

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS
EN LA ZONA DE MULALÓ: ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE
LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL.**

ANAHÍ EMILY LARA MENA

**DIRECTOR: XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
DMQ, septiembre 2022**

CERTIFICACIONES

Yo, Anahí Emily Lara Mena declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ANAHÍ EMILY LARA MENA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Anahí Emily Lara Mena, bajo mi supervisión.

XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE_REVISOR1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE_REVISOR2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ANAHÍ EMILY LARA MENA

XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con mucho amor a la memoria de “El Loco Mena”, mi abuelo y Zulema, mi mamá.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darme el valor y la fortaleza a lo largo de mi vida universitaria.

A mis hermanas, Ma. Belén y Carolina, por su constante guía, respaldo, aliento y amor. Ustedes, ejemplo de mujeres valientes y esforzadas, que caminaron a mi lado desde muy pequeñas se los debo todo, porque hoy por hoy sin ustedes esto no hubiera sido posible. Las amo con todo mi corazón.

A mi familia, Patricio, Gina, Kevin y Camila, por estar presentes y acompañarme en este camino.

Eternamente agradecida con las profesoras y los profesores quienes fueron amigas y amigos e hicieron este camino más agradable y sus enseñanzas trascendieron las aulas: Verónica Minaya, Xavier Zapata, Carla Manciatì, Ma. Belén Aldás, Gissela Vilaña, Ana Balarezo, Lenin Campozano, Narcisa Romero y Roberto Cazco.

Finalmente, agradezco por la amistad de Katherine, Diana Belén, Jorge, Sebastián, Nicole y Alondra Belén. Gracias por permitirme compartir este arduo camino con ustedes y llenarlo de innumerables experiencias que se quedan conmigo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Agua Subterránea.....	3
1.4.2 Acuíferos	4
1.4.3 Calidad del Agua.....	4
1.4.4 Diagrama de Piper	5
1.4.5 Diagrama de Wilcox.....	6
1.4.6 Sistemas de Información Geográfica	7
1.4.7 CHIRPS.....	8

2	MÉTODOS.....	8
2.1	Zona de Estudio.....	8
2.2	Análisis hidroquímico del agua subterránea.....	10
2.2.1	Recopilación y tratamiento de datos	10
2.2.2	Diagrama de Piper	11
2.2.3	Diagrama de Wilcox.....	12
2.2.4	Datos espaciales y temporales.....	12
2.2.5	Norma Ecuatoriana sobre la Calidad del Agua.....	13
3	RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	16
3.1	Resultados	16
3.2	Discusión.....	40
3.3	Conclusiones	41
3.4	Recomendaciones	42
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

RESUMEN

El acuífero de Mulaló es un sistema que no ha sido estudiado por lo que en este estudio se realiza el análisis donde se evidencie las variaciones espaciales y temporales del agua subterránea. Los datos para el análisis hidroquímico se obtuvieron del INAMHI, de dos estaciones: seca y húmeda. Se utilizó ArcGIS para obtener la relación entre los parámetros físicos y químicos con datos espaciales como la cobertura vegetal, uso del suelo, precipitación y geología del suelo para comprender los procesos geoquímicos y actividades que influyen sobre el agua subterránea. La existencia de contaminación del agua subterránea y el uso se analizaron mediante el uso del diagrama de Piper y el diagrama de Wilcox. Como resultado se obtuvo que el nivel piezométrico del acuífero es poco variable durante estaciones es mínima (2 m), existiendo en la zona central del acuífero un área de recarga donde CE, temperatura, Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} y HCO_3^- incrementan sus concentraciones. El agua es bicarbonatada cálcica por la geología del suelo y se determinó la presencia de biotitas (Mg^{+2} y K^+) y plagioclasas (Na^+ , Ca^{+2} y HCO_3^-). El agua del acuífero puede usarse para riego pero existen puntos donde el agua es inadecuada para este fin. Se supone la existencia de contaminación antrópica por a la presencia de nitratos (fertilizantes o agua residual) cuya concentración (76,6 – 96,0 mg/l) en la estación seca sobrepasan el límite (50 mg/l) de los valores que permite la normativa ecuatoriana para el consumo de agua y uso doméstico.

PALABRAS CLAVE: hidroquímica, acuífero, Mulaló, agua subterránea, geología.

ABSTRACT

The Mulaló aquifer is a system that has not been studied yet, so in this study the analysis is carried out where the spatial and temporal variations of groundwater are evidenced. The data for the hydrochemical analysis were obtained from INAMHI, from two seasons: dry and wet. ArcGIS was used to obtain the relationship between physical and chemical parameters with spatial data such as vegetation cover, land use, precipitation, and soil geology to comprehend the geochemical processes and activities that influence groundwater. The existence of groundwater contamination and use were analyzed by using the Piper diagram and the Wilcox diagram. As a result, the piezometric level of the aquifer is not very variable during seasons, it is minimal (2 m), and there is a recharge area in the central zone of the aquifer where EC, temperature, Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} and HCO_3^- increase their concentrations. The water is calcium bicarbonate due to soil geology and the presence of biotite (Mg^{+2} and K^+) and plagioclase (Na^+ , Ca^{+2} and HCO_3^-) was determined. The aquifer water can be used for irrigation but there are points where the water is unsuitable for this purpose. The existence of anthropic contamination is assumed due to the presence of nitrates (fertilizers or residual water) whose concentration (76.6 – 96.0 mg/l) in the dry season exceeds the limit (50 mg/l) of the values that allows the Ecuadorian regulations for water consumption and domestic use.

KEYWORDS: hydrochemistry, aquifer, Mulaló, geology, groundwater.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial es evidente la crisis por la degradación de los ecosistemas naturales, incluidos los acuáticos. Esta degradación sumada a la escasez de recursos naturales constituye dos de los problemas más importantes que surgen por la construcción de sociedades modernas, la creciente demanda de recursos, las restricciones en su uso y el cambio climático [1], [2]. Un ejemplo de esta degradación se evidencia en el agua como recurso. Éste posee un valor intrínseco, no sólo ambiental, sino también social y cultural, puesto que no se lo considera como un lujo o necesidad sino un derecho humano [1]. Actualmente, una alta proporción de la población sufre estrés hídrico y en los próximos años el acceso al agua potable será aún más limitado [2]. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud [OMS], una persona necesita 50 L/día para cubrir sus necesidades básicas [3]. No obstante, se prevé que la demanda de agua a nivel mundial crezca por encima del uso actual, entre un 20% y un 30% hasta el año 2050 [4].

El agua subterránea constituye un componente importante para la subsistencia de las sociedades modernas, pues es un reservorio de agua más abundante que las aguas superficiales. Corresponde a la proporción de 1 a 10 veces el agua que se encuentra almacenada en embalses y lagos [5]. Los acuíferos, estructuras geológicas que almacenan agua subterránea, tienen propiedades únicas que son sumamente importantes en una época de escasez. Esta importancia es evidente cuando la recarga del acuífero es significativa y el agua sirve como fuente de suministro durante las sequías y escasez de abastecimiento de agua superficial [6]. La calidad del agua subterránea es controlada por procesos naturales (Ej. geología, interacciones suelo/roca con el agua, etc.), actividades antropogénicas (agricultura, crecimiento industrial, urbanización) y la contribución atmosférica. Por lo tanto, la evaluación de la calidad del agua subterránea a escala espacial y temporal es imperativa para la gestión de este recurso, especialmente en regiones con escasez de agua [7]. No obstante, no existe una adecuada gestión de este recurso por la escasa investigación o conocimiento técnico, lo que lleva a la degradación de la calidad o al uso excesivo de éste [8].

En Ecuador, en 2017 se han realizado varios estudios en la Secretaria Nacional del Agua [SENAGUA] los cuales determinan que el 4% del volumen total de recursos hídricos a nivel nacional corresponde a agua subterránea [9]. Destinándose principalmente para consumo humano (77,6%), riego agrícola (8,9%), abrevadero (6,5%) e industria (4,9%) [10]. En la zona Andina del Ecuador el recurso de agua subterránea depende de la salud de los ecosistemas de montaña. Uno de estos ecosistemas fundamentales es el páramo. Se localiza entre las cotas de

los 3.200 y los 4.700 msnm. Una gran proporción de los páramos ecuatorianos son húmedos dado a que la precipitación por año oscila entre los 500 y 2.000 mm [11]. Como el páramo central y occidental retiene agua en el suelo, se constituyen como verdaderas esponjas de agua capaces de mantener el caudal base de los acuíferos y así proveer de agua dulce de calidad que se destina a varias actividades [12], [13]. Por tanto para poder usar estas reservas de agua es importante conocer la composición del agua subterránea que está influenciada por varios factores como: litología, meteorización, disolución, precipitación o intercambio iónico [14].

En la zona norte de los Andes en Ecuador en la provincia de Cotopaxi se ubica el acuífero de Mulaló, cuya agua subterránea es sustancial para el desarrollo de la región, por las actividades que se desarrollan ahí como agricultura y floricultura. Sin embargo, el agua subterránea en el acuífero no ha sido estudiada aún y se desconoce sobre la recarga, cantidad de agua utilizada en las actividades de la zona, la calidad del agua, y cómo todos estos parámetros del acuífero se ven afectado durante la época seca y de lluvia en la zona.

1.1 Objetivo general

Establecer la variación espacial y temporal del agua subterránea del Acuífero de Mulaló, en la parte norte de los Andes del Ecuador.

1.2 Objetivos específicos

1. Determinar la relación que existe entre los iones presentes en el agua subterránea y datos espaciales como cobertura vegetal, uso del suelo, precipitación y geología del suelo.
2. Analizar los posibles usos del agua del acuífero
3. Determinar la existencia de contaminación antrópica en el agua subterránea del acuífero.

1.3 Alcance

Para el manejo y consumo sostenible del agua subterránea es esencial el análisis de los factores mencionados anteriormente. Sin embargo, los estudios en el país y en la región andina especialmente son escasos. Uno de los estudios realizados se enfoca en la zona sur del país, en la cuenca de Loja, donde se determinaron iones predominantes y los procesos hidroquímicos que establecen la composición química del agua. A través del análisis químico y el uso de

diagramas bivariados (TDS vs $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$, TDS vs $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$, Mg/Na vs Ca/Na y HCO_3/Na vs Ca/Na), se obtuvo como resultado que la interacción roca-agua determina principalmente la composición de las aguas subterráneas. Por ejemplo: los iones como sulfato, bicarbonato, calcio y yeso provienen de la meteorización de calcita, dolomita y yeso. Sin embargo, no es posible justificar la presencia de ciertos componentes químicos de algunos puntos de muestreo con la interacción con el material geológico de la cuenca, por lo que estas variaciones pudieron haber sido influenciadas por factores antrópicos [14]. Otro estudio se enfoca en el sistema complejo del acuífero Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos, en las cercanías del volcán Illaló cerca de Quito, la capital del país. Se utilizaron herramientas hidrodinámicas, geoquímicas e isotópicas para evaluar las características químicas del agua y su origen, identificar las áreas de recarga y estimar el tiempo de tránsito del agua utilizando métodos simples y datos escasos. Los resultados revelaron dos acuíferos distintos, el primero se caracteriza por una alta mineralización y una zona de recarga entre 2400 msnm y 3100 msnm. Mientras que el segundo tiene una mineralización intermedia y una zona de recarga media entre 2300 msnm y 2700 msnm [15].

Con el fin de cooperar en el eje de investigación de los acuíferos en la zona centro del país se recopilará información de los parámetros físico-químicos del agua subterránea para realizar un análisis de iones como bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, sodio, potasio, etc. Para entender cómo estos interactúan entre sí y así mismo determinar cómo estos parámetros se ven afectados por variables espaciales y temporales, a través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el acuífero de Mulaló.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Agua Subterránea

El agua subterránea es el recurso existente bajo la superficie de un terreno [16]. Este recurso se encuentra bajo el nivel freático saturando los poros y fisuras del suelo. Naturalmente el agua fluye a la superficie, lo realiza por medio de manantiales, cauces fluviales, entre otros. La renovación del agua subterránea depende de la recarga que proviene principalmente de la precipitación, pero también puede ocurrir por la escorrentía superficial, cursos de agua superficial y acuíferos cercanos [17].

