



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Caracterización hidrogeoquímica de la interacción agua
superficial/subterránea, para evaluar la contaminación difusa en la región
centro-occidente de la Huasteca Potosina

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Carolina Rocha Vázquez

Director:

Dr. Antonio Cardona Benavides



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. Antecedentes, justificación y objetivos.....	16
1.1. Antecedentes.....	16
1.1.1 Estudios previos en la Huasteca Potosina.....	18
1.2. Justificación	21
1.3. Objetivo general	22
1.4. Objetivos específicos	22
2. Marco teórico y estado del arte	23
2.1. Medios Kársticos	23
2.2. Agricultura de la caña de azúcar	23
2.2.1. Ingenios Azucareros.....	24
2.2.2. Variedades de caña de azúcar.....	26
2.2.3. Variedades en México.....	27
2.2.4. Etapas del ciclo de vida de la caña	28
2.2.5. Fertilización	31
2.2.6. Calendario de actividades de campo.....	35
2.3. Sitio Ramsar	37
3. Capítulo 3. Descripción de la zona de estudio.....	39
3.1. Localización del área de estudio	39
3.2. Vegetación	40
3.3. Clima.....	41
3.4. Hidrografía	42

3.5.	Fisiografía.....	43
3.6.	Geología	44
3.7.	Hidrogeología	58
3.8.	Actividades Económicas.....	58
4.	Materiales y Métodos de Investigación.....	59
4.1.	Recopilación de Información	59
4.2.	Campaña de muestreo	59
4.3.	Trabajo de laboratorio	64
4.4.	Trabajo de gabinete	65
4.4.1.	Digitalización Geológica	65
4.4.2.	Análisis de trabajo de campo	66
4.4.3.	Índice de Calidad del Agua (ICA)	66
5.	Resultados de la interpretación Hidrogeoquímica.....	69
5.1.	Parámetros de campo.....	71
5.2.	Balance de electroneutralidad y validación de los resultados del laboratorio 72	
5.3.	Análisis Estadístico	74
5.3.1.	Elementos mayores.....	74
5.3.2.	Elementos menores.....	77
5.3.3.	Elementos traza	78
5.3.4.	Determinación de las Familias de Agua.....	80
5.3.5.	Determinación de la Calidad	85
5.4.	ÍNDICE DE CALIDAD	99
6.	Evaluación de Indicadores de Contaminación Difusa.....	101

6.1. Nitrógeno	104
6.2. Fósforo.....	106
6.3. Potasio	108
6.4. Zinc.....	110
6.5. Cloro	112
6.6. Cobre	114
6.7. Hierro.....	116
6.8. Manganeso	118
6.9. Metales Pesados	120
7. Discusión de Resultados	122
7.1. Familias de Agua.....	122
7.2. Calidad del Agua	122
7.3. Contaminación Difusa.....	125
Conclusiones.....	135
Referencias.....	136

Índice de figuras

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE REGIONES KÁRSTICAS DEL MUNDO.....	14
FIGURA 2. MAPA DE ZONAS KÁRSTICAS EN MÉXICO.....	14
FIGURA 3. ZONIFICACIÓN PRODUCTIVA DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR DENTRO DE HUASTECA POTOSINA.....	26
FIGURA 4. ETAPAS FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	29
FIGURA 5. CICLO FENOLÓGICO Y PRODUCTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	31
FIGURA 6. CALENDARIO DE ACTIVIDADES PARA EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	37
FIGURA 7. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	39
FIGURA 8. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN EL PERIODO 1971-2000 EN LA CUENCA RIO GALLINAS.....	41
FIGURA 9. CLIMAS PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA KÖPPEN-GIGER.....	42
FIGURA 10. PROVINCIAS FISIAGRÁFICAS DE MÉXICO.....	43
FIGURA 11. SUBPROVINCIAS FISIAGRÁFICAS DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.....	44
FIGURA 12. MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	45
FIGURA 13. SECCIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	46
FIGURA 14. HOJA DE CAMPO PARA EL REGISTRO DE DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRA DE AGUA.....	63
FIGURA 15. CATEGORÍAS DE CLASIFICACIÓN DE ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA ICA.....	68
FIGURA 16. RESULTADOS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO PARA EL PARÁMETRO DE TEMPERATURA.....	71
FIGURA 17. RESULTADOS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO PARA EL PARÁMETRO DE PH.....	72
FIGURA 18. RESULTADOS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO PARA EL PARÁMETRO DE CE.....	72
FIGURA 19. GRÁFICA DE ELECTRONEUTRALIDAD.....	73
FIGURA 20. DIAGRAMA BOX PLOT (CAJAS Y BIGOTES).....	74
FIGURA 21. DIAGRAMAS DE CAJA DE BIGOTES DE ELEMENTOS MAYORES "CATIONES".....	76
FIGURA 22. DIAGRAMAS DE CAJA DE BIGOTES DE ELEMENTOS MAYORES "ANIONES".....	77
FIGURA 23. DIAGRAMAS DE CAJA DE BIGOTES DE ELEMENTOS MENORES.....	78
FIGURA 24. DIAGRAMAS DE CAJA DE BIGOTES DE ELEMENTOS TRAZA.....	80
FIGURA 25. MAPA DIAGRAMAS STIFF PERIODO DE LLUVIAS.....	83
FIGURA 26. MAPA DIAGRAMAS STIFF PERIODO DE ESTIAJE.....	84
FIGURA 27. DIAGRAMAS DE WILCOX PARA LA CLASIFICACIÓN SAR.....	91
FIGURA 28. ELEMENTOS EVALUADOS POR DEBAJO DE LA NOM-127-SSA1-1994.....	96

FIGURA 29. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO EVALUANDO DUREZA TOTAL (MG/L) CON LA NOM-127-SSA1-1994	97
FIGURA 30. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO EVALUANDO SO ₄ (MG/L) CON LA NOM-127-SSA1-1994	98
FIGURA 31. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS DE SIEMBRA DE CAÑA DE AZÚCAR. FUENTE: AGUILAR ET AL, 2010.....	103
FIGURA 32.RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL NO ₃	104
FIGURA 33.DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE NO ₃	105
FIGURA 34.RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL P.	106
FIGURA 35.DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE P.	107
FIGURA 36. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL K.....	108
FIGURA 37. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE K.....	109
FIGURA 38. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL ZN.....	110
FIGURA 39. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE ZN.....	111
FIGURA 40. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL CL.	112
FIGURA 41. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE CL.	113
FIGURA 42. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL CU.....	114
FIGURA 43. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE CU.....	115
FIGURA 44. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL FE.	116
FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE FE.	117
FIGURA 46. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUAS PARA EL MN.	118
FIGURA 47. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS CON MAYOR CANTIDAD DE MN.	119
FIGURA 48.LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y ARSÉNICO.....	121
FIGURA 49. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL MN	127
FIGURA 50. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL FE.....	128
FIGURA 51. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL CU.....	129
FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL CL	130
FIGURA 53. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL ZN.....	131
FIGURA 54. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL K	132

FIGURA 55.DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL NO ₃	133
FIGURA 56. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS APROVECHAMIENTOS EVALUADOS CON EL LINEAMIENTO DE CALIDAD DEL P	134

Índice de tablas

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	18
TABLA 2. ZONA DE ABASTO PARA LOS INGENIOS.....	25
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR POR SAGARPA.	27
TABLA 4. VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR MÁS ADAPTABLES EN MÉXICO. <i>FUENTE:</i> <i>AGUILAR,2010</i>	28
TABLA 5. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS FENOLÓGICAS DE LA CAÑA DE AZÚCAR.	29
TABLA 6. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS ESENCIALES PARA LA CAÑA DE AZÚCAR.....	32
TABLA 7. DESCRIPCIÓN DE LOS FERTILIZANTES USADOS POR CADA INGENIO.	34
TABLA 8. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DEL CALENDARIO DE CAMPO.....	35
TABLA 9. TIPOS DE APROVECHAMIENTOS MUESTREADOS.....	59
TABLA 10. MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE CONCENTRACIONES EN ELEMENTOS MAYORES Y MENORES.....	64
TABLA 11. DISPOSICIÓN DEL USO DE AGUA	69
TABLA 12. PUNTOS DE MUESTREO.	70
TABLA 13.ELEMENTOS MAYORES Y MENORES.	75
TABLA 14. ELEMENTOS TRAZA.....	79
TABLA 15. FAMILIAS DE AGUA EN AMBOS MUESTREOS.	82
TABLA 16. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS.....	86
TABLA 17. CONTINUACIÓN DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS.....	87
TABLA 18. CLASIFICACIÓN (SAR) DE RIESGO PARA RIEGO AGRÍCOLA.....	88
TABLA 19. CLASIFICACIÓN (SAR0) PARA RIEGO AGRÍCOLA.....	89
TABLA 20. CLASIFICACIÓN DE GRADOS HIDROMÉTRICOS FRANCESES PARA RIEGO AGRÍCOLA.	90
TABLA 21. CARBONATO SÓDICO RESIDUAL PARA RIESGO DE RIEGO AGRÍCOLA.	90
TABLA 22. TABLA DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LA NOM-127-SSA1-1994.	92
TABLA 23. PESOS RELATIVOS DE LOS PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA EL ICA SEGÚN SU IMPORTANCIA PARA LA SALUD HUMANA.	99
TABLA 24. RESULTADOS OBTENIDOS PARA ICA DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA.	100
TABLA 25. TABLA DE NUTRIENTES ESENCIALES PARA LA CAÑA DE AZÚCAR.....	101
TABLA 26. ESTADÍSTICA DEL PARÁMETRO PH.....	123
TABLA 27. ESTADÍSTICA DEL PARÁMETRO DE SDT.....	123
TABLA 28. ESTADÍSTICA PARA EL ELEMENTO NA.	124
TABLA 29. ESTADÍSTICA PARA EL ELEMENTO CL.....	124
TABLA 30. ESTADÍSTICA PARA LA VARIABLE SO ₄	125
TABLA 31. ESTADÍSTICA PARA LA VARIABLE NO ₃	125

Símbolos Químicos

NO₃

Al Aluminio

As Arsénico

B Boro

Ba Bario

Ca Calcio

Cd Cadmio

Cl Cloro

Cr Cromo

Cu Cobre

F Flúor

Fe Hierro

Hg Mercurio

K Potasio

Mg Magnesio

Mn Manganeseo

Mo Molibdeno

Na Sodio

NO₃ Nitrato

Pb Plomo

SO₄ Sulfato

Zn Zinc

ABREVIATURAS

CONADESUCA	Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
DMA	Water FrameWork Directive (Durectiva Marco de Agua)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
FDC	Fuentes de Contaminación Difusas
FNOPC	Fuentes No Puntuales de Contaminación Difusas
FPC	Fuentes Puntuales de Contaminación
IAWQ	International Association on Water Quality
ICA	Índices de Calidad del Agua
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
NOM	Norma Oficial Mexicana
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección del Ambiente
PV-SLP	Plataforma Valles- San Luis Potosí
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SIAP	Servicio de Información Agroalimenticia y Pesquera
SMO	Sierra Madre Oriental
STD	Sólidos Totales Disueltos
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS	U.S Geological Survey (Servicio Geológico de Estados Unidos)
UTM	Universal Transverse Mercator

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el aumento de las actividades humanas en distintos ámbitos, han alterado la disponibilidad del agua. Es esta una razón, para que todos los seres humanos de manera responsable comencemos a concientizar que tales actividades se traducen en afectaciones, las cuales engloban el carácter físico, químico, biológico, económico, social y cultural que inciden sobre el ambiente. La disponibilidad del vital líquido se ve afectado no solo por la cantidad sino también por la calidad y se ven comprometidas por las actividades antropogénicas de las cuales destaca la agricultura.

De acuerdo con la FAO (1993), a primera vista, la mayoría de los problemas hídricos no parecen estar directamente relacionados con el sector agrícola. Sin embargo, este sector es, con mucho, el que absorbe la mayor cantidad de agua a nivel mundial. Más de las dos terceras partes del agua extraída de los ríos, lagos y acuíferos del mundo se utilizan para el riego.

Según la CONAGUA (2017) reporta, que el 76% del agua utilizada en el país, es destinada al uso consuntivo de agricultura. Y reconoce, que esta actividad, así como la deforestación y un mal manejo de la basura son responsables del 70% de la contaminación de los recursos hídricos. Así mismo, se cuenta con poca información documentada, respecto al impacto que esta actividad genera en el ambiente de diversos ecosistemas.

El agua puede contaminarse por dos causas principales que son las naturales o por actividades antropogénicas. Los recursos hídricos como arroyos, ríos, lagos o estuarios (conocidos como fuentes superficiales), así como los acuíferos (conocidos como fuentes subterráneas) son un medio y un receptor de una amplia gama de residuos y sustancias nocivas provenientes de distintas fuentes. Cuando se conoce el origen y al responsable de la descarga, se está en presencia de FPC; cuando no es posible identificar ni uno, ni otro, se habla de FNPC o FCD (Landeros, Palacios y Hernández, 2014).

En la actividad agrícola los principales contaminantes que se generan son los nutrientes, pesticidas, sedimentos, minerales y patógenos que provienen de los agroquímicos (plaguicidas y fertilizantes químicos), así como la aplicación de estiércoles a los cultivos. El agua de riego constituye el medio más eficiente de transporte de contaminantes agrícolas hacia los cuerpos de agua superficial y subterráneo (Pérez y Aguilar, 2012).

Una característica básica de la contaminación que se genera en la actividad agrícola es que sus impactos no son locales, sino que tienden a afectar toda una cuenca hidrográfica. Por lo que se considera que es de vital importancia reconocer el papel de las aguas subterráneas, así como el de las aguas superficiales en el país.

La solución de los problemas de contaminación difusa debe ser considerados como una actividad importante, con el fin de poder llegar a tener un control de la calidad del agua presente en estos cuerpos. El contar con la identificación de fuentes difusas de contaminación, permite tomar acciones para mitigar su impacto negativo en los recursos hídricos y de esta manera poder proponer medidas de protección y

ordenamiento de los usos del suelo, factor que influye en el incremento de FCD, como un aspecto relevante a resolver.

En Estados Unidos de Norteamérica, y desde las décadas de los años setenta y ochenta, la contaminación difusa ha sido reconocida como una de las fuentes más importantes de contaminación superficial. En 1977 se instauró la famosa Ley Federal Estadounidense denominada Acta de Agua Limpia (Clean Water Act), que diez años después, en 1987, fue modificada y renombrada como el Acta de Calidad del Agua (Water Quality Act). Posteriormente en el año de 1992, después de contar con un mejor control de las fuentes puntuales, la oficina ambiental de los Estados Unidos descubrió que aproximadamente el 50% de su problema de contaminación que llegaba a ríos, lagos y acuíferos, provenía de la contaminación difusa (IAWQ, 1996). En diciembre de 2000, la Unión Europea emitió un documento denominado la DMA, cuyo objetivo es mejorar el “buen estado” de aguas superficiales y subterráneas en la región, pretendiendo atender el problema de calidad del agua en un esquema de cuenca, con un enfoque al estudio y la mitigación tanto de fuentes puntuales como de fuentes difusas de contaminación. En América Latina, los retos del agua se han enfocado principalmente a lograr la cobertura de agua potable y, en una menor proporción, en cubrir las necesidades de saneamiento. Por ello, una gran proporción de agua residual no tratada llega a los cuerpos receptores. Sin embargo, en las últimas décadas, el concepto de manejo integrado de cuenca ha tenido una mayor popularidad, y por este motivo se ha reconocido la importancia de incluir, de un mejor modo, las fuentes de contaminación difusa (Arreguín, Gómez, y Izurieta, 2000). En dicha región, organizaciones tales como la Conagua y el IMTA, en México (Izurieta, Mijangos, Rivera, Torres, y Chavarría, 2007), y la Universidad Federal de Minas Gerais, en Brasil, entre otras, realizan ahora estudios en la materia. Internacionalmente, resalta la labor del Grupo Especializado de Contaminación Difusa y Eutroficación, perteneciente a la IAWQ, que ha organizado 15 conferencias internacionales en el tema, y que en la actualidad expande sus actividades hacia América Latina. Conferencias en donde, se promueve la investigación, disemina información y apoya el desarrollo de políticas para entender y resolver la contaminación generada por fuentes difusas o no puntuales. En este sentido, es conveniente mencionar la activa participación del Reino Unido, Estados Unidos, Francia, Alemania, Suecia, Sudáfrica, Japón y Australia (Bravo, Saldaña, Izurieta, y Mijangos, 2013). México, cuenta con un marco legal y normativo integrado por un conjunto de leyes, reglamentos y normas que son de utilidad para marcar la pauta a la participación del estado en el establecimiento de políticas agrícolas y ambientales en el ámbito nacional. Adicionalmente, cada entidad federativa tiene sus propias leyes ambientales (o ecológicas) y de aguas, reglamentos para aspectos ambientales específicos y normas técnicas.

La institución responsable de la política ambiental es la SEMARNAT creada en 1994 y la encargada de la vigilancia y el cumplimiento ambiental, a la par de la PROFEPA. El recurso agua constituye una excepción ya que es administrado, normado y vigilado por una misma dependencia, la CONAGUA, órgano administrativo desconcentrado de la SEMARNAT que, además, absorbe la mayor parte de su presupuesto (Academia Mexicana de Ciencias, 2010).

De acuerdo con la información de la CONAGUA, el 70% de los cuerpos de agua superficial del país está afectado por la contaminación, con un 31% que se describe

como extremadamente contaminado. Mercurio, plomo, cadmio, níquel, cromo, arsénico, cianuro o tolueno, son algunas de las sustancias que pueden encontrarse en ríos y lagos (Cubas, Llano y de Rosenzweig, 2017).

Como nos menciona Cubas et al. (2017), el 95% del agua dulce en nuestro país se encuentra en el subsuelo, y de ahí proviene el 75% de la que se consume en nuestras ciudades. El agua es extraída de los acuíferos, los cuales son formaciones geológicas permeables que permiten la circulación y el almacenamiento de aguas (esto se debe a las grietas y poros que contienen estas formaciones rocosas). Se pueden encontrar diferentes tipos de acuíferos los cuales se clasifican en base a diferentes criterios, como lo son la porosidad, la litología, la presión del agua y su complejidad. En la clasificación de la porosidad destacan los acuíferos kársticos de los cuales se estima que el 25% de la población mundial es abastecida de aguas subterráneas provenientes de ellos (Aguilar et al., 2016); (Perrin, 2003) (Bakalowicz, 2005).

Estos acuíferos se forman gracias a los sistemas kársticos los cuales según Ford y Williams (1989), se desarrolla a partir de la disolución de las rocas (caliza, mármol, dolomía, yeso o halita) por la acción del agua principalmente. En este sentido, su evolución y expresiones morfológicas dependerán de las interacciones: roca-agua, condiciones climáticas, topografía y la acción biológica.

Estos sistemas ocupan aproximadamente 20% de la superficie terrestre en una variedad de climas y regiones (Figura1) (Ford y Williams, 1989). En Europa abarca el 35% (Goldscheider, 2005); en Estados Unidos es mayor del 20% (Davis, Long y Wireman, 2002); en México y Centroamérica, consiste en aproximadamente 23% (Kueny y Day, 2002).

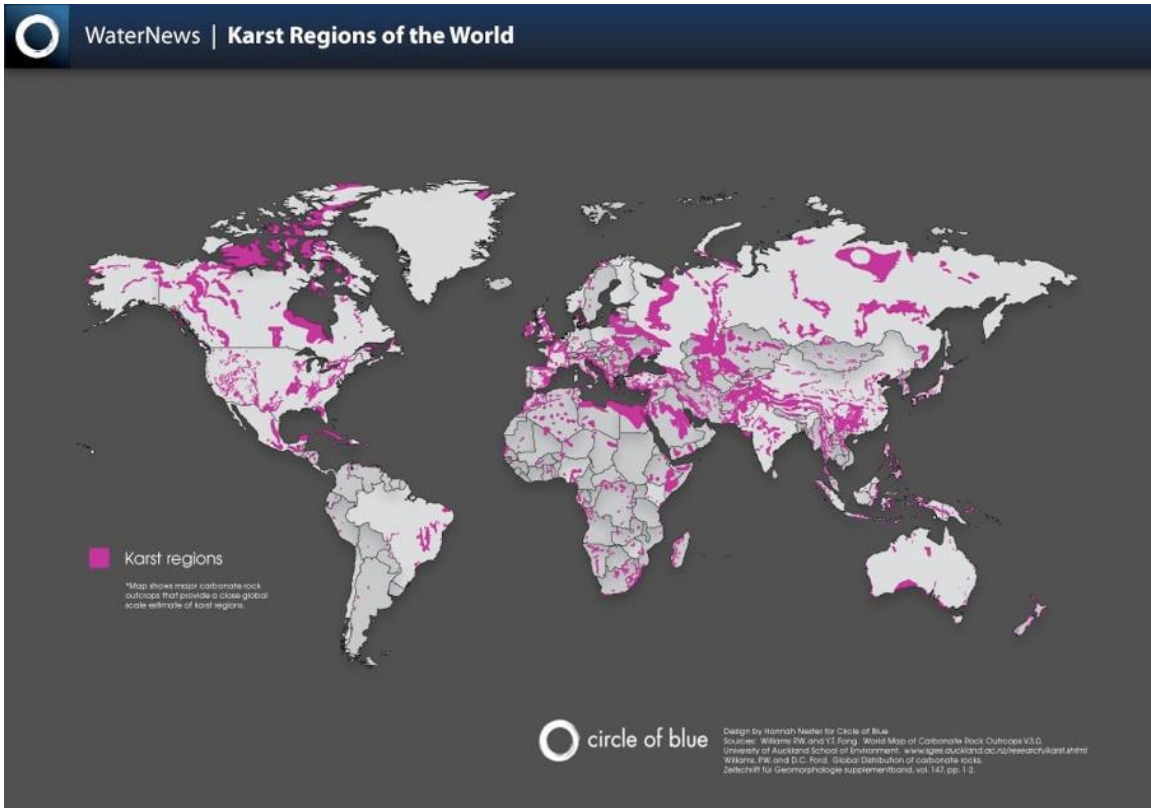


Figura 1. Distribución de regiones kársticas del mundo.

Fuente: Circle of blue, 2010.

Como mencionan Mora, Bonifaz, y López (2016) (Mora , Bonifaz, & López Martínez, 2016), los paisajes kársticos en México representan aproximadamente un 15% del territorio nacional. Estos paisajes se localizan principalmente en Tamaulipas, San Luis Potosí, Chiapas y la península de Yucatán (Espinasa, 2007) (Figura 2), sin embargo, la caracterización de estos territorios y su funcionamiento tiene aún poco detalle.

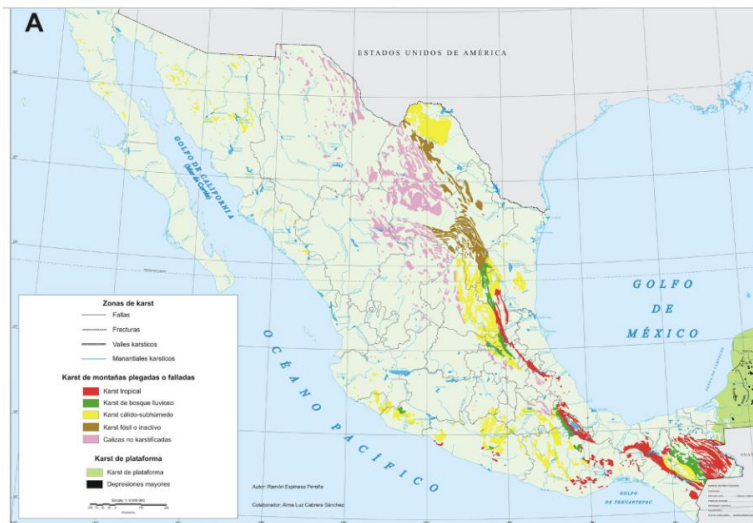


Figura 2. Mapa de zonas kársticas en México.

Fuente: Espinasa, 2007. Atlas Nacional de México.

La región Huasteca del estado de San Luis Potosí se encuentra dentro de la Subprovincia del Carso Huasteco la cual pertenece a la SMO, (Morán, Ramos, López, Carranco, y Santacruz, 2013). Debido a las características geológicas se puede afirmar que se cuenta con un acuífero Kárstico, sin embargo, por sus características peculiares como la permeabilidad, (la cual se debe a la interconexión de planos de drenaje y no a su porosidad) la cual favorece la transferencia de agua desde la superficie a las cavidades subsuperficiales o viceversa, es por esta razón que este tipo de acuíferos son muy vulnerables a cualquier contaminante debido a que se introduce más fácilmente al acuífero. Como mencionan Aguilar, Bautista, Mendoza y Delgado (2013), la restauración de un acuífero contaminado es una tarea técnicamente complicada y de elevado costo, a veces es irreversible por lo que es preferible tomar medidas de prevención y previsión, en lugar de la remediación.

1. ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Antecedentes

Los acuíferos kársticos desempeñan un papel importante, sobre todo porque el 20-25% de la población mundial depende de las aguas subterráneas que almacenan (Ford y Williams, 1989).

Debido a sus peculiares características, además de ser excelentes dotadores de agua también son muy vulnerables a los contaminantes, como nos menciona Aguilar et al. (2016), desde los años 60's y desde diversas disciplinas surgen conceptos, metodologías y enfoques para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en ambientes kársticos.

Los primeros estudios se realizaron en varios países de Europa, de los que destaca España debido a sus diversos estudios sobre los ambientes kársticos, como por ejemplo el publicado por Pérez (2009), titulado "*Primeros resultados obtenidos sobre el funcionamiento hidrogeológico de la Lagunas de Estaña y su relación con el acuífero de Estopiñán*", el cual contribuye a la mejora del conocimiento hidrogeológico del acuífero Estopiñán en donde se identifica cuatro tipos de aguas subterráneas y deduce los procesos hidrogeoquímicos dominantes desde un punto de vista cualitativo: disolución de carbonatos, yeso y/o anhidrita y halita. Además, establece diversos sistemas de flujo con diferentes tiempos de tránsito, busca comprobar la existencia de aportes subterráneos para alimentar el sistema endorreico. la recarga de las lagunas es entre los meses de enero y mayo, el periodo de estratificación de sus aguas, se observan variaciones importantes tanto en el contenido de oxígeno disuelto como en el Potencial Redox (Eh). Esto podría indicar movimientos de flujo convectivos en el entorno de la termoclina debido a diferencias de temperatura y densidad, aunque no se descarta la existencia de posibles aportes de agua subterránea, principalmente en las zonas donde se observa un incremento en los parámetros correspondientes al de oxígeno disuelto y Eh. Adicionalmente, el bajo grado de mineralización del agua en las lagunas y el no aumento de la concentración en sales en profundidad, parece indicar la existencia de una importante renovación del agua en las lagunas indicando un importante papel de las aguas subterráneas en el funcionamiento de la laguna.

En los últimos años en México se comenzaron las investigaciones sobre la caracterización de estos territorios y su funcionamiento sin embargo aún se tiene poco avance, cabe mencionar que destaca la Península de Yucatán por ser de las que se tiene más información.

Un ejemplo de estudio es el denominado "*Ivaky: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación*" presentado por Aguilar et al. (2016) en cual busca una diferenciación del territorio de acuerdo con su nivel de vulnerabilidad a la contaminación la cual se muestra en un mapa con seis clases de vulnerabilidad. En el cual se establece recomendaciones de uso del territorio. El enfoque propuesto es replicable y podría usarse para evaluar la vulnerabilidad de

los acuíferos en regiones con características ambientales similares no solo en México, sino en Guatemala, Belice, Cuba, o la península de la Florida.

En la plataforma Valles - San Luis se tienen pocos estudios de la caracterización hidrogeoquímica de la zona; sin embargo, destaca el presentado por Morán et al. (2013) titulado "*Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina*". En el cual se realiza modelación inversa en 4 secciones con posible conexión hidráulica por medio de fracturas, se logran identificar los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el agua subterránea. En general la modelación hidrogeoquímica sugiere que el principal proceso que domina en el flujo subterráneo es la interacción agua roca y la mezcla con agua de reciente infiltración. Los principales flujos subterráneos en el área de estudio van de W – E. Debido a que la zona de estudio está sumamente fracturada, es posible que un número importante de estas fracturas estén comunicadas hidráulicamente, como lo evidencian los manantiales de la región. En el área de estudio se identificaron principalmente tres flujos subterráneos, uno local, otro intermedio y el tercero regional. El primero está asociado a la recarga local y el tercero es un flujo más evolucionado con mayor tiempo de residencia y mayor distancia recorrida, entre ambos se encuentra el flujo intermedio. La modelación hidrogeoquímica resultó una herramienta económica, útil y eficiente para evidenciar la conexión hidráulica entre cuencas y subcuencas hidrogeológicas e identificar los procesos naturales durante su evolución.

Otro estudio de la zona es el publicado por Krienen et al. (2017) denominado "*Hydrogeological and hydrochemical characterization of two karstic discharge areas in San Luis Potosí, Mexico*", en el cual se analizaron dos zonas, por un lado, la región de Río Verde (RV) y por otro Ciénega de Cabezas (CC), el estudio busca identificar el contraste hidroquímico para determinar el conocimiento de las vías de flujo de agua subterránea y las interacciones agua-roca. Demostrando con ello que los sistemas de aguas subterráneas kársticas con ajuste geológico aparentemente similar en distancia directa muestran un análisis químico y estadístico de ambas áreas no presentan correlación regional entre ellas. El entorno geológico se compone principalmente de calizas, con fracciones variables de capas de dolomita y yesos. Por el contrario de otros informes, los cuales indican que no hay conexión hidráulica entre las dos áreas de estudio, (RV) y (CC), como se aprecia en los resultados obtenidos en el análisis del agua. Así mismo, se presenta una composición química totalmente diferente, influenciados por el entorno geológico (Guaxcamá-El Abra y Tamasopo Fm) el cual se compone como se había mencionado principalmente de calizas, con fracciones variables de capas de dolomita y yeso, siendo la influencia de este entorno geológico más fuerte en RV que en CC, lo que da como resultado una firma de yeso más significativa en el agua muestreada de la descarga con zonas mayores de concentraciones de calcio y magnesio en RV y en menor concentración en CC.

1.1.1 Estudios previos en la Huasteca Potosina

Como se ha mencionado existen pocos estudios relacionados con la hidrogeología del área de estudio, sin embargo, a continuación, se muestra la Tabla 1, donde se presentan estudios que de cierta forma trabajaron algunos de los aspectos, abordados en este documento y sirvieron de cierta manera de guía y apoyo, los cuales se encuentran citados o referenciados a lo largo de esta investigación.

Tabla 1. Descripción de Antecedentes Teóricos

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Autor (es)	Titulo	Tema	Aporte a la investigación
Ferney (2011)	GESTIÓN PARTICIPATIVA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: EL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO VALLES, ORIENTE DE MÉXICO.	Describe diversos problemas que se tiene en la zona y las gestiones que son posibles de aplicar, aunque existen dos grandes visiones (la <i>visión ecosistémica</i> y la <i>visión basada en el desarrollo sostenible</i>).	Nos presenta evidencia sobre la relación sociedad- naturaleza de la cuenca Río Valles sin embargo nos hace mención que las actividades cambian a lo largo de la cuenca. Mencionando que la parte baja de cuenca es la más afectada tanto en calidad como en cantidad.
Aguilar et al. (2010)	ZONIFICACIÓN PRODUCTIVA CAÑERA EN HUASTECA POTOSINA, MÉXICO	Nos presenta la evaluación de la distribución espacial al caracterizar el nivel de productividad del cultivo, en la región Huasteca Potosina, mediante técnicas de percepción remota, utilizando los sistemas de información geográfica (SIG). Se emplearon datos de Índice Normalizado de Vegetación (INDV), suelo y agrometeorológicos para evaluar la productividad mediante un software cartográfico el cual permitió identificar y evaluar el estado del cultivo.	Los resultados indican que la zona cañera es óptima para obtener altos rendimientos, pero estos fueron marginales. Cada zona tiene una combinación similar de potencial, limitaciones para el desarrollo del cultivo y determina el foco de atención para futuras recomendaciones en las zonas cañeras. Estas áreas dentro de Huasteca Potosina requieren sistemáticas acciones de planeación, arreglos institucionales e iniciativas gubernamentales para incrementar su rentabilidad y productividad.

Autor (es)	Titulo	Tema	Aporte a la investigación
Dávila (2017)	EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN LAS CUENCAS DEL RÍO GALLINAS Y DEL RÍO VALLES EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO. (TESIS INGENIERO AMBIENTAL)-	Evalúa de la respuesta hidrológica de las cuencas del Río Gallinas y del Río Valles ante un contexto de cambio climático, esto mediante el uso del modelo hidrológico GR4J.	Los resultados indican la posibilidad de importantes pérdidas de caudal medio mensual en especial durante los meses junio y septiembre. Además, se valoran disminuciones de caudal máximo mensual mayores a -90% y de hasta -80% de caudal mínimo mensual.
Peralta et al. (2016)	PERCEPCIÓN LOCAL RESPECTO A LA VALORACIÓN AMBIENTAL Y PÉRDIDA DE LOS RECURSOS FORESTALES EN LA REGIÓN HUASTECA DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO-	Analiza la percepción local de la población respecto a la valoración ambiental y pérdida de los recursos forestales	La metodología sobre percepción local apoyadas en mapeo participativo y análisis de cambios de cobertura y uso de suelo permitió entender escenarios del estado de los recursos forestales y la dinámica productiva desarrollada en la Huasteca.
Morán et al. (2013)	COMPORTAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS EN ACUÍFEROS CÁRSTICOS FRACTURADOS, APLICANDO MODELACIÓN INVERSA: CASO HUASTECA POTOSINA	Se buscó demostrar la conectividad hidráulica del sistema de fallas y fracturas aplicando modelación inversa. Se identificaron dos principales tipos de agua: uno bicarbonatado cálcico debido a interacción con rocas carbonatadas como las calizas y otro sulfatado cálcico que se relaciona con un proceso de interacción agua-roca, principalmente de origen evaporítico como los yesos.	Se estudiaron cuatro trayectos uno de Rioverde a Santa Anita, de Apesco a Huichihuayan, de Guadalupe a Tambaque y de El Salto- Minas Viejas.

Autor (es)	Titulo	Tema	Aporte a la investigación
Krienen et al. (2017)	HYDROGEOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF TWO KARSTIC DISCHARGE AREAS IN SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO	Nos presenta el análisis hidroquímico de dos áreas kársticas, Río Verde (RV) y Ciénega de Cabezas (CC) para examinar si el agua subterránea, que abastece a las áreas de descarga, experimenta la misma evolución y tiene una fuente común.	Se utiliza información recabada en CC para comparar el comportamiento del agua con el tiempo.
Saldaña (2011)	EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE EL MICROCLIMA EN EL HUMEDAL CIÉNEGA DE CABEZAS, TAMASOPO, S.L.P	Evalúa un posible cambio microclimático por el cambio de uso de suelo a causa de la desecación de este para abrir nuevas tierras al cultivo	El cambio de uso de suelo ha influido el microclima del lugar ya que la variación es evidente en los análisis efectuados. Por lo anterior se recomienda limitar el dren del humedal y dejar que la naturaleza vuelva a estabilizar el lugar ya que si se continúa en un futuro será más difícil aminorar el impacto del cambio de uso de suelo en esta zona.
Zubieta (2012)	USO ACTUAL Y POTENCIAL AGROECOLÓGICO DE LA FRACCIÓN PEÑA AMARILLA-LA TINAJA, DEL HUMEDAL CIÉNEGA DE CABEZAS	Se logra identificar un uso actual del suelo, principalmente destinado a la producción extensiva de ganado bovino de carne en pastizales inducidos y de agricultura de temporal especialmente de caña de azúcar, frutales y cultivos de subsistencia como el maíz, frijol y otros.	Se determinó que lo idóneo sería una reconversión de sus actividades, hacia unas más eficientes, apegadas a los principios de la agroecología, anteponiendo siempre la preservación del predio y en general de todo el ecosistema del humedal.
Jabardo y Padilla (2016)	LA ESCASEZ DE AGUA EN LA HUASTECA POTOSINA (MÉXICO): CONFLICTOS LOCALES	El problema de la escasez proviene de la sobreexplotación de los acuíferos, genera serias implicaciones que afectan mayormente a las poblaciones que en ella habitan.	Nos mencionan el uso y manejo del agua en la región de la Huasteca Potosina

1.2. Justificación

La Huasteca Potosina pertenece a la Subprovincia del Carso Huasteco, esta región kárstica abarca aproximadamente el 14.65% de la superficie total del Estado Potosino (INEGI,2002). Debido a sus características específicas, tanto en lo relativo a la organización de los flujos hídricos superficiales y subterráneos como a la relación entre ambos, estas dan origen a los acuíferos kársticos estos se diferencian del resto por su heterogeneidad organizada, es decir, los huecos que la disolución de la roca va originando, y el propio flujo que condiciona la disolución, se van jerarquizando desde arriba, la superficie del terreno, donde se produce la recarga, hacia abajo, la surgencia (manantial), donde se produce la descarga, dando una estructura de drenaje 3D (Antigüedad, Morales, y Uriarte, 2007).

Como menciona Aguilar et al. (2013) la urbanización, industria y las actividades agropecuarias que se realizan en la superficie del karst son grandes amenazas de contaminación debido a los residuos que son vertidos hacia los acuíferos.

La protección de la calidad de las aguas del medio kárstico es una tarea complicada ya que la velocidad de propagación del contaminante varía mucho de un punto a otro, debido a las funciones transmisiva y capacitiva. La función transmisiva (capacidad para el paso del agua) en los conductos, gobierna el flujo de los recursos, se transmiten rápidamente el contaminante, sin apenas modificación. Y la función capacitiva (capacidad para contener agua) en los bloques, gobierna el almacenamiento de las reservas que mantienen el contaminante durante un tiempo, más o menos largo, junto con el agua allí almacenada, lo que origina dilución (Antigüedad et al., 2007).

La contaminación producida por las actividades antropogénicas, principalmente, la agricultura pone en riesgo la integridad de la zona. Uno de los principales cultivos de la zona Huasteca es la caña de azúcar según los datos de la CONADESUCA, en el 2017 se produjeron 5,621 miles de toneladas, gracias a estas cifras se logró estar en el 3 lugar a nivel nacional. Sin embargo, es importante considerar que la agricultura de la caña incluye el uso de agroquímicos, de fertilizantes, pesticidas y herbicidas que contribuyen a la afectación de la calidad del agua, de los cuerpos de agua superficial y subterráneos.

Por otro lado, dentro de la Subprovincia del Carso Huasteco se encuentra el humedal denominado Ciénega de Cabezas, el cual recibe agua subterránea de manantiales, y funciona como zona de amortiguamiento y filtro de agua. Este humedal es a la vez una zona ecológica y económicamente importante para las comunidades que la rodean, ya que contiene una biodiversidad única de plantas y animales como el cocodrilo de pantano, aves migratorias y otras especies.

Debido a estos factores de riesgo, y a la falta de información que se tiene, surge la necesidad de contar con un estudio hidrogeoquímico que nos permita conocer la magnitud del impacto humano. Al contar con la información que aportará el estudio, se logró contribuir para que las autoridades correspondientes busquen establecer

estrategias que logren minimizar los efectos negativos derivados de las propias actividades humanas, así como de las circunstancias naturales que la propia región presenta de tal forma que se logre mantener un equilibrio en los ecosistemas.

1.3. Objetivo general

Evaluar la composición química del agua superficial y subterránea para obtener los índices de calidad (ICA) con el fin de general la información necesaria, respecto al conocimiento de los parámetros que genera la contaminación difusa en la región centro-occidente de la huasteca potosina.

1.4. Objetivos específicos

1. Realizar la interpretación hidrogeoquímica del agua y su relación con el medio geológico.
2. Caracterizar la calidad del agua para uso público-urbano y riego agrícola.
3. Obtener los índices de calidad en aguas superficiales y subterráneas para uso público urbano.
4. Evaluar la contaminación difusa producido por las actividades agrícolas en los recursos hídricos.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1. Medios Kársticos

Como nos menciona Antigüedad et al., (2007), las regiones kársticas tienen unas características específicas hidrológicas, tanto en lo relativo a la organización de los flujos hídricos superficiales y subterráneos como a la relación entre ambos, y que diferencian claramente esas regiones de cualquier otra, y los acuíferos kársticos de cualquier otro tipo de acuífero.

Un acuífero Kárstico puede ser conceptualizado como un sistema hidrológico abierto que cuenta con una variedad de flujos de entrada, salida y a través de la capa superficial y subsuperficial. Las fronteras del sistema están definidas por los límites de captación y la geometría de los conductos (Ford y Williams, 1989).

En los sistemas de agua subterránea poco profundos, las fluctuaciones de la recarga por la precipitación se propagan a través del sistema; mientras que en los sistemas más grandes y profundos éstas se igualan. La evolución geológica y morfológica del ambiente rocoso en el pasado determina el estadio y la profundidad de karstificación del sistema de flujo presente. La karstificación de las rocas carbonatadas comienza generalmente en la superficie y se propaga hacia el interior. Una red de drenaje profunda puede haberse desarrollado de forma similar a una red fluvial superficial (IGME, 2002).

A pesar de su importancia por su relación con las aguas subterráneas, en México el karst ha sido poco estudiado. Aproximadamente el 20% del territorio está ocupado por rocas solubles, principalmente calizas y en menor proporción yesos, se tiene desarrollo de karst en la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Chiapas y en la plataforma calcárea de la Península de Yucatán (Espinasa, 1990).

2.2. Agricultura de la caña de azúcar

La caña de azúcar, *Saccharum officinarum* L., es una gramínea originaria de Nueva Guinea; se cultivó por primera vez el Sureste Asiático y la India occidental, aproximadamente en 327 A.C. Fue introducido en Egipto alrededor del 647 D.C. y en España aproximadamente en 755 D.C. Desde entonces, se extendió a casi todas las regiones tropicales y sub-tropicales. Debido a los viajes de Cristóbal Colón a América llegó a México en la época de la conquista (1522 aprox.), fue así como la primera plantación se llevó a cabo en el estado de Veracruz, instalándose posteriormente los primeros ingenios azucareros en las partes cálidas del país como parte de la colonización (Hernández y Hernández, 2013).

Es una planta perenne en forma de tallo que es cultivada en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (actualmente se cultiva en 105 países) entre las latitudes 37° N y 31° S, principalmente, por su capacidad para almacenar grandes cantidades

de sacarosa (10-18%) en los internudos, dependiendo de la variedad y de las condiciones agroclimáticas como factores limitantes para su crecimiento, además de la etapa de desarrollo (planta, soca o resoca), suelo, fertilización, clima, temperatura, plagas, malezas, enfermedades y la disponibilidad de agua, tienen relación directa en la productividad del cultivo (rendimiento de campo y agroindustrial) (Aguilar et al., 2010).

Desde el surgimiento y expansión del cultivo de caña de azúcar, los productores y los dueños de los medios de producción han estado estrechamente ligados a las fuerzas económicas mundiales y, por ende, han influido en la modelación del mundo. Ningún cultivo ha tenido tanto impacto radial como el de la caña de azúcar y es, según la UNESCO, el cultivo agrícola más importante del planeta. Esta expansión del cultivo ha arrastrado mano de obra, tecnología, hábitos, historia, formas de organización y relaciones sociales de producción; sin embargo, también tuvo que ver con la esclavitud y con la expansión de la raza de color por varias zonas geográficas del mundo (Hernández y Hernández, 2013).

El desarrollo de la caña depende de la luz solar, la cual se absorbe por la clorofila presente en las células de las hojas. Esta sirve de energía para lograr que se lleve a cabo la reacción química entre el CO₂ absorbido del aire, el agua y nutrientes que la planta toma del suelo a través de la raíz. El resultado que se obtiene de esta reacción es la sacarosa, la cual se almacena en el tallo de la planta. Cabe destacar que la caña está considerada como una de las plantas más eficientes convertidores de energía solar que existen, mientras que el azúcar es una de las fuentes energéticas más económicas para el hombre, ya que proporciona alrededor del 12% de hidratos de carbono. Los componentes de la caña son: sacarosa (8 – 16%), agua (73 – 76%) y bagazo o fibra (11 – 16%). La sacarosa se obtiene mediante: $12\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} = \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + 12\text{O}_2$. El jugo de caña también contiene pequeñas cantidades de otras sustancias como glucosa (0.2-0.6%), fructosa (0.2-0.6%), sales (0.3-0.8%), ácidos orgánicos (0.1-0.8%), otros (0.3-0.8%) (Hernández y Hernández, 2013).

2.2.1. Ingenios Azucareros

Se denomina ingenio azucarero o simplemente ingenio a una antigua hacienda colonial americana (con precedentes en las Islas Canarias) con instalaciones para procesar caña de azúcar con el objeto de obtener como productos principales azúcar, ron y alcohol. Su antecedente es el trapiche, cuya escala de producción era muy pequeña y, a su vez, el ingenio vino a ser sustituido por las grandes centrales azucareras modernas que se desarrollaron en el siglo XX (Hernández y Hernández, 2013).

Su desarrollo industrial en San Luis Potosí inició con el establecimiento del primer ingenio en el año de 1888, denominado Compañía Manufacturera y Desarrolladora Rascón, que para el año de 1903 sería transformada en “The Rio Tamasopo Sugar Company Agua Buena” o simplemente “Ingenio Agua Buena”, posteriormente en el año de 1975 este ingenio vuelve a reestructurarse para convertirse en el ingenio “Alianza Popular” el cual sigue en operación hoy en día en el municipio de

Tamasopo. Ese mismo año es creado el Ingenio Ponciano Arriaga, hoy conocido como San Miguel del Naranjo, ubicado en el municipio de El Naranjo. Años anteriores, en 1963 es creado el Ingenio Plan de Ayala y por último en el año de 1984 el Ingenio Plan de San Luis, estos dos ubicados en el municipio de Ciudad Valles (Quitero, 2012).

Con el crecimiento productivo de los ingenios se sumaron tierras dedicadas al cultivo de caña de azúcar, en un estudio realizado por Aguilar (2011) se muestra que para el año de 1973 la superficie destinada al cultivo de este producto era de 19,678 has, mientras que al año de 1990 esta superficie logró llegar a las 78,656 has, finalmente para el año 2009 la superficie ocupada era de 89,158 has.

Actualmente los cuatro ingenios existentes en la Huasteca Potosina han extendido su zona de abasto incluso hasta municipios de Tamaulipas (Tabla 2) (Quitero, 2012).

Tabla 2. Zona de abasto para los Ingenios.

Fuente: Quitero, 2012

Ingenio	Zona de abasto
San Miguel del Naranjo	Tamaulipas: Antigua Morelos, Ocampo Nuevo Morelos. San Luis potosí: Ciudad del Maíz. Huasteca: El Naranjo.
Alianza Popular	San Luis Potosí: Alaquines, Rayón. Huasteca: Tamasopo y Aquismón.
Plan de Ayala	Huasteca: Tancanhuitz, Ciudad Valles, Tamuín, Tanlajás.
Plan de San Luis	Huasteca: Ciudad Valles.
El Higo (Ubicado en Veracruz)	Huasteca: San Vicente Tancuayalab.

