



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“Variación estacional de la calidad del agua en los Acuíferos de Tabalaopa-
Aldama y Aldama-San Diego, en Chihuahua, México”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**Presenta:
Brenda Nájera Haro**

**ASESOR:
Ph. D. María Teresa Alarcón Herrera**

**CO ASESOR:
Ph. D. Víctor Manuel Reyes Gómez**

Chihuahua, Chih.

MAYO 2016



RESUMEN

VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS DE TABALAOPA-ALDAMA Y ALDAMA-SAN DIEGO, EN CHIHUAHUA, MÉXICO

La escasez del recurso hídrico se agudiza con el continuo deterioro de su calidad, y por sobre-explotación de los acuíferos. La calidad del agua puede estar siendo afectada por las actividades antropogénicas. Aunado a esto se encuentra el factor de contaminación de origen natural. Además, el número de habitantes de la ciudad de Chihuahua y sus alrededores va en aumento, lo cual ocasiona y magnifica al abatimiento de los pozos de agua subterránea que son la fuente de consumo humano, en el rubro doméstico, agrícola e industrial. El objetivo del presente estudio consistió en analizar el agua de pozos de los acuíferos Tabalaopa-Aldama (TAB) y Aldama-San Diego (SD) para detectar cambios en la calidad de agua relacionados con factores estacionales y con las principales actividades antropogénicas de la región. En primer lugar, se delimitó el área de los dos acuíferos mencionados, luego se estableció el plan de muestreo en 15 pozos durante tres estaciones del año: primavera, verano y otoño. Posteriormente se hizo la determinación analítica química de las variables primarias de calidad de agua siguiendo las metodologías correspondientes. Enseguida se estimó el balance iónico como medida de calidad del análisis químico y para la determinación del tipo de agua. Finalmente se realizaron análisis estadísticos descriptivos, pruebas t de Student, probabilidad condicional y análisis multivariado, para conocer las tendencias de calidad del agua y variación estacional de calidad química en los acuíferos. Una segunda fase, consistió en revisar la cobertura vectorial de INEGI 2012 del uso de suelo (escala 1:50,000) verificando con lo observado en campo, para identificar las actividades antropogénicas aledañas a superficies aguas arriba de los pozos de agua, para tratar de encontrar relación entre esas dos variables. Se encontró que en la zona de estudio predominan actividades de tipo doméstico y agrícola. Para TAB se observa que aunque hay más aprovechamientos que se destinan a uso agrícola que los de uso público-urbano, el volumen de extracción es superior para el segundo uso. Contrariamente, para SD se observa que de esos dos usos, los volúmenes de extracción del agua, los más importantes son para uso agrícola. En la zona de estudio sí se perciben cambios en la calidad de agua relacionados con factores estacionales



que a su vez son influenciados por factores naturales y antropogénicos. Por ejemplo, con respecto a la agricultura y la variación estacional, se registró un aumento de concentraciones de N-NO_3^- y P en el agua de los pozos en verano y otoño, coincidiendo con la temporada de lluvias que podría influir en la lixiviación del fósforo y nitrógeno de los fertilizantes usados e infiltrarlos en los acuíferos. En cuanto a la dureza disminuyó en verano, hecho debido a un efecto de dilución por las lluvias, la temperatura del agua disminuyó en otoño, el Potencial Oxido Reducción y el Si aumentaron en primavera; aunque estas últimas cuatro variables no presentaron ninguna relación con actividades antropogénicas, más bien fueron consideradas de influencia geogénica. En cuestión de calidad del agua los resultados muestran que los fluoruros (F^-) y el arsénico (As) son los que rebasan los máximos recomendables para los usos de consumo humano y agrícola. Con una media poblacional de 2.13 ± 0.005 mg/L para F^- lo que rebasa la NOM-127-SSA-1994 si es para consumo humano ($P < 0.001$), la Ley Federal de Aguas Nacionales si es para uso agrícola ($P < 0.001$) y la normatividad internacional ($P < 0.001$). También el As con una media poblacional de 0.0148 ± 0.00003 mg/L rebasa los límites recomendados por la OMS ($P < 0.001$). Por acuífero fue mayor la media de fluoruros en el de SD con 2.32 ± 0.33 mg F^- /L que en el de TAB con 1.87 ± 0.4 mg F^- /L rebasando ambas normatividades mexicanas e internacionales ($P < 0.05$). Esto reforzó la hipótesis de un origen geogénico de As y F^- debido a que el acuífero TAB está más cercano a la zona urbana. Cabe señalar que el As en el acuífero SD rebasa la internacional con 0.02 ± 0.003 mg/L ($P < 0.008$). En cuanto al F^- en todas las estaciones rebasa las normatividades, mientras que el As solamente rebasa la internacional en verano con media de 0.019 ± 0.003 mg/L ($P < 0.008$), lo que permite apoyar la hipótesis de una posible variabilidad estacional. Durante el año, el tipo de agua predominante es bicarbonatada sódica lo que concuerda con anteriores resultados obtenidos en términos de calidad de agua donde existe la presencia de As y F^- (Alarcón-Herrera, et al., 2013).



ABSTRACT

SEASONAL VARIATION OF WATER QUALITY IN TABALAOPA-ALDAMA AND ALDAMA-SAN DIEGO AQUIFERS IN CHIHUAHUA, MEXICO

The lack of the water resources sharpens by the continued deterioration of their quality, and over-exploitation of the aquifers. Water quality perhaps it is being affected by the anthropogenic activities. Added to this, there is the factor of natural contamination. In addition, population of the city of Chihuahua and its surroundings is increasing, which causes and magnifies the groundwater wells lowering that are the human consumption source, in the domestic, agricultural and industrial sector. Therefore the objective of this study was to analyze the well's water of Tabalaopa-Aldama (TAB) and Aldama-San Diego (SD) aquifers to determine if there are changes detected in water quality related to seasonal factors and anthropogenic activities in the region. So one of the goals was to determine the wells water quality from the TAB-SD aquifer system and its seasonal variation and then identify anthropogenic activities. The methodology to develop the first objective was to defined water quality, for this the study area has been defined in two aquifers mentioned, then the sampling plan was sampled 15 wells in spring, summer and autumn seasons each, subsequently was made the water quality primary variables analytical chemical determination following corresponding methodologies. Also was carried out the analytic ionic balance determination for the type of water and finally descriptive statistical analyzes were performed, Student's t tests, conditional probability and multivariate analysis such as the principal component, for water quality trends and seasonal variation of the aquifers. To identify the anthropogenic activities, the second goal, was used INEGI 2012 vector coverage (scale 1: 50,000) and the field's observation, all these to relate them with the wells water quality seasonal variation current data identified, only domestic and agricultural activities were observed. In TAB there are more wells for agricultural use, followed by the public-urban use, and the reverse as observed for extraction volumes. In SD is observed that agricultural water use dominated both for in harvesting and extraction volumes. In the study area there are changes in water quality related to seasonal factors which in turn are influenced by natural and anthropogenic factors. With regard to agriculture and seasonal variations, was recorded N-NO₃⁻ and P increase



concentrations in summer and fall wells water, coinciding with the rainy season that could influence leaching in used and infiltrated phosphorus and nitrogen fertilizer into aquifers. As for the hardness decreased in summer because of the rains, the water temperature decreased in autumn, the Oxidation Reduction Potential and Si increased in spring, these last four variables are not related to anthropogenic activities. So they are considered geogenic influence. In water quality matter the results showed that fluorides (F^-) and arsenic (As) are those that exceed the maximum recommended guidelines for human and agricultural use. With 2.13 ± 0.005 mg/L population mean of F^- exceeds the drinking water guideline NOM-127-SSA-1994 ($P < 0.001$), the Federal National Waters Law for agricultural use ($P < 0.001$) and international standards set by the World Health Organization (WHO) ($P < 0.001$). Also the As with 0.0148 ± 0.00003 mg/L population mean exceeds the recommended limits by WHO ($P < 0.001$). The 2.32 ± 0.33 mg of F^- /L SD mean was greater than 1.87 ± 0.4 mg F^- /L TAB mean by aquifers, exceeding both; Mexican and international normativity ($P < 0.05$) this indicates a geogenic origin. It should be noted that the As in SD aquifer exceeds the international normativity with 0.02 ± 0.003 mg/L ($P < 0.008$). As the F^- in all stations exceeds the normativities, but only exceeds the As in summer the international normativity with 0.019 ± 0.003 mg/L ($P < 0.008$) mean. During the year, sodium bicarbonate is the water types predominant, this is agree with the water quality results, that there are As and F^- presence (Alarcon-Herrera, et al., 2013).



CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	18
II.	MARCO TEORICO	20
II.1	Antecedentes.....	20
II.2	Uso de suelo y vegetación del área de estudio	22
II.3	Hidrología superficial	23
II.3.1	Cuenca y subcuenca hidrológica	23
II.4	Hidrología subterránea	24
II.4.1	Evolución del nivel estático	25
II.5	Calidad del agua.....	26
II.6	Usos del agua.....	28
II.6.1	Extracción del agua subterránea y su distribución por usos	29
II.7	Efectos a la salud atribuidos a la presencia en el agua de arsénico y fluoruros ..	31
II.7.1	Arsénico	31
II.7.2	Fluoruros	33
II.8	Efectos ambientales del arsénico y fluoruros	34
II.8.1	Arsénico	34
II.8.2	Fluoruros	35
	HIPÓTESIS:	36
III.	OBJETIVOS:	36
General:	36
Específicos:	36
IV.	METODOLOGÍA.....	37
IV.1	Determinación de la calidad del agua	37
IV.1.1	Área de estudio.....	37



IV.1.2 Población de estudio	39
IV.1.3 Muestra estratificada	39
IV.1.4 Desarrollo del plan de muestreo	40
IV.1.5 Determinación analítica de las variables (parámetros de calidad de agua) .	41
IV.2 Identificación de las actividades antropogénicas.....	43
IV.3 Balance iónico	44
IV.4 Análisis estadístico.....	44
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
V.1 Calidad del agua	48
V.1.1 Posible origen del fluoruro en la zona.....	48
V.1.2 Efectos del fluoruro en la salud de la población expuesta	49
V.1.3 Posible origen del metaloide.....	52
V.1.4 Efectos del arsénico inorgánico en la salud de la población expuesta	53
V.2 Calidad del agua por acuífero	54
V.3 Calidad del agua por estación del año	58
V.4 Análisis multivariado para el efecto de pozo y estacionalidad.....	64
V.4.1 Análisis de correlación	64
V.4.2 Análisis de componentes principales para pozos	67
V.4.3 Análisis de componentes principales para estacionalidad	71
V.4.4. Distribución espacial del As, F ⁻ , N-NO ₃ , P	75
V.5 Clasificación del agua	77
V.5.1 Por sólidos totales disueltos	77
V.5.2 Por dureza	78
V.5.3 Por balance iónico	79
VI. CONCLUSIONES.....	87



VII. RECOMENDACIONES	88
VIII. BIBLIOGRAFÍA	89
IX. ANEXOS	94
X. APENDICE	107



LISTA DE FIGURAS

Figura II.1. Mapa de uso de suelo y vegetación de INEGI (2012) escala 1:50,000.....	22
Figura II.2. Regiones hidrológicas y cuencas pertenecientes a los acuíferos	24
Figura II.3. Niveles estáticos de profundidad de algunos pozos censados por CONAGUA (2011).....	26
Figura IV.4. Ubicación de los pozos de muestreo (TAB-n pertenecen al acuífero Tabalaopa-Aldama y SD-n pertenecen al acuífero Aldama-San Diego)	38
Figura V.5. Distribución espacial de concentraciones de As.....	76
Figura V.6. Distribución espacial de las concentraciones de F ⁻	77
Figura V.7. Diagrama de Piper en primavera	84
Figura V.8. Diagrama de Piper en verano	85
Figura V.9. Diagrama de Piper en otoño	86
Figura IX.10. Distribución espacial de las concentraciones de N-NO ₃	105
Figura IX.11. Distribución espacial de las concentraciones de P	106



LISTA DE TABLAS

Tabla II.1. Características generales de los acuíferos	25
Tabla II.2. Agrupación de usos de la clasificación del Repda	28
Tabla II.3. Generalidades socioeconómicas y demográficas por municipios	29
Tabla IV.4. Comparativa del uso de suelo con lo observado en campo.....	43
Tabla V.5. Comparación de valores máximos permisibles según el uso del agua y la normatividad internacional	46
Tabla V.6. Valores extremos eliminados para el análisis estadístico, y que rebasan los límites de Consumo humano NOM-127-SSA-1994 y la EPA (estándar secundario). ...	47
Tabla V.7. Medias poblacionales por variable comparadas con normatividades	51
Tabla V.8. Medias por acuífero, comparadas con normatividades.....	56
Tabla V. 9. Diferencias de las medias poblacionales por acuífero del presente estudio.	57
Tabla V.10. Media estacional de primavera comparada con normatividades	60
Tabla V.11. Media estacional de verano comparada con normatividades	61
Tabla V.12. Media estacional de otoño comparada con normatividades	62
Tabla V.13. Correlación entre variables de metales y metaloides.....	65
Tabla V.14. Matriz de correlaciones entre las variables con mayor información (rx, y, valor P).....	66
Tabla V.15. Coeficientes de los Eigenvectores para los primeros cuatro componentes principales	67
Tabla V.16. Coeficientes de los Eigenvectores para los primeros cuatro componentes principales	72
Tabla V.17. Frecuencias absolutas para la clasificación de dureza a través de las estaciones en los pozos muestreados	79
Tabla V.18. Frecuencias absolutas para la clasificación de balance iónico a través de las estaciones en los pozos muestreados.....	82
Tabla V.19. Frecuencias absolutas del error del balance iónico a través de las estaciones en los pozos muestreados	83



LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica V.1. Distribución de los pozos de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y dos.....	69
Gráfica V.2. Distribución de los pozos de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y tres	70
Gráfica V.3. Distribución de los pozos de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y cuatro.....	71
Gráfica V.4. Distribución de las estaciones de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y dos.....	73
Gráfica V.5. Distribución de las estaciones de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y tres	74
Gráfica V.6. Distribución de las estaciones de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y cuatro.....	75
Gráfica V.7. Tendencia de las probabilidades condicionales para tipo de dureza en las épocas del año	78
Gráfica V.8. Tendencia de las probabilidades condicionales para tipo de agua por Balance Iónico en las épocas del año	80
Gráfica V.9. Tendencia de las probabilidades condicionales del error calculado por balance iónico en las épocas del año.....	83



LISTA DE CUADROS

Cuadro V.1. Contribuciones del componente principal 1 para pozos	67
Cuadro V.2. Contribuciones del componente principal 2 para pozos	68
Cuadro V. 3. Contribuciones del componente principal 3 para pozos	68
Cuadro V.4. Contribuciones del componente principal 4 para pozos	68
Cuadro V.5. Contribuciones del componente principal 1 por estación	72
Cuadro V.6. Contribuciones del componente principal 2 por estación	72
Cuadro V.7. Contribuciones del componente principal 3 por estación	72
Cuadro V.8. Contribuciones del componente principal 4 por estación	73



LISTA DE GRÁFICOS EN ANEXOS

Gráfico IX.2. Dispersión de los valores de As (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	95
Gráfico IX.1. Dispersión de los valores de F ⁻ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	95
Gráfico IX.3. Dispersión de los valores de Na ⁺ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	96
Gráfico IX.4. Dispersión de los valores de N-NO ₃ ⁻ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	96
Gráfico IX.5. Dispersión de los valores de pH (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	97
Gráfico IX.6. Dispersión de los valores de T.S.D. (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	97
Gráfico IX.7. Dispersión de los valores de P (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	98
Gráfico IX.8. Dispersión de los valores de SO ₄ ⁻ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	98
Gráfico IX.9. Dispersión de los valores de Cd (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	99
Gráfico IX.10. Dispersión de los valores de dureza total (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	99
Gráfico IX.12. Dispersión de los valores de Fe (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	100
Gráfico IX.11. Dispersión de los valores de Al (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	100
Gráfico IX.13. Dispersión de los valores de Mg ⁺ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	101
Gráfico IX.14. Dispersión de los valores de Zn ⁺ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año.....	101
Gráfico IX.15. Variación estacional con sus barras de error.....	102
Gráfico IX.16. Variación estacional con sus barras de error.....	102



Gráfico IX.17. Variación estacional con sus barras de error	103
Gráfico IX.18. Variación estacional con sus barras de error estándar de la temperatura del agua	103
Gráfico IX.19. Variación estacional con sus barras de error	104
Gráfico IX.20. Variación estacional con sus barras de error	104



LISTA DEL APÉNDICE

Apéndice X.1. Tabla de atributos de puntos seleccionados del Acuífero Tabalaopa-Aldama.....	108
Apéndice X.2. Tabla de atributos de puntos seleccionados del Acuífero Aldama-San Diego.....	109
Apéndice XI.3. Vegetación de los acuíferos.....	111
Apéndice XI.4. Nivel de significancia de la prueba de normalidad Anderson-Darling para las principales variables de estudio.....	117



AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme terminar este proyecto.

A mis padres y a mi hermana por apoyarme en todo momento incondicionalmente, quienes tuvieron paciencia y estuvieron conmigo siempre. A mi perro Honey por acompañarme en todo momento a altas horas de la noche trabajando conmigo.

Agradezco a mis asesores de tesis Ph. D. María Teresa Alarcón, Ph. D. Víctor Manuel Reyes y Ph. D. Mélida Gutiérrez por permitirme adentrar en la investigación científica y proporcionarme las herramientas para llevarla a cabo.

Especialmente también agradezco al Ph. D. Juan Ángel Ortega por su asesoría estadística, siempre dispuesto a ayudarme.

Agradezco a mis compañeros y amigos de la generación 2014-2016 de la maestría en ciencia y tecnología ambiental del CIMAV que ayudaron a que culminara este episodio de mi vida que sin ayuda de todos ellos no hubiera podido culminar esta tesis.

A todos gracias.



DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de investigación a mis abuelos que lograron salir adelante lográndose como profesionistas, a mi tío abuelo Teófilo maestro investigador apasionado por lo que hace.

Por supuesto, también dedico este trabajo de investigación a mi familia, padre, madre y hermana todos profesionistas, siempre luchadores y ejemplos a seguir por igual, todas personas importantes en mi vida que siempre han estado para apoyarme en las buenas y en las malas.

I. INTRODUCCIÓN

La escasez del recurso hídrico se agudiza con el continuo deterioro de su calidad, y por sobre-explotación de los acuíferos. El abastecimiento de agua potable a las comunidades se ve amenazado, al igual que su crecimiento económico y el futuro de las próximas generaciones. De los 653 acuíferos censados por CONAGUA (2011) del país, aproximadamente 162 (24.81%) se encuentran sin disponibilidad de agua, 349 (53.44%) con disponibilidad y el resto está bajo estudio. En el estado de Chihuahua, los acuíferos Tabalaopa-Aldama (TAB) y Aldama- San Diego (SD) son fuentes importantes de agua para los habitantes de la ciudad de Chihuahua y para las actividades agrícolas en la zona; en ellos el grado de explotación se encuentra entre el 75 y 100%, indicando que aún no son sobreexplotados, a pesar de los periodos de sequía que se han presentado. El número de pozos autorizados por CONAGUA en ambos acuíferos es de 536 (237 y 299) con una piezometría de 1.35 a 220 m, lo que puede afectar la calidad del agua si se extrae a mayores profundidades (CONAGUA, 2012).

La calidad del agua puede estar siendo afectada por las actividades antropogénicas. El excedente de agua de los riegos en las actividades agrícolas es una fuente de recarga a estos acuíferos (CONAGUA, 2011) lo que implica una posible incorporación de compuestos nitrogenados, fosforados y iones de potasio debido al uso de fertilizantes (Ongley, 1997). Aunado a esto se encuentra el factor de contaminación de origen natural como la contribución de las riolitas y vidrios volcánicos con contenidos de As y F⁻ (Alarcón-Herrera, et al., 2013; Reyes-Gómez, et al., 2013; Gutiérrez, et al., 2009). Por ello es también de alta importancia la recarga del acuífero por el agua de lluvia, la cual es la principal fuente de agua limpia y de recarga al acuífero Tabalaopa-Aldama (Cruz, 2005). Otros estudios en la zona del acuífero relacionan la infiltración con la presencia de metaloides en el agua, encontrando una relación estrecha con la presencia de arsénico (As), problema que se considera actualmente de alta prioridad (Reyes-Gómez, et al., 2010; Cruz, 2005; Alarcón-Herrera, et al., 2012). Sin embargo, el número de habitantes de la ciudad de Chihuahua y sus alrededores va en aumento, lo cual ocasiona y magnifica el abatimiento de los pozos de agua



subterránea que son fuente para el consumo urbano, doméstico, agrícola e industrial.

La información sobre la calidad del agua del acuífero Aldama-San Diego es prácticamente nula por lo que la información presentada aquí es más relevante. Este estudio analizó los diferentes parámetros de calidad del agua para con ello asociar la posible variabilidad estacional de la calidad del agua y el grado de afectación que ocasiona el uso de suelo debido a las actividades antropogénicas. Ello ayudará a planear a mediano y largo plazo la gestión del recurso agua en zonas afectadas por presión antropogénica, especialmente la de Tabalaopa - Aldama. Los resultados de este estudio pueden igualmente apoyar la toma de decisiones a las instituciones encargadas de administrar y cuidar la calidad del agua en estos acuíferos para asegurar a largo plazo la disponibilidad de agua para los habitantes de la ciudad y las diferentes actividades económicas.

II. MARCO TEORICO

II.1 Antecedentes

El valle de Chihuahua-Aldama y zonas adyacentes han sido estudiadas con diversos objetivos geológicos, entre ellos mineros, petroleros e hidrogeológicos. Entre los primeros se pueden citar los trabajos de Hewit en 1951, en cuanto a la geología y mineralización de la mina de San Antonio en el Distrito Minero de Santa Eulalia. El estudio geológico-regional de carácter petrolero elaborado por Ramírez y Acevedo en 1957, definió la estratigrafía del estado de Chihuahua, incluyendo a las Sierras que conforman el Valle Chihuahua-Aldama. En 1972 se elaboró un estudio hidrogeológico de los acuíferos de la zona de veda en la región de Aldama, Chihuahua, por Ariel Construcciones S.A. su objetivo principal fue determinar el potencial del acuífero, así como su funcionamiento dentro del marco geológico.

La Facultad de Ingeniería de la UACH, a través de la Secretaría de Educación Pública realizaron un estudio geo hidrológico del Valle de Chihuahua dentro del margen de una serie de investigaciones geo hidrológicas No.100, con el propósito de detectar, cuantificar y planear la explotación de los recursos hidráulicos subterráneos en la cuenca donde se ubica la ciudad (UACH, 1978).

Chavez (1993) realizó la hidrogeología física y química de la porción centro-occidental del Valle de Tabalaopa-Aldama. El objetivo de su estudio fue analizar como la mayor parte de los acuíferos que actualmente se explotan en el estado de Chihuahua se encuentran en medios porosos granulares y algunos especialmente en medios sedimentarios de tipo abanico aluvial, consideró de interés adquirir una mejor comprensión de las relaciones sedimentológicas, geomorfológicas e hidrogeoquímicas que operan en el área, para destacar la información que pueda ser utilizable como una guía práctica en la prospección hidrogeológica. En su trabajo un resultado importante fue que encontró que el riego tradicional de zonas agrícolas era con aguas residuales, localizado en ambas márgenes del río Chuvíscar, eso ocasionaba un sensible deterioro del agua subterránea debido a la contaminación por nitratos, que si bien estaba dentro de los límites permisibles, los

resultados eran suficientes para tomar acciones de protección adecuadas. También analizó los niveles estáticos de diciembre de 1991, encontró que el flujo del agua subterránea dentro de la zona estudiada es hacia el oeste a partir del río Chuvíscar, hasta la batería de pozos de agua potable. Pérez-Arámbula (1996), hizo la determinación de la geometría del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua. En el 2004, la compañía Moro INGENIERÍA S.A. hizo la actualización de mediciones piezométricas del acuífero de Tabalaopa, Chihuahua, para elaborar las configuraciones del nivel estático correspondientes. La configuración del nivel estático evidenciaba que los mayores valores de profundidad del nivel estático se presentan en la parte sur y noroeste y las más someras en la porción centro y noreste del valle. A lo largo del río Chuvíscar no se registran abatimientos, lo cual confirma que en esa zona ha disminuido la extracción de agua o que existe una mayor recarga; esta última es posible debido a la alta permeabilidad de los materiales que conforman el lecho del río, lo que favorece una mayor infiltración.

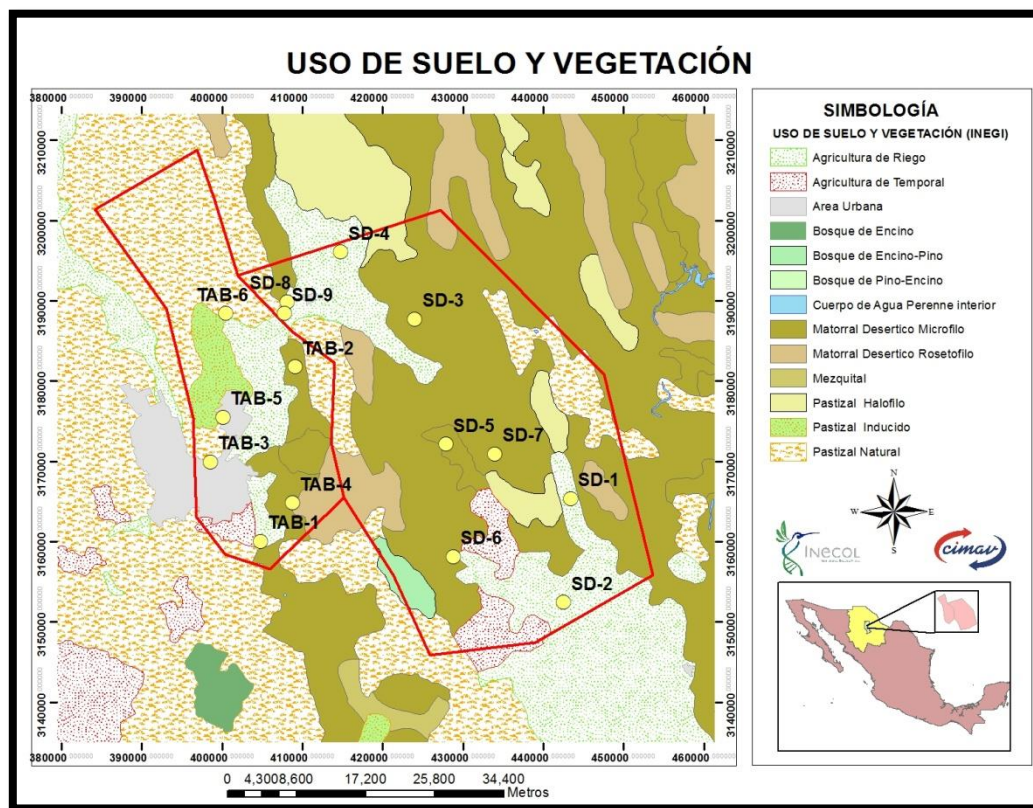
Cruz (2005) elaboró un modelo hidrogeoquímico del arsénico en el acuífero Tabalaopa-Aldama-El Cuervo en Chihuahua México, donde analizó aspectos hidrogeoquímicos del arsénico, su extensión, magnitud y tipo de contaminación. En Aldama la presencia de arsénico en el agua subterránea, es un problema que se ha hecho prioritario para la entidad, debido a la toxicidad del mismo, su trabajo se justifica para determinar si la población está expuesta, ya que se tiene el recurso subterráneo para el abastecimiento de agua potable a la población. Reyes Gómez, et al. (2010) estudiaron la dinámica del As en el Valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, establecieron que uno de los principales problemas de salud que atañe a los habitantes de la zona y los alrededores de la Sierra del Cuervo en Chihuahua, es la contaminación por arsénico en los pozos de agua del acuífero donde se provee el consumo humano y el uso agrícola. Por lo que propusieron un modelo conceptual del funcionamiento del hidrosistema determinado a partir de los niveles de As en el sistema sólido superficial y la fase líquida subterránea de los acuíferos de Tabalaopa-Aldama –Laguna de Hormigas. La metodología aplicada

consistió en el análisis de los niveles de concentración de arsénico en el agua del acuífero, en rocas, sedimento y suelo.

II.2 Uso de suelo y vegetación del área de estudio

En la figura II.1 se observa los tipos de vegetación y uso de suelo en la zona de estudio. Son en total 2, 343.1 Km² de las cuales predomina el matorral desértico micrófilo con un 40.54%, luego pastizal natural (incluye pastizal-huizachal) con un 21.14%, con un 17.39% la agricultura de riego, le siguen en menores porcentajes el matorral desértico rosetófilo con 6%, luego la agricultura de temporal con 4.49%, el pastizal halófito con 3.47%, asentamientos humanos con 2.98%, pastizal inducido con 2.78%, bosque de encino pino con 1.21%, y cuerpos de agua 0.005% (INEGI, 2012). En apéndice X.3 se describen los principales tipos de vegetación encontrados en el área de estudio.

Figura II.1. Mapa de uso de suelo y vegetación de INEGI (2012) escala 1:50,000.



II.3 Hidrología superficial

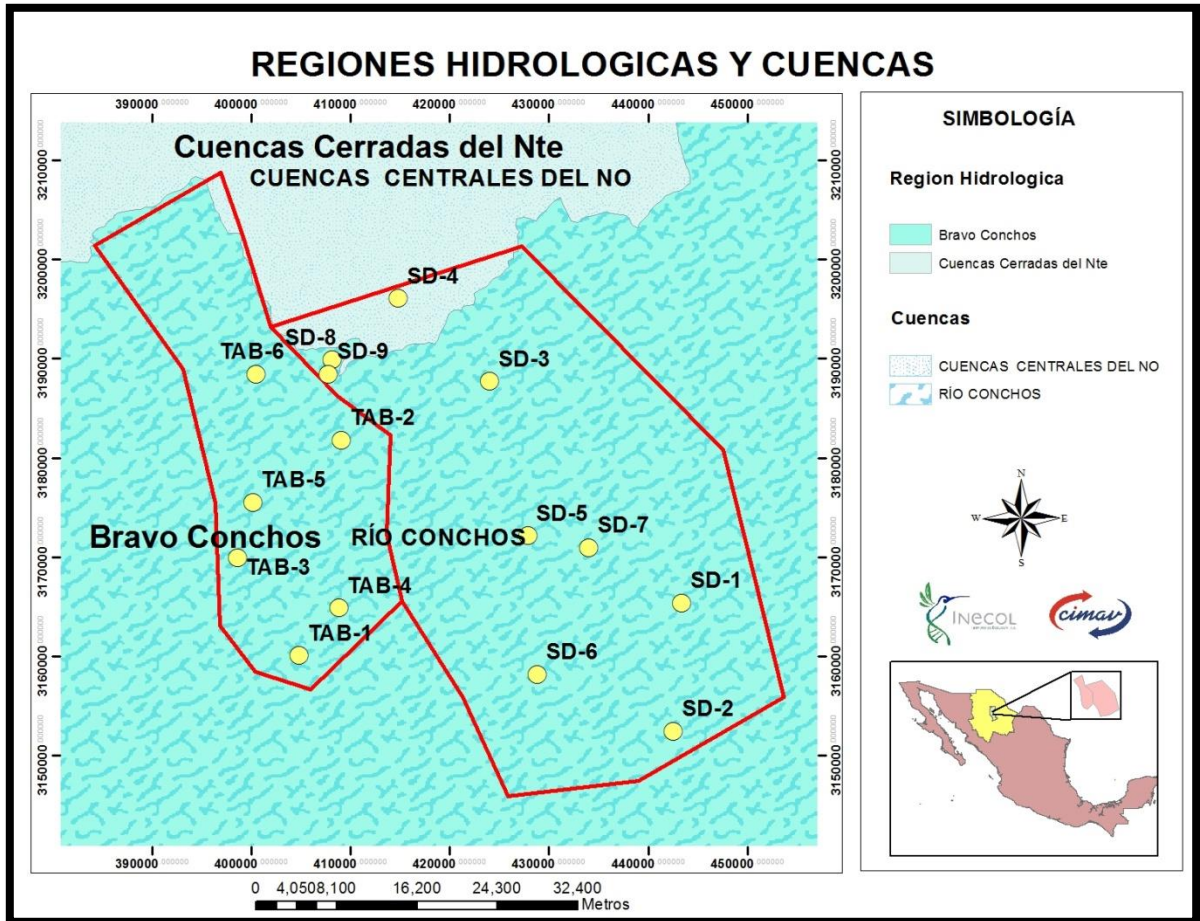
Como se puede observar en la figura II.2 los acuíferos Tabalaopa-Aldama (TAB) y Aldama-San Diego (SD) pertenecen a la Región Hidrológica No. 24 “Bravo-Conchos” y una pequeña porción de las mismas se ubican en la Región Hidrológica No. 34 “Cuencas Cerradas del Norte”. Esta última se considera la región hidrológica de mayor relevancia ya que incluye al Río Conchos, el cual es la corriente más importante del estado (CONAGUA, 2013).