1.4.2 Acuíferos

Los acuíferos son sistemas de aguas subterráneas que constituyen el reservorio predominante y la reserva estratégica de almacenamiento de agua dulce en la Tierra, aproximadamente el 30% del total global. Ciertos acuíferos se extienden de manera uniforme sobre áreas terrestres muy grandes y tienen mucho más almacenamiento que todos los embalses y lagos de superficie del mundo. A diferencia con los cuerpos de agua superficiales, pierden muy poco del agua almacenada por evaporación directa [18]. Los acuíferos tienen dos características fundamentales, la primera es su capacidad de almacenar y la segunda su capacidad de transmitir o el movimiento del agua subterránea. En el grado en que poseen estas propiedades las diferentes formaciones geológicas varían ampliamente. Además, su área puede variar con la estructura geológica desde unos pocos kilómetros cuadrados hasta muchos miles de kilómetros cuadrados [18].

1.4.3 Calidad del Agua

La calidad del agua describe el nivel de perturbación y la capacidad de un cuerpo de agua o ecosistema para conservarse o restaurarse que está bajo presión humana [19]. No es sencillo definir calidad del agua puesto que va más allá de sus características fisicoquímicas o biológicas, sino que se considera el uso y el valor que se les otorga [20]. Por otro lado, la calidad del agua se describe mediante la medición de parámetros físicos, químicos o biológicos, o utilizando índices de calidad del agua. Es necesario tomar en cuenta que la calidad de un cuerpo de agua es inestable debido a factores externos e internos que presentarán variaciones espaciales y temporales [21].

En cuanto al agua subterránea la calidad, en comparación con el agua superficial, es muy distinta y más uniforme porque no reciben la misma carga contaminante y gran parte del material suspendido queda retenido durante la infiltración del agua; también son más mineralizadas porque tienen una gran capacidad de disolver los estratos del suelo [21]. De acuerdo al libro de Calidad del Agua de Aguilar *et al.* [19] para establecer alteraciones de la calidad del agua es necesario evaluar las condiciones en las que se encuentra, para esto se realizan varias evaluaciones de las características físicas como: sólidos, que de acuerdo a sus características químicas pueden ser suspendidos, sedimentables o disueltos (coloidales). La turbidez, describe la entrada de luz en el líquido. El olor, que indica la presencia de minerales por la reducción de sulfatos debido a la actividad microbiana o la descomposición de la materia orgánica. La

temperatura, que puede influir en la tasa de reacciones químicas y bioquímicas. Y el color que es el material coloidal en suspensión. El pH, determina el estado neutro, ácido o alcalino del agua. La alcalinidad, se define como la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos. La conductividad, es característica de una solución para conducir corriente eléctrica. Finalmente, la dureza, que representa las concentraciones de calcio y magnesio.

Las características químicas del agua están vinculadas a la presencia de iones específicos. Muchas de estas características se determinan por la interacción entre iones. Los iones principales son cationes como calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^+) y potasio (K^+), y aniones como bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-). Otros iones en el agua son carbonatos (CO_3^{-2}), fosfatos (PO_4^{-3}), aluminio (Al^{+3}), arsénico (As^+), amonio (NH_4^+), cobre (Cu^{+2}), bario (Ba^{+2}), hierro (Fe^{+3}), manganeso (Mn^{+2}), hidróxido (OH^-), flúor (F^-), borato (BO_4^{-3}), bisulfato (HSO_4^-), bisulfito (HSO_3^-), monofosfatos ($\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$), difosfatos (HPO_4^{-3}), sulfuro (S^{-2}) y sulfito (SO_3^{-2}) [19].

1.4.4 Diagrama de Piper

Los diagramas de Piper indican la concentración relativa de los cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+) y aniones (Cl^- , SO_4^{-2} , NO_3^- , HCO_3^-) presentes en una muestra [22]. Su función principal es identificar las facies de agua subterránea y ayudar a comprender varios procesos geoquímicos a lo largo de la trayectoria del flujo del acuífero. Además sirve para clasificar los tipos de agua, puesto que las concentraciones de cationes y aniones se describen en categorías de composición definidas [23]. En esta representación gráfica los porcentajes en miliequivalentes de los cationes y aniones se representan en triángulos separados (Figura 1). Los puntos trazados en los espacios triangulares se proyectan más hacia el campo central de diamantes, que proporciona el carácter general del agua. La principal ventaja de este diagrama es que se puede dibujar en cualquier paquete de software de hoja de cálculo [24].

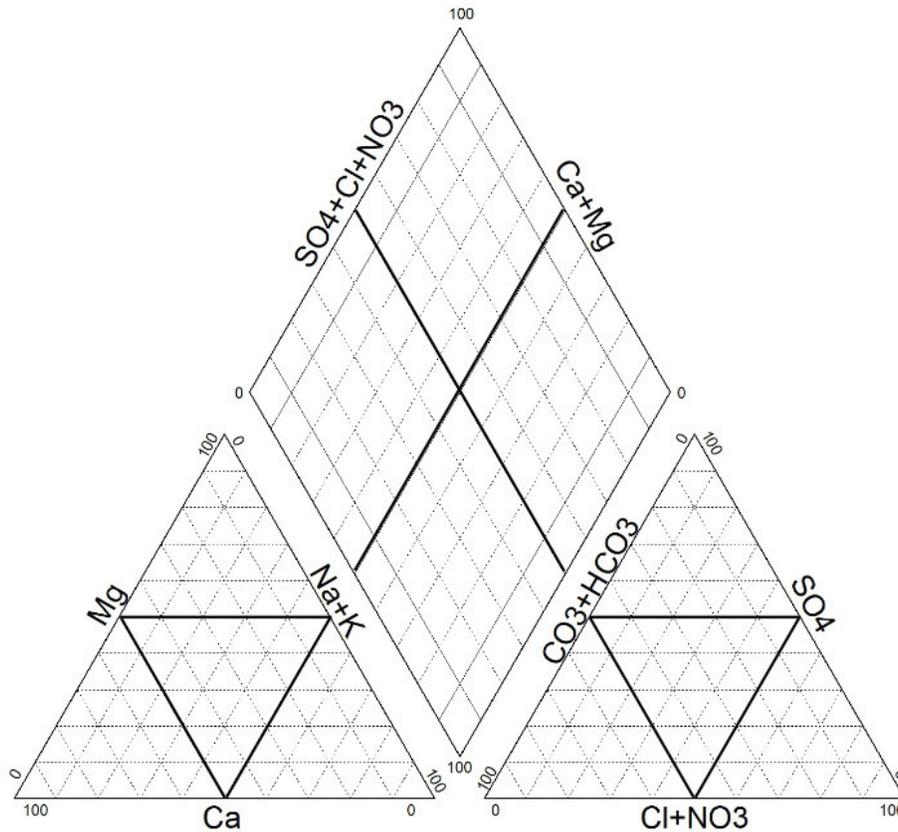


Figura 1. Diagrama de Piper.

1.4.5 Diagrama de Wilcox

Wilcox [25] propuso un método para calificar las aguas que se usarían para riego, se basa en la relación del porcentaje de sodio (%Na) y la conductividad eléctrica (CE) del agua [26]. Es un diagrama de dispersión simple de la relación entre el %Na, en el eje Y, conductividad ($\mu\text{S} / \text{cm}$), en el eje X y consta de cinco áreas distintas, como excelente a buena, buena a admisible, admisible a dudosa, dudosa a inadecuada e inadecuada (Figura 2) [25], [27].

El %Na indica la cantidad de sodio soluble en el agua subterránea, usualmente en todas las aguas naturales es un parámetro que se utiliza para evaluar la idoneidad para el riego, ya que el sodio reacciona con el suelo para reducir la permeabilidad. Si el %Na excede el 60% se trata de un suelo con acumulación de Na^+ , este exceso de Na^+ combinado con carbonato conduce a la formación de suelos alcalinos, mientras que con cloruro se forman suelos salinos, por lo que dificultará el crecimiento de las plantas [28].

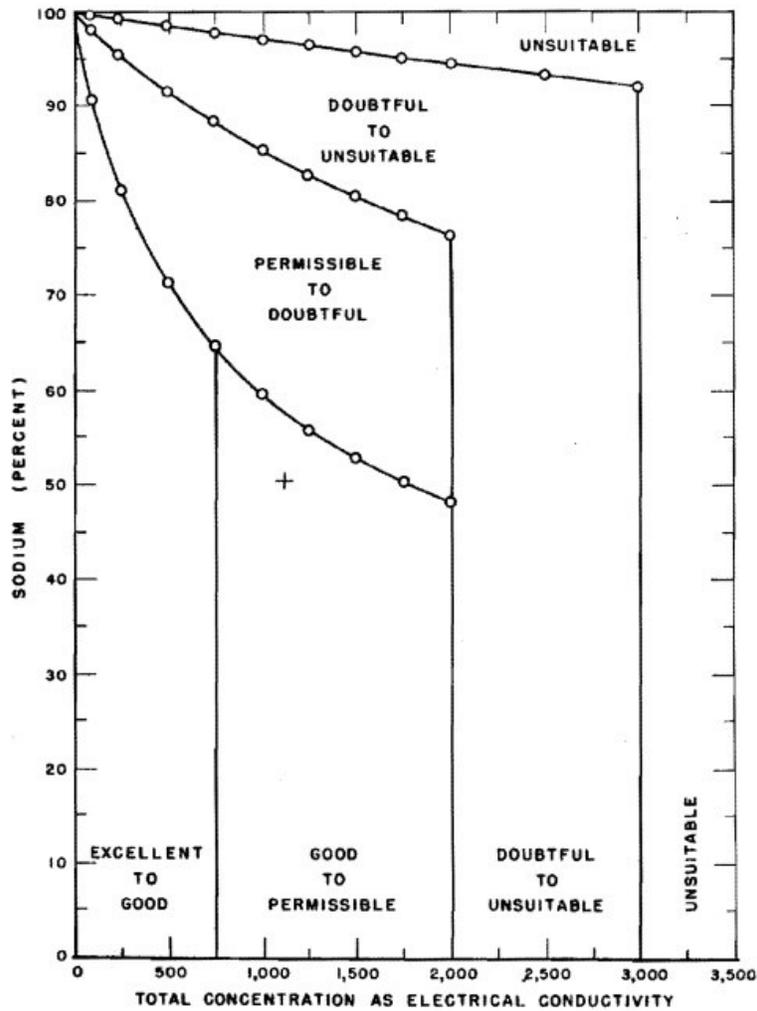


Figura 2. Diagrama de Wilcox, para la clasificación de agua de irrigación [25].

1.4.6 Sistemas de Información Geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) es un método que crea, administra, analiza y muestra información geográficamente referenciada. El análisis involucra desde consultas simples hasta la elaboración de complejos modelos. Con el tiempo los SIG poseen un rol importante en la gestión de recursos, la planificación del uso de la tierra, la evaluación de peligros naturales, el análisis del hábitat de la vida silvestre y el monitoreo de zonas ribereñas [29]. Por ejemplo, en Seúl, Corea del Sur a través de los SIG fue posible determinar que la variación química del agua se veía influenciada por la distribución de aniones, especialmente con Cl^- , NO_3^- y posiblemente SO_4^{2-} . Reflejando que la recarga de varios contaminantes está relacionada con las características del uso de la tierra [23].

1.4.7 CHIRPS

Los científicos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, siglas en inglés) y Centro de Riesgos Climáticos (CHC, siglas en inglés) con el apoyo financiero de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, siglas en inglés), Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, siglas en inglés) y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, siglas en inglés) han desarrollado técnicas para producir mapas de precipitación, especialmente en áreas donde los datos de superficie son escasos. Es así que se desarrolló un paquete con series temporales de precipitación cuasi-global (50°S – 50°N, 180°E -180°O), con datos desde 1981 hasta la actualidad y resolución de 0,05°: CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) que ofrece al público paquetes de datos completos, fiables y actualizados para cumplir con objetivos de alerta temprana, como por ejemplo el monitoreo de sequías estacionales [30].

El algoritmo CHIRPS combina tres fuentes de datos principales: (a) la climatología de precipitación global con una resolución de 0,05° de latitud/longitud estimada para cada mes en función de los datos de la estación, las observaciones satelitales promediadas, la elevación, latitud y longitud; (b) estimaciones de precipitación por satélite basadas en TIR; y c) mediciones pluviométricas in situ [30].