Como se muestra en la fig. 3 la distribución espacial correspondiente a los y niveles de productividad en las diferentes zonas productoras de caña de azúcar.

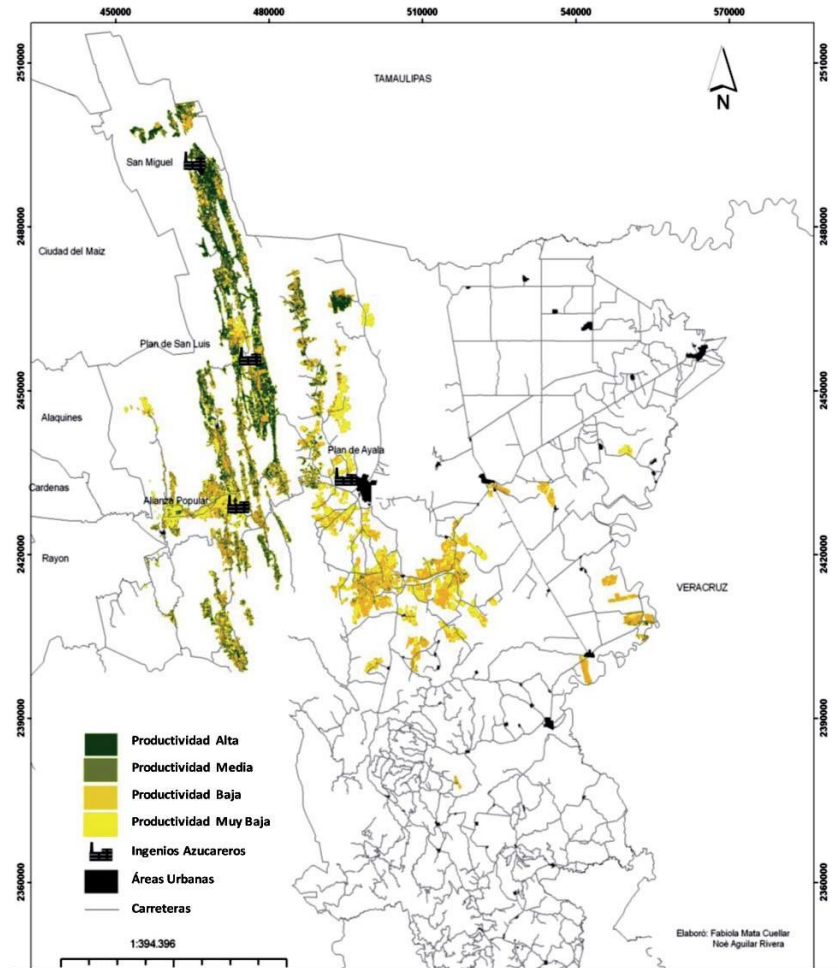


Figura 3. Zonificación productiva del cultivo de caña de azúcar dentro de Huasteca Potosina.
Fuente: Aguilar et al., 2010

2.2.2. Variedades de caña de azúcar

Existen una gran diversidad de especies y variedades de la caña de azúcar, esto, debido a la fusión de composiciones químicas que se han desarrollado en diversos países, cuya finalidad es de obtener plantas que desarrollen un mayor rendimiento, así como, una mayor resistencia a las diferentes zonas, climas, enfermedades y plagas donde se cultiva la caña de azúcar. La SAGARPA a través SIAP, clasifican la caña de azúcar de acuerdo con la Tabla 3. (Hernández y Hernández, 2013).

Tabla 3. Clasificación de la caña de azúcar por SAGARPA.

Fuente: Hernández y Hernández, 2013.

NOMBRE	NOM. CIENTIFICO	DESCRIPCIÓN	Negativa
Caña Criolla	<i>Saccharum Officinarum</i>	Es la variedad que trajo Hernán Cortés, la más antigua y la más abundante en la República Mexicana; posee un jugo abundante y una mayor riqueza en sacarosa, dotada de gran vitalidad, pues a pesar de su larga estancia en el territorio, no ha degenerado en lo más mínimo.	Es muy sensible a los extremos de calor y frío, por lo que suele enfermarse algunas veces
Caña Cristalina	<i>Saccharum Lubridatum</i>	El nombre de Cristalina procede del aspecto de su tallo, cuyos cañutos están cubiertos de una capa de vello blanquecino que le comunican brillantes reflejos; el color de sus hojas es de un verde más oscuro que el de las otras variedades. Este tipo de caña es robusto y tiene mayor resistencia a las adversas condiciones meteorológicas;	Es muy dura, exigiendo por este motivo mayor gasto de energía en los trapiches.
Caña Violeta	<i>Saccharum Violaceum</i>	Tiene los tallos con una coloración violeta y las hojas ofrecen un color verde intenso. Tiene la ventaja de resistir, mejor que otras, las bajas de temperatura y ser también más precoz.	Es su tendencia a secarse rápidamente y ser menos jugosa que sus congéneres.
Caña Veteada	<i>Saccharum Versicola</i>	Resiste muy bien a los efectos del frío, es precoz y se distingue de las otras por su agradable aspecto rayado de amarillo y rojo violeta.	

2.2.3. Variedades en México

Desde la conquista de Hernán Cortés introdujo a los suelos de Anáhuac, distintas variedades de caña de azúcar que pronto hicieron florecer con éxito el cultivo y la industria azucarera en el país; desde entonces hasta nuestras fechas se han adquirido grandes experiencias y con ellas se va alcanzando la obtención de más y más variedades hasta llegar a contar con diversos clones que cumplen con los rendimientos de producción en las distintas zonas ubicadas en la extensión geográfica de México. Las variedades se agrupan en claves y están compuestas por letras y números (Tabla 4). Las letras señalan el lugar de origen. El número indica el año cuando fue producida y la serie que corresponde; ejemplo, Mex 60-1403: Mex indica el lugar de origen, 60 el año en que se clasificó y 1403 la serie que se le asignó según su aparición. Las variedades con (*) son las que mayormente se utilizaron desde las décadas de los sesentas y setentas en México (Hernández y Hernández, 2013).

Tabla 4. Variedades de caña de azúcar más adaptables en México. Fuente: Aguilar, 2010

Mex 52-17*	Mex 55-286	MEX 69-290
Mex 52-23	Mex 56-105	MEX 68-P23
Mex 52-29*	Mex 56-356	MEX 64-1487
Mex 53.142*	Mex 56-476*	MEX79-431
Mex 53-157	Mex 56-563*	RB73-9735
Mex 54-81	ITAxMex 57-197	CP74-2005
Mex 54-88	Mex 57-863	Q-96
Mex 54-138	Mex 57-1287	RD75-11
Mex 55-21	Mex 58-1230*	CP72-2086
Mex 55.32	Mex 59- 144	Co-997
Mex 55-61	Mex 59-641	Q-68
Mex 55-250*	Mex 60-1403*	MEX-821
Mex 55-261	Mex 60-1469	

Las variedades de caña de azúcar más empleadas en la Huasteca potosina son la CP 72-2086 (21%), la ZMEX 55-32 (50.6%) y otras (Mex 69-260, mex 79-431, Mex 68-P-23, Mex 57-473, RD 75-11, SP 70-1284). En cuanto a la etapa de desarrollo del cultivo, se tienen para plantilla 13.96%, soca 40.60% y resoca 45.44% (Arcudia, Flores, Orta, y Torres, 2018).

Aunque existe una amplia variedad de plantas de caña de azúcar, el sector azucarero de la Entidad no cesa en la búsqueda por encontrar variedades con mayor rendimiento y resistencias, ya que en la actualidad los cambios climáticos provocados por la contaminación mundial y el calentamiento global han sido muy extremos. Esto ha afectado de manera directa e indirecta todo el ecosistema mundial donde cada vez es más difícil encontrar buenos nutrientes para las plantas y que a su vez no provoquen erosión o algún otro perjuicio a la tierra, agua y aire (Hernández y Hernández, 2013).

2.2.4. Etapas del ciclo de vida de la caña

La caña de azúcar tiene esencialmente cuatro fases de crecimiento (Figura 4): a) fase de establecimiento; la cual implica germinación y emergencia, ya sea en plantación (plantillas) o en rebrote (socas y resocas) de los cuales crecerán nuevos tallos (amacollado); b) fase de ahijamiento, formativa o reposo fisiológico; c) fase de crecimiento rápido; y c) fase de maduración y cosecha. Las cuales se describen en la Tabla 5, en la Figura 5 se aprecia el Ciclo fenológico y productivo de la caña de azúcar (Aguilar et al., 2010).

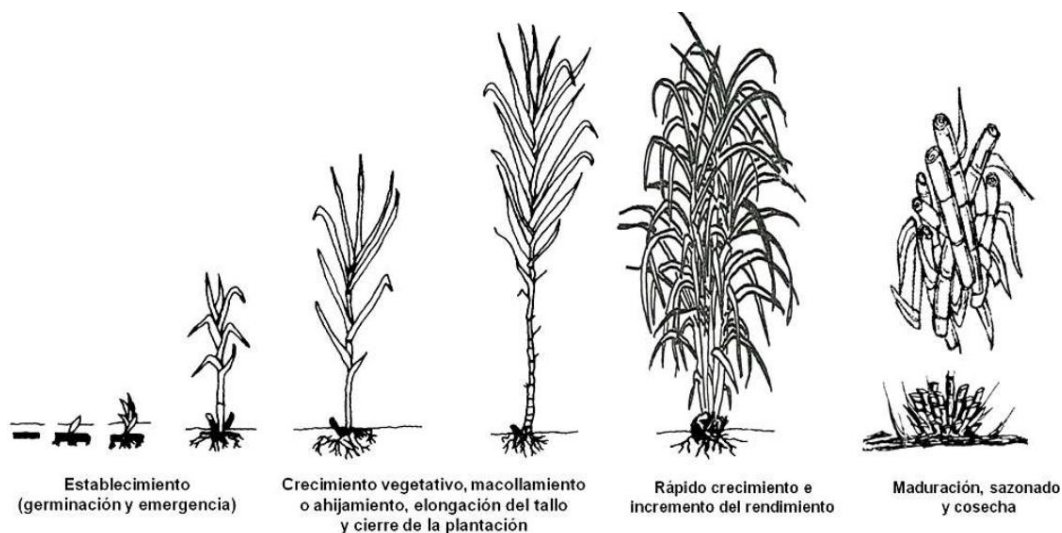


Figura 4. Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar.

Fuente: Aguilar et al., 2010

Tabla 5. Descripción de las etapas fenológicas de la caña de azúcar.

Fuente: Aguilar, 2011

ETAPA	DURACIÓN	DESCRIPCIÓN
Establecimiento (germinación y emergencia)	30 – 50 días	Es la iniciación del crecimiento a partir de las yemas presentes en los tallos plantados. Durante esta fase es necesaria la disponibilidad adecuada de agua y el control de malezas. Ya que el déficit hídrico tiene un impacto significativo sobre el rendimiento de azúcar debido a que propicia la reducción de la densidad de población de adultos debido al nuevo e insuficiente sistema de raíces pequeñas y poco profundas. La germinación de las yemas es influenciada por factores externos (humedad, temperatura y la aeración del suelo) e internos (sanidad de la yema, la humedad del esqueje, el contenido de azúcar reductor del esqueje y su estado nutricional). La germinación produce una mayor respiración y por eso, es importante tener una buena aireación del suelo. La época de plantación, como factor de manejo, incluye los efectos de la edad/calidad de la semilla o esquejes y, en especial, los de las variables ambientales. La incidencia del primer factor se relaciona con diferencias en el estado hídrico, nutricional, fisiológico y con el contenido y tipo de azúcares del esqueje. En cuanto al segundo factor, es ampliamente reconocido que la modificación de la fecha de siembra genera variaciones en el escenario ambiental, principalmente en las condiciones térmicas e hídricas, que inciden en la emergencia, en el desarrollo foliar y en la producción (Romero et al., 2005).
Crecimiento vegetativo, amacollado o ahijamiento, elongación de la plantación	50 – 70 días	El crecimiento y el rendimiento son muy sensibles a cualquier déficit de agua en esta etapa exigente; además la planta amacolla, se desarrolla mayor cantidad de follaje y la plantación comienza a cerrar. Es necesario aplicar fertilizante, para que las plantas puedan desarrollarse satisfactoriamente en la siguiente fase. La elongación del tallo es inicialmente rápida y, durante esta fase, el contenido de fibra del tallo es elevado, mientras que los niveles de sacarosa son todavía bastante bajos. Una temperatura cercana a 30°C es considerada como óptima para el ahijamiento.

		El ahijamiento es el proceso fisiológico de ramificación subterránea múltiple, que se origina a partir de las articulaciones nodales compactas del tallo primario. El ahijamiento le da al cultivo un número adecuado de hojas activas y tallos, que permiten obtener un buen rendimiento. Diversos factores, tales como la variedad, la luz, la temperatura, el riego (humedad del suelo) y las prácticas de fertilización afectan al ahijamiento. La incidencia de una iluminación adecuada en la base de la planta de caña durante el período de ahijamiento es de vital importancia.
Crecimiento rápido e incremento del rendimiento	180 – 220 días	Comprende desde el cierre del dosel hasta el inicio del periodo de madurez de los tallos. Se caracteriza por el aumento de biomasa y del número de tallos por área. La humedad es fundamental para que el sistema radical se desarrolle y pueda absorber los nutrimentos. Cualquier déficit de agua comenzaría el proceso de maduración y detendría la acumulación de sacarosa antes de su etapa óptima. Durante la primera etapa de esta fase ocurre la estabilización de los retoños. De todos los retoños formados sólo el 40 - 50% sobrevive y llega a formar cañas triturables. Esta es la fase más importante del cultivo, en la que se determinan la formación y elongación real de la caña y su rendimiento. En esta fase ocurre un crecimiento rápido de los tallos con la formación de 4-5 nudos por mes.
Maduración y sazonado	60 – 140 días	Se inicia alrededor de dos a tres meses antes de la cosecha para cultivos con ciclo de 12 meses, y de los 12 a los 16 meses de edad para los que completan el ciclo en 18 a 24 meses. En esta fase se requiere un bajo contenido de humedad del suelo, por lo que el riego debe ser reducido y luego detenerse para llevar la caña a la madurez; así, se detiene el crecimiento y se propicia la acumulación de carbohidratos y la conversión de azúcares reductores (glucosa y fructosa) a sacarosa. La maduración del tallo ocurre desde la base hacia el ápice y por esta razón la parte basal contiene más azúcares que la parte superior.
Cosecha	360 – 540 días	Los factores que afectan el sazonado de la planta de caña de azúcar son la edad, el contenido de nitrógeno del suelo y la humedad. Los factores ambientales pueden influir en la acumulación de sacarosa, incluido el estrés hídrico, los nutrimentos y la temperatura. Por regla general, la caña de azúcar es cosechada mediante un corte en la base del tallo, el cual se hace de forma manual o mecánica; la paja se elimina manualmente o es quemada previamente a la cosecha; ésta ocurre antes de la floración (12 a 18 meses después de la siembra).

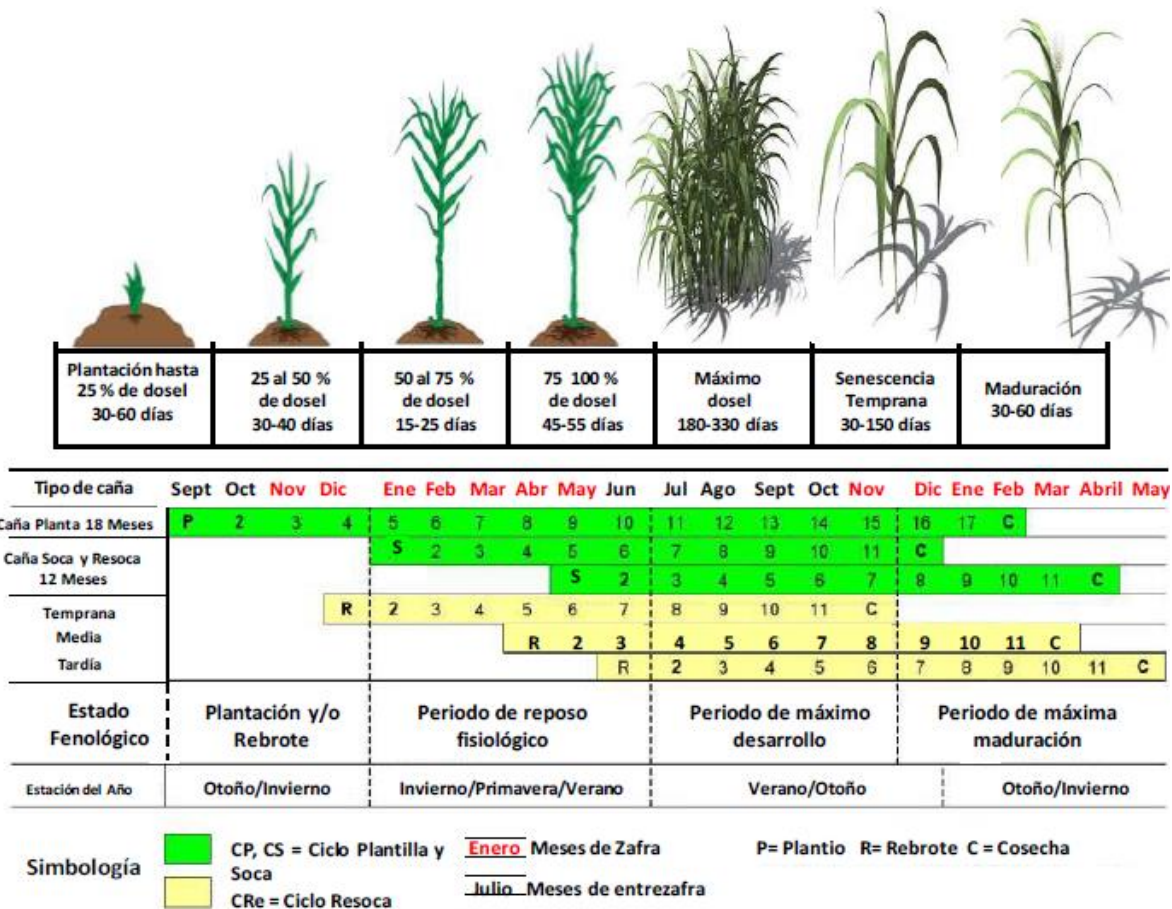


Figura 5. Ciclo fenológico y productivo de la caña de azúcar

Fuente: Aguilar et al., 2010

2.2.5. Fertilización

La caña de azúcar es una planta que se adapta a una gran diversidad de suelos y de condiciones edáficas en general; sin embargo requiere de 19 elementos que son esenciales (Tabla 6) para la caña de azúcar y se agrupan en tres grupos: los elementos no minerales (C, H y O), los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S y Si) requeridos en cantidades expresadas en % o en g/kg de peso seco y los micronutrientes (Fe, Zn, B, Cu, Cl, Mn, Ni, Na y Mo) requeridos en menores cantidades expresadas en % o en mg/kg de peso seco.

Para que un nutriente sea considerado esencial, debe tener una influencia directa sobre el metabolismo y fisiología del cultivo, de manera que su presencia resulte determinante para el cumplimiento de su ciclo de vida y que su acción no pueda ser reemplazada por otro elemento (Romero et al., 2009).

Tabla 6. Descripción de los elementos esenciales para la caña de azúcar.

Fuente: IFA, 1992. (IFA Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, 1992)

TIPO	ELEMENTO	FUNCIONES
NO MINERALES	C Carbono	Proviene del agua y aire.
	H Hidrógeno	
	O Oxígeno	
MACRONUTRIENTES	N Nitrógeno	Es el motor del crecimiento de la planta. Suple de uno a cuatro por ciento del extracto seco de la planta. Es absorbido del suelo bajo forma de nitrato (NO ₃ ⁻) o de amonio (NH ₄ ⁺). En la planta se combina con componentes producidos por el metabolismo de carbohidratos para formar aminoácidos y proteínas. Siendo el constituyente esencial de las proteínas, está involucrado en todos los procesos principales de desarrollo de las plantas y en la elaboración del rendimiento. Un buen suministro de nitrógeno para la planta es importante también por la absorción de los otros nutrientes.
	P Fósforo	Suple de 0,1 a 0,4 por ciento del extracto seco de la planta, juega un papel importante en la transferencia de energía. Por eso es esencial para la fotosíntesis y para otros procesos químico-fisiológicos. Es indispensable para la diferenciación de las células y para el desarrollo de los tejidos, que forman los puntos de crecimiento de la planta. El fósforo es deficiente en la mayoría de los suelos naturales o agrícolas o donde la fijación limita su disponibilidad.
	K Potasio	Suple del uno al cuatro por ciento del extracto seco de la planta, tiene muchas funciones. Activa más de 60 enzimas (sustancias químicas que regulan la vida). Por ello juega un papel vital en la síntesis de carbohidratos y de proteínas. Además, mejora el régimen hídrico de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y salinidad. Las plantas bien provistas con K sufren menos de enfermedades
	Ca Calcio	Es esencial para el crecimiento de las raíces y como un constituyente del tejido celular de las membranas. El objetivo de la aplicación de Ca es usualmente el del encalado, es decir reducir la acidez del suelo
	Mg Magnesio	Es el constituyente central de la clorofila, el pigmento verde de las hojas que funciona como un aceptador de la energía provista por el sol; por ello, del 15 al 20 por ciento del magnesio contenido en la planta se encuentra en las partes verdes. El Mg se incluye también en las reacciones enzimáticas relacionadas a la transferencia de energía de la planta.

	S Azufre	Es un constituyente esencial de proteínas y también está involucrado en la formación de la clorofila. En la mayoría de las plantas suple del 0,2 al 0,3 (0,05 a 0,5) por ciento del extracto seco. Por ello, es tan importante en el crecimiento de la planta como el fósforo y el magnesio; pero su función es a menudo subestimada.
	Si Silicio	Fortalece el tallo para resistir el vuelco.
MICRONUTRIENTES	Fe Hierro	Produce clorofila y actúa como un catalizador para el transporte del Oxígeno en las hojas para el proceso de la síntesis de la clorofila. La absorción del Fe es controlada por procesos metabólicos y entra a la planta a través de los pelos radicales. Su absorción se inhibe por la absorción de otros nutrientes como; el Mn, Cu, Mg, K y Zn. Debido a que es un elemento inmóvil dentro de las plantas, los tejidos jóvenes o zonas de crecimiento requieren de un suministro constante.
	Zn Cinc	Este nutriente es absorbido por las plantas de manera activa en forma de catión divalente Zn^{2+} en pH altos y también puede ser absorbido como catión monovalente $ZnOH^{+}$. La cantidad requerida por las plantas es significativamente mayor que el Cobre (Cu) y menor que el Mn. Al igual que el P, la absorción del Zn aumenta con la presencia de Micorrizas arbusculares, principalmente en cereales. En bajas temperaturas su absorción se reduce drásticamente, así como por antagonismo con otros elementos
	B Boro	Este nutrimento es requerido en pequeñas cantidades por las plantas. Es inmóvil dentro de las plantas y solamente puede moverse por el xilema de manera ascendente hacia los tejidos de crecimiento. El B se asocia con las auxinas, la síntesis y movimiento de los azúcares, se involucra en la producción de carbohidratos y la reducción del nitrato, es por ello que cuando no hay suficiente B se presentan síntomas de deficiencia de Nitrógeno a pesar de que se suministre bien. Además de ello, el Boro es sumamente esencial para la germinación y viabilidad del polen, la calidad de las semillas y por lo tanto el rendimiento final del cultivo.
	Cu Cobre	Este nutriente tiene similitud con el Hierro (Fe) en la fácil transferencia de electrones. Es absorbido por las plantas de manera activa y es capaz de reemplazar otros iones en los sitios de absorción. Dentro de la planta es móvil, esto es determinado por la absorción y disponibilidad del nutriente, es decir si tiene una baja disponibilidad y su absorción es pobre, su movilidad cesa y no puede translocarse a pesar de que existen otras partes de las plantas que lo demanden. El Cobre es un componente integral de los cloroplastos, por lo tanto, participa en la fotosíntesis. Es esencial en la formación de enzimas involucradas en la respiración, en la producción de energía y crecimiento. Otra función del Cu es evitar la lignificación (muerte celular o necrosis foliar) de las hojas, esto a menudo sucede en cereales. El Cu juega también un papel importante en la formación del polen, semillas, granos y frutos.

Cl Cloro	-
Mn Manganeso	Es absorbido de manera activa por las plantas y su óptima absorción se da en pH de 4.5 a 5.5. Es un nutriente relativamente inmóvil dentro de las plantas y su transporte se da de manera ascendente por la xilema. El Mn actúa como catalizador de energía activando las enzimas y participa en la producción de la clorofila. Además de las funciones mencionadas, el Mn acelera la germinación de las semillas, participa en la formación de vitaminas y junto al Fósforo (P) forman enzimas.
Ni Níquel	
Na Sodio	
Mo Molibdeno	Es controlado por procesos metabólicos y de manera activa. Es un elemento que se requiere en pequeñas cantidades, pero su ausencia trae graves problemas en las plantas. El Mo está involucrado en dos enzimas fundamentales; la Nitrato Reductasa y Nitrogenasa, cuyas enzimas son las responsables de la fijación del Nitrógeno, y su ausencia cesa la fijación de este importante macronutriente.

FERTILIZANTES QUÍMICOS.

También llamados fertilizantes inorgánicos o minerales; existen tres sustancias principales en la composición de los fertilizantes: el nitrógeno, el fósforo y el potasio; las proporciones en % de estos componentes en el fertilizante químico, están representados por la fórmula que acompaña a los fertilizantes. Esta fórmula consta de tres números separados por guiones, ejemplo: 20-20-20 o 20-0-10 etc., el primer número es la proporción de nitrógeno asimilable por la planta que contiene, el segundo la cantidad de fósforo y el tercero de potasio. Cuando los tres números tienen valor diferente de cero se dice que es un fertilizante completo. Aproximadamente 50% del aumento en el rendimiento de los cultivos de caña de azúcar, en todo el mundo, se debe a la utilización de fertilizantes químicos (CONADESUCA, 2015).

En la tabla 7, se pueden ver qué tipo de fertilizante se utiliza en cada ingenio de la huasteca potosina.

Tabla 7. Descripción de los fertilizantes usados por cada Ingenio.

Fuente: Aguilar, 2011

NOMBRE DEL INGENIO	FERTILIZANTE UTILIZADO
Alianza Popular	100-40-40, 100-60-60, 120-60-60 y 160-80-100
Plan de Ayala	28-14-14
Plan de San Luis	20-10-10
San Miguel del Naranjo	20-10-10

2.2.6. Calendario de actividades de campo.

En la Tabla 8 se describen las actividades realizadas en el campo de la Huasteca Potosina y en la Figura 6 se presenta un calendario con algunas de estas actividades.

Tabla 8. Descripción de las actividades del calendario de campo.

Fuente: Aguilar, 2011.

ACTIVIDAD	DESCRIPCION
Plantación.	Se comienza la preparación de suelo y la siembra en los meses de noviembre o diciembre (siembras de invierno). La caña se siembra en trozos de 60 cm de largo utilizando hasta 12 t ha ⁻¹ de tallos, que son sembrados con profundidades de 15 a 25 cm; la distancia entre surcos varía de 1.2 a 1.5 metros dependiendo si la cosecha será manual o mecanizada.
Fertilización.	En el caso de la plantación, el fertilizante se aplica en el fondo del surco al momento de la siembra; y para el caso de las socas y resocas el fertilizante se aplica antes de los 90 días posteriores a la cosecha.
Labores de escarda y aplicación de herbicidas.	En el caso de plantación, el control de arvenses se puede realizar químicamente en los días subsecuentes a la colocación de los esquejes mediante la aplicación de un herbicida pre-emergente. Para el caso de las socas y resocas la aplicación del herbicida se realiza cuando las arvenses alcanzan una altura entre los 5 y 10 cm.
Aplicación de madurantes (reguladores del crecimiento).	Las especificaciones de estos productos varían acorde con las características climáticas de la zona (precipitación, temperatura y horas luz) y de la variedad de caña que se esté cultivando. En cuanto al cierre del dosel, esto se refiere al momento en que las plantas de caña de azúcar han alcanzado una altura adecuada (alrededor de 1.5 metros) y las hojas de estas se entrecruzan provocando así que la incidencia de luz sobre el suelo cultivado sea menor, lo que reduce la densidad de arvenses nocivas para la caña de azúcar y se perfila el momento de cosecha o fin de las etapas fenológicas. El cierre de campo, entre otras cosas, depende de la distancia a la cual se encuentren los surcos, del amacollado y de las características de las variedades.
Ahuile de basura, remanga y requema de residuos (hojas, cogollos y chupones).	Actividad llevada a cabo una semana después de la cosecha; evita el desarrollo de malezas y contribuye a incrementar el contenido de materia orgánica del suelo.
Destronque.	Consiste en recortar los tocones que el cortador o la máquina cosechadora dejan en el campo, ya que el corte no se hace a ras del suelo. La permanencia de estas secciones reduce el poder de germinación y afecta la calidad de los retoños.
Subsolado.	Se realiza 10 días después del corte, y permite remover los primeros 30 o 40 cm del suelo compactados durante la cosecha, eliminar raíces viejas y muertas, estimular la formación de nuevas, recortar los bordes del surco para mantener la anchura entre líneas de plantación, favorecer la aireación y mejorar la eficiencia del riego.
Limpieza o descepada:	consiste en la eliminación de los desechos de los cultivos diferentes a la caña o en la remoción de las cepas viejas, en caso de renovación
Arada:	esta labor persigue romper e invertir la capa arable del terreno, a una profundidad de 25 cm en suelos poco profundos y de 35-40 cm en suelos profundos; se debe efectuar en época seca, con arados de disco o vertedera o también con rastras pesadas tipo Rome.

Rastrillaje (gradeo).	Se utiliza para cortar, desterronar y voltear el suelo, hasta mullirlo, así como para destruir e incorporar los residuos de cosecha. Se aconseja efectuar una o dos pasadas de rastra (grada), utilizando rastras de varios discos. Debe impedirse el afinamiento excesivo del suelo, especialmente en zonas muy ventosas.
Aplicación de cal agrícola.	La cal se puede incorporar después de arar o rastrillar, para asegurar la mezcla con el suelo de la capa superficial, práctica que asegura una adecuada neutralización en esta zona de gran actividad radical. La presencia de humedad adecuada (cercana a capacidad de campo) es fundamental para la reacción del correctivo en el suelo. En términos globales, la dosificación de cal varía entre 0,5 y 2 toneladas de carbonato de calcio por hectárea
Surcada.	Los surcos, si las condiciones y la topografía del terreno lo permiten deben ser trazados en pendientes de 1 a 2%, en líneas rectas o en contorno. Para esta labor se utiliza un surcador de uno y dos cuerpos, en dependencia de la potencia del tractor con que se hace la labor. Los surcadores trabajan a una profundidad aproximada de 25-30 cm y la tierra que desplazan hacia los lados forma los caballones.
Aporcadura o redondeo.	Se realiza durante las primeras semanas después de la cosecha; es una práctica cultural que consiste en acercar suelo al caballón que se forma sobre la línea de plantación, permitiéndole a la planta un mayor anclaje y resistencia al vuelco, a la vez que evita la excesiva humedad al pie de la planta. El riego que inicialmente se realizaba en el surco situado en la línea de plantación, se cambia para el nuevo surco formado a lo largo del antiguo caballón.
Resiembra.	Consiste en plantar nuevos esquejes en los sitios donde el material no germinó o donde las plantas se perdieron después de la cosecha. Esta práctica debe hacerse dentro de los 10 días siguientes a la emergencia del 80 % de la población, es decir, a los 40 días de la plantación.
Control de arvenses.	Se ha encontrado que el período crítico de competencia de la caña planta con las arvenses, ocurre entre los veinte y cien días después de la plantación, y para las socas entre los veinticinco y noventa días después del corte. A partir de los noventa o cien días del cultivo, la sombra que proyecta el follaje es suficiente para no permitir el crecimiento de las arvenses. Se define como "período crítico de competencia" aquel en que la plantación de caña debe estar libre de arvenses o con la mínima presencia de ellas para que no reduzcan significativamente el rendimiento por unidad de área.
Cosecha.	La cosecha de la caña es la culminación de todos los esfuerzos sostenidos durante los 12 a 18 meses que el tallo tarda en llegar a su madurez industrial. Desafortunadamente, en muchos casos no se le da la debida atención
Resiembra.	Uno de los factores que más inciden en la productividad y rendimientos de la agricultura cañera es la despoblación de cepas por eso se debe plantar en los espacios vacíos para lograr poblaciones con más del 95% de plantas por hectárea. Una despoblación se considera a partir de una distancia de 40 cm entre cepa y cepa.

CICLO PRODUCTIVO	CICLO SOCA												
	MES	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
AÑO	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Fertilización N													
Fertilización P													
Fertilización K													
Aplicación de herbicidas													
Riego													
Aplicación de cal													

CICLO PRODUCTIVO	CICLO RESOCA								
	MES	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
AÑO	18	18	19	19	19	19	19	19	19
Fertilización N									
Fertilización P									
Fertilización K									
Aplicación de herbicidas									
Riego									
Aplicación de cal									

Figura 6. Calendario de actividades para el cultivo de caña de azúcar.

Fuente: Aguilar et al., 2010

2.3. Sitio Ramsar

Recientemente se ha reconocido a los humedales entre los ecosistemas más importantes de la tierra por la gran biodiversidad que albergan (Tapia et al., 2010).

Cowardin, Carter, Golet y LaRoe (1979), presentaron una de las definiciones más comprensibles de lo que representa un humedal y es una de las más aceptadas en la actualidad; define a estos sistemas como: "áreas en donde la saturación de agua es el factor dominante que determina la naturaleza del desarrollo del suelo y del tipo de comunidades de plantas y animales que viven en el suelo o en su superficie. La característica que todos los humedales comparten es que el suelo o el sustrato está al menos periódicamente saturado o cubierto con agua. Los humedales son áreas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, en donde el nivel freático usualmente está a nivel de superficie o cerca de ésta, o la superficie está cubierta por aguas someras" (Téllez, 2018).

La Convención de Ramsar los define como zonas húmedas desde "extensiones de marismas, pantanos o turberas cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros" (SEMARNAT, 2007).

En México, la Convención Ramsar fue aprobada por la Cámara de Senadores del Congreso de la Unión en 1984. El instrumento de adhesión de la Convención fue firmado por el presidente Miguel de la Madrid en 1985 y depositado ante el Director General de la UNESCO en 1986, en este mismo año se designó el primer Sitio

Ramsar del país (la Reserva de la Biósfera Ría Lagartos) ubicada en el Estado de Yucatán.

Como nos menciona el plan de manejo del Humedal “Ciénega de Cabezas”, (2007). En el 2008 se decreta como sitio RAMSAR a la Ciénega de Cabezas, Municipio de Tamasopo en el estado de San Luis Potosí y también ha sido designado una Área Prioritaria para el Manejo y Conservación en el estado. Cuenta con una superficie de aproximadamente 1,560 hectáreas ubicado en la región Huasteca del estado. Recibe agua subterránea de manantiales, funciona como zona de amortiguamiento y filtro del agua. El humedal es a la vez ecológica y económicamente importante para las comunidades que la rodean, y contiene una biodiversidad única de plantas y animales como el cocodrilo de pantano, aves migratorias y otras especies.

El ecosistema funciona con un nivel alto de biodiversidad y recursos naturales, sin embargo, la agricultura de caña, la ganadería bovina, y creciendo poblaciones humanas han tenido efectos negativos al humedal sobre los últimos treinta años. Por ejemplo, un análisis de fotos aéreas indica una pérdida de aproximadamente 574 hectáreas del humedal desde los 1970s por la ampliación de la agricultura de caña y expansión de la ganadería. Otro daño incluye sedimentación, demanda por agua potable y de riego, y contaminación del agua por agroquímicas y la vivienda no-sustentable.

Actualmente la CONANP impulsa el cumplimiento de la Convención en los Sitios Ramsar que se encuentran dentro de Áreas Naturales Protegidas Federales y facilita procesos para que todos los actores relacionados con los Sitios Ramsar den cumplimiento a este compromiso internacional que, a través de los procesos ecológicos de los humedales, brinda beneficios a todos los mexicanos.

3. CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en México en el estado de San Luis Potosí, en la región centro occidente de la zona Huasteca (Figura 7). El presente estudio se centra en una porción del río Gallinas, el cual nace de la unión del río Santa María y el río Verde, estos pertenecen a la Cuenca del Río Tamuín, también conocida como Cuenca del Río Tampaón, la cual forma parte de la Región Hidrográfica del Pánuco (26), dentro de la Región Hidrológico-Administrativa IX Golfo Norte.

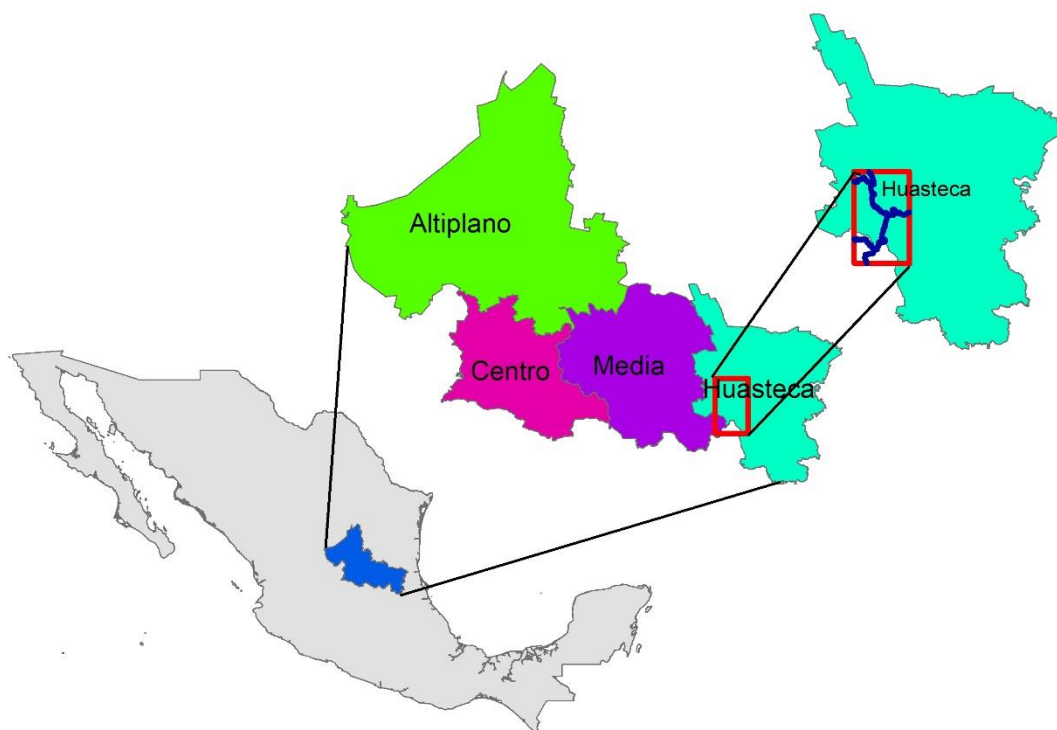


Figura 7. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La trayectoria del río Gallinas incluye los municipios de Aquismón, Tampasopo y Ciudad Valles. La toma de muestras comienza en la localidad de Rascón de ahí, se siguió la trayectoria para recabar las demás muestras hacia el sur sobre el río Gallinas. Incluye una zona muy importante la Ciénega de Cabezas ya que, como se había mencionado, es considerado un sitio RAMSAR, el cual es un humedal con una superficie de aproximadamente 1,560 hectáreas recibe agua subterránea de manantiales, funciona como zona de amortiguamiento y filtro del agua.

La Huasteca Potosina pertenece a la subprovincia del Carso Huasteco, esta región kárstica es una de las más extensas del país. Abarca el 14.65% de la superficie total del estado Potosino. Dentro de la zona de estudio se destacan las formaciones

Tamasopo, El Abra, y Méndez las cuales se caracteriza por estar conformada principalmente de rocas calizas, compactas y solubles que al ser disueltas por flujo.

3.2. Vegetación

Los tipos de vegetación son predominantemente arbóreos, destacando entre ellos los bosques de encino, encino-pino, pino-encino y las selvas, alta perennifolia y baja caducifolia. El bosque de encino que está constituido por árboles del género *Quercus*, es el más abundante, y se ubica principalmente en las sierras (en altitudes que fluctúan entre 700 y 1 000 m aproximadamente), sobre suelos someros como los Litosoles y las Rendzinas. Este tipo vegetativo se encuentra concentrado en el oeste de la sierra calcárea con dolinas, donde forma una franja que atraviesa este sistema en dirección norte-sur, desde la localidad de Agua Zarca hasta el límite con el estado de Querétaro. Otras agrupaciones importantes de esta especie se localizan al este de San Cirilo de Acosta y al noroeste de Xilitla. Existen áreas bastante grandes que han sido taladas para abrir nuevos terrenos a la actividad agrícola, quemadas para la inducción de pastos destinados al ganado o bien para usar la madera de los elementos vegetativos en forma doméstica, para construcciones, muebles, postes, leña, etcétera. Los bosques mixtos (pino-encino y encino-pino) se encuentran fundamentalmente al este de la subprovincia, sobre la sierra alta de laderas abruptas, donde también se halla la única zona con bosque de pino, que se desarrolla sobre suelos ácidos. La altitud máxima a la que se encuentra es de 2 200 m. En general los bosques están formados por tres estratos principales, alto de *Pinus* y *Quercus* (según el caso domina uno y otro), medio, arbustivo y bajo, compuesto por pastos. Estos dos últimos se originan debido a la perturbación que sufre la vegetación por la actividad del hombre. La selva alta perennifolia, es un tipo de vegetación que se desarrolla en zonas con mucha precipitación. Se localiza en la sierra alta de laderas abruptas al sureste de la subprovincia, donde el clima es cálido con lluvias abundantes durante el año. Presenta árboles de más de 30 m de alto, que no tiran sus hojas en ninguna época. En los lugares donde las perturbaciones son mínimas los estratos inferiores no se presentan, debido a la poca luz que pasa a través del follaje. Es común encontrar áreas que han sido desprovistas de la vegetación natural de selva para dar paso a actividades agrícolas. La selva baja caducifolia se encuentra en el centro de la región, en la sierra calcárea con dolinas y también sobre el valle, el cañón y la llanura inter-montaña al noreste de Santa Catarina, donde el clima es semicálido. Los árboles que la constituyen tienen de 6 a 15 m de alto, su follaje cae en la época del año en un 75% lo que le da una tonalidad grisácea. Algunas de las especies más importantes que la constituyen son: chaca (*Bursera simaruba*), cedro (*Cedrela odorata*), higuerón (*Ficus* sp), rajador (*Lysiloma divaricata*), orejón (*Enterolobium cydocarpum*) y limoncillo (*Citrus* sp). Otros tipos de vegetación presentes en el Carso Huasteco son: el bosque mesófilo de montaña, el matorral submontano que forma un manchón bastante grande en el centro y norte de la sierra de laderas convexas, el matorral crasicale, el chaparral y pastizales naturales y cultivados. (INEGI, 2002)

3.3. Clima

El estado de San Luis Potosí es característico por su variedad de vegetación y clima, se divide en cuatro zonas principales, el área de estudio en cuestión pertenece a la zona Huasteca. Esta se caracteriza por un clima Cálido Subhúmedo con lluvias en verano, se presentan con diferentes rangos de humedad; el menos húmedo comprende áreas del municipio de Tamuín y la totalidad del municipio de Ébano; su temperatura media anual oscila entre los 27° y los 29°C y la media mensual más alta, que se registra entre mayo y junio, fluctúa entre 28° y 32°C; la más baja se da en enero, con valores de 18° a 21 °C. La precipitación media anual varía de los 848 a los 1 062 mm, con una concentración máxima, en los meses de julio y septiembre, de 196 mm y una mínima de 15 mm en febrero. (INEGI,2002)

Dávila (2017) presenta la Figura 8 en la cual se muestra la precipitación media mensual de la cuenca del río Gallinas, con la información de CLICOM (2016). Donde se aprecia claramente que el mes con mayor precipitación es julio y el de menor precipitación es febrero.

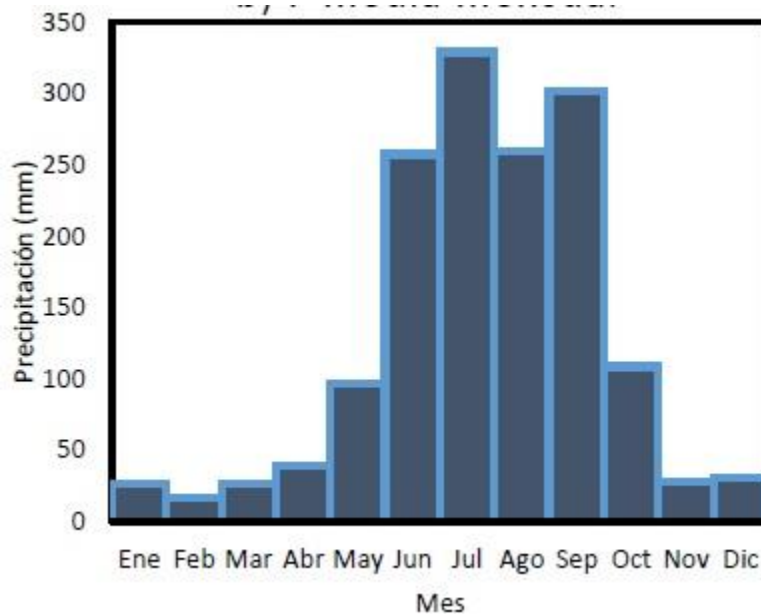


Figura 8. Precipitación media mensual en el periodo 1971-2000 en la cuenca río Gallinas

Fuente: Dávila, 2017.

Como nos menciona Dávila (2017), la caracterización climatológica de la cuenca Río Gallinas como se aprecia en la Figura 9, pertenece a tres clasificaciones diferentes Cwa (templado seco en invierno y caliente en verano), Am (tropical monzón) y Aw (Tropical sabana) esta es en base a la clasificación de Köppen-Geiger.