II.3.1 Cuenca y subcuenca hidrológica

Como se observa en la figura II.2 la zona de los acuíferos TAB y SD se localizan dentro de la cuenca río Conchos-Presa El Granero, subcuenca río Chuvíscar (INEGI, 2003). Las corrientes superficiales que se presentan en la zona del acuífero TAB son efímeras y estacionales, en periodos de estiaje no existe flujo en los arroyos, mientras que en el río Chuvíscar existe un escurrimiento prácticamente continuo debido a la descarga de aguas tratadas que son arrojadas por plantas de tratamiento. Los principales arroyos afluentes del río Chuvíscar son El Mimbres, ubicado al norte, Los Nogales al sur y Santa Eulalia en la porción sureste. En el acuífero SD los principales arroyos afluentes del río Chuvíscar son San Diego y Santa Eulalia. En el acuífero TAB como consecuencia del asentamiento urbano, la región cuenta con importantes obras de infraestructura hidráulica, como la planta de tratamiento de aguas residuales sur, y otra de menor escala propiedad del fraccionamiento Camino Real, la red de agua potable y alcantarillado que cubre la mayor parte de la zona urbana, así como la red de agua tratada existente en una parte de la zona sur de la Ciudad de Chihuahua. Existen también la batería de pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento así como el sistema de rebombeo y los aprovechamientos automatizados. Dentro de las obras en construcción se encuentran un colector de aguas negras en la capital, así como una fuente alterna de suministro para agua potable en la población de Aquiles Serdán. En cuanto al acuífero SD en su porción centro y sur, existe infraestructura de sistemas avanzados de riego (aspersión, goteo, etc.). Existen también canales (sobre todo al sureste del acuífero) revestidos y no

revestidos que transportan agua a zonas de cultivo, donde predominan forrajes y nogal (CONAGUA, 2013).

Figura II.2. Regiones hidrológicas y cuencas pertenecientes a los acuíferos



II.4 Hidrología subterránea

No se localizan distritos o unidades de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). Ambos acuíferos TAB y SD son de tipo libre, presentan una permeabilidad que varía de media a baja y se alojan ambos en sedimentos aluviales depositados en el centro del valle, constituidos por arenas intercaladas con arcillas y limos estratificados, cuyo espesor puede alcanzar los 800 m. La fuente principal de recarga es el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas, una menor fuente de recarga está representada por infiltración vertical del agua de

lluvia que se precipita en el valle y por los retornos de riego agrícola (CONAGUA, 2013). Cabe señalarse que a lo largo del río Chuvíscar no se registran abatimientos, lo cual confirma que en esa zona ha disminuido la extracción de agua o que existe una mayor recarga; esta última posibilidad es posible debido a la alta permeabilidad de los materiales que conforman el lecho del río, lo que favorece una mayor infiltración (Pérez-Arámbula, 1996). En la tabla II.1 se describen más características generales de los acuíferos donde se puede observar en mejor condición al acuífero SD.

Tabla II.1. Características generales de los acuíferos

Características del acuífero	Tabalaopa-Aldama	Aldama-San Diego
Tipo de material	Aluvial	Aluvial, sedimentos coluviales y con contenidos de fragmentos líticos abundantes de la riolita volcánica y toba, así como de conglomerado y piedra caliza
Era	Cuaternario	Cuaternario
Permeabilidad	Alta en general, hacia el Valle de Aldama es media-alta	
Transmisividad	0.012 m ² /s	0.0033 m ² /s
Recarga media	76.5 Mm ³ /año	61 Mm ³ /año
Grosor	400 m en general, se adelgaza hacia el Valle de Aldama a 200 m.	300 m
Total de Sólidos Disueltos	500 a 2000 mg/L	300 a 500 mg/L
Extracción media anual	65.6 Mm ³ /año, calculado para 148 pozos	20.9 Mm ³ /año calculado para 128 pozos

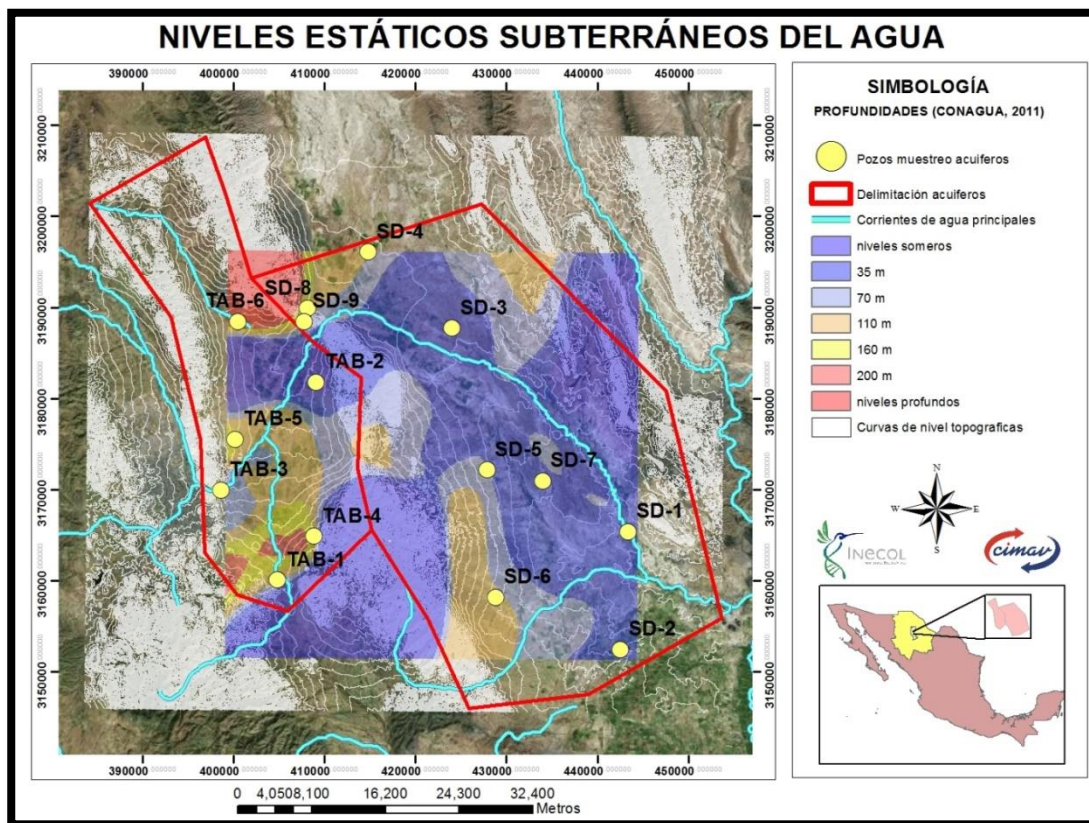
(Reyes-Gómez, et al., 2013).

II.4.1 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático en el acuífero TAB para el periodo 1971-2012 (figura II.3), presenta valores puntuales que varían de 9.55 metros de recuperación a 41.69 metros de abatimiento, localizándose la zona de recuperaciones en áreas paralelas al río, de la parte media a la parte baja de la cuenca, mientras que los mayores abatimientos se muestran hacia la parte alta del acuífero en la zona centro-poniente, disminuyendo los abatimientos hacia el sur (CONAGUA, 2013).

Con la información disponible para 1971 y 2007 del acuífero SD (figura II.3) se estimó un abatimiento promedio de 7.5 m en 36 años. En este periodo de tiempo los niveles piezométricos han evolucionado de una manera distinta, al sur han descendido hasta 30 m, la zona centro norte registra descensos de 20 m y en la porción norte del acuífero existen recuperaciones positivas de hasta 5 m (CONAGUA, 2013).

Figura II.3. Niveles estáticos de profundidad de algunos pozos censados por CONAGUA (2011)



II.5 Calidad del agua

La Agencia Protectora del Ambiente por sus siglas en inglés (EPA) define la calidad del agua como el valor graduado de los componentes (orgánicos e inorgánicos, químicos o físicos) que comprenden la naturaleza del agua.

El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial con el crecimiento de la población humana, la

expansión de la actividad industrial y agrícola, la amenaza del cambio climático como causa de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico.

A nivel global, el principal problema relacionado con la calidad del agua lo constituye la eutrofización, que es el resultado de un aumento de los niveles de nutrientes (generalmente fósforo y nitrógeno) afectando sustancialmente a los usos del agua. Las mayores fuentes de nutrientes provienen de la escorrentía agrícola y de las aguas residuales domésticas (también fuente de contaminación microbiana), de efluentes industriales y emisiones a la atmósfera procedentes de la combustión de combustibles fósiles y de los incendios forestales. La baja calidad del agua afecta directamente sobre la cantidad de agua de diversas maneras (ONU-DAES, 2014).

La contaminación significa la presencia de sustancias químicas o de otra naturaleza en concentraciones superiores a las condiciones naturales. Hay dos tipos de fuentes de contaminación: las fuentes naturales, que depende de los terrenos que atraviesa el agua, por contacto con la atmósfera y suelo (por ejemplo sales minerales, calcio, magnesio, hierro, etcétera) y las antropogénicas, producidas como consecuencia de las actividades humanas. Entre los contaminantes más importantes se encuentran los microorganismos patógenos, desechos orgánicos (heces y fluidos humanos y animales), sustancias químicas inorgánicas (ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo), nutrientes vegetales inorgánicos como los nitratos y fosfatos, compuestos orgánicos (como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes difíciles de degradar por sus estructuras moleculares complejas), sedimentos y materiales suspendidos, sustancias radiactivas, contaminación térmica (García, 2002). Los contaminantes constituyen la principal causa de la degradación de la calidad de agua en el mundo y su contaminación está en función de su uso (ONU-DAES, 2014)

La calidad del agua subterránea está regida por diversos factores, que entre otros, son de tipo físico, químico, biológico, así como los rangos y periodos de explotación y el tipo de acuífero. La interpretación química del agua subterránea se utiliza conjuntamente con la geología y la hidrogeología, como un auxiliar para

tratar de entender y conocer en una forma más precisa el funcionamiento de los acuíferos y así lograr la planeación de un mejor y más racional aprovechamiento. Dado que el acuífero de TAB no presenta problemas de salinidad, pero presenta problemas de fluoruros, arsénico y fierro fuera de norma, aunque el arsénico y el fierro aun no representan un problema. La conservación efectiva de los suministros de agua subterránea requiere la integración de los usos del suelo y la gestión del agua (CONAGUA, 2013).

II.6 Usos del agua

Según el Registro Público de Derechos de Agua (Repda) los usos se clasifican de la siguiente manera (tabla II.2):

Tabla II.2. Agrupación de usos de la clasificación del Repda

Uso agrupado	Consuntivo/no consuntivo	Rubros de clasificación del Repda
Agrícola	Consuntivo	Agrícola, acuicultura, pecuario, usos múltiples, otros usos.
Abastecimiento público	Consuntivo	Doméstico, público urbano
Industria autoabastecida	Consuntivo	Agroindustrial, servicios, industrial, comercio.
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	Consuntivo	Industrial
Hidroeléctrico	No consuntivo	Hidroeléctricas

Elaborado con base en CONAGUA (2014).

Se define al uso como la aplicación del agua a una actividad. Cuando existe consumo, entendido como la diferencia entre el volumen suministrado y el volumen descargado, se trata de un uso consuntivo. Existen otros usos que no consumen agua como la generación de energía eléctrica, que utiliza el volumen almacenado en presas. A estos usos se les denomina no consuntivos (CONAGUA, 2010).

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos en México lo representa el uso agrupado agrícola, principalmente para riego, es importante destacar que México es uno de los países que cuenta con mayor infraestructura

de riego en el mundo, siguiéndole el abastecimiento público, la energía eléctrica (excluyendo la hidroelectricidad) y finalmente la industria autoabastecida (CONAGUA, 2014). Chihuahua ocupa el tercer lugar de todo el país al que se le otorga uno de los mayores volúmenes concesionados de agua para usos consuntivos (5124.7 Mm³), siendo principalmente para el uso agrícola (4587.6 Mm³) (CONAGUA, 2010). Cabe señalar que la participación de la actividad económica terciaria aporta más al PIB en la entidad de Chihuahua con un 57.8 %, siguiéndole las actividades secundarias con un 35% y finalmente las primarias con un 7.2% (INEGI, 2009).

II.6.1 Extracción del agua subterránea y su distribución por usos

El acuífero TAB se ubica en los municipios de Chihuahua y Aldama. El acuífero SD se ubica en dos municipios Aldama y Aquiles Serdán. El número de localidades rurales en la zona del acuífero TAB es de 156 y para SD son 253. Para el acuífero TAB se contaba en el 2010 con un aproximado de 1, 041,316 personas en total entre los dos municipios y 45,155 personas en total en el acuífero SD entre los dos municipios las cuales demandan agua para uso público urbano. En la tabla II.3 se describen más aspectos socioeconómicos de cada municipio involucrado en el área de estudio.

Tabla II.3. Generalidades socioeconómicas y demográficas por municipios

Características	Chihuahua	Aldama	Aquiles Serdán
Población total (INEGI, 2010)	819,543 hab.	22,302 hab.	10,688 hab.
Proyección de población total 2030 (Consejo Nacional para la Población)	1, 013,190 hab.	28,126 hab.	17,028 hab.
Tomas de agua (INEGI, 2013)	127 tomas de pozo y 1 de presa.	7 tomas de pozo.	
Principal actividad económica	Producción de leche de bovino, con 27,506 mil L en 2010.	Producción de leche de bovino, con 7,633 mil L en 2010.	Producción de leche de bovino con 353 mil L.
Personal ocupado en manufactura	53,203	776	6
Inversión pública en 2010	1,324.676 mdp.	34.438 mdp.	19.189 mdp.
Cultivos de producción	Alfalfa verde	Alfalfa verde	No hay datos.

agrícola	(173,340 ton) y viveros (240,999.75 ton).	(204,660 ton) y algodón hueso (18,000 ton).	
Superficie total sembrada	29,158.75	13,201.30	No hay datos.

(CONAGUA, 2013).

En cuanto al acuífero TAB del censo de aprovechamientos de 2007, se tienen un total de 344 captaciones del agua subterránea, de las cuales 210 corresponden a pozos y 134 a norias. Del total de aprovechamientos 122 (35.4 %) se destinan al uso agrícola, 84 (24.5 %) al uso público - urbano, 61 más (17.7 %) para uso doméstico, 44 (12.9 %) para usos múltiples, 19 (5.4 %) para uso pecuario y los 14 restantes (4.1 %) para uso Industrial. El volumen de extracción conjunto se estimó en 75.1 hm³ anuales, de los cuales 34.4 hm³ (45.8%) se destinan al uso público - urbano, 31.3 hm³ (41.7%) para uso agrícola, 8.1 hm³ (10.8%) para usos múltiples y el resto para uso doméstico e industrial, (CONAGUA, 2013). Se observa que aunque hay más aprovechamientos que se destinan a uso agrícola, siguiéndole los de uso público-urbano, en volumen de extracción es mayor para uso público-urbano, y enseguida le sigue para uso agrícola por una diferencia mínima.

En cuanto al acuífero SD para 2007, se tiene un total de 212 aprovechamientos, de las cuales 171 son pozos, 39 norias y 2 manantiales. Del total de aprovechamientos, 132 (62.5 %) se destinan al uso agrícola, 45 (21.1 %) a usos múltiples, 20 (9.27 %) a uso doméstico y 15 (7.2 %) a varios usos. El volumen de extracción total es de 63.6 hm³ anuales, de los cuales 56.4 hm³ (88.7 %) son para uso agrícola, 4.1 hm³ (6.5 %) para usos múltiples, 2.0 hm³ (3.1 %) para público urbano, 0.8 hm³ (1.2 %) para uso doméstico y el resto para otros usos (CONAGUA, 2013). Se observa que domina tanto en aprovechamientos y volúmenes de extracción el uso de agua agrícola.

II.7 Efectos a la salud atribuidos a la presencia en el agua de arsénico y fluoruros

II.7.1 Arsénico

Es un elemento semimetal o metaloide, inodoro e insípido. Puede encontrarse en agua por erosión de depósitos naturales de la Tierra o por prácticas industriales (escorrentías de vidrios y desechos electrónicos) y agrícolas (escorrentías de huertos). Entre sus usos están que el arsénico industrial en un 90 por ciento en Estados Unidos de América se usa como preservador de madera, pero también es usado en pinturas, colorantes, metales, fármacos, jabones, semiconductores; se usa en la agricultura, minería y en fundidoras todo esto contribuye a su liberación en el ambiente. Los efectos a la salud cuando alguien bebe agua contaminada que sobrepasa los límites máximos permisibles, puede experimentar por muchos años daños en la piel o problemas con el sistema circulatorio y puede incrementar las posibilidades de padecer cáncer (EPA, 2013).

El arsénico se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza. Al arsénico se le encuentra natural como mineral de cobalto, aunque por lo general está en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como Mn, Fe, Co, Ni, Ag o Sn. El principal mineral del arsénico es el FeAsS (arsenopirita, pilo). Los arseniatos y tioarseniatos naturales son comunes y la mayor parte de los minerales de sulfuro contienen arsénico. La As_4S_4 (realgarita) y As_4S_6 (oropimente) son los minerales más importantes que contienen azufre. El óxido, arsenolita, As_4O_6 , se encuentra como producto de la alteración debida a los agentes atmosféricos de otros minerales de arsénico, y también se recupera de los polvos colectados de los conductos durante la extracción de Ni, Cu y Sn; igualmente se obtiene al calcinar los arseniuros de Fe, Co o Ni con aire u oxígeno (LENNTECH, 2016).

El arsénico elemental tiene pocos usos. Es uno de los pocos minerales disponibles con un 99.9999+ % de pureza. En el estado sólido se ha empleado ampliamente en los materiales láser GaAs y como agente acelerador en la manufactura de varios aparatos. El óxido de arsénico se utiliza en la elaboración de vidrio. Los sulfuros de arsénico se usan como pigmentos y en juegos

pirotécnicos. El arseniato de hidrógeno se emplea en medicina, así como otros compuestos de arsénico. La mayor parte de la aplicación medicinal de los compuestos de arsénico se basa en su naturaleza tóxica. El arsénico es uno de los más tóxicos elementos que pueden ser encontrados. Debido a sus efectos tóxicos, los enlaces de arsénico inorgánico ocurren en la tierra naturalmente en pequeñas cantidades. Los humanos pueden ser expuestos al arsénico a través de la comida, agua y aire (LENNTECH, 2016).

La exposición puede también ocurrir a través del contacto con la piel con suelo o agua que contenga arsénico. Los niveles de arsénico en la comida son bastante bajos, no es añadido debido a su toxicidad, pero los niveles de arsénico en peces y mariscos pueden ser altos, porque los peces absorben arsénico del agua donde viven. La exposición al arsénico puede ser más alta para la gente que trabaja con arsénico, para gente que bebe significantes cantidades de vino, para gente que vive en casas que contienen conservantes de la madera y gente que viven en granjas donde el arsénico de los pesticidas ha sido aplicado en el pasado. La exposición al arsénico inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. Es sugerido que la toma de significantes cantidades de arsénico inorgánico puede intensificar las posibilidades de desarrollar cáncer, especialmente las posibilidades de desarrollo de cáncer de piel, pulmón, hígado, linfa. A exposiciones muy altas de arsénico inorgánico puede causar infertilidad y abortos en mujeres, puede causar perturbación de la piel, pérdida de la resistencia a infecciones, perturbación en el corazón y daño del cerebro tanto en hombres como en mujeres. Finalmente, el arsénico inorgánico puede dañar el ADN. El arsénico orgánico no puede causar cáncer, ni tampoco daño al ADN. Pero exposiciones a dosis elevadas puede causar ciertos efectos sobre la salud humana, como es lesión de nervios y dolores de estómago (LENNTECH, 2016).

II.7.2 Fluoruros

Los fluoruros están presentes en la corteza terrestre de forma natural, pudiendo ser encontrado en rocas, carbón y arcilla. Los fluoruros son liberados al aire cuando el viento arrastra el suelo. Los procesos de combustión en las industrias pueden liberar fluoruro de hidrógeno al aire. Los fluoruros que se encuentran en el aire acabarán depositándose en el suelo o en el agua.

Se estima que se halla en un 0.065% en la corteza terrestre; es casi tan abundante como el carbono, el nitrógeno o el cloro, mucho más que el cobre o el plomo, aunque mucho menos que el hierro, aluminio o el magnesio. Los compuestos cuyas moléculas contienen átomos de flúor están ampliamente distribuidos en la naturaleza. Muchos minerales contienen cantidades pequeñas del elemento, y se encuentra tanto en rocas ígneas como en rocas sedimentarias.

Los compuestos que contienen flúor se utilizan para incrementar la fluidez del vidrio fundido y escorias en la industria vidriera y cerámica. El espato flúor (fluoruro de calcio) se introduce dentro del alto horno para reducir la viscosidad de la escoria en la metalurgia del hierro. La criolita, Na_2AlF_6 , se utiliza para formar el electrólito en la metalurgia del aluminio. El óxido de aluminio se disuelve en este electrólito, y el metal se reduce, eléctricamente, de la masa fundida. El uso de halocarburos que contienen fluoruros como refrigerantes se patentó en 1930, y estos compuestos estables y volátiles encontraron un mercado como propelentes de aerosoles, así como también en refrigeración y en sistemas de aire acondicionado. Sin embargo, el empleo de fluorocarburos como propelentes ha disminuido en forma considerable a causa del posible daño; a la capa de ozono de la atmósfera. Un uso del flúor, muy importante durante la Segunda Guerra Mundial, fue un el enriquecimiento del isótopo fisionable ^{235}U ; el proceso más importante empleaba hexafluoruro de uranio. Este compuesto estable y volátil fue con mucho el material más adecuado para la separación del isótopo por difusión gaseosa. Mientras que para los consumidores la utilización de compuestos de fluorurados en la industria pasa casi inadvertida, algunos compuestos se han vuelto familiares a través de usos menores pero importantes, como aditivos en

pastas de dientes y superficies fluoropoliméricas antiadherentes sobre sartenes y hojas de afeitar (teflón por ejemplo) (LENNTECH, 2016).

En el agua, aire, plantas y animales hay presentes pequeñas cantidades de fluoruros. Como resultado los humanos están expuestos a los fluoruros a través de los alimentos y el agua potable y aire. Los fluoruros se pueden encontrar en cualquier tipo de comida en cantidades relativamente pequeñas. Se pueden encontrar grandes cantidades de fluoruros en el té y en los mariscos. El flúor es esencial para mantener la solidez de nuestros huesos. Si se absorben fluoruros con demasiada frecuencia, puede provocar caries, osteoporosis y daños a los riñones, huesos, nervios y músculos. Las industrias liberan la forma gaseosa del flúor. Este gas es muy peligroso, ya que en elevadas concentraciones puede causar la muerte. En bajas concentraciones puede causar irritaciones de los ojos y la nariz (LENNTECH, 2016).

II.8 Efectos ambientales del arsénico y fluoruros

II.8.1 Arsénico

Puede ser encontrado de forma natural en la tierra en pequeñas concentraciones. Esto ocurre en el suelo y minerales y puede entrar en el aire, agua y tierra a través de las tormentas de polvo y las aguas de escorrentía. El arsénico no se puede movilizar fácilmente cuando este es inmóvil. Debido a las actividades humanas, mayormente a través de la minería y fundiciones, naturalmente el arsénico inmóvil se ha movilizó también y puede ahora ser encontrado en muchos lugares donde ellos no existían de forma natural. El ciclo del arsénico ha sido ampliado como consecuencia de la interferencia humana y debido a esto, grandes cantidades de arsénico terminan en el ambiente y en organismos vivos. El arsénico es mayoritariamente emitido por las industrias productoras de cobre, pero también durante la producción de plomo y zinc y en la agricultura. Este no puede ser destruido una vez que este ha entrado en el ambiente, así que las cantidades que hemos añadido pueden esparcirse y causar efectos sobre la salud de los humanos y los animales en muchas localizaciones sobre la tierra. Las plantas absorben arsénico bastante fácil, así que alto rango de

concentraciones pueden estar presentes en la comida. Las concentraciones altas de arsénico inorgánico que está actualmente presente en las aguas superficiales aumentan las posibilidades de alterar el material genético de los peces. Esto es mayormente causado por la acumulación de arsénico en los organismos de las aguas dulces consumidores de plantas. Las aves comen peces que contienen eminentes cantidades de arsénico y morirán como resultado del envenenamiento por arsénico como consecuencia de la descomposición de los peces en sus cuerpos (LENNTECH, 2016).

II.8.2 Fluoruros

Cuando el flúor se fija a partículas muy pequeñas puede permanecer en el aire durante un largo periodo de tiempo. Cuando el flúor del aire acaba en el agua se instala en los sedimentos. Cuando acaba en los suelos, el flúor se pega fuertemente a las partículas del suelo. En el medio ambiente el flúor no puede ser destruido; solamente puede cambiar de forma. El flúor que se encuentra en el suelo puede acumularse en las plantas. La cantidad de fluoruros que tomen las plantas depende del tipo de planta, del tipo de suelo y de la cantidad y tipo de fluoruros que se encuentren en el suelo. En las plantas que son sensibles a la exposición del flúor incluso a bajas concentraciones pueden provocar daños en las hojas y una disminución del crecimiento. Los animales que ingieren plantas que contienen fluoruros pueden acumular grandes cantidades en sus cuerpos. El flúor se acumula principalmente en los huesos. Como consecuencia, los animales expuestos a elevadas concentraciones de fluoruros sufren de caries y degradación de los huesos. Demasiado flúor también puede provocar la disminución de la cantidad de alimento tomado por el estómago y puede alterar el desarrollo de las garras de animales. Por último, puede provocar bajo peso al nacer en animales (LENNTECH, 2016).



HIPÓTESIS: Los acuíferos Tabalaopa-Aldama y Aldama-San Diego presentan cambios en la calidad de agua relacionados con factores estacionales y las actividades antropogénicas realizadas en la región.

III. OBJETIVOS:

General: Determinar la variación estacional de la calidad del agua en pozos del sistema de acuíferos de TAB-SD, y su relación con el actual uso de suelo de la región.

Específicos:

- Determinar la calidad del agua de los pozos del sistema de acuíferos TAB-SD y su variación estacional. Mediante la selección y delimitación del área de estudio; posteriormente el desarrollo del plan de muestreo y finalmente la determinación analítica de los parámetros de calidad de agua seleccionados.
- Identificar las actividades antropogénicas a través de la cobertura vectorial de INEGI 2012 (escala 1:50,000) y lo observado en campo para relacionarlas con los datos actuales de la variación estacional de la calidad del agua en los pozos de estudio.

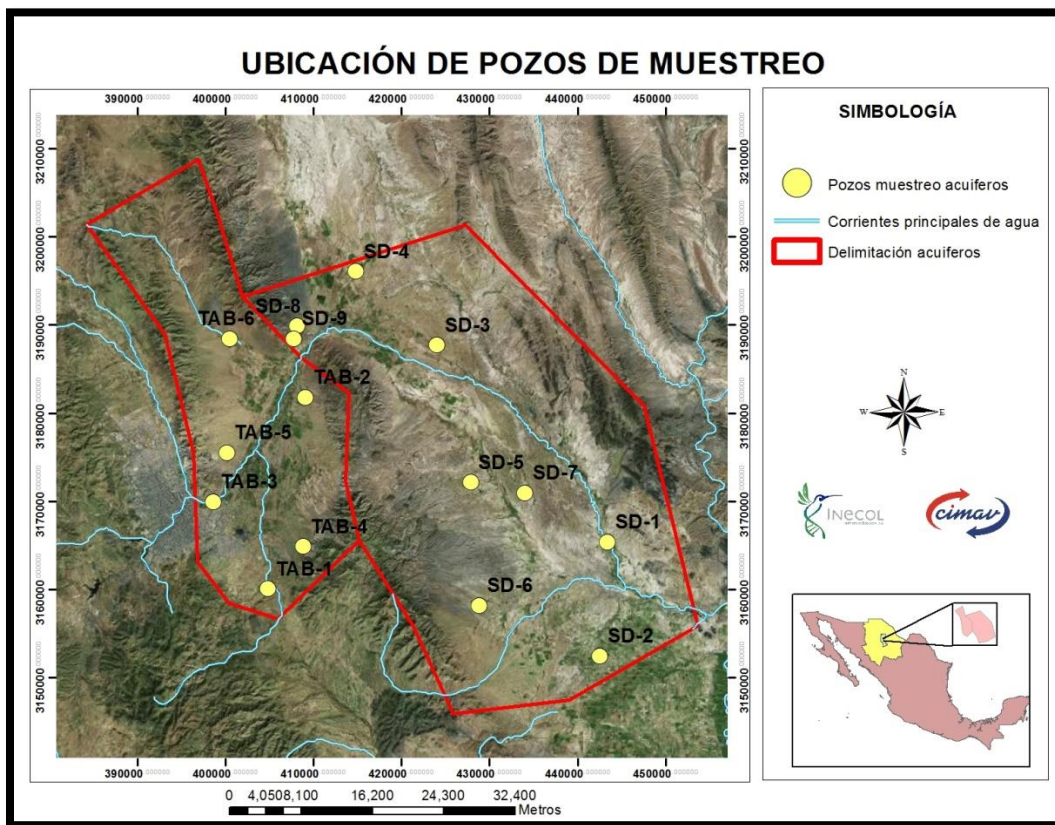
IV. METODOLOGÍA

IV.1 Determinación de la calidad del agua

IV.1.1 Área de estudio

El conjunto de pozos pertenecientes al acuífero de TAB localizado en la porción central del Estado de Chihuahua, se encuentra entre los paralelos 28° 32'30" y 29° 0' 0" de latitud norte y los meridianos 106° 10' 0" y 105° 52' 0" de longitud oeste, cubre una superficie de 728 km². El acuífero colinda al norte con el acuífero Laguna El Diablo y Laguna de Hormigas, al oriente con Aldama-San Diego, al occidente con el Acuífero Chihuahua-Sacramento, mientras que al sur colinda con el Acuífero Villalba, todos en el estado de Chihuahua (figura IV.4) (CONAGUA, 2008). Geopolíticamente el acuífero abarca parcialmente los municipios Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua (Chavez, 1993). El acuífero SD se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 25' 00" y 29° 55'0" de latitud norte y los meridianos 106° 00' 00' y 105° 28' 00" de longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 1,620 km² colinda al norte con el acuífero Laguna de Hormigas, al oriente con el acuífero Potrero El Llano, al poniente con Villalba y Tabalaopa Aldama y al sur con Meoqui Delicias, todos ellos en el estado de Chihuahua (ver figura IV.4). Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios de Aldama, Aquiles Serdán, Rosales, Chihuahua y Julimes (CONAGUA, 2008).