2 MÉTODOS

2.1 Zona de Estudio

Dentro del espacio geográfico que comprende la unidad hidrogeológica de Latacunga- Ambato se encuentra ubicada la parroquia rural de Mulaló ubicada en el cantón de Latacunga (Figura 3). Por su altitud de 3000 m.s.n.m, la temperatura del aire oscila entre 10-17 °C y su precipitación se encuentra en aproximadamente 900 mm anuales. Posee relieve montañoso, escarpado y colinado. Por esto existen grandes extensiones de páramo donde se originan fuentes de agua que son usadas para abastecer a las poblaciones. Uno de los principales ríos de la parroquia es el río Cutuchi que nace del volcán Cotopaxi. Por otro lado desde el punto de vista geológico la parroquia se ubica en una zona con presencia de cangahua, un material formado por ceniza volcánica de composición andesítica, materiales de depósitos de lahares, coluviales, lacustres y estratos de pómez [31].

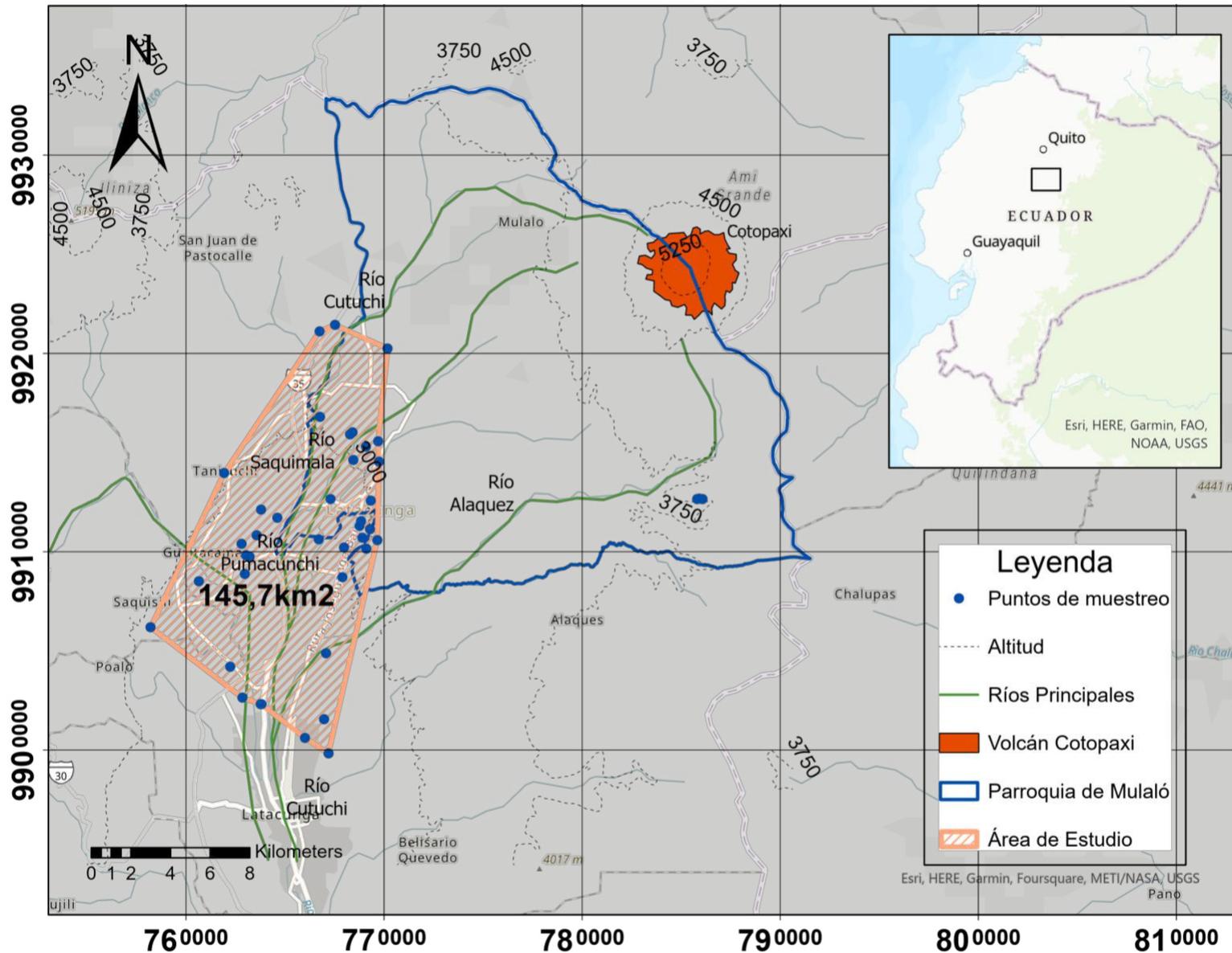


Figura 3. Área de estudio del Acuífero de Mulaló.

Dentro del área de estudio se encuentra el acuífero Mulaló el cual es una fuente importante de abastecimiento de agua para esta zona (Figura 3). Esta agua subterránea se utiliza para el abastecimiento de agua doméstico, riego de huertas e invernaderos donde se cultivan rosas, que es la principal actividad económica de esta región. El acuífero de aproximadamente 250 m de ancho se encuentra a unos 80 km al sur de Quito entre la Cordillera Real y Occidental. Las investigaciones iniciales del acuífero indican que este tiene alrededor de 200 km² [32]. Los puntos de muestreo distribuidos a lo largo del área de estudio comprendían perforaciones, pozos y manantiales.

2.2 Análisis hidroquímico del agua subterránea

2.2.1 Recopilación y tratamiento de datos

Cationes y Aniones

Los datos del análisis hidroquímico de las muestras de agua proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del acuífero de Mulaló fueron recolectados durante la estación húmeda y seca (Figura 3). Se obtuvieron 24 datos de la estación húmeda que corresponden a los meses de abril a junio de los años 2011 y 2013. Mientras que para la estación seca se obtuvieron 25 datos del mes de septiembre noviembre en los años 2011 y 2012 (Tabla 1).

El análisis se basó en parámetros físicos como sólidos disueltos totales (TDS), temperatura, turbidez y color. También parámetros químicos como pH, conductividad eléctrica (CE), e iones como Na⁺, K⁺, Mg⁺², Ca⁺², SO₄⁻², Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻², NO₃⁻, NO₂ y PO₄⁻² en mg/l. Las muestras dedicadas al análisis químico en Ecuador como alcalinidad y el cloruro son medidas en el laboratorio mediante titulación. El sulfato y el nitrato mediante espectrofotometría (error de 0,1 mg/l). El fosfato y el fluoruro se determinan por colorimetría (error de 0,02 mg/l). Los cationes Ca⁺² y Mg⁺² se miden por valoración complexométrica (0,015 mg/l de error), y cationes Na⁺ y K⁺ por absorción atómica de llama (0,03 mg/l de error) [15]. Posteriormente se realizó el balance iónico por estación, aceptando únicamente el error del 10%, con el fin de verificar la calidad de los datos químicos de los mayores componentes.

Tabla 1. Puntos de muestreo.

Punto	SECTOR	LONG	LAT
P2	Barrio Santa Bárbara	766016	9900606
P3	Barrio Chile de Colatoa	766978	9901548
P4	José Guango Bajo	767898	9908722
P6	Barrio Espinoza	767305	9912655
P7	San Isidro	768451	9914634
P8	Mulaló	769750	9914539
P9	El Rosal	769333	9912580
P10	Quisinche Bajo	768832	9911540
P12	José Guango Alto	769283	9911142
P13	José Guango Alto	769653	9910592
P15	Río San José Guango Alto	769106	9910158
P17	José Guango Alto	768908	9910708
P22	Hacienda La Serranía	769079	9915310
P26	Barrio Callo Donoso	768281	9915916
P27	Barrio Callo Mancheno	766758	9916794
P31	Barrio Agua Clara	766695	9910628
P32	El Chasqui	767517	9921434
P35	Avelina	764616	9911708
P36	Hda. San Mateo	763792	9912116
P38	San Sebastián	762795	9910402
P39	Guaytacama	762970	9908874
P40	Santa Inés	763556	9910836
P41	Santa Inés	763022	9909834
P42	Santa Inés	763214	9909746
P43	Pupana Norte	760657	9908516
P44	La Calera	763768	9902318
P45	La Calera	763812	9902322
P49	Mollepamba	758212	9906188
P50	San Antonio Cruz Loma	762223	9904204

2.2.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es el método gráfico más utilizado para clasificar el agua en función de porcentajes normalizados de cationes y aniones principales, es decir, que las concentraciones porcentuales de miliequivalentes de los principales cationes: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ ; y aniones: HCO_3^- , CO_3^{-2} , NO_3^- , SO_4^{-2} y Cl^- se trazan en dos campos triangulares, que luego se proyectan en el campo central de diamantes [24]. En el presente estudio se utilizó el software “Diagrammes” para Windows, una aplicación de hidroquímica desarrollada y nombrada por el Ingeniero Roland Simler de la Universidad de Avignon.

Este diagrama combina tres campos: dos triangulares en la parte inferior y un campo intermedio en forma de diamante. En el triángulo inferior izquierdo se proyecta un solo punto de los valores porcentuales de reacción de los cationes y en el triángulo inferior derecho los aniones. De esta forma los dos puntos en el diagrama indican las concentraciones relativas de los diversos constituyentes disueltos del agua. Por otro lado, en el campo central en forma de diamante se presenta un punto a partir de la intersección de las líneas de proyección de los puntos en los dos primeros campos; este punto muestra el carácter químico general del agua [33].

2.2.3 Diagrama de Wilcox

El diagrama de Wilcox es la relación entre la CE y %Na y permite evaluar el agua subterránea cuyo fin sea el uso para riego agrícola [26]. Estos diagramas se obtendrán a través del software de uso libre Diagrammes de la Universidad de Avignon. Para esto se calculará el %Na utilizando la siguiente ecuación, donde todos los cationes: Ca⁺², Na⁺, Mg⁺², K⁺ se expresan en miliequivalentes por unidad de litro (meq / L) y el resultado como porcentaje [34].

$$\%Na = \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} \times 100$$

Ecuación 1. Porcentaje de Sodio [34]

2.2.4 Datos espaciales y temporales

Para el análisis y presentación de la información espacial y temporal se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permitieron explorar una relación entre los iones presentes y diversas actividades naturales o antropogénicas en la zona. Se integraron los datos de los parámetros físicos y químicos obtenidos con información espacial, tales como uso del suelo, mapas de precipitación y geología del suelo. También se compararon los datos de acuerdo a la estación en la que se obtuvieron con el fin de establecer si existe variación temporal de los parámetros y cuál es el comportamiento del agua subterránea a lo largo del acuífero. Para esto se utilizó el software ArcGIS Pro con los datos espaciales recopilados del Sistema Nacional de Información y se empleó el método de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) para la interpolación espacial de los parámetros físicos, cationes y aniones analizados en las muestras [35]. A los valores del ráster de precipitación de CHIRPS se le aplicó la función de transformación de ráster a punto para aplicar el método de la IDW, como a los demás datos, y

obtener las isoyetas. El IDW se basa en un algoritmo simple que calcula el peso de los valores de acuerdo a la relación inversa de la distancia, es decir que en cuanto más cerca se encuentre un punto del lugar donde se requiere estimar algún parámetro, más peso tiene en el promedio. [36], [37] De esta forma se pudo analizar de manera gráfica cuál es la relación de los parámetros medidos y cuáles son las anomalías que se presentan en los datos.

2.2.5 Norma Ecuatoriana sobre la Calidad del Agua

En el Anexo 1 del Acuerdo Ministerial 097-A, referente a la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes del Recurso, se establecen los criterios de calidad de las aguas para diferentes fines y los límites permisibles para las descargas en cuerpos de agua. Cuyo objetivo proteger la calidad del agua para salvaguardar y preservar los usos que le han sido asignados, la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general [38].

En el presente estudio se realiza una comparación de los datos obtenidos con los criterios de calidad para aguas destinadas al consumo humano y uso doméstico (Tabla 2), y con los criterios de calidad de aguas para riego agrícola (Tabla 3).

Tabla 2. Criterios de calidad de fuentes de agua para consumo humano y Doméstico. [38]

Elaboración: Lara, 2022.

Parámetro	Expresado Como	Unidad	Criterio De Calidad
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Arsénico	As	mg/l	0,1
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	1000
Bario	Ba	mg/l	1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro	CN	mg/l	0,1
Cobre	Cu	mg/l	2
Color	Color real	Unidades de Platino-Cobalto	75
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Fluoruro	F	mg/l	1,5
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	<4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	<2
Hierro total	Fe	mg/l	1,0
Mercurio	Hg	mg/ l	0, 006
Nitratos	NO ₃	mg/l	50,0
Nitritos	NO ₂	mg/l	0,2
Potencial Hidrógeno	pH	unidades de pH	6-9
Plomo	Pb	mg/l	0,01
Selenio	Se	mg/l	0,01
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	500
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	0,2
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbiedad	UNT	100,0

Tabla 3. Criterios de calidad de aguas para riego agrícola. [38]

Elaboración: Lara, 2022.