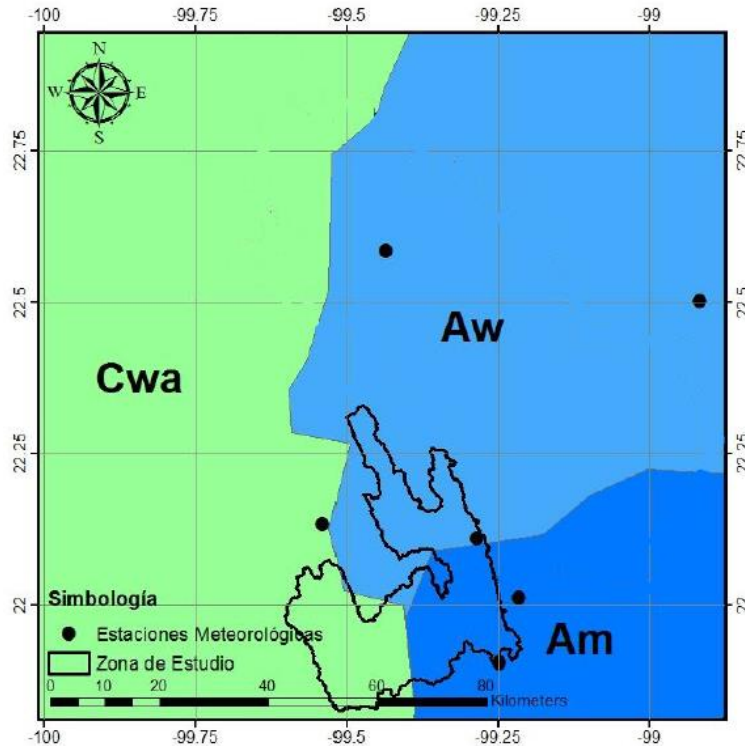


Figura 9. Climas presentes en el área de estudio según la clasificación climática Köppen-Giger.

Fuente: Dávila, 2017.

3.4. Hidrografía

Las aguas superficiales del estado de San Luis Potosí están distribuidas en tres regiones hidrológicas: RH37 “El Salado”, RH26 “Pánuco” y RH12 “Lerma-Santiago”.

La región hidrológica RH26 “Pánuco”.

Cubre el 43.38% de la superficie estatal, drenando las aguas a través de los ríos Verde, Santa María, Tampaón (Tamuín) y Moctezuma hacia el río Pánuco para finalmente verter sus aguas al Golfo de México. Las cuencas de esta región hidrológica y la porción del territorio estatal que cobijan son: Río Tamuín (36.49%), Río Moctezuma (4.8%), Río Pánuco (1.23%) y Río Tamesí (0.86%).

En referencia a las aguas subterráneas la CONAGUA tiene delimitados 19 acuíferos en la entidad, de los cuales 10 están sobreexplotados. En general el estado presenta un balance hídrico positivo; es decir que la recarga supera a la extracción, con una disponibilidad de 79 millones de metros cúbicos. Los acuíferos más sobreexplotados son: 2411 San Luis Potosí, 2402 El Barril, 2408 Villa de Arista y 2417 Santa María del Río; entre estos cuatro suman un déficit de 200 millones de metros cúbicos.

3.5. Fisiografía

San Luis Potosí está conformado por tres (SMO, Mesa del centro y llanura costera del golfo norte) de las quince provincias de México (Figura 10), de las cuales se dividen en ochenta y ocho subprovincias de las que corresponden nueve al estado, como se puede apreciar en la Figura 11. El área de estudio pertenece a la provincia de SMO que está constituida por rocas sedimentarias de origen marino, calizas y lutitas, principalmente de la era mesozoica; los estratos de estas rocas están doblados a manera de grandes pliegues que forman una sucesión de crestas alternadas con bajos; las cumbres oscilan entre los 2,000 y 3,000 m. y en específico a la subprovincia del Karst Huasteco.



Figura 10. Provincias Fisiográficas de México.

Fuente: INEGI, 1983

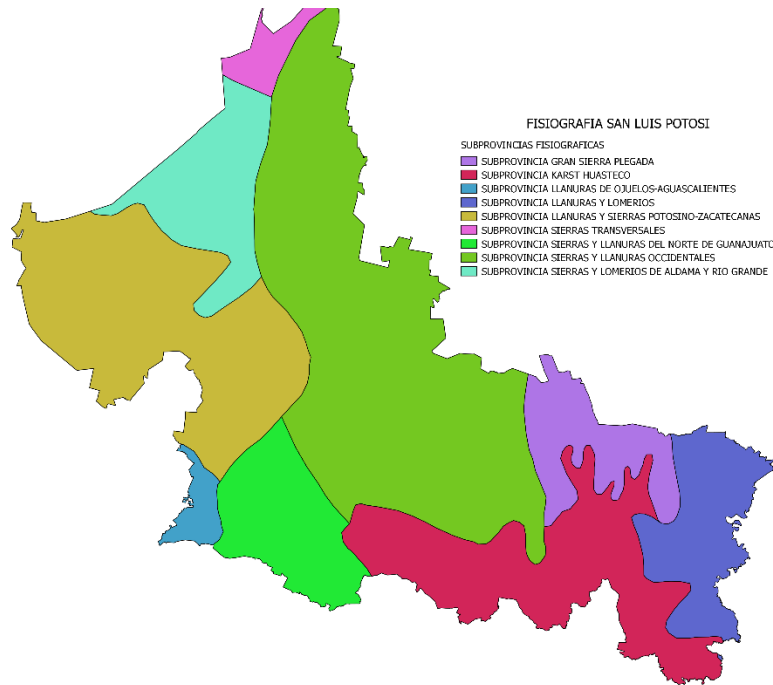


Figura 11. Subprovincias Fisiográficas del estado de San Luis Potosí
Fuente: Elaboración propia, 2019 con datos de la CONABIO.

3.6. Geología

La región donde se localiza el río Gallinas pertenece a la a la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PV-SLP), la cual forma parte de la provincia de la SMO se caracteriza por la presencia predominante de rocas calizas, estas han sido sometidas a un largo proceso de meteorización por las aguas, dando origen al conocido Carso Huasteco.

Las rocas sedimentaras que forman a esta plataforma son de edad Mesozoica, conformada básicamente por sedimentos marinos de distintas facies; que presentan gran cantidad de pliegues, cabalgaduras y fallas.

En la Figura 12 se presenta el mapa geológico del área en cuestión se identificaron las formaciones de El Abra, Tamasopo, Agua Nueva, San Felipe, Cárdenas y Méndez, todas provenientes del sistema Cretácico. Como se puede observar en la Figura 13 la sección geológica se aprecia que la formación principal es la de El Abra.

A continuación, se detalla cada una de ellas. La geología descrita a continuación se tomó del informe final compilación geológica prospecto Xilitla IEG32, de Petróleos mexicanos coordinación regional de exploración zona norte super intendencia de paleontología regional y paleo sedimentación de 1986.

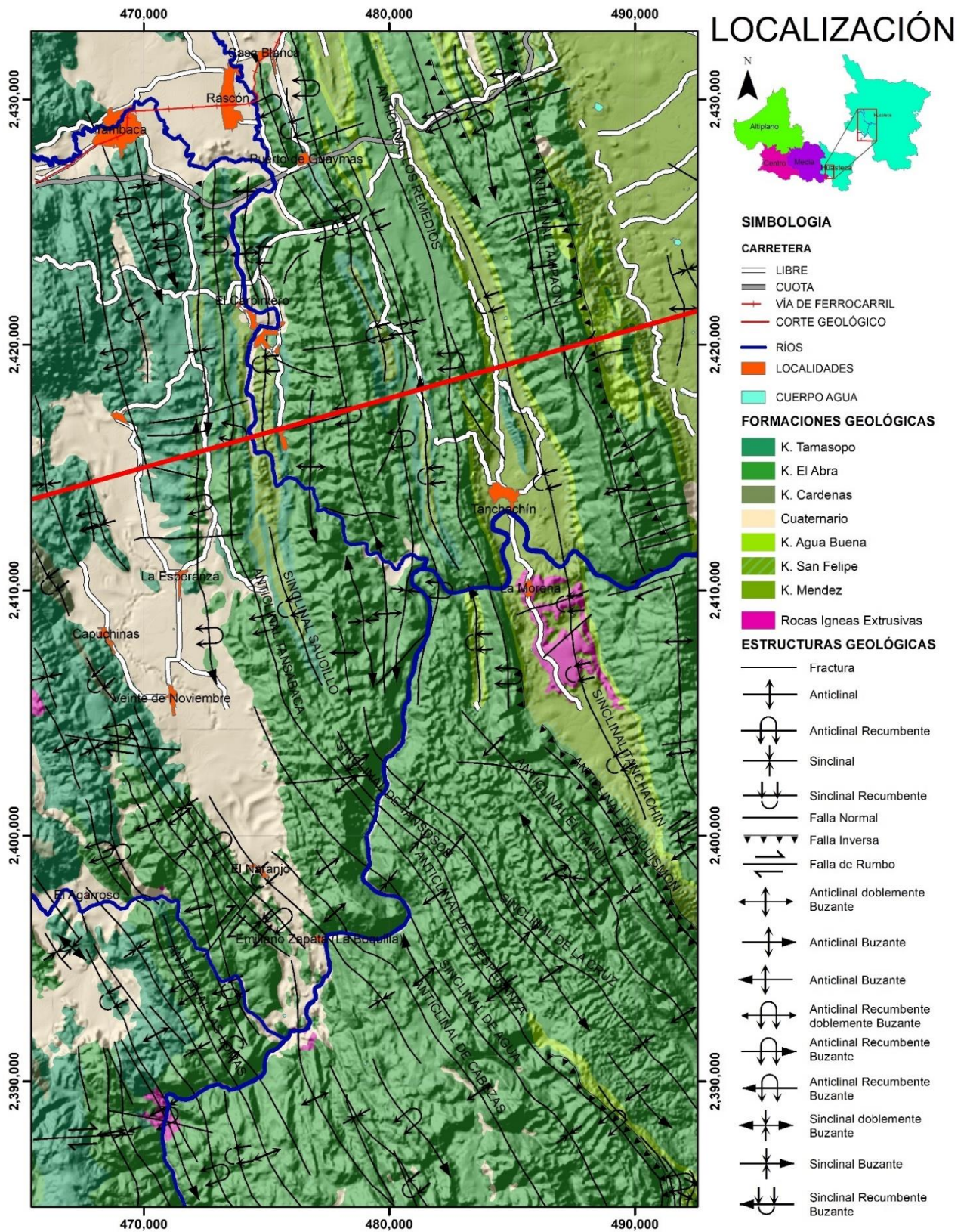


Figura 12. Mapa Geológico del área de estudio

Fuente: Elaboración propia, 2019. Con datos del informe final compilación geológica prospecto Xilitla IEG32.

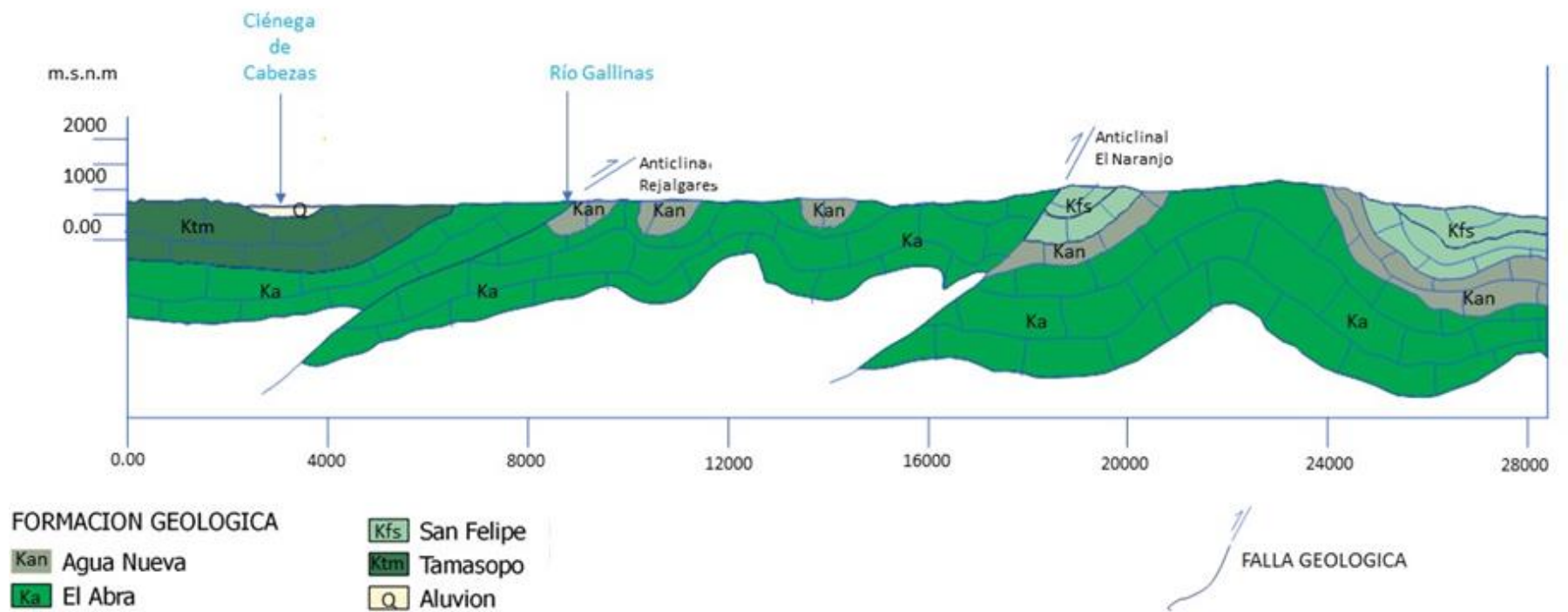


Figura 13. Sección Geológica del Área de estudio
 Fuente: Elaboración propia,2019. Con datos del SGM.

EL ABRA

(Nombrada por Gardias en 1915)

Litología y Espesor

La importancia económica de esta Formación ha hecho que se le estudie detalladamente; originalmente Miur (1936) la dividió en dos facies: Taninul (de rudistas) y El Abra (de miliólidos). En fechas recientes algunos geólogos de PEMES la subdividen en tres Facies:

Pre-arrecifal (Formación Tamabra), arrecifal (Facies Taninul) y arrecifal (Facies El Abra)

La Facies Arrecifal (Taninul) está representada por cuerpos arrecifales con caprínidos, radiolítidos, nerineas, tucisias, equinodermos y algunos corales; estos cuerpos se alinean estrechamente bordeando la plataforma Valles- San Luis Potosí.

La Facies Taninul presenta un espesor del rango de 2000 metros.

La Facies post-arrecifal (Facies El Abra) consiste en wackes-tone-packstone de miliólidos, otrácodos, pellets, intraclastos y bioclastos, color café y crema, en capas de 0.4 a 2 metros, de espesor, se observa una parcial recristalización y dolomitización; en algunas áreas se presentan brechas calcáreas café claro en cuerpos de 10 a 30 cm de espesor.

El Abra, por su origen arrecifal (bioherma) presenta un espesor sumamente irregular variado entre los 98 y los 2600 metros.

El pozo Culmena 1 atravesó 2670 metros. Dentro de esta Formación, aunque probablemente por repeticiones en la columna debido a fallas inversas.

Sedimentología

Se acepta que El Abra se depositó en Plataformas estables, amplias y de aguas someras, las cuales presentaban principalmente ambientes tanto arrecifales como post-arrecifales. Dichas plataformas, por una continua subsidencia pudieron sustentar un potente paquete sedimentario cuyas características litológicas y paleontológicas indican que se depositó en aguas bien oxigenadas y cálidas.

Relaciones estratigráficas

La posición estratigráfica de El Abra varía de región a región; descansa concordantemente sobre la Tamalipas Inferior, la Guaxcamá y la Santuario, así como la Horizonte Otates y a una columna de rocas carbonatas de edad Neocomianocordantemente a la Agua Nueva y Tamasopo (oriente de la Plataforma

Valles- San Luis Potosí) y a la Formación Soyotal. En el pozo Tamalihuale 1, El Abra subyace discordantemente a la Formación San Felipe. Algunos de estos aspectos se expresan en los anexos 26 y 27, (Fig. 2 y 2-A)

Edad y correlación

En términos generales a la formación El Abra se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano; Esta formación se correlaciona por edad con las Formaciones Tamaulipas Superior, Cuesta del Cura y Tamabra.

Distribución

Los afloramientos de El Abra son extensos en la región de que se informa, y varios pozos dentro de ella la han alcanzado, tanto en la Plataforma Valles- San Luis Potosí como en la Provincia Tampico-Misantla. Aflora en el área correspondiente a las hojas F14-C-19, F14-C-27, F14-C-29, F14-C-37, F14-C-38, F14-C-39, F14-C-48 y F14-C-49.

Paleontología

El conjunto de fauna fósil identificado en esta Formación, por paleontólogos al servicio de PEMEX es sumamente extenso se encuentran, entre otras especies: *Parkeria sphaerica* Carpenter, *Acteonella* Sp., *Monopleura* Sp., *Soleonopora* Sp., *Nerinea* Sp., *Toucasia* Sp., *Toucasia Texana*, *Requienia* Sp., *Eoradiolites davisoni* Hill, *Gryphaea* Sp., *Caprina occidentalis* Conrad, *Caprinula* cf. *C. anguís* Roemer, *Sauvagesia Texana* Roemer, *Pactan* of. *p. Bonellensis* Kuiller, *Capriniloideamultitubefa* Palmer, *Pecten* of. *bonellensis* Kniker, *Pecten roemeri*, Hill, *Lima wacoensis* Roemer, *Chondrodonta* of. *C. mursoni* Hill, *Trochus* Sp., *Turritela* Sp., *Kingena* of. *wacoensis* Roemer, *Nummoloculina heimi* Bonet, *Coskinolinoides texanus*, *Tilocolina* Sp., *Spiroloculina* Sp., *Orbitolina texana* Roemer, *Oycilcina Schlumberger* Munier, *Dictyoconus wainutensis* Carsey, *Heferohelix reussi* Cushman, *Calciphaerula onnomianata* Bonet, *Pithonella ovalis* Kauffma, *Pithonella trajoi* Bonet, *Stomispahera sphaerica* Kauffman, *Clobigerina aspera*, *Microcalamoides confusus*, *Marginotruncana canaliculata* Reuss, *M. helvética* Bolli, *Clobotruncana* Sp., *Rotalipora* Sp., *Sigmoilina* Sp.

Además, dentro de los macrofósiles no clasificados se citan equinodermos, rudistas, toucasias, caprínicos y otros.

TAMASOPO

(primeramente, estudiada por Bose en 1906 y Carrillo le dio nombre en 1971)

Litología y espesor

Esta formación se ha dividido en dos miembros: Inferior y Superior. El miembro Inferior algunos autores lo llaman “Facies mixtra del Turoniano”, y otros “Formación Agua Nueva Mixta”. El miembro Inferior se compone de una alternancia de mudstone y packstone arcilloso, de color café claro y crema, en ocasiones con zonas de dolomitización y escasos módulos y bandas de pedernal gris; su estratificación en general se presenta en capas de 10 a 20 cm.

El espesor máximo de este miembro es del orden de 300 m.

El miembro Superior de la Tamasopo se presenta como una secuencia de wackestone-bounstone con fragmentos biógenos; excepcionalmente se encuentra grainstone de fauna bentónica; su coloración predominante es café claro, y se presenta en capas de espesor variable entre 10 y 90 cm. Y el espesor máximo de este miembro es del rango de 1600 m., por lo cual el de la Formación Tamasopo es del orden de 1900 m.

Sedimentología

Después del resultado de detallados análisis petrográficos y paleontológicos, se infiere que el miembro inferior de la Tamasopo fue depositado en depresiones de extensión modesta dentro de una plataforma, o bien en márgenes de plataforma con caracteres de cuenca somera. El miembro Superior debe haberse depositado en ambiente marino somero de baja energía a lagunar, limitado por barreras orgánicas (arrecifes).

Relaciones estratigráficas.

La formación Tamasopo subyace a la Formación Cárdenas y supra yace a El Abra, en ambos casos concordantemente.

Edad y Correlación

Bose consideró a la Tamasopo como de edad Turoniano-Santoniano, posteriormente se ha considerado que más bien debe ubicarse desde el Turoniano hasta el Santoniano. Se correlaciona en su porción Inferior con el agua Nueva, y en la Superior con la Soyatal y San Felipe.

Distribución

La Tamasopo aflora extensamente en el área correspondiente a las hojas F14-C-17, F14-C-18, F14-C-19, F14-C-27 y F14-C-28; sus afloramientos se alinean sobre una superficie burdamente semicircular, con algunos cuerpos arrecifales.

Paleontología

Dentro de los microfósiles: *Sulcoperculina flobosa d'cizancourt*, *Suloperculina dickersoni* Palmer, *Orpitooides tissiti* Schlumberger, *Lepidorbitoides minor* Vaughan, *Ayalaina rutteni* Palmer, *Bordelis cardenasensis* Barker, *Calcispherula innominata* Bonet, *Stomiosphera sphaerica* Kauffman, *Nummaloculina heimi* Bonet, *Boshopella alata*, *Valvulina* Sp., *Pseudorbitoides* Sp., *Quinqueloculina* Sp., *Pseudocyclamina* Sp., *Siderolites* Sp., *Cuneolina* Sp. Y otros. Dentro de los macrofósiles se citan: *Coralliocnema* Sp. *Tamsia* Sp. *Durania* Sp., Asi como corales y pelecípodos , restos de ruditas, etc.

AGUA NUEVA

(Nombrada por Stephenson en 1921)

Litología y espesor

Dentro del área que nos ocupa, esta Formación fue descrita por Sellards (1936) como constituida por tres miembros: el inferior, formado por capas de caliza con intercalaciones de lechos delgados de lutita; el medio es predominantemente arcilloso, con intercalaciones delgadas de caliza, y el miembro superior representado por una alternancia de lutitas negras y calizas del mismo color.

En la porción oriental de la Plataforma Valles- San Luis Potosí, está Formación se ha descrito como interestratificaciones de calizas arcillosas, en capas delgadas, de grano fino a medio, color gris a negro y lutitas laminares, de color gris oscuro a negro, con bandas y lentes de pedernal negro. En el área de Xilitla la litología descrita para esta Formación no se ajusta a la de la localidad tipo, ya que consiste en areniscas calcáreas de estratificación delgada, color gris, con intercalaciones de lutitas color café rojizo por interperismo.

En la Provincia Tampico- Misantla, por geología del subsuelo se ha identificado, en la base de esta Formación un conglomerado de cistos de caliza, lutita y pedernal, así como escasas capas delgadas de bentonita verde. Las capas dentro de esta Formación presentan espesores entre los 20 y 60 cm.

El espesor de la Agua Nueva fluctúa entre los 30 y los 500 m.

Sedimentología

Se infiere que esta Formación se depositó en un ambiente de mar abierto, en un borde de plataforma y cuenca, a profundidades nerítico-batiales.

Relaciones estratigráficas.

Se ha observado que en la localidad tipo, esta Formación descansa concordantemente sobre la Cuesta del Cura, y subyace en la misma forma a la San Felipe al poniente de Zimapán, Hgo. Pero en otras áreas supra yace en discordancia

a las Formaciones El Abra, Tamabra y Cuesta del Cura, y subyace a la Cárdenas (Sierra de Alvarez). En la región de Xilitla la Formación Agua Nueva descansa discordantemente sobre El Abra. En la provincia Tampico-Misantla, por métodos de subsuelo, se ha encontrado esta formación subyaciendo a la San Felipe concordantemente, y descansando sobre la Tamaulipas Superior.

Edad y Correlación

En general se le asigna una edad Tironiano, dentro del área de referencia se correlaciona por edad con la Soyatal y Tamasopo (parcialmente).

Distribución

Aflora esta Formación en los flancos del anticlinorio de Huayacocotla, así como en varios anticlinales dentro del área de que se informa. Varios pozos, de la provincia Tampico- Misantla han alcanzado la Formación Agua Nueva.

Paleontología

Los paleontólogos al servicio de PEMEX han identificado entre otros, los siguientes fósiles: *Inoceramus labiatus sholetim*, *Inoceramus hereynicus Petrasheck*, *Mantelliceras aff. Couloni d'Orbigny*, *amonitas del cenomaniano*, *Marginotruncanasigali Reichel*, *Marginotruncana difformis Gandolfi*, *Marginotruncana indica Jacob y Sastry*, *Marginotruncana canaluculata Reuss*, *Whiteinella archasocretacea Pessagno*, *Globotrucana coronata*, *Globotrucana havanensis*, *Globotrucana sigali*, *Rotalipora appenninica Renz*, *Rotalipora Turonica*, *Pithinella ovalis Kauffman*, *Stomiosphaera sphaerica Bonet*, radiolarios, dientes y escamas de peces.

SAN FELIPE

(nombrada por Jeffrey en 1910 y mencionada formalmente por Muir hasta 1936)

Litología y espesor

Consiste esta Formación de wackestone y mudstone arcilloso, gris oscuro, estratificado en capas de 20 a 40 cms. de espesor, con intercalaciones de lutita gris estratificada en lachos delgados y de bentonita verde en capas de 2 a 15 cms.

La San Felipe tiene, dentro del área de referencia un espesor que va de unos cuantos metros hasta 150 mts. El pozo Maguey No. 3 penetró 267 m. dentro de esta formación.

Sedimentología

La San Felipe se depositó en áreas próximas a superficies positivas que contenían la fuente de los sedimentos terrígenos y aparatos volcánicos; el ambiente de depósito fue posiblemente batial a nerítico.

Relaciones estratigráficas.

En término general la formación San Felipe subyace concordantemente a la Méndez y sobreyace en la misma forma a la Agua Nueva, aunque se ha informado que el a porción oriental de la Plataforma Valles- San Luis Potosí descansa en discordancia sobre El Abra.

En sentido de oriente a poniente cambia de facies y corresponde al mismo miembro Superior de la Tamasopo.

Se indican gráficamente algunas características estratigráficas de la San Felipe.

Edad y Correlación

En el área de Xilitla, SLP, se ubica dentro del coniaciano – Santoniano; en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental la edad de la San Felipe varía entre el Santoniano temprano al Campaniano temprano. Se correlaciona dentro del área de referencia con las formaciones Tamasopo y Soyatal.

Distribución

La Formación San Felipe aflora profusamente al oriente de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, en los flancos del anticlinorio Huayacocotla, así como en varios anticlinales dentro del área de que se trata; en la Provincia Tampico- Misantla numerosos pozos la han alcanzado.

Paleontología

Los paleontólogos de PEMEX han reportado que la San Felipe contiene entre otras, la siguiente fauna fósil: *Balanocrinus mexicanus Springer*, *Ostrea plumosa Morton*, *Ostrea congesta Conrad*, *Durania Manuelensis Stephenson*, *Sauvagesia delgolyeri stanton*, *Inoceramis unduloplicatus*, *dictyinitra multicostata*, *lamelibranquis indeterminados*, *globotruncana fornicata*, *Globotruncana concavata*, *Globotruncana calcarata*, *Globotruncana lapparenti*, *Globotruncana arca*, *Globotruncana stuarti*, *Marginotruncana renzi Gandolfi*, *Rotalipora cushmani*, *Dicarinelia concavata*, *Calcisphaerula inmoniaata*, *radiolarios*.

CÁRDENAS

(en 1906 Bose la llamó “División Cárdenas” e Imlay en 1944 fue quien la nombró Formación)

Litología y espesor

Esta unidad litológica se ha dividido en cuatro miembros, siendo de la base a la cima: interestratificaciones de lutitas color gris y gris verdoso en capas delgadas a gruesa, areniscas calcáreas color gris y crema, calizas biógenas en capas de espesor medio a grueso, escasos lechos de bentonita blanca; el espesor de este miembro varía entre 50 y más de 500 m; el segundo miembro está compuesto por interestratificaciones de lutitas gris verdoso, calcáreas y limolitas color gris, en capas de espesor medio a grueso, areniscas color gris, calcáreas y calcarenitas con cuerpos de calizas biógenas. El espesor de este miembro varía entre 200 y 250 m. El tercer miembro consiste de areniscas color gris y pardo, de grano fino a medio, de espesores medianos a gruesos, que alternan con capas gruesas de lutitas calcáreas, fosilíferas; el espesor del tercer miembro varía 300 y 500 m; el cuarto miembro, o sea el superior, lo constituyen lutitas y limolitas de color rojizo, de estratificación mediana a gruesa, con intercalaciones de areniscas color gris; el espesor de este miembro varía entre 60 y 250 m.

El espesor total máximo para la formación Cárdenas varía entre 600 y 2000 m.

Sedimentología

Se infiere que la formación Cárdenas se depositó en un ambiente nerítico de mares dominantes regresivos.

Relaciones estratigráficas.

La Cárdenas descansa en forma discordante sobre la Formación Tamasopo (área de Río Verde), y se encuentra en general cubierta por depósitos aluviales.

Edad y Correlación

Su edad corresponde al Maestrichtiano-Campaniano. Se correlaciona cronológicamente con las formaciones Mezcala y Méndez, dentro del área en cuestión.

Distribución

Se encuentra aflorando en un área de modestas proporciones en la región de Río Verde, SLP.

Paleontología

Los conjuntos de fauna fósil, identificados por paleontólogos de PEMEX son muy numerosos, se citan entre otros: *Ostrea tecticosata Gabb*, *Pholadomya Sp.*, *Veniella conradi Morton*, *Turritella guionae Myers*, *Hardoviana potosiensis Lambert*, *Hamulus angulatus Wade*, *Hamulus onyx Morton*, *Arca securiculata armeriai Myers*, *Cardum, Tabacoensis Myers*, *Corbulla crassiplica Gab*, *Cymella bella mexicana Myers*, *Turritella trilira Conrad*, *Biradiolitas aguileras Bose*, *Pycnodonte mytabilis Morton*, *Lima Cardanasesis Bose*, *Neithea youngi Myers*, *Spetifer agua jensis Myers*, *Hippurites muellerriedi Veimunt*, *Hippurites perkinsi Myers*, *Lopha maccoyi Myers*, *Ostrea semiar mata Bose*, *Pholadomya cahuilensis Imlay*, *Trigonia eufalensis Gabb*, *Cerithiun subcarnaticum Bose*, etc.

MÉNDEZ

(Nombrada por De Golyer en 1925).

Litología y espesor

En términos generarles consiste en una alternancia de margas, lutitas y limolitas de colores gris, gris verdoso y café rojizo, que alternan con calizas arcillosas de color gris, negro y crema, estratificadas en capas de 20 a 30 cm. de espesor, aparecen escasos lechos de bentonita verde y blanco. Fuera del área en cuestión, esta unidad litológica cambia de facies a calizas negras, arcillosas, en el flanco oriental de la Sierra del Abra.

El espesor de la Méndez varía entre 500 y 1000 m.

Sedimentología

El ambiente de depósito para la Formación Méndez varió de batial a nerítico.

Relaciones estratigráficas.

Dentro del área de que se informa, la Méndez subyace concordantemente y en forma transicional a las Formaciones Terciarias Velasco y Chicotepec, y discordantemente a basaltos del Plioceno y Cuaternario. Suprayase en la misma forma a la San Felipe.

Edad y Correlación

La edad dominante para esta formación se considera Campaniano-Maestrichtiano, aunque en regiones como la parte oriental de la Sierra del Abra se considera de edad Campaniano Tardío.

Se correlaciona cronológicamente con las Formaciones Mezcala y Cárdenas.

Distribución

La Méndez tiene una distribución extensa; aflora profusamente en las Provincias Sierra Madre Oriental, Plataforma Valles- San Luis Potosí, y en la porción occidental de la Tampico-Misantla; en esta última se ha observado también en el subsuelo.

Paleontología

La Formación Méndez contiene abundante fauna fósil, dentro de la que se ha identificado: *Durania manuelensis*, *Stephenson*, *Sauvagesia belti* Stebhenson, *Sauvagesia coloradoensis* Stephenson, *Sauvagenia mergani* Adkins, *Inoceramus barabini*, *inoceramus vanuxemi*, *Tampsia Chacoyensis* Stephenson, *Tamasia bishopi* Stephenson, *Globotruncana arca* var. *Contusa* Cushman, *Globotruncana loebrichi* Pessagno, *Globotruncana stuartiformis* Dalbienz, *Globotruncana trinidadensis* Gandolfi, *Globotruncana ventricosa* Whithe, *Globotruncana lapparenti*, *Globotruncana bullcides*, *Globotruncana calcarata*, *Heterohelix globulosa* Cushman, *Rugoglobigerina hexavamerata* Bronnimann, *Racemiguembelina fructicosa* Egger, *Pseudotectularia deformis* Kikoine, *Globigerinelloides volutus* White, *Globigerinoides bolli* Pessagno, *Globotruncana havanensis* Voowiki, *Abathomphalus mayoroensis* Boli, *Guembelina globosa*, *Clavuloniloides trilaterata*, *Archaeoglobigerina blowi*, Pessagno, *Abathomphalus mayaroensis* Bolli, *Boliviana incrassata* Reuss, *Bulinialimbata* White, *Gaudryna retusa* Cushman, *Planoglobulina acervulinoides* Egger, y otros.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Los rasgos estructurales en la SMO, los esfuerzos de compresión deformaron fuertemente la secuencia Mesozoica, principalmente en pliegues anticlinales y sinclinales, ocasionando también un sistema de fallas inversas o cabalgaduras alineadas en dirección noroeste-sureste.

Posteriormente los esfuerzos de carácter distintivo originaron la formación de un sistema de fracturas y fallas normales de igual orientación, que provocaron las fosas tectónicas o graben. De manera simultánea se inició un período de actividad ígnea representada por estructuras de cuerpos intrusivos (diques, mantos y lacolitos entre otros), además de conos volcánicos y coladas de lava que se presentan al suroeste y sureste de la ciudad de San Luis Potosí. (INEGI,2002).

A continuación, se mencionan algunos anticlinales presentes en el área de estudio:

La estructura “Santa María Tampalantín” se ubica en una elevación topográfica. Acusa una longitud del rango de los 19 km. Su amplitud media es de unos 2.5 km. Se orienta 17° NW-SE. Las rocas que afloran en su zona axial corresponden a la Formación Tamasopo. Se han medido en su flanco oriental echados que varían

entre 18° y 73°. En su porción sur este anticlinal está recostado hacia el oriente. Se le ha estimado un cierre del rango de 400 m.

Este anticlinal se orienta con promedio de 13° NW-SE acusa una longitud mínima del orden de los 14 km. Y una amplitud media de 1.5 km. Afloran en su culminación rocas de la Formación Tamasopo parcialmente cubiertas por sedimentos cuaternarios. En su flanco oriental se han medido echados que fluctúan entre 18° y 80°, y en el occidental entre 15° y 30°. Se ha interpretado como un anticlinal recostado hacia el oriente.

El anticlinal “Rejalgares – Tansabaca” tiene una longitud del orden de 48kms. Y amplitud media de unos 2 km. En su porción norte se orienta 70- NW-SE. En su culminación aflora la formación El Abra. Los echados medidos en sus flancos varían entre 17° y 65° para el oriental y entre 18° y 50° para el occidental. En sus porciones norte y sur se ha interpretado como un anticlinal recostado al oriente, mientras que en su porción media se manifiesta como ligeramente asimétrico. Su flanco occidental en la porción norte está truncado por una falla inversa buzante hacia el poniente y su flanco oriental en la porción sur, queda afectado por otra falla inversa, buzante también al poniente, y burdamente paralela al eje del anticlinal que se describe. Se ha calculado para este anticlinal, un cierre de 100 m, para el Cretácico Inferior y de 600 m. Referido al Jurásico Superior.

El anticlinal “El Naranja” presenta una longitud del rango de los 26 km. Su amplitud es del orden de 2 km. Su orientación general es NW-SE con promedio de 13°, aunque ésta cambia por flexiones en su zona axial. Afloran en su culminación rocas de la formación El Abra.; Los echados medidos en sus flancos varían para el oriente entre 15° y 75° y para el occidente entre 20° y 80°. Este anticlinal se interpreta como recostado hacia el oriente en la mayor parte de su extensión, excepto en su porción sur en la que se manifiesta como ligeramente asimétrico, sin recostamiento. Se ha calculado para esta estructura un cierre del orden de 1000 m.

La estructura “El Tamul” tiene una longitud del rango de 61kms. Es un anticlinal estrecho, con amplitud media de un kilómetro. Se orienta con promedio de 10° NW-SE en su porción norte y de 35° NW-SE en su porción sur; esto es debido a una flexión en su parte media. Se han medido en su flanco oriental echados que fluctúan entre 16° y 85°, y en su flanco occidental entre 10° y 75°. Aflora en su zona axial la formación El Abra. Su porción norte se ha interpretado con recostamiento hacia el oriente, y su porción sur como asimétrica. Se ha medido para este anticlinal un cierre de 800 m, referido al Cretácico Inferior de 1400 m. Para el Jurásico Superior.

XXV-C-19-C- 29 - “Tampaón” Este anticlinal tiene una longitud del orden de 33 km dentro del área continuando fuera de ella hacia el norte. Su amplitud es de 2 a 3 km. Se orienta 15° NW-SE, excepto al sur de la traza de la falla que lo corta (F-19), donde se orienta prácticamente Norte- Sur. En la culminación de este anticlinal aflora la formación El Abra. En su flanco oriental se ha medido echados que varían entre 10° y 65° y en el occidental entre 5° y 50° se manifiesta como un anticlinal asimétrico. En su porción sur se encuentra cortado transversalmente por una falla

de desplazamiento horizontal cuya traza se orienta NE-SW, esta falla desplaza hacia el oriente 900mts el eje de anticlinal, el cual se encuentra afectado también por una gran falla inversa que presenta su traza paralela al eje de la estructura y es buzante hacia el occidente. El cierre máximo para este anticlinal es del orden de 1100mts próximo al eje de esta estructura quedó el pozo Colmena No.1.

XXXVIII-C-19 – “La Esperanza” Este anticlinal presenta una longitud de 10.5 km y se orienta 6° NW-SE; aflorando en su culminación rocas de la formación El Abra. En su flanco oriental se han medido echados entre 25° y 65° y en flanco occidental entre 40° y 78°. Se interpreta como un anticlinal recostado hacia el oriente. No se ha medido el cierre de esta estructura.

XLIV-C-29 – Este anticlinal acusa una longitud de 14.5 km y una amplitud del rango de 2 km. Se orienta predominantemente 25° NW-SE, presentando su eje algunas flexiones. En la mayor parte de su zona axial aflora la formación El Abra, solo en su extremo noroeste aflora la Tamasopo. Los echados medidos en sus flancos varían entre 9° y 35°, para el oriental, y entre 16° y 41° para el occidental. Esta estructura se interpreta como un anticlinal recostado al oriente. Su eje se flexiona en su porción media. No se ha medido su cierre.

XLV-X-29- Presenta esta estructura una longitud del rango de 21.5 km. Su amplitud es de unos 2 km Se orienta predominantemente 37° NW-SE, con algunas flexiones en su eje. Se considera una estructura asimétrica. En su culminación afloran rocas de la formación El Abra. Se han medido en su flanco oriental echados que varían entre 2° y 72° y en el occidental entre 5° y 35°. No se ha medido el cierre de este anticlinal.

XLVII-C-29 – “Aquismón” Se ubica en la sierra del mismo nombre. Presenta este anticlinal una longitud próxima a los 22 km. Su amplitud varía entre 600 y 1500mts. Se orienta predominantemente 36° NW-SE. En su zona axial aflora la formación El Abra.

En su flanco oriental se han medido echados entre 26° y 56°, y en el occidental entre 6° y 50°. Se ha interpretado que esta estructura presenta en general recostamiento hacia el este. Su flanco oriental está truncado por una gran falla inversa buzante hacia el occidente y cuya traza se orienta paralelamente al eje de la estructura. En la cima del Cretácico Inferior a esta estructura se le ha medido un cierre del orden de 800 m.

LIV-C-29-C-39 – Este anticlinal presenta una longitud del rango de 23 km, con una amplitud de 2 a 3 km. Se orienta predominantemente 28° NW-SE. En su culminación afloran las formaciones El Abra y Tamasopo. Los echados medidos en sus flancos varían entre 14° y 55° para el oriental, y entre 18° y 52° para el occidental; se ha interpretado con recostamiento hacia el oriente en su porción noroeste y media. No se ha calculado el cierre de esta estructura.

LXII-C-29 –“La Mojonera”. La longitud de este anticlinal es del rango de 14.5kms. Su amplitud oscila entre los 3 y 4 km. Su eje presenta flexiones, sin embargo, la orientación dominante de esta estructura es de 20° NW-SE. En toda su culminación

aflora la formación El Abra. Los echados medidos, en su flanco oriental varían entre los 19° y 51°, y en el occidental entre los 11° y 61°. El extremo noroeste de este anticlinal está cubierto por depósitos cuaternarios. No se ha medido el cierre estructural.

3.7. Hidrogeología

Como nos menciona Morán et al, (2013). A nivel regional el flujo va de las regiones de mayor elevación topográficas localizadas en la Sierra de Álvarez de la zona media a las de menor elevación hacia el Golfo de México en la zona de la Huasteca.

En el área de estudio existen unidades con condiciones hidrogeológicas que funcionan como Acuífero (formaciones San Felipe y Méndez) y otros como acuíferos (formación el Abra). El acuífero más importante de la región es la Formación El Abra, funciona como confinado en los valles y como libre en los sistemas montañosos.

Esta formación está compuesta por carbonatos de plataforma y arrecifes, se encuentra muy fracturada y presenta estructuras kársticas (dolinas) que son comunes en la región.

Como nos menciona Santacruz y Ramos (2010), el flujo subterráneo es controlado por estructuras como anticlinales y sinclinales con orientación N-S y fallas regionales con una disposición E-W, que pueden conectar las diferentes cuencas hidrogeológicas de diferentes elevaciones. Por lo que es posible suponer que el sistema de fallas E-W podría conectar la zona media con la zona de la huasteca.

3.8. Actividades Económicas

La huasteca potosina se ve favorecida por las características de su clima y vegetación, por lo que destaca como principal actividad económica la agricultura, se cultivan caña de azúcar, chile piquín, frijol, maíz grano, naranja además de avena forrajera, cebada forrajera en verde, frijol, garbanzo forrajero, lenteja, maíz grano, sorgo grano como cultivos temporales (INEGI, 2002).

Como nos menciona Aguilar (2010), la región Huasteca es una de las mayores productoras de sacarosa del país.

Algunos otros cultivos principales son el maíz y el frijol, así como la naranja y el café. En la ganadería, el ganado bovino es relevante, aunque el ganado porcino también ocupa un lugar significativo desde el punto de vista económico.

El Plan Estatal de Desarrollo de la entidad 2015-2021 nos menciona que el turismo es una actividad económica con alto potencial de crecimiento y de generación de empleos en la zona Huasteca, por sus diversos atractivos naturales.

4. Materiales y Métodos de Investigación

Se llevaron a cabo considerando los objetivos particulares y el marco de referencia preliminar obtenido a partir de la recopilación de información. A continuación, se describen en forma detallada las actividades de campo realizadas, así como el procedimiento utilizado.

4.1. Recopilación de Información

Se recopilaron la información básica del área de estudio, como el clima, la hidrología, geografía, topografía, litología entre otros. En los estudios hidrogeoquímicos, se evalúan la composición química de las muestras de agua, logrando de esta manera la evaluación de las composiciones puntuales de los sitios, con toda esa información se puede definir estadística y espacialmente la interacción del agua superficial y subterránea y de esa forma las autoridades correspondientes pueden proponer medidas importantes de protección, remediación o descontaminación del recurso hídrico.

4.2. Campaña de muestreo

La composición química de los recursos hídricos dentro del área de estudio se investigó por medio de dos etapas de muestreo. La primera se llevó a cabo en junio – julio del 2018 se recopilaron 26 muestras, en periodo de lluvias. En la segunda campaña se realizó en febrero del 2019, en periodo de estiaje, y se recopilaron 39 muestras de las cuales se agregaron 13 sitios nuevos. Cabe hacer mención que se tienen 65 muestras en total sin embargo son de diversos tipos de aprovechamientos (río, pozo, noria y manantial) como se aprecia en la Tabla 9.

Tabla 9. Tipos de aprovechamientos muestreados.

Tipo de Aprovechamiento	Periodo de Lluvias (Muestras)	Periodo de Estiaje (Muestras)	Muestras en total
NORIA	3	3	6
MANANTIAL	8	14	22
RIO	13	20	33
POZO	2	2	4
TOTAL	26	39	65

En estas campañas se siguió el siguiente protocolo para la toma de muestra:

Preparación de frascos para la toma de muestras.

Se utilizaron frascos de polietileno de alta densidad (prelavados en laboratorio con una solución de ácido clorhídrico y agua destilada) con tapa y contratapa.

Por cada sitio de muestreo se utilizaron dos envases de 60ml y solo uno de 500ml para los análisis químicos en el laboratorio.

Toma de Muestras

Una vez colectada la muestra de agua se filtró y almacenó, sin embargo, en ocasiones se pueden presentar modificaciones en las concentraciones originales, por lo que fue indispensable aplicar técnicas de conservación y/o estabilización de la muestra.

La preservación de la muestra para metales (mayores y traza) y algunos elementos no metálicos (frasco de 60 ml), se le agregó ácido nítrico (ultra puro) para disminuir el pH a menos de 2 unidades y mantener en solución los solutos de interés hasta el momento de análisis en laboratorio. Para la muestra de Nitratos se utilizó un frasco de 60 ml y se le adiciono ácido Sulfúrico En la botella de 500 ml se recolecto la muestra para aniones y no se le adiciono ningún preservador. Inmediatamente después de la colecta, todos los frascos utilizados para la colecta de las muestras de agua se deben mantener en recipientes aislantes especiales con hielo en su interior, manteniendo su temperatura alrededor de los 4° C hasta el momento de su análisis en laboratorio.

Una parte importante del protocolo implementado durante el trabajo de campo se realizó la medición de los siguientes parámetros como temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, oxígeno disuelto y alcalinidad.

Estas mediciones permiten establecer las condiciones originales del agua, para la medición de los parámetros de campo, se utilizó una sonda multi-paramétrica. Con este equipo, se realiza las mediciones de los parámetros de campo, con excepción de la alcalinidad, la cual se describen a continuación:

Para la determinación de la alcalinidad se utilizó un titulador, el equipo consiste en una pistola graduada y ampollas de ácido sulfúrico a 0.16N.

El punto de equivalencia se obtiene a partir de las lecturas de pH para diferentes cantidades de ácido añadidas registradas en campo

La alcalinidad se determinó por medio de la calculadora de alcalinidad este programa es proporcionado por el USGS, en este se utiliza varios métodos para determinar los puntos finales de carbonato y bicarbonato de sus datos de titulación obtenidos en campo. Después de encontrar estos puntos de equivalencia, la calculadora de alcalinidad calcula la alcalinidad de la muestra y sus concentraciones de hidróxido, carbonato y bicarbonato.

Una vez obtenidos todos los resultados de los distintos métodos se analizan y descartan los métodos que están fuera de rango (diferencias significativas) entre los métodos, tomando como referencia los resultados obtenidos en campo. Ya identificados los métodos utilizables se obtiene el promedio de ellos para utilizar este valor como concentración final de hidróxido, carbonato y bicarbonato.

La alcalinidad total se define formalmente como la suma de equivalentes en forma de bases que reaccionan con un ácido fuerte, o bien, como la capacidad de una solución para aceptar protones. Estas bases comúnmente son: bicarbonatos, boratos, iones de ácido silícico, bisulfuros, aniones orgánicos e hidróxidos. Para fines prácticos, se considera como alcalinidad total a la suma de bicarbonatos y carbonatos ($\text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-}$).

El potencial redox del agua constituye un parámetro muy útil para la definición de las condiciones oxidantes o reductoras que prevalecen en el sistema de agua. Se midió con un electrodo de tipo combinado, que consiste en un filamento de platino y un electrodo de referencia (de plata-cloruro de plata), que también está acoplado en la sonda multiparamétrica. El elemento sensible donde se realiza la transferencia de electrones es el filamento de platino, por lo que se mantuvo limpio y pulido para evitar mediciones erróneas.