Figura IV.4. Ubicación de los pozos de muestreo (TAB-n pertenecen al acuífero Tabalaopa-Aldama y SD-n pertenecen al acuífero Aldama-San Diego)



El clima en el acuífero TAB comprende dos tipos: BS0hw (w), (seco semicálido con lluvias en verano), este tipo de clima presenta una temperatura media anual mayor a 18° C, con inviernos frescos (CONAGUA, 2008). El de tipo BS0kw (w), (seco templado con lluvias en verano), presenta una temperatura que varía de los 12 a los 18° C. La precipitación media anual es de 381.2 mm/año. El ciclo de lluvias empieza en el mes de julio y termina a finales del mes de septiembre. La evaporación potencial media anual registrada para las estaciones climatológicas varía de 1,893 a 2,494 mm, con un valor promedio de 2,125 mm/año. En el acuífero SD, el tipo de climas predominantes en la zona son dos tipos de climas: BWhw (w) (García, 2002), (muy seco, semicálido con lluvias en verano), se presenta en la mayor parte del acuífero y se caracteriza por registrar temperaturas medias anuales mayores de 18° C, con precipitaciones medias anuales entre 300 y 400 mm. El otro es de tipo BWkw (w), (muy seco, templado

con lluvias en verano), presenta una temperatura media anual entre 12.0° C a 18.0° C. El mes más frío registra temperaturas de -3 a 18° C, mientras que la temperatura media del mes más cálido es mayor de 18° C. La precipitación media anual es de 317.9 mm/año, el ciclo de lluvias empieza en el mes de julio y termina a fines del mes de septiembre; la evaporación potencial media anual promedio es de 2,419 mm/año (CONAGUA, 2008).

IV.1.2 Población de estudio

El elemento de muestreo es el pozo, siendo los ubicados en los acuíferos de TAB y SD. En total hay 536 pozos, información obtenida de un censo elaborado por CONAGUA (2012). Del acuífero TAB son 237 y 299 pertenecen al acuífero SD. Por consiguiente se hizo una depuración de esos censos debido a que varios de ellos se encuentran sellados, tapados, o simplemente sin acceso, por lo que se reconsideró el total de pozos para el análisis siendo finalmente 112 pozos (N=112), 47 pozos corresponden al acuífero TAB (N₁=47) y 65 al de SD (N₂= 65).

Se considerará a la población de estudio una población de tamaño finito (N=112) estratificada por acuíferos (2 estratos) de tamaños N₁=47 para el estrato 1 correspondiente al acuífero TAB y N₂=65 para el estrato 2 correspondiente al acuífero SD.

IV.1.3 Muestra estratificada

El tamaño de muestra estratificado para estimar las medias de la concentración de las características que describen la calidad del agua se determinó considerando un error relativo del 15% con un nivel de confianza del 85% por asignación proporcional con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^L N_i^2 \sigma_i^2 / \omega_i}{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 + B^2 N^2 / Z^2}$$

n: El tamaño de la muestra estratificada

N: Tamaño de la población

i=1,2, → L= número de estratos

B: Error de estimación fijado $\rightarrow B^2=r^2\mu^2$ (r =error relativo) y (μ =media poblacional)

σ^2 : Varianza de la característica más variable

W: Ponderación para determinar el tamaño de muestra aleatoria en cada estrato

Z: Se obtiene a partir del nivel de confianza bajo una distribución normal estándar

El valor asumido para la varianza fue 0.0001 de la característica a medir el arsénico (As) debido a que es el que cuenta con mayor información de estudios anteriores realizados en el acuífero de Tabalaopa-Aldama en diferentes años (estrato 1) y en el que los datos muestran mayor consistencia. Para efectos de calcular el tamaño de muestra debido a que no se cuenta con información de calidad de agua del acuífero de SD se asumirá que las varianzas son iguales en ambos estratos. El valor asumido para la media poblacional fue de 0.0162 mg/L, el valor del error relativo (r) es de 0.15, el valor de Z es de 1.44 correspondiente a un nivel de confianza de 85%, W se obtiene por asignación proporcional, la fórmula es la siguiente:

$$\omega_i = \frac{N_i}{N}$$

Por lo que el tamaño de muestra estratificado determinado fue de 27 pozos, pero por cuestiones económicas se redujo a un total de 15 pozos a muestrear, asignando 6 pozos al estrato 1 y 9 al estrato 2 (muestras aleatorias en cada estrato), de la siguiente manera $n_i=nW_i$.

Para seleccionar la muestra aleatoria de pozos en cada estrato se utilizó la lista proporcionada por CONAGUA donde se identifican los pozos del 1 al N_i . Para seleccionar los pozos se generó una muestra aleatoria de tamaño n_i en el Minitab16 asumiendo una distribución uniforme de números enteros la cual asigna la misma probabilidad de ocurrencia de cada pozo en la muestra.

IV.1.4 Desarrollo del plan de muestreo

El estudio se realizó aproximadamente en el lapso de tiempo de un año, ajustando los muestreos a las estaciones del clima que son primavera, verano y otoño. El primer muestreo fue el 6 y 8 de mayo 2015 (primavera), el segundo el 7 y

8 de julio del 2015 (verano), continuando el 27 y 31 de agosto del 2015 (verano) por cuestiones de inaccesibilidad debido a las lluvias se tuvo que postergar y el tercer muestreo el 16 y 21 de octubre del 2015 (otoño). En cada muestreo que empezaba a las 10:30 am y terminaba a las 17:30 pm, se recolectaban las 15 muestras de agua y se realizaban análisis *in situ* de pH, conductividad eléctrica (C.E.), Potencial Oxido Reducción (P.O.R.), salinidad, Sólidos Disueltos Totales (SDT), temperatura del agua y el ambiente. Las fechas de muestreo se decidieron con el fin de observar la influencia estacional del periodo de lluvia sobre el comportamiento hidrológico de los acuíferos en cuanto a la presencia y distribución de contaminantes.

La elección de los 15 pozos fue aleatoriamente del conjunto de pozos de los acuíferos de TAB y SD, que por cuestiones de presupuesto se tuvo que limitar ese tamaño de muestra, y por cuestiones de dificultades en campo se tuvieron que reubicar la mayoría de los pozos ubicados anteriormente con la metodología de CONAGUA mediante un mallado triangular, con aristas de 6 km por lado y buffer de 2 km de radio, tratando de abarcar toda el área de estudio (ver figura IV.4). Se usó GPS de la marca GARMIN modelo GPSmap76 para la ubicación de los mismos.

Para la toma de muestras de agua de pozo y la determinación de todas las variables primarias se tomaron 1 L para el primer muestreo y 2 L para el segundo y tercer muestreo en un envase de polietileno o polipropileno, cerrado herméticamente. Todas las muestras se refrigeraron a 4°C hasta su análisis.

IV.1.5 Determinación analítica de las variables (parámetros de calidad de agua)

Las variables primarias medidas fueron: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^{1+}), potasio (K^{1+}), nitrógeno de nitrato (N-NO_3^{1-}), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^{1-}), fluoruros (F^{1-}), arsénico (As), aluminio (Al), cadmio (Cd), fósforo (P), sílice (Si), también se analizarán la dureza (como CaCO_3), alcalinidad, pH, Total de Sólidos Disueltos (T.S.D.) y Sólidos Totales (ST).

Los cationes, metales y metaloides medidos en las muestras fueron: Ca^+ , Mg^+ , K^+ , Na^+ , P, As, Si, Al, Cd una vez que fueron previamente digeridas siguiendo

los lineamientos de la EPA método 3015 utilizando un digestor de la marca CEM, modelo MARS 5 para el primer muestreo y el método en parrilla para el segundo y tercer muestreo. El método para la determinación de metales fue mediante espectrometría de emisión plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) cuyo principio es determinar de forma cuantitativa la mayoría de los elementos de la tabla periódica a niveles de traza y ultra traza, partiendo de muestras en disolución acuosa. La marca del aparato es Thermo Scientific modelo iCAP 6500 SERIES ICP Spectrometer.

Para la determinación de NO_3^- se consideró el método de reducción con cadmio cuperizado, usando el método 8171 de HACH, que consiste en que el NO_3^- siempre se reduce cuantitativamente a Nitrito (NO_2^-) en presencia de Cadmio. Para el ion SO_4^- se usará el método 8051 que va de los 0 a los 70 mg/L este método es equivalente al de la USEPA método 375.4. Para ambos iones NO_3^- y SO_4^- se utilizará un espectrofotómetro de la marca HACH, modelo DR2010.

Los fluoruros fueron determinados usando un electrodo de ion selectivo. El equipo usado fue un medidor de parámetros múltiples marca Orion modelo 1260. Todo siguiendo los lineamientos de la NMX-AA-077-SCFI-2001. Según la NMX-AA-034-SCFI-2001 se realizó la cuantificación de los sólidos y sales disueltas para la determinación de TSD y ST.

Los métodos volumétricos de titulación fueron usados para la determinación de cloruros, dureza y alcalinidad, siguiendo los lineamientos de las siguientes normas correspondiendo cada una en el orden anterior NMX-AA-073-SCFI-2001, NMX-AA-072-SCFI-2001 y NMX-AA-036-SCFI-2001.

Según la NMX-AA-008-SCFI-2011 para la medición de pH se requiere el uso de un termómetro con una resolución de 0.5 °C; un potenciómetro con una impedancia de entrada superior a 1012 Ω .

De las 15 muestras a dos del acuífero TAB y dos del SD se les hizo por duplicado cada análisis. Así como también se realizaron los estándares necesarios para la aseguración del buen funcionamiento de los equipos y las valoraciones correspondientes a los titulantes.

IV.2 Identificación de las actividades antropogénicas

Para la realización de la variable secundaria que corresponde a identificar las actividades antropogénicas y poder relacionarlo con la calidad del agua, se usó la cobertura vectorial de INEGI 2012 (escala 1:50,000) la cual nos establece el tipo de uso de suelo que se le da a la zona donde se ubican los pozos, así como lo observado en campo nos brinda la información necesaria para poder encontrar relaciones con las variables primarias y la estacionalidad de las mismas, para tratar de establecer el origen de ciertos problemas relacionados con la calidad del agua, particularmente con compuestos como los nitratos. Para la realización de la caracterización del uso de suelo se usó el programa ArcGis.

El tipo de uso de suelo que tiene la cobertura vectorial de INEGI 2012 que corresponde con el pozo muestreado y también lo observado en campo se puede ver en la tabla IV.4. Como se puede apreciar en algunos casos no coincide lo observado en campo con la capa de INEGI. Para efectos de este trabajo se utilizó lo observado en campo que se dividió en dos grupos Doméstico y Agrícola, que en el acuífero TAB predomina el tipo Doméstico y en el acuífero SD el Agrícola.

Tabla IV.4. Comparativa del uso de suelo con lo observado en campo

POZO	USV INEGI 2012	OBSERVACIONES EN CAMPO
TAB-1-EMYCSA	Agricultura de Riego	Doméstico
TAB-2 RANCHO LARGO	Matorral Desértico Micrófilo	Doméstico
TAB-3 COL. ROBINSON	Área Urbana	Doméstico
TAB-4 CERCA PENITENCIARIA	Matorral Desértico Micrófilo	Doméstico
TAB-5 ASOCIACIÓN CIVIL	Área Urbana	Doméstico
TAB-6 MIMBRES	Pastizal Natural	Agrícola
SD-1 RANCHO EL COYOTE	Agricultura de Riego	Agrícola
SD-2 NORIA OSCAR ORTIZ	Agricultura de Riego	Agrícola
SD-3 CERCA ANTIGUO INECOL	Matorral Desértico Micrófilo	Agrícola
SD-4 RANCHO MIGUEL SAAVEDRA	Agricultura de Riego	Agrícola
SD-5 RANCHO DE MARCELINO	Matorral Desértico Micrófilo	Agrícola
SD-6 RANCHO SANTA ELENA	Matorral Desértico Micrófilo	Agrícola

SD-7 RANCHO LOS NOGALES	Matorral Desértico Micrófilo	Agrícola
SD-8 BALNEARIO LOS MECHO	Agricultura de Riego	Doméstico
SD-9 ORFANATO LOS LIRIOS	Agricultura de Riego	Doméstico

IV.3 Balance iónico

Se realizó el cálculo del balance iónico por estaciones. Lo que nos da información valiosa del tipo de agua que resulta así como si el análisis en laboratorio se realizó correctamente por el error calculado obtenido. Para la realización de los diagramas de Piper se utilizó el programa Diagrammes v 6.5.

La fórmula utilizada para el cálculo del error fue la siguiente:

$$\left| \frac{\text{suma de cationes}(\text{meq/L}) - \text{suma de aniones}(\text{meq/L})}{\text{suma de cationes}(\text{meq/L}) + \text{suma de aniones}(\text{meq/L})} * 100 \right|$$

IV.4 Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo para las variables primarias con medias poblacionales, por acuífero y estacionales (ponderadamente). También se hicieron pruebas de normalidad con el algoritmo Anderson-Darling para los datos de las variables con el fin de revisar el cumplimiento del supuesto de normalidad. Para el caso de las variables que no cumplieron con este supuesto se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para probar el efecto del factor de interés. Las estimaciones del error estándar, intervalos de confianza y pruebas de hipótesis de las medias con respecto a un valor hipotetizado dado por la NOM-127-SSA-1994, Ley Federal de Derechos del agua en materia de aguas nacionales (uso agrícola) y la normativa internacional (EPA), en el caso de valores donde no aplica la prueba de hipótesis se maneja un intervalo. Así mismo utilizándose pruebas de hipótesis para encontrar si hubo o no diferencia entre acuíferos y estaciones. Para las pruebas de hipótesis se utilizó la prueba t-Student (Snedecor & Cochran, 1984).



Se hizo un análisis de correlación el cual indica sí existe correlación entre variables lo que conlleva hacer la evaluación mediante la técnica de análisis multivariado, análisis de componentes principales, del conjunto de variables primarias, para observar tendencias de agrupación o disgregación entre pozos y también por estaciones (Steel & Torrie, 1980).

Para información del tipo de agua por la variable dureza, así como por los tipos de agua obtenidos del balance iónico se realizó un análisis de probabilidad de condicionantes, dando a conocer tendencias generales del tipo de agua, sustentando lo presentado con los diagramas de Piper.

Para la realización del análisis estadístico se utilizó el paquete estadístico Minitab16.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados de las determinaciones analíticas de los diferentes muestreos realizados, se tiene que las variables F^- , As, Cd, Na^+ , Al, SO_4^- , presentan valores extremos que rebasan los límites permisibles para el uso de consumo humano (NOM 127, como a nivel internacional EPA) (Tabla V.5); también presentaron valores extremos: $N-NO_3^-$, Zn^+ y Mg^+ las dos primeras variables no rebasan normatividades y el Mg^+ no tiene Límite Máximo recomendable en el caso del uso para consumo humano, o agrícola Permisible (LMP).

Los valores extremos fueron eliminados para su análisis estadístico (Tabla V.6), esto con el fin de tener la mayor representatividad del comportamiento de los acuíferos y la estacionalidad, puesto que la inclusión de los mismos puede influir de manera directa en los valores obtenidos. Corresponden en su mayoría a pozos del acuífero Aldama-San Diego (SD), siendo SD-2, SD-3, SD-5, SD-7, SD-8 y SD-9 los primeros cuatro de uso agrícola, los últimos dos el primero es un balneario en Cd. Aldama y el segundo abastece de agua a un orfanato cerca de Cd. Aldama el cual ya cuenta con un filtro (ósmosis inversa) para minimizar el contenido de contaminantes. Se encontró As en SD-3, SD-5 y SD-9; Al sólo en SD-5; F^- y Mg^+ en SD-8; Fe en SD-3 y SD-7; Na^+ y SO_4^- en SD-2 y SD-8. Sin embargo en el acuífero Tabalaopa-Aldama (TAB) sólo en TAB-3 y TAB-5 presentan valores extremos (se encontró Zn^+ en el acuífero TAB-3; $N-NO_3^-$ y Cd en TAB-5) el primero corresponde a agua de consumo humano, ubicado en la colonia Robinson de Cd. Chihuahua y el segundo a una asociación civil que abastece a otra colonia de la misma ciudad.

Tabla V.5. Comparación de valores máximos permisibles según el uso del agua y la normatividad internacional

Variables comparativas	NOM-127-SSA-1994 (CH, mg/L)	Ley Federal De Derechos en Materia de Aguas Nacionales (UA, mg/L)	
		EPA/USEPA (CH, mg/L)	
Fluoruros	1.5	4	2
Arsénico	0.025	0.01	
Cadmio	0.005	0.005	
Nitrógeno de nitratos	10	10	



Variación estacional de la calidad del agua acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Aldama-San Diego

pH min	6.5	6	6.5
pH máx	8.5	9	8.5
T.S.D.	1000	*500	500
Sulfatos	400	250	250
Cloruros	250		250
Zinc	5	2	5
Aluminio	0.2	5	0.05-0.2
Cobre	2	0.2	1
Fierro	0.3	5	0.3
Sodio	200		
Dureza total (CaCO₃)	500		

Nota:

CH Consumo Humano

UA Uso Agrícola

 Estándar primario EPA/USEPA.

 Estándar secundario EPA/USEPA.

* Cultivos sensibles 500-1000 mg/L; cultivos con manejo especial 1000-2000 mg/L; cultivos tolerantes en suelos permeables 2000-5000 mg/L; para frutas sensibles Ley Federal de Derechos. De 26 disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2014.

Tabla V.6. Valores extremos eliminados para el análisis estadístico, y que rebasan los límites de Consumo humano NOM-127-SSA-1994 y la EPA (estándar secundario).

Variable	Valor extremo	mg/L
F⁻	SD-8 VER	4.45
	SD-8 OTN	4.61
As	SD-3 VER	0.043
	SD-3 OTN	0.033
	SD-5 PRIM	0.073
	SD-5 VER	0.226
	SD-5 OTN	0.174
	SD-9 VER	0.038
	SD-9 OTN	0.027
	Cd	TAB-5 PRIM
SD-5 PRIM		0.009
Na⁺	SD-2 PRIM	316.12
	SD-5 PRIM	264.12
	SD-5 VER	377.21
Al	SD-5 VER	0.139
	SD-2 PRIM	600
	SD-5 PRIM	647
	SD-5 VER	586
	SD-5 OTN	462
SO₄⁻	SD-3 VER	1.08
	SD-3 OTN	0.32
	SD-7 VER	0.31

N-NO₃⁻	TAB-5 OTN	5.53
Zn⁺	TAB-3 VER	0.38
Mg⁺	SD-8 VER	70.75

En apéndice X.4 se muestran las pruebas de normalidad para las variables con resultados notables. La única variable que no cumplió con este supuesto fue Si donde claramente se observa la ocurrencia del efecto de la estacionalidad sobre la distribución de los datos, efecto que probablemente no permitió el supuesto de normalidad en el muestreo. Sin embargo, el resultado de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis coincidió con el resultado de la prueba paramétrica t-Student, indicando que la falta de normalidad no influyó sobre el resultado de la prueba.

V.1 Calidad del agua

En general la media poblacional de la concentración de fluoruro fue de 2.13 ± 0.005 mg/L con un mínimo de 2.12 y un máximo de 2.14 (tabla V.7) lo cual excede el valor límite establecido para consumo humano de la NOM-127-SSA-1994 que es de 1.5 mg/L ($P < 0.001$), rebasando también el límite establecido para uso de suelo agrícola de la Ley Federal de Derechos en materia de aguas nacionales el cual es de 1 mg/L ($P < 0.001$), y sobrepasa el valor límite establecido por estándares secundarios (estéticos y organolépticos) de la calidad de agua de consumo de la EPA que es de 2 mg/L ($P < 0.001$).

El 50% de los valores rebasan el límite máximo permisible (1.5 mg/L) recomendado en México y a nivel mundial para consumo humano. Para los estándares primarios de calidad del agua de consumo humano establecido por la EPA, sólo dos valores rebasan su límite (4 mg/L), estos valores corresponden a las muestras del pozo SD-8 en el verano y otoño, el cual se encuentra en la Cd. de Aldama siendo un balneario.

V.1.1 Posible origen del fluoruro en la zona

El enriquecimiento del F⁻ en agua subterránea se relaciona generalmente a la disolución de fluorita (CaF₂) (Alarcón-Herrera, et al., 2013) y criolita (Na₃AlF₆)

que al pasar el agua subterránea por rocas constituidas por estos compuestos, los disuelve e incorpora. La concentración de fluoruros, por ende variará según el lugar, por ejemplo, el agua de mar suele contener 1mg/L de fluoruro, el agua de pozos es muy variable, dependiendo en gran medida de la composición geológica (0 hasta 50 mg/L) y las aguas superficiales los contienen en menor proporción (Duran, 1980). Cada vez más estudios encuentran que el contenido de F en vidrio volcánico (riolitas y tobas) es muy alto y una fuente importante de concentraciones anómalas de F en agua.

V.1.2 Efectos del fluoruro en la salud de la población expuesta

Elevadas concentraciones de fluoruros en agua ocasiona fluorosis dental ésta se produce sólo si la ingesta se lleva a cabo por la madre durante el periodo de gestación y del bebe y niño hasta las 12 años de edad promedio. Etapa de vida que corresponde al período de calcificación de los dientes. Si el niño es expuesto después de los 10-12 años de edad, no se produce la fluorosis dental, ni se altera la estructura del esmalte, cualquiera que sea la cantidad de ingestión de fluoruros. Una vez que se forman dichas lesiones del esmalte no pueden corregirse, ya que no existe un tratamiento médico o dieta que las elimine. El fluoruro parece ser el único agente causante de la fluorosis dental (Duran, 1980). Hay un punto óptimo, alrededor de una concentración de F^- de 0.7 mg/L, en el cual la aparición de fluorosis es mínima con la máxima reducción en caries dental (Duran, 1980). A niveles de concentración inferiores a 1 mg de F^- /L, se llegan a registrar algunos beneficios, pero no es tan apreciable la reducción significativa en la caries dental y principalmente si decrece la concentración. También se puede presentar fluorosis esquelética si un individuo ingiere fluoruro a razón de 20 mg/d en un período de 20 años o más; ésta dosis correspondería a un agua con una concentración de 10 mg/L y un consumo de 2 L/d (AWWA, 1990). De 34 pozos analizados en la región que el investigador llama Tabalaopa-Aldama Dolores y El Cuervo, se observa que cerca de la ciudad de Aldama 13 pozos rebasaron la norma, coincidiendo con lo reportado en otros estudios realizados en la región (Reyes-Gómez, et al., 2013).

Otro estudio realizado demostró efectos en la reproducción masculina humana por causas del fluoruro. Teniendo una población expuesta al fluoruro en dosis de 3-27 mg / día (población expuesta a altas concentraciones). Los resultados se compararon con un grupo de individuos expuestos al fluoruro en dosis más bajas: 2-13 mg / día (población expuesta a baja concentración). Midieron niveles urinarios de fluoruro, parámetros del semen y las hormonas reproductivas en sangre (LH, FSH, estradiol, prolactina, inhibidora-B, testosterona libre y total). Mostrando un aumento significativo de la FSH ($P < 0.05$) y una reducción de la inhibidora-B, testosterona libre y la prolactina en suero ($P < 0.05$) en la población expuesta a altas concentraciones. No se encontraron anomalías de los parámetros seminales estudiados en ese estudio en ninguna de las dos poblaciones. Los resultados obtenidos indican que una exposición al fluoruro de 3-27 mg / día induce a un efecto subclínico en la reproducción masculina que puede explicarse por un efecto tóxico de fluoruro en las células de Sertoli y en las células gonadotrofas (Ortiz-Pérez, et al., 2003).

El arsénico también rebasó el límite establecido por la EPA para consumo humano (tabla V.7) ($P < 0.001$). Siete valores rebasan el límite máximo recomendable en la normatividad mexicana, y 10 el valor recomendado por la EPA y la OMS (0.010 mg/L). El 50% de los datos oscilan entre 0.008 y 0.02 mg/L. Se estima que la media poblacional para el arsénico es menor ($P < 0.99$) al valor de la NOM-127 con una estimación puntual de 0.0148 ± 0.00003 y un valor mínimo esperado de 0.0147 y máximo de 0.0148 a un 95% de confianza (tabla V.7).

Tabla V.7. Medias poblacionales por variable comparadas con normatividades

VARIABLE	$\hat{\mu} \pm \widehat{\text{EE}}(\hat{\mu})$	$[i, j]$	\widehat{LEE}	P (CH)	P (UA)	P (EPA)	P (EPA 2)
Fluoruros	2.13±0.005	2.12 , 2.14	0.01	P<0.001	P<0.001	P<0.99	P<0.001
Arsénico	0.0148±0.00003	0.01473 , 0.01485	0.00006	P<0.99	P<0.99	P<0.001	---
Cadmio	0.0036±0.00001	0.00357, 0.00364	0.00003	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Nitrógeno de nitratos	1.03±0.004	1.02 , 1.04	0.009	P<0.99	NA	P<0.99	---
Total de Sólidos D.	408.43±0.81	406.68 , 410.18	1.75	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sulfatos	171.29±0.54	170.14 , 172.46	1.17	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cloruros	30.45±0.10	30.23 , 30.67	0.22	P<0.99	NA	P<0.99	---
Zinc	0.0484±0.0001	0.0481 , 0.0487	0.0003	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Aluminio	0.036±0.00007	0.0358 , 0.0361	0.0001	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cobre	0.0166±0.00007	0.0165 , 0.0168	0.0002	P<0.99	P<0.99	P<0.99	P<0.99
Fierro	0.0902±0.0003	0.0894 , 0.0909	0.0007	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sodio	77.55±0.15	77.23 , 77.87	0.32	P<0.99	NA	NA	---
Dureza total	168.33±0.39	167.50 , 169.17	0.83	P<0.99	NA	NA	---
pH	7.61±0.001	7.607 , 7.611	0.002	NA	NA	NA	---
Salinidad	0.407±0.0008	0.405 , 0.409	0.002	NA	NA	NA	---
Silicio	11.49±0.009	11.47 , 11.51	0.02	NA	NA	NA	---
Alcalinidad	248.11±0.28	247.51 , 248.70	0.60	NA	NA	NA	---
Conductividad E.	814.98±1.63	811.47 , 818.50	3.51	NA	NA	NA	---
Fosforo	0.103±0.0003	0.102 , 0.104	0.0007	NA	NA	NA	---
Temp. agua	26.72±0.01	26.70 , 26.75	0.02	NA	NA	NA	---
Temp. ambiente	33.14±0.02	33.11 , 33.18	0.03	NA	NA	NA	---
Sólidos Totales	539.07±1.21	536.45 , 541.69	2.62	NA	NA	NA	---
Potasio	2.43±0.003	2.427 , 2.441	0.007	NA	NA	NA	---
Magnesio	7.53±0.02	7.49 , 7.57	0.04	NA	NA	NA	---
Calcio	52.44±0.10	52.23 , 52.66	0.22	NA	NA	NA	---
Potencial Óxido R.	152.32±0.35	151.55 , 153.08	0.77	NA	NA	NA	---

Nota:

CH: Límite máximo permisible para Uso Consuntivo establecido en la NOM-127-SSA-1994

UA: Límite máximo permisible para Uso Agrícola establecido por la Ley Federal de Derechos

EPA: Límite máximo permisible de los estándares primarios de calidad de agua, en USA.

EPA 2: Límite máximo permisible de los estándares secundarios de calidad de agua, en USA.

V.1.3 Posible origen del metaloide

Otros estudios realizados en Chihuahua abordan el posible origen de la presencia de As y presentan valores de su contenido en aguas de algunos acuíferos de la región, así como en rocas y sedimentos de los embalses principales de Chihuahua. En la región de Meoqui-Delicias, Espino-Valdés *et al.* (2009) propone que el As presente en el agua de consumo es de origen natural, proveniente de las arsenopiritas de las sierras circundantes. En el Valle de la Sierra del Cuervo, el estudio preliminar de Reyes-Cortés (1997), menciona que el As presente en las aguas subterráneas del valle del Cuervo, seguramente proviene del aluvión constituido de láminas de arcillas. En los valles de Tabalaopa, Aldama y El Cuervo, existe información parcial (Gutiérrez, *et al.*, 2009), que sugiere que el As del agua de los pozos puede provenir de aportes de residuos de centros urbanos e industriales, sobre todo en la boquilla de Aldama, o de los sedimentos depositados en el cauce del río Chuvíscar donde se mezclan las aguas provenientes de Aldama con las de la zona urbana de Chihuahua. A la fecha, las sugerencias sobre un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico del sistema han sido presentadas por Osuna (1991) y Chávez (1993) quienes proponen un esquema hipotético para el valle de Tabalaopa y Aldama, pero enfocado a la explotación racional del acuífero para evitar abatimientos del mismo. Se carece de un modelo que incluya el funcionamiento hidrogeoquímico de los acuíferos que están interconectados y cubren todo el valle de Tabalaopa- Aldama-El Cuervo. Reyes- Gómez *et al.* (2013) muestran que el componente geológico de la zona, compuesto de rocas riolíticas de sierras y pies de monte, posee el mayor contenido de arsénico; seguido de los sedimentos y suelos de los pies de monte y valles circundantes a los cauces principales. En el agua de pozos de las zonas central y sur del Valle, los análisis revelaron nueve pozos con niveles de concentración por encima de 0.025 mg As/L y nueve pozos entre 0.021 y 0.025 mg As/L valores superiores o muy próximos al límite recomendable para consumo humano (NOM-127), indicando una posible distribución ligada al patrón de flujos del acuífero, a la presencia del elemento en

las zonas líticas y sedimentos de tipo riolíticos del paisaje y al comportamiento hidro-térmico del acuífero en la zona sur de la región.

Cabe señalarse un importante estudio (Gutiérrez , et al., 2008) realizado en la cuenca media del río Conchos el cual consistió en hacer una caracterización geoquímica de esa zona donde se analizó la presencia de sales (Ca^+ y Na^+) y metaloides tóxicos (As y Sb). Determinados en el contenido de muestras de aguas superficiales y de sedimentos. Realizaron análisis de correlación entre las sales, metaloides y elementos asociados, y su distribución espacial para mostrar la relación entre ellos, de la geología y la hidrología y con otros factores potenciales que afectan su distribución. Esto ayudó a determinar las fuentes, las cuales incluyen la minería, afloramientos de rocas, centros urbanos, descarga de aguas residuales, escurrimientos agrícolas. La salinidad del río Conchos alcanzó un nivel crítico después de recibir aguas contaminadas de su tributario el río Chuvíscar y los retornos de drenajes de irrigación del Distrito 005, pero aguas abajo más retiradas de ese foco de contaminación la calidad mejoró cuando se mezcló con aguas ricas en Ca^+ , reduciendo significativamente las concentraciones de Na^+ . Basado en su distribución espacial, el contenido de As en material aluvial fue asociado con la presencia de minas de Ag-Pb y en menor grado a ignimbritas del Oligoceno. La correlación de As con Sb, Cu, y Bi sugiere que las fuentes naturales son la contribución dominante de As en el agua. Sin embargo concentraciones por encima del nivel permisible para agua de consumo fueron encontradas en muestras de agua de río en los pocos lugares donde las aguas residuales estaban presentes también, sugiriendo adicionalmente otra fuente importante de As, el factor antropogénico (Gutiérrez , et al., 2008).