Parámetro	Expresado Como	Unidad	Criterio De Calidad
Aceites y Grasas	Película Visible		Ausencia
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico	As	mg/l	0,1
Berilio	Be	mg/l	0,1
Boro	B	mg/l	0,75
Cadmio	Cd	mg/l	0,05
Cinc	Zn	mg/l	2,0
Cobalto	Co	mg/l	0,01
Cobre	Cu	mg/l	0,2
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	1000
Cromo	Cr ⁺⁶	mg/l	0,1
Flúor	F	mg/l	1,0
Hierro	Fe	mg/l	5,0
Huevos de parásitos			Ausencia
Litio	Li	mg/ l	2,5
Materia flotante	Visible		Ausencia
Mercurio	Hg	mg/ l	0, 001
Manganeso	Mn	mg/l	0,2
Molibdeno	Mo	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	0,2
Nitritos	NO ₂	mg/l	0,5
Oxígeno Disuelto	OD	mg/l	3
Potencial Hidrógeno	pH		6-9
Plomo	Pb	mg/l	5,0
Selenio	Se	mg/l	0,02
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	250
Vanadio	V	mg/l	0,1

3 RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

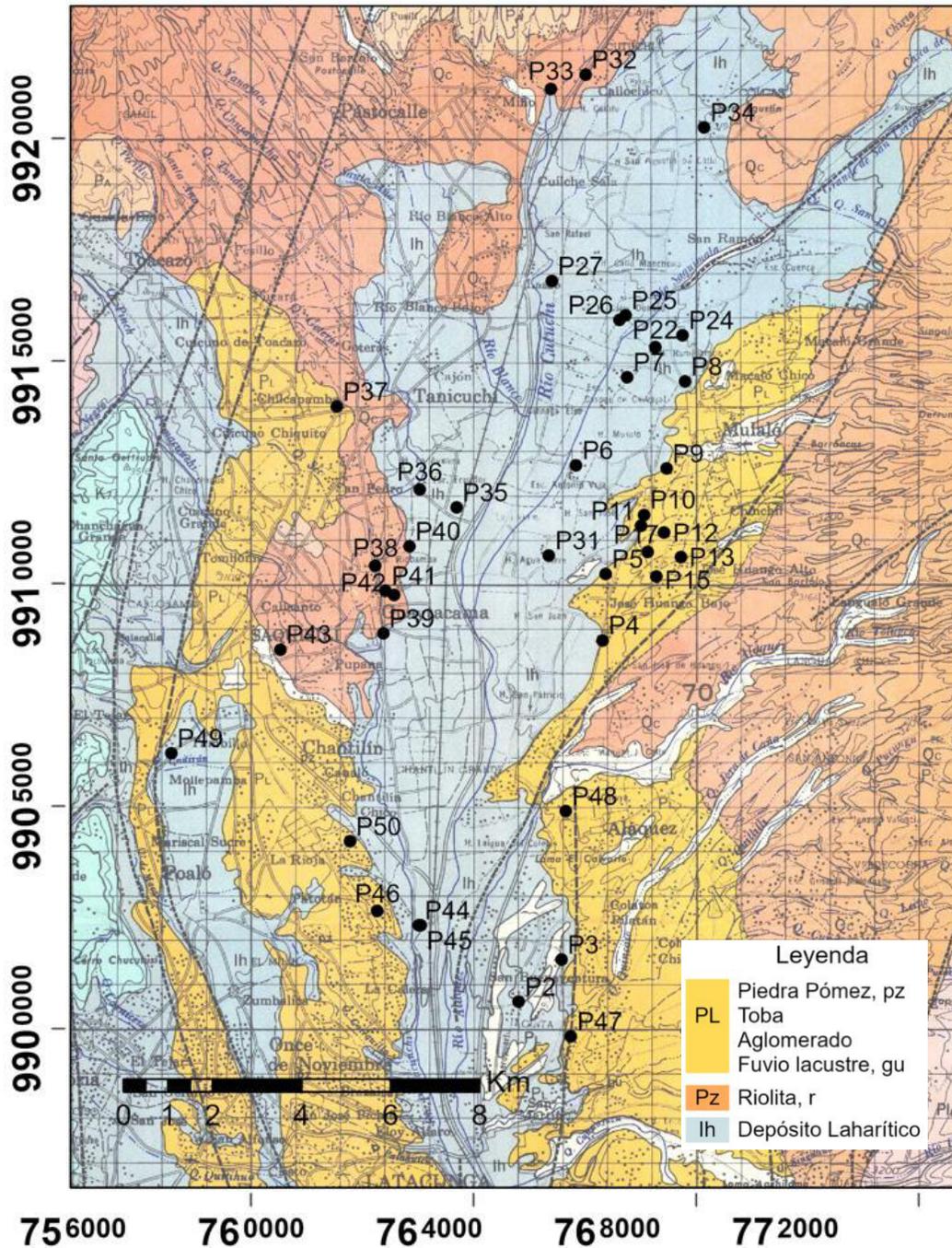


Figura 4. Mapa Geológico de la zona de estudio.

La composición química del agua subterránea en el acuífero resulta de la interacción entre el agua que se infiltra en el suelo y la litología del suelo. Muchos de los componentes químicos se adquieren en el área de recarga y los demás en el trayecto del flujo del agua subterránea. Generalmente la evolución del anión predominante va desde facies hidrogeoquímicas de tipo HCO_3^- a facies de tipo SO_4^{2-} y hasta facies de Cl^- , en flujos de corto, largo y muy largo recorrido respectivamente. El tipo de catión presente se debe a la litología del flujo del agua: por ejemplo el Ca^{+2} presente en carbonatos donde predomina la calcita o plagioclasas cálcicas, ricas en anortita [39].

Como se observa en el mapa geológico de la zona (Figura 4) los puntos donde se tomaron las muestras del agua subterránea están asentados sobre piedra pómez, toba, aglomerado, fluvio lacustre, riolitas y depósitos laharíticos. Las tobas están compuestas por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y en menor cantidad biotita y hornblenda, cuya composición incluye a anfíboles [40], [41]. La composición química del agua se explica a través de los procesos geoquímicos en la Tabla 4 [39].

Tabla 4. Reacciones químicas de los procesos geoquímicos

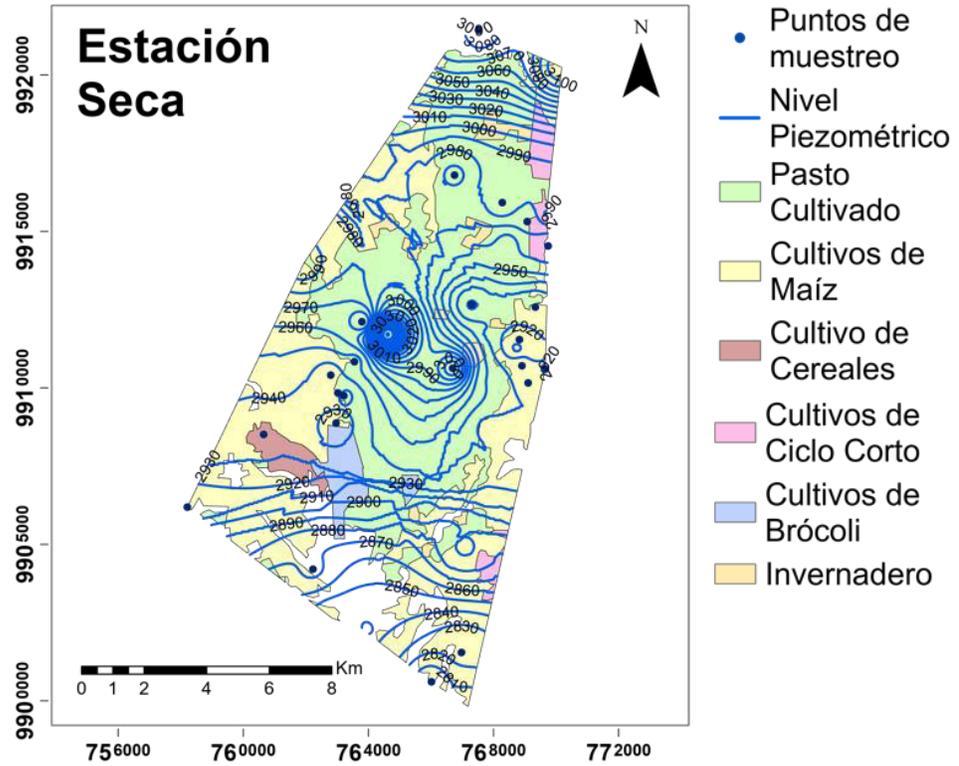
Mineral	Proceso Geoquímico
Biotita	Meteorización de serpentinita $14 \text{CO}_2 + 15 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{KMg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2 \leftrightarrow 2 \text{K}^+ + 6 \text{Mg}^{+2} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> Biotita Caolinita </div>
Plagioclasa	Meteorización de plagioclasas: $(x \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + y \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8) = \text{Na}_A\text{Ca}_B\text{Al}_C\text{Si}_D\text{O}_8$ $2 \text{NaCaAl}_3\text{Si}_5\text{O}_{16} + 6 \text{CO}_2 + 9 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{Na}^+ + 2 \text{Ca}^{+2} + 6 \text{HCO}_3^- + 4 \text{SiO}_4$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> Plagioclasa Caolinita </div>
Feldespato Potásico	Meteorización de feldespato potásico (microclino) $2 \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2 \text{CO}_2 + 11 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{K}^+ + 2 \text{HCO}_3^- + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4 (\text{l}) + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> Microclino Caolinita </div>

Para la interpolación de los datos físicos y químicos no se consideraron las muestras tomadas en los puntos 28, 29 y 30 (Figura 3) porque se encontraban muy distanciadas del resto y al momento de aplicar la interpolación, a través del método IDW, esta se veía afectada.

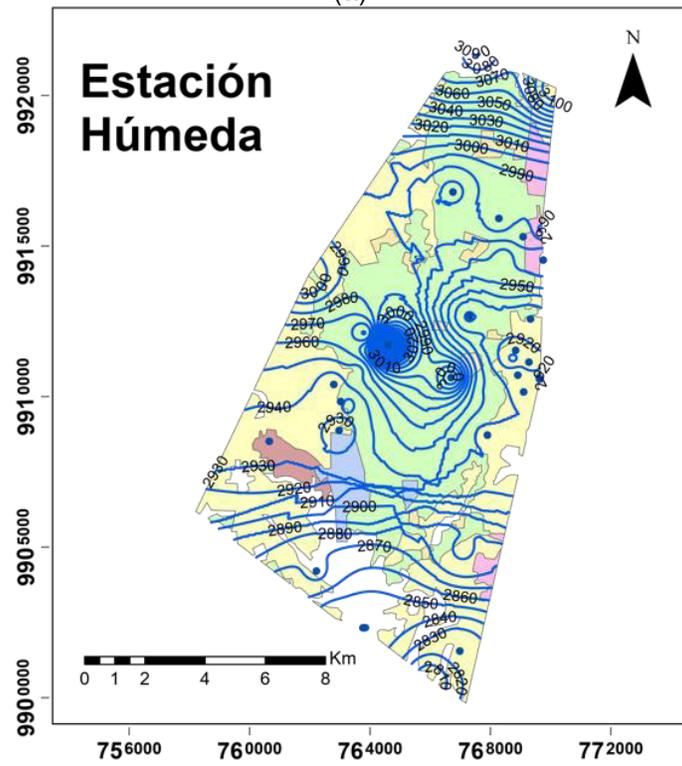
El nivel piezométrico del acuífero varía entre los 2800 msnm y 3610 msnm, aproximadamente, y presenta una diferencia del nivel de agua desde 0,1 m hasta 2 m, de acuerdo a las mediciones realizadas en cada punto (Tabla 5). Además, como se observa en la Figura 5 las zonas más altas se encuentran en el norte y centro del área de estudio, para ambas estaciones, es así que el flujo de agua se mueve en dirección hacia el sur, y en los puntos más altos puede existir una zona de recarga del acuífero probablemente debido a una zona de alta permeabilidad.

Tabla 5. Niveles piezométricos en metros de la estación húmeda y seca.