Al inicio del trabajo de campo, se realizaron mediciones de verificación de su correcto funcionamiento, sumergiendo el electrodo en una solución denominada Zobell. Si el electrodo funciona adecuadamente registrará el valor de la solución Zobell establecido en la botella que lo contiene.

La medición del potencial redox al igual que para el pH y los restantes parámetros de campo, se realizaron cada dos minutos hasta que de acuerdo con la secuencia de mediciones lecturas consecutivas se mantenían relativamente constantes.

Conductividad eléctrica y temperatura. La conductividad eléctrica es la propiedad que mide la facilidad de transmisión de una corriente eléctrica, proceso que en el caso de una solución acuosa es función de la concentración de electrolitos presentes. De este modo, el registro de este parámetro en una solución permite identificar de manera indirecta su salinidad.

La conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos se registraron por medio de un sensor incorporado a la sonda multiparamétrica que utiliza ajuste por temperatura, parámetro que se registró con un el sensor incorporado en la sonda y que presenta una aproximación de 0.01°C .

Actividad de los iones hidrógeno (pH). La medición de la actividad de los iones hidrógeno en el agua se efectuó por medio del potenciómetro acoplado en la sonda multiparamétrica. Previo a la medición de campo, se utilizó la técnica de calibración en dos puntos, en este caso especificados a partir de soluciones buffer de pH conocido. En esta técnica, el pH a registrar se debe de ubicar entre dichos extremos. Para ello, se utilizan soluciones de 4.0, 7.0 y 9.0 unidades de pH.

La calibración consistió en colocar el electrodo sin calibrar en la solución para tener idea aproximada del pH del agua; posteriormente, se sumergirá en la solución (buffer) de pH 7.0 realizando los ajustes necesarios para calibrar el aparato y posteriormente, dependiendo el pH aproximado determinado previamente en la

solución, se introduce en la solución guía de pH 4.0 o 10.0, ajustando la pendiente del potenciómetro para obtener el valor correspondiente.

Una vez calibrado el equipo, se sumergía el electrodo en la celda de aislamiento, registrando las lecturas del pH en forma continua hasta que, aproximadamente después de 10-15 minutos, se estabilizaban. Posteriormente se colocaba el electrodo nuevamente en la solución buffer de pH 7.0; si la medición era diferente en 0.05 unidades de pH, se repetía el procedimiento de calibración y el de medición del pH del agua.

En la gran mayoría de los casos, las mediciones de pH tomaron un cierto tiempo para estabilizarse por lo que en el formato de campo se registraron varias mediciones con respecto del tiempo para verificar la tendencia de estabilización que presentaron.

Registro del oxígeno disuelto. La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua se efectuó sumergiendo un electrodo especial en este caso específico, el sensor de oxígeno disuelto incorporado en el equipo utilizado es polarográfico de tipo "Clark" con sensor y compensación integrada por temperatura.

Una vez polarizado el electrodo, el procedimiento de calibración del aparato incluyó sumergirlo en una solución libre de oxígeno (preparada mezclando 2 gramos de sulfito de sodio en 100 ml de agua destilada) ajustando la lectura a cero mg/l de oxígeno disuelto.

Posteriormente una vez seco el electrodo, se calibró al aire manteniendo el sensor 1 centímetro arriba de una superficie de agua limpia (evitando el contacto de la membrana con el agua) ajustando la lectura (calibración al aire) al valor correspondiente de acuerdo con la elevación sobre el nivel mar del sitio.

Esta calibración, se lleva a cabo diariamente al inicio de las operaciones durante la toma de la primera muestra del día, calibraciones subsiguientes se llevaron a cabo con calibración al aire únicamente.

Una vez calibrado el sensor, se introduce en el recipiente en donde se llevaron a cabo las mediciones, realizando diversas lecturas hasta que se identificó que los valores se estabilizaron en mediciones continuas realizadas cada dos minutos.

Para cada sitio muestreado se documentaron las características físicas y químicas de las muestras de agua, así como datos generales del aprovechamiento en una hoja de registro de campo. En total se realizaron 65 hojas de campo el formato de la hoja de registro de campo utilizada se muestra en la Figura 14.

DATOS GENERALES

Clave del Aprovechamiento	39	Número de muestra	39	Tipo de Aprovechamiento	Pozo	Nota	Manantial	Galería
Coordenadas UTM Datum WGS84	X= 483,480	Y= 2,410,100			Estanque	Río	Presas	Papalets
Elevación (metros)	Zona UTM		14N	Uso del Agua	Potable	Agrícola	Forestal	Doméstico
Municipio					Agropecuaria	Abrevadero	Ecológico	Servicios
Localidad	MARGEN IZQUIERDA RIO SANTA MARIA			Tipo de Bomba	Turbina Vertical	Sumergible	Centrifuga	
Fecha	17-Feb-19				Eléctrica	Sin Equipo	Otro:	
Litología Predominante	CALZAS			Profundidad (m)		Caudal de extracción (l/s)		
Prof. al Nivel del agua	NE	m	ND	CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS				
Lugar de Toma de Muestra	Cauce del Río	Llave en Bronce	Nota	Color	INCOLORA	Olor	INCOORA	
			Estacion Lago/Manantial	Apariencia	TRANSPARENTE	Sulfuración	NO	
				Turbidez	NO	Desprendimiento de gases	NO	

PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Hora de Inicio						
Tiempo (min.)	1	3	5	7	9	11
T (°C)	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
O.D. (%)	80.70	80.90	80.10	79.90	80.00	80.00
O.D. (mg/l)	6.74	6.75	6.88	6.87	6.88	6.88
CE (microSiemens)	942	940	942	940	932	931
pH	7.48	7.39	7.45	7.45	7.42	7.44
ORP (E campo en mV)	249	22.4	27	246.2	223.2	22.42

DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD DE CAMPO

N ácido: 1.8 ± 0.008 V muestra (Alcali): 25 ml Filtrada X SI NO

H ₂ SO ₄ NÚMERO DE vueltas	0	15	25	35	45	50	55	60	62	65	68	71
pH	7.44	6.44	6.32	6.07	5.8	5.65	5.45	4.83	4.26	3.48	3.21	3.05

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA COLECTADA

MUESTRA PARA	TIPO DE ENVASE	CANTIDAD	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?	Check
CATIONES Y METALES	POLIETILENO	1	60 ML	REFRIGERACIÓN, H2O2	SI	X
NITRATOS	POLIETILENO	1	60 ML	REFRIGERACIÓN, H2SO4	NO	X
ANIONES	POLIETILENO	1	500 ML	REFRIGERACIÓN	NO	X

OBSERVACIONES

MANANTIAL EN FRENTE

 DESPUES DE LA CUEVA DEL AGUA

FOTOGRAFIA



Figura 14. Hoja de campo para el registro de datos físicos y químicos de muestra de agua.

4.3. Trabajo de laboratorio

El análisis de las muestras de agua se llevó a cabo en el laboratorio de Análisis Químicos de Agua y Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UASLP donde se determinaron las concentraciones de elementos mayores, elementos menores y elementos traza.

Para los elementos mayores y menores, las concentraciones de los aniones se determinaron por los métodos descritos en la Tabla 10. Los cationes mayores (Na, K, Ca, Mg) se obtuvieron por medio de un espectrómetro de emisión óptico con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES), en esta técnica, se forma un aerosol con la muestra líquida y un sistema de nebulización, el cual es transportado por el Argón a la antorcha del plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. Debido las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de Emisión atómicos de líneas características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de las líneas. La información es procesada por el sistema informático. Los elementos traza (metales, no metales, elementos de transición y tierras raras), además del silicio, se analizaron por medio de un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) esta técnica es muy similar ya que utiliza la muestra líquida vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Argón donde se forman los iones para pasar al espectrómetro de masas donde son separados mediante un analizador y detectados.

Para los aniones Cl y SO₄ y algunos menores, como el NO₃ y F, se realizaron los análisis con las muestras filtradas, y sin preservador.

Tabla 10. Métodos para la obtención de concentraciones en elementos mayores y menores.

DETERMINACION	MÉTODO ANALÍTICO	DESCRIPCIÓN
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001, Método de valoración con nitrato de plata. (Método Argentométrico)	Se efectúa la titulación con solución valorada en nitrato de plata, usando cromato de potasio como indicador
Fluoruros	EPA 9214-1996, Método Colorimétrico	Utilizando SPADNS, el cual se basa en la reacción entre los iones fluoruro y un colorante de zirconio.
Nitratos	NMX AA-079-SCFI-2001 Método de sulfato de brucina,	Se fundamenta en la reacción entre el ion nitrato y la brucina que produce un color amarillo el cual es medido espectrofotométricamente estimando la colorimétrica del nitrato.
pH	NMX-008-SCFI-2011 Potenciométrico	
Sólidos totales disueltos	NMX-AA-034-SCFI-2001 Gravimétrico	Medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas, así como materia orgánica mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas

		específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo de éstos
Sulfato	EPA-9036-1986 Método Turbidimétrico	Los iones de sulfato en la muestra reaccionan con el bario en el reactivo de sulfato SulfaVer 4 y forman una turbidez de sulfato de bario insoluble. La cantidad de turbidez formada es proporcional a la concentración de sulfato.
Temperatura	NO APLICA	
Alcalinidad Total	NMX-AA-036-SCFI-2001 Método colorimétrico	Consiste en medir la alcalinidad presente en el agua por titulación con una solución valorada de un ácido, en los puntos de equivalencia del bicarbonato (pH=8.3) y del ácido carbónico (pH=4.5).
Dureza total	NMX AA-072-SCFI-2001 Método volumétrico EDTA	Se basa en la titulación con solución valorada de EDTA, de los iones causantes de la dureza, en presencia de un indicador que puede ser eriocromo negro T (Dureza total) o la murexida (Dureza de calcio).

4.4. Trabajo de gabinete

4.4.1. Digitalización Geológica

La edición de la cartografía geológica a escala 1:50.000 se tomó del informe final compilación geológica prospecto Xilitla IEG32, de Petróleos mexicanos coordinación regional de exploración zona norte súper intendencia de paleontología regional y paleo sedimentación de 1986. Con el objetivo de obtener una geología más detallada del área de estudio ya que, como se ha mencionado en el presente estudio se busca correlacionar la información geológica para contribuir al estudio integral del agua.

Mediante el escaneado del plano se procedió a la digitalización de este en el software ArcMap versión 10.3 ya que este permite la correcta preservación de los originales de tal modo que no se produzca la deformación ni degradación de estos lo cual podría interferir en la calidad y el proceso de traspaso de los datos a formato digital. Con este método de digitalización se procurará el máximo rigor en el posicionamiento del original y la introducción de coordenadas. El método de digitalización en pantalla facilita este aspecto al no tener que trabajar sobre el papel sino directamente con la imagen escaneada de la hoja.

La digitalización se realizó en el sistema UTM, (zona 14 N). El proceso de digitalización se desarrollará bajo la premisa de la precisión: f Precisión en el posicionamiento del original (papel o imagen).

La digitalización de la carta geológica se trata de un proceso organizado en distintas fases de ejecución. Por un lado, se digitalizaron las formaciones geológicas del área y, por otro lado, se digitalizaron todos los elementos auxiliares (Estructuras geológicas). Una vez terminados se compone el mapa completo dentro de una plantilla general en donde se encajarán todas las piezas.

4.4.2. Análisis de trabajo de campo

Previamente se realizó una compilación de información referente a el área de estudio y a los trabajos previos, debido a que, la existencia de estos proporciona una visión del avance en el conocimiento hidrogeológico que existe, sin embargo, como ya se ha mencionado no se encontró algún trabajo previo en el área específica interés. Posterior al trabajo de campo, y con la finalidad de tener un amplio panorama de las condiciones hidro geoquímicas, se implementó el uso de distintos softwares con los cuales es posible representar la información generada en este estudio.

Con ayuda del software Aqua Chem versión 2014.1, se elaboran los diagramas de Stiff y Wilcox. Este software nos permite obtener, a partir de una base de datos, balances de electroneutralidad, porcentajes de error, con esta información se generan los distintos tipos de gráficos. Lo que, en conjunto, facilita la comprensión del comportamiento hidrogeoquímico.

Para la elaboración de los mapas con los parámetros de campo, elementos mayores y conductividad hidráulica, se utilizó el software Q gis versión 2.18.15, y Surfer versión 13, los cuales, permitieron construir los mapas con las concentraciones de los resultados que se obtuvieron de los análisis físicos y químicos, fueron comparados con los valores máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994, para la calidad del agua destinada para uso potable. Y el índice de SAR para agua de riego el cual fue el más destacado de todos los índices para la comparación. Posteriormente se creó una base de datos en la hoja de cálculo de Excel para que a partir de ella generar mapas que mostrara el comportamiento de los elementos y parámetros que sobrepasaran el límite máximo permisible que estable la norma y poder deducir que aprovechamientos no son aptos para uso potable.

Además, con estos mismos se generan los mapas de zonas de alta concentración de los indicadores químicos inorgánicos que nos indican contaminación difusa.

4.4.3. Índice de Calidad del Agua (ICA)

Como ya se ha mencionado el ICA es un tipo de índice ambiental que puede utilizarse como marco de referencia único para comunicar información sobre la calidad del medio ambiente afectado y evaluar la vulnerabilidad o susceptibilidad del agua a la contaminación. Este índice propone clasificar en una escala de 0 a 300 la calidad representativa del agua, de acuerdo con los constituyentes evaluados; Y esto, a su vez, hace posible calificar el agua según su estado como: Excelente, Bueno, Medio, Malo o Muy Malo (Espinoza y Rodríguez , 2016).

Para el desarrollo del presente trabajo se han planteado ICA para la evaluación del recurso hídrico a ser destinado al consumo humano, de acuerdo con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

En este estudio se propone un sistema estimativo de la calidad del agua superficial y subterránea a través del ICA basado en la medición física de siete parámetros (pH, SDT, Dureza total, NO_3^- , Cl^- , SO_4^- y Na^+) fisicoquímicos. El cálculo consistió en tres etapas. En la primera, a cada uno de los siete parámetros se les asignó una ponderación (w) acorde con su importancia relativa en la calidad del agua para consumo humano, así como de las condiciones geohidrológicas de la región de estudio (zona Kárstica). La ponderación máxima fue de cinco y se asignó a sólidos totales disueltos y nitratos, en función de los efectos adversos en la salud humana. A los iones sodio y cloruro se les asignó una ponderación de cuatro, ya que pudieran afectar al cultivo. La ponderación de tres fue asignado a la dureza total y al ion sulfato; al pH se le asignó la ponderación mínima de uno debido a su variación mínima.

En la segunda etapa se determinó el peso relativo (W_i) de cada parámetro de acuerdo con la ecuación del método del peso aritmético:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=0}^n w_i}$$

Donde W_i es la ponderación relativa, w . es el peso de cada parámetro y n es el número de parámetros.

En la tercera etapa se estableció una escala de valoración de la calidad para cada parámetro (q_i). Para esto, se dividió la concentración resultante de cada muestra de agua analizada por su respectivo límite máximo permisible de acuerdo con NOM-127-SSA1-1994 y el resultado fue multiplicado por 100:

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

Donde q_i . es la calificación de la calidad, C_i es la concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en mg/l y S_j es el valor estándar de agua potable en mg/l.

Finalmente, para calcular el ICA se determinó el SI_i usando la ecuación:

$$SI_i = (W_i)(q_i)$$

Donde S_{li} es el subíndice de cada parámetro y q_i es la calificación de la calidad:

$$ICA = \sum S_{li}$$

Donde ICA es el índice de calidad del agua y S_{li} es el subíndice de cada parámetro.

El resultado final son valores clasificados en cinco categorías de calidad del agua(Figura 15):

EXCELENTE	<50
BUENA	50-100
MEDIA	100-200
MALA	200-300
MUY MALA	>300

Figura 15. Categorías de clasificación de índice de calidad del agua ICA

5. Resultados de la interpretación Hidrogeoquímica

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de los análisis químicos, presentándolos de forma gráfica por medio de mapas para apreciar la tendencia de los resultados de laboratorio y de los parámetros medidos en campo, así como la distribución de grupos de familias de agua y la comparación de la calidad del agua para los usos los público urbano y riego agrícola.

Existen diferentes criterios para establecer una clasificación de los usos del agua. Como menciona la CONAGUA (2017), se define al uso como la aplicación del agua a una actividad. De la manera más general se clasifican en dos grandes grupos: consuntivos (son los que reducen su cantidad y/o calidad) y no consuntivos (no reducen la cantidad ni calidad y permiten utilizarla para otros usos). En la presente investigación se clasificó en 5 diferentes tipos los cuales se describen en la Tabla 11.

Tabla 11. Disposición del Uso de Agua

Uso del agua	Descripción	Disposición
Doméstico	Agua para abastecimiento de algunas viviendas que están cerca del aprovechamiento (Noria).	Consuntivo
Potable	Agua para abastecimiento público, el agua es entregada a través de redes de agua potable.	Consuntivo
Potable-Agrícola	Agua utilizada para abastecer a la población y a su vez se utiliza para el riego de cultivos	Consuntivo
Agrícola	Agua utilizada únicamente para el riego de cultivos, se cuenta con equipo (bomba), para el abastecimiento.	Consuntivo
Agrícola-Ecológico	Agua aprovechada por la vegetación de la zona, no cuenta con equipo (bomba) ni riega algún cultivo específico.	Consuntivo

En la Tabla 12 se presentan las 65 muestras en la cual se indica la localidad, la ubicación de los puntos de muestro, su tipo de aprovechamiento, su uso y el periodo de muestreo.

Tabla 12. Puntos de muestreo.

ID- Mues	ID- Estac	Localidad	Tipo de apro	Periodo	Uso del agua	X	Y
						m	m
1-2	1	EL CAMPAMENTO	NORIA	Lluvias	DOMESTICO	471791	2420868
1-3	1	EL CAMPAMENTO	NORIA	Estiaje	DOMESTICO	471791	2420868
2-2	2	CABEZAS	MANANTIAL	Lluvias	POTABLE	468911	2417131
2-3	2	CABEZAS	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE	468911	2417131
3-2	3	CABEZAS	MANANTIAL	Lluvias	POTABLE-AGRICOLA	469465	2416695
3-3	3	CABEZAS	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE-AGRICOLA	469465	2416695
4-2	4	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Lluvias	POTABLE-AGRICOLA	467733	2418190
4-3	4	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE-AGRICOLA	467733	2418190
5-2	5	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Lluvias	POTABLE-AGRICOLA	467699	2418194
5-3	5	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE-AGRICOLA	467699	2418194
6-2	6	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Lluvias	AGRICOLA	467161	2418139
6-3	6	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA	467161	2418139
7-2	7	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Lluvias	POTABLE-AGRICOLA	466914	2417821
7-3	7	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE-AGRICOLA	466914	2417821
8-2	8	CIENEGA CABEZAS	MANANTIAL	Lluvias	AGRICOLA	466576	2415431
8-3	8	CIENEGA CABEZAS	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA	466576	2415431
9-2	9	EL CARPINTERO, RIO GALLINAS	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	474045	2422551
9-3	9	EL CARPINTERO, RIO GALLINAS	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	474045	2422551
10-2	10	CAPUCHINAS	MANANTIAL	Lluvias	POTABLE-AGRICOLA	468537	2407971
10-3	10	CAPUCHINAS	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE-AGRICOLA	468537	2407971
11-2	11	VEINTE DE NOVIEMBRE	NORIA	Lluvias	DOMESTICO	471142	2405765
11-3	11	VEINTE DE NOVIEMBRE	NORIA	Estiaje	DOMESTICO	471142	2405765
12-2	12	VEINTE DE NOVIEMBRE, RIO LA CIENEGA	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	471046	2406194
12-3	12	VEINTE DE NOVIEMBRE, RIO LA CIENEGA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	471046	2406194
13-2	13	VEINTE DE NOVIEMBRE, RIO LA CIENEGA	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	471015	2406284
13-3	13	VEINTE DE NOVIEMBRE, RIO LA CIENEGA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	471015	2406284
14-2	14	LA ESPERANZA	NORIA	Lluvias	DOMESTICO	471366	2409364
14-3	14	LA ESPERANZA	NORIA	Estiaje	DOMESTICO	471366	2409364
15-2	15	EL JABALI, RIO GALLINAS	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	474674	2421363
15-3	15	EL JABALI, RIO GALLINAS	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	474674	2421363
16-2	16	RIO GALLINAS CRUCE PUENTE AUTOPISTA	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	475264	2426712
16-3	16	RIO GALLINAS CRUCE PUENTE AUTOPISTA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	475264	2426712
17-2	17	RIO GALLINAS	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	474268	2417972
17-3	17	RIO GALLINAS	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	474268	2417972
18-2	18	RIO GALLINAS	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	475301	2414614
18-3	18	RIO GALLINAS	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	475301	2414614
19-2	19	RIO GALLINAS CRUCE PUENTE DEL FERROCARRIL	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	474385	2429953
19-3	19	RIO GALLINAS CRUCE PUENTE DEL FERROCARRIL	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	474385	2429953
20-2	20	RASCON	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	473666	2431334
20-3	20	RASCON	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	473666	2431334
21-2	21	TAMBACA	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	469020	2429105
21-3	21	TAMBACA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	469020	2429105
22-2	22	RASCON-ALAMEDA	POZO	Lluvias	POTABLE	473540	2429346
22-3	22	RASCON-ALAMEDA	POZO	Estiaje	POTABLE	473540	2429346
23-2	23	RASCON	POZO	Lluvias	POTABLE	474100	2430259
23-3	23	RASCON	POZO	Estiaje	POTABLE	474100	2430259
24-2	24	RIO TAMASOPO, PASO REAL	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	474754	2427450
24-3	24	RIO TAMASOPO, PASO REAL	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	474754	2427450
25-2	25	EL NACIMIENTO, TANCHACHIN	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	484499	2413750
25-3	25	EL NACIMIENTO, TANCHACHIN	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	484499	2413750
26-2	26	RIO SANTA MARIA, TANCHACHIN	RIO	Lluvias	AGRICOLA-ECOLOGICO	484414	2413004
26-3	26	RIO SANTA MARIA, TANCHACHIN	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	484414	2413004
27-3	27	CABEZAS, EL DETALLE	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	467742	2412216
28-3	28	RIO VERDE, VEINTE DE AGOSTO	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	475203	2392009
29-3	29	RIO SANTA MARIA , VEINTE DE AGOSTO	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	475745	2391697
30-3	30	EL OJO CALIENTE	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	476143	2393104
31-3	31	EMILIANO ZAPATA	MANANTIAL	Estiaje	POTABLE	477364	2395708
32-3	32	EMILIANO ZAPATA/RIO SANTA MARIA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	477392	2395482
33-3	33	EMILIANO ZAPATA/RIO CIENEGA GRANDE	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	477292	2395580
34-3	34	CASCADA DE TAMUL AGUAS ARRIBA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	481021	2411394
35-3	35	MARGEN IZQUIERDA RIO SANTA MARIA	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	480897	2410470
36-3	36	RIO SANTA MARIA	RIO	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	480906	2410410
37-3	37	MARGEN DERECHA RIO SANTA MARIA	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	482423	2409933
38-3	38	CUEVA DE AGUA, MARGEN IZQUIERDA RIO SANTA MARIA	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	483149	2410085
39-3	39	MARGEN IZQUIERDA RIO SANTA MARIA	MANANTIAL	Estiaje	AGRICOLA-ECOLOGICO	483380	2410109

5.1. Parámetros de campo

A continuación, se analizan los parámetros de campo, ya que estos nos proporcionan información más precisa.

Temperatura

De manera general los rangos de temperatura del agua de los aprovechamientos se encuentran entre los 19.5 °C y los 29.8 °C, siendo el valor promedio 23.7 °C para todos los aprovechamientos. Considerando que el aprovechamiento que reporta la temperatura más baja pertenece al segundo muestreo (estiaje) de agua superficial y las temperaturas más altas se identificaron en el primer muestreo (Lluvias) en agua superficial, como se puede apreciar en el Figura 16.

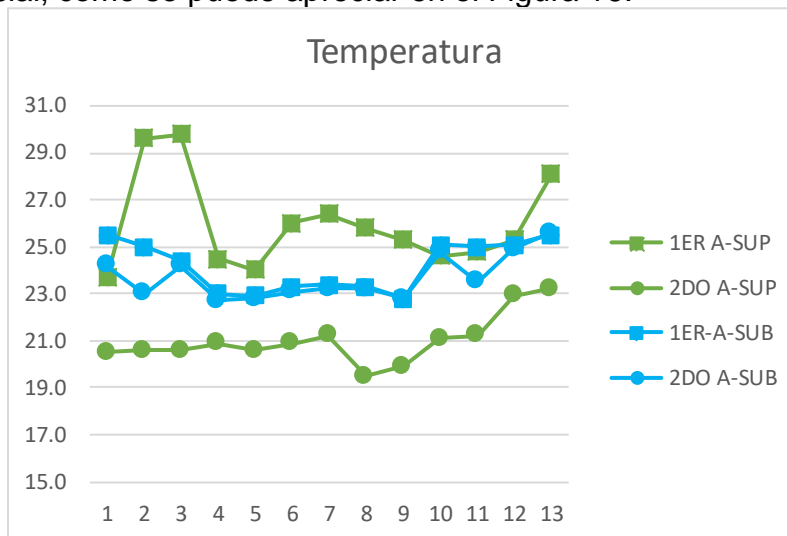


Figura 16. Resultados de los datos obtenidos en campo para el parámetro de temperatura.

pH

En la Figura 17 se muestran los valores obtenidos en las campañas de muestreo la mayor parte de los valores de pH de las muestras están cercanos a la neutralidad, teniéndose como valor máximo 8.3 y valor mínimo 6.3 para toda el área de estudio con un valor promedio general de 7.4 pH.

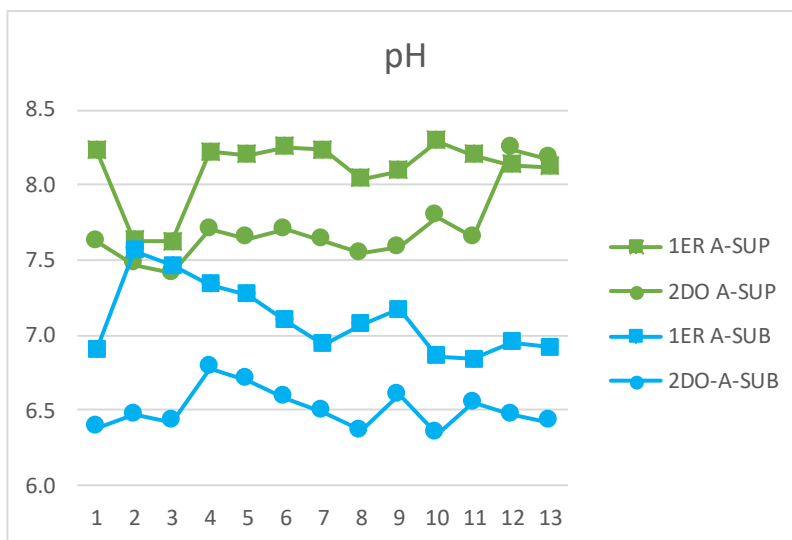


Figura 17. Resultados de los datos obtenidos en campo para el parámetro de pH.

Conductividad eléctrica (CE)

Los valores de CE para este trabajo presentaron un rango de valores entre 278.4 y 1762.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un promedio de 975.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de CE se dieron en el agua subterránea en periodo de estiaje. Por el otro lado el valor más bajo se registró en el agua subterránea en temporada de lluvias.

En la figura 18 se puede apreciar que los valores del agua subterránea se mantienen muy similares en ambos periodos de muestreo.

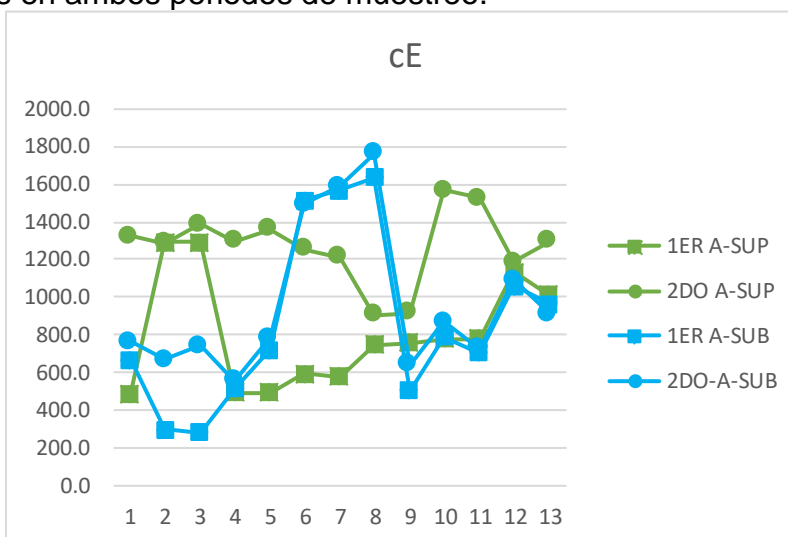


Figura 18. Resultados de los datos obtenidos en campo para el parámetro de CE.

5.2. Balance de electroneutralidad y validación de los resultados del laboratorio

Para rectificar que los análisis del laboratorio son confiables, se verifica que los resultados de los elementos mayores y menores cumplan con la condición básica de disolución, esa debe ser eléctricamente neutra.

La exactitud de un análisis de iones mayoritarios puede ser estimada a partir de las diferencias en el balance eléctrico, ya que la suma de cargas positivas y negativas en el agua debería ser igual.

Se calculó el balance de electroneutralidad a partir de la concentración en miliequivalentes (Freeze y Cherry, 1979) de cada una de las muestras para comprobar la exactitud del resultado con relación a los elementos mayores, utilizando la siguiente fórmula (en meq/l):

$$\%Error = \left(\frac{\Sigma cationes - \Sigma aniones}{\Sigma cationes + \Sigma aniones} \right) \times 100$$

En la mayoría de los laboratorios los valores de % Error, se encuentran por encima del 2%, pero si las desviaciones son superiores al 6% deben revisarse los métodos de muestreo y los procedimientos analíticos.

El 29 % de las 65 muestras presentó un error entre el 0% y ± 2 %; el 71% mostró un error entre ± 2.1 % y ± 6 %. Esto nos indica que los datos obtenidos de laboratorio están dentro del rango de precisión requerida y por lo tanto la interpretación de los resultados químicos se considera verdadera. En la Figura 19 se presenta esta información de acuerdo con el número de la muestra.

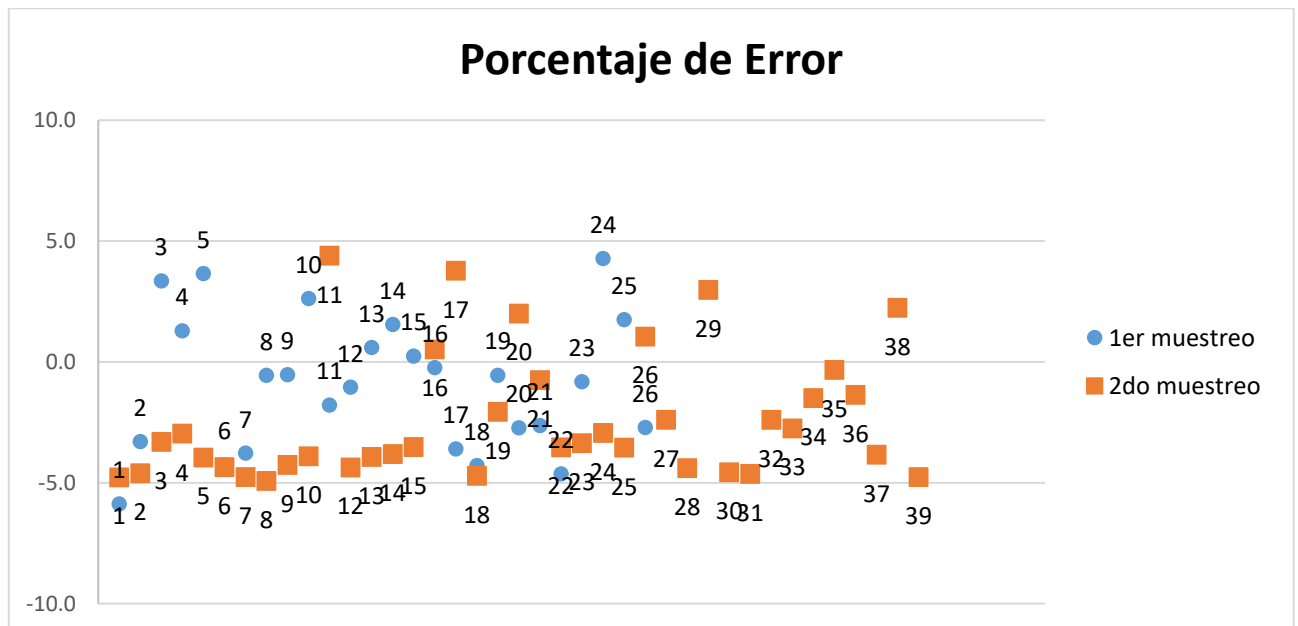


Figura 19. Gráfica de electroneutralidad.

5.3. Análisis Estadístico

Debido a diversos factores como: a) la variabilidad de las condiciones geológicas del subsuelo, b) las temporadas de los muestreos, c) que son aprovechamientos de diversos tipos (superficial y subterránea), se ha determinado cierta diversidad en la magnitud de los resultados de campo y laboratorio.

En breve se describirán los resultados obtenidos de los análisis químicos, presentándolos a manera de gráficos de cajas y bigotes (*Box Plot*), los cuales son una presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos sobre un rectángulo alineado verticalmente (Figura 20).

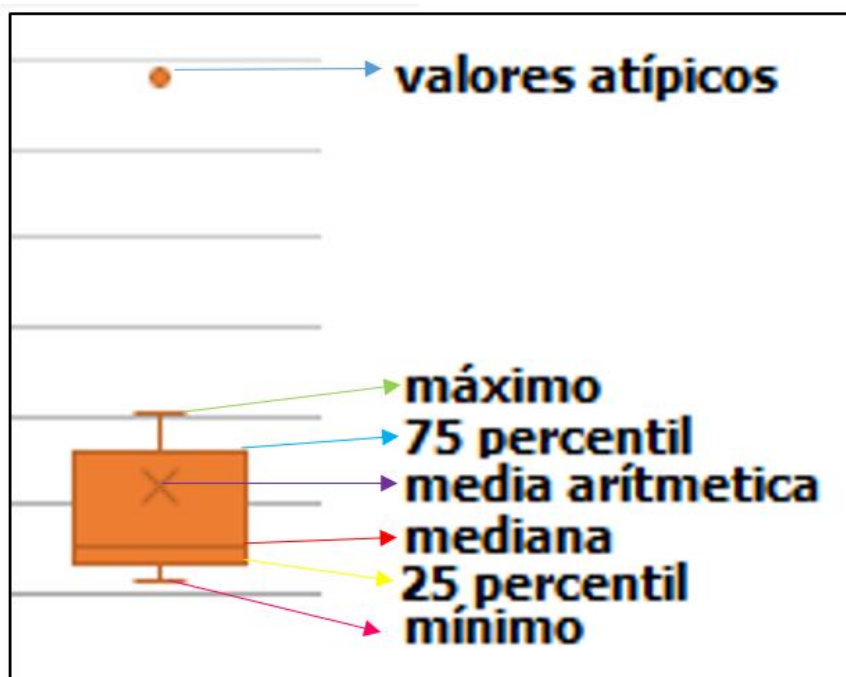


Figura 20. Diagrama Box Plot (cajas y bigotes).

5.3.1. Elementos mayores

Los elementos mayores se determinaron por su concentración en relación con los demás elementos. Los aniones más abundantes son HCO_3 , SO_4 , Cl , NO_3 y F , su concentración oscila de 0.3 mg/L y 500 mg/L para el agua superficial en periodo de Lluvias, y entre 0.6 mg/L a 471.6 mg/L en temporada de estiaje. Para el agua subterránea se tiene una concentración de 0.1 mg/L a 800 mg/L en el periodo de lluvias y entre 0.0 mg/L a 599.2 mg/L en periodo de estiaje. Obteniendo la mayor y menor concentración en el agua subterránea sin embargo en distinto periodo para el primer es en el periodo de lluvias y la menor en el periodo de estiaje. Siendo el HCO_3 el más abundante para ambos periodos de muestreo sin embargo en la temporada de estiaje en el agua superficial se presenta un incremento notorio en el promedio de los SO_4 .

Por otra parte los cationes presentes son Ca, Mg, Na y K y su rango en agua superficial es entre 1.2 mg/L y 241.1 mg/L para el periodo de lluvias y de 0 mg/L a 223.4 mg/L para el periodo de estiaje, para el agua subterránea se tienen valores de 0.7 mg/L a 302.4 mg/L para el periodo de lluvias y de 0.7 mg/L a 252.6 mg/L en periodo de estiaje, la mayor concentración es de Ca que se presenta en agua subterránea en periodo de lluvias. En la Tabla 13 se presenta la descripción estadística de cada elemento con su periodo de muestreo y respectiva clasificación (superficial/subterránea).

Tabla 13. Elementos mayores y menores.

PERÍODO	UNIDAD	MÍNIMO				MÁXIMO			
		Lluvias		Estiaje		Lluvias		Estiaje	
		A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub
HCO ₃	mg/L	145.1	91.6	127.0	209.3	271.3	496.0	309.1	403.6
SO ₄	mg/L	85.0	10.0	39.2	20.2	500.0	800.0	471.6	599.2
Cl	mg/L	5.0	3.6	17.9	14.3	94.6	44.1	100.1	71.5
NO ₃	mg/L	5.8	6.2	2.7	1.8	34.1	37.6	11.5	12.0
F	mg/L	0.3	0.1	0.6	0.0	0.9	1.2	1.3	1.4
Ca	mg/L	75.4	49.6	147.0	83.5	241.1	302.4	223.4	252.6
Mg	mg/L	9.4	0.9	2.3	0.8	36.4	58.8	45.9	51.4
Na	mg/L	1.9	0.7	0.9	0.8	10.2	28.1	27.6	22.1
K	mg/L	1.2	0.7	0.0	0.7	3.2	4.9	3.6	2.3
PERÍODO	UNIDAD	MEDIA ARITMETICA				DESVIACION ESTÁNDAR			
		Lluvias		Estiaje		Lluvias		Estiaje	
		A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub
HCO ₃	mg/L	214.3	315.5	231.4	309.5	41.8	123.9	53.8	60.3
SO ₄	mg/L	202.5	223.7	356.3	200.3	133.1	317.3	112.0	216.7
Cl	mg/L	34.8	12.4	46.2	28.0	30.4	12.6	29.7	16.5
NO ₃	mg/L	11.0	13.6	6.1	5.3	7.6	8.5	2.9	3.2
F	mg/L	0.6	0.5	0.9	0.5	0.2	0.4	0.2	0.4
Ca	mg/L	138.4	163.3	178.9	154.5	53.7	87.3	22.8	51.6
Mg	mg/L	20.0	19.6	31.6	18.0	9.3	22.0	11.0	19.1
Na	mg/L	4.5	5.0	12.7	4.3	2.9	7.7	9.7	5.7
K	mg/L	2.1	1.9	1.7	1.4	0.6	1.1	1.2	0.5
PERÍODO	UNIDAD	RANGO (MÁX-MIN)				N			
		Lluvias		Estiaje					
		A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub				
HCO ₃	mg/L	126.19	404.35	182.075	194.333	26			
SO ₄	mg/L	415	790	432.396	579.029	26			
Cl	mg/L	89.565	40.528	82.1942	57.1786	26			
NO ₃	mg/L	28.339	31.439	8.856	10.1844	26			
F	mg/L	0.54	1.08	0.69	1.37	26			
Ca	mg/L	165.7	252.84	76.4561	169.114	26			
Mg	mg/L	27.087	57.869	43.6349	50.6842	26			
Na	mg/L	8.3437	27.411	26.6696	21.2793	26			
K	mg/L	2.054	4.1854	3.5705	1.59313	26			

A continuación, se presentan los gráficos de cajas y bigotes de cada elemento:

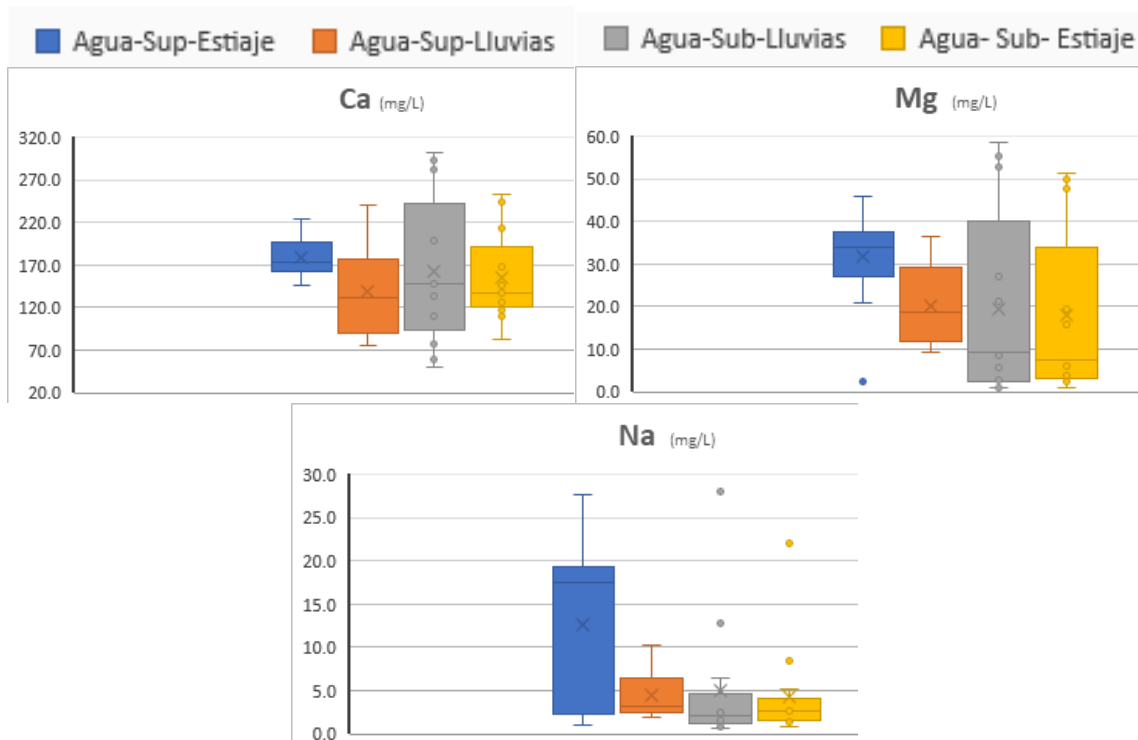


Figura 21. Diagramas de caja de bigotes de elementos mayores “CATIONES”.

En la Figura 21 se muestran los cationes, el predominante es el Ca con un rango de 50 a 300 mg/L. Además, se identifica que los elementos Na y Mg se presentan más elevadas sus concentraciones en el periodo de estiaje.

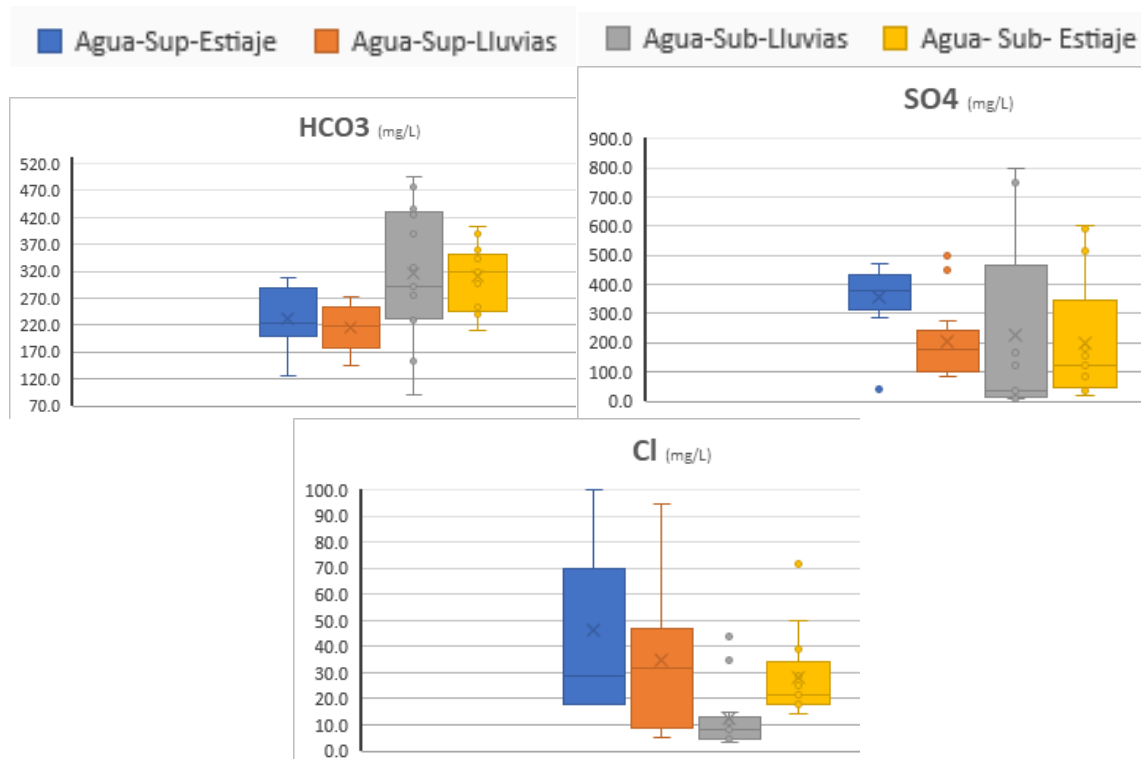


Figura 22. Diagramas de caja de bigotes de elementos mayores “ANIONES”.

Para los aniones se observa (Figura 22) que el elemento predominante es el SO₄ con un rango de 10 mg/L a 800 mg/L, esta máxima concentración se obtiene en el agua subterránea en el periodo de Lluvias.

5.3.2. Elementos menores

Dentro de los elementos menores (Figura 23) se tomaron en cuenta los aniones NO₃ sus concentraciones van de 1.8 mg/L a 37.6 mg/L, la máxima concentración se presenta en agua subterránea en el periodo de lluvias. Para el F se tienen concentraciones de 0 mg/L a 1.4mg/L esta última obtenida en el agua subterránea en el periodo de estiaje; el catión K tiene una concentración entre 0 mg/L y 5 mg/L, esta concentración se registra en agua subterránea en el periodo de lluvias.