V.1.4 Efectos del arsénico inorgánico en la salud de la población expuesta

El As es dañino para la salud ya que siendo un químico inorgánico puede ocasionar daños en la piel, o problemas en el sistema circulatorio, y pudiera incrementar el riesgo de padecimientos de cáncer, de las fuentes comunes de abastecimiento se tiene que es por depósitos naturales de la erosión y el

escurrimientos natural, escurrimientos de huertos, y escurrimientos de las producciones del vidrio y desperdicios electrónicos (EPA, 2009).

En el estado de Chihuahua, se han detectado diferentes zonas donde el agua de pozos y norias de consumo humano supera esos niveles de As; por ejemplo, el estudio de (Ochoa Reyes, et al., 2009) permitió poner en evidencia los daños tóxicos severos que se presentaron en los habitantes de la comunidad La Casita (a 60 km de la ciudad de Chihuahua), a causa de la ingesta de aguas altamente contaminadas con As (7-11 mg/L), provenientes del pozo principal de consumo de la comunidad. En el caso del acuífero de Tabalaopa-Aldama, se encontró un pozo con niveles muy cercanos a los límites de la Norma ($=0.027$ mg/L As), ubicado en un albergue de niños, pero desde hace más de 10 años, cuenta con un filtro de osmosis inversa, con lo que asegura una fuente de agua limpia para consumo humano en el albergue (Reyes-Gómez et al., 2013).

Se estima que las medias poblacionales para los demás parámetros analizados no rebasan ($P<0.99$) a los valores de la normatividad mexicana para consumo humano y utilización del agua de riego. La media poblacional de pH tampoco rebasa los límites de las mismas, el límite inferior fue de 7.607 y el superior de 7.611 (tabla V.7).

V.2 Calidad del agua por acuífero

En cuanto a la calidad del agua por acuífero se observa que en el acuífero Tabalaopa-Aldama (TAB) solamente el fluoruro excede los valores recomendados para riego de acuerdo a lo establecido en la Ley Federal de Derechos de calidad del agua para uso agrícola (1mg/L) con 1.87 ± 0.40 ($P<0.04$) (tabla V.8).

El acuífero Aldama-San Diego (SD) el fluoruro también excede el valor recomendado de calidad de agua de uso potable ($P<0.02$) y la calidad de agua de uso agrícola ($P<0.002$) con una media de 2.32 ± 0.3 mg/L (tabla V.8). El arsénico en el acuífero SD rebasa el límite del estándar primario de la EPA ($P<0.008$) con una media de 0.02 ± 0.003 mg/L (tabla V.8).

Se observa que entre acuíferos no existe diferencia significativa (tabla V.9) en la mayoría de las variables lo que indica que son similares en su

comportamiento y composición. En contraste, se encontró diferencia significativa en las variables de contenido de As ($P < 0.003$), $N-NO_3^-$ ($P < 0.004$) y en dureza total ($P < 0.04$) siendo más altos los valores de la media de $N-NO_3^-$ y dureza total en el acuífero Tabalaopa-Aldama, y para el caso de la concentración de As la media resulta ser mayor para el acuífero Aldama-San Diego, ello sin rebasar lo establecido como valores de referencia para los usos de consumo y riego agrícola.

Para el caso del contenido de $N-NO_3^-$ se puede observar que posiblemente la cercanía a la ciudad está influyendo en la diferencia entre la calidad del agua de ambos acuíferos, puesto que se encontró más presente este compuesto en el acuífero Tabalaopa, el cual está más cercano a la ciudad, lo que pudiera deberse a descargas de agua residual o en su defecto a que los alrededores de la ciudad se desarrolla la actividad agrícola. En cuanto al As no se puede decir lo mismo puesto que el acuífero SD está menos antropizado (figura II.1), probablemente tiene que ver con el origen de los depósitos naturales por erosión, es decir un origen geogénico.



Tabla V.8. Medias por acuífero, comparadas con normatividades

VARIABLE	Acuífero Tabalaopa-Aldama							Acuífero Aldama-San Diego						
	$\bar{\mu} \pm \widehat{EE}(\bar{\mu})$	[i, j]	\widehat{LEE}	P (CH)	P (UA)	P (EPA)	P (EPA 2)	$\bar{\mu} \pm \widehat{EE}(\bar{\mu})$	[i, j]	\widehat{LEE}	P (CH)	P (UA)	P (EPA)	P (EPA 2)
Fluoruros	1.87±0.40	0.83 , 2.91	1.04	P<0.2	P<0.04	P<0.99	P<0.61	2.32±0.33	1.54 , 3.09	0.77	P<0.02	P<0.002	P<0.99	P<0.19
Arsénico	0.007±0.001	0.004 , 0.010	0.0031	P<0.99	P<0.99	P<0.97	---	0.02±0.003	0.013 , 0.028	0.008	P<0.90	P<0.99	P<0.008	---
Cadmio	0.003±0.002	(-)0.004 , 0.011	0.008	P<0.78	P<0.99	P<0.78	---	0.004±0.001	0.00003 , 0.00757	0.0038	P<0.79	P<0.99	P<0.79	---
Nitrógeno de nitratos	1.79±0.42	0.69 , 2.88	1.09	P<0.99	NA	P<0.99	---	0.48±0.13	0.17 , 0.78	0.31	P<0.99	NA	P<0.99	---
Total de Sólidos D.	357.3±51.06	226.04 , 488.56	131.26	P<0.99	P<0.98	P<0.98	---	445.4±75.22	271.94 , 618.86	173.46	P<0.99	P<0.76	P<0.76	---
Sulfatos	147.5±43.13	36.63 , 258.37	110.87	P<0.99	P<0.97	P<0.97	---	188.5±44.75	82.68 , 294.32	105.82	P<0.99	P<0.89	P<0.89	---
Cloruros	29.67±8.18	8.64 , 50.70	21.03	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---	31.02±7.96	12.67 , 49.37	18.35	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Zinc	0.054±0.014	0.017 , 0.090	0.037	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---	0.045±0.006	0.029 , 0.060	0.016	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Aluminio	0.043±0.004	0.033 , 0.053	0.010	P<0.99	P<0.99	P<0.93	---	0.031±0.007	0.015 , 0.047	0.016	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cobre	0.015±0.006	(-)0.0006 , 0.0310	0.0158	P<0.99	P<0.99	P<0.99	P<0.99	0.018±0.005	0.005 , 0.031	0.013	P<0.99	P<0.99	P<0.99	P<0.99
Fierro	0.08±0.03	0.01 , 0.15	0.07	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---	0.097±0.031	0.022 , 0.173	0.076	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sodio	59.37±6.31	43.15 , 75.59	16.22	P<0.99	NA	NA	---	90.7±16.30	52.14 , 129.25	38.55	P<0.99	NA	NA	---
Dureza total	217.2±41.0	111.79 , 322.61	105.41	P<0.99	NA	NA	---	133±13.93	100.88 , 165.12	32.12	P<0.99	NA	NA	---
pH	7.46±0.07	7.28 , 7.63	0.18	NA	NA	NA	---	7.72±0.10	7.50 , 7.94	0.22	NA	NA	NA	---
Salinidad	0.35±0.05	0.23 , 0.47	0.12	NA	NA	NA	---	0.45±0.08	0.26 , 0.63	0.19	NA	NA	NA	---
Silicio	10.33±0.42	9.25 , 11.41	1.08	NA	NA	NA	---	12.33±0.93	10.19 , 14.47	2.14	NA	NA	NA	---
Alcalinidad	243±22.45	185.29 , 300.70	57.70	NA	NA	NA	---	251.8±21.41	202.42 , 301.17	49.38	NA	NA	NA	---
Conductividad E.	714±102.69	450.03 , 977.97	263.97	NA	NA	NA	---	888±150.56	540.80 , 1235.20	347.20	NA	NA	NA	---
Fosforo	0.096±0.020	0.044 , 0.148	0.052	NA	NA	NA	---	0.108±0.031	0.035 , 0.181	0.073	NA	NA	NA	---
Temp. agua	27.19±1.18	24.16 , 30.22	3.03	NA	NA	NA	---	26.38±0.47	25.30 , 27.46	1.08	NA	NA	NA	---
Temp. ambiente	32±1.66	27.74 , 36.26	4.26	NA	NA	NA	---	33.97±0.70	32.36 , 35.58	1.61	NA	NA	NA	---
Sólidos Totales	479.7±73.44	290.91 , 668.49	188.79	NA	NA	NA	---	582±114.53	317.90 , 846.10	264.10	NA	NA	NA	---
Potasio	2.6±0.25	1.95 , 3.25	0.65	NA	NA	NA	---	2.31±0.26	1.72 , 2.90	0.59	NA	NA	NA	---
Magnesio	9.48±1.85	4.72 , 14.23	4.75	NA	NA	NA	---	6.12±1.12	3.54 , 8.70	2.58	NA	NA	NA	---
Calcio	60.5±9.90	35.04 , 85.96	25.46	NA	NA	NA	---	46.62±5.26	34.49 , 58.75	12.13	NA	NA	NA	---
Potencial Óxido R	169.1±39.17	68.41 , 269.79	100.69	NA	NA	NA	---	140.18±6.84	124.41 , 155.94	15.77	NA	NA	NA	---

Tabla V. 9. Diferencias de las medias poblacionales por acuífero del presente estudio.

Variable	A ₁ -A ₂	$\overline{EE}(A_1 - A_2)$	P
F ⁻	-0.44	0.53	P<0.41
As	-0.013	0.004	P<0.003
Na ⁺	-31.33	19.74	P<0.14
N-NO ₃ ⁻	1.31	0.38	P<0.004
pH	-0.26	0.13	P<0.07
T.S.D.	-88.1	102.14	P<0.40
P	-0.012	0.040	P<0.77
SO ₄ ⁻	-41	63.85	P<0.53
Dureza total	84.2	37.06	P<0.04
Cd	-0.0005	0.002	P<0.84
C.E.	-174	204.61	P<0.41
Fe	-0.017	0.041	P<0.69
Temp. Agua	0.81	1.11	P<0.48
Temp. Amb	-1.97	1.58	P<0.23
Salinidad	-0.10	0.11	P<0.38
Alcalinidad	-8.8	32.1	P<0.79
Cl ⁻	-1.35	11.87	P<0.91
Cu	-0.002	0.008	P<0.77
Al	0.012	0.009	P<0.19
Zn ⁺	0.009	0.016	P<0.57
S.T.	-102.3	154.2	P<0.52
K ⁺	0.29	0.38	P<0.46
Mg ⁺	3.36	2.03	P<0.12
Ca ⁺	13.88	10.27	P<0.20
P.O.R.	28.92	32.42	P<0.39
Si	-2	1.2	P<0.12

Nota:

A₁: Acuífero TAB

A₂: Acuífero SD

\overline{EE} : Error estándar

V.3 Calidad del agua por estación del año

A escala estacional de tiempo, en primavera se observa que el fluoruro rebasa el límite máximo permitido para uso agrícola ($P < 0.002$) con una media de 1.72 ± 0.20 (tabla V.10). En verano se observa que la media del fluoruro es de 2.47 ± 0.30 (tabla V.11) rebasando el límite de la NOM-127 para consumo humano ($P < 0.003$), sin embargo también rebasa el límite recomendado para riego ($P < 0.001$) y se acerca un poco a rebasar el estándar secundario de la EPA (2 mg/L) que afecta cuestiones estéticas más no la salud ($P < 0.07$). El arsénico rebasa el límite establecido por los estándares primarios de la EPA ($P < 0.008$).

En otoño los fluoruros rebasaron el límite de la NOM 127 ($P < 0.01$) y el de uso agrícola ($P < 0.0001$) con una media de 2.31 ± 0.32 (tabla V.12).

En las variables donde se observa variación estacional significativa ($P < 0.05$) es en el N-NO_3^- , P, temperatura del agua, P.O.R., dureza total y Si. En las demás no se encontró variabilidad estacional ($P > 0.99$).

En cuanto a la variable N-NO_3^- en la gráfica IX.15 en anexos se observa que las concentraciones aumentan de primavera a verano y en el otoño bajan un poco pero casi se mantienen igual que el verano, esto pudiera deberse a que las lluvias tienen un efecto de lixiviación hacia los acuíferos.

En lo referente a los otros parámetros determinados analíticamente en las muestras de agua de los pozos, (gráfica IX.16, anexo) se observa que el fósforo (P) presenta un comportamiento similar como el del N-NO_3^- puesto que aumenta considerablemente de primavera a verano y en otoño se mantiene con las concentraciones del verano, cabe señalarse que el fósforo está presente en fertilizantes y naturalmente en la corteza terrestre, y como se menciona anteriormente se puede notar la influencia de las lluvias, propiciando la lixiviación e infiltración de compuestos de fosforo hacia el acuífero. Los nutrientes como el P y NO_3^- también pueden tener su origen en la infiltración de las aguas residuales domesticas de la Cd. de Chihuahua.

No obstante también se probó variabilidad estacional ($P < 0.05$) de la dureza total (ver gráfica IX.17 en anexos) donde se observa que la dureza en el verano disminuye, esto pudiera deberse a los siguientes dos efectos, uno es que en



épocas de lluvias se tiene más el efecto de dilución sobre todo en los pozos que están en el río siendo esta su forma de recarga disminuyendo la concentración de cualquier compuesto químico y de la dureza principalmente, puesto que el agua de lluvia recarga y viene limpia (López-Ortiz, 2015).

Tabla V.10. Media estacional de primavera comparada con normatividades

PRIMAVERA						
Variable	$\hat{\mu} \pm \hat{\epsilon}(\hat{\mu})$	$[\hat{i}, \hat{j}]$	P (CH)	P (UA)	P (EPA)	P (EPA 2)
Fluoruros	1.72±0.20	1.28 , 2.16	P<0.15	P<0.002	P<0.99	P<0.90
Arsénico	0.003±0	*	---	---	---	---
Cadmio	0.004±0.0009	0.001 , 0.006	P<0.91	P<0.99	P<0.91	---
Nitrógeno de nitratos	0.33±0.10	0.12 , 0.54	P<0.99	NA	P<0.99	---
Total de Sólidos D.	415.6±51.50	305.14 , 526.06	P<0.99	P<0.94	P<0.94	---
Sulfatos	145.6±26.79	87.23 , 203.97	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cloruros	25.21±5.27	13.90 , 36.52	P<0.99	NA	P<0.99	---
Zinc	0.052±0.017	0.014 , 0.091	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Aluminio	*	*	---	---	---	---
Cobre	0.018±0.014	(-)0.022 , 0.059	P<0.99	P<0.99	P<0.99	P<0.99
Fierro	0.08±0	*	---	---	---	---
Sodio	76.86±8.03	59.36 , 94.36	P<0.99	NA	NA	---
Dureza total	191.8±26.03	135.96 , 247.63	P<0.99	NA	NA	---
pH	7.55±0.08	7.38 , 7.72	NA	NA	NA	---
Salinidad	0.41±0.05	0.29 , 0.52	NA	NA	NA	---
Silicio	19.41±0.93	17.42 , 21.41	NA	NA	NA	---
Alcalinidad	249.6±15.17	217.06 , 282.14	NA	NA	NA	---
Conductividad E.	828±103.31	606.42 , 1049.58	NA	NA	NA	---
Fosforo	0.015±0.005	0.003 , 0.027	NA	NA	NA	---
Temp. agua	26.9±0.76	25.26 , 28.54	NA	NA	NA	---
Temp. ambiente	33.03±1.05	30.77 , 35.29	NA	NA	NA	---
Sólidos Totales	569.3±80.69	396.24 , 742.36	NA	NA	NA	---
Potasio	2.49±0.19	2.07 , 2.91	NA	NA	NA	---
Magnesio	6.82±1.06	4.55 , 9.08	NA	NA	NA	---
Calcio	52.91±5.52	41.06 , 64.75	NA	NA	NA	---
Potencial Óxido R	207.5±22.05	160.20 , 254.80	NA	NA	NA	---

Tabla V.11. Media estacional de verano comparada con normatividades

Variable	VERANO					
	$\hat{\mu} \pm \widehat{\epsilon\epsilon}(\hat{\mu})$	$[\hat{i}, \hat{j}]$	P (CH)	P (UA)	P (EPA)	P (EPA 2)
Fluoruros	2.47±0.30	1.82 , 3.11	P<0.003	P<0.0001	P<0.99	P<0.07
Arsénico	0.019±0.003	0.012 , 0.025	P<0.97	P<0.99	P<0.008	---
Cadmio	*	*	---	---	---	---
Nitrógeno de nitratos	1.44±0.37	0.64 , 2.24	P<0.99	NA	P<0.99	---
Total de Sólidos D.	390.4±43.20	297.08 , 483.72	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sulfatos	159.3±22.56	110.15 , 208.44	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cloruros	31.3±5.58	19.25 , 43.35	P<0.99	NA	P<0.99	---
Zinc	0.067±0.008	0.047 , 0.088	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Aluminio	0.029±0.005	0.017 , 0.040	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cobre	0.019±0.005	0.008 , 0.030	P<0.99	P<0.99	P<0.99	P<0.99
Fierro	0.13±0.03	0.06 , 0.20	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sodio	66.93±8.47	48.47 , 85.39	P<0.99	NA	NA	---
Dureza total	118.8±23.49	68.05 , 169.55	P<0.99	NA	NA	---
pH	7.65±0.08	7.47 , 7.82	NA	NA	NA	---
Salinidad	0.38±0.04	0.28 , 0.48	NA	NA	NA	---
Silicio	7.009±0.356	6.24 , 7.78	NA	NA	NA	---
Alcalinidad	242±18.70	201.60 , 282.40	NA	NA	NA	---
Conductividad E.	779.3±86.58	592.25 , 966.35	NA	NA	NA	---
Fosforo	0.109±0.023	0.058 , 0.160	NA	NA	NA	---
Temp. agua	28.44±0.76	26.80 , 30.07	NA	NA	NA	---
Temp. ambiente	32.73±1.16	30.14 , 35.31	NA	NA	NA	---
Sólidos Totales	444.6±58.56	318.08 , 571.11	NA	NA	NA	---
Potasio	2.53±0.19	2.11 , 2.95	NA	NA	NA	---
Magnesio	8.5±1.11	6.07 , 10.93	NA	NA	NA	---
Calcio	48.45±4.75	38.19 , 58.71	NA	NA	NA	---
Potencial Óxido R	98.69±4.95	87.98 , 109.40	NA	NA	NA	---

Tabla V.12. Media estacional de otoño comparada con normatividades

OTOÑO						
Variable	$\hat{\mu} \pm \widehat{\epsilon\epsilon}(\hat{\mu})$	$[\hat{i}, \hat{j}]$	P (CH)	P (UA)	P (EPA)	P (EPA 2)
Fluoruros	2.31±0.32	1.61 , 3.01	P<0.01	P<0.0001	P<0.99	P<0.18
Arsénico	0.011±0.003	0.005 , 0.017	P<0.99	P<0.99	P<0.31	---
Cadmio	*	*	---	---	---	---
Nitrógeno de nitratos	1.31±0.33	0.58 , 2.03	P<0.99	NA	P<0.99	---
Total de Sólidos D.	356.6±36.05	278.73 , 434.47	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sulfatos	163.7±31.37	95.93 , 231.47	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Cloruros	29.07±5.55	17.07 , 41.07	P<0.99	NA	P<0.99	---
Zinc	0.022±0.010	(-)0.003 , 0.047	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Aluminio	0.040±0.005	0.028 , 0.051	P<0.99	P<0.99	P<0.97	---
Cobre	0.022±0.007	0.006 , 0.038	P<0.99	P<0.99	P<0.99	P<0.99
Fierro	0.071±0.025	0.015 , 0.127	P<0.99	P<0.99	P<0.99	---
Sodio	72.2±9.67	51.30 , 93.09	P<0.99	NA	NA	---
Dureza total	193.1±20.17	149.52 , 236.67	P<0.99	NA	NA	---
pH	7.66±0.14	7.36 , 7.95	NA	NA	NA	---
Salinidad	0.37±0.04	0.28 , 0.46	NA	NA	NA	---
Silicio	6.83±0.33	6.13 , 7.54	NA	NA	NA	---
Alcalinidad	248.3±18.11	209.18 , 287.42	NA	NA	NA	---
Conductividad E.	713.4±72.09	557.66 , 869.14	NA	NA	NA	---
Fosforo	0.121±0.026	0.065 , 0.177	NA	NA	NA	---
Temp. agua	24.58±0.36	23.78 , 25.39	NA	NA	NA	---
Temp. ambiente	*	*	NA	NA	NA	---
Sólidos Totales	507±56.49	384.95 , 629.05	NA	NA	NA	---
Potasio	2.35±0.19	1.94 , 2.75	NA	NA	NA	---
Magnesio	8.08±1.04	5.83 , 10.3	NA	NA	NA	---
Calcio	54.68±6.39	40.88 , 68.48	NA	NA	NA	---
Potencial Óxido R	145.9±30.31	80.43 , 211.37	NA	NA	NA	---

Los pozos ubicados cerca del río Chuvíscar son TAB-2, TAB-3, TAB-5, SD-1, SD-3, SD-8 y SD-9. Lo cual coincide en que en verano se tuvo una media de 1.64 ± 0.48 mm de precipitación según tres estaciones meteorológicas ubicadas en los acuíferos con resultados de precipitación diaria para el año 2015, en comparación con la media de primavera y otoño las cuales corresponden a 0.43 ± 0.22 y 0.87 ± 0.36 respectivamente. La otra razón es que la dilución puede ser el resultado de un mezcla de agua del acuífero con el agua que pudiera infiltrarse a través del espacio anular del pozo (pared del suelo y ademe) con el agua que pudiera estar inundando la zona del brocal del pozo una por agua de lluvia otra por crecida del río o canal de irrigación sucediendo esto en temporada de lluvias. Esto se daría únicamente si la muestra fuera obtenida en un tiempo de reposo no menor de 24 horas. Este efecto pudo haberse presentado en pozos TAB-2, TAB-3, TAB-5, SD-5, SD-6 SD-7. También se presenta la recarga horizontal que proviene de las sierras colindantes del valle, los pozos TAB-1, TAB-4, TAB-6, SD-2, SD-4, SD-5, SD-6, SD-7 en estos pozos no suena lógico que haya un efecto de dilución en temporada de lluvia ya que el tránsito de agua requiere de muchos años en llegar al pozo, pero quizá por efecto del brocal inundado, es decir el sellamiento del pozo queda con abertura y por ahí se da el caso de introducción de agua de lluvia o agua superficial (López-Ortiz, 2015).

Respecto a la temperatura, como era de esperar, hubo diferencia entre estaciones ($P < 0.05$) en cuanto a la temperatura (ver gráfica IX.18 en anexos) como se puede ver que la primavera y verano se parecen, levemente más cálida en verano y para el otoño disminuyó considerablemente.

En la gráfica IX.19 en anexos se puede observar variabilidad estacional en el P.O.R. como se puede ver la primavera se diferencia del verano y otoño, siendo mucho mayor en la primavera las reacciones de óxido-reducción.

En lo referente al Si en la gráfica IX.20 en anexos se muestra también una variabilidad estacional, como se puede ver está más presente en la primavera, aparentemente con las lluvias se diluye su concentración por la recarga natural del agua de infiltración de las lluvias. En zonas con concentraciones extremadamente altas de Si acuoso se puede formar carbón de silicio en superficies oxihroxidas

férricas, lo que por un lado puede inhibir la absorción de As y por el otro se mantiene en la fase disuelta hasta por varios kilómetros. Altos niveles de pH promueven la disolución de Si, el cual puede contribuir también a la liberación de As en agua subterránea. Una vez en la solución As y F^- absorben Fe, Mn, Al y se adhieren a materiales como arcillas presentes en los sedimentos. Las condiciones del pH alcalino reducen la capacidad de adsorción de estos sólidos liberando aniones de limos y aluviones de regreso al agua (Alarcón-Herrera, et al., 2013).

Aunque de forma estadística no se presentaron variaciones estacionales para el caso del As, los datos revelan una tendencia a disminuir la concentración de ese metaloide después del periodo de lluvias, ya que en promedio se aprecia una variación en las concentraciones de As de 0.056 mg/L en primavera, pasando por 0.036 mg/L en verano (durante las lluvias) hasta niveles de As de alrededor de 0.028 mg/L para el total de pozos en los dos acuíferos estudiados (Reyes-Gómez, et al., 2013). Se debe de recomendar mucho más estudios por más años para los periodos estacionales

V.4 Análisis multivariado para el efecto de pozo y estacionalidad

V.4.1 Análisis de correlación

Se observa en las tablas V.13 y V.14 una estructura de correlación entre las variables consideradas, lo cual sugiere un análisis multivariado que permita tomar en cuenta la relación entre estas variables. Con esto se espera explicar la variabilidad entre los pozos considerados en el muestreo.

Los datos presentados demuestran claramente que la co-ocurrencia de As y F^- es común en muchos acuíferos en América Latina, especialmente en ambientes oxidados y alcalinos. El origen del As y F^- en agua subterránea en América Latina es principalmente geogénico por naturaleza. Una fuente primaria identificada es el vidrio volcánico y en menor extensión minerales hidrotermales. Una fuente secundaria son los óxidos/hidróxidos de Fe, Mn y Al y arcilla de los cuales el As, F^- y otros elementos traza tienen una mayor afinidad de adsorción con ellos (Alarcón-Herrera, et al., 2013). Otras causas de presencia de F^- pueden ser porque sea de origen antropogénico, ya que es usado por los dentistas, por la creencia de que

promueve el fortalecimiento de los dientes, cosa que se ha demostrado falsa, pero no ha sido aceptada. Otras posibles fuentes podrían ser asociadas al uso de fertilizantes y fábricas de aluminio (EPA, 2009). En Chihuahua, no hay fábricas de aluminio, por lo que es poco probable.

Tabla V.13. Correlación entre variables de metales y metaloides

	As	F⁻	Cd	Cu	Fe	Al	Zn⁺
As	1						
F⁻	0.35 (0.058)	1					
Cd	---	0.388 (0.343)	1				
Cu	-0.240 (0.283)	0.203 (0.310)	-0.426 (0.720)	1			
Fe	0.018 (0.936)	-0.070 (0.746)	---	0.010 (0.967)	1		
Al	0.669 (0.000)	0.198 (0.312)	---	-0.195 (0.386)	-0.104 (0.636)	1	
Zn⁺	0.096 (0.724)	0.314 (0.127)	-0.437 (0.462)	0.401 (0.099)	-0.108 (0.726)	0.160 (0.568)	1

Tabla V.14. Matriz de correlaciones entre las variables con mayor información (rx, y, valor P)

	As	F ⁻	pH	TSD	Temp. agua	Salinidad	Alcalinidad	Si	Ca ⁺	Na ⁺	N-NO ₃ ⁻	P	SO ₄ ⁻	Cl ⁻
As	1													
F ⁻	0.35 (0.058)	1												
pH	0.119 (0.531)	0.181 (0.244)	1											
TSD	0.710 (0.000)	0.201 (0.197)	-0.119 (0.448)	1										
Temp. agua	0.032 (0.873)	0.265 (0.095)	-0.137 (0.392)	0.179 (0.287)	1									
Salinidad	0.735 (0.000)	0.191 (0.219)	-0.126 (0.419)	0.985 (0.000)	0.087 (0.587)	1								
Alcalinidad	-0.045 (0.813)	-0.178 (0.252)	0.076 (0.627)	0.147 (0.347)	-0.320 (0.041)	0.134 (0.391)	1							
Si	0.195 (0.302)	-0.269 (0.081)	-0.005 (0.973)	0.218 (0.160)	0.048 (0.764)	0.183 (0.241)	0.184 (0.239)	1						
Ca ⁺	0.178 (0.348)	0.048 (0.758)	-0.510 (0.000)	0.591 (0.000)	0.260 (0.101)	0.578 (0.000)	-0.011 (0.942)	0.001 (0.996)	1					
Na ⁺	0.942 (0.000)	0.204 (0.189)	0.150 (0.338)	0.865 (0.000)	0.012 (0.943)	0.863 (0.000)	0.143 (0.359)	0.297 (0.053)	0.181 (0.245)	1				
N-NO ₃ ⁻	-0.221 (0.241)	0.038 (0.810)	-0.217 (0.163)	0.056 (0.723)	-0.015 (0.926)	0.024 (0.881)	0.032 (0.841)	-0.403 (0.007)	0.354 (0.020)	-0.172 (0.271)	1			
P	-0.168 (0.393)	-0.238 (0.176)	-0.001 (0.997)	-0.103 (0.560)	0.040 (0.828)	-0.089 (0.615)	0.039 (0.827)	-0.392 (0.022)	-0.094 (0.596)	-0.101 (0.570)	0.037 (0.838)	1		
SO ₄ ⁻	0.686 (0.000)	0.316 (0.039)	-0.106 (0.498)	0.931 (0.000)	0.273 (0.084)	0.926 (0.000)	-0.092 (0.557)	0.178 (0.253)	0.560 (0.000)	0.816 (0.000)	-0.045 (0.773)	-0.080 (0.651)	1	
Cl ⁻	0.620 (0.000)	0.073 (0.643)	-0.151 (0.332)	0.851 (0.000)	0.014 (0.932)	0.840 (0.000)	0.159 (0.309)	-0.052 (0.741)	0.595 (0.000)	0.690 (0.000)	0.404 (0.007)	0.056 (0.752)	0.696 (0.000)	1

V.4.2 Análisis de componentes principales para pozos

El análisis de componentes principales para pozo en las tres estaciones sugiere que los primeros cuatro componentes principales explican el 79% de la variabilidad total en el conjunto de datos multivariados. El primer componente explica el 33.5%, el segundo el 20.1%, el tercero 13.3% y el cuarto 11.6%. Por lo tanto sólo se interpretarán estos componentes principales.

En el tabla V.15 se muestran los Eigenvectores y en los cuadros V.1, V.2, V.3 y V.4 las contribuciones que aporta cada variable a cada componente, con respecto al cero. Las positivas es que se encuentran muy por encima del cero, las negativas al contrario y las que no contribuyen es por su cercanía con el mismo. El primer componente se puede interpretar como una descripción media del agua muestreada en las estaciones.