Punto	Estación Húmeda	Estación Seca	Punto	Estación Húmeda	Estación Seca
P2	2801,05	2801,20	P30	3609,00	3609,00
P3	2821,65	2821,55	P31	3017,70	3018,00
P4	2926,20	2926,10	P32	3090,78	3090,40
P5	2939,50	2939,50	P33	3076,00	3076,00
P6	2918,60	2918,90	P34	3109,20	3109,10
P7	2955,85	2955,70	P35	3111,00	3111,00
P8	2965,00	2965,00	P36	2949,40	2949,40
P9	2925,90	2923,65	P37	3010,00	2995,70
P10	2917,10	2917,00	P38	2932,60	2932,90
P11	2906,50	2906,30	P39	2921,00	2921,00
P12	2916,25	2916,20	P40	2947,00	2947,00
P13	2919,40	2919,45	P41	2940,00	2940,00
P15	2928,60	2928,75	P42	2923,10	2922,80
P17	2927,50	2927,35	P43	2933,30	2933,70
P22	2971,75	2971,80	P44	2846,90	2846,90
P24	2991,35	2990,60	P45	2836,00	2834,00
P25	2987,95	2988,19	P46	2844,30	2844,40
P26	2988,20	2988,30	P47	-	2802,50
P27	2966,90	2967,73	P48	2891,00	2891,10
P28	3581,00	3581,00	P49	2929,85	-
P29	3591,00	3591,00	P50	2871,60	2871,50



(a)



(b)

Figura 5. Niveles Piezométricos: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

En el Diagrama de Piper (Figura 6) se refleja que para ambas estaciones en el campo triangular inferior izquierdo el agua subterránea del acuífero de Mulaló es agua donde hay presencia de magnesio, calcio y sodio, a pesar de que para ambas estaciones existen puntos en los que predomina las aguas magnésicas; mientras que en el campo inferior derecho predominan los bicarbonatos. Así en el campo central se refleja que son aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, pero hay puntos donde el agua es bicarbonatada sulfatada y/o clorada o sódica.

En el diagrama de Wilcox para ambas estaciones (Figura 7) que el agua subterránea puede usarse, de acuerdo al porcentaje de sodio y a la conductividad eléctrica, pues se considera excelente o buena. Sin embargo, hay puntos de muestreo en los que el agua se muestra dudosa o completamente inadecuada para usarse, esto sucede en los puntos 3 (estación seca), 36 (estación seca), 44 (estación húmeda) y 50 (estación seca y húmeda), que se encuentran ubicados en el Barrio Chile de Colatoa, Hacienda San Mateo, La Calera y San Antonio de Cruz Loma, respectivamente. Evidenciado que en la estación seca es donde el agua presenta la mayor inadecuación para usarse en riego y en la estación húmeda los puntos se muestran con mayor confiabilidad para este fin.

El color (Tabla 6) se observa que en la estación seca no excede a los límites (75 Unidad Pt-Co) de la calidad de agua para consumo humano y doméstico (Tabla 2), mientras que el punto 44 en la estación húmeda (117 Unidad Pt-Co) lo excede. En la turbiedad (Tabla 7) para la estación seca el punto 36 excede a los límites de la calidad de agua para consumo humano y doméstico (100 UTN), mientras que en la estación húmeda no se supera ese valor en ningún punto.

Para el análisis de los iones se deberá tomar en cuenta que los resultados del balance iónico para las estaciones seca y húmeda demuestran que existen 3 y 2 puntos de muestreo, respectivamente, donde el porcentaje de error es mayor al 10%. Sin embargo, por la cantidad de datos disponibles, que no son muchos, se va a hacer uso de estos para el siguiente análisis.

Diagrama de Piper

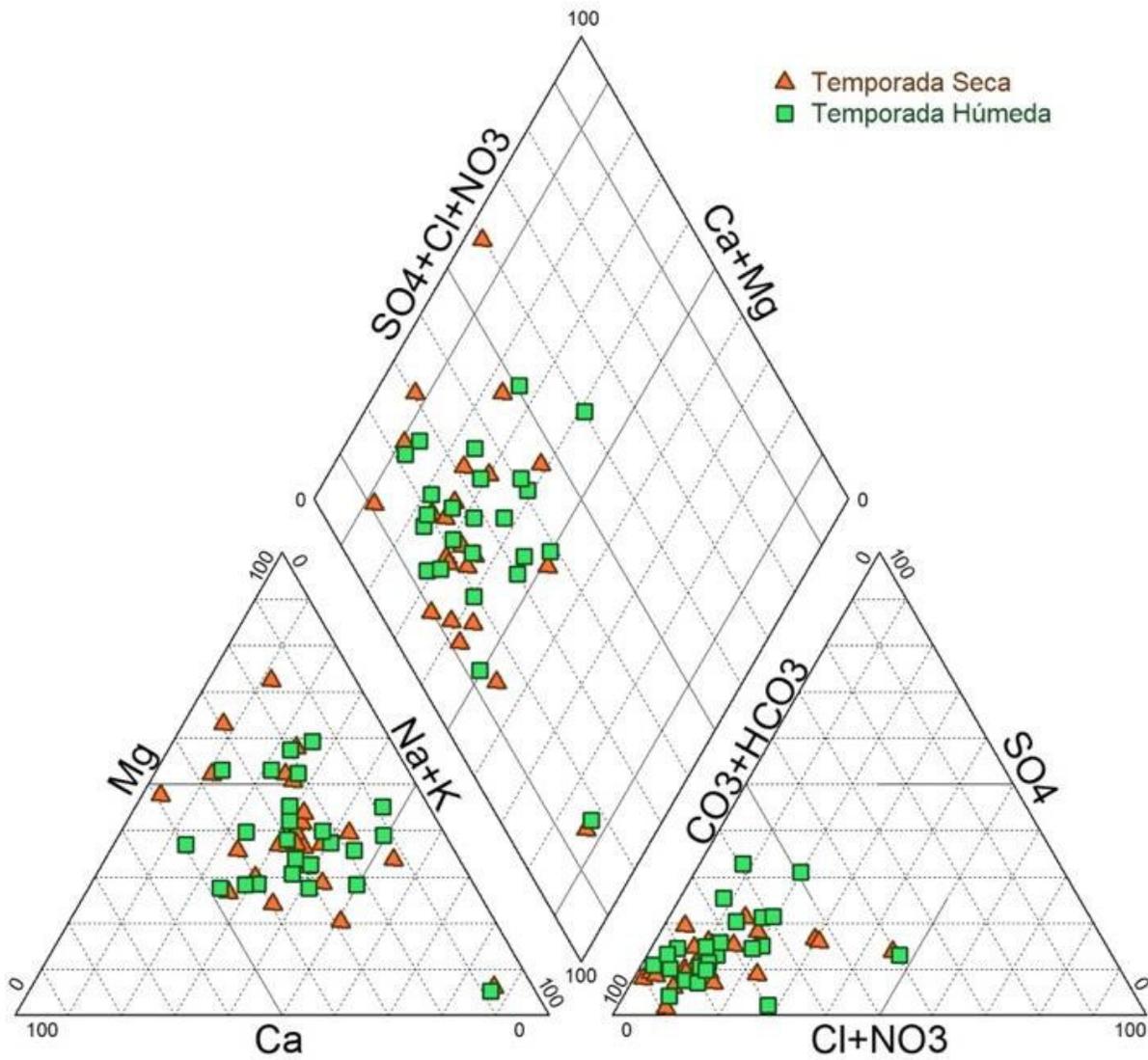


Figura 6. Diagrama de Piper para estación seca y húmeda.

Diagrama de Wilcox

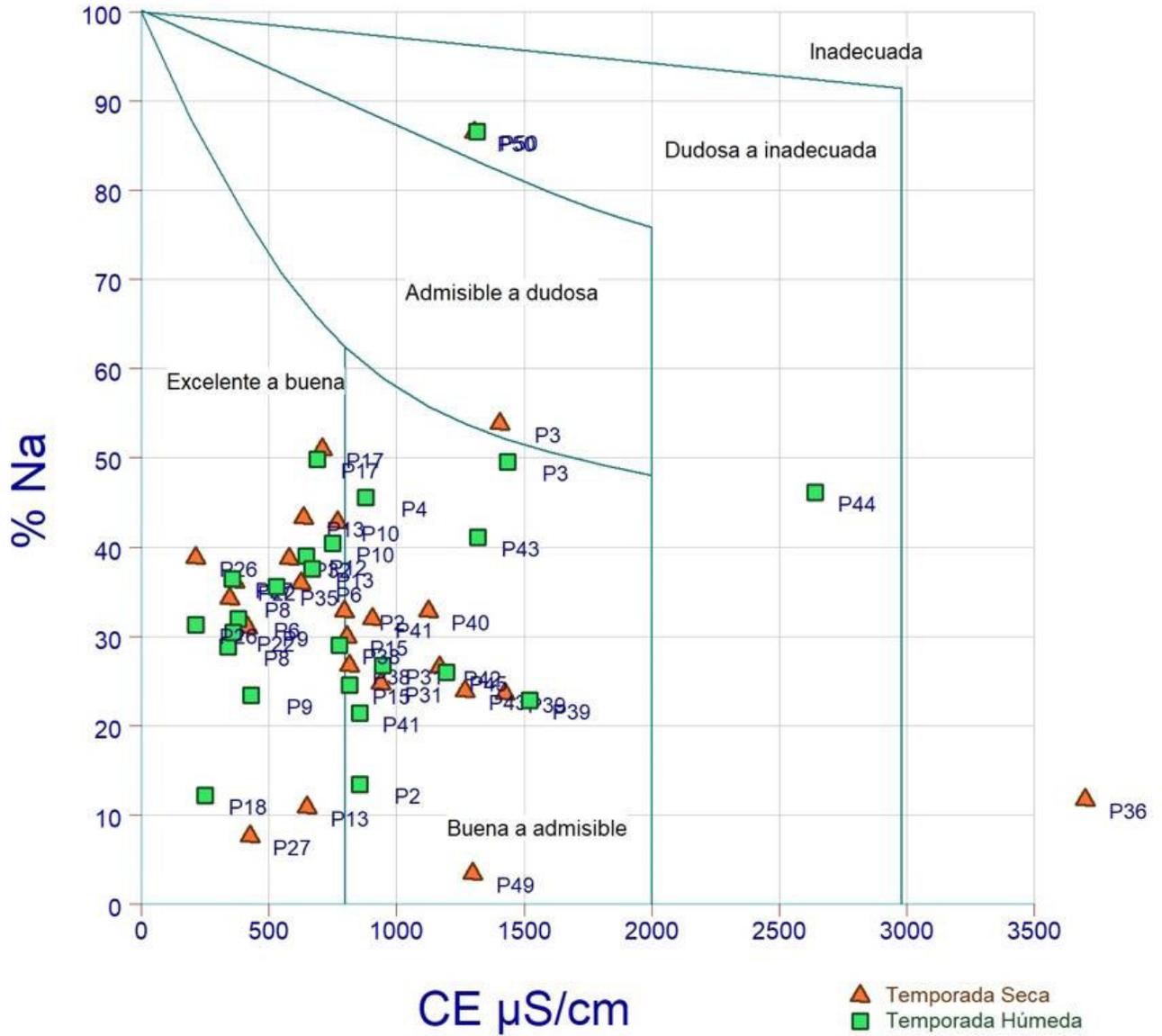


Figura 7. Diagrama de Wilcox para estación seca y húmeda.

Tabla 6. Valores de Color (Unidad Pt-Co).

Punto	Estación Seca	Estación Húmeda	Punto	Estación Seca	Estación Húmeda
P2	-	-	P31	33	33
P3	30	28	P32	7	-
P4	-	1	P35	-	2
P6	36	10	P36	23	-
P8	10	4	P38	5	7
P9	5	7	P39	-	3
P10	5	2	P40	3	-
P12	-	3	P41	22	4
P13	14	8	P42	-	-
P15	-	8	P43	21	80
P17	8	5	P44	-	117
P22	13	22	P45	-	34
P26	22	19	P49	46	-
P27	28	30	P50	19	8

Tabla 7. Valores de Turbiedad (UTN).