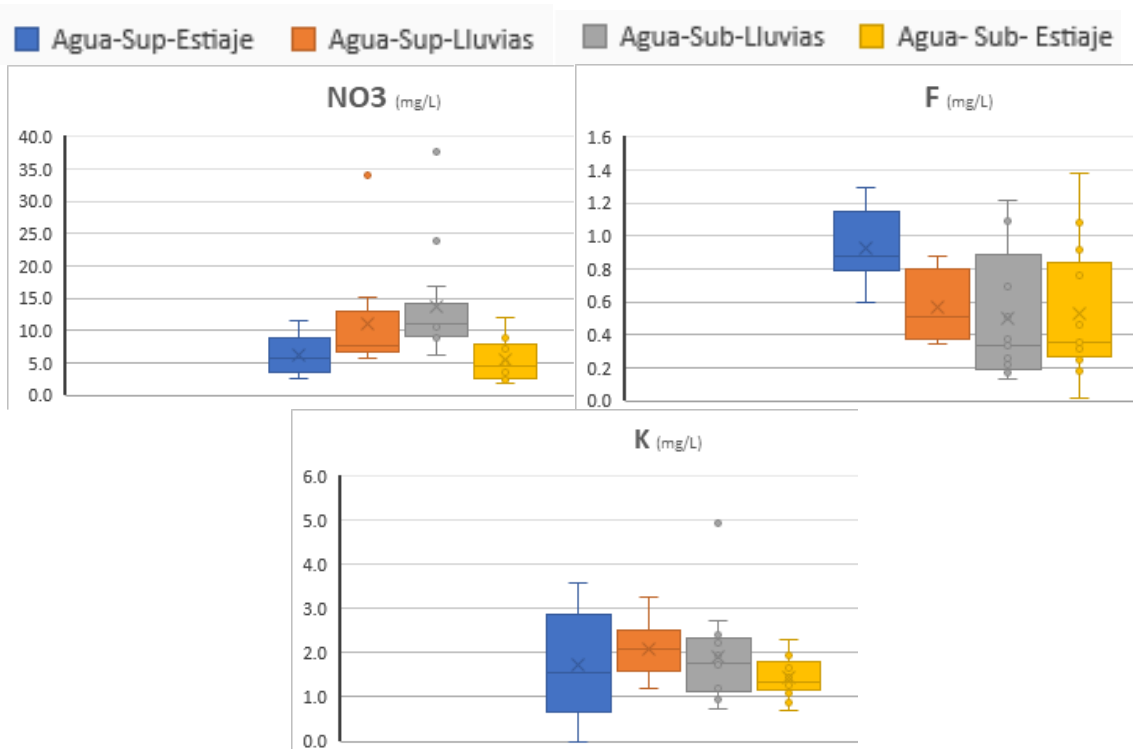


Figura 23. Diagramas de caja de bigotes de elementos menores.

5.3.3. Elementos traza

Al igual que los elementos mayores y menores, se estableció en la presente investigación el análisis de elementos traza, dentro de los que destacan, por su concentración e importancia: Sr, Fe, Pb, Ba, Zn, Li, U y Hg.

En la Tabla 14 se observa de manera detallada su descripción estadística. Se puede apreciar que el Estroncio es el elemento más abundante con un máximo de 4953 ug/L esta concentración se presenta en el agua superficial en el periodo de estiaje. El segundo elemento que presenta concentración máxima en el agua subterránea en temporada de estiaje es el Fe con 2050 ug/L. El elemento con menor concentración es el Hg el cual se presenta con un rango de 0.7 a 1.2 ug/L.

En la Figura 24 se presentan los diagramas de cajas correspondientes a los elementos mencionados.

Tabla 14. Elementos traza.

PERIODO	UNIDAD	MÍNIMO				MÁXIMO			
		Lluvias		Estiaje		Lluvias		Estiaje	
		A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub
Sr	ug/L	701.9	43.5	2019.5	195.4	2685.6	4177.9	4952.5	4120.0
Fe	ug/L	9.6	6.3	38.0	15.1	103.4	1597.4	74.0	2049.5
Pb	ug/L	1.6	1.5	1.4	0.3	115.3	44.8	103.1	39.4
Ba	ug/L	7.5	6.1	18.6	13.9	43.6	140.2	41.4	130.9
Zn	ug/L	0.8	1.3	4.7	2.6	62.4	219.9	50.4	40.2
Li	ug/L	4.6	0.3	12.0	1.5	25.6	44.8	34.1	46.1
U	ug/L	0.7	0.4	0.5	0.1	1.0	1.4	1.3	1.3
Hg	ug/L	0.6	0.6	0.6	0.4	0.7	0.7	0.7	1.2

PERIODO	UNIDAD	MEDIA ARITMETICA				DESVIACION ESTÁNDAR			
		Lluvias		Estiaje		Lluvias		Estiaje	
		A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub
Sr	ug/L	1441.1	1231.0	3486.9	1246.6	680.2	1547.3	848.6	1463.0
Fe	ug/L	35.5	146.2	55.0	212.9	31.6	436.4	13.2	554.2
Pb	ug/L	23.1	24.6	15.0	6.7	41.2	20.7	27.7	12.4
Ba	ug/L	17.7	33.6	26.6	35.3	11.1	35.6	7.8	31.0
Zn	ug/L	10.4	38.3	16.4	13.5	17.5	69.0	12.0	11.7
Li	ug/L	10.3	12.5	24.6	13.4	6.7	17.1	7.1	17.6
U	ug/L	0.8	0.9	0.9	0.8	0.1	0.3	0.3	0.3
Hg	ug/L	0.7	0.7	0.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.2

PERIODO	UNIDAD	RANGO (MÁX-MIN)				N
		Lluvias		Estiaje		
		A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub	
Sr	ug/L	1983.6	4134.3	2933.0	3924.6	26
Fe	ug/L	93.8	1591.0	35.9	2034.4	26
Pb	ug/L	113.7	43.3	101.6	39.0	26
Ba	ug/L	36.1	134.1	22.8	116.9	26
Zn	ug/L	61.6	218.7	45.8	37.6	26
Li	ug/L	21.0	44.5	22.1	44.6	26
U	ug/L	0.3	0.9	0.8	1.3	26
Hg	ug/L	0.1	0.1	0.1	0.8	26

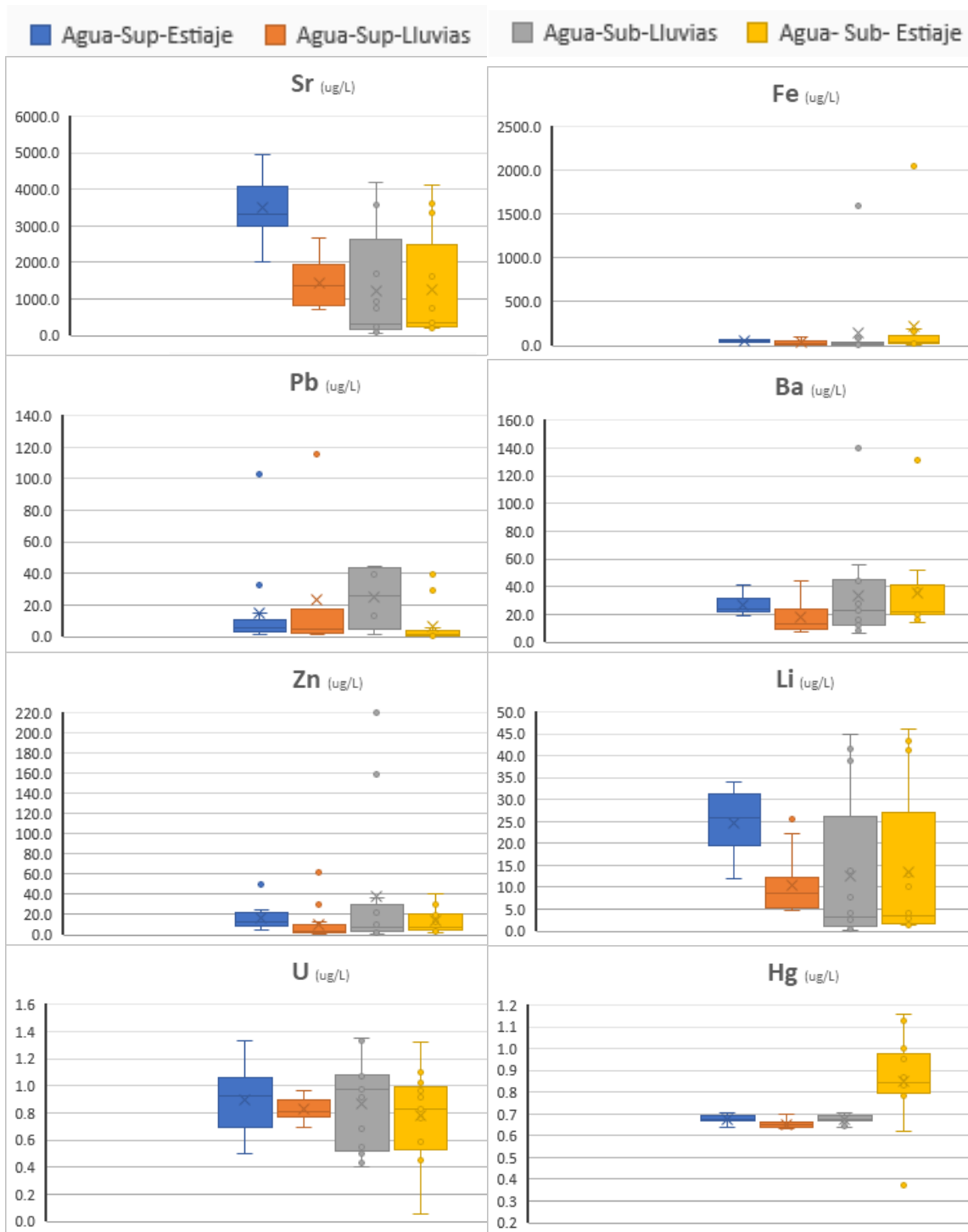


Figura 24. Diagramas de caja de bigotes de elementos Traza.

5.3.4. Determinación de las Familias de Agua

La determinación de la familia de agua se logra por el criterio del ion dominante, el cual se basa en la cuantificación selectiva de aniones y cationes para cada muestra expresados en % de meq/L. Esto se establece de acuerdo con el anión y catión que

sobre pasa el 50% del total de miliequivalentes por litro, si ninguno sobre pasa esta concentración el agua se clasifica como MIXTA.

De acuerdo con esta clasificación se determinaron en el área de estudio tres familias de agua para el primer muestreo en temporada de lluvias.

- Cálctica – Bicarbonatada (Ca-HCO₃)
- Cálctica – Sulfatada (Ca-SO₄)
- Cálctica – Mixta

Y para el segundo muestreo en temporada de estiaje solo se identificaron dos familias:

- Cálctica – Bicarbonatada (Ca-HCO₃)
- Cálctica – Sulfatada (Ca-SO₄)

En la Tabla 15 se puede observar la clasificación de los aprovechamientos según la familia de agua y el periodo de muestreo.

En la Figura 25 se representa en un mapa la distribución geográfica de las familias de agua por muestras del primer muestreo en periodo de lluvias. Y en la Figura 26 se representa el segundo muestreo en el periodo de Estiaje. Ambos mapas contienen los diagramas de Stiff los cuales tienen distinto color según la familia de agua la Ca-HCO₃ es rojo, la Ca-SO₄ es amarillo y la Ca-Mixta de color morado.

Tabla 15. Familias de agua en ambos muestreos.

SampleID	StationID	Location	Tipo	X	Y	Familia 1er. Muestreo	Familia 2do. Muestreo
1-2	1	EL CAMPAMENTO	NORIA	471791	2420868	Ca-HCO3	Ca-HCO3
2-2	2	CABEZAS	MANANTIAL	468911	2417131	Ca-HCO3	Ca-HCO3
3-2	3	CABEZAS	MANANTIAL	469465	2416695	Ca-HCO3	Ca-HCO3
4-2	4	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	467733	2418190	Ca-HCO3	Ca-HCO3
5-2	5	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	467699	2418194	Ca-HCO3	Ca-HCO3
6-2	6	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	467161	2418139	Ca-SO4	Ca-SO4
7-2	7	CABEZAS- OSCURANAS	MANANTIAL	466914	2417821	Ca-SO4	Ca-SO4
8-2	8	CIENEGA CABEZAS	MANANTIAL	466576	2415431	Ca-SO4	Ca-SO4
9-2	9	EL CARPINTERO, RIO GALLINAS	RIO	474045	2422551	Ca-HCO3	Ca-SO4
10-2	10	CAPUCHINAS	MANANTIAL	468537	2407971	Ca-HCO3	Ca-HCO3
11-2	11	VEINTE DE NOVIEMBRE	NORIA	471142	2405765	Ca-HCO3	Ca-HCO3
12-2	12	VEINTE DE NOVIEMBRE,RIO LA CIENEGA	RIO	471046	2406194	Ca-SO4	Ca-SO4
13-2	13	VEINTE DE NOVIEMBRE,RIO LA CIENEGA	RIO	471015	2406284	Ca-SO4	Ca-SO4
14-2	14	LA ESPERANZA	NORIA	471366	2409364	Ca-HCO3	Ca-HCO3
15-2	15	EL JABALI, RIO GALLINAS	RIO	474674	2421363	Ca-mixta	Ca-SO4
16-2	16	RIO GALLINAS CRUCE PUENTE AUTOPISTA	RIO	475264	2426712	Ca-HCO3	Ca-HCO3
17-2	17	RIO GALLINAS	RIO	474268	2417972	Ca-HCO3	Ca-SO4
18-2	18	RIO GALLINAS	RIO	475301	2414614	Ca-HCO3	Ca-SO4
19-2	19	RIO GALLINAS CRUCE PUENTE DEL FERROCARRIL	RIO	474385	2429953	Ca-mixta	Ca-SO4
20-2	20	RASCON	RIO	473666	2431334	Ca-SO4	Ca-SO4
21-2	21	TAMBACA	RIO	469020	2429105	Ca-mixta	Ca-SO4
22-2	22	RASCON-ALAMEDA	POZO	473540	2429346	Ca-HCO3	Ca-HCO3
23-2	23	RASCON	POZO	474100	2430259	Ca-HCO3	Ca-HCO3
24-2	24	RIO TAMASOPO, PASO REAL	RIO	474754	2427450	Ca-mixta	Ca-SO4
25-2	25	EL NACIMIENTO, TANCHACHIN	RIO	484499	2413750	Ca-mixta	Ca-SO4
26-2	26	RIO SANTA MARIA, TANCHACHIN	RIO	484414	2413004	Ca-mixta	Ca-SO4

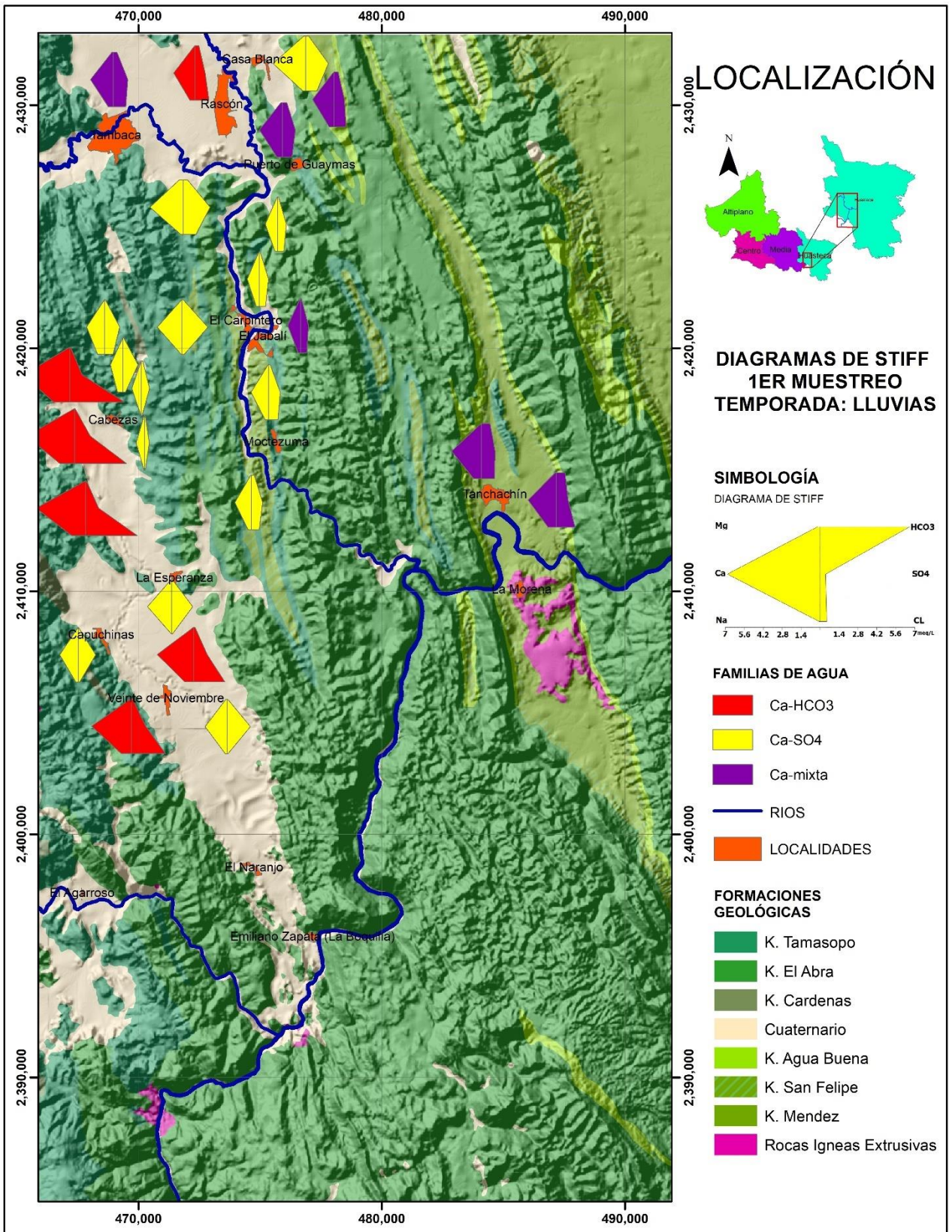
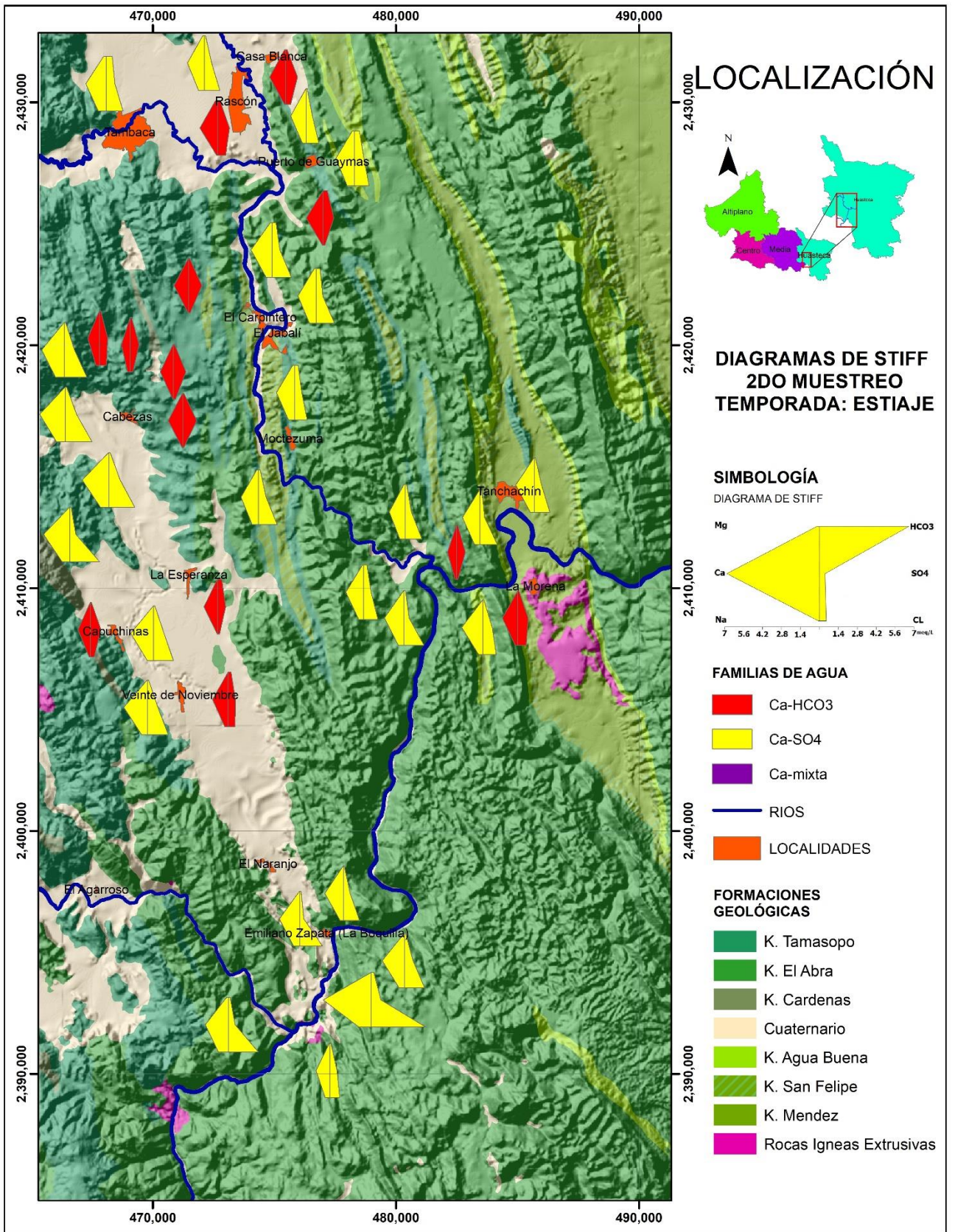


Figura 25. Mapa diagramas Stiff periodo de Lluvias.



5.3.5. Determinación de la Calidad

La calidad de las aguas, junto a la cantidad, es uno de los indicadores prioritario para los cuerpos de agua tanto el superficial como el subterráneo, estos son identificados por las Naciones Unidas para definir el desarrollo sostenible. La calidad define las aptitudes de las aguas para ser aprovechada en diversos usos, en el presente trabajo se evalúa para el uso agrícola y el uso público – urbano. Para la evaluación del uso agrícola se consideran como algunos de los indicadores la CE, la salinidad efectiva, la relación de adsorción de Na, concentración de Ca, Cl, Na y HCO₃ entre otros.

El agua natural es un sistema de cierta complejidad, no homogéneo, que puede estar constituido por una fase acuosa, una gaseosa y una o más fases sólidas. La composición química de este sistema en función del uso que se le da recibe el nombre de calidad del agua. García (2015), plantea en su artículo “*Calidad del agua con fines de riego*” depende básicamente del contenido y tipo de sales.

Para el uso público- urbano se utilizó como referencia la Norma Oficial Mexicana de Calidad del Agua para Uso y Consumo Humano (NOM-127-SSA1-1994), la cual señala los valores máximos permisibles de diversas características y elementos químicos establecidos por la Secretaría de Salud, y que condicionan si el agua es apta para uso y consumo humano.

PARA USO AGRICOLA

Son tres los criterios generales que se emplean para evaluar la calidad del agua para el riego agrícola, contenido de sales solubles, Na, Ca, Mg, Cl, entre otros. Los cuerpos de aguas están sometidos a impactos negativos como resultado de no aplicarse medidas de tratamiento, por la deforestación, el empleo de químicos que se generan como consecuencia del desarrollo económico y social. Una desventaja que se tiene en este estudio es el predominio de suelos kársticos. En la Tabla 16 y 17 se presentan los resultados de análisis químicos obtenidos.

Tabla 16. Resultados de los Análisis Químicos

SampleID	StationID	X	Y	Temp	pH_field	Cond_field	Ca	Mg	Na	K	HCO3	CO3	Cl	SO4	NO3	Ca	Mg	Na	K	HCO3	CO3	Cl	SO4	NO3
		m	m	°C		uS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
3-2	3	469465	2416695	24.4	7.46	278.40	49.6	1.0	0.7	2.7	91.6	0.3	11.2	13.0	23.9	2.5	0.1	0.0	0.1	1.5	0.0	0.3	0.3	0.4
3-3	3	469465	2416695	24.2	6.42	738.00	137.1	2.2	1.5	1.1	403.6	0.1	17.9	20.2	4.0	6.8	0.2	0.1	0.0	6.6	0.0	0.5	0.4	0.1
4-2	4	467733	2418190	23.0	7.34	512.00	77.1	21.2	1.3	1.3	274.9	0.4	4.8	35.0	9.3	3.8	1.7	0.1	0.0	4.5	0.0	0.1	0.7	0.1
4-3	4	467733	2418190	22.7	6.78	554.00	83.5	15.7	1.6	0.7	254.1	0.1	17.9	55.3	3.5	4.2	1.3	0.1	0.0	4.2	0.0	0.5	1.2	0.1
5-1	5	467699	2418190	23.6	7.13	443.00	104.7	13.6	0.6	0.6	294.8		10.1	10.0	16.6	5.2	1.1	0.0	0.0	4.8	0.0	0.3	0.2	0.3
5-1-A	5	467699	2418194	23.3	7.10	470.00	104.9	13.4	1.6	0.6	301.7		12.2	23.0	15.5	5.2	1.1	0.1	0.0	4.9	0.0	0.3	0.5	0.2
5-2	5	467699	2418194	22.9	7.27	718.00	110.1	27.2	1.5	2.0	274.9	0.3	3.6	120.0	10.6	5.5	2.2	0.1	0.0	4.5	0.0	0.1	2.5	0.2
5-3	5	467699	2418194	22.8	6.70	782.00	110.0	20.3	1.5	0.9	239.2	0.1	21.4	156.7	3.1	5.5	1.7	0.1	0.0	3.9	0.0	0.6	3.3	0.0
6-1	6	467161	2418139	23.2	6.89	618.00	113.7	18.8	0.2	1.0	273.7		12.2	165.0	10.0	5.7	1.5	0.0	0.0	4.5	0.0	0.3	3.4	0.2
6-2	6	467161	2418139	23.3	7.10	1516.00	282.3	58.8	2.8	2.2	229.1	0.2	9.0	800.0	9.7	14.1	4.8	0.1	0.1	3.8	0.0	0.3	16.7	0.2
6-3	6	467161	2418139	23.1	6.58	1492.00	213.4	49.8	2.5	1.4	297.1	0.1	25.0	512.5	2.2	10.6	4.1	0.1	0.0	4.9	0.0	0.7	10.7	0.0
7-1	7	466914	2417821	24.0	6.80	1185.00	225.0	42.5	0.5	1.8	278.6		16.2	425.0	18.8	11.2	3.5	0.0	0.0	4.6	0.0	0.5	8.8	0.3
7-1-A	7	466914	2417821	25.8	7.17	1174.00	189.0	41.3	0.3	1.4	259.0		10.1	300.0	21.0	9.4	3.4	0.0	0.0	4.2	0.0	0.3	6.2	0.3
7-2	7	466914	2417821	23.4	6.94	1569.00	293.9	55.2	2.8	1.8	293.0	0.2	5.4	760.0	8.9	14.7	4.5	0.1	0.0	4.8	0.0	0.2	15.8	0.1
7-3	7	466914	2417821	23.2	6.49	1590.00	243.4	51.4	2.9	2.3	319.4	0.1	17.9	599.2	1.8	12.1	4.2	0.1	0.1	5.2	0.0	0.5	12.5	0.0
8-1	8	466576	2415431	24.6	6.84	1309.00	352.3	55.6	0.5	1.2	278.6		12.2	725.0	15.5	17.6	4.6	0.0	0.0	4.6	0.0	0.3	15.1	0.2
8-2	8	466576	2415431	23.3	7.07	1635.00	302.4	52.8	2.4	1.7	236.8	0.3	5.2	750.0	11.5	15.1	4.3	0.1	0.0	3.9	0.0	0.1	15.6	0.2
8-3	8	466576	2415431	23.2	6.36	1762.00	252.6	47.6	2.9	1.4	327.5	0.1	25.0	592.5	2.2	12.6	3.9	0.1	0.0	5.4	0.0	0.7	12.3	0.0
9-2	9	474045	2422551	23.7	8.23	485.50	75.4	11.9	3.1	2.1	168.0	2.2	6.8	87.5	8.9	3.8	1.0	0.1	0.1	2.8	0.1	0.2	1.8	0.1
9-3	9	474045	2422551	20.5	7.62	1325.00	200.1	33.7	17.5	2.2	224.2	0.6	67.9	439.6	4.0	10.0	2.8	0.8	0.1	3.7	0.0	1.9	9.2	0.1
10-1	10	468537	2407971	22.6	6.70	459.00	131.0	5.4	0.5	0.8	313.1		8.1	10.0	21.0	6.5	0.4	0.0	0.0	5.1	0.0	0.2	0.2	0.3
10-2	10	468537	2407971	22.8	7.17	501.00	112.7	8.7	0.8	1.9	326.9	0.3	4.4	20.0	11.1	5.6	0.7	0.0	0.0	5.4	0.0	0.1	0.4	0.2
10-3	10	468537	2407971	22.8	6.60	642.00	117.9	7.4	0.8	1.3	299.0	0.1	14.3	81.7	4.9	5.9	0.6	0.0	0.0	4.9	0.0	0.4	1.7	0.1
12-2	12	471046	2406194	29.6	7.63	1291.00	241.1	36.4	2.5	3.2	271.3	0.8	15.0	500.0	15.1	12.0	3.0	0.1	0.1	4.4	0.0	0.4	10.4	0.2
12-3	12	471046	2406194	20.6	7.47	1289.00	223.4	33.7	2.2	0.4	299.0	0.6	17.9	471.6	5.8	11.2	2.8	0.1	0.0	4.9	0.0	0.5	9.8	0.1
13-2	13	471015	2406284	29.8	7.62	1294.00	224.1	33.9	2.2	2.6	247.9	0.8	10.6	450.0	13.7	11.2	2.8	0.1	0.1	4.1	0.0	0.3	9.4	0.2
13-3	13	471015	2406284	20.6	7.41	1388.00	215.9	36.5	2.2	-0.2	299.0	0.5	21.4	453.0	5.3	10.8	3.0	0.1	0.0	4.9	0.0	0.6	9.4	0.1
15-2	15	474674	2421363	24.5	8.22	491.30	80.4	9.4	3.0	1.2	145.1	2.4	5.0	85.0	34.1	4.0	0.8	0.1	0.0	2.4	0.1	0.1	1.8	0.5
15-3	15	474674	2421363	20.9	7.70	1297.00	173.3	38.4	20.0	2.9	194.3	0.7	64.3	416.2	2.7	8.6	3.2	0.9	0.1	3.2	0.0	1.8	8.7	0.0
16-2	16	475264	2426712	24.0	8.20	490.00	76.2	9.9	4.0	1.9	160.4	2.1	5.6	87.5	12.4	3.8	0.8	0.2	0.0	2.6	0.1	0.2	1.8	0.2
16-3	16	475264	2426712	20.6	7.64	1360.00	158.2	2.3	0.9	1.5	309.1	0.8	71.5	39.2	11.5	7.9	0.2	0.0	0.0	5.1	0.0	2.0	0.8	0.2
17-2	17	474268	2417972	26.0	8.25	593.00	106.7	12.9	4.8	2.1	217.5	2.4	18.9	137.5	7.1	5.3	1.1	0.2	0.1	3.6	0.1	0.5	2.9	0.1
17-3	17	474268	2417972	20.9	7.70	1257.00	169.8	34.2	18.7	1.5	209.1	0.6	60.8	286.6	8.4	8.5	2.8	0.8	0.0	3.4	0.0	1.7	6.0	0.1
18-2	18	475301	2414614	26.4	8.23	578.00	101.0	12.0	4.3	2.4	206.2	2.2	31.5	114.5	7.1	5.0	1.0	0.2	0.1	3.4	0.1	0.9	2.4	0.1
18-3	18	475301	2414614	21.2	7.63	1211.00	164.8	36.9	18.6	2.8	222.7	0.6	28.6	425.8	2.7	8.2	3.0	0.8	0.1	3.6	0.0	0.8	8.9	0.0
19-2	19	474385	2429953	25.8	8.04	747.00	131.0	18.5	2.0	1.2	195.2	1.6	45.2	175.0	6.2	6.5	1.5	0.1	0.0	3.2	0.1	1.3	3.6	0.1
19-3	19	474385	2429953	19.5	7.54	907.00	147.0	21.0	2.7	1.0	177.9	0.4	17.9	289.4	9.3	7.3	1.7	0.1	0.0	2.9	0.0	0.5	6.0	0.1
20-2	20	473666	2431334	25.3	8.09	758.00	129.8	18.6	1.9	1.2	186.3	1.3	39.9	205.0	5.8	6.5	1.5	0.1	0.0	3.1	0.0	1.1	4.3	0.1
20-3	20	473666	2431334	19.9	7.58	913.00	161.6	34.1	18.4	1.5	205.0	0.4	17.9	349.8	6.6	8.1	2.8	0.8	0.0	3.4	0.0	0.5	7.3	0.1
21-2	21	469020	2429105	24.6	8.29	778.00	139.2	18.8	9.4	2.1	268.7	3.3	37.8	180.0	7.5	6.9	1.5	0.4	0.1	4.4	0.1	1.1	3.7	0.1
21-3	21	469020	2429105	21.1	7.79	1568.00	193.7	45.9	27.6	3.6	252.9	1.0	100.1	381.1	4.0	9.7	3.8	1.2	0.1	4.1	0.0	2.8	7.9	0.1

Tabla 17. Continuación de los Análisis Químicos

SampleID	StationID	X	Y	Temp	pH_field	Cond_field	Ca	Mg	Na	K	HCO3	CO3	Cl	SO4	NO3	Ca	Mg	Na	K	HCO3	CO3	Cl	SO4	NO3
		m	m	°C		uS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
24-2	24	474754	2427450	24.8	8.20	775.00	140.6	19.3	10.2	2.0	241.3	0.1	48.3	140.0	7.1	7.0	1.6	0.4	0.1	4.0	0.0	1.4	2.9	0.1
24-3	24	474754	2427450	21.2	7.65	1526.00	174.3	40.7	24.7	2.9	277.8	0.8	85.8	333.5	3.1	8.7	3.3	1.1	0.1	4.6	0.0	2.4	6.9	0.0
25-2	25	484499	2413750	25.3	8.13	1134.00	181.4	28.9	2.6	1.9	257.1	2.0	94.6	195.0	12.2	9.0	2.4	0.1	0.0	4.2	0.1	2.7	4.1	0.2
25-3	25	484499	2413750	22.9	8.24	1188.00	174.5	22.8	2.0	0.0	209.7	2.3	17.9	352.2	9.7	8.7	1.9	0.1	0.0	3.4	0.1	0.5	7.3	0.2
26-2	26	484414	2413004	28.1	8.12	1011.00	172.8	29.9	8.0	2.8	220.5	2.0	93.5	275.0	5.8	8.6	2.5	0.3	0.1	3.6	0.1	2.6	5.7	0.1
26-3	26	484414	2413004	23.2	8.17	1298.00	168.6	31.2	9.0	2.1	127.0	1.2	28.6	394.2	5.8	8.4	2.6	0.4	0.1	2.1	0.0	0.8	8.2	0.1
27-3	27	467742	2412216	23.6	6.64	1742.00	250.2	45.3	2.6	1.5	164.4	0.1	17.9	670.2	2.7	12.5	3.7	0.1	0.0	2.7	0.0	0.5	14.0	0.0
28-3	28	475203	2392009	22.5	7.59	1662.00	219.8	57.5	21.5	3.3	194.3	0.6	28.6	679.4	4.0	11.0	4.7	0.9	0.1	3.2	0.0	0.8	14.1	0.1
29-3	29	475745	2391697	23.9	7.52	918.00	131.5	26.7	5.1	0.9	204.1	0.4	17.9	225.7	6.6	6.6	2.2	0.2	0.0	3.3	0.0	0.5	4.7	0.1
30-3	30	476143	2393104	25.5	6.47	3105.00	455.4	70.2	4.4	1.2	269.1	0.1	39.3	1240.7	3.5	22.7	5.8	0.2	0.0	4.4	0.0	1.1	25.8	0.1
32-3	32	477392	2395482	20.5	7.42	1295.00	212.9	30.9	2.1	0.2	238.9	0.1	17.9	454.2	4.0	10.6	2.5	0.1	0.0	3.9	0.0	0.5	9.5	0.1
33-3	33	477292	2395580	24.0	7.67	1375.00	193.1	34.9	5.5	0.9	119.6	1.5	21.4	518.5	6.2	9.6	2.9	0.2	0.0	2.0	0.1	0.6	10.8	0.1
34-3	34	481021	2411394	21.6	7.68	1196.00	152.6	32.2	16.8	2.5	172.0	0.5	21.4	378.0	5.8	7.6	2.7	0.7	0.1	2.8	0.0	0.6	7.9	0.1
35-3	35	480897	2410470	23.0	7.34	1242.00	169.4	29.4	13.8	2.6	210.3	0.3	50.0	320.5	6.6	8.5	2.4	0.6	0.1	3.4	0.0	1.4	6.7	0.1
36-3	36	480906	2410410	22.5	8.32	1286.00	185.2	34.1	5.8	1.6	146.4	2.0	25.0	449.8	6.2	9.2	2.8	0.3	0.0	2.4	0.1	0.7	9.4	0.1
37-3	37	482423	2409933	22.7	7.50	519.00	86.3	7.6	0.7	0.7	254.1	0.5	17.9	29.3	9.3	4.3	0.6	0.0	0.0	4.2	0.0	0.5	0.6	0.1
38-3	38	483149	2410085	24.5	7.25	1335.00	198.9	24.3	3.4	1.2	272.9	0.3	17.9	307.0	11.5	9.9	2.0	0.1	0.0	4.5	0.0	0.5	6.4	0.2
39-3	39	483380	2410109	24.3	7.44	931.00	146.4	15.3	1.9	2.2	301.0	0.5	17.9	189.5	9.3	7.3	1.3	0.1	0.1	4.9	0.0	0.5	3.9	0.1

INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS, ÍNDICES Y CLASIFICACIÓN

RIESGO DE SALINIZACIÓN

Se evalúa normalmente mediante la determinación de la conductividad eléctrica del agua (C.E.) y afecta a la disponibilidad de agua por el cultivo

Según Terrón, (2002): para los problemas de salinización, utilizando la conductividad eléctrica (CE) del agua, propone la siguiente escala:

$CE \leq 0.7$ milimhos/cm: No hay problema

$0.7 < CE \leq 3.0$ milimhos/cm: Problema Creciente

$CE > 3.0$ milimhos/cm: Problema grave

Se identifica solo una muestra (30-3) pertenece a la clasificación de “Problema grave” ya que tiene 3.1 milimhos/cm. Se tienen 15 muestras como “No hay problema” y el resto 43 son identificadas como “Problema creciente”.

PROBLEMAS DE PERMEABILIDAD

Se expresa mediante la relación de adsorción de sodio (SAR), se relaciona la cantidad de ion sodio frente a la del calcio y magnesio, indicando el riesgo de alcalinización.

Una elevada proporción relativa de sodio respecto a los iones calcio y magnesio en el agua de riego puede inducir cambios de estos iones por los de sodio en los suelos, provocando la degradación de este con la consiguiente pérdida de estructura y permeabilidad.

Su valor viene dado por la siguiente expresión

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

Tabla 18. Clasificación (SAR) de riesgo para Riego Agrícola.

RIESGO DE SODIO	
SAR	RIESGO
0-10	Bajo
10-18	Medio
18-26	Alto
más de 26	Muy Alto

Los resultados de las 59 muestras nos indican que se tiene un riego bajo ya que están dentro de este rango (Tabla 18).

El uso del SAR corregido (SAR^0) resulta más real que el anterior, ya que considera que el cálculo precipita con los bicarbonatos. Se utiliza la siguiente Tabla 19 para cálculo del SAR ajustado y las siguientes ecuaciones:

Tabla 19. Clasificación (SAR^0) para Riego Agrícola.

Fuente:FAO (2002)

Suma de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ (meq/l)	Valor de $pK_2 - pK_c$	Suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} (meq/l)	Valor de $p(Ca + Mg)$	Suma de CO_3^{2-} y CO_3H^- (meq/l)	Valor de $p(AIK)$
0,05	2,0	0,05	4,6	0,05	4,3
0,10	2,0	0,10	4,3	0,10	4,0
0,15	2,0	0,15	4,1	0,15	3,8
0,20	2,0	0,20	4,0	0,20	3,7
0,25	2,0	0,25	3,9	0,25	3,6
0,30	2,0	0,30	3,8	0,30	3,5
0,40	2,0	0,40	3,7	0,40	3,4
0,50	2,1	0,50	3,6	0,50	3,3
0,75	2,1	0,75	3,4	0,75	3,1
1,00	2,1	1,00	3,3	1,00	3,0
1,25	2,1	1,25	3,2	1,25	2,9
1,50	2,1	1,50	3,1	1,50	2,8
2,00	2,2	2,00	3,0	2,00	2,7
2,50	2,2	2,50	2,9	2,50	2,6
3,00	2,2	3,00	2,8	3,00	2,5
4,00	2,2	4,00	2,7	4,00	2,4
5,00	2,2	5,00	2,6	5,00	2,3
6,00	2,2	6,00	2,5	6,00	2,2
8,00	2,3	8,00	2,4	8,00	2,1
10,00	2,3	10,00	2,3	10,00	2,0
12,50	2,3	12,50	2,2	12,50	1,9
15,00	2,3	15,00	2,1	15,00	1,8
20,00	2,4	20,00	2,0	20,00	1,7
30,00	2,4	30,00	1,8	30,00	1,5
50,00	2,5	50,00	1,6	50,00	1,3
80,00	2,5	80,00	1,4	80,00	1,1

$$SAR^0 = SAR (1 + 8.4 - pHc)$$

$$pHc = (pK_2 - pK_c) + p(Ca + Mg) + p(AIK)$$

Los resultados obtenidos del SAR⁰ se utilizarán más adelante con la norma RIVERSIDE. Fuente: FAO (2002)

DUREZA EN EL AGUA

El grado de dureza se refiere al contenido de calcio en el agua y se calcula mediante la siguiente formula:

$$Dureza = \frac{(Ca \times 2.5) + (Mg \times 4.12)}{10}$$

La dureza se expresa en grados hidrométricos franceses para clasificar el tipo de agua, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Clasificación de grados hidrométricos Franceses para Riego Agrícola.

Fuente: Ros Orta S, (2001).

TIPO DE AGUA	GRADOS HIDROMÉTRICOS FRANCESES (°F)
Muy dulce	<7
Dulce	7-14
Medianamente dulce	14-22
Medianamente dura	22-32
Dura	32-54
Muy dura	>54

Los resultados obtenidos nos indican que el agua contiene altos valores de calcio ya que, solo 1 muestras no están dentro del concepto relacionado con dureza, es considerara dulce. Se identificaron 29 muestras que pertenecen a la clasificación de agua “Muy dura”, 11 son “medianamente dura”, 18 se clasifican como “Dura”.

CARBONATO SÓDICO RESIDUAL (ÍNDICE DE EATON)

Nos indica la acción degradante del agua sobre las plantas y suelo, y se calcula mediante la siguiente formula:

$$CSR = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg)$$

Según los resultados se puede clasificar con la Tabla 21:

Tabla 21. Carbonato sódico residual para riesgo de Riego Agrícola.

CARBONATO SÓDICO RESIDUAL		
CSR	RIESGO	
<0	Bajo	Recomendable
1.25-2-5	Medio	Poco recomendable
>2.5	Alto	No recomendable

NORMAS COMBINADAS

NORMA RIVERSIDE

Establece la clase agua en función del riesgo de salinización (mediante la CE) y alcalinización (mediante el SAR⁰) que puede originar su uso. Se establecen categorías de clases de aguas enunciadas según las letras C y S.

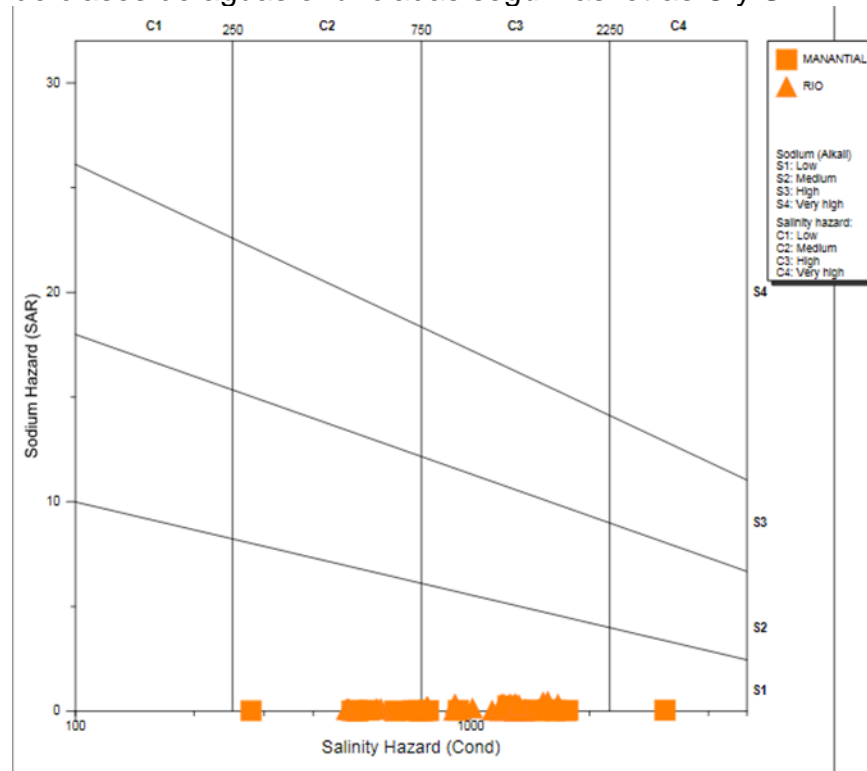


Figura 27. Diagramas de Wilcox para la clasificación SAR.

Fuente: Elaboración propia, Aquachem.

Según los resultados del SAR⁰ y la CE (Figura 27) se obtuvieron 24 muestras con la clasificación C2-S1 la cual nos indica que es un agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad, 48 C3-S1 significa que el agua es de salinidad alta se puede utilizar para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad. y solo 1 C4-S1 esta nos muestra agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad. Todas las muestras tienen la clasificación S1 la cual nos indica que se tiene agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

En general se tiene un agua de buena calidad, se tienen valores bajos de sodio; Más de un millón de hectáreas del mundo producidas con caña de azúcar se ven afectadas por la salinidad / sodicidad. (Choudhary, Ghumana, Thuyb y Bureshb 2004), siendo la caña de azúcar un cultivo semi-tolerante a sodicidad del suelo y moderadamente sensible a la salinidad (Ayres y Westcot, 1976). Sin embargo, el cultivo no se ve afectado con los resultados obtenidos en el análisis.