Tabla V.15. Coeficientes de los Eigenvectores para los primeros cuatro componentes principales

Variables	Componentes principales			
	1	2	3	4
F ⁻	0.103	-0.063	0.494	-0.278
As	0.334	0.032	0.197	-0.349
Na ⁺	0.370	0.204	0.078	0.267
N-NO ₃ ⁻	0.017	-0.381	-0.367	-0.164
pH	-0.022	0.459	0.152	-0.313
T.S.D.	0.414	-0.003	0.038	0.262
P	-0.081	0.091	-0.145	0.135
Cd	0.335	-0.082	-0.054	-0.407
Fe	0.007	0.407	-0.320	-0.237
Salinidad	0.415	-0.001	0.056	0.265
Alcalinidad	0.118	0.270	-0.389	0.000
Cu	-0.172	0.080	0.503	0.234
Al	0.338	-0.162	0.030	-0.278
Ca ⁺	0.221	-0.417	-0.097	0.191
Si	0.267	0.372	-0.086	0.239

Cuadro V.1. Contribuciones del componente principal 1 para pozos

Componente Principal 1	
No contribuyen :	Temperatura del agua, N-NO ₃ ⁻ , P, Fe, pH
Contribuyen positivamente:	Salinidad, T.S.D., Na ⁺ , As, Cd, Al
Contribuyen negativamente:	Cu

Cuadro V.2. Contribuciones del componente principal 2 para pozos

Componente Principal 2	
No contribuyen:	F ⁻ , As, T.S.D., P, salinidad, Cu, Cd
Contribuyen positivamente:	pH, Fe, Si
Contribuyen negativamente:	Ca ⁺ , N-NO ₃ ⁻

Cuadro V. 3. Contribuciones del componente principal 3 para pozos

Componente Principal 3	
No contribuyen:	Na ⁺ , T.S.D., Cd, salinidad, Al, Ca ⁺ , Si.
Contribuyen positivamente:	F ⁻ , Cu
Contribuyen negativamente:	alcalinidad, N-NO ₃ ⁻ , Fe

Cuadro V.4. Contribuciones del componente principal 4 para pozos

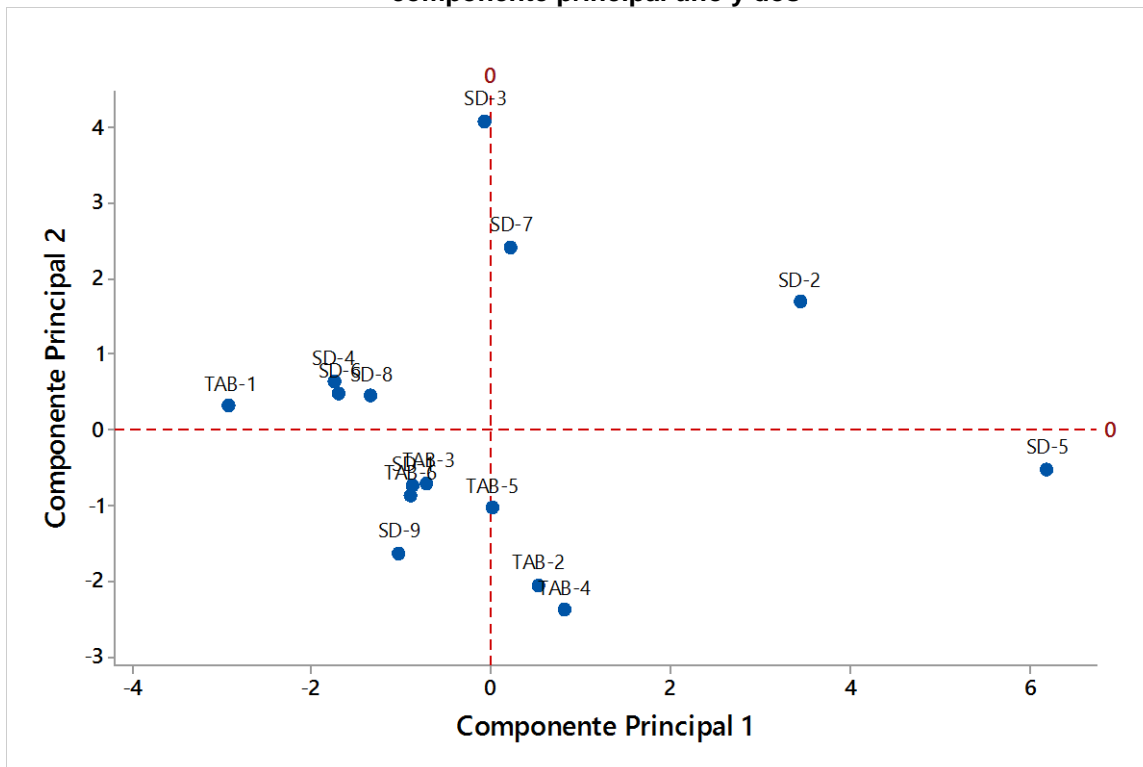
Componente Principal 4	
No contribuyen:	Alcalinidad
Contribuyen positivamente:	N-NO ₃ ⁻ , T.S.D., salinidad, Cu, Si
Contribuyen negativamente:	Cd, As, pH

De acuerdo al primer componente (gráfica V.1) los pozos SD-2 y SD-5 quedan muy por encima del cero, lo que indica que estos pozos se caracterizan por tener valores altos en T.S.D., salinidad, Na⁺, As, Cd y Al. Estos pozos se caracterizan por ser de uso agrícola no de consumo doméstico afortunadamente, pero deben de ser monitoreados. El pozo TAB-1 está muy por debajo del cero lo que indica que el agua de este pozo se caracteriza por tener un alto contenido de Cu, pudiendo deberse a la cercanía de la ciudad y la actividad industrial. La mayoría de los pozos tienden a agruparse en el centro sin distinción de un acuífero a otro.

Con respecto al componente principal dos (gráfica V.1) se observa que la mayoría de los pozos TAB excepto TAB-1 y en conjunto con SD-1, SD-5, SD-9 en el muestreo se ubicaron por debajo del cero, lo que indica que estos pozos se caracterizan por tener valores mayores de Ca⁺ y N-NO₃⁻. Por arriba del cero se

ubican más de la mitad de los pozos SD y TAB-1, que se esperan valores mayores en pH, Fe y Si.

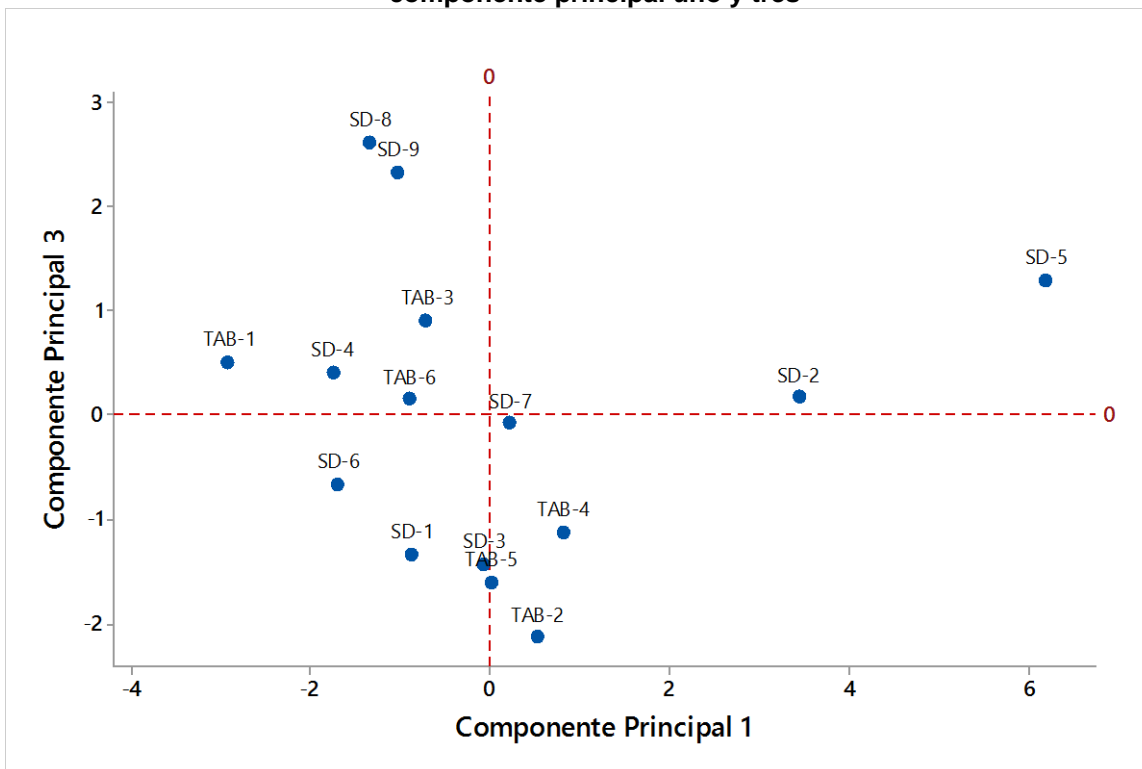
Gráfica V.1. Distribución de los pozos de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y dos



Para la variabilidad explicada por el componente principal 3 (gráfica V.2) se observa que la distribución de los pozos a través de los acuíferos fue muy similar. Mitad de los pozos en TAB (1, 3, 6) y cinco pozos en SD (2, 4, 5, 8, 9) estos últimos extremos se ven influidos por la presencia de F^- y Cu. El cobre se asocia con la presencia de rocas volcánicas del Terciario (Gutiérrez, et al., 2012).

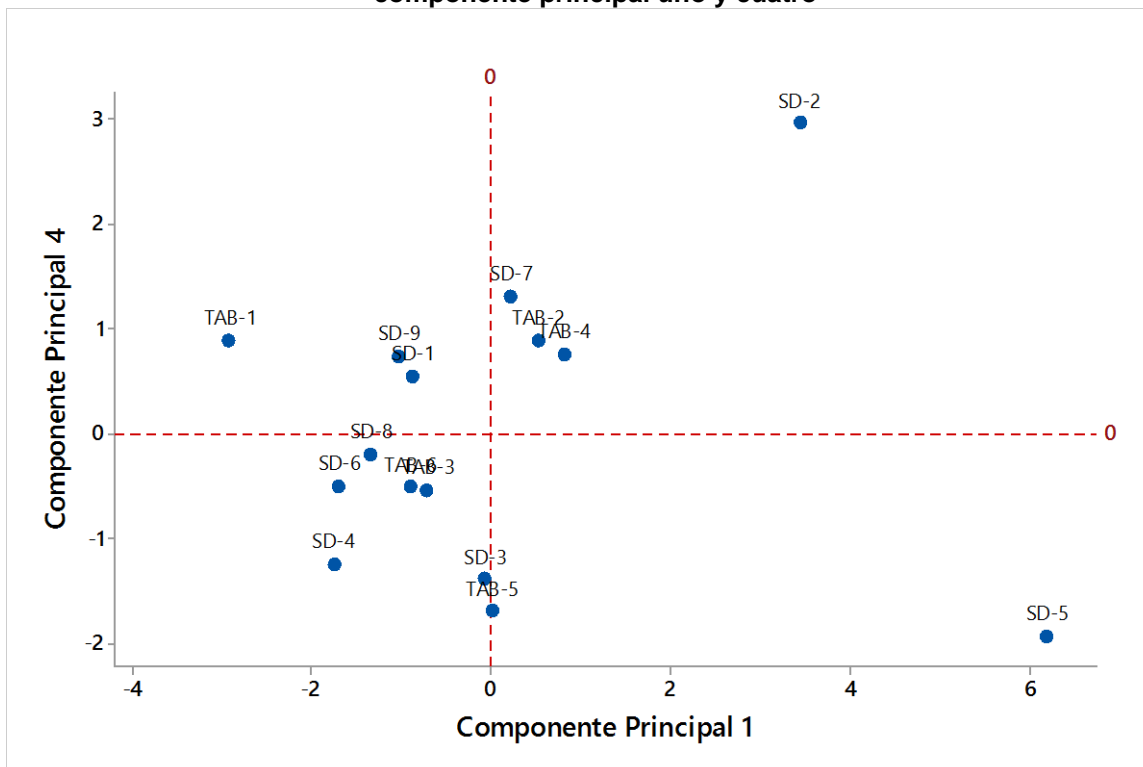
La otra mitad de pozos TAB (2, 4, 5) y SD (1, 3, 6) se ven influidos por alcalinidad, Fe, $N-NO_3^-$. En contraste los pozos TAB-3 y SD-8 se caracterizan por tener altos valores de F^- . En cuanto a TAB-3 y SD-8 están cerca de pies de Monte donde ha sido encontrada la presencia de F^- en co-ocurrencia con el As (Reyes-Gómez, et al., 2013).

Gráfica V.2. Distribución de los pozos de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y tres



De acuerdo al componente principal 4 (gráfica V.3) se observa cierta similitud de los pozos entre ambos acuíferos. Por lo que sobresale el pozo SD-2 con influencia de salinidad, Si, Cu, T.S.D., N-NO₃⁻. Por otro lado sobresale SD-5, siguiéndole TAB-5, SD-3 y SD-4 con influencia de As, Cd, pH.

Gráfica V.3. Distribución de los pozos de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y cuatro



V.4.3 Análisis de componentes principales para estacionalidad

El análisis de componentes principales estacional sugiere que los primeros cuatro componentes principales explican el 77% de la variabilidad total en el conjunto de datos multivariados. El primer componente explica el 36.8%, el segundo el 15.4%, el tercero 13.5% y el cuarto 11.3%. Por lo tanto sólo se interpretarán estos componentes principales.

En el tabla V.16 se muestran los Eigenvectores y en los cuadros V.5, V.6, V.7 y V.8 las contribuciones que aporta cada variable a cada componente, con respecto al cero. Las positivas es que se encuentran muy por encima del cero, las negativas al contrario y las que no contribuyen es por su cercanía con el mismo. El primer componente se puede interpretar como una descripción media del agua muestreada en las estaciones.

Tabla V.16. Coeficientes de los Eigenvectores para los primeros cuatro componentes principales

Variables	Componentes principales			
	1	2	3	4
pH	-0.055	-0.530	0.010	-0.326
T.S.D.	0.447	-0.048	0.106	-0.024
Temp. Del agua	0.122	0.019	-0.400	0.349
Salinidad	0.440	-0.059	0.105	-0.054
Alcalinidad	-0.096	0.011	0.520	-0.351
N-NO ₃ ⁻	0.103	0.482	-0.065	-0.261
Cl ⁻	0.395	0.174	0.127	-0.238
SO ₄ ⁻	0.425	-0.116	-0.151	0.071
F ⁻	0.117	-0.353	0.407	-0.051
Na ⁺	0.345	-0.353	0.144	-0.134
Ca ⁺	0.312	0.382	0.047	0.185
Si	-0.004	-0.127	0.519	0.467
P	-0.056	0.163	-0.213	-0.492

Cuadro V.5. Contribuciones del componente principal 1 por estación

Componente Principal 1	
No contribuyen :	pH, alcalinidad, Si, P
Contribuyen positivamente:	T.S.D., salinidad, SO ₄ ⁻ , Cl ⁻
Contribuyen negativamente:	

Cuadro V.6. Contribuciones del componente principal 2 por estación

Componente Principal 2	
No contribuyen :	T.S.D., temperatura del agua, salinidad, alcalinidad, SO ₄ ⁻ , P
Contribuyen positivamente:	N-NO ₃ ⁻
Contribuyen negativamente:	pH

Cuadro V.7. Contribuciones del componente principal 3 por estación

Componente Principal 3	
No contribuyen :	pH, N-NO ₃ ⁻ , Ca ⁺
Contribuyen positivamente:	Alcalinidad, Si
Contribuyen negativamente:	F ⁻ y temperatura del agua

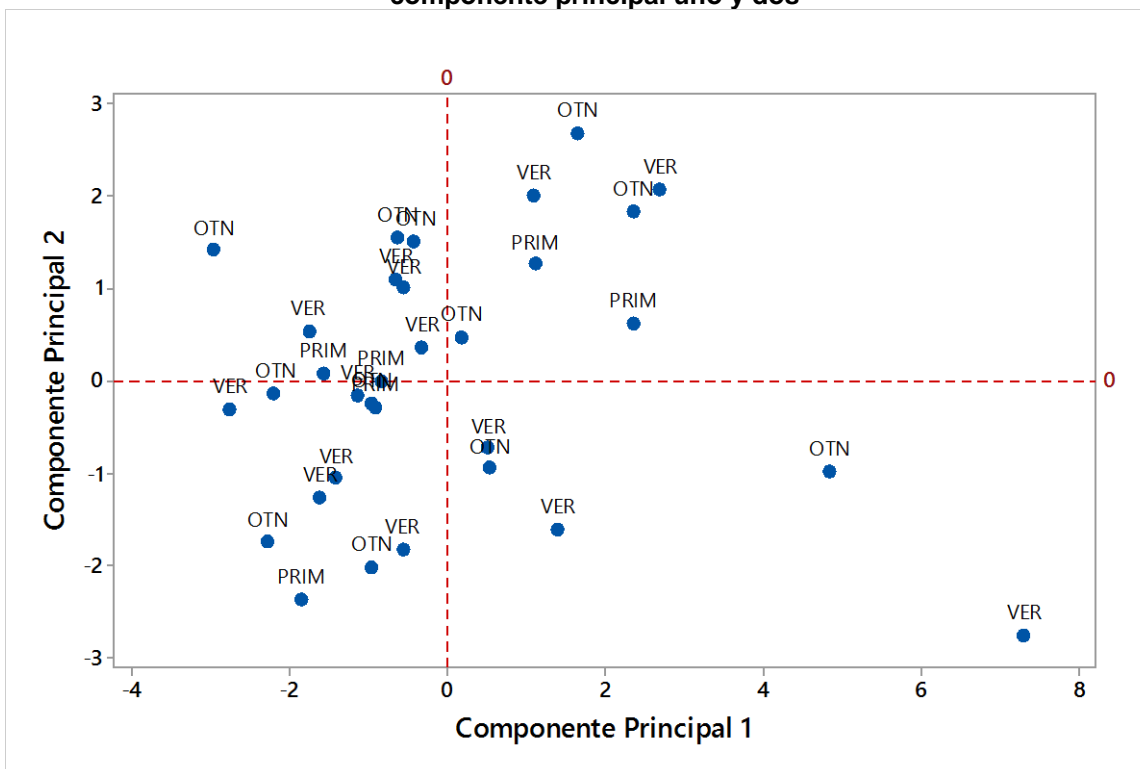
Cuadro V.8. Contribuciones del componente principal 4 por estación

Componente Principal 4	
No contribuyen :	T.S.D., salinidad, Cl^- , SO_4^- , F^-
Contribuyen positivamente:	Si, temperatura del agua
Contribuyen negativamente:	P

De acuerdo al primer componente lecturas (gráfica V.4) para las estaciones de verano y otoño no muestran una agrupación notoria; sin embargo, hay dos lecturas, en otoño y verano que se caracterizan por mostrar valores altos de T.S.D., salinidad, SO_4^- , Cl^- que se corresponden a mayoría de los pozos tienden a agruparse en el centro sin distinción de un acuífero a otro.

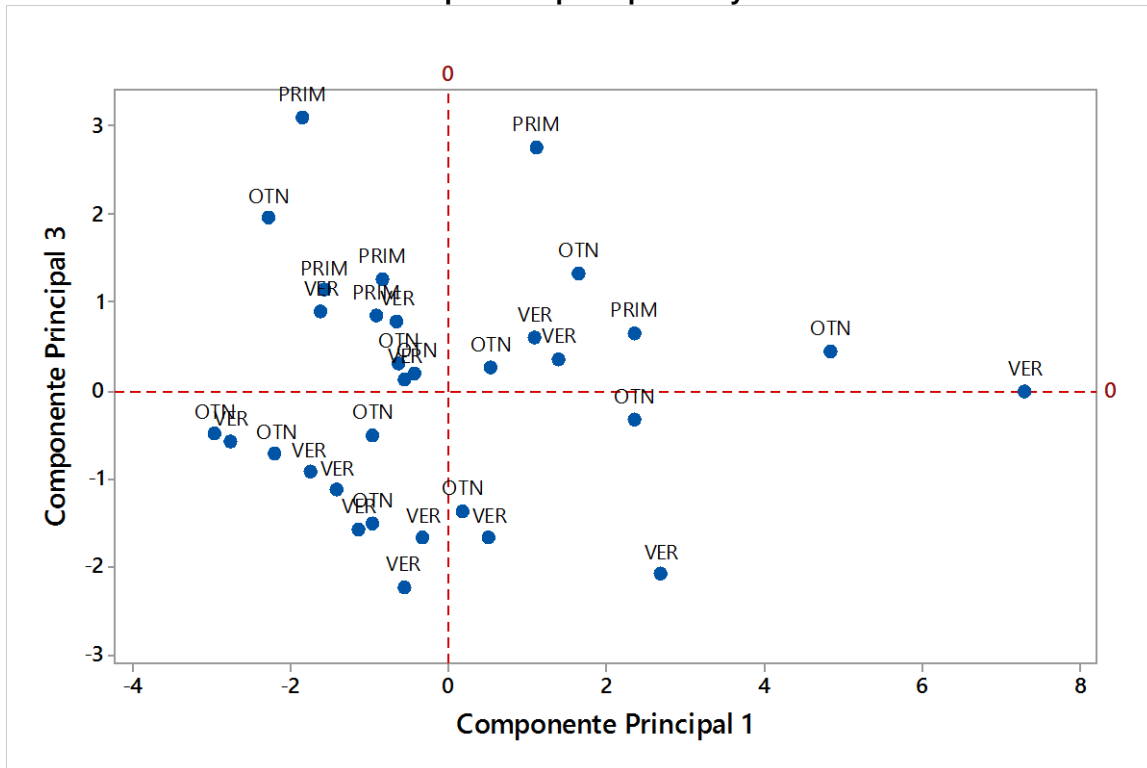
Con respecto al componente principal dos (gráfica V.4) se observa que la mayoría de los valores de primavera se ubican por encima del cero influenciados por la $N-NO_3^-$. El verano y otoño se distribuye por debajo y por encima del cero y un valor de primavera. Los valores ubicados por debajo del cero se ven influidos por el pH.

Gráfica V.4. Distribución de las estaciones de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y dos



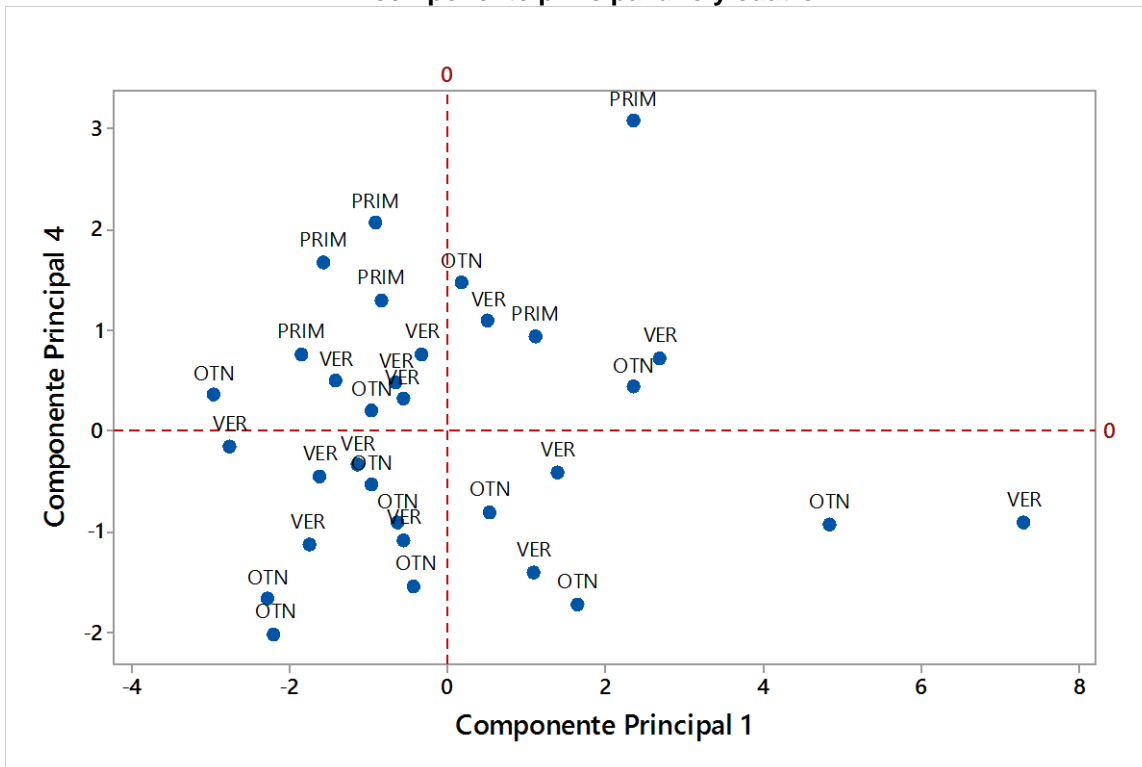
Con respecto al componente principal tres (gráfica V.5) se observa que la mayoría de los valores de primavera se ubican por encima de cero contribuciones del Si. El verano y otoño se distribuye por debajo y por encima del cero, influidos por el F.

Gráfica V.5. Distribución de las estaciones de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y tres



Con respecto al componente principal cuatro (gráfica V.6) se observa que la mayoría de los valores de primavera se ubican por encima del cero influyen la temperatura del agua y Si. El verano y otoño se distribuye por debajo y por encima del cero, influidos por la temperatura del agua y Si. Los valores ubicados por debajo del cero se ven influidos por el P.

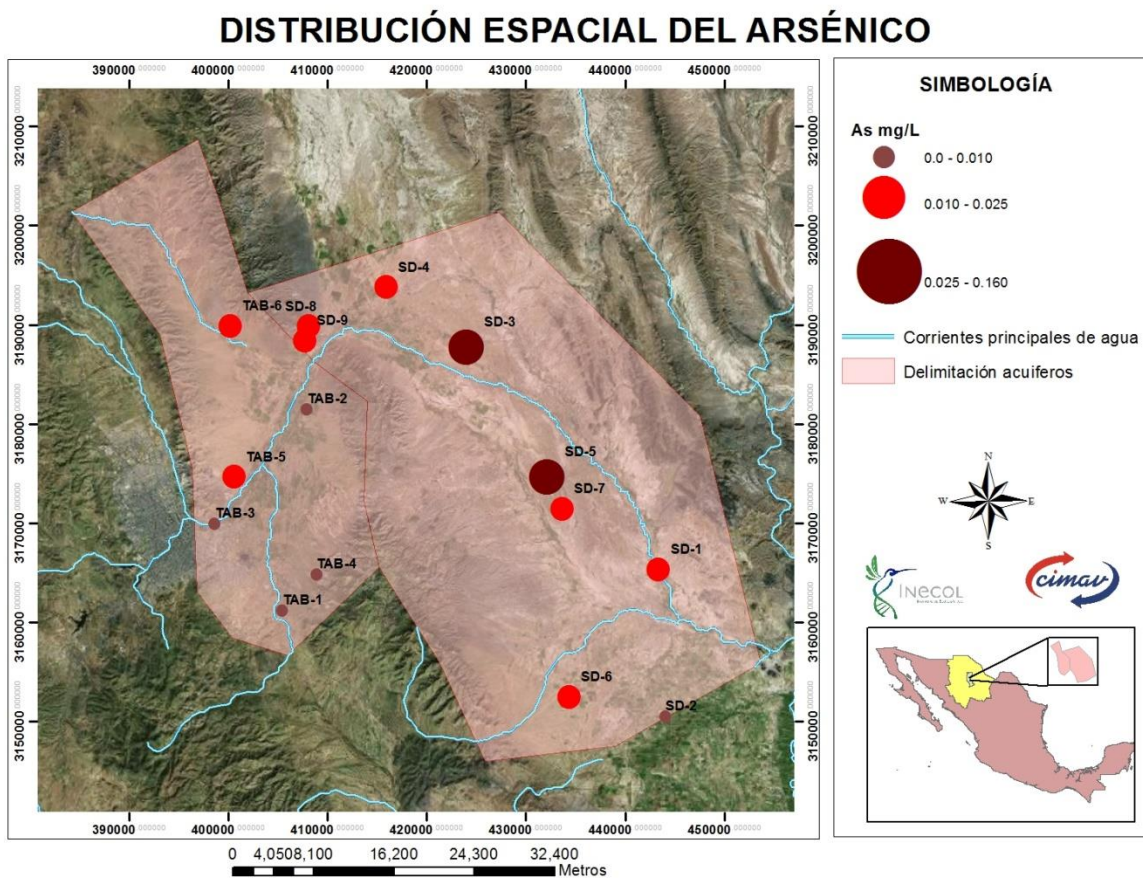
Gráfica V.6. Distribución de las estaciones de acuerdo a los valores generados para el componente principal uno y cuatro



V.4.4. Distribución espacial del As, F⁻, N-NO₃, P

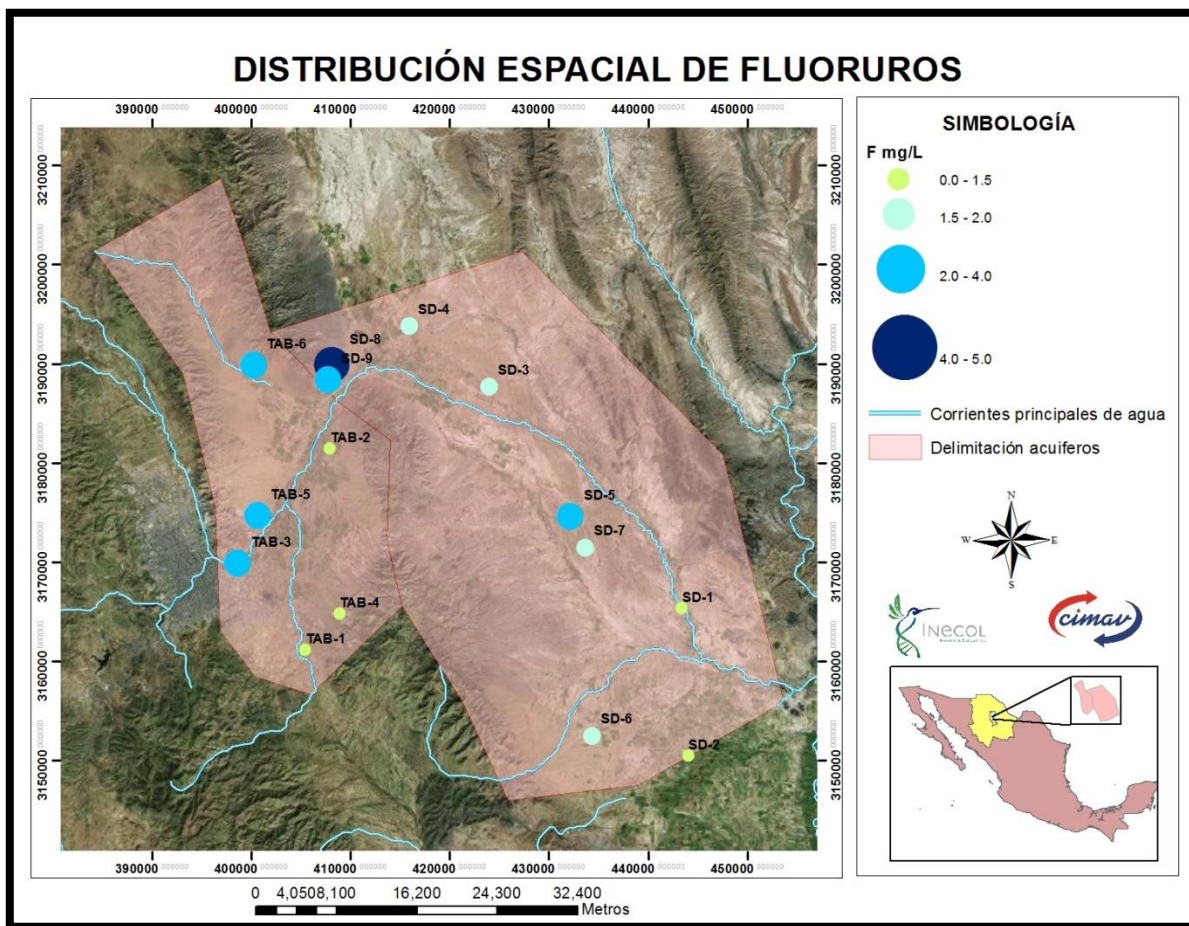
En la figura V.5 se observan las concentraciones promedio de As para cada pozo, los que rebasan la NOM-127 y por consiguiente la normativa internacional, siendo las concentraciones más altas, fueron en SD-3 y SD-5 pozos de uso agrícola, ubicados en la parte media-alta del acuífero SD. Los pozos con concentraciones medias, que rebasan la norma internacional y la NOM-127 se ubican en todo el acuífero SD. Sólo SD-2 no rebasa ninguna norma. En cuanto al acuífero TAB las concentraciones medias están en la parte media-alta del mismo y en la parte media-sur están los pozos que no rebasaron normatividades, los cuales fueron TAB (1, 2, 3 y 4).