Punto	Estación Seca	Estación Húmeda	Punto	Estación Seca	Estación Húmeda
P2	-	-	P31	2	1,15
P3	1,04	4,02	P32	0,15	-
P4	1	0,97	P35	-	0,13
P6	0	0,28	P36	339	-
P8	2	0,56	P38	57	15,1
P9	0	1,27	P39	-	0,12
P10	1	0,4	P40	1	-
P12	-	0,58	P41	0	0,27
P13	1,04	1,05	P42	-	-
P15	-	2,83	P43	39	26,6
P17	1,00	1,25	P44	-	25,3
P22	1,00	0,17	P45	-	51,5
P26	1,00	0,16	P49	29,7	-
P27	3,9	3,6	P50	0	0,34

Los valores de pH se encuentran en un rango de 6,2 a 8,7 y se evidencia que incrementa conforme el agua subterránea se dirige hacia la zona sur del área de estudio y se presume un aumento en el tiempo de residencia dentro del acuífero, además que al sur en la estación seca (Figura 8a) el pH es más básico que en la estación húmeda (Figura 8b). Estos valores no sobrepasan los límites establecidos por la norma ecuatoriana de la calidad del agua para riego agrícola y para consumo (6-9). La conductividad eléctrica en la estación seca (Figura 9a) alcanza su máximo valor (3076 - 3825 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en la zona central, mientras que en la estación húmeda (Figura 9b) la CE incrementa en dirección sur. Al igual que la CE, la temperatura alcanza su máximo valor en la zona central del área de estudio durante la estación seca (Figura 10a) y en la estación húmeda (Figura 10b) los valores incrementan conforme el agua fluye hacia el sur del área de estudio. Como era de esperarse en la estación seca los valores de temperatura son mayores a la estación húmeda.

La concentración de Na^+ , en la estación seca y húmeda (Figura 11), incrementa con movimiento del flujo de agua con dirección al sur. Durante la estación seca (Figura 11a) la concentración de Na^+ alcanza un alto valor en la zona centro del área, posteriormente disminuye la concentración y al sur esta alcanza su máximo valor. La concentración de Ca^{+2} , al igual que el Na^+ , en la estación seca alcanza un alto valor en la zona centro y sur del área de estudio y los valores fluctúan entre 20 - 170 mg/l (Figura 12a). Mientras que en la estación húmeda fluctúan entre 10 - 60 mg/l y concentración incrementa en dirección sur (Figura 12b). Como la concentración de Na^+ es mayor a la concentración de Ca^{+2} , se puede evidenciar que existe la presencia de plagioclasas ricas en sodio en el acuífero. La concentración de K^+ durante la estación húmeda es mayor que en la estación seca en el área de estudio (Figura 13); además, la concentración incrementa en dirección sur en ambas estaciones al igual que los demás cationes. Las concentraciones de K^+ en el acuífero pueden ser el indicador de la presencia de feldespato potásico y/o biotitas. Por otro lado, la concentración de Mg^{+2} varía considerablemente puesto que en la estación seca alcanza el máximo valor en la zona centro del área de estudio (Figura 14a), mientras que en la estación húmeda se observa en mismo patrón de incremento en dirección sur (Figura 14b). De acuerdo a lo presentado en la Tabla 4, se puede evidenciar que existe la presencia de biotita, mas no de feldespato potásico en el acuífero.

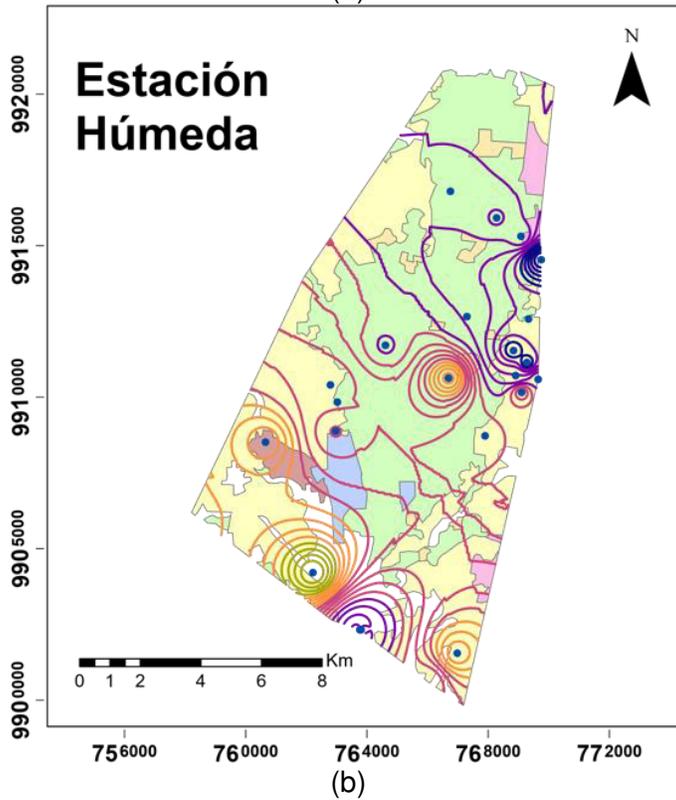
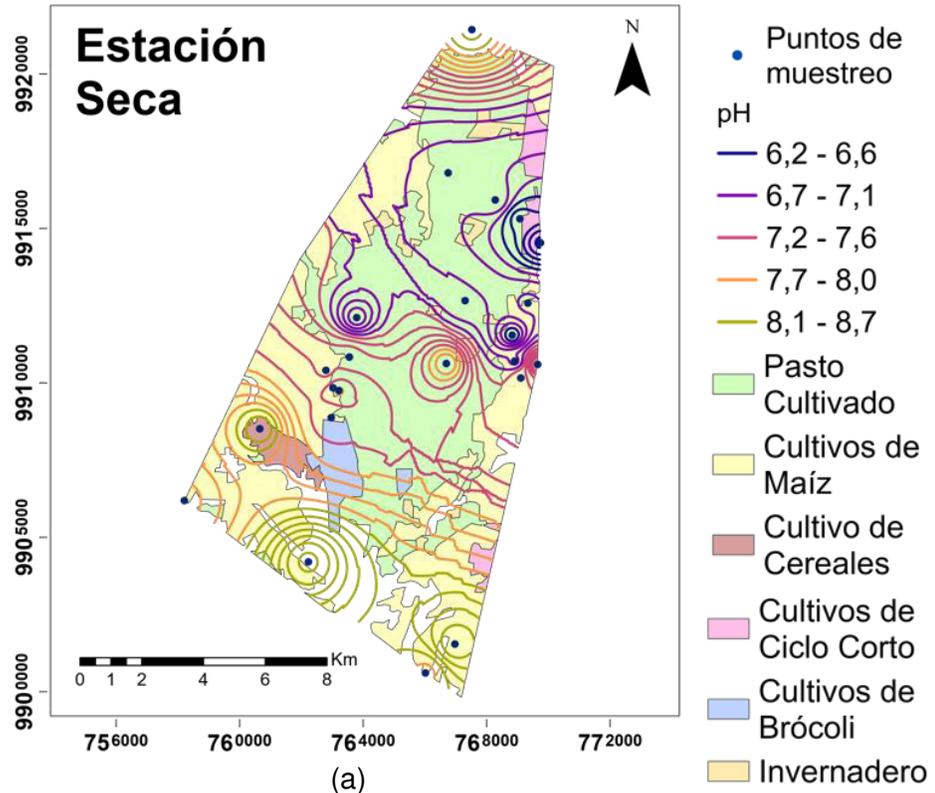


Figura 8. Distribución espacial y temporal de pH: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

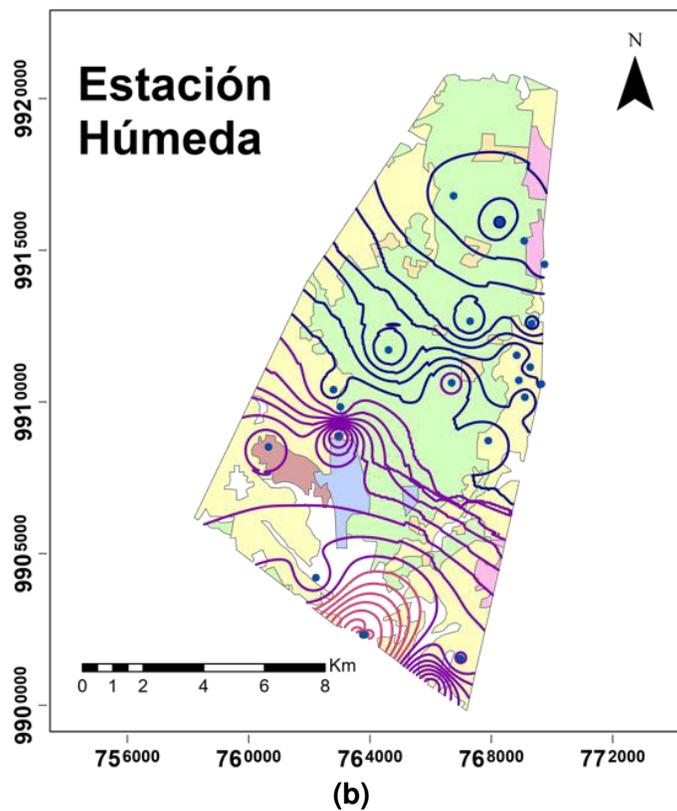
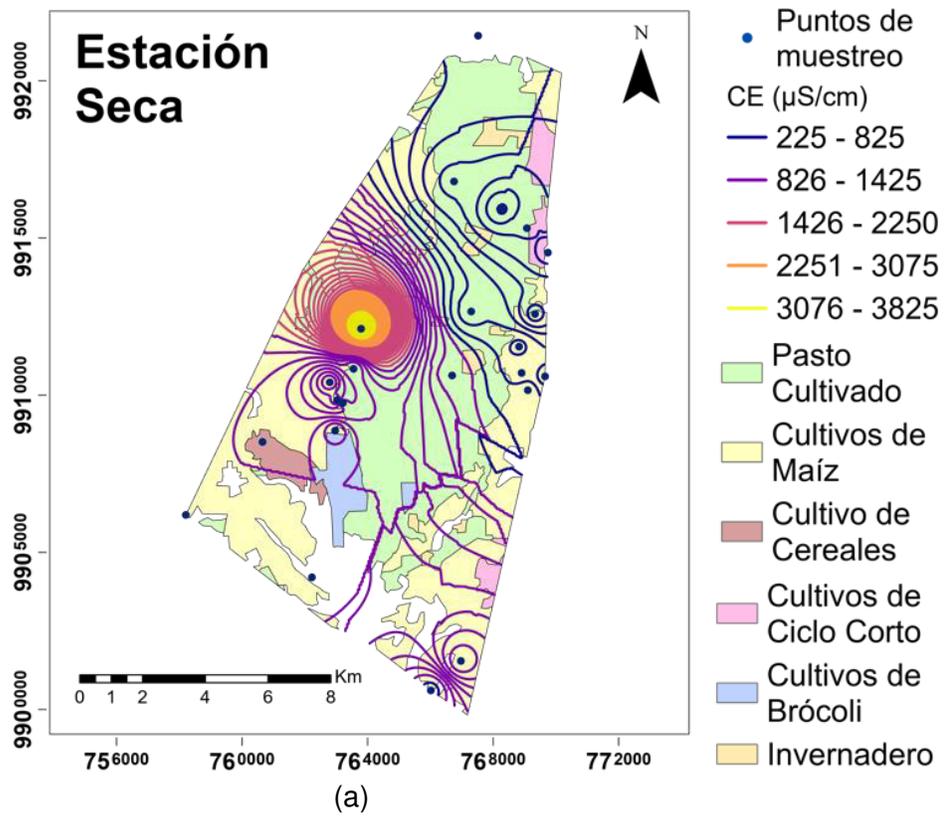


Figura 9. Distribución espacial y temporal de conductividad eléctrica: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