PARA USO PÚBLICO-URBANO

En el área de estudio, dadas las condiciones terreno e hidrográficas que prevalecen, el abastecimiento a la población es principalmente de agua superficial para las localidades aledañas al río Gallinas, aunque en comunidades más alejadas su abastecimiento es de agua subterránea por medio de pozos, norias y manantiales. En México se rige con la Norma Oficial Mexicana de Calidad del Agua para Uso y Consumo Humano (NOM-127-SSA1-1994), la cual señala los valores máximos permisibles de diversas características y elementos químicos establecidos por la Secretaría de Salud, y que condicionan si el agua es apta para uso y consumo humano.

La norma señala que para que el agua sea segura para la población es necesario, no solo de que esté libre de propiedades no deseadas desde el punto de vista estético (como olor, sabor, turbidez), sino también que su composición química sea la adecuada y no incluya microorganismos patógenos. De este modo, entre las características incluidas en la NOM-127-SSA1-1994 se mencionan: *i)* Biológicas, *ii)* Físicas y organolépticas, *iii)* Químicas y *iv)* Radioactivas (Tabla 22).

Tabla 22. Tabla de características químicas de la NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE	CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.2	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
Arsénico	0.025	pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Bario	0.7	Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Cadmio	0.005	Clordano (total de isómeros)	0.3
Cianuros (como CN-)	0.07	DDT (total de isómeros)	1
Cloro residual libre	0.2-1.50	Gamma-HCH (lindano)	2
Cloruros (como Cl)	250	Hexaclorobenceno	0.01

Cobre	2
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.3
Fluoruros (como F)	1.5
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	0.05

Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20
2,4 - D	50
Plomo	0.01
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1000
Sulfatos (como SO ₄)	400
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5
Trihalometanos totales	0.2
Zinc	5

Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

En este capítulo se consideraron únicamente algunas de las características químicas (los destacados con color gris), analizados a partir de los resultados obtenidos de laboratorio. Se identificaron solo 10 sitios que son los que utilizan el agua para abastecimiento de la población de los cuales se tienen 25 muestras.

De los 17 criterios químicos que se evaluaron, 15 parámetros están por debajo del límite máximo permisible (Figura 28) y tan solo 2 sobrepasan el límite máximo como se puede apreciar en la Figura 29 para la CaCO₃ (Dureza Total), y en la Figura 30 para SO₄.

A continuación, se describen cada uno de los parámetros evaluados:

STD

El agua es conocido como un solvente universal ya que recolecta fácilmente las impurezas. El agua subterránea al estar en la porosidad de los materiales geológicos está en amplio contacto con diversos minerales por lo que interacciona con ellos en forma variada. Los sólidos disueltos se refieren a los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua.

Los STD se originan a partir de:

fuentes naturales (interacción del agua con los minerales que componen el acuífero), fuentes de contaminación (aguas residuales de origen doméstico e industrial, escurrimiento urbano, efluentes agrícolas, etc.).

En algunos casos, el agua subterránea tiene concentraciones elevadas de STD debido a procesos naturales (como sucede en manantiales mineralizados, agua

marina, entre otros), pero en otros casos, el incremento de lo STD está relacionado con contaminación. Se reconoce que en general una elevada concentración de STD no constituye un peligro para la salud de la población, por lo que, aunque datos médicos detallados no están disponibles, al parecer no existen efectos dañinos a la salud de la población cuando la salinidad del agua es mayor a 1000 mg/l, por lo que este límite es básicamente de tipo estético; sin embargo, en muchas ocasiones entre mayor sea la salinidad del agua es más factible encontrar valores elevados de elementos traza tóxicos.

Cl

La concentración promedio calculada es del orden de 27 mg/l. Ningún punto rebasa las concentraciones sean mayores al límite permisible (250 mg/l) se reconoce que no ocasiona mayores problemas en la salud de la población que ingiere agua con valores elevados; sin embargo, cuando las concentraciones son mayores de ese límite, el consumidor del agua detecta un gusto salino en el agua.

Na

Este elemento normalmente es benéfico y requerido por el cuerpo, sin embargo, concentraciones elevadas pueden causar ciertos problemas de salud, además de que imparte sabor al agua de consumo. Ninguna de las muestras de agua rebasa la concentración de 200 mg/l que estipula como límite permisible la NOM-127-SSA1-1994.

NO₃

Ningún sitio reportó valores superiores a 44.28 mg/l NO₃. Cabe hacer mención que en la norma vienen reportado valor máximo permisible, pero de N-NO₃ se hizo la conversión a nitrógeno para la evaluación.

F

Si la concentración excede el límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 de 1.5 mg/l, es dañino a la salud ya que provoca alteraciones dentales, óseas y renales. La presencia de fluoruro generalmente está asociada con fuentes de origen natural, ya que este halógeno puede movilizarse a partir de su presencia en rocas en forma de minerales como el apatito y topacio.

As

El arsénico ha sido reconocido como un elemento tóxico desde tiempos históricos, por lo que su presencia en el agua que se utiliza para consumo humano está regulada por la NOM-127-SSA1-1994. Sin embargo, considerando que se ha detectado un incremento en el Riesgo de contraer cáncer debido a la exposición de bajo nivel al As, recientemente se ha presentado una adecuación al límite permisible establecido para este elemento, que hasta antes del año 2000 era de 0.05 mg/l,

disminuyendo el límite permisible anualmente a partir del 2001 en 0.005 mg/l hasta llegar a 0.025 en el año 2005. En ningún aprovechamiento se presentan concentraciones de arsénico por arriba del límite permisible.

Fe

Las concentraciones de hierro (y manganeso) superiores al límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 no ocasionan problemas a la salud de la población; sin embargo, el límite propuesto es para que el agua sea útil para ciertos propósitos domésticos entre los que se menciona el lavado de ropa, ya que concentraciones de hierro y manganeso mayores a 0.3 mg/L y 0.15 mg/L respectivamente, ocasionan manchas en la ropa y taponan las tuberías de distribución de agua.

Todas las concentraciones de hierro son menores a 0.02 mg/L, que existen en el área de estudio.

Pb

Es bien conocido que diversas actividades antropogénicas tienden a dispersar el plomo en el ambiente. Entre ellas se menciona a las actividades mineras y de metalurgia, la industria de las pinturas, pesticidas y las gasolinas con plomo.

Mg

El límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 es de 0.15 mg/L, en el presente estudio en ningún aprovechamiento se rebasa el límite permisible.

DUREZA TOTAL

De acuerdo con la Secretaría de Salud para el agua de uso público-urbano (500 mg/l CaCO_3) es muy elevado, ya que se considera que precisamente a partir de 180 mg/l CaCO_3 se presentarán problemas asociados con el uso de aguas muy duras. En la zona de estudio, aproximadamente el 51% de las muestras de agua presentaron concentraciones superiores a 500 mg/l CaCO_3 (Figura28);

La dureza total del agua no produce efectos a la salud de la población, pero si interfiere con casi todas las tareas de limpieza doméstica, por lo que el límite permisible establecido para esta característica es básicamente de tipo estético.

SO₄

El límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 es de 400 mg/L, en el presente estudio solo en el aprovechamiento número 7 se rebasa el límite permisible como se muestra en la Figura 30.

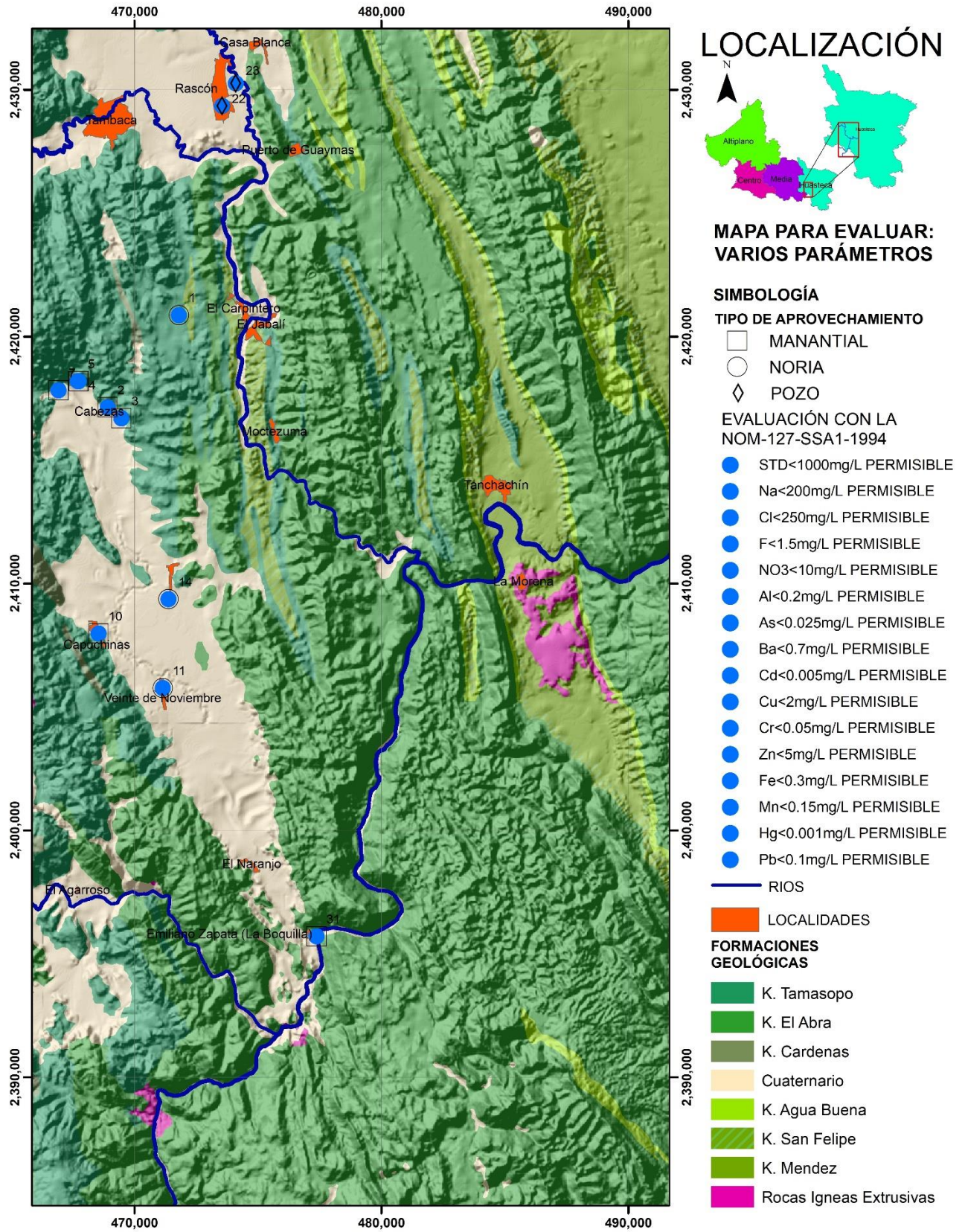


Figura 28. Elementos evaluados por debajo de la NOM-127-SSA1-1994.

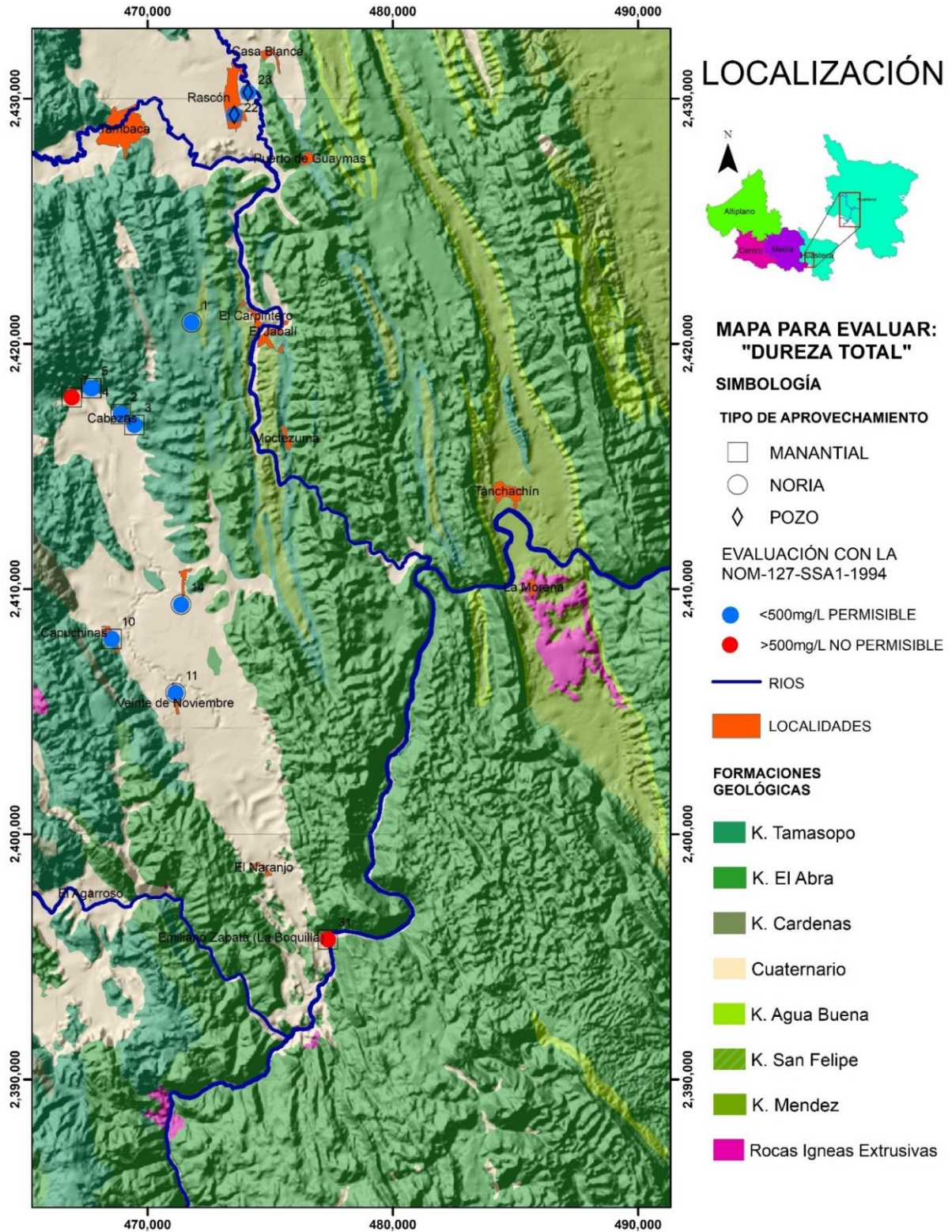


Figura 29. Distribución geográfica de los puntos de muestreo evaluando Dureza Total (mg/L) con la NOM-127-SSA1-1994

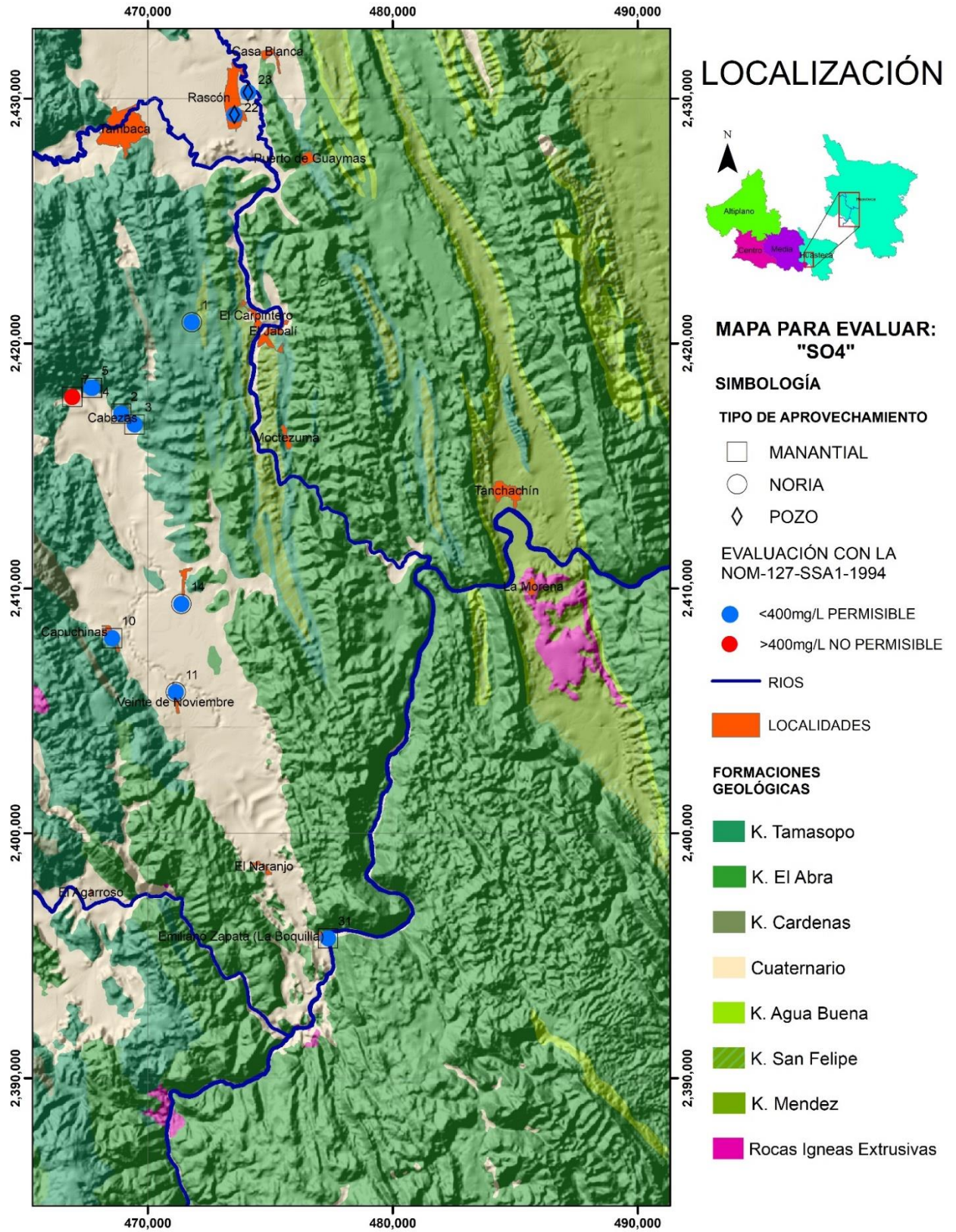


Figura 30. Distribución geográfica de los puntos de muestreo evaluando SO_4 (mg/L) con la NOM-127-SSA1-1994

5.4. ÍNDICE DE CALIDAD

Como nos mencionan Sánchez, Álvarez, Pacheco, Carrillo y González (2016) para impulsar la gestión adecuada del agua es fundamental contar con información necesaria sobre el estado de este recurso, pues así será posible guiar la toma de decisiones y definir acciones. En este sentido, el conocimiento de la composición química y su distribución espacial a través de la calidad del agua es fundamental desde el punto de vista de su aptitud para el consumo humano, además puede indicar cambios estacionales y temporales en la medida que sus constituyentes químicos estén presentes en el acuífero. El índice de calidad del agua (ICA) es una de las herramientas más efectivas para resumir los datos de calidad de las aguas superficiales y subterráneas en un formato fácilmente expresable y comprensible, capaz de ser utilizado por los responsables políticos y ciudadanos interesados. Se define como una técnica de clasificación que engloba la influencia compuesta de cierto grupo de parámetros de calidad del agua en un solo valor general (Tabla 23).

Tabla 23. Pesos relativos de los parámetros considerados para el ICA según su importancia para la salud humana.

Parametro	unidad	Limite máximo permisible	wi	Wi
pH	rango pH	6.5 -8.5	1	0.04
SDT	mg/l	1000	5	0.2
Dureza	mg/l	500	3	0.12
Na	mg/l	200	4	0.16
Cl	mg/l	250	4	0.16
SO4	mg/l	400	3	0.12
NO3	mg/l	10	5	0.2
sum			25	1

Para esta evaluación (Tabla 24) se obtuvo que en temporada de Lluvias para el agua superficial el 62% de los sitios muestreados tienen una categoría “excelente”, mientras que para el agua subterránea se tiene 54% de la misma categoría. En temporada de estiaje para el agua superficial se obtuvo un ICA de 100% en la categoría “buena”, mientras que en agua subterránea se obtuvo 77% en la categoría “excelente”.

Tabla 24. Resultados obtenidos para ICA de acuerdo con la metodología propuesta.

CALIDAD	ICA			
	Lluvias		Estiaje	
	A- Sup	A-Sub	A- Sup	A-Sub
EXCELENTE	8	7	0	10
BUENA	5	6	13	3
MEDIA	0	0	0	0
MALA	0	0	0	0
MUY MALA	0	0	0	0

6. Evaluación de Indicadores de Contaminación Difusa

Como menciona Mata (2009), durante el cultivo e industrialización de la caña de azúcar sobresalen tres contaminantes: la aplicación excesiva de fertilizantes, la quema del cultivo y los desechos líquidos (aguas vegetales contaminadas). el área en cuestión es una zona agrícola donde el cultivo predominante es la caña de azúcar en la Figura 31 se muestra la región que se tiene de siembra de caña de azúcar según las investigaciones de Aguilar et al. (2010).

Dadas las elevadas extracciones de nutrientes para mantener el cultivo de caña a un nivel aceptable, se tienen que aplicar grandes cantidades de fertilizantes químicos. El manejo deficiente de fertilizantes inorgánicos constituye una fuente de contaminación para el aire y el agua, provocando un foco potencial de enfermedades en el hombre, animales y plantas. Afectando las propiedades químicas y biológicas del suelo (Mata,2009).

Romero et al. (2009), nos menciona que las plantas absorben los elementos minerales de las proximidades de las raíces, existen 16 elementos nutritivos esenciales para la caña de azúcar como se puede ver en la Tabla 25.

Tabla 25. Tabla de nutrientes esenciales para la caña de azúcar.

no minerales	carbono
	hidrógeno
	oxígeno
nutrimentos	nitrógeno
	fósforo
	potasio
	calcio
	magnesio
	azufre
micro nutrimentos	boro
	zinc
	cloro
	cobre
	hierro
	manganeso
	molibdeno

Guzmán (2018) reporta que, de los cultivos perennes, el de la caña de azúcar, es el de mayor superficie sembrada en el país (826,910 ha) de la cual el 93% (770,628 ha) utiliza fertilizantes químicos dato que contrasta con el segundo cultivo en superficie, que es el café, donde solo el 34% utiliza fertilizantes químicos.

Es importante desarrollar criterios para reconocer la extensión de los impactos que genera la agricultura (contaminación difusa), como mencionan Edmunds y Shand (2008), esta actividad puede por ejemplo, agregar pequeñas cantidades de iones principales como Ca, SO₄, K y NO₃ para el agua subterránea y/o superficial tal que, sin cuidado de monitoreo la indicación temprana de contaminación podría resultar problemático. Sin embargo, el origen abrumador de los principales iones que constituyen más del 98% del agua subterránea, se derivan de la entrada del agua de lluvia, los procesos del suelo y las reacciones entre el agua y la roca madre. Para asegurarse que se está produciendo contaminación, se requiere el conocimiento de características espaciales y temporales (tendencias) en iones mayores y otros elementos que dan la definición de la composición base. El criterio de concentraciones base busca establecer el rango de concentraciones de un determinado elemento o compuesto químico, derivado de distintas fuentes como puede ser natural, geológico, biológico o atmosférico, en condiciones no perturbadas por actividad antropogénica.

Los términos como “fondo” o “umbral” se utilizan para identificar concentraciones “anómalas” en relación con valores típicos, aun que algunos autores prefieren utilizar estos términos ya que la condición inicial puede incluir algún componente antropogénico. Entonces se necesita una determinación precisa de las concentraciones de fondo para distinguir los cambios antropogénicos en la calidad del agua causados tanto por contaminantes como por fuentes geogénicas.

Con el valor de fondo se busca establecer una comprensión sólida de la distribución espacial y temporal de calidad del agua en relación con los controles hidrogeológicos y geoquímicos. Este se obtiene mediante las herramientas estadísticas, pero no se puede explicar la varianza en los datos es por eso que se ocupa la situación de campo (el tipo de cultivo) de manera obligatoria para poder identificar los elementos de mayor importancia. La mediana y el percentil 97.7 se adopta como los principales parámetros estadísticos para definir inicialmente el valor de fondo y comparar con los diferentes conjuntos de datos (Edmunds y Shand, 2008).

Por estos motivos se procedió a analizar los resultados químicos obtenidos de 17 elementos (requeridos por el cultivo de caña de azúcar) de las aguas para así poder determinar cuáles de estos nos proporcionan la información requerida. Para este apartado se tiene un total de 39 puntos de muestreo de los cuales se consideraron 20 de agua superficial y 19 de agua subterránea. Se utiliza la información de ambos periodos de muestreo temporada de lluvias y temporada de estiaje con un total de 65 muestras en total.

Debido a la falta de normativa que regule algunos elementos químicos que nos permiten evidenciar la contaminación de algún cuerpo de agua, se intentó definir las concentraciones base para estos 13 elementos mencionados (Tabla 22). Estas concentraciones base se obtuvieron mediante el parámetro estadístico de la mediana, tomando este valor de referencia, se procedió a la elaboración de mapas en los cuales se distinguen los sitios que rebasan la mediana del elemento analizado. Como se presentan a continuación:

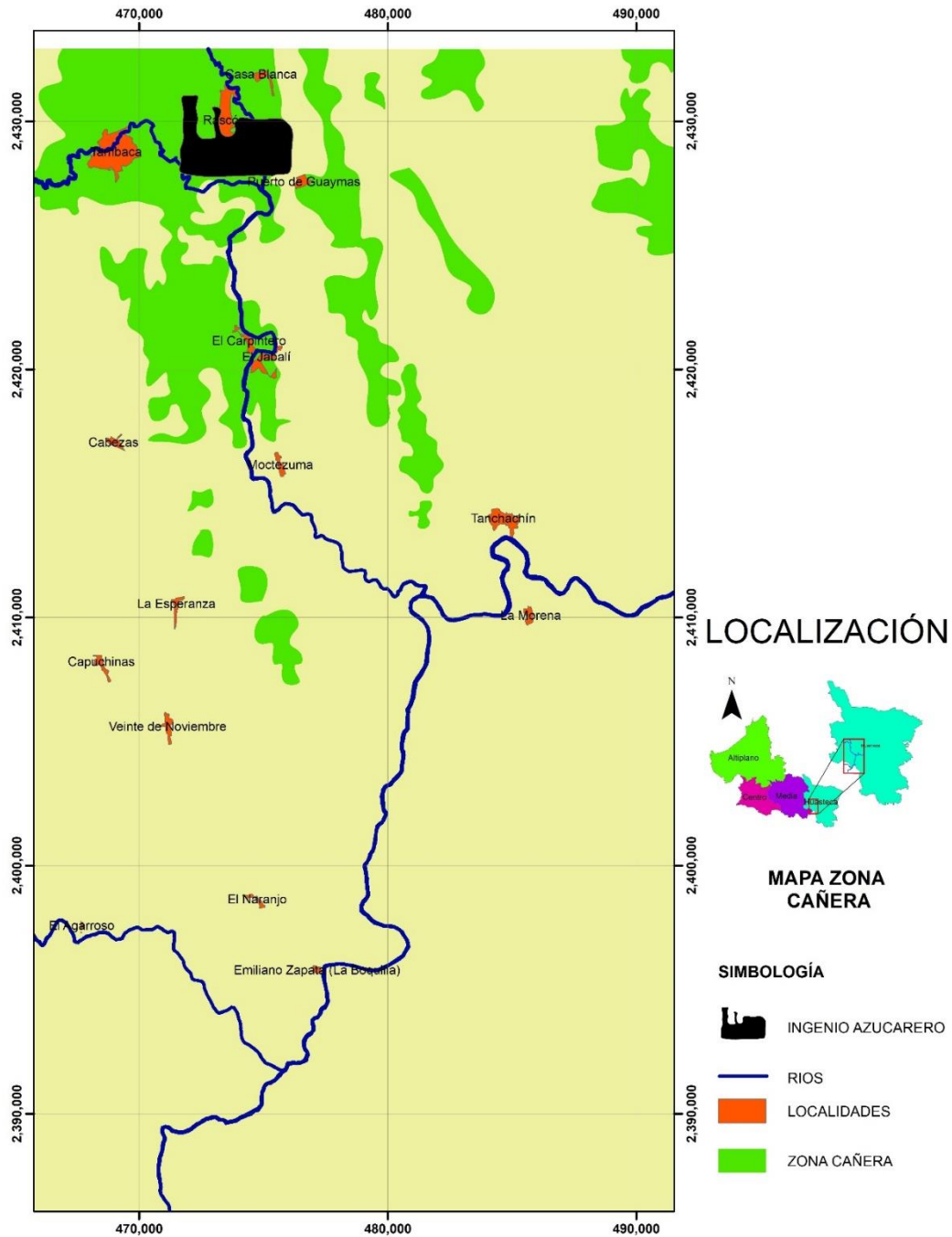


Figura 31. Distribución geográfica de las zonas de siembra de caña de azúcar.

Fuente: Aguilar et al, 2010

6.1. Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas por lo que se aplica en grandes cantidades para la producción de cosechas; sin embargo, se presenta también en forma natural en el suelo en compuestos de tipo orgánico que se generan a partir de la descomposición de las plantas y animales. En el suelo, las bacterias convierten los diferentes compuestos de nitrógeno a nitrato. En general, esta conversión es provechosa para los agricultores ya que las plantas absorben el nitrógeno precisamente como nitrato. Sin embargo, el nitrato es extremadamente móvil y rápidamente es movilizado por el agua hacia el nivel freático.

En la Figura 32 se presenta la relación entre las concentraciones de nitrógeno y el agua superficial-subterránea en ambas temporadas de muestreo. Y en la Figura 33 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de NO_3 que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

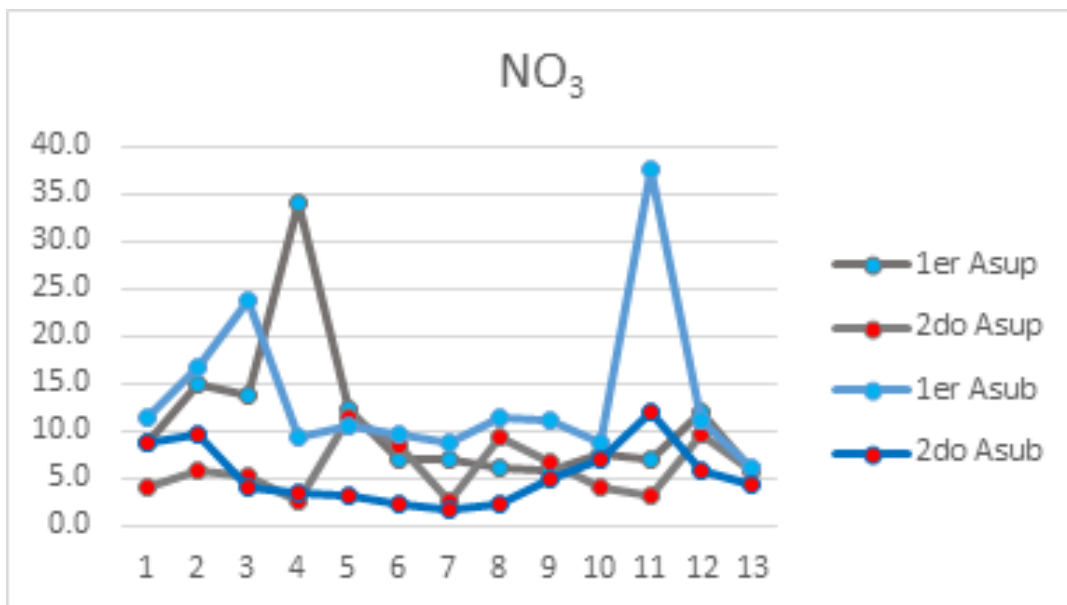


Figura 32. Resultados del análisis de aguas para el NO_3 .

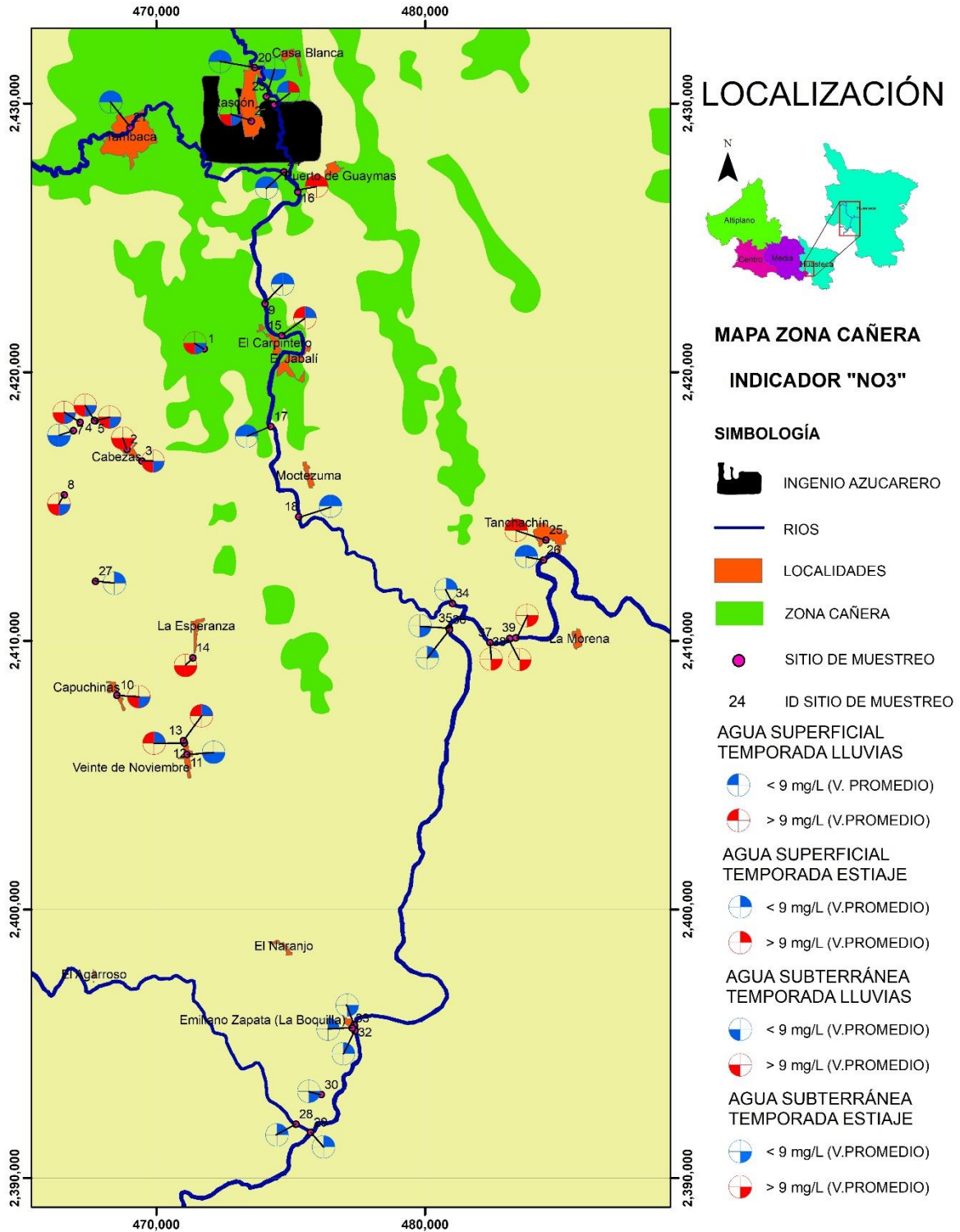


Figura 33. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de NO₃.

6.2. Fósforo

El fósforo forma la base de gran número de compuestos, de los cuales los más importantes son los fosfatos. En todas las formas de vida, los fosfatos desempeñan un papel esencial en los procesos de transferencia de energía, como el metabolismo, la fotosíntesis, la función nerviosa y la acción muscular. Los ácidos nucleicos, que entre otras cosas forman el material hereditario (los cromosomas), son fosfatos, así como cierto número de coenzimas. Los esqueletos de los animales están formados por fosfato de calcio

El agua de lluvia puede contener distintas cantidades de fosfatos que se filtran de los suelos agrícolas a los cuerpos de agua próximos. El ion fosfato suele operar como un nutriente del crecimiento de algas, esto quiere decir que, al existir mayor concentración de fosfatos, crecen las algas de manera desmedida, lo que a su vez afecta la cantidad de oxígeno presente en el agua y, por ende, el crecimiento descontrolado de materia orgánica viva, situación que conlleva una mayor tasa de descomposición, que finalmente conduce a un proceso franco de eutrofización. La contaminación de lechos acuáticos con fosfatos entonces no es con implicaciones en la salud humana, sino en el equilibrio ambiental que genera el lixiviado del ion.

En la Figura 34 se presenta la relación entre las concentraciones de nitrógeno y el agua superficial-subterránea en ambas temporadas de muestreo. Y en la Figura 35 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de P que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

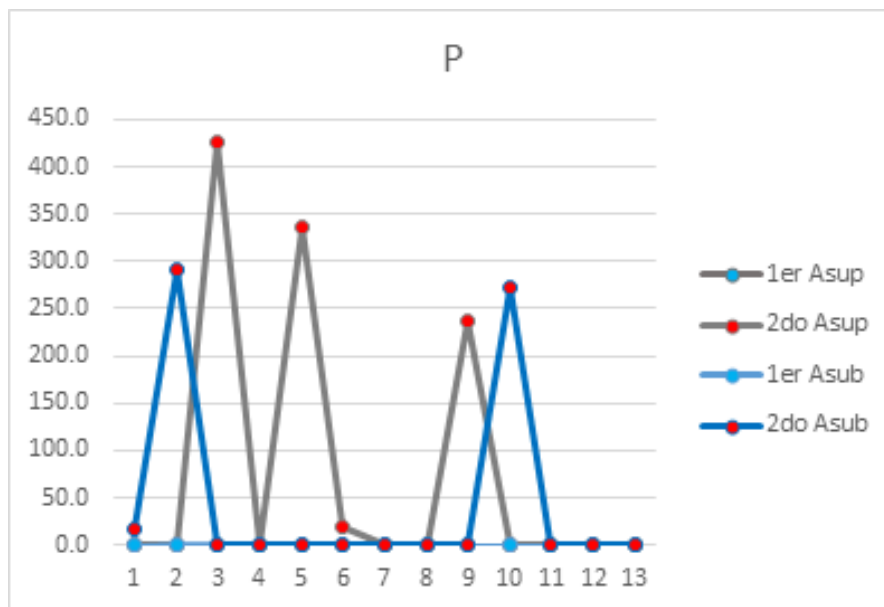


Figura 34. Resultados del análisis de aguas para el P.

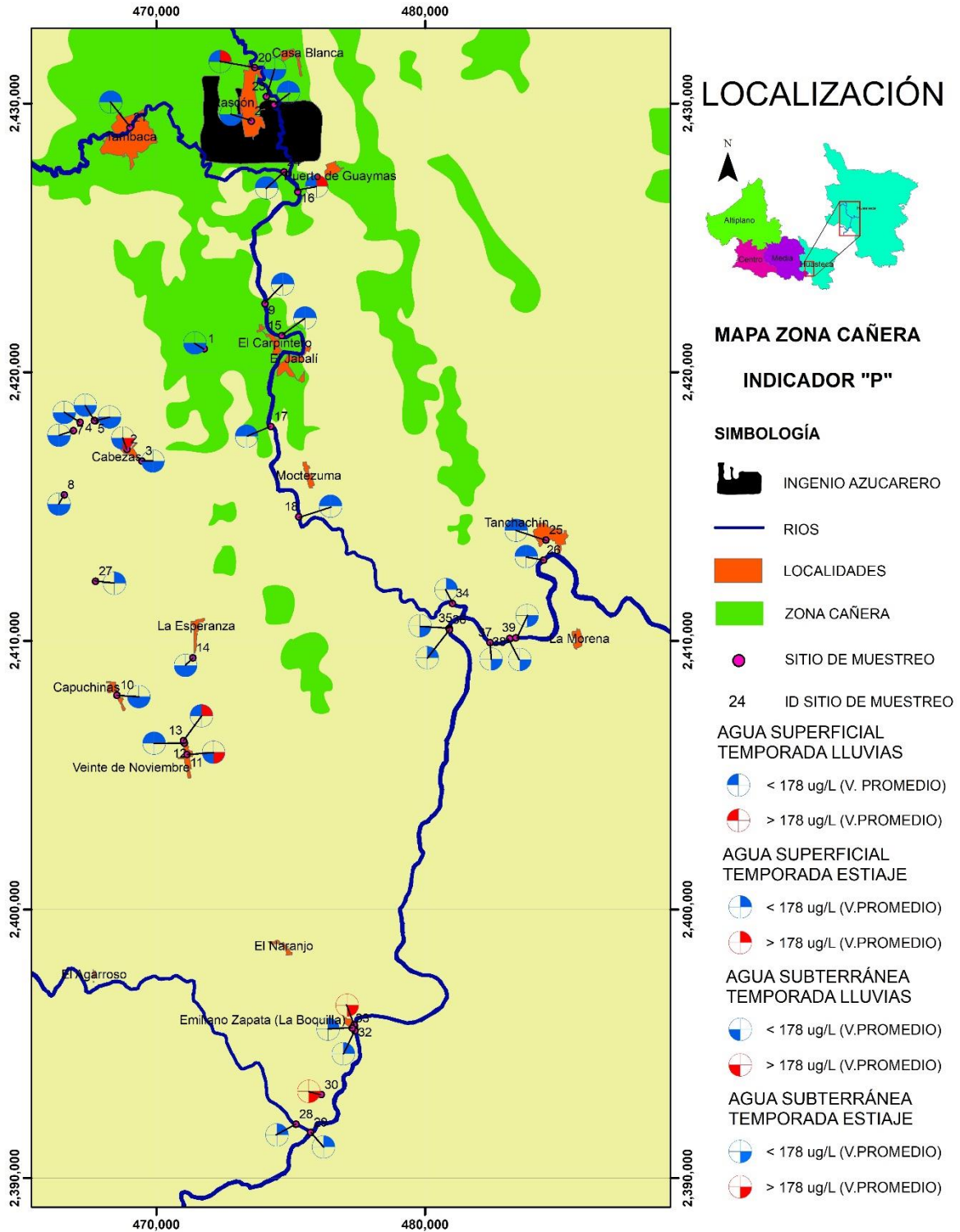


Figura 35. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de P.

6.3. Potasio

El ion potasio K^+ , corresponde a sales de muy alta solubilidad y que son difíciles de precipitar. Las aguas dulces no suelen tener más de 10 ppm y el agua de mar alrededor de 400 ppm. Su determinación se hace por fotometría de llama. Se elimina por intercambio iónico y ósmosis inversa.

La utilización de fertilizantes de cloruro o carbonato potásicos son por lo general poco móviles si no se sobrepasa en su utilización la capacidad de fijación del suelo y no se producen cambios de solubilidad, pueden conducir a aumentos de concentración. En la Figura 36 se presenta la relación entre las concentraciones de potasio y el agua superficial-subterránea en ambos periodos de muestreo y en la Figura 37 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de k que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

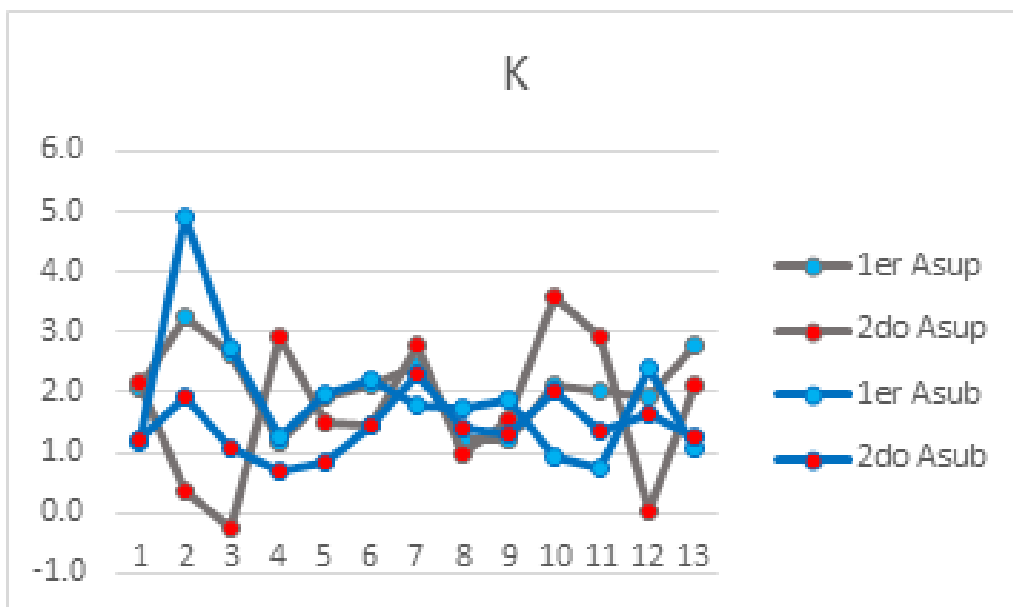


Figura 36. Resultados del análisis de aguas para el K

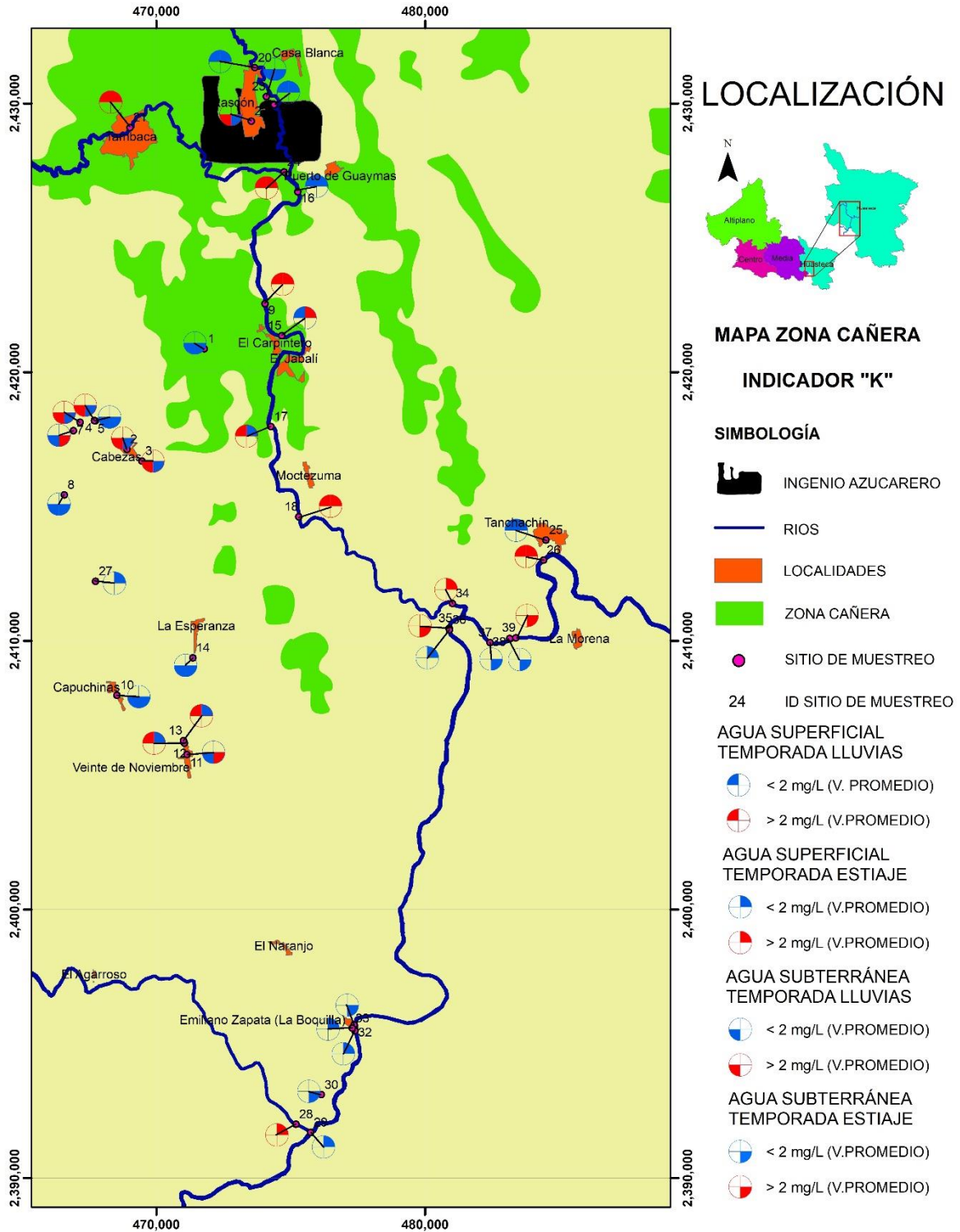


Figura 37. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de K.