Figura V.5. Distribución espacial de concentraciones de As



Los fluoruros están muy distribuidos, la concentración más alta que rebasa la normativa internacional en su estándar primario y por consiguiente la NOM-127 están en SD-8, pozo de uso doméstico, perteneciente a un balneario en la Cd. de Aldama, ubicado al noroeste del acuífero SD. También se observan concentraciones que rebasan normativa mexicana en la parte media y norte del acuífero SD y SD-6 al sur. Sin embargo hacia el sureste no rebasan normatividades perteneciendo a los pozos SD-1 y SD-2. En TAB es un comportamiento similar como el As que al sur no rebasan normatividades, coincidiendo con la co-ocurrencia del As y en la parte media-norte están concentraciones que rebasan la NOM-127 y la internacional en su estándar secundario (figura V.6).

Figura V.6. Distribución espacial de las concentraciones de F⁻



Cabe señalarse que en cuanto al N-NO₃ se observan mayores concentraciones en el acuífero TAB, exactamente en TAB-5, ubicado en la Cd. de Chihuahua, pudiendo deberse a descarga de agua residual (figura IX.10. en anexos). En cuanto al P analizado se encuentra más concentrado al norte del acuífero TAB cerca de la Cd. de Aldama y al sur del acuífero SD (figura IX.11 en anexos).

V.5 Clasificación del agua

V.5.1 Por sólidos totales disueltos

En todas las épocas del año el agua de todos los pozos se clasificó como dulce a excepción del pozo SD-4 en verano que se clasificó como salobre, principalmente por su contenido de sodio aunque el error asociado a la lectura de

laboratorio lo hace un resultado dudoso (17.6% de error). Por lo anterior se considera que el agua en todos los pozos se clasifica como dulce.

V.5.2 Por dureza

Parece ser que el agua tiende a ser más dura en la época de primavera y otoño (gráfica V.7), siendo más probable que el agua en estas épocas sea dura. En la época de verano la dureza del agua tiende a ser constante por efecto de la dilución provocada por las lluvias. La gráfica V.7 se obtiene a partir de la tabla V.17.

Gráfica V.7. Tendencia de las probabilidades condicionales para tipo de dureza en las épocas del año

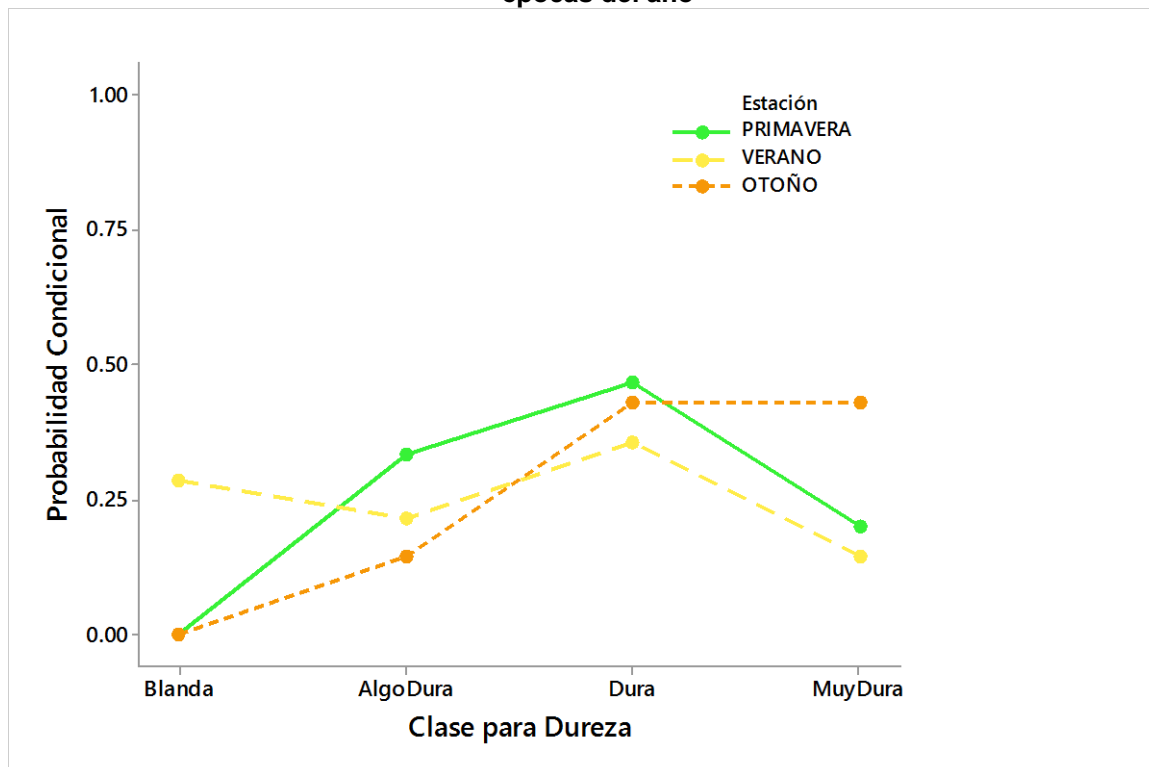


Tabla V.17. Frecuencias absolutas para la clasificación de dureza a través de las estaciones en los pozos muestreados

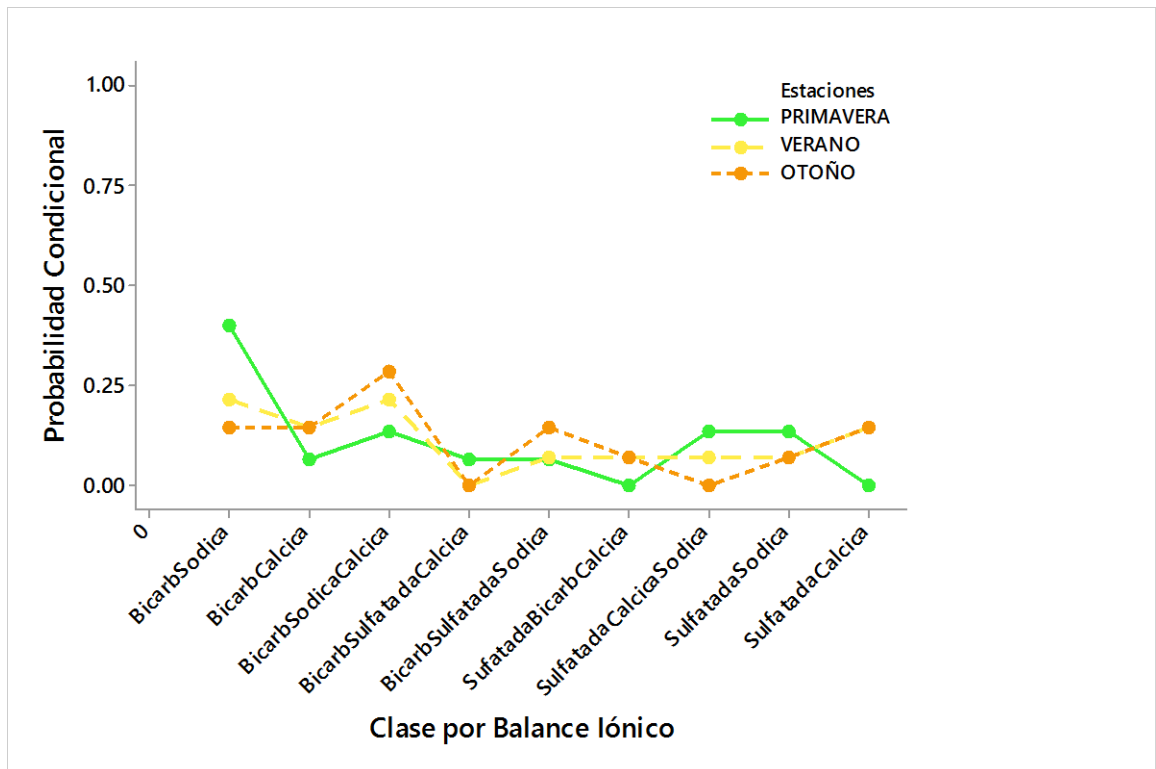
Estación	Blanda	Algo dura	Dura	Muy dura	Total
Primavera	0	5	7	3	15
Verano	4	3	5	2	14
Otoño	0	2	6	6	14
Total	4	10	18	11	43

V.5.3 Por balance iónico

Como se observa en la Gráfica V.8 obtenida a partir de la tabla V.18 se presenta un tipo de agua similar en verano y otoño, en primavera se observa que sí varía en tipos de agua por balance iónico. Predominando el agua de tipo bicarbonatada sódica, luego la sulfatada-cálcica-sódica y la sulfatada-sódica. En cuanto a verano y otoño predomina la bicarbonatada-sódica-cálcica, siguiéndole la bicarbonatada-sulfatada-sódica y luego la sulfatada-cálcica. Esto se apoya con los diagramas de Piper por estación del año (figura V.7, V.8, V.9).

Las aguas ligeramente alcalinas ($\text{pH}=7.4$), son de tipo bicarbonatada cálcica, se dan más en áreas de recarga y se encuentran bajas concentraciones de As. Mientras para aguas de tipo bicarbonatada sódica ($\text{pH}>9$) alcalinas se da en zonas de descarga. Generalmente el incremento en la salinidad y alcalinidad están correlacionados con altas concentraciones de As y F^- eso restringe el consumo humano. La disolución de Si puede ser significativa especialmente con altos niveles de pH. Por lo que aguas bicarbonatadas sódicas, con $\text{pH}=8$ y alta conductividad se tiene la presencia de As y F^- , indicando un origen volcánico. Altos rangos de evaporación, típico de zonas áridas y semiáridas, generan salinidad en agua subterránea (aguas bicarbonatadas sódicas, Na-HCO_3) y alcalinas, liberando As y F^- , resultando aguas ricas en As y F^- (Alarcón-Herrera, et al., 2013)

Gráfica V.8. Tendencia de las probabilidades condicionales para tipo de agua por Balance iónico en las épocas del año



En Giggenbach (1988) las aguas termales que caen en campos de aguas inmaduras pueden sugerir el efecto de una variedad de procesos que incluyen el re-equilibrio y fuerte dilución/mezcla con aguas someras. Mezclándose aguas completamente equilibradas de Na^+ y Cl^- con aguas meteorizadas someras produciendo posiblemente aguas ricas en bicarbonatos. Sin embargo es una tendencia ligar altas concentraciones de As con aguas de tipo Na-Cl. Las más grandes concentraciones de As fueron encontradas en aguas maduras con Na-Cl que tuvieron contacto con rocas por un periodo largo, sugiriendo que el incremento de As es debido a una residencia prolongada y a las interacciones del agua con la pared rocosa. Los resultados del estudio en esa zona sugieren que las aguas del tipo Na-Cl que son maduras y profundas tienen altos contenidos de As concomitantes con elevadas concentraciones de Li^+ y Si. El As en aguas termales está presente principalmente como As (III) indicando condiciones de reducción de las aguas profundas geotermales. Altos niveles de As en sedimentos indican que



después de la descarga a suelo superficial, el As (III) es oxidado y ocurre una atenuación natural de As por adsorción/ co-precipitación en fases del mineral Fe. Es probable que las descargas de aguas termales no son la principal fuente de elevados contenidos de As en aguas someras de acuíferos, como son aguas inmaduras y pudieran tener solamente un pequeño componente correspondiente al depósito profundo. Se necesitan más investigaciones hidrológicas para explicar mejor los mecanismos y procesos responsables de las altas ocurrencias de As en acuíferos de aguas someras (Ormachea Muñoz, et al., 2015).



Tabla V.18. Frecuencias absolutas para la clasificación de balance iónico a través de las estaciones en los pozos muestreados

ESTACION	Bicarbonatada- Sódica	Bicarbonatada- Cálcica	Bicarbonatada- Sódica-Cálcica viceversa	Bicarbonatada- Sulfatada- Cálcica	Bicarbonatada- Sulfatada- Sódica	Sulfatada- Bicarbonatada- Cálcica	Sulfatada- Cálcica- Sódica	Sulfatada- Sódica	Sulfatada- Cálcica	TOTAL
PRIMAVERA	6	1	2	1	1	0	2	2	0	15
VERANO	3	2	3	0	1	1	1	1	2	14
OTOÑO	2	2	4	0	2	1	0	1	2	14
TOTAL	11	5	9	1	4	2	3	4	4	43

En cuanto al error calculado a partir del balance iónico de las determinaciones analíticas, se puede ver en la Gráfica V.9, los resultados obtenidos en primavera y otoño son aceptables, excepto los obtenidos en verano, que se consideran dudosos. La gráfica V.9 se obtuvo a partir de la tabla V.19.

Gráfica V.9. Tendencia de las probabilidades condicionales del error calculado por balance iónico en las épocas del año

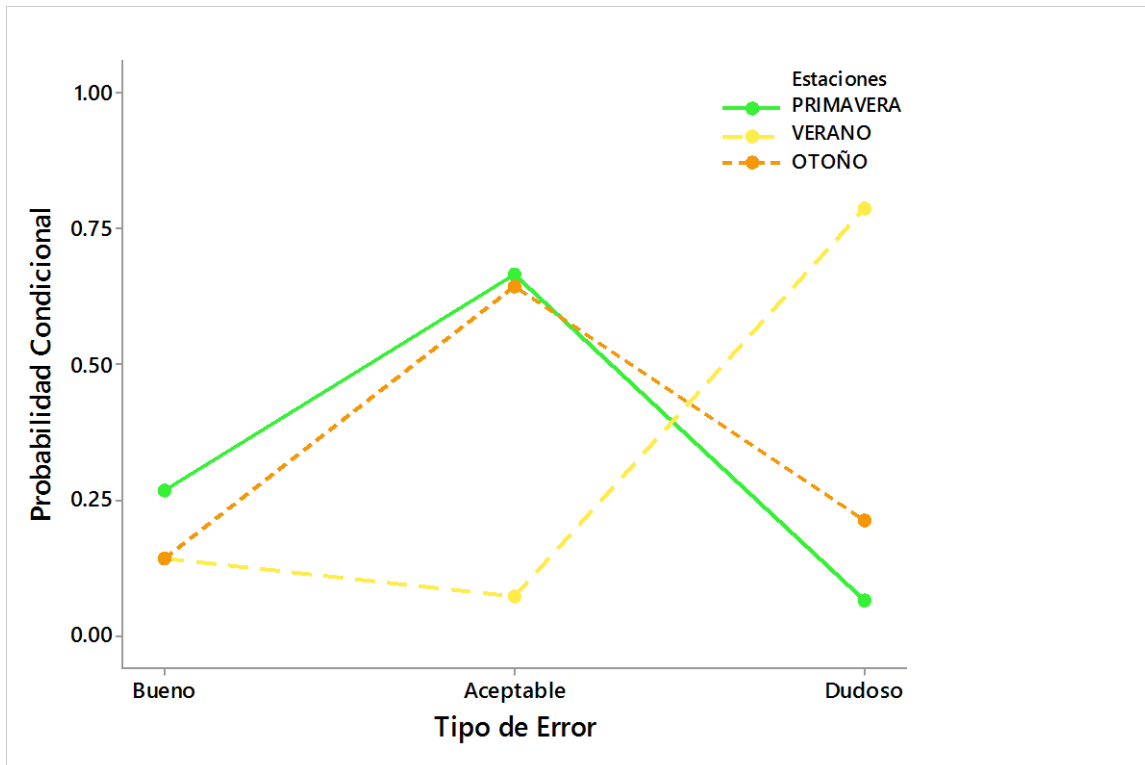


Tabla V.19. Frecuencias absolutas del error del balance iónico a través de las estaciones en los pozos muestreados

ESTACION	Buena	Aceptable	Dudoso	TOTAL	Prob (Época)
PRIMAVERA	4	10	1	15	0.3488
VERANO	2	1	11	14	0.3256
OTOÑO	2	9	3	14	0.3256
TOTAL	8	20	15	43	1

Figura V.7. Diagrama de Piper en primavera

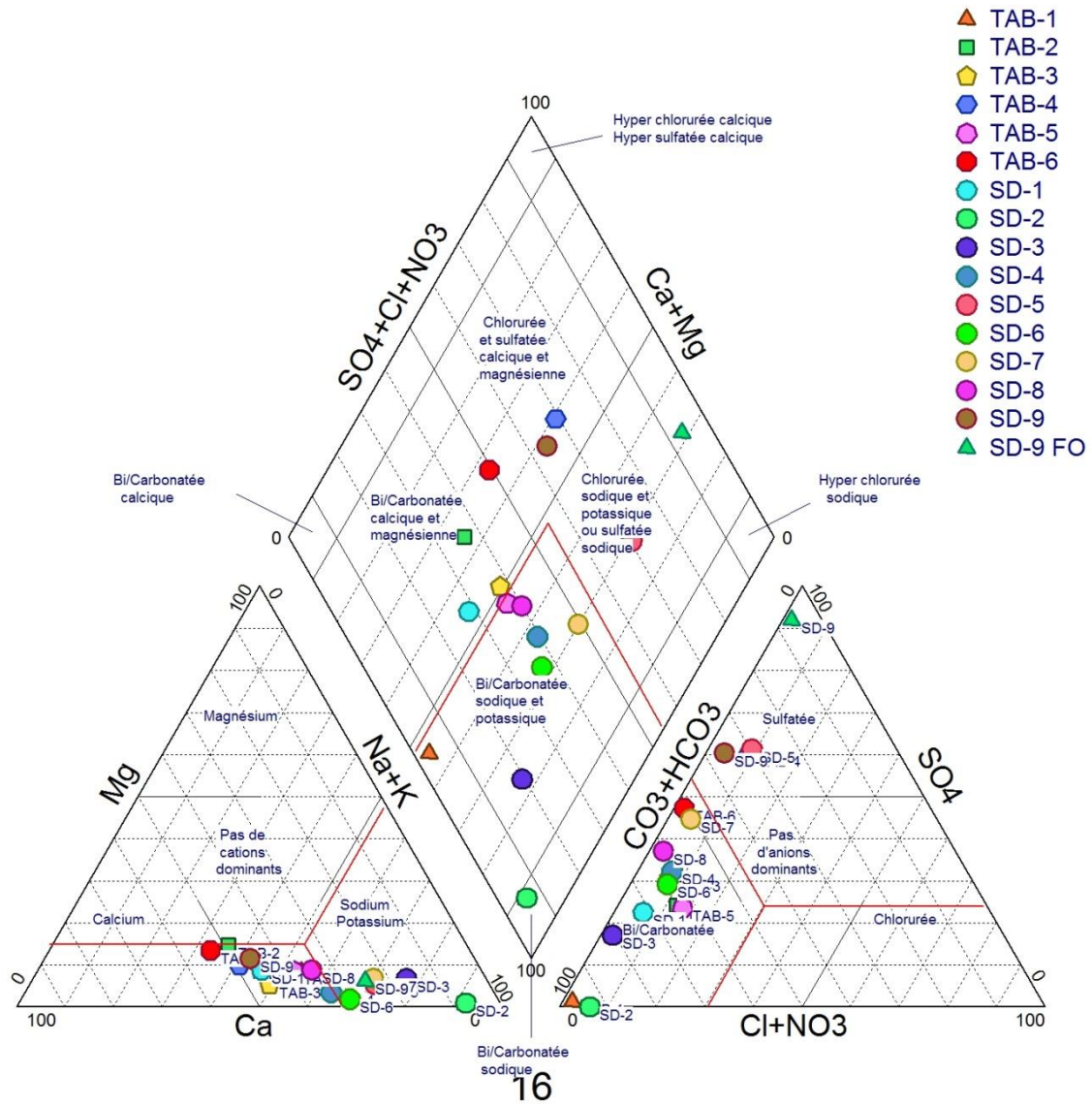


Figura V.8. Diagrama de Piper en verano

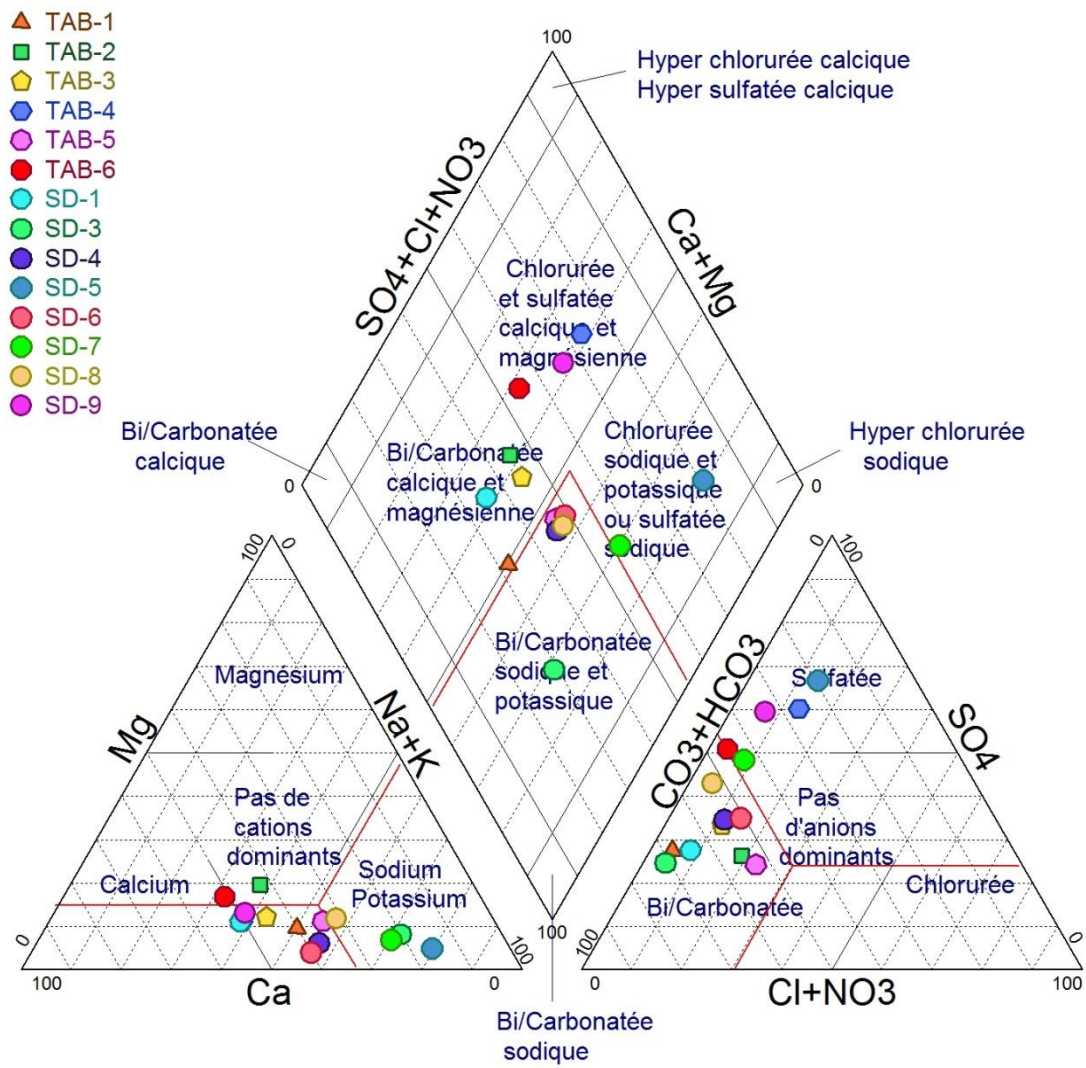
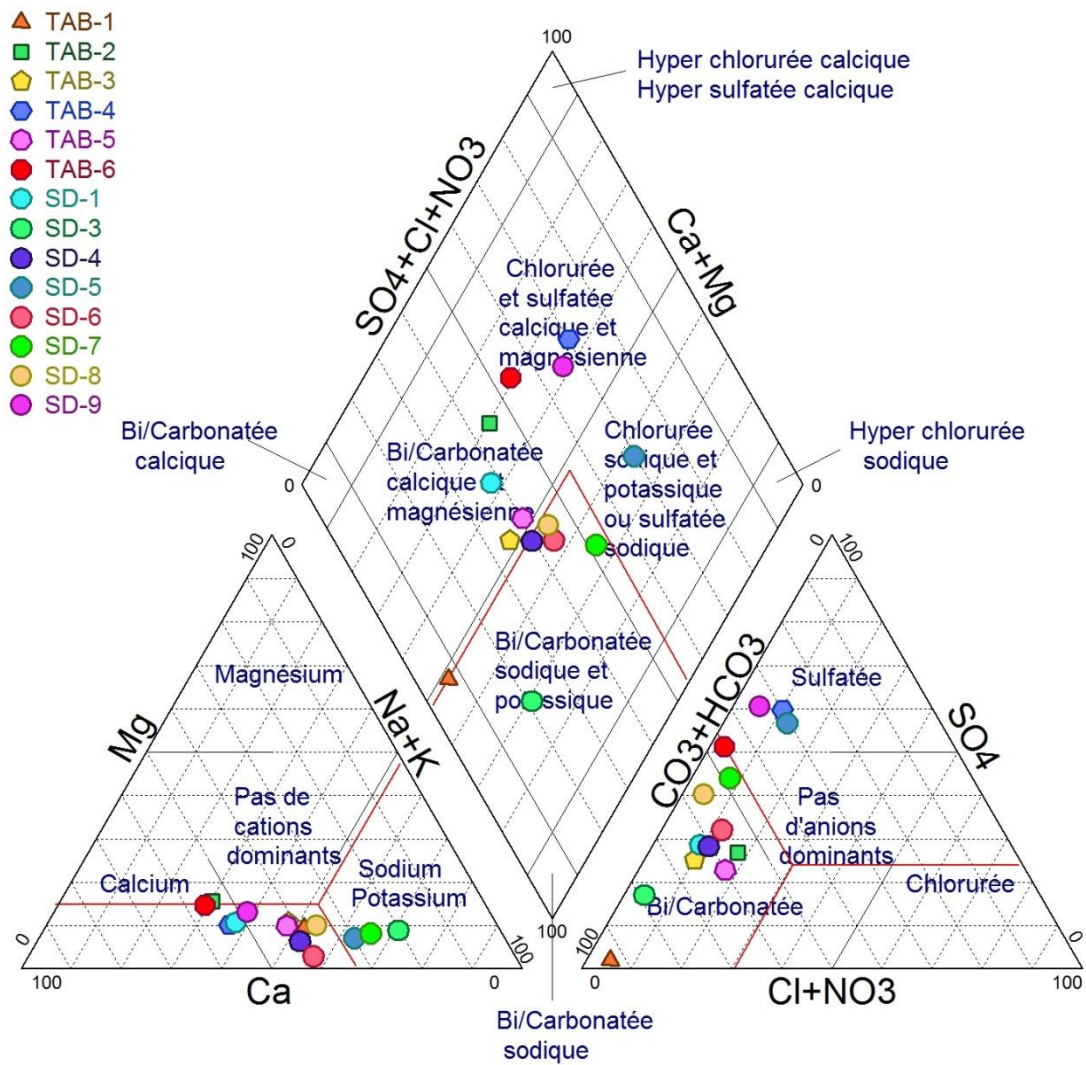


Figura V.9. Diagrama de Piper en otoño



VI. CONCLUSIONES

De acuerdo a la hipótesis planteada, se presentaron cambios en la calidad de agua relacionados con factores estacionales y actividades antropogénicas.

Con respecto a la agricultura y la variación estacional, se registró un aumento de concentraciones de N-NO_3^- y P en el agua de los pozos en verano y otoño, coincidiendo con la temporada de lluvias que podría influir en la lixiviación del fósforo y nitrógeno de los fertilizantes usados, y/o descargas de agua residual que terminan infiltrándose en los acuíferos.

En cuanto a la dureza, ésta disminuyó en verano posiblemente por efecto de las lluvias, la temperatura del agua disminuyó en otoño, el potencial óxido reducción y el Si aumentaron en primavera, estas cuatro variables se consideran de influencia geogénica.

Los contenidos de F^- y As rebasan la normatividad mexicana en lo referente al consumo humano. Del total muestreado, es decir 43 pozos, en 28 (65%) rebasan el límite permitido para fluoruros y 7 pozos (16%) para arsénico. En referencia al agua para uso agrícola 36 pozos (84%) rebasan la normatividad para fluoruros y 2 pozos (5%) para arsénico. En las tres estaciones y en ambos acuíferos.

En cuanto a la normatividad internacional de 43 pozos analizados en ambos acuíferos y las tres estaciones del año, 3 pozos (7%) para fluoruros rebasan el límite recomendable para uso potable y 21 (49%) rebasan el estándar secundario de daño estético de la normatividad de USA. Para arsénico 18 pozos (42%) rebasan la normatividad internacional de 0.010 mg/L.

En cuanto a la variación estacional. El F^- en verano con una media de 2.47 ± 0.3 mg/L ($P < 0.003$) y en otoño con una media de 2.31 ± 0.32 mg/L ($P < 0.01$) rebasan la norma mexicana de uso de consumo humano. El As rebasa la normatividad internacional en verano con una media de 0.019 ± 0.003 mg/L ($P < 0.008$).

En cuanto al tipo de agua se observa que varía estacionalmente en primavera predomina el agua de tipo bicarbonatada sódica. En el verano y otoño predomina la bicarbonatada-sódica-cálcica.



Durante el año, el tipo de agua predominante es bicarbonatada sódica, indicando una relación con la presencia de As y F-.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el estudio de otros componentes en el agua (elementos radiactivos). Así como incluir la determinación analítica de los elementos del presente trabajo en sedimentos, suelos y agua superficial, en relación a los pozos de muestreo en forma cuantitativa para complementar el presente estudio y dar seguimiento a la correlación entre el uso que se le da al suelo con la calidad del agua.

Es altamente recomendable dar seguimiento a través del tiempo a la variabilidad estacional de la calidad del agua a través del monitoreo de preferencia permanente a través de una red de monitoreo mediante la cual se actualice la información hidrogeoquímica. Con dicha información se podrán tomar las medidas adecuadas e implementar las medidas de prevención para el acuífero, así como de la tecnología requerida para darle la calidad recomendada para consumo humano.

