de Coahuila., 132, p.
- FERNANDEZ, R. R. (2020). Parque Nacional de Las Tablas Daimiel. Guía geológica. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Organismo autónomo de parques nacionales. 214, P.
- FERTIC. (2025). Conductividad eléctrica en agricultura. Importancia y aplicaciones. En línea en: <https://www.fertic.com/contenidos/control-fertirrigacion/articulos/conductividad-electrica-en-agricultura-importancia-y-aplicaciones/>. Consultado en septiembre de 2025.
- GARCIA, D. Y. B. (2015). Índices de salinidad del agua de la red hidrográfica del estado de Morelos, México. Tesis, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Hidrociencias, 144 p.
- GONZALES, R. V. I. (2023). Caracterización fisicoquímica de suelo y agua para evaluar la salinidad en el acuífero La Misión, Baja California, México. Tesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, 151 p.
- HELIODORO, M. M. (2012). Hidrogeología e hidrogeoquímica del acuífero transfronterizo Prieta, Sonora. Tesis Universidad de Sonora, Facultad Interdisciplinaria de Ciencias Exactas y Naturales, 282 p.
- IMTA. (2022). Aguas subterráneas, hacer visible lo invisible. En línea en: <https://www.gob.mx/imta/articulos/dia-mundial-del-agua-2022>. Consultado en octubre 2025.
- JUAREZ, C. E. O. (2021). Calidad agrícola de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del Oriental y el Valle de Tehuacán - Zapotitlán,

Estado de Puebla. Tesis Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Hidrociencias, 241 p.

KALHOR, K., GHASEMIZADEH, R., RAJIC, L., & ALSHAWABKEH, A. (2019). Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas y remediación en acuíferos kársticos: una revisión. En línea en: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X18301632?\\_cf\\_chl\\_tk=46TTqfNZVkJWh06XZB0MhVLgB1q017yaaasgLL3ef\\_nQ-1770802958-1.0.1.1](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X18301632?_cf_chl_tk=46TTqfNZVkJWh06XZB0MhVLgB1q017yaaasgLL3ef_nQ-1770802958-1.0.1.1). Consultado en agosto de 2025.

LANDERO. G, S. A. (2019). Evaluación de la calidad del agua de La Laguna la Pólvara en Villahermosa Tabasco. Tesis, Instituto Tecnológico de Villahermosa, División de estudios de posgrado e investigación, 99 p.

LENNTECH. (2025). Peligro del sodio en el agua de irrigación. En línea en: <https://www.lenntech.es/aplicaciones/riego/sar/riesgo-sodio-en-regadios.htm>. Consultado en octubre de 2025.

LOMELI, M, J, M. (2009). Calidad de las aguas del rio Lerma en Relación con el riego agrícola. Tesis, Colegio de postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Hidrociencias, 77 p.

LOPEZ, S. (2025). PLANTAE. Agua de riego agrícola-Parámetros a tener en cuenta-Acumulación de sales. En línea en: <https://plantae.garden/agua-de-riego-agricola/#>. Consultado en noviembre de 2025.

MEZA, M. M. (2020). Evaluación de la calidad del agua potable en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. Tesis, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Centro de investigación en Genética y Ambiente, 93 p.

MKILIMA, TIMOTH. (2023). Salinidad de las aguas subterráneas e idoneidad para el riego en zonas costeras bajas. Un caso de dar es Salaam, Tanzania. En línea en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589471423000177>.

Consultado en noviembre de 2025.

MORAN, R. J. (2012). Conexiones hidráulicas de cuencas hidrogeológicas en la sierra Madre Oriental aplicando modelos hidrogeoquímicos. Tesis, Instituto potosino de investigación científica y tecnológica, A. C. posgrado en ciencias aplicadas.

NARANJO, A. J. B. (2025). Diagnóstico socio- espacial de la región sureste del estado de Coahuila. Consejo para la Planeación Estratégica de Largo Plazo de la región sureste del Estado de Coahuila., 60 p.

NEIRA, G. M. A. (2006). Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial impactos y medidas de mitigación. Memoria, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil, 95 P.

DOF. (2020). NORMA Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-2020. Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua. Obtenido de [https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/8366/salud13\\_C/salud13\\_C.html](https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/8366/salud13_C/salud13_C.html) Consultado en noviembre de 2025.

PADILLA, R. D. A. (2014). Procesos hidrogeoquímicos que dan origen a la salinidad en el sistema acuífero de Tierra Nueva, San Luis Potosí. Tesis, Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada, Baja California, 135 p.

PINO, C. S. P. (2018). Generación de un visor ambiental gis web mediante ArcGIS online free para el campus sur ups. Tesis, Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. 87 p.

- PROAIN, T. A. (2020). Clasificación del agua por su dureza. En línea en: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/clasificacion-del-agua-por-su-dureza?srsltid=AfmBOopesV3tcFHqJfidhFUbjGmW2J2sTCfRWFPZXFxlEo3rbpQTkx4>. Consultado en octubre 2025.
- REYES, M. R. (2005). Conferencia de Gobernadores Fronterizos México-Estados Unidos Mesa del Agua. El agua en Coahuila. En línea en: <https://es.scribd.com/presentation/131085829/Coahuila-Situacion-Del-Agua-en-Coahuila-Para-El-paso>. Consultado en noviembre de 2025.
- RODRIGUEZ, S. A. (2010). La dureza del agua. Universidad Tecnología Nacional. Monografía. Facultad regional de Bahía Blanca. 32 p.
- RUIZ, F. J. J. (2025). Consejo para la planeación estratégica de largo plazo de la región sureste del Estado de Coahuila. Plan estratégico 2040 de la región sureste del Estado de Coahuila, 233 p.
- SAJB. (2025). Spokane Aquifer Joint Board. Tipos de acuíferos. En línea en: <https://www.spokaneaquifer.org/the-aquifer/what-is-an-aquifer/types-of-aquifers/>. Consultado en noviembre 2025.
- SALINAS, A. S. (2021). Club ensayos. Análisis de la dureza del agua. En línea en: <https://www.clubensayos.com/Ciencia/Analisis-de-la-dureza-del-agua/5364078.html>. Consultado en octubre 2025.
- SECCOAHUILA. (2025). Perfil sureste de Coahuila. Secretaria de economía del estado de Coahuila, 39 P.
- SELA, G. (2025). Calidad del agua de riego. En línea en: <https://cropaia.com/es/blog/calidad-agua-de-riego/>. Consultado en octubre 2025.
- TORO, A. D. M. (2022). Determinación de parámetros clave para la exploración de agua subterránea en rocas fracturadas. Universidad de Chile, Memoria,

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología,  
164, p.

VALDIVIELSO, A. (2025). IAGUA. ¿Qué es un acuífero?. En línea en:  
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-acuifero>. Recuperado en  
noviembre de 2025.

VALVERDE, R. V. (2017). SILO.TIPS. Obtenido de DUREZA DEL AGUA  $\text{Ca OH} + \text{CO}_2 \text{CaCO}_3 + \text{H}_2 \text{O}$ : <https://silo.tips/download/ca-oh-co-2-caco-3-h-2-o>. Consultado en agosto de 2025.

VILLAGRAN, L. R. (2018). Comparación de los métodos analíticos para determinación de dureza total en agua potable; por titulación complejométrica indicado en NMX-AA-072-SCFI-2001 y un kit para determinación rápido de dureza (marca hach). Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, 82 p.

WHITE, W. B. (2019). Chapter 64 - Hydrogeology of Karst aquifers. En línea en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780128141243000649>. Consultado octubre de 2025.