6.4. Zinc

El zinc es un oligoelemento esencial que se encuentra en prácticamente todos los alimentos y en el agua potable en forma de sales o complejos orgánicos. Generalmente, la principal fuente de zinc son los alimentos. Aunque las concentraciones de zinc en aguas superficiales y subterráneas no suelen sobrepasar 0,01 y 0,05 mg/L, respectivamente. No obstante, el agua de consumo con concentraciones de zinc mayores que 3 mg/L puede resultar inaceptable para los consumidores.

En la Figura 38 se presenta la relación entre las concentraciones de zinc y el agua superficial-subterránea para ambos periodos de muestreo y en la Figura 39 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de P que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

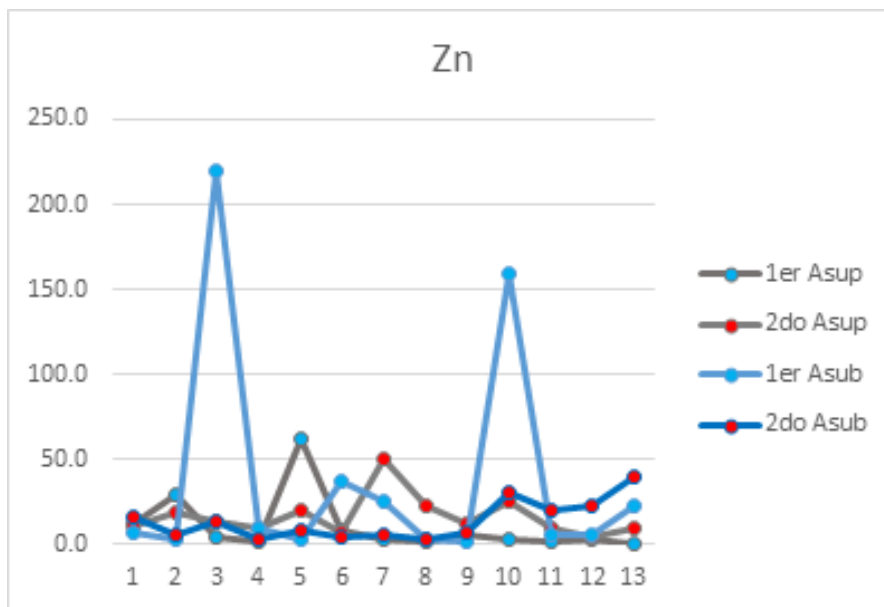


Figura 38. Resultados del análisis de aguas para el Zn.

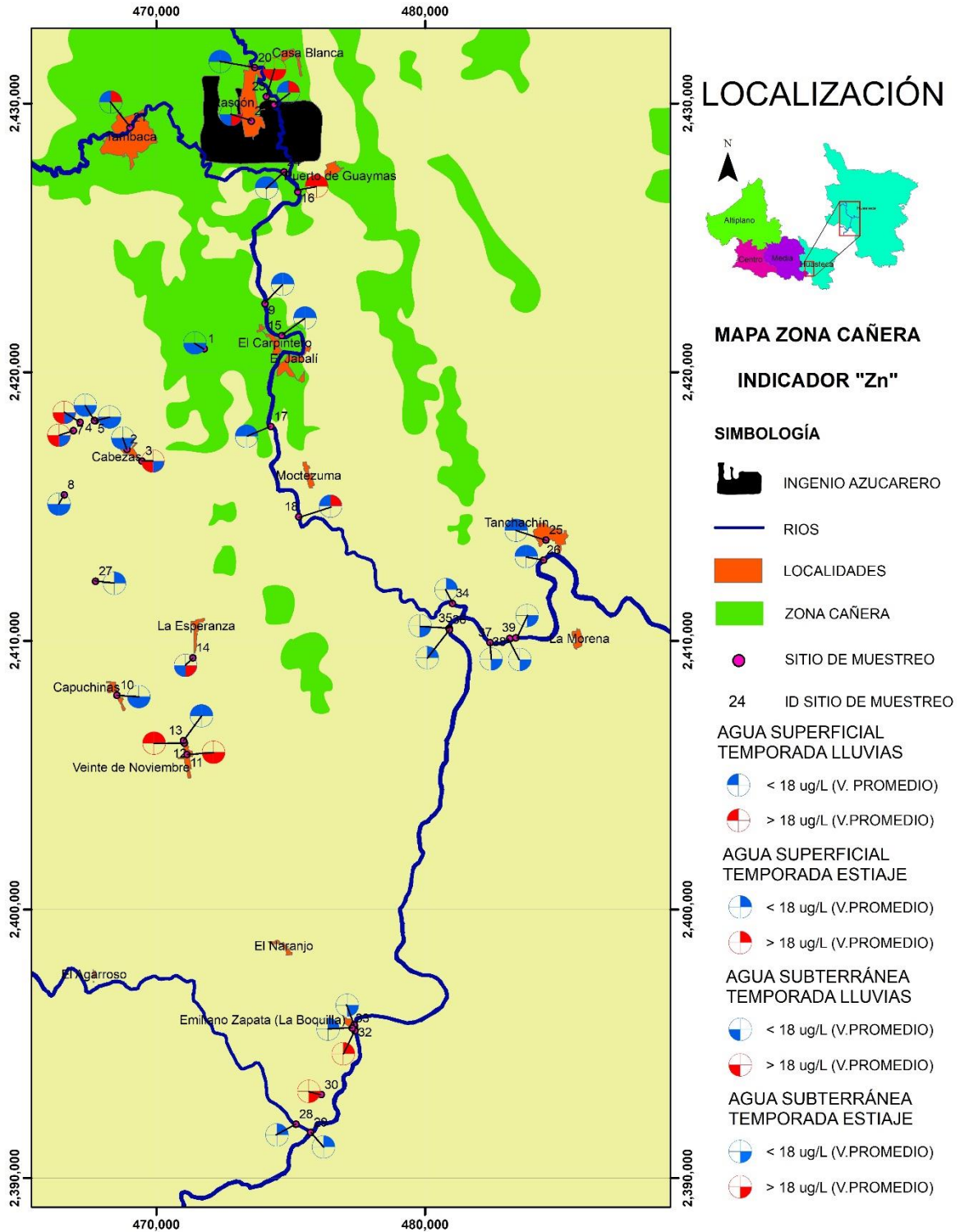


Figura 39. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de Zn.

6.5. Cloro

Este elemento que se encuentra en el agua natural procede de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua. Otra fuente es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales a aguas superficiales.

En la Figura 40 se presenta la relación entre las concentraciones de Cloruros y el agua superficial-subterránea para ambos periodos de muestreo y en la Figura 41 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de Cl que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

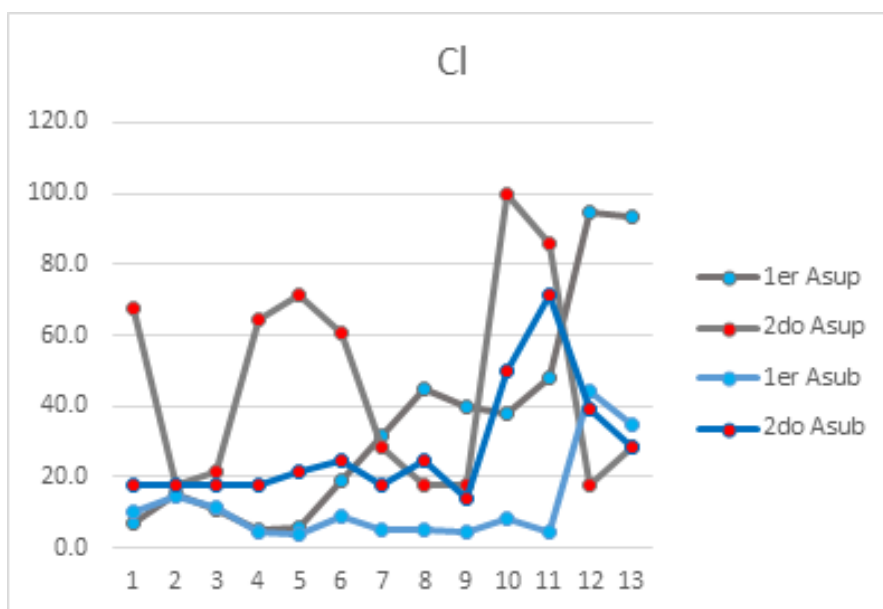


Figura 40. Resultados del análisis de aguas para el Cl.

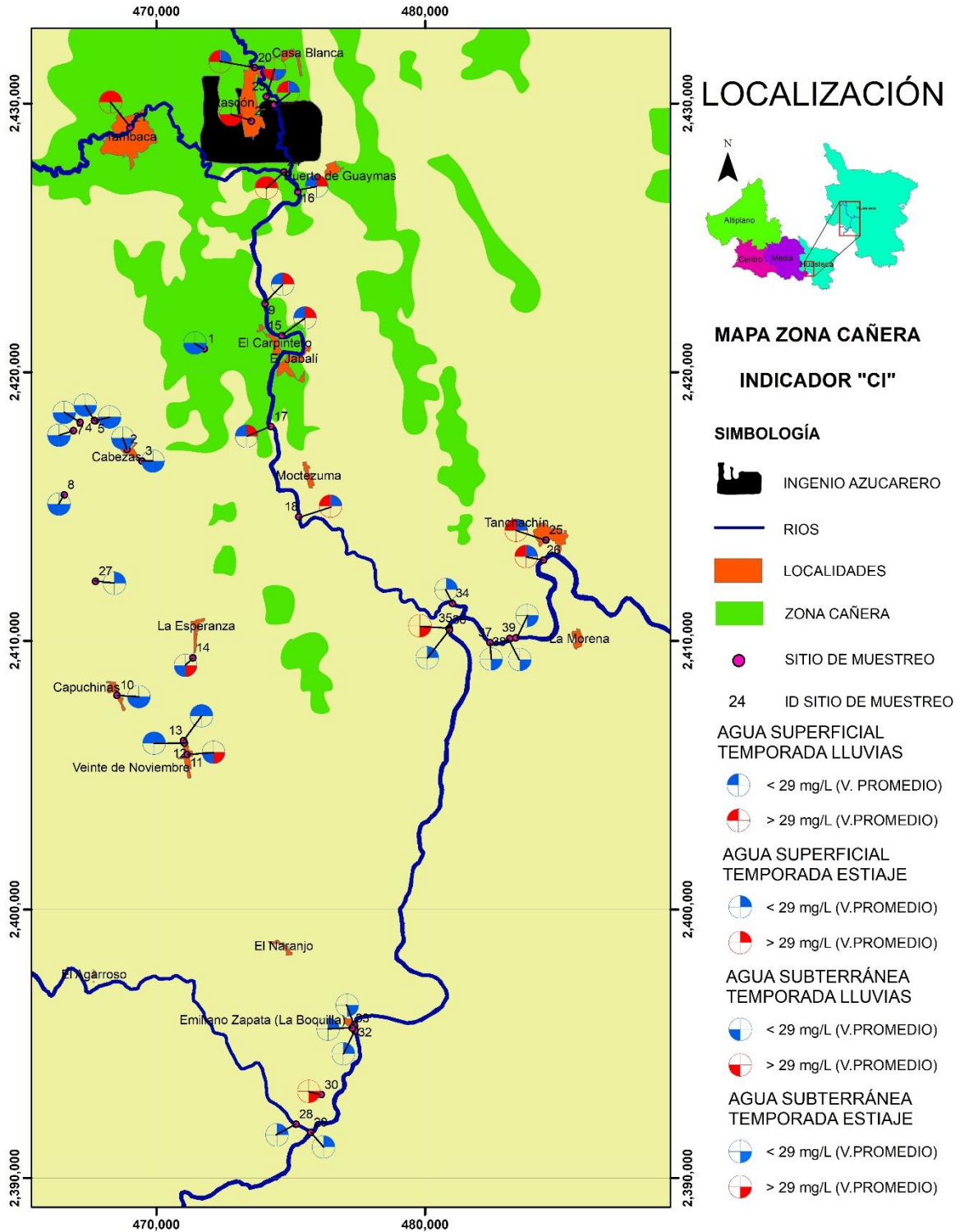


Figura 41. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de CI.

6.6. Cobre

El cobre es un nutriente esencial y, al mismo tiempo, un contaminante del agua de consumo. En ocasiones se añade sulfato de cobre pentahidratado a las aguas superficiales para el control de algas. La concentración de cobre en el agua tratada suele aumentar durante su distribución, sobre todo en sistemas con pH ácido o en aguas con concentración alta de carbonato, con pH alcalino.

En la Figura 42 se presenta la relación entre las concentraciones de cobre y el agua superficial-subterránea en ambos periodos y en la Figura 43 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de Cu que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

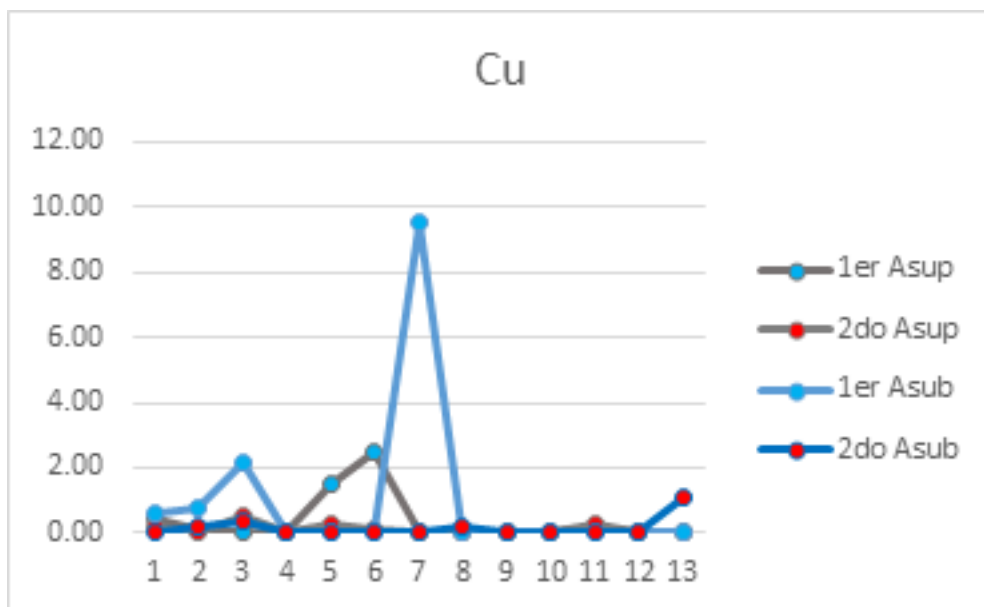


Figura 42. Resultados del análisis de aguas para el Cu.

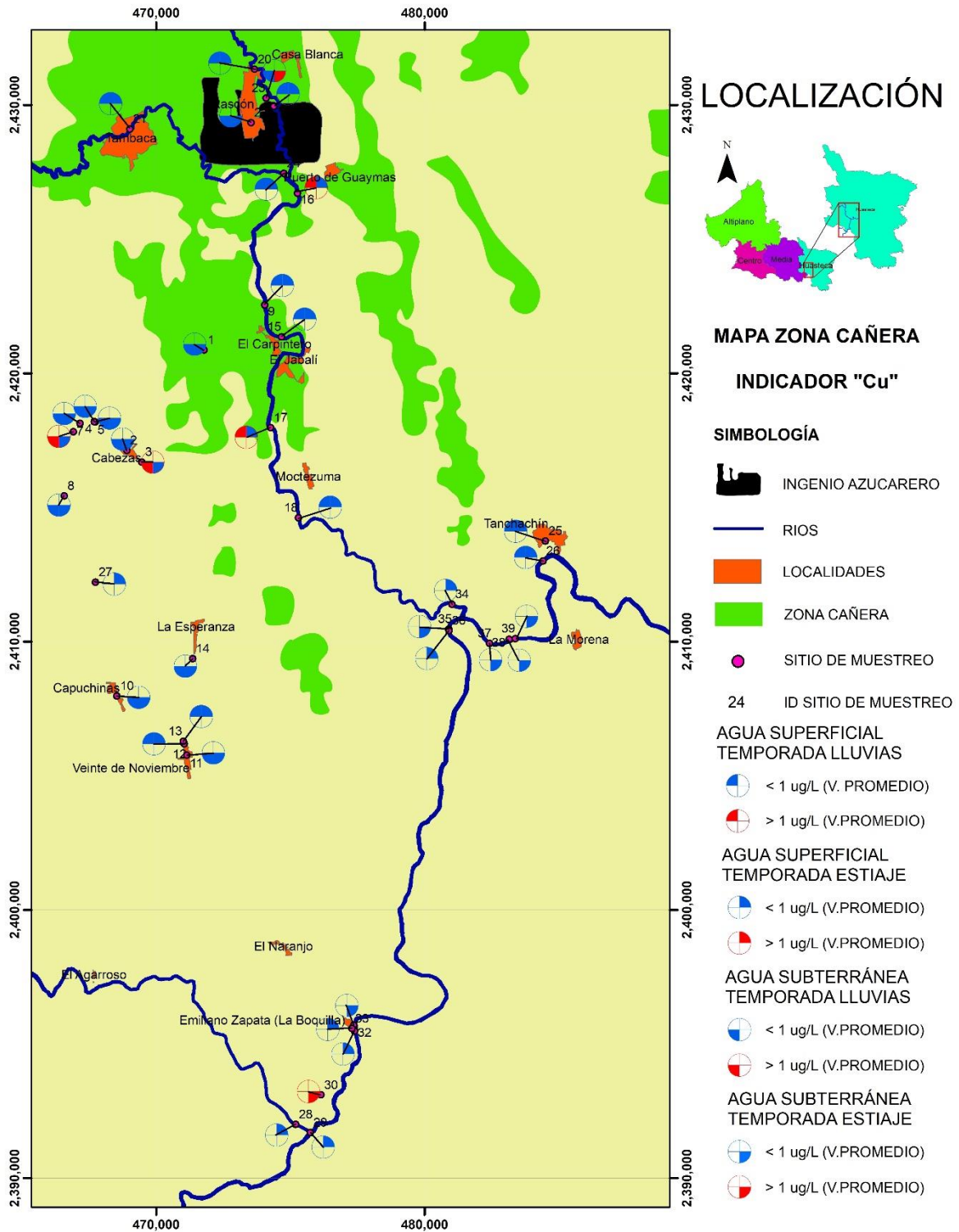


Figura 43. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de Cu

6.7. Hierro

El hierro es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre. El hierro es un elemento esencial en la nutrición humana. Las necesidades diarias mínimas de este elemento varían en función de la edad, el sexo, el estado físico y la biodisponibilidad del hierro, y oscilan entre 10 y 50 mg/día.

En la Figura 44 se presenta la relación entre las concentraciones de hierro y el agua superficial-subterránea. En la Figura 45 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de Fe que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

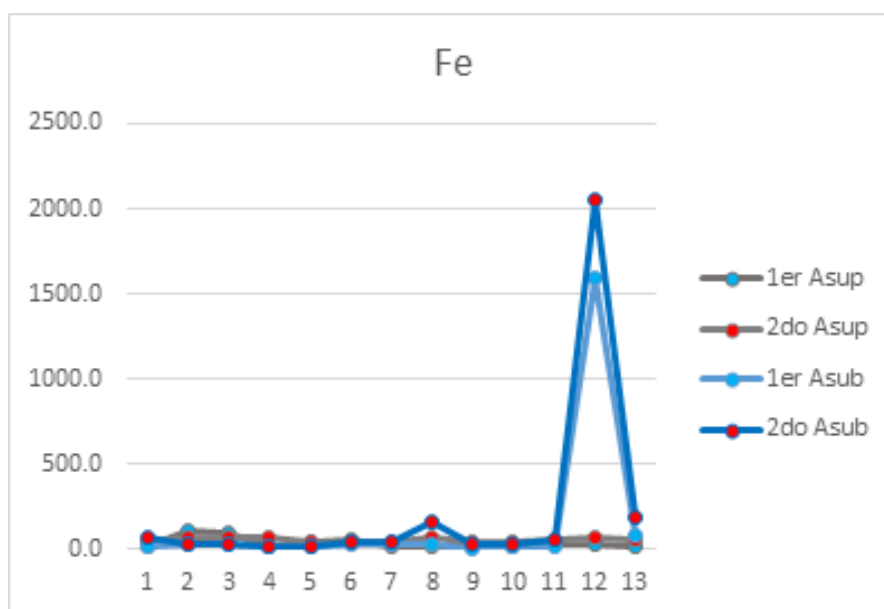


Figura 44. Resultados del análisis de aguas para el Fe.

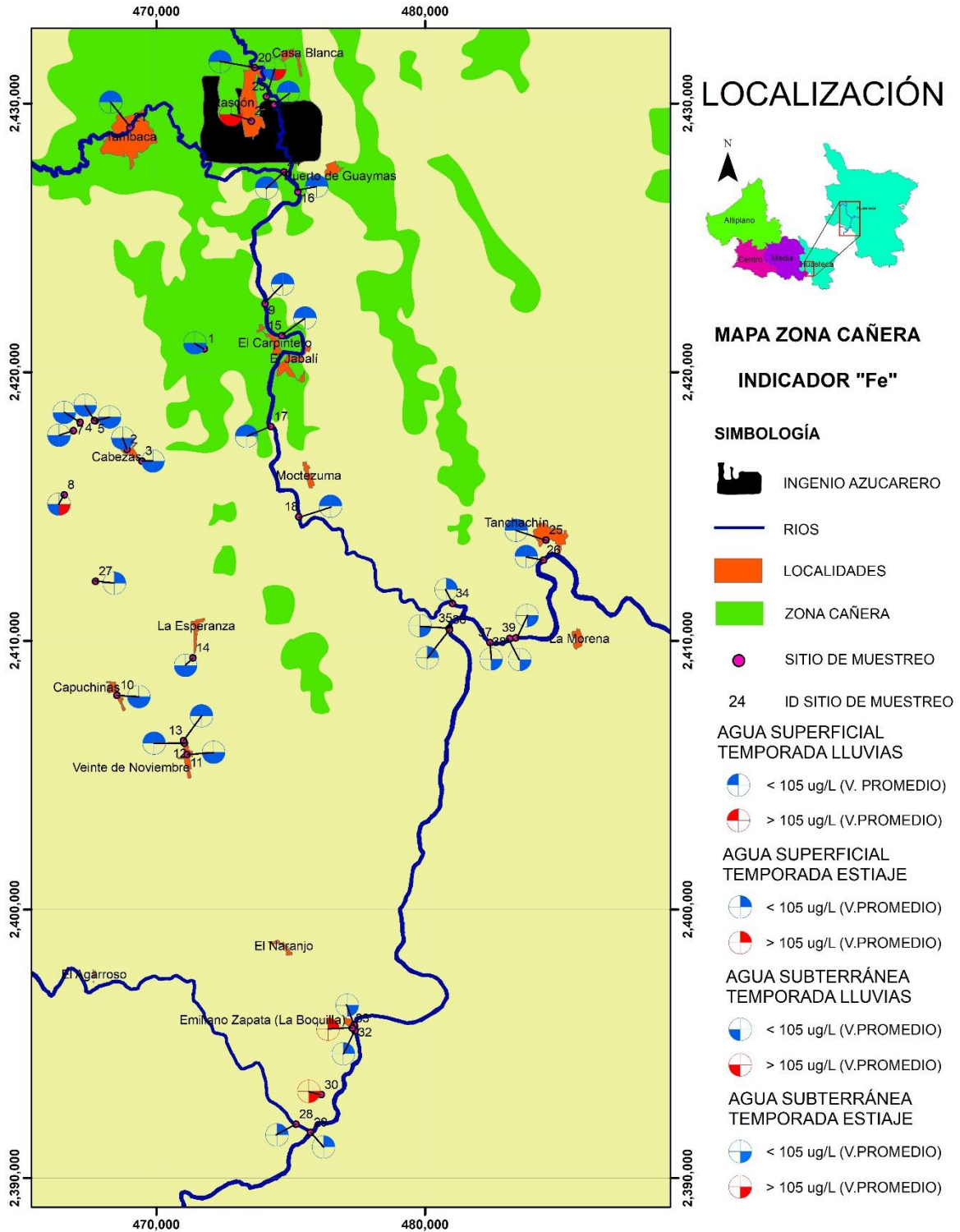


Figura 45. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de Fe.

6.8. Manganeso

El ión manganeso se comporta en la mayoría de los casos muy parecido al ión hierro, además de poder ser bivalente y trivalente positivo puede también presentarse con valencia +4 formando el MnO_2 que es insoluble. Rara vez el agua contiene más de 1 ppm y requiere un pH ácido. La forma manganeso que es más general por aireación se oxida y precipita con un color oscuro de MnO_2 . Se determina por oxidación a permanganato y colorimetría de la solución oxidada y espectrometría de absorción atómica.

En la Figura 46 se presenta la relación entre las concentraciones de manganeso y el agua superficial-subterránea en ambos periodos y en la Figura 47 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde se tiene una concentración de Mn que rebasa el promedio obtenido de los muestreos.

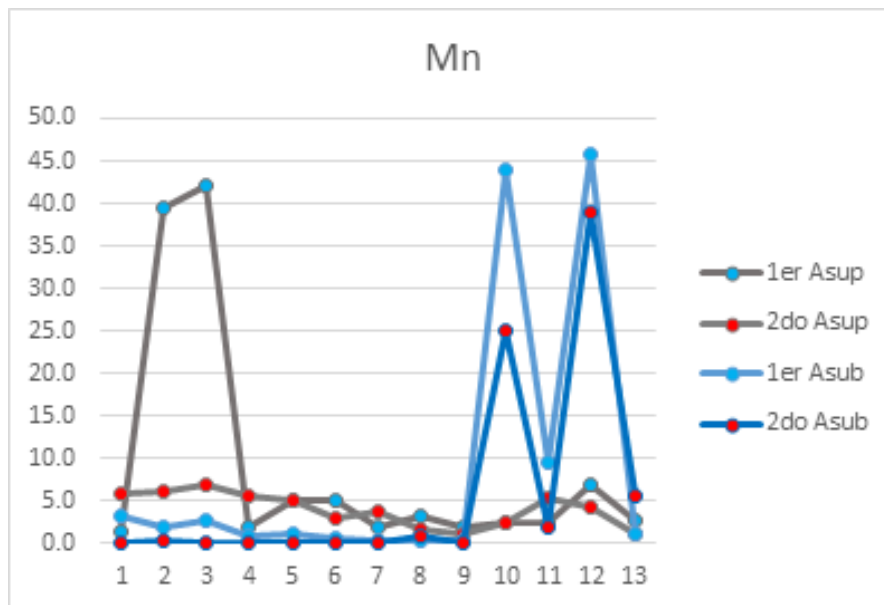


Figura 46. Resultados del análisis de aguas para el Mn.

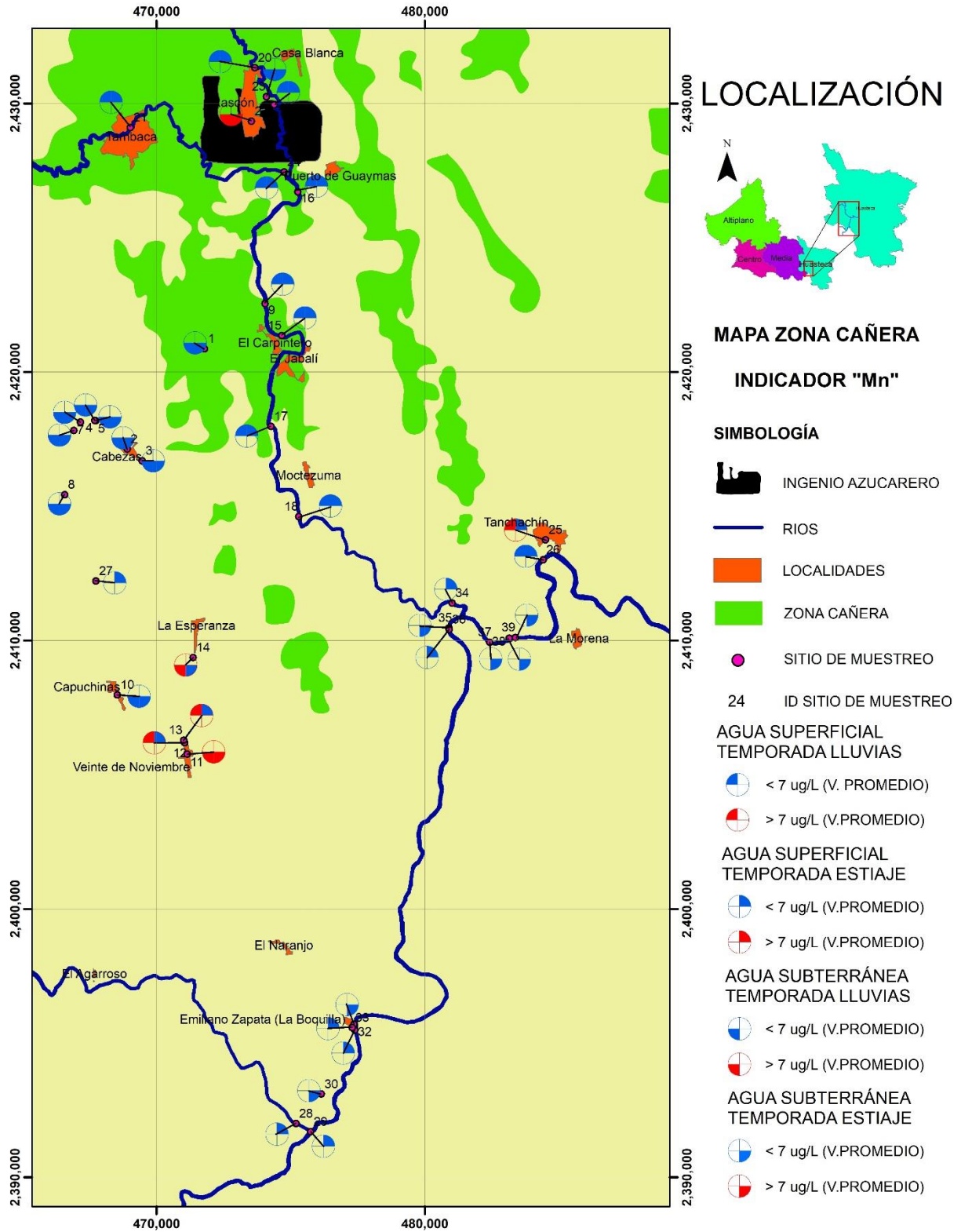


Figura 47. Distribución geográfica de las zonas con mayor cantidad de Mn.

Con los resultados obtenidos se busca identificar los indicadores, la OCDE define un indicador como “un parámetro o un valor derivado de parámetros, que sugiere, proporciona información acerca de, o describe el estado de un fenómeno, el medio ambiente o un área, con un significado que se extiende más allá de que estén directamente vinculados con el valor de un parámetro”. (Perevochtchikova, 2013)

Según la teoría de la pirámide de uso de información (Hammond et al., 1995), los indicadores ambientales permiten evaluar los avances de la política pública ambiental y la efectividad de los programas implementados, para ofrecer una herramienta práctica que visualice su seguimiento a través del monitoreo y la evaluación de cambios, su manejo y comunicación (IAIA, 2007), lo que depende en primera instancia de la calidad y la cantidad de los datos y se refleja en términos de suficiencia, eficiencia y representatividad de la información, obtenida en su mayoría por medio de sistemas de monitoreo ambiental.

Como resultados obtenidos se lograron identificar sitios de muestreo mayormente afectados, considerando únicamente 10 elementos (NO₃, P, K, B, Zn, Cl, Cu, Fe, Mn y Mo) los faltantes se eliminaron debido a que sus concentraciones están relacionadas con la erosión de la roca madre. Se considera de suma importancia el establecer un sistema de monitoreo ambiental, para corroborar y establecer con mayor detalle los valores de fondo (con más información).

6.9. Metales Pesados

Los altos niveles de concentración de metales pesados en agua utilizada para riego representan un problema importante para la agricultura y la salud humana, así como para la biodiversidad. Para evaluar la calidad del agua de los ríos, embalses y manantiales, se utilizaron los criterios de EPA, (1986), la NOM-001-ECOL-1996 (ECOL, 1997) y los criterios ecológicos de calidad de agua para diferentes usos (SEDUE 1989), que establecen los límites máximos permisibles para metales pesados contenidos en el agua para uso en riego agrícola y urbano (Figura 48). (Mancilla Villa, et al, 2012)

Parámetro (mg L ⁻¹)	Ríos uso en riego agrícola		Ríos uso público urbano [‡]		Aguas Naturales (EPA 1986)	Riego agrícola (SEDUE 1989)	Fuente de abastecimiento de agua potable (SEDUE 1989)	Recreativo e Industrial (SEDUE 1989)
	Promedio mensual	Promedio diario	Promedio mensual	Promedio diario				
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.05	-
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.01	0.01	0.01	0.01
Cobre	4	6	4	6	1.5	0.2	1	0.1
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.1	1	0.05	0.1
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.01	0.002	-	-	-
Níquel	2	4	2	4	0.632	0.2	0.01	-
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.0015	5	0.05	0.1
Zinc	10	20	10	20	5	2	5	-

Fuente: NOM-001-ECOL-1996

[‡] Valores idénticos para protección de vida acuática

Figura 48. Límites máximos permisibles para metales pesados y arsénico.

(Perevochtchikova, 2013)

Afortunadamente para este estudio los niveles de metales pesados están por debajo de los límites máximos permisibles, en ambos periodos de muestreo.

7. Discusión de Resultados

7.1. Familias de Agua

De acuerdo con Morán et al., (2013), en la Zona de la Huasteca Potosina obtuvo la familia de tipo cálcica bicarbonatada principalmente, en la presente investigación se llegó al mismo resultado ya que en ambos periodos de muestreo la familia dominante es la cálcica bicarbonatada, otra familia obtenida es la cálcica sulfatada, la cual en el estudio de Morán et al. (2013), se relaciona con la zona montañosa de la Sierra Madre Oriental que corresponde a la Zona Media.

Según los resultados obtenidos por Krienen et al. (2017), nos menciona que en sus resultados también predomina la familia cálcica bicarbonatada seguida de la cálcica sulfatada.

El resultado obtenido es característico de la interacción con rocas carbonatadas.

7.2. Calidad del Agua

Para los dos periodos analizados, se encontró una variación en los índices de calidad del agua, sin embargo, como se ha mencionado se tiene una calidad de excelente a buena. Respecto al periodo de lluvias, para el agua superficial se obtuvo el 62% de las muestras con calidad “excelente” y el 38% en la categoría de “buena”. Para agua subterránea se disminuyó a 54% en la categoría “excelente” y se obtiene el 46% en la categoría de “buena”. En cuanto para el periodo de Estiaje, para el agua superficial el 100% de las muestras pertenecen a la categoría de calidad “buena”. Para el agua subterránea se tiene el 77% en la categoría “excelente” el 23% en categoría “buena”.

Lo que nos indica que en general se encuentra una calidad de agua aceptable para el uso público-urbano sin embargo las pequeñas variaciones que se presentan nos indican el deterioro en la calidad.

Como nos menciona Sánchez et al. (2016), la media general del pH fue de 7.2 ± 0.2 DS donde todos los valores para sitios y meses estuvieron dentro de una condición de neutra a ligeramente alcalina. El máximo valor de pH fue 8.0 mientras que el menor valor fue de 6.7.

Como se puede apreciar en la Tabla 26, en la presente investigación se obtuvieron los valores de pH, respecto al tipo de agua superficial y subterránea en ambos periodos de muestreo.

Tabla 26. Estadística del parámetro pH.

pH				
Est/Periodo	A.SUP.P.LLU	A.SUB.P.LLU	A.SUP.P.EST	A.SUB.P.EST
MINIMO	7.6	6.8	7.4	6.3
MÁXIMO	8.3	7.6	8.2	6.8
MEDIA ARITMETICA	8.1	7.1	7.7	6.5
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.2	0.2	0.2	0.1

La media general del pH fue de 7.4 ± 0.1 DS para todos los valores en ambos periodos de muestreo. El máximo valor de pH fue 8.3 se presentó en el agua superficial en el periodo de lluvias mientras que el menor valor fue de 6.3 en el agua subterránea en el periodo de estiaje.

Para el parámetro de SDT Sánchez et al. (2016), obtuvo un promedio general fue de 1182mg/L ± 880.3 DS, el valor menor obtenido es de 288.6 mg/L y el mayor es de 7466.9 mg/L.

En la Tabla 27 se muestra la estadística para el parámetro de SDT obtenidos en esta investigación en ambos periodos. La media general de SDT fue de 465.9 mg/L ± 63.3 DS el menor valor se encontró en el agua subterránea en periodo de lluvias 115 mg/L mientras que el valor mayor fue en el agua subterránea en periodo de estiaje con 834 mg/L.

Tabla 27. Estadística del parámetro de SDT.

SDT				
Est/Periodo	A.SUP.P.LLU	A.SUB.P.LLU	A.SUP.P.EST	A.SUB.P.EST
MINIMO	231.0	115.0	461.0	263.0
MÁXIMO	579.0	834.0	774.0	834.0
MEDIA ARITMETICA	368.1	423.4	620.4	451.9
DESVIACIÓN ESTANDAR	128.2	238.5	98.6	194.2

La media general de Na fue de 106.4 mg/L DS ± 125.9 donde el máximo valor es 1060mg/L y el mínimo es de 1 mg/L estos valores son los reportados en su investigación de Sánchez et al. (2016).

Los resultados de esta investigación para el elemento de Na se presentan en la Tabla 28, en donde la media general es de 6.6mg/L DS ± 2.9 donde el valor mínimo es de 0.7 mg/L y el máximo es de 28.1 mg/L ambos se presentaron en el agua

subterránea en temporada de lluvias. De acuerdo con estos resultados se puede ver que el agua analizada contiene poco Na comparado con el estudio de Sánchez et al. (2016).

Tabla 28. Estadística para el elemento Na.

Na				
Est/Periodo	A.SUP.P.LLU	A.SUB.P.LLU	A.SUP.P.EST	A.SUB.P.EST
MINIMO	1.9	0.7	0.9	0.8
MÁXIMO	10.2	28.1	27.6	22.1
MEDIA ARITMETICA	4.5	5.0	12.7	4.3
DESVIACIÓN ESTANDAR	2.9	7.7	9.7	5.7

Con respecto al elemento Cl se observó en la investigación de Sánchez et al. (2016), una media de 148.7 mg/L \pm 188.7 DS, el mayor valor es de 1578.0 mg/L y el menor de 14.0 mg/L.

El análisis estadístico para este elemento está en la Tabla 29 en el cual la media general es de 30.4 mg/L \pm 9.1 DS, el valor mínimo se obtuvo en agua subterránea en temporada de lluvias con un valor de 3.6 mg/L, mientras que el valor máximo se obtuvo en agua superficial en temporada de estiaje con un valor de 100.1 mg/L.

Tabla 29. Estadística para el elemento Cl.

Cl				
Est/Periodo	A.SUP.P.LLU	A.SUB.P.LLU	A.SUP.P.EST	A.SUB.P.EST
MINIMO	5.0	3.6	17.9	14.3
MÁXIMO	94.6	44.1	100.1	71.5
MEDIA ARITMETICA	34.8	12.4	46.2	28.0
DESVIACIÓN ESTANDAR	30.4	12.6	29.7	16.5

Para la variable de SO₄ nos reporta Sánchez et al. (2016), un promedio general de 334.2 mg/L \pm 393.0 DS con un mínimo de 0.01 mg/L y un máximo de 2000.0 mg/L.

En la Tabla 30 se presenta el análisis estadístico para esta variable donde se tiene un promedio general de 151.0 mg/L \pm 93.2 DS, los valores mínimo y máximo se obtuvieron en agua subterránea en distinto periodo, el valor mínimo de 10 mg/L

presentado en periodo de lluvias y un valor máximo de 599.2 mg/L presentado en periodo de estiaje.

Tabla 30. Estadística para la variable SO₄.

SO ₄				
Est/Periodo	A.SUP.P.LLU	A.SUB.P.LLU	A.SUP.P.EST	A.SUB.P.EST
MINIMO	85.0	10.0	39.2	20.2
MÁXIMO	94.6	44.1	471.6	599.2
MEDIA ARITMETICA	34.8	12.4	356.3	200.3
DESVIACIÓN ESTANDAR	30.4	12.6	112.0	216.7

Para la variable de NO₃ nos reporta Sánchez et al. (2016), un promedio general de 1.5 mg/L \pm 2.0 DS con un mínimo de 0.002 mg/L y un máximo de 9.4 mg/L.

Para esta variable el presente estudio se encuentra muy por encima del estudio de Sánchez et al. (2016), esto se puede atribuir al impacto antropogénico de la zona, la agricultura de la caña de azúcar en la Tabla 31 se presenta el análisis estadístico para esta variable donde se tiene un promedio general de 6.6.0 mg/L \pm 5 DS, los valores mínimo y máximo se obtuvieron en agua subterránea en distinto periodo, para el mínimo se presenta en periodo de estiaje con un valor de 1.8 mg/L y un valor máximo de 44.1 mg/L presentado en periodo de estiaje.

Tabla 31. Estadística para la variable NO₃.

NO ₃				
Est/Periodo	A.SUP.P.LLU	A.SUB.P.LLU	A.SUP.P.EST	A.SUB.P.EST
MINIMO	5.8	6.2	2.7	1.8
MÁXIMO	7.7	44.1	11.5	12.0
MEDIA ARITMETICA	2.5	12.4	6.1	5.3
DESVIACIÓN ESTANDAR	1.7	12.6	2.9	3.2

7.3. Contaminación Difusa

Aunque los resultados obtenidos en el presente trabajo no exceden los límites máximos permisibles estipulados en la NOM-127-SSA1-1994, no indica que no

exista contaminación difusa ya que se logra identificar que el principal indicador de contaminación difusa es el nitrato, seguido del sulfato y el cloruro.

Como nos mencionan Pacheco y Cabrera (1996), la actividad humana, en este caso la agricultura, modifica la calidad del agua subterránea, en los parámetros químicos referentes a aspectos de contaminación, ya que es posible establecer criterios de discriminación entre las aguas que subyacen a suelos con diferentes usos.

El estudio que presenta Pacheco y Cabrera (1996), comenta que las conductividades eléctricas variaron en un intervalo de 700 a 3170 uS/cm.

En el presente estudio se tiene un intervalo de 278.4 a 1762 uS/cm, presentándose estos valores en agua subterránea, sin embargo, el mínimo se presenta en temporada de lluvia y el máximo en temporada de estiaje.

De manera general Pacheco y Cabrera (1996), nos mencionan que, se observa una tendencia ascendente en las concentraciones de los iones a partir del periodo de lluvias, excepto para el ion nitrato, debido probablemente a un efecto de dilución.

En el presente trabajo se logra identificar que para el agua superficial tiende a incrementarse sus concentraciones, pero en temporada de estiaje con excepción del pH el cual tiende a bajar. Para el agua subterránea se incrementan los SDT el Cl y los SO₄ y tienden a la baja el pH, el Na y los NO₃.

Para este caso de NO₃ se debe a que debido a los fertilizantes utilizados contienen altos niveles de NO₃ los cuales están en exceso y se quedan en el suelo, pero al iniciar temporada de lluvias todos estos excedentes tienden a infiltrarse.

Se realizó la evaluación con los lineamientos de calidad del agua de la Ley Federal de Derechos, disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales (2016). Y se obtuvo que existen varios aprovechamientos que sobrepasan estos valores sobre todo en los K (Figura 54), NO₃ (Figura 55) y P(Figura 56), sin embargo, se realizó la comparativa de los elementos restantes como Mn (Figura 49), Fe (Figura 50), Cu (Figura 51), Cl(Figura 52) y Zn (Figura 53) como se aprecia en los siguientes mapas respectivamente.

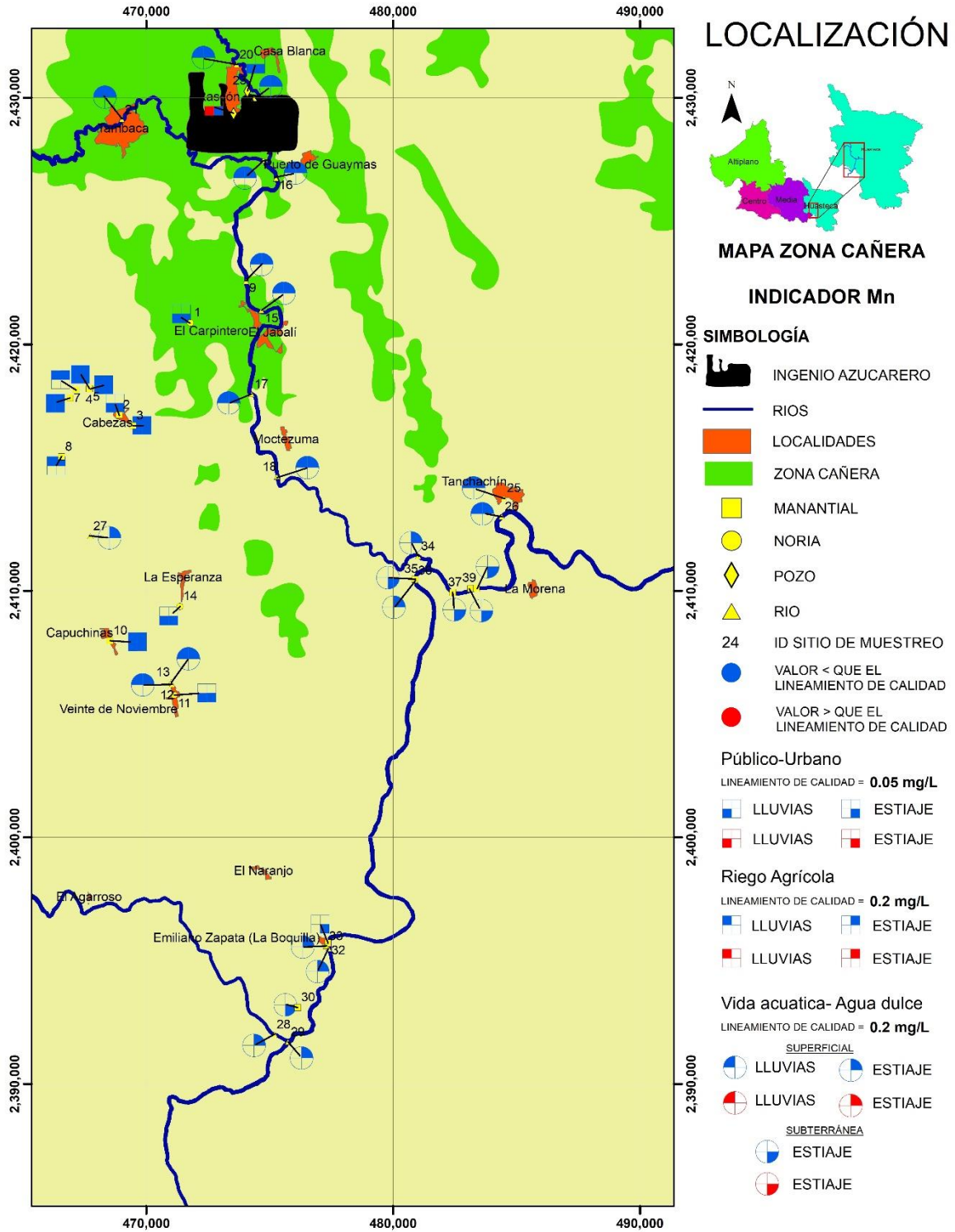


Figura 49. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del Mn

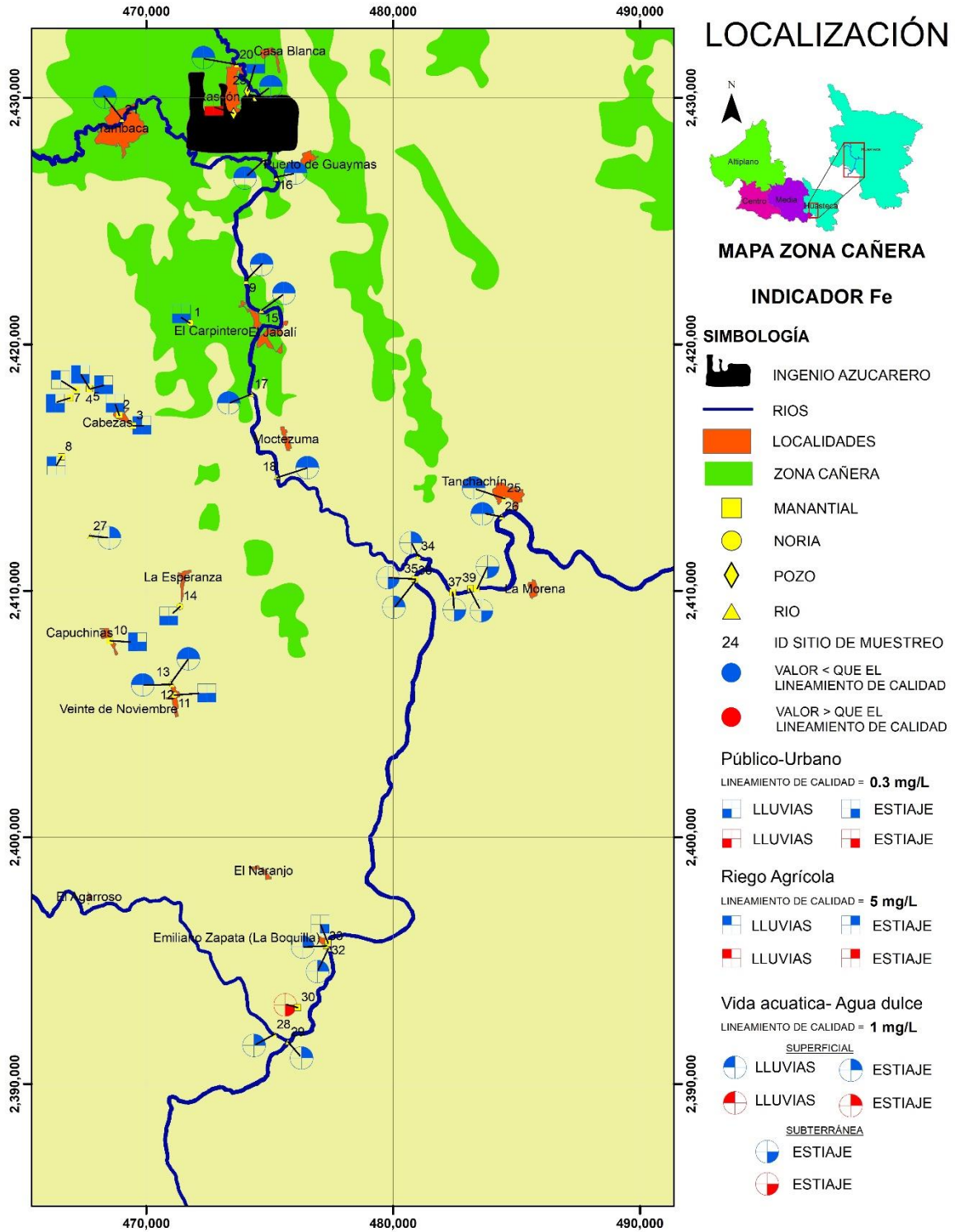


Figura 50. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del Fe

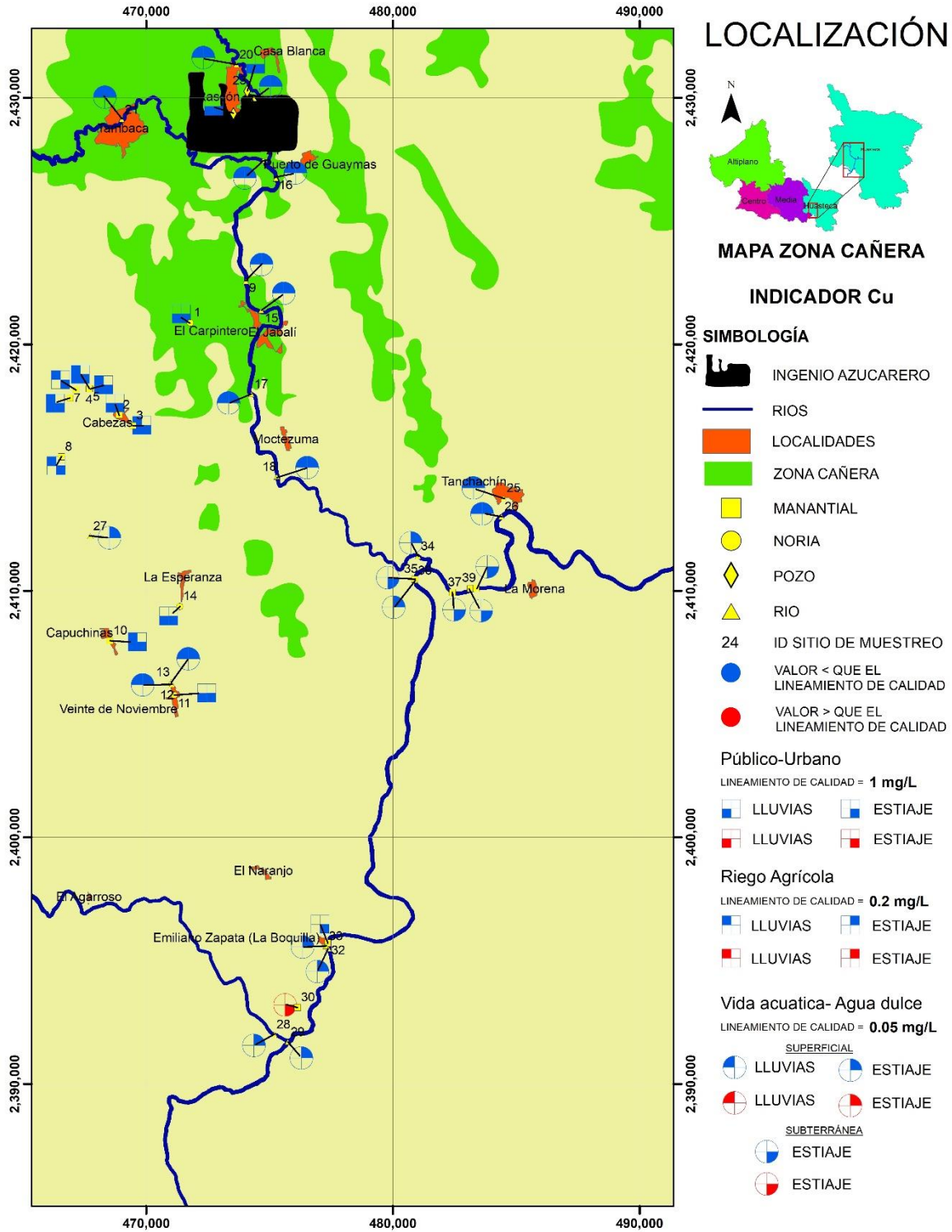


Figura 51. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del Cu

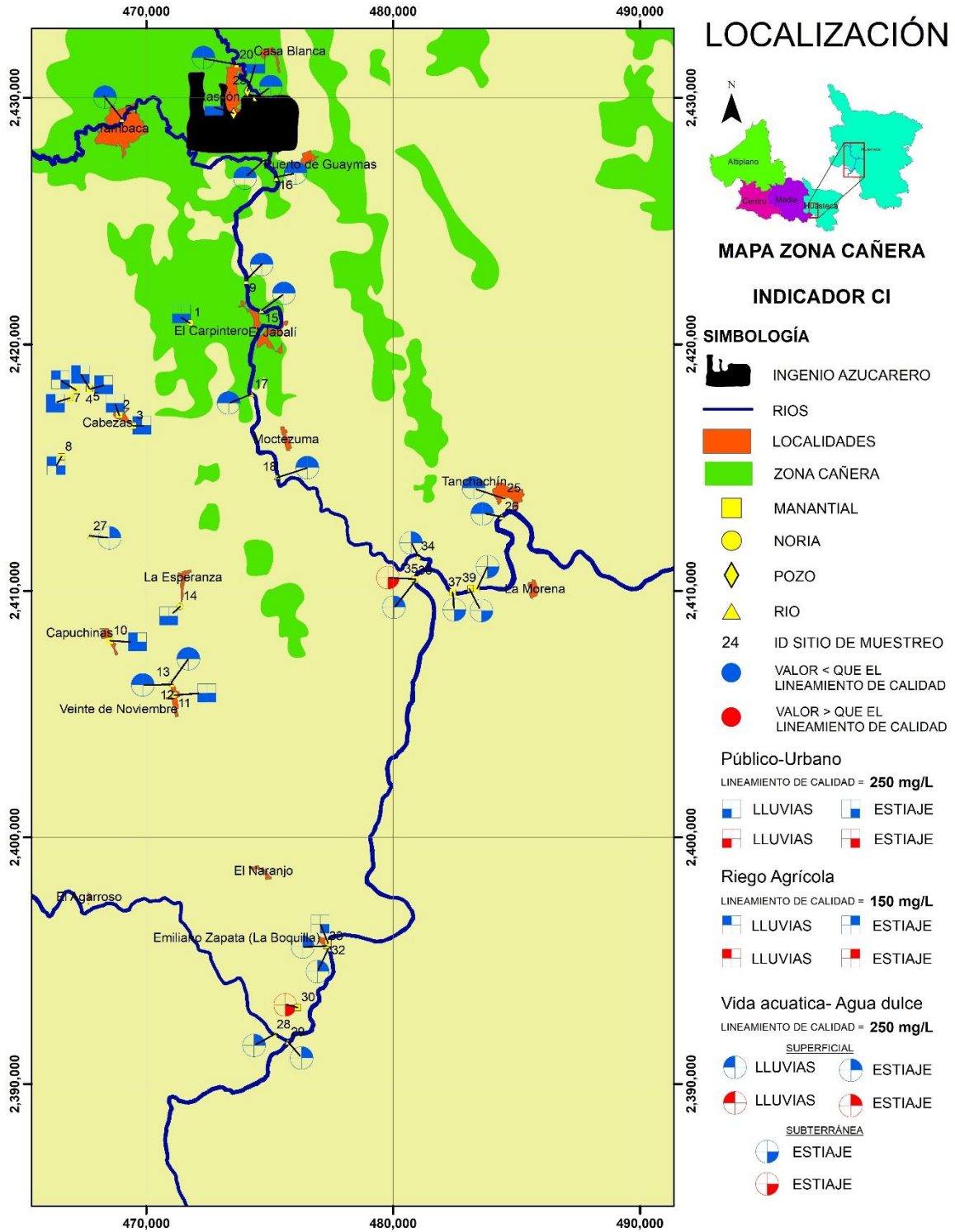


Figura 52. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del CI

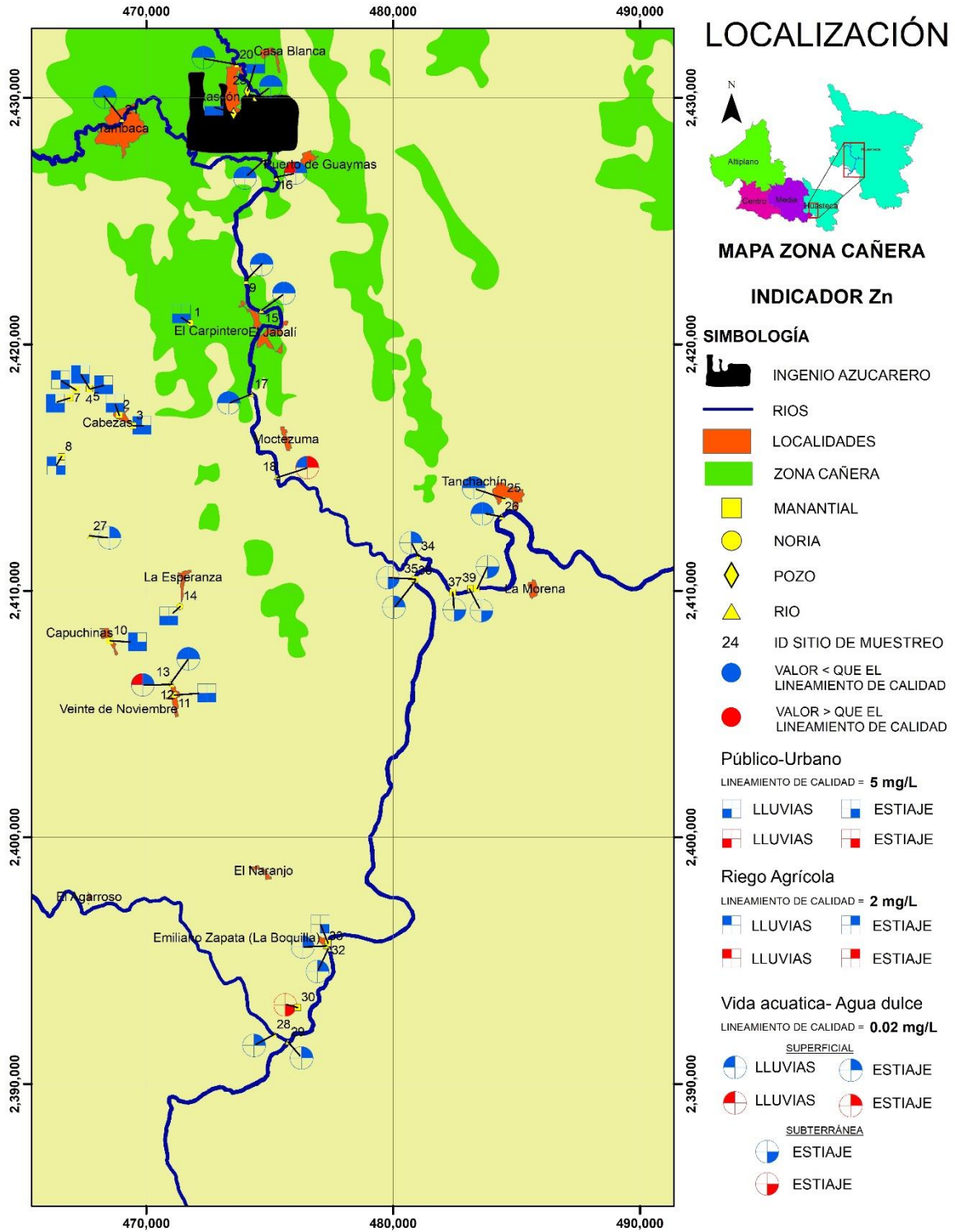


Figura 53. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del Zn

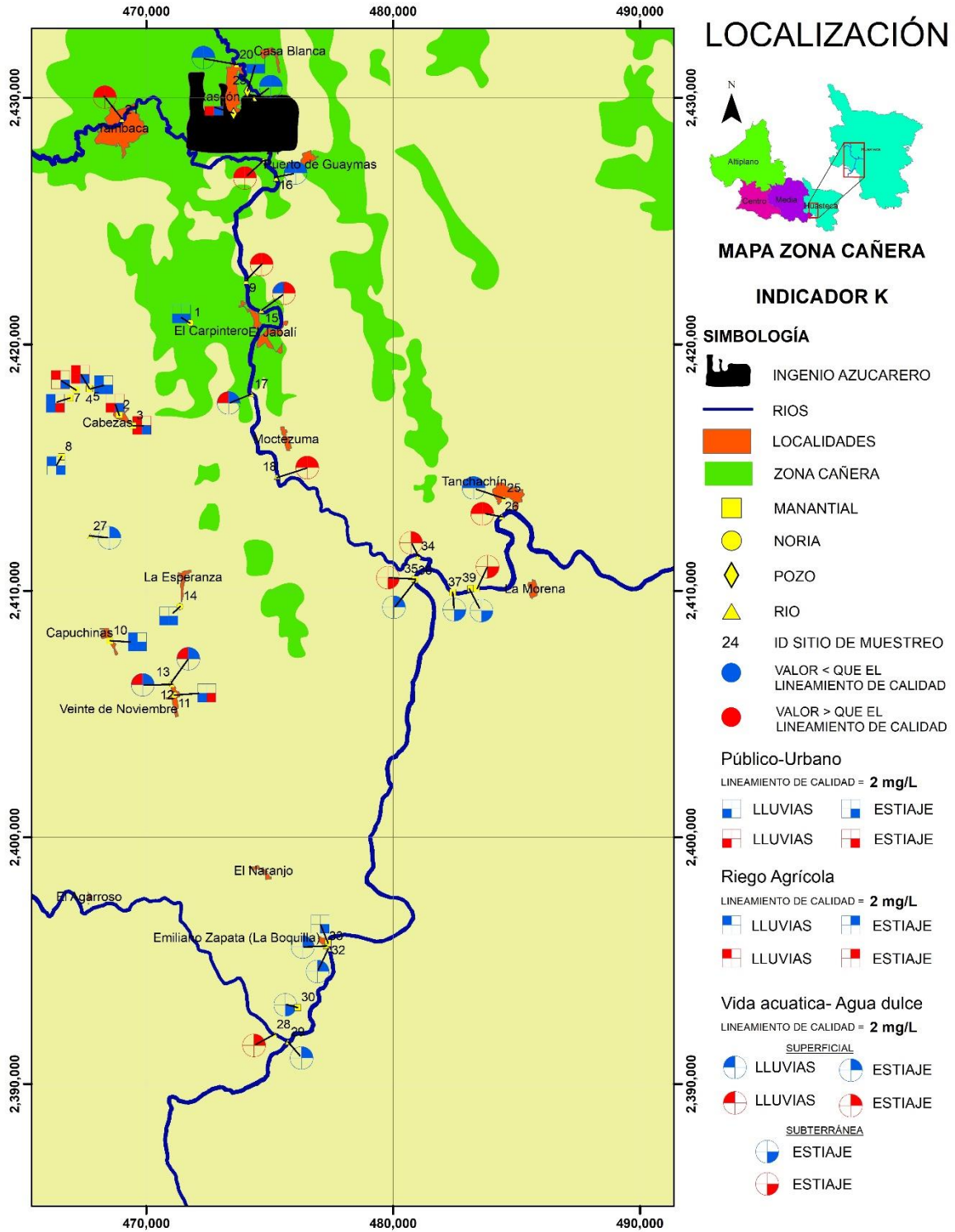


Figura 54. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del K

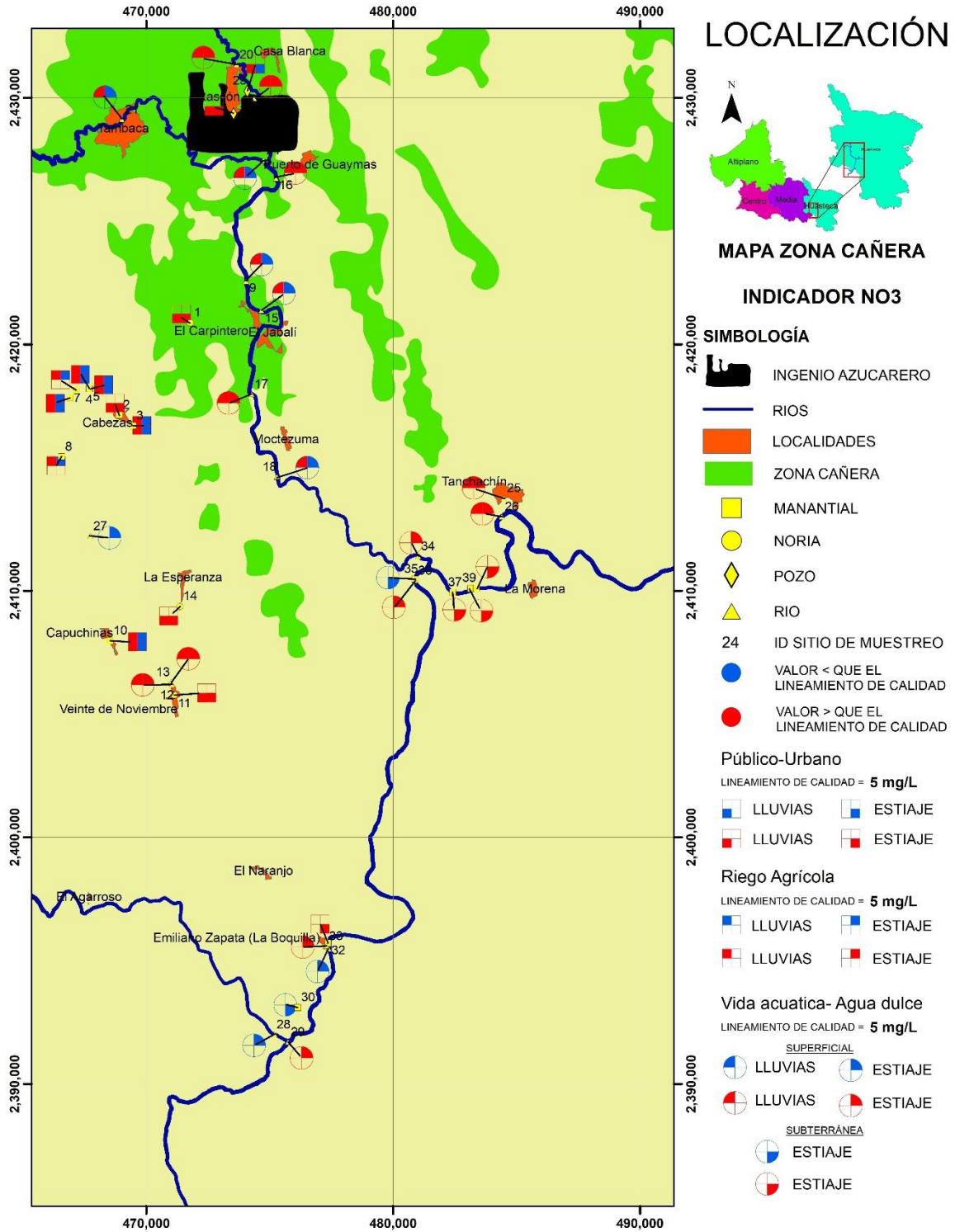


Figura 55. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del NO₃

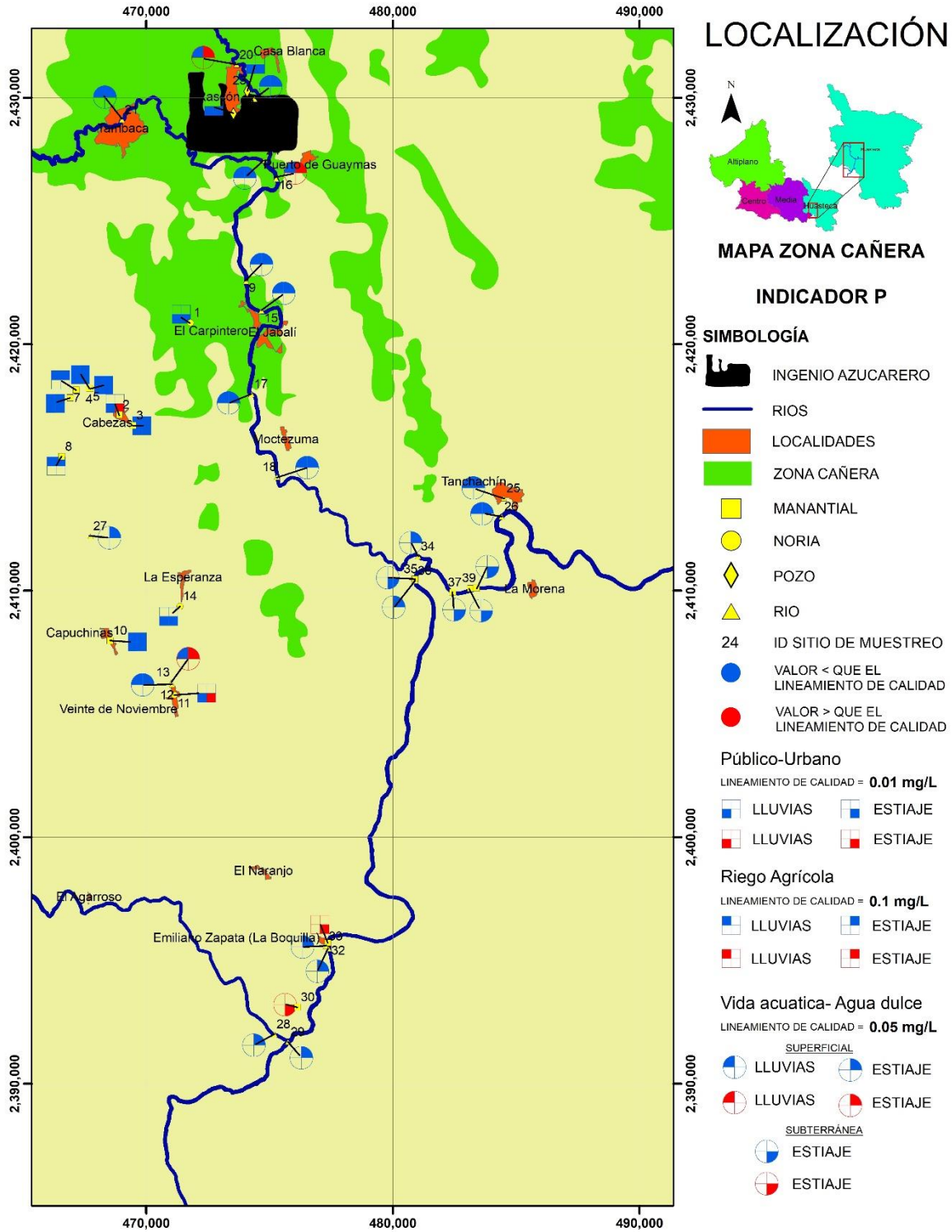


Figura 56. Distribución geográfica de los aprovechamientos evaluados con el lineamiento de calidad del P

CONCLUSIONES

Se logró evaluar la composición química del agua superficial y subterránea obteniendo los índices de calidad (ICA).

Con base en la composición química del agua se identificaron 3 familias de agua para el primer muestreo, las familias que predominan son la bicarbonatada-cálcica (54%), cálcica-mixta (23%) y la sulfatada-cálcica (23%).

Para el segundo muestreo se redujo a 2 familias de agua en la que predomina la sulfatada- cálcica (58%) y la bicarbonatada – cálcica (42%).

La comparación de los resultados de los análisis físicos y químicos generados en este trabajo con respecto a la NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles en las concentraciones de características químicas en el agua para consumo humano, señala que en general la composición del agua subterránea es apta para el consumo humano. El principal problema que se detectó en un solo aprovechamiento que está relacionado con los elementos de los parámetros CaCO_3 (dureza) y SO_4 . La clasificación del agua para riego ayudó a predecir qué tan susceptible es el cultivo para no desarrollarse completamente debido a la salinidad y el impacto en el suelo por el contenido de sodio intercambiable. Se identificó que el agua obtenida de en 24 aprovechamientos presentan salinidad media la cual se considera apta para riego debido a que la salinidad no afecta el desarrollo del cultivo de caña de azúcar. Se identificaron que 48 muestras de aprovechamientos en los cuales la salinidad es considerada alta, sin embargo, se puede utilizar para el riego en suelos con buen drenaje y con cultivos semi tolerantes al sodio (caña de azúcar) como es el caso.

En este estudio se demuestra como alternativa viable el uso de índices como el valor ICA para evaluar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en sistemas kársticos, proporcionando valiosas herramientas a los tomadores de decisiones, a fin de comprender de forma integral el estado de la calidad del agua y tener la oportunidad de tomar decisiones adecuadas para un mejor uso en el futuro.

Debido a que los valores obtenidos no rebasan la NOM-127-SSA1-1994 se procedió a determinar valores de fondo para poder localizar los sitios que presentan mayor concentración de cada elemento. Se considera de gran importancia establecer una red de monitoreo para la zona en cuestión con el fin de contar con información adecuada para tomar decisiones referentes a la protección y mejora del ambiente y así lograr un "desarrollo sostenible".

Para la evaluación difusa se utilizaron los límites de calidad que nos proporciona la ley federal de derechos disposiciones aplicables en materias de aguas nacionales (2016) en donde resalto la contaminación por NO_3 y P principalmente para sus tres diferentes usos (fuente de abastecimiento para uso público urbano, riego agrícola y protección a la vida acuática en agua dulce).

REFERENCIAS

- Academia Mexicana de Ciencias. (2010). *EL AGUA EN MÉXICO CAUCES Y ENCAUCES* (Vol. 1). (B. Jiménez Cisneros, M. L. Torregrosa y Armentia, & L. Aboites Aguilar, Edits.) México DF. doi:ISBN 978-607-95166-1-1
- Aguilar Duarte , Y., Bautista , F., Mendoza, M., Frausto, O., Ihl, T., & Delgado , C. (2016). IVAKI INDICE DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO KÁRSTICO YUCATECO A LA CONTAMINACIÓN. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 913-933. doi:ISSN 1665-2738
- Aguilar Duarte , Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., & Delgado, C. (2013). VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS KÁRSTICOS. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(2), 243-263. doi:ISSN1870-0462
- Aguilar Ibarra, A., & Pérez Espejo, R. H. (2008). LA CONTAMINACIÓN AGRÍCOLA DEL AGUA EN MÉXICO: RETOS Y PERSPECTIVAS. *Problemas del desarrollo*, 205-215. doi:ISSN 0301-7036
- Aguilar Rivera , N. (2011). COMPETITIVIDAD DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE LA HUASTECA MÉXICO. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina* . San Luis Potosí, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Aguilar Rivera , N., Galindo Mendoza, G., Contreras Servin , C., & Fortanelli Martínez, J. (2010). ZONIFICACIÓN PRODUCTIVA CAÑERA EN HUASTECA POTOSINA, MEXICO. *Agronomía Trop*, 60(2), 139-154. doi:ISSN 0002-192X.
- Antigüedad, I., Morales, T., & Uriarte, J. A. (2007). LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS. CASOS DEL PAIS VASCO. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(3), 325-332. doi:ISSN 1132-9157
- Arcudia Hernández , C. E., Flores Azuara, H., Orta Flores, S. B., & Torres Espinosa, B. (2018). AGRICULTURA INDUSTRIAL EN LA HUASTECA POTOSINA: LA CAÑA DE AZÚCAR. *Revista Académica de Investigación Tlatemoani*. Obtenido de <https://www.eumed.net/rev/tlatemoani/27/cana-azucar.html>
- Arreguín Cortés, F., Gómez Balandra, A., & Izurieta Dávila, J. (2000). CONTAMINACIÓN DIFUSA. *Tlálloc*, 7(19), 8-10.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1976). *WATER QUALITY FOR AGRICULTURE*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bakalowicz, M. (2005). KARST GROUNDWATER A CHALLENGE FOR NEW RESOURCES. *Hydrogeology Journal*, 13, 148-160.
- Bravo Inclán , L., Saldaña Fabela, P., Izurieta Dávila , J., & Mijangos Carro, M. (01 de 02 de 2013). LA IMPORTANCIA DE LA CONTAMINACIÓN DIFUSA EN MÉXICO Y EN EL MUNDO. México. Obtenido de www.gob.mx:https://www.gob.mx/csm/uploads/attachment/file/93656/contaminacion_01feb.mx
- Choundhary, O. P., Ghumana, B. S., Thuyb, N., & Bureshb, R. J. (2011). EFFECTS OF LONG-TERM USE OF SODIC WATER IRRIGATION, AMENDMENTS AND CROP RESIDUES ON SOIL PROPERTIES AND CROP YIELDS IN

- RICE- WHEAT CROPPING SYSTEM IN A CALCAREOUS SOIL. *Departament of Soils, Punjab Agricultural University*, 362-372.
- CONADESUCA. (2015). *NUTRICION DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR Y USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES*. Boletín técnico Informativo del sector de la caña de azúcar, DF. Obtenido de www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114366/Boletin_Tecnico_Informativo_Octubre_2015.pdf
- CONADESUCA. (2015). *NUTRICION DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR Y USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES*.
- CONAGUA, C. (2017). *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO*. CONAGUA, MÉXICO. Obtenido de sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C., & Laroe, E. T. (1979). *CLASSIFICATION OF WETLANDS AND DEEPWATER HABITATS OF THE UNITED STATES US FISH AND WILDLIFE SERVICE*. Washington DC: US Department of the Interior. Obtenido de <https://www.fws.gov/wetlands/Documents/Classification-of-Wetlands-and-Deepwater-Habitats-of-the-United-States.pdf>
- Cubas, F., Llano, M., & de Rosenzweig, L. J. (Agosto de 2017). EL MISTERIO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MÉXICO. México. Obtenido de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/El-misterio-del-agua-subterranea-en-Mexico.pdf>
- Dávila Ortiz, R. (2017). EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN LAS CUENCAS DEL RÍO GALLINAS Y DEL RÍO VALLES EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO. *Trabajo Recepcional para obtener el Título de Ingeniero Ambiental, Facultad de Ingeniería*. San Luis Potosí, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Davis, A. D., Long, A. J., & Wireman, M. (2002). KARSTIC: A SENSITIVITY METHOD FOR CARBONATE AQUIFER IN KARST TERRAIN. *Environmental Geology*, 24(1), 65-72. doi:10.1007/s00254-002-0531-1
- Edmunds, W. M., & Shand, P. (Edits.). (2008). *NATURAL GRONDWATER QUALITY*. Blackwell publishing. doi:ISBN: 978-14051-5675-2
- Espinasa Pereña, R. (2007). *EL KARST DE MÉXICO. MAPA NA III 3, EN Coll-Hurtado, A. (Coord), NUEVO ATLAS NACIONAL DE MÉXICO*. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía .
- Espinosa Paz, T. M., & Rodríguez , C. (3 de 12 de 2016). NOTA TÉCNICA: ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA), DE LOS RÍOS AROA Y YARACUY DE LOS ESTADOS DE FALCÓN Y YARACUY EN VENEZUELA. *Revista Ingeniería UC*, 381-386. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70748810015>
- FAO. (1993). *EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN 1993* (Vol. 26). Roma, Italia . doi:ISSN 0251-1371
- FAO Organization of the United Nations Food and Agriculture Organization. (2002). *WASTEWATER TREATMENT AND USE IN AGRICULTURE. FAO Irrigation and Drainage Paper, 47*.
- Ferney Leonel, H. (2011). *GESTIÓN PARTICIPATIVA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: EL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO VALLES, ORIENTE*

- DE MÉXICO. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Ambientales, Facultades de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina*. San Luis Potosí, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (1989). *KARST GEOMORPHOLOGY AND HYDROLOGY*. Great Britain : Champan & Hall. doi:ISBN 0 412 44590 5
- Freeze, R. A., & Cherry, A. J. (1979). *GROUNDWATER*. Prentice Hall Inc.
- García Hidalgo, Y. (mayo de 2015). CALIDAD DEL AGUA CON FINES DE RIEGO. *Revista digital de Medio Ambiente "Ojeando la Agenda"*(35), 12 pp. doi:ISSN 1989-6794
- Gidahatari. (s.f.). Obtenido de Gestión sostenible del agua : <http://gidahatari.com/ih-es/evaluacion-hidrogeologica-karst>
- Goldscheider, N. (2005). KARST GROUNDWATER VULNERABILITY MAPPING: APPLICATION OF A NEW METHOD IN THE SWABIAN ALB, GERMANY. *Hydrological Journal*, 13(4), 555-564. doi:10.1007/s10040-003-0291-3
- Guzmán Flores, J. (2018). *FERTILIZANTES QUÍMICOS Y BIOFERTILIZANTES EN MÉXICO*. Reporte de Investigación, Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Cámara de Diputados LXIII Legislatura, CDMX.
- Hernández Ayón, H., & Hernández Ayón, F. J. (2013). LA CAÑA DE AZÚCAR EN SU CONTENIDO HISTORICO. En F. J. Hernández Ayón, A. D. Valencia Ovalle, J. A. Toledo González, & H. Hernández Ayón, *EL SECTOR CAÑERO EN NAYARIT DESDE UNA PRESPECTIVA ORGANIZACIONAL Y AMBIENTAL* (Vol. 1, págs. 4-33). Tepic: Fundación Universitaria de Andaluza Inca Garcilaso . doi:ISBN-13: 978-84-15774-91-4
- IAWQ, I. (1996). *Nature's Way*.
- IFA Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. (1992). *LOS FERTILIZANTES Y SU USO*. París. Obtenido de <http://www.fertilizer.org>, también disponible en versión CD.
- IGME , I. (2002). *ISÓTOPOS AMBIENTALES EN EL CICLO HIDROLÓGICO: PRINCIPIOS Y APLICACIONES* (Vol. 1). Madrid: IGME. doi:ISBN 8478404651, 9788478404650
- IGME, I. (2002). *ISÓTOPOS AMBIENTALES EN EL CICLO HIDROLÓGICO*. Madrid: W.G. Mook.
- INEGI. (2002). *SÍNTESIS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ*. SLP: Comisión de Estudios del Territorio Nacional INEGI.
- Izurieta Dávila, J., Mijangos Carro, M., Rivera , P., Torres, V., & Chavarría , J. (2007). *DIAGNÓSTICO DE LA CONTAMINACIÓN POR FUENTES NO PUNTUALES EN MÉXICO*. (Proyecto Interno): IMTA.
- Jabardo Pereda, V., & Padilla y Sotelo, L. S. (2016). LA ESCASEZ DE AGUA EN LA HUASTECA POTOSINA (MÉXICO): CONFLICTOS LOCALES. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(2), 133.165.
- Krienen, L., Heuser, M., Höbig, N., Mares Ochoa, M., Rüde, T. R., & Cardona Benavides, A. (2017). HYDROGEOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF TWO KARSTIC DISCHARGE AREAS IN SAN

- LUIS POTOSÍ, MEXICO. *Environmental Earth Sciences*, 76:825. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7166-8>
- Kueny, J. A., & Day, M. (2002). DESIGNATION OF PROTECTED KARSTLANDS IN CENTRAL AMERICA: A REGIONAL ASSESSMENT. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(3), 165-174. Obtenido de <http://caves.org/pub/journal/PDF/V64/v64n3-Kueny.pdf>
- Landeros Sánchez, C., Palacios Vélez, E., & Hernández Pérez, J. (2014). EL AGUA Y LA AGRICULTURA EN MÉXICO. (G. d. Valle, Ed.) *Revista de Educación y Cultura "az"*, 6(82), 18-27.
- Mata Espinosa, H. A. (2009). LOS CONTAMINANTES EN EL CULTIVO E INDUSTRIALIZACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR. *Agro productividad*, 2(1), 17-20. doi:ISSN-2594-0252
- Mora , P. L., Bonifaz, R., & López Martínez, R. (2016). UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE COMITÁN, LAGOS DE MONTEBELLO, CHIAPAS-MÉXICO. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 377-394. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2016v68n3a1>
- Morán Ramírez, J., Ramos Leal, J., López Álvarez, B., Carranco Lozada, S., & Santacruz de León, G. (2013). COMPORTAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS EN ACUÍFEROS CÁRSTICOS FRACTURADOS, APLICANDO MODELACIÓN INVERSA: CASO HUASTECA POTOSINA. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 71-82. doi:ISSN 1405-3322
- Pachecho, J., & Cabrera, A. (1996). EFECTO DEL USO DE FERTILIZANTES EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ESTADO DE YUCATÁN. *Ingeniería Hidráulica en México*, XI(1), 53-60.
- Peralta Rivero, C., Galindo Mendoza , M. G., Contreras Servin, C., Algara Siller, M., & Mas Caussel , J. (2016). PERCEPCIÓN LOCAL RESPECTO A LA VALORACIÓN AMBIENTAL Y PÉRDIDA DE LOS RECURSOS FORESTALES EN LA REGIÓN HUASTECA DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO. *Madera bosques (online)*, 22(1), 71-93. doi:ISSN 2448-7597
- Perevochtchikova, M. (2013). LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y LA IMPORTANCIA DE LOS INDICADORES AMBIENTALES. *Gestión y Política Pública*, 22(2).
- Pérez Espejo , R. H., & Aguilar Ibarra, A. (2012). *AGRICULTURA CONTAMINACIÓN DEL AGUA*. UNAM Instituto de Investigaciones Económicas. doi:ISBN 978-607-02-3550-4
- Pérez, C. (2009). PRIMEROS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO DE LA LAGUNAS DE ESTAÑA Y SU RELACIÓN CON EL ACUÍFERO DE ESTOPIÑÁN (HUESCA, ESPAÑA). *Boletín Geológico y Minero*, 120(3), 443-458. Obtenido de http://www.igme.es/Boletin/2009/120_3_2009/11-ARTICULO%208%20443-458.pdf
- Perrin, J. (2003). A CONCEPTUAL MODEL OF FLOW AND TRANSPORT IN A KARST AQUIFER BASED ON SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS OF

- A NATURAL TRACERS. *Thesis PhD Degree of Doctor of Philosophy in Science*. Switzerland: University of Neuchatel.
- Quitero Ruiz, J. R. (2012). ESTUDIO AMBIENTAL Y SOCIAL COMPARATIVO DEL BOSQUE HUMEDO EN BASE AL CAMBIO DE USO DE SUELO ENTRE LA HUASTECA POTOSINA, MÉXICO Y LA MATA ATLÁNTICA, RIO DE JANEIRO, BRASIL. *Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias Ambientales , Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina .* San Luis Potosí, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Romero, E., Alonso, L., Casen, S., Leggio Neme, F. M., Tonatto, J. M., Scandaliaris, J., . . . Fernández de Ullivarri, J. (2009). FERTILIZACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR CRITERIOS Y RECOMENDACIONES. En E. E. Colombres, E. Romero , P. Digonzelli, & J. Scandaliaris (Edits.), *MANUAL DEL CAÑERO* (Vol. 1, págs. 87-100). Tucumán, Argentina. doi:ISBN 978-987-21283-7-1
- Ros Orta, S. (2001). *LA EMPRESA DE JARDINERÍA Y PAISAJISMO MANTENIMIENTO Y CONSERVACION DE ESPACIOS VERDES* (Vol. 2a. Edición). Ediciones Mundi-Prensa.
- Saldaña Rodarte, M. Á. (2011). EFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE EL MICROCLIMA EN EL HUMEDAL CIÉNEGA DE CABEZAS, TAMASOPO, S.L.P. *Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, Facultad de Agronomía .* Soledad de Graciano Sánchez, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo , L., & González , R. A. (2016). CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA: ACUÍFERO SUR DE QUINTANA ROO, MÉXICO. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 75-96. doi: ISSN 2007-2422.
- SantaCruz de León , G., & Ramos Leal, J. A. (2010). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA RESERVA SIERRA ABRA TANCHIPA Y SU ZONA DE INFLUENCIA*. Reporte Inédito.
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2007). *PERSPECTIVAS SOBRE CONSERVACIÓN DE ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN MÉXICO*. (Ó. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez, & L. Zambrano , Edits.) Obtenido de <https://books.google.com.mx/books?id=uWlrkIx-r3oC&pg=PA26&lpg=PA26&dq=La+Convenci%C3%B3n+de+Ramsar+los+define+como+zonas+h%C3%BAmedas+desde+%E2%80%9Cextensiones+de+marismas,+pantanos+o+turberas+cubiertas+de+agua,+sean+%C3%A9stas+de+r%C3%A9gimen+natural+o+>
- Tapia Goné , J. J., Alcalá Jáuregui, J., Rodríguez Ortiz, J., Aceves Alonso, J., García Hernández, J. L., Villar Morales, C., & Tiscareño Iracheta , M. A. (2010). USO POTENCIAL DEL SUELO DEL HUMEDAL DE LA CIÉNEGA DE CABEZAS SAN LUIS POTOSÍ MÉXICO. *Multequina Latin American Journal of Natural Resources*(19), 93-103. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42818826010>
- Téllez García , B. I. (2018). MONITOREO DE METALOTIONEÍNAS EN TEJIDO DE CARACOL DE AGUA DULCE (pachychilus sp) DE LA CIÉNEGA DE CABEZAS SAN LUIS POTOSÍ. *Tesis para obtener el Título de Licenciado en*

- Ciencias Ambientales y Salud, Facultad de Medicina* . San Luis Potosí, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Terrón, P. U. (2002). *FITOTECNIA: INGENIERÍA DE LA PRODUCCIÓN VEGETAL*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Zubieta Méndez, F. (2012). USO ACTUAL Y POTENCIAL AGROECOLÓGICO DE LA FRACCIÓN PEÑA AMARILLA- LA TINAJA, DEL HUMEDAL CIÉNEGA DE CABEZAS. *Tesis para obtener el Título de Ingeniero Agroecólogo, Facultad de Agronomía* . Soledad de Graciano Sánchez, SLP, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