Es de gran importancia que las autoridades encargadas de la administración del agua establezcan un control sobre la concesión de permisos para la perforación de pozos en la zona. Así como también el apoyo al desarrollo de proyectos por expertos en el área de hidrogeología.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón-Herrera, M. T. y otros, 2013. Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, Issue 262, pp. 960-969.
- Alarcón-Herrera, M. T., Reyes-Gómez, V. M., Gutiérrez, M. & Núñez-López, D., 2012. *Temporal variation and Co-occurrence of fluoride and arsenic in aquifers of the central semi-arid region of Chihuahua, Mexico*. Cairns, Australia: s.n.
- AWWA, 1990. *Water Quality and Treatment*. s.l.:McGraw-Hill, Inc.
- Chavez Aguirre, R., 1993. *Hidrogeología física y química de la porción centro-occidental del Valle Tabalaopa-Aldama, Chihuahua*. Chihuahua, México: UACH.
- Chavez, R., 1993. *Hidrogeología física y química de la porción centro-occidental del Valle Tabalaopa-Aldama, Chihuahua*. Chihuahua, México: UACH.
- CONAGUA, 2008. *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero 0835 Tabalaopa-Aldama, Estado de Chihuahua*, Distrito Federal, México: CONAGUA.
- CONAGUA, 2008. *DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRANEA EN EL ACUÍFERO 0836 ALDAMA-SANDIEGO, ESTADO DE CHIHUAHUA*, México, D.F.: CONAGUA.
- CONAGUA, 2010. *Estadísticas del Agua en México*. [En línea] Available at: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Capitulo_3.pdf [Último acceso: 15 Abril 2016].
- CONAGUA, 2011. *Las Ciencias de la Tierra en el Estudio del Agua Subterránea*, México D.F.: Gobierno.
- CONAGUA, 2012. *Censo 2012*, Chihuahua, Chih.: CONAGUA.
- CONAGUA, 2013. *Estudio Técnico Justificativo para el ordenamiento en el Acuífero 0835 TABALAOPA-ALDAMA*, Chihuahua: GOBIERNO.
- CONAGUA, 2014. *Estadísticas del Agua en México*, México, D.F.: Federación.
- CONAGUA, 2014. *GLOSARIO*, Distrito Federal: Gobierno .
- Cruz Medina, R., 2005. *Modelo hidrogeoquímico del Arsénico en el Acuífero Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, Chihuahua, México*. Chihuahua, México: UACH.

Cruz, R., 2005. *Modelo hidrogeoquímico del Arsénico en el Acuífero Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, Chihuahua, México*. Chihuahua, México: UACH.

Duran, C., 1980. *Fluoración en Abastecimiento de Agua Potable*. México, D.F.: UNAM.

EPA, 2009. *National Primary Drinking Water Regulations*. [En línea] Available at: www.epa.gov [Último acceso: 20 Marzo 2016].

EPA, 2013. *Basic Information about Arsenic in Drinking Water*. [En línea] Available at: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/arsenic.cfm> [Último acceso: 14 Abril 2015].

EPA, 2015. *Terminology Services (TS)*. [En línea] Available at: http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do?matchCriteria=Contains&checkedTerm=on&checkedAcronym=on&search=Search&term=water%20quality [Último acceso: 10 Noviembre 2015].

Espino-Valdés, M. S., Barrera-Prieto, Y. & Herrera-Peraza, E., 2009. Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *TECNOCENCIA*, 1(3), pp. 8-10.

Fields Museum, 2016. *Soil and Plants*. Chicago: s.n.

García, G., 2002. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. [En línea] Available at: <http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html> [Último acceso: 14 Abril 2015].

Gutiérrez, M., Martínez-Pina, C. & Luo, J., 2008. Geochemical processes contributing to the contamination of soil and surface waters in the Rio Conchos basin, Mexico. *Geosphere*, 4(3), p. 600–611.

Gutiérrez, M., Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T. & Núñez-López, D., 2012. Exploratory Analysis of Sediment Geochemistry to Determine the Source and Dispersion of Ba, Fe, Mn, Pb and Cu in Chihuahua, Northern Mexico. *Journal of Geography and Geology*, 4(4).

Gutiérrez, M., Alarcón-Herrera, M. T. & Camacho, L. M., 2009. Geographical distribution of arsenic in sediments within the Rio Conchos Basin, Mexico. *Environ Geol*, Issue 57, pp. 929-935.

IMPLAN, 2006. *Plan Sectorial de Agua Pluvial*, Chihuahua, Chih: Mpio.Chihuahua.

INECC, 2009. *Metales Pesados*. [En línea]
Available at: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>
[Último acceso: 8 Abril 2015].

INEGI, 2007. *Censo Agropecuario*. [En línea]
Available at: www.inegi.org.mx
[Último acceso: 14 Enero 2016].

INEGI, 2009. *Censos Económicos. Módulo de Medio Ambiente*. [En línea]
Available at: www.inegi.org.mx
[Último acceso: 14 Enero 2016].

INEGI, 2009. *Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación*, México: Gob.

INEGI, 2013. *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegaciones. Agua potable y saneamiento*. [En línea]
Available at: www.inegi.org.mx
[Último acceso: 14 Enero 2016].

Lenntech, 1998. *Water Treatment Solutions*. [En línea]
Available at: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/p.htm>
[Último acceso: 8 Abril 2015].

LENNTECH, 2016. *Tratamiento y purificación del agua*. [En línea]
Available at: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>
[Último acceso: 15 Enero 2016].

López-Ortiz, M., 2015. *Efectos de dilución y recarga* [Entrevista] (10 Diciembre 2015).

Moiseenko, T. I., Gashkina, N. A., Sharova, Y. N. & Kudryavtseva, L. P., 2008. Ecotoxicological assessment of water quality and ecosystem health: A case study of the Volga River. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Issue 71, p. 837–850.

Nerantzis , K. & Konstantinos , S. V., 2015. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, Issue 525, p. 13–25.

NIH, 2013. *Enfermedades Provocadas por el Ambiente de A a Z*. [En línea] Available at: <http://www.niehs.nih.gov/health/topics/atoz/enfermedades/> [Último acceso: 8 Abril 2015].

Ochoa Reyes, J. y otros, 2009. Arsenicismo subagudo y crónico en una población rural. *Dermatología Rev Mex*, 2(53), pp. 63-69.

Ongley, E. D., 1997. *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. [En línea] Available at: <http://www.fao.org/docrep/w2598s/w2598s00.htm> [Último acceso: 26 Mayo 2012].

ONU-DAES, 2014. *Decenio Internacional para la Acción "El agua fuente de vida 2005-2015"*. [En línea] Available at: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml> [Último acceso: 10 Noviembre 2015].

Ormachea Muñoz, M. y otros, 2015. Arsenic and other trace elements in thermal springs and in cold waters from drinking water wells on the Bolivian Altiplano. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 60, pp. 10-20.

Ortiz-Pérez, D. y otros, 2003. Fluoride-induced disruption of reproductive hormones in men. *Environmental Research*, 83(1), pp. 20-30.

Osuna, V. A., 1991. *Construcción de un modelo digital de flujo y diseño de una política de explotación óptima del acuífero Tabalaop-Aldama*. Tesis de maestría. Chihuahua, México: UACH.

Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A. & Pérez-Ceballos, R., 2004. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Revista UADY Ingeniería*, 2(8), pp. 165-179.

Reyes-Cortés, I. A., 1997. *Geologic Studies in the Sierra de Peña Blanca*. El Paso, Texas: The University of Texas at El Paso.

Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M. & Núñez-López, D., 2013. Fluoride and Arsenic in an Alluvial Aquifer System in Chihuahua, Mexico:

Contaminant Levels, Potential Sources, and Co-occurrence. *Springer Science*, 1433(224).

Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Núñez-López, D. & Cruz-Medina, R., 2010. Dinámica del arsénico en el Valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(1), pp. 21-31.

Rodríguez Pineda, J. A., 2000. *A GEOPHYSICAL, GEOCHEMICAL AND REMOTE SENSING INVESTIGATION OF THE WATER RESOURCES AT THE CITY OF CHIHUAHUA, MEXICO*, El Paso, Texas: THE UNIVERSITY OF TEXAS AT EL PASO.

Snedecor, G. & Cochran, W., 1984. *Métodos Estadísticos*. México: Continental S.A. de C.V..

Steel, R. & Torrie, J., 1980. *Bioestadística. Principios y Procedimientos*. 2da ed. Colombia: McGrawHill.

UACH, 1978. *Estudio Geohidrológico del Valle de Chihuahua, Primera Etapa*. Chihuahua, México: Secretaría de Educación Pública.

Universidad Sevilla, 2015. *Ambientum*. [En línea] Available at: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Dureza_de_agua_s.asp#

[Último acceso: 8 Abril 2015].

Villalba, L. y otros, 2013. Analysis of Health Risk Due to the Presence of Radioactivity and Chemical Elements in Groundwater, Aldama Municipality, Chihuahua, Mexico. *Journal of Environmental Protection*, Volumen 4|, pp. 1265-1271.



IX. ANEXOS

Gráfico IX.2. Dispersión de los valores de F⁻ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

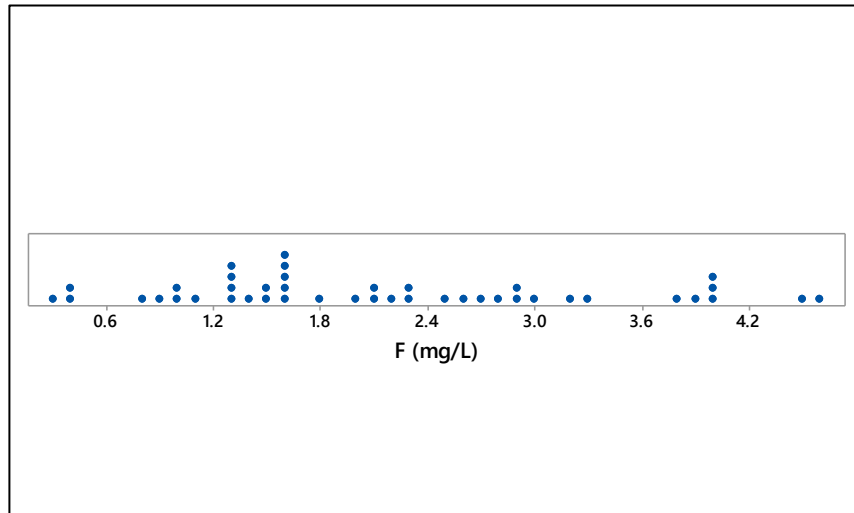


Gráfico IX.1. Dispersión de los valores de As (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

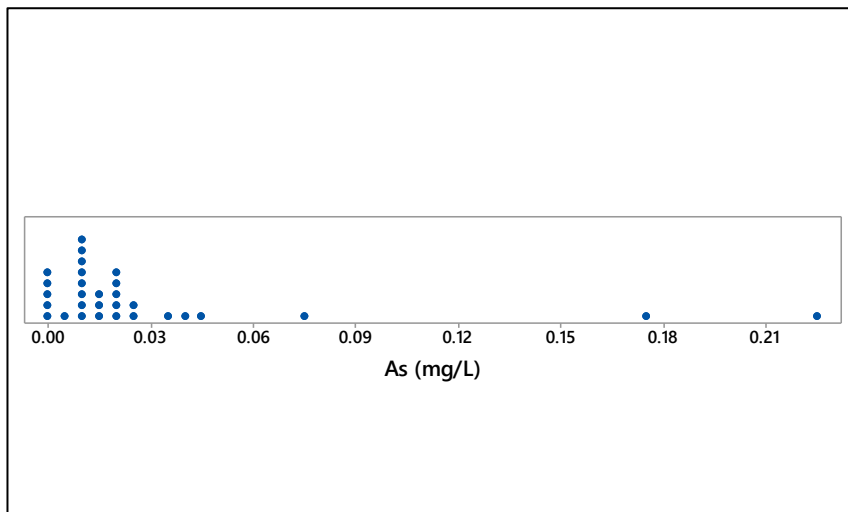


Gráfico IX.3. Dispersión de los valores de Na⁺ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

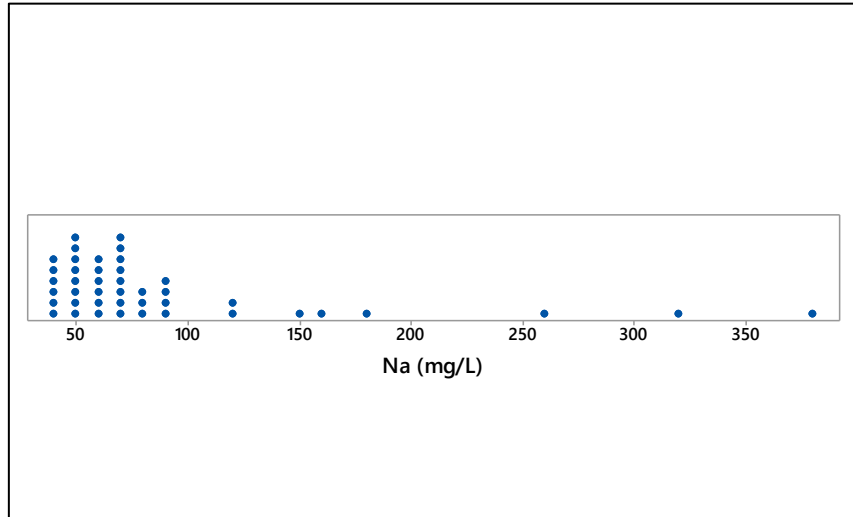


Gráfico IX.4. Dispersión de los valores de N-NO₃⁻ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

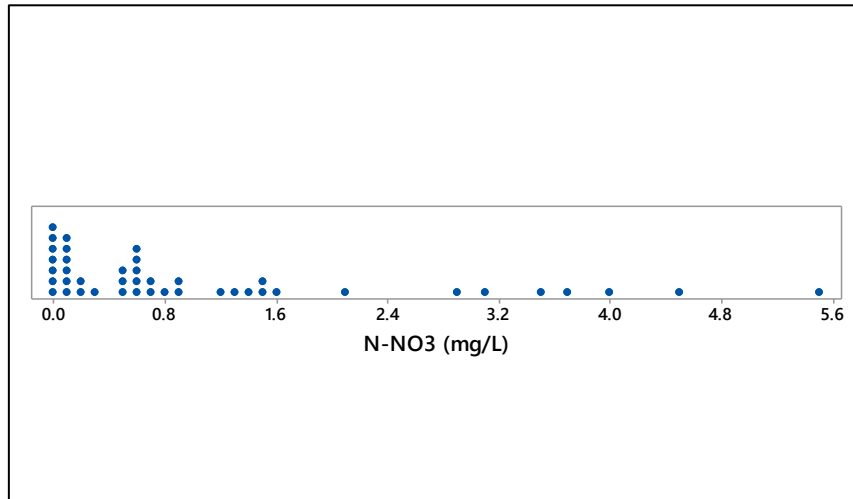


Gráfico IX.5. Dispersión de los valores de pH (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

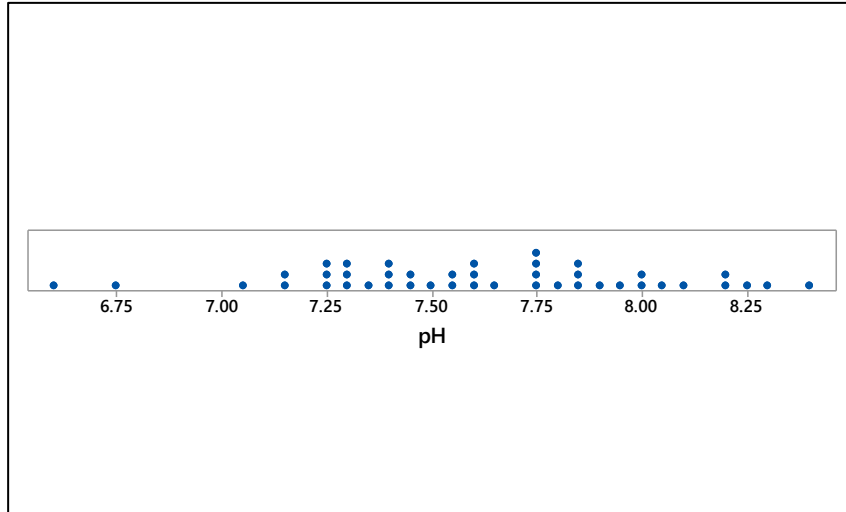


Gráfico IX.6. Dispersión de los valores de T.S.D. (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

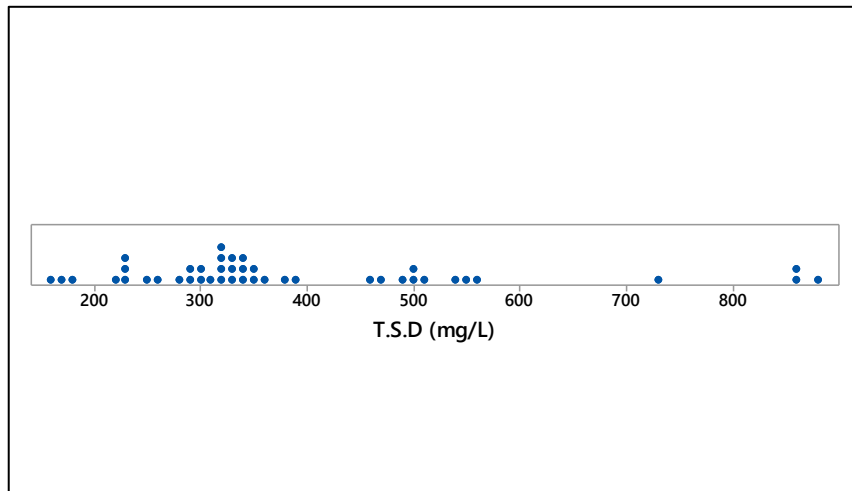


Gráfico IX.7. Dispersión de los valores de P (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

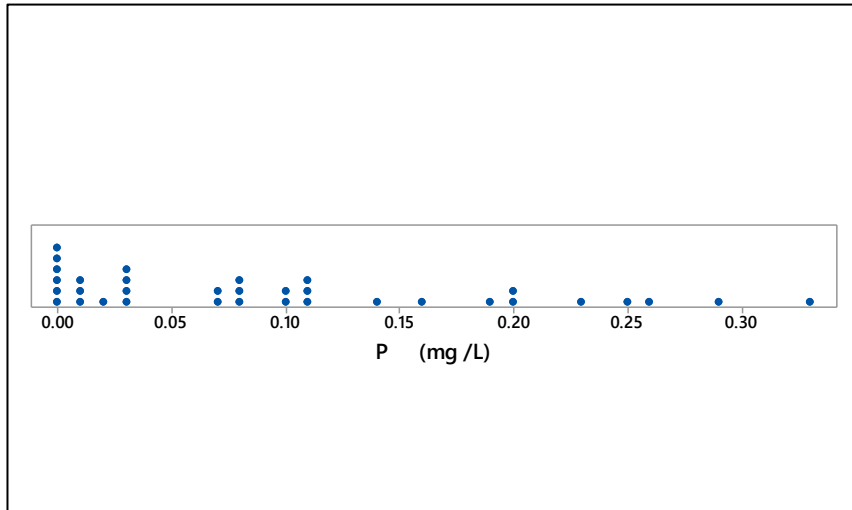


Gráfico IX.8. Dispersión de los valores de SO_4^- (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

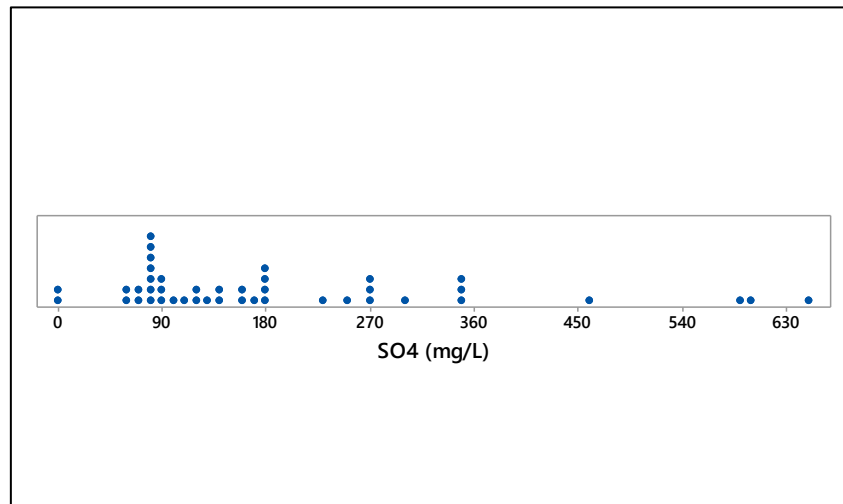


Gráfico IX.9. Dispersión de los valores de Cd (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

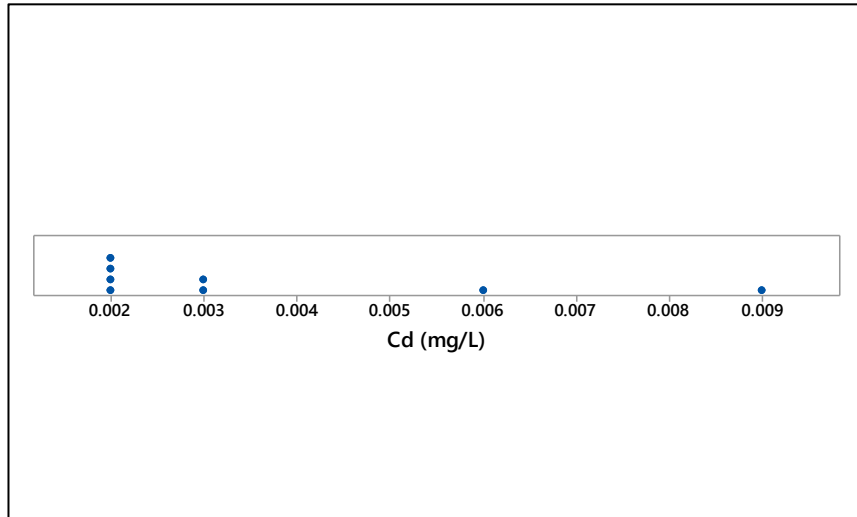


Gráfico IX.10. Dispersión de los valores de dureza total (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

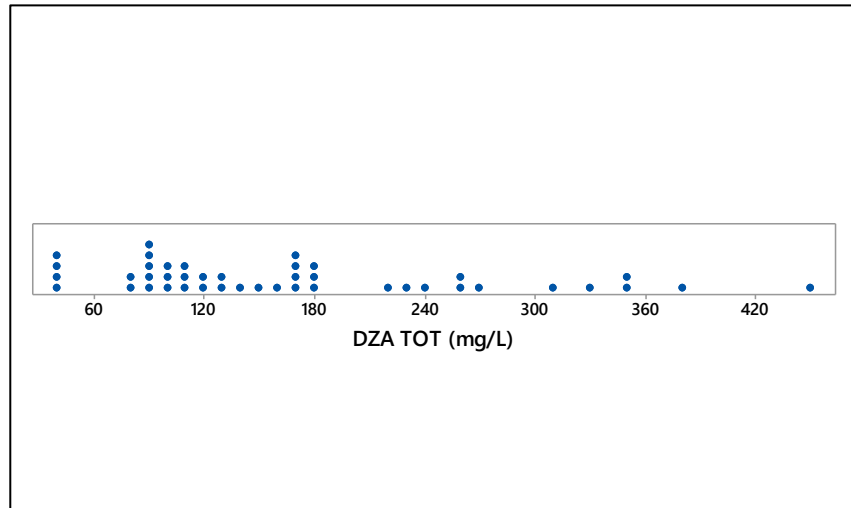




Gráfico IX.12. Dispersión de los valores de Al (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

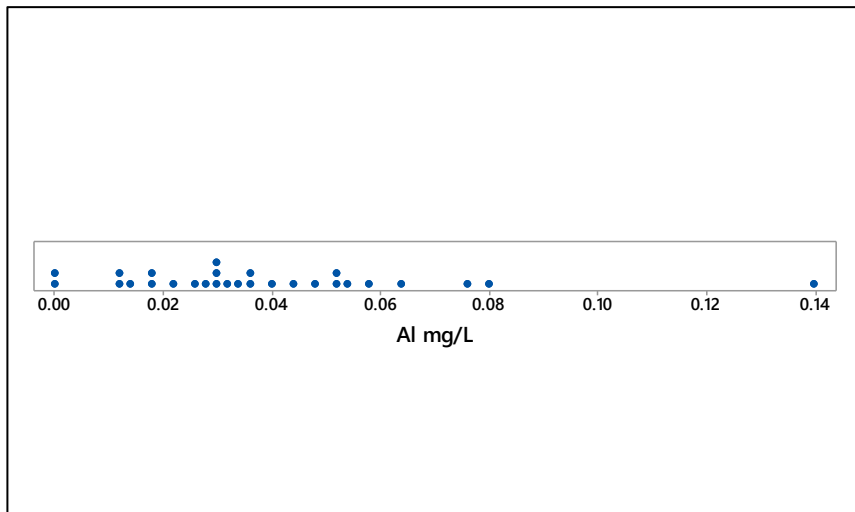


Gráfico IX.11. Dispersión de los valores de Fe (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

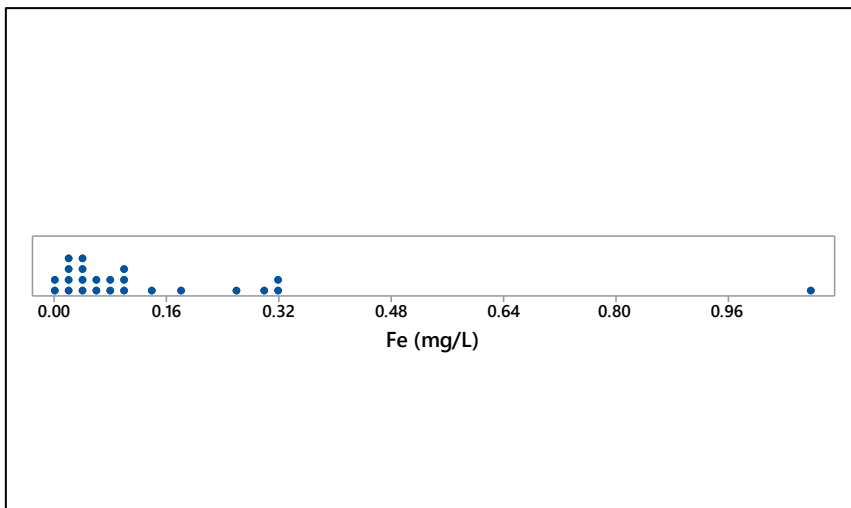


Gráfico IX.13. Dispersión de los valores de Mg^+ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

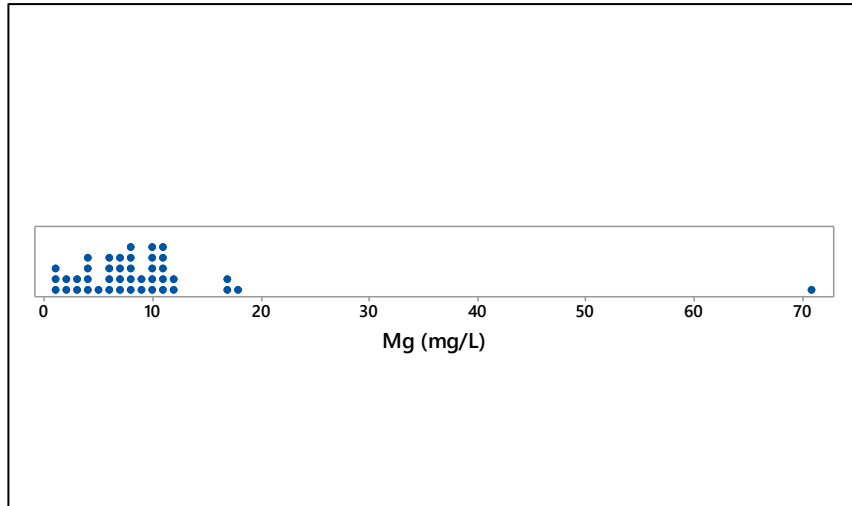


Gráfico IX.14. Dispersión de los valores de Zn^+ (mg/L) en las muestras seleccionadas en los dos acuíferos durante las tres estaciones del año

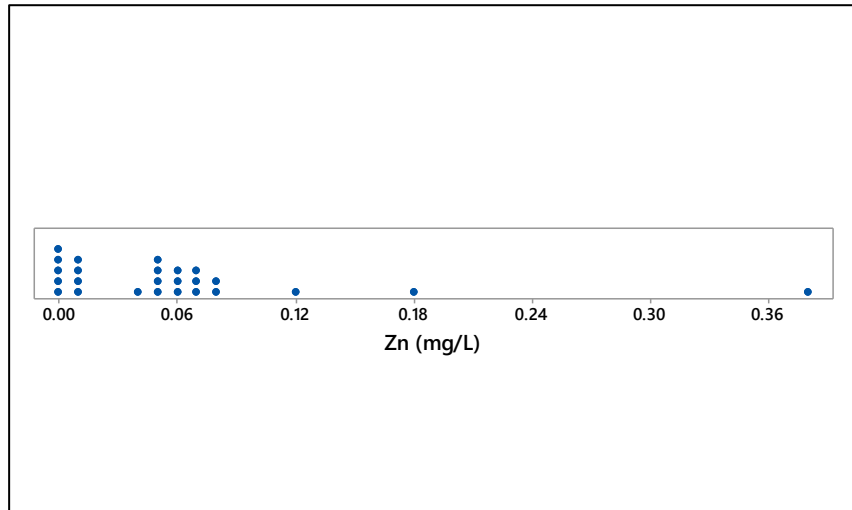


Gráfico IX.15. Variación estacional con sus barras de error estándar del $N-NO_3^-$

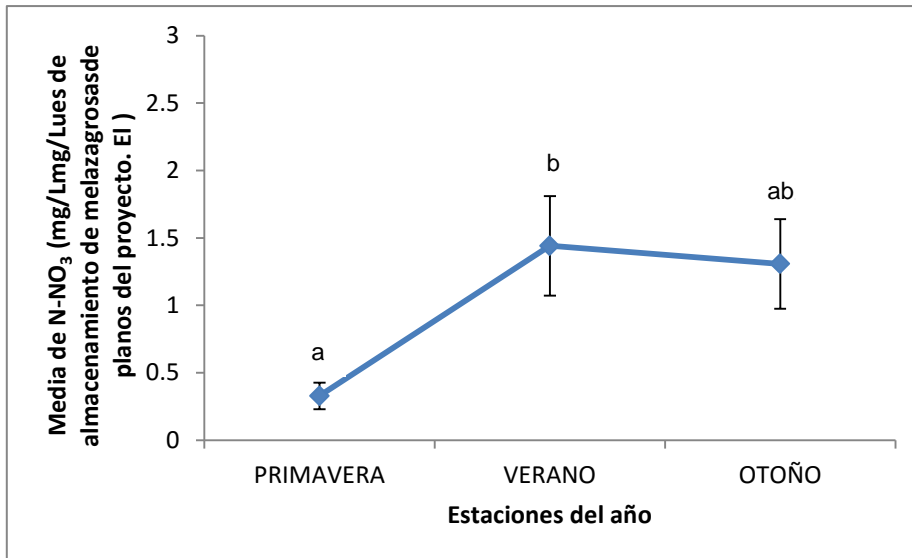


Gráfico IX.16. Variación estacional con sus barras de error estándar del P

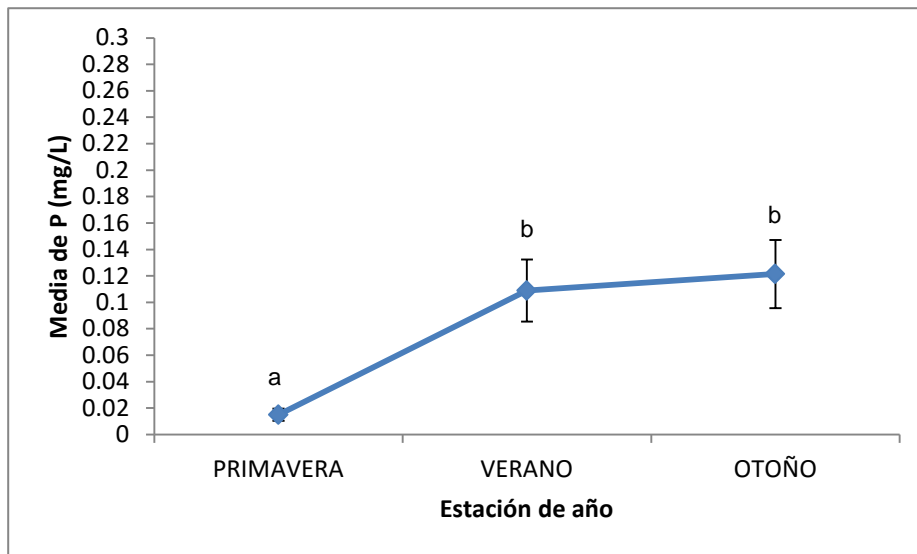


Gráfico IX.17. Variación estacional con sus barras de error estándar de la dureza total