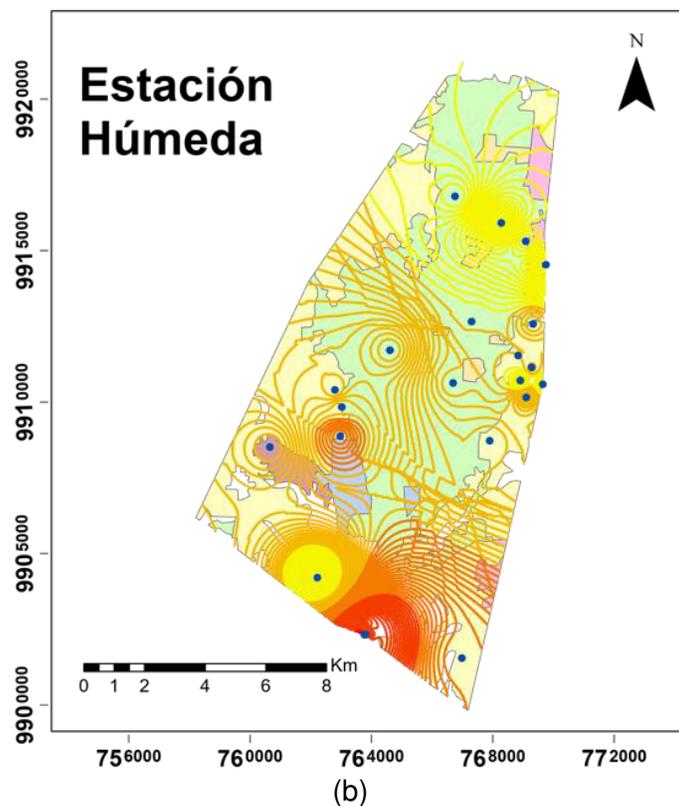
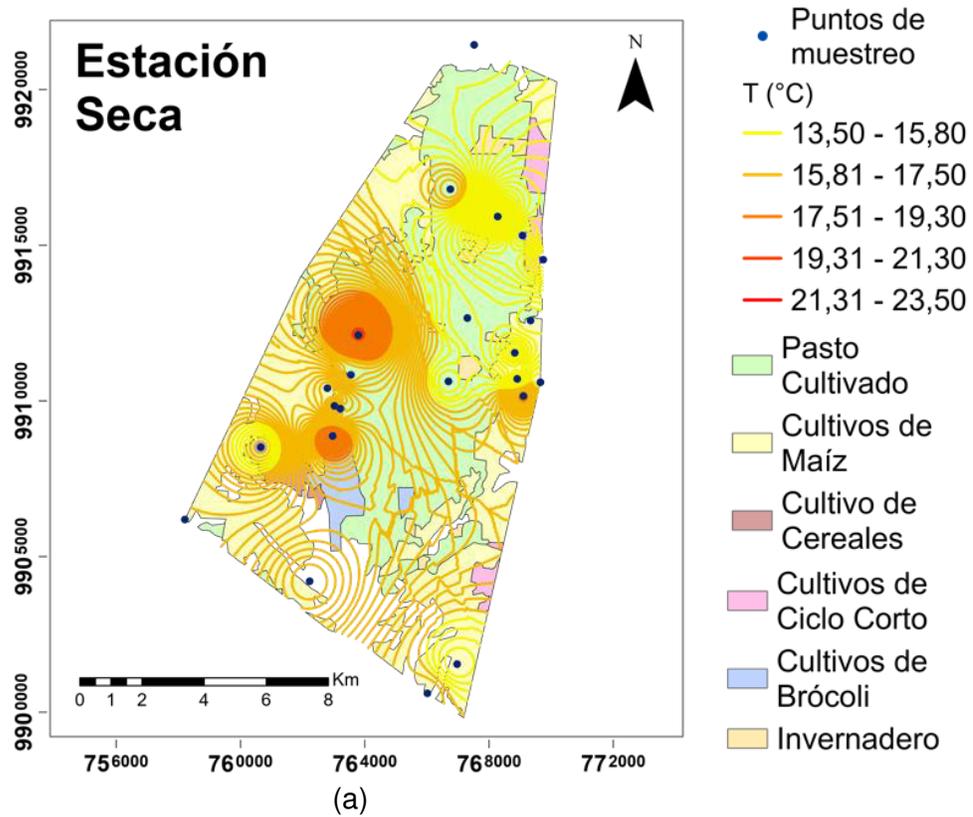


Figura 10. Distribución espacial y temporal de la temperatura: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

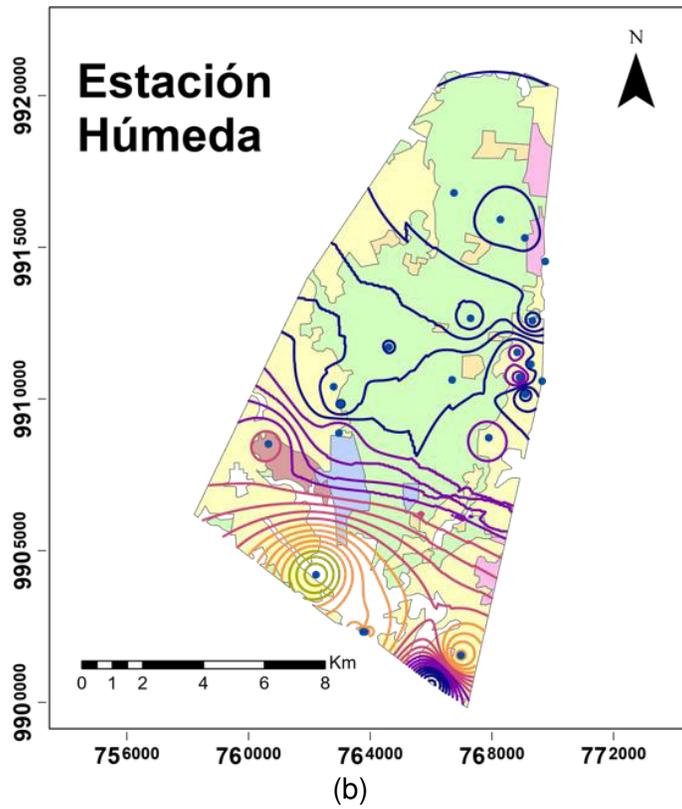
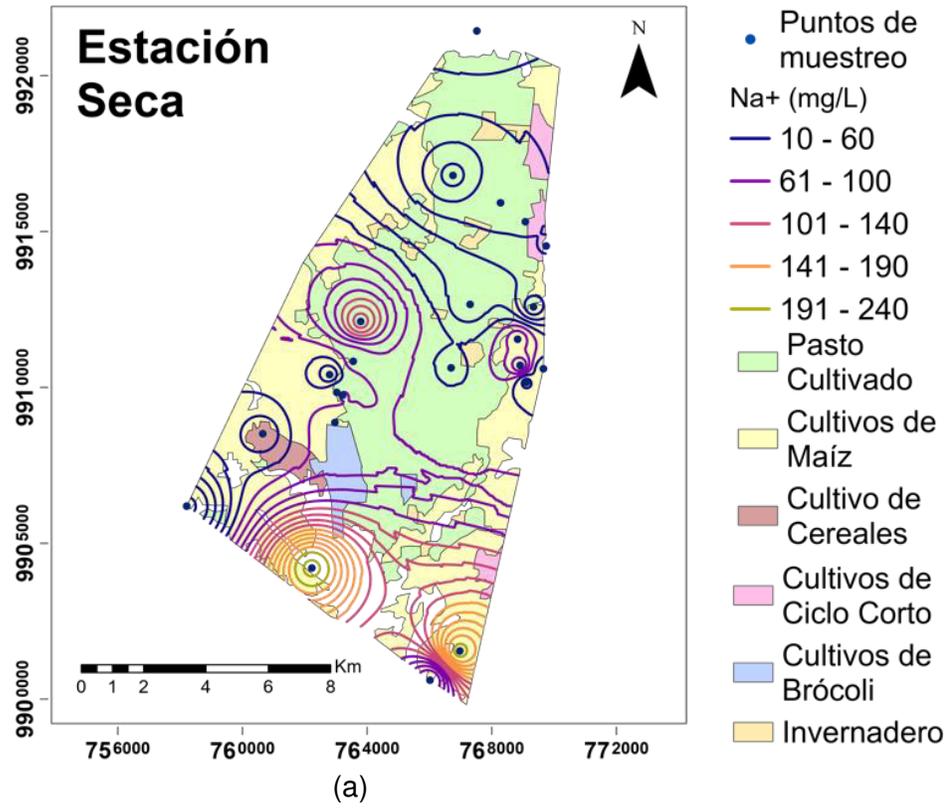


Figura 11. Distribución espacial y temporal de Na⁺: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

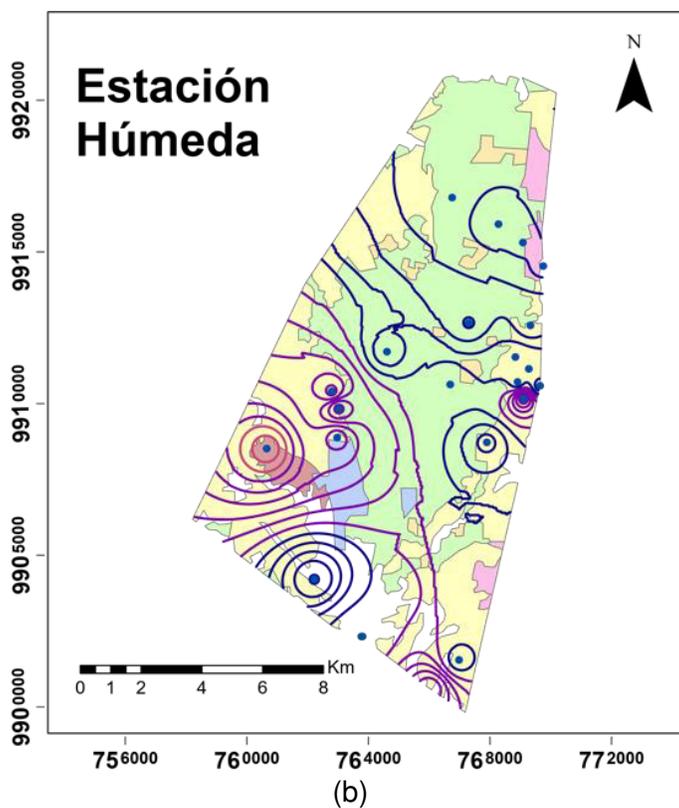
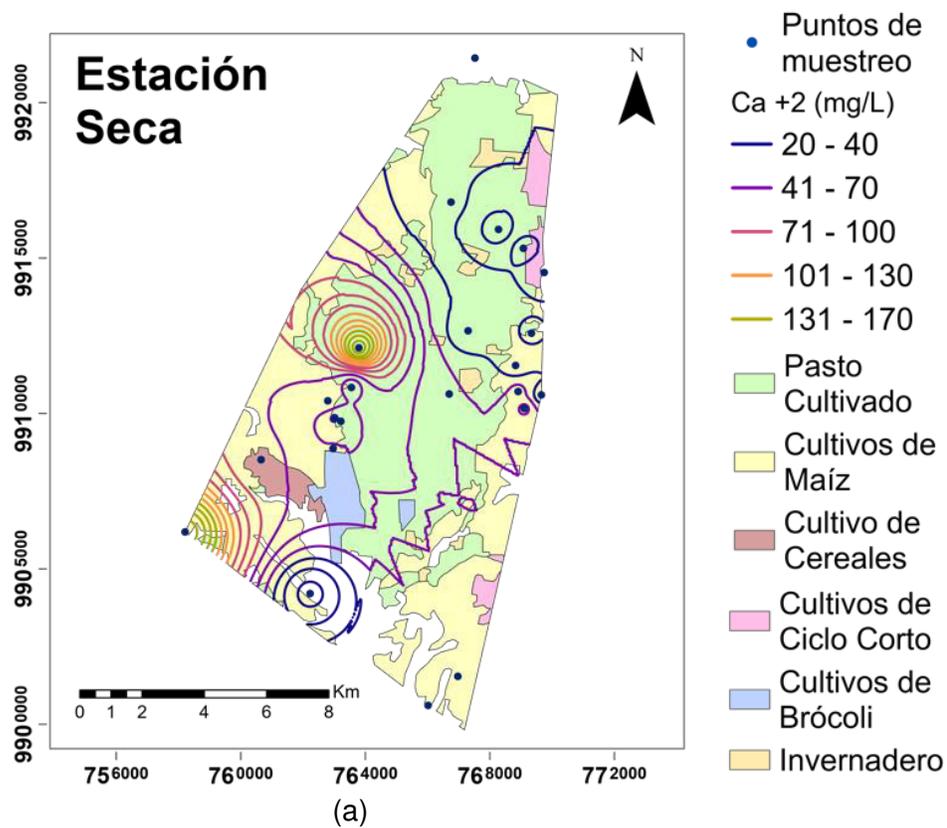


Figura 12. Distribución espacial y temporal de Ca⁺²: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

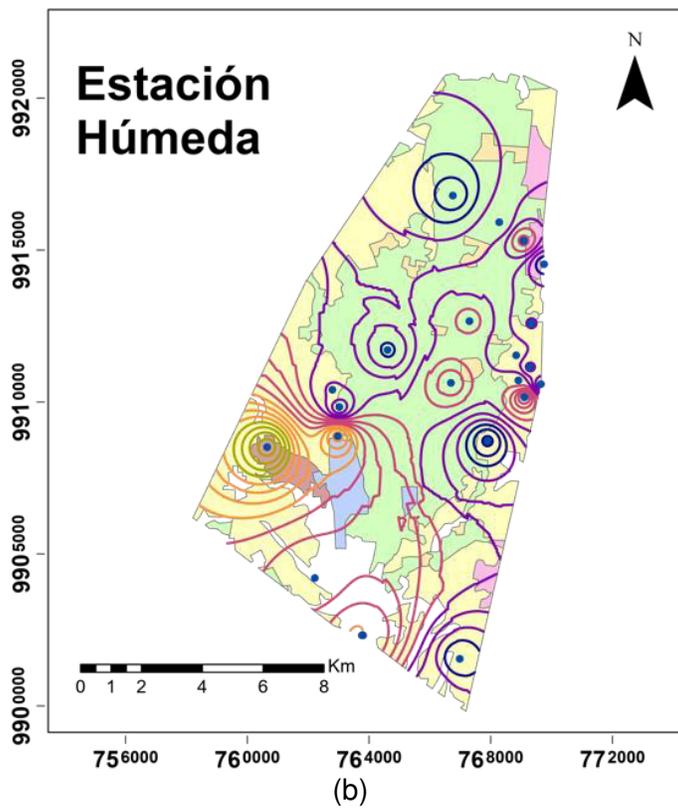
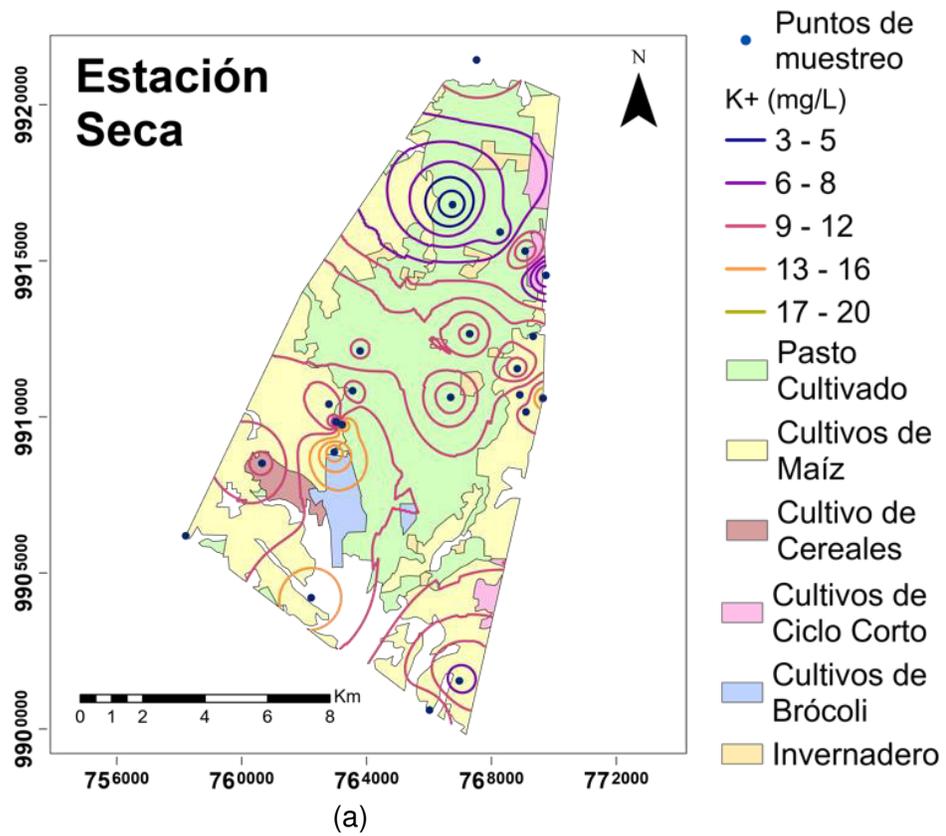


Figura 13. Distribución espacial y temporal de K⁺: (a) estación seca y (b) estación húmeda

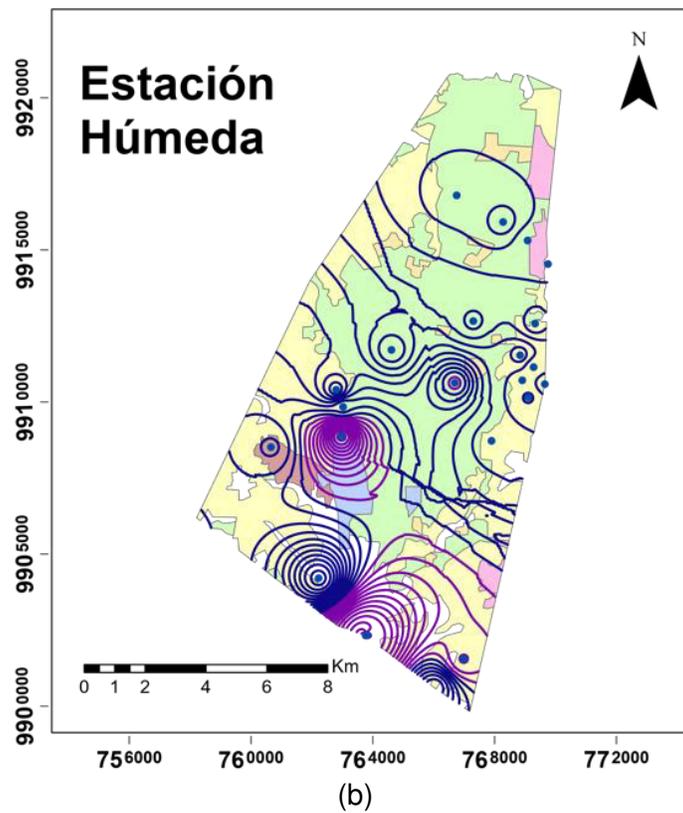
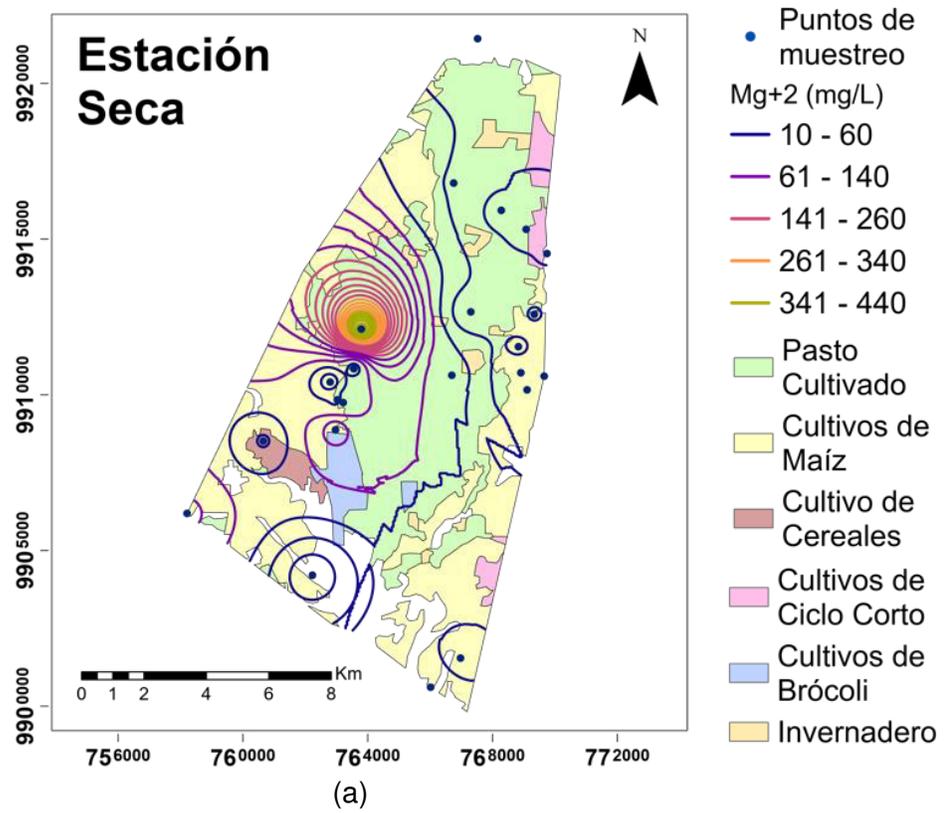


Figura 14. Distribución espacial y temporal de Mg⁺²: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

En la figura 15 se observa que la concentración de NO_2 en la estación húmeda no sobrepasa los 0,3 mg/l es mucho menor que la estación seca que llega hasta 1,95 mg/l. En base a los datos de la concentración de nitritos en la estación seca se visualiza que exceden la norma de calidad de agua para consumo humano y doméstico (0,2 mg/l) y para riego agrícola (0.5 mg/l). La concentración de NO_3^- (Figura 16) en la estación húmeda no sobrepasa los 37,5 mg/l a diferencia de la estación seca que llegan hasta un valor de 96 mg/l. En cuanto a la normativa de calidad de agua para riego la concentración de nitratos en la estación seca sobrepasa el límite para el uso de riego agrícola (50 mg/l). En la época seca los valores de concentración de SO_4^{2-} fluctúan entre 10 – 105 mg/l, mientras que en la estación húmeda de 81 - 140 mg/l (Figura 17). A pesar de que la variabilidad temporal no es muy alta se puede observar que la variabilidad espacial es evidente, puesto que de norte a sur la concentración va en incremento. La norma de la calidad del agua establece límites de 250 y 500 mg/l para el riego agrícola y el consumo humano y doméstico, respectivamente. Por lo que en ninguna de las dos estaciones se exceden estos valores. La variabilidad espacial de la concentración de Cl^- se presenta en la estación seca y húmeda al sur del área de estudio, en la estación húmeda los valores de concentración fluctúan entre 10-190 mg/l, pero la estación seca llega valores de 240 mg/l (Figura 18). El CO_3^{2-} presenta su máxima concentración en la estación seca, en la zona central del área de estudio, y también se evidencia que en la estación húmeda los valores incrementan en dirección norte-sur (Figura 19). La concentración de HCO_3^- también muestra variación en ambas estaciones, siendo la seca donde presenta la máxima concentración en la zona central y en la estación húmeda el incremento se muestra al sur de la zona (Figura 20). La concentración de PO_4^{3-} presenta el mismo patrón donde se alcanza la máxima concentración en la estación seca (Figura 21), en la estación húmeda los picos de concentración se encuentran sobre las áreas donde se realizan actividades agrícolas.

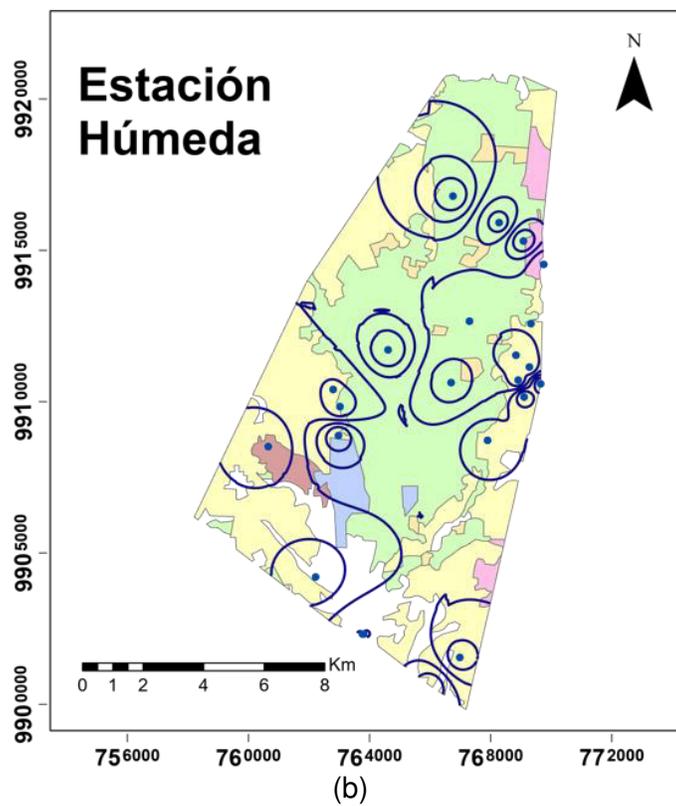