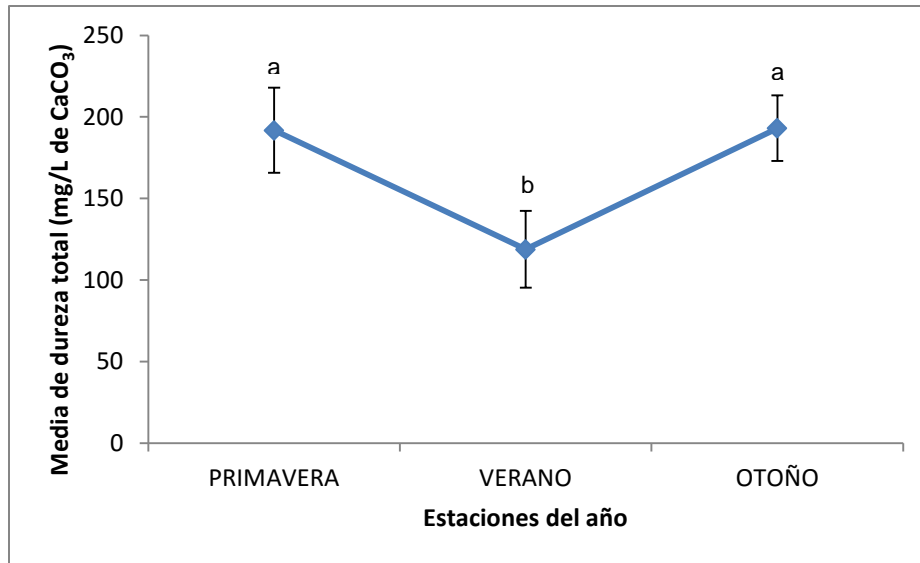


Gráfico IX.18. Variación estacional con sus barras de error estándar de la temperatura del agua

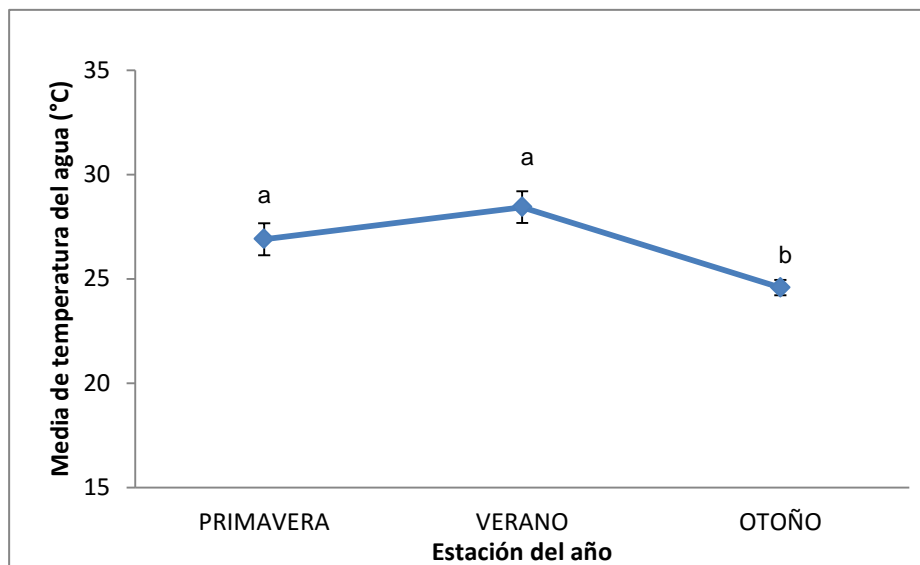


Gráfico IX.19. Variación estacional con sus barras de error estándar del P.O.R.

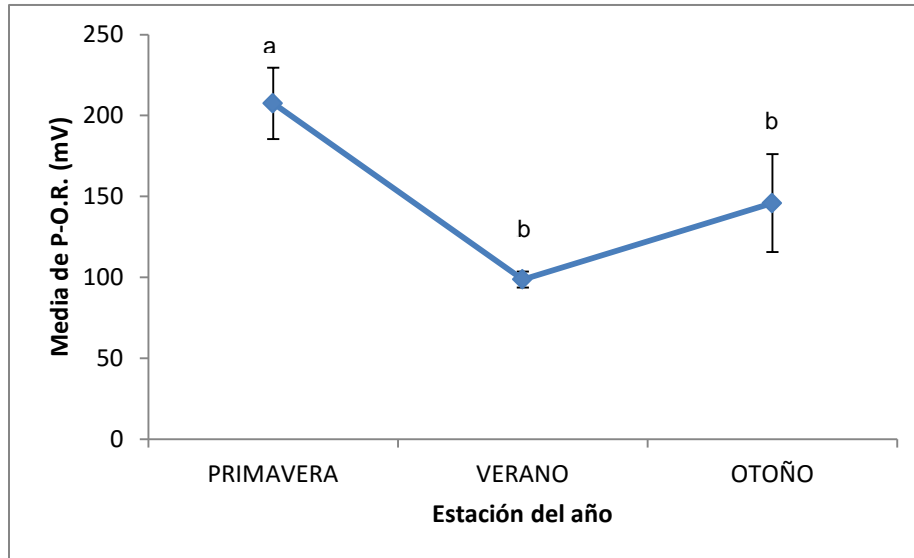


Gráfico IX.20. Variación estacional con sus barras de error estándar del Si

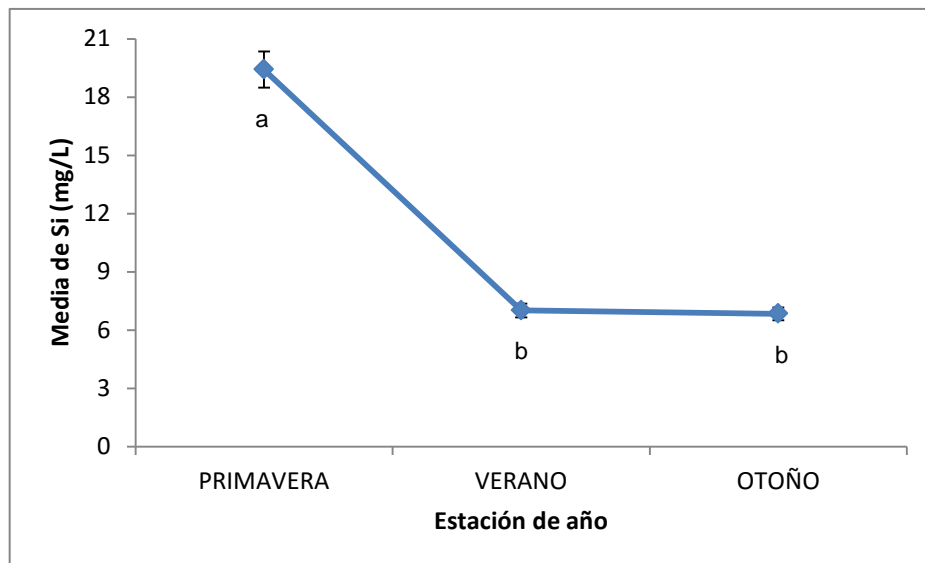


Figura IX.10. Distribución espacial de las concentraciones de N-NO₃

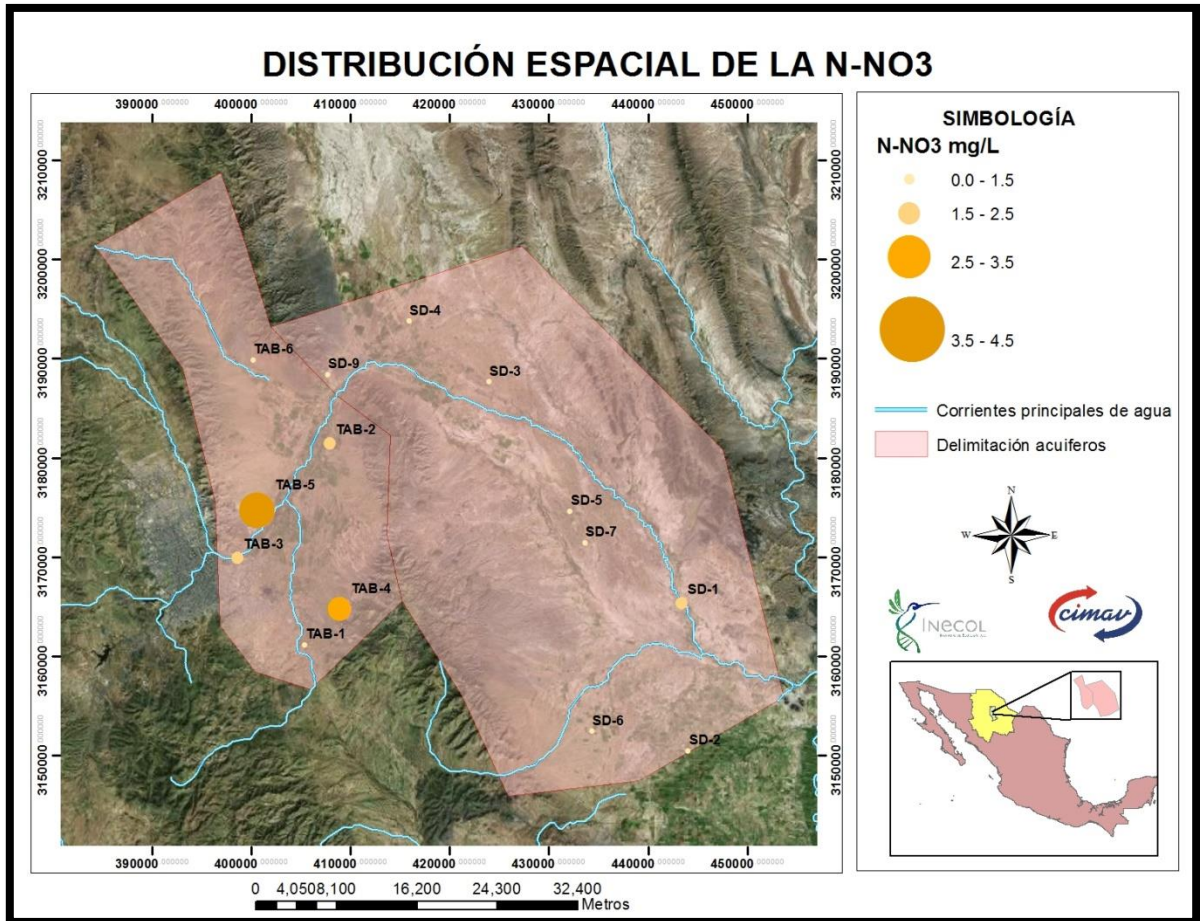
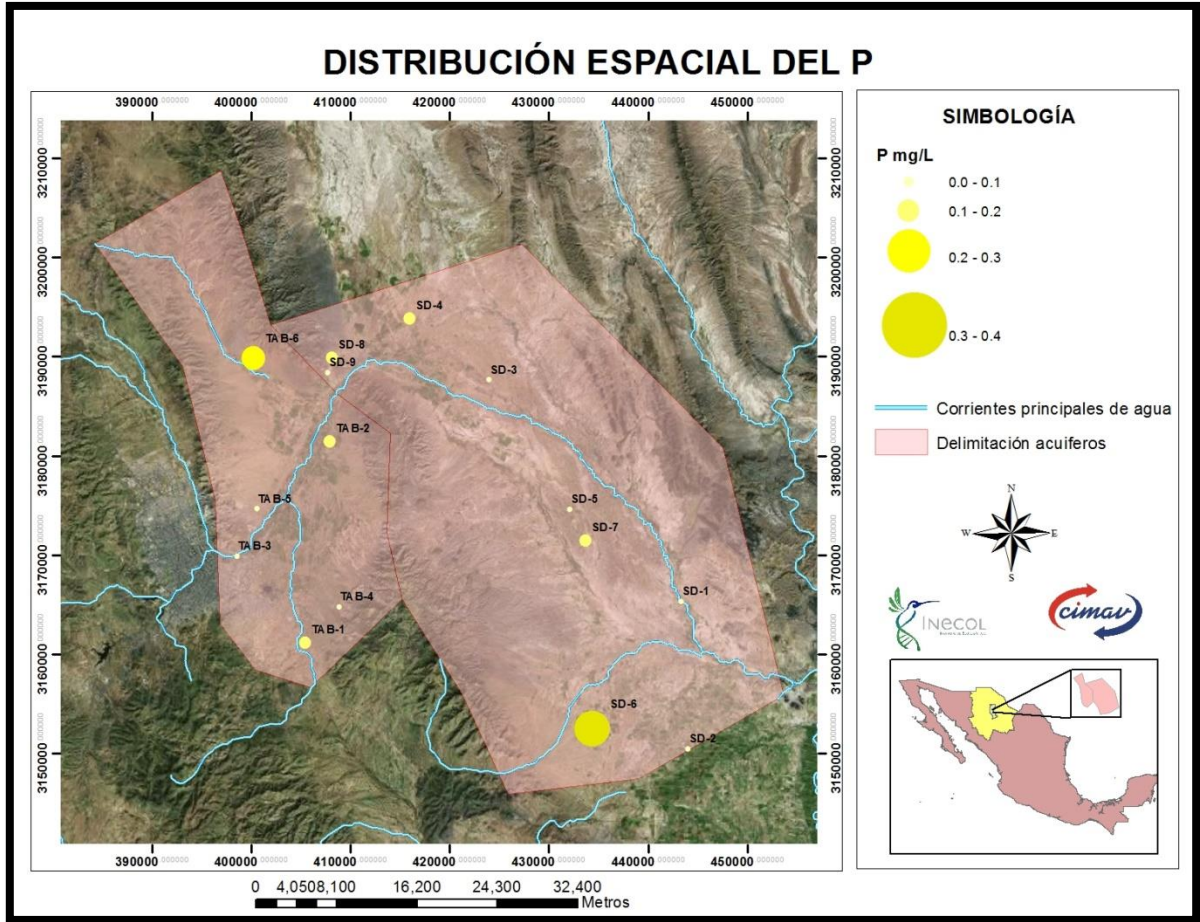


Figura IX.11. Distribución espacial de las concentraciones de P





X. APENDICE



Apéndice X.1. Tabla de atributos de puntos seleccionados del Acuífero Tabalaopa-Aldama

CLAVE CIMAV	CLAVE CNA	DEPENDENCIA	X	Y	msnm	PROPIETARIO	TIPO DE APRO-VECHAMIENTO	USO	TIPO DE DESCARGA
TA-1	A020	JUNTA CENTRAL	405417.64	3161205.62 9	1491	EMYCSA (Javier Prieto, Manuel Gaytán, Jaime Cruz)	POZO	CONSUMO HUMANO, PERO LA FILTRAN	A LA RED
TA-2	C025	JUNTA CENTRAL	407878.98	3181468.75 3	1329	Rancho Largo, Ejido Aldama (Roberto Mendoza)	POZO	CONSUMO HUMANO, DOMÉSTICO	A LA RED
TA-3	C102 ROBINSON2	JUNTA MPAL.	398595.7	3169939.56	1395	Calle Progreso 7107	LLAVE	PUBLICO-URBANO, CONSUMO HUMANO, DOMÉSTICO, POSIBLEMENTE CLORADA	A LA RED
TA-4	TA 062/TA 053	JUNTA CENTRAL	408874.52	3164816.14 3	1486		POZO	PUBLICO-URBANO, POSIBLEMENTE CLORADA	MIXTA (RED Y TANQUE)
TA-5			400598.56	3174711.16 8	1377	Asociación Valle de Chihuahua A.C.	POZO	CONSUMO DOMÉSTICO, NO CLORADO	A LA RED
TA-6	P-249		400199.00	3189908.00	1398	Mimbres de Abajo	POZO	CONSUMO HUMANO, GANADERO	TANQUE ELEVADO Y POSIBLEMENTE CLORADO



Apéndice X.2. Tabla de atributos de puntos seleccionados del Acuífero Aldama-San Diego

CLAVE CIMAV	CLAVE CNA	X	Y	msnm	PROPIETARIO	TIPO DE APROVECHA-MIENTO	USO	TIPO DE DESCARGA	CULTIVOS
SD-1	ASD - SI 53	443380.47	3165376.86	1125	Rancho El Coyote (Dueño Carlos Rubén Acosta, Capataz Carlos Sandoval)	NORIA	CONSUMO DOMÉSTICO, CONSUMO HUMANO	A LA RED	NOGALES
SD-2	ASD - 058	444062	3150501	1171	MODULO 8 DE ROSALES	POZO	AGRICOLA, CONSUMO HUMANO	DESCARGA A CANAL DE RIEGO PARA 4795 has	ALFALFA, ALGODÓN, CHILE, CACAHUATE, NOGAL
SD-3	ASD-AL 18	424000.12	3187707.700	1228		PAPALOTE	PECUARIO, GANADERO	TANQUE ELEVADO	
SD-4		415959	3193826	1247	Señor Miguel Barraza, del R. La Victoria. Nos llevó al rancho del menon.	POZO	GANADERO, CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO	TANQUE ELEVADO	-----
SD-5		432156.036	3174654.03	11876	R. En Medio (Capataz Marcelino Rodríguez. Esposa María)	POZO	RIEGO		
SD-6		434373.00	3152500.00	1202	Rancho Santa Elena, (Dueño Eduardo Ramírez, capataz Martin Reyes)	POZO	CONSUMO HUMANO, RIEGO, GANADERO	A LA RED	NOGAL, DURAZNO



Variación estacional de la calidad del agua acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Aldama-San Diego

SD-7		433641.33	3171484.77			PAPALOTE			
SD-8	P-019 EC	408148.65	3189888.45	1288	Joel El encargado que nos atendió	POZO	USO PARA LA ALBERCA, AGRICOLA, CONSUMO HUMANO	A LA RED	NOGAL
SD-9	P-214-TA	407739.21	3188426.98	1325	Eduardo (papá), encargados : Aron, Eva, María Elena Álvarez Flores	POZO	CONSUMO HUMANO	A LA RED	

Apéndice X.3. Vegetación de acuíferos

Matorral Desértico Micrófilo. Es el tipo de matorral de zonas áridas y semiáridas de mayor distribución en México, formado por arbustos de foliolo pequeño. Se desarrolla principalmente sobre terrenos aluviales más o menos bien drenados y puede estar formado por asociaciones de especies sin espinas, con espinas o mezclados; asimismo pueden estar en su composición otras formas de vida, como cactáceas, izotes o gramíneas. La distribución de este matorral se extiende a las zonas más secas de México, y en áreas en que la precipitación es inferior a 100 mm anuales. *Larrea* y *Ambrosia* constituyen 90 a 100% de la vegetación en áreas de escaso relieve, pero a lo largo de las vías de drenaje o en lugares con declive pronunciado aparecen arbustos como, especies de *Prosopis*, *Cercidium*, *Olneya*, *Condalia*, *Lycium*, *Opuntia*, *Fouquieria*, *Hymenoclea*, *Acacia*, *Chilopsis*, etcétera.

Larrea a menudo es la única dominante, otras veces, junto con *Flourensia*, forma 80 a 100% de la vegetación; los matorrales de pura *Flourensia* son menos frecuentes. Una buena parte del área de distribución de esta vegetación está ocupada por muchos distritos de riego, además de existir ganadería extensiva y explotación forestal (INEGI, 2009).

Pastizal Natural. Es una comunidad dominada por especies de gramíneas, en ocasiones acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes familias, como son: compuestas, leguminosas, etc. Su principal área de distribución se localiza en la zona de transición entre los matorrales xerófilos y la zona de bosques. El Pastizal Natural se desarrolla de preferencia en suelos medianamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi siempre de naturaleza ígnea, en altitudes entre 1 100 y 2 500 m. La precipitación media anual es del orden de los 300 a 600 mm, con 6 a 9 meses secos y la humedad atmosférica se mantiene baja durante la mayor parte del año. Los suelos propios de estos pastizales son en general neutros (pH 6 a 8), con textura que varía de migajón arcilloso a migajón arenoso y coloración rojiza a café. Por lo común son suelos fértiles y medianamente ricos en materia orgánica. Se erosionan con facilidad cuando se encuentran en declive y carecen de suficiente protección por parte de la

vegetación. Los pastizales en cuestión son generalmente de altura media, de 20 a 70 cm, aunque a causa del intenso pastoreo se mantienen casi siempre más abajo. La coloración amarillenta pálida es característica durante la mayor parte del año y la comunidad solo reverdece en la época más húmeda (INEGI, 2009).

Son frecuentemente dominantes o codominantes en las asociaciones las especies del género *Bouteloua* y la más común de todas es *Bouteloua gracilis*, que prevalece en amplias extensiones del pastizal, sobre todo en sitios en que el sobrepastoreo no ha perturbado demasiado las condiciones originales y preferentemente en suelos algo profundos. En laderas pendientes, con suelo somero y pedregoso, a menudo son más abundantes *Bouteloua curtipendula* y *Bouteloua hirsuta*, en algunas zonas pueden también funcionar como dominantes o codominantes: *Bouteloua eriopoda* y *Bouteloua scorpioides*; aparentemente resultan favorecidas por un pastoreo intenso, desplazando en ciertas áreas a *Bouteloua gracilis*. Por sus características este tipo de vegetación es el más explotado desde el punto de vista pecuario a base de ganado vacuno, lo que ha provocado que la mayoría de estas comunidades estén muy perturbados y en algunos casos hayan sido sustituidas por diversos arbustos y/o hierbas (INEGI, 2009).

Agricultura de temporal. Se clasifica como tal al tipo de agricultura de todos aquellos terrenos en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende del agua de lluvia, por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua, su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo, que puede llegar a más de diez años, en el caso de los frutales, o bien son por periodos dentro de un año como los cultivos de verano. Incluye los que reciben agua invernal como el garbanzo. Estas zonas, para ser clasificadas como de temporal deberán permanecer sembradas al menos un 80% del ciclo agrícola.

Pueden ser áreas de monocultivo o de policultivo y pueden combinarse con pastizales o bien estar mezcladas con zonas de riego, lo que conforma un mosaico complejo, difícil de separar, pero que generalmente presenta dominancia de los cultivos cuyo crecimiento depende del agua de lluvia (INEGI, 2009).

Vegetación Halófila. La constituyen comunidades vegetales arbustivas o herbáceas que se caracterizan por desarrollarse sobre suelos con alto contenido de sales, en partes bajas de cuencas cerradas de las zonas áridas y semiáridas, cerca de lagunas costeras, área de marismas, etcétera. Esta comunidad se caracteriza por especies de baja altura y por la dominancia de pastos rizomatosos y tallos rígidos, además de una escasa cobertura de especies arbustivas. Las especies más abundantes corresponden estrictamente a halófitas como chamizo (*Atriplex spp.*), romerito (*Suaeda spp.*), vidrillo (*Batis maritima*), hierba reuma (*Frankenia spp.*), alfombrilla (*Abronia maritima*) y lavanda (*Limonium spp.*). Otras especies capaces de soportar estas condiciones son verdolaga (*Sesuvium spp.*), zacate toboso (*Hilaria spp.*), zacate (*Eragrostis obtusiflora*), entre varias más (INEGI, 2009).

El uso principal de algunas especies de esta comunidad son alimento para el ganado bovino, tal es el caso del chamizo (*Atriplex spp.*) y algunas especies de pastos como zacate toboso (*Hilaria sp.*) y zacate (*Eragrostis obtusiflora*). La succulencia es una característica frecuente en las halófitas de familias diferentes, así como la reproducción vegetativa y la alta presión osmótica (INEGI, 2009).

Matorral Desértico Rosetofilo. Este matorral está dominado por especies con hojas en roseta, con o sin espinas, sin tallo aparente o bien desarrollado. Se le encuentra generalmente sobre xerosoles de laderas de cerros de origen sedimentario, en las partes altas de los abanicos aluviales o sobre conglomerados en casi todas las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste del país. Aquí se desarrollan algunas de las especies de mayor importancia económica de esas regiones áridas como: *Agave lechuguilla* (Lechuguilla), *Euphorbia antisiphylitica* (Candelilla), *Parthenium argentatum* (Guayule), *Yucca carnerosana* (Palma samandoca), etcétera. Entre sus acompañantes destaca por su abundancia *Agave shawii*, así como arbustos diversos, muchos de los cuales sobrepasan notablemente la altura de *Ambrosia*, como por ejemplo *Fouquieria columnaris*, *Yucca valida*, *Pachycereus pringlei*, *Myrtillocactus cochal*, etc. (INEGI, 2009).

En altitudes superiores a 500 m el papel de *Larrea* se vuelve más importante. Algunos de los principales usos de este tipo de vegetación son: la obtención de fibras vegetales útiles en cordelería y jarcería en general, y la celulosa para papel; también sirven para la elaboración de bebidas alcohólicas y alimento para ganado. Además de este tipo de explotación forestal, hay mucha actividad ganadera, principalmente con caprinos (INEGI, 2009).

Bosque de Pino-Encino. Esta comunidad, junto con los bosques de encino-pino se considera fases de transición en el desarrollo de bosques de pino o encino puros. Este tipo de bosque se distribuye ampliamente en la mayor parte de la superficie forestal de las partes altas de los sistemas montañosos del país, la cual está compartida por las diferentes especies de pino (*Pinus spp.*) y encino (*Quercus spp.*); siendo dominantes los pinos. Algunas de las especies más comunes son pino chino (*Pinus leiophylla*), pino (*P. hartwegii*), ocote blanco (*P. montezumae*), pino lacio (*P. pseudostrobus*), pino (*P. rudis*), pino escobetón (*P. michoacana*), pino chino (*P. teocote*), ocote trompillo (*P. oocarpa*), pino ayacahuite (*P. ayacahuite*), pino (*P. pringlei*), *P. duranguensis*, *P. P. duranguensis*, *P. chihuahuana*, *P. engelmannii*, *P. lawsoni*, *P. oaxacana*, encino laurelillo (*Quercus laurina*), encino (*Q. magnoliifolia*), encino blanco (*Q. candicans*), roble (*Q. crassifolia*), encino quebracho (*Q. rugosa*), encino tesmilillo (*Q. crassipes*), encino cucharo (*Q. urbanii*), charrasquillo (*Q. microphylla*), encino colorado (*Q. castanea*), encino prieto (*Q. laeta*), laurelillo (*Q. mexicana*), *Q. glaucoides*, y *Q. scytophylla* (INEGI, 2009).

Pastizal inducido. Es aquel que surge cuando es eliminada la vegetación original. Este pastizal puede aparecer como consecuencia de desmonte de cualquier tipo de vegetación; también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. Son de muy diversos tipos y aunque cabe observar que no hay pastizales que pudieran considerarse como totalmente libres de alguna influencia humana, el grado de injerencia del hombre es muy variable y con frecuencia difícil de estimar. A

consecuencia del pastoreo intenso o de los fuegos periódicos, o bien de ambos factores juntos, se detiene a menudo el proceso de la sucesión y el pastizal inducido permanece como tal mientras perdura la actividad humana que lo mantiene. Otras veces el pastizal inducido no forma parte de ninguna serie normal de sucesión de comunidades, pero se establece y perdura por efecto de un intenso y prolongado disturbio, y muchas con ayuda de algún factor del medio natural, como, por ejemplo, la tendencia a producirse cambios en el suelo que favorecen el mantenimiento del pastizal. De esta manera se tiene la categoría de pastizales inducidos que prosperan una vez destruidos los bosques de *Pinus* y de *Quercus*. En altitudes superiores a 2 800 m las comunidades secundarias frecuentemente son similares al Pastizal de Alta Montaña, formado por gramíneas altas que crecen en extensos macollos. Los géneros *Festuca*, *Muhlenbergia*, *Stipa* y *Calama-grostis* son los más típicos de estos pastizales que, además de su interés ganadero, son aprovechados también a través de raíz de zacatón, materia prima para la elaboración de escobas que proporcionan las partes subterráneas de *Muhlenbergia*. Por debajo de los 3 000 m de altitud, los pastizales inducidos derivados de los Bosques de *Quercus* y *Pinus*, son mucho más variados y en general no presentan la fisonomía de macollos muy amplios, pudiendo variar de bajos a bastante altos, a menudo en función del clima. Entre los géneros a que pertenecen las gramíneas dominantes pueden citarse: *Andropogon*, *Aristida*, *Bouteloua*, *Bromus*, *Deschampsia*, *Hilaria*, *Muhlenbergia*, *Stipa*, *Trachypogon* y *Trisetum*. Menos frecuentes o quizá fáciles de identificar parecen ser los pastizales originados a expensas de Matorrales Xerófilos y aun de otros Pastizales. Los géneros *Buchloe*, *Erioneuron*, *Aristida*, *Lycurus* y *Bouteloua* contienen con frecuencia las especies dominantes (INEGI, 2009).

Las dominantes más comunes que aparecen después de ser sometidos a fuegos frecuentes y la acción del pisoteo, por el largo periodo de sequía hace que tengan un color amarillo pajizo durante más de 6 meses, pertenecen a los géneros: *Bouteloua*, *Cathestecum*, *Hilaria*, *Trachypogon* y *Aristida*. También son abundantes algunas leguminosas. Algunas otras especies de gramíneas que llegan a formar comunidades de pastizal inducido, son: *Aristida adscensionis*

(Zacate tres barbas), *Erioneuron pulchellum* (Zacate borreguero), *Bouteloua simplex*, *Paspalum notatum* (Zacate burro), *Cenchrus spp.* (Zacate cadillo o Roseta), *Lycurus phleoides*, *Enneapogon desvauxii* y otros. No es rara la presencia ocasional de diversas hierbas, arbustos y árboles (INEGI, 2009).

Agricultura de riego. Estos agrosistemas utilizan agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola, por lo que su definición se basa principalmente en la manera de cómo se realiza la aplicación del agua, por ejemplo la aspersión, goteo, o cualquier otra técnica, es el caso del agua rodada (distribución del agua a través de surcos o bien tubería a partir de un canal principal y que se distribuye directamente a la planta), por bombeo desde la fuente de suministro (un pozo, por ejemplo) o por gravedad cuando va directamente a un canal principal desde aguas arriba de una presa o un cuerpo de agua natural (INEGI, 2009).

Apéndice X.4. Nivel de significancia de la prueba de normalidad Anderson-Darling para las principales variables de estudio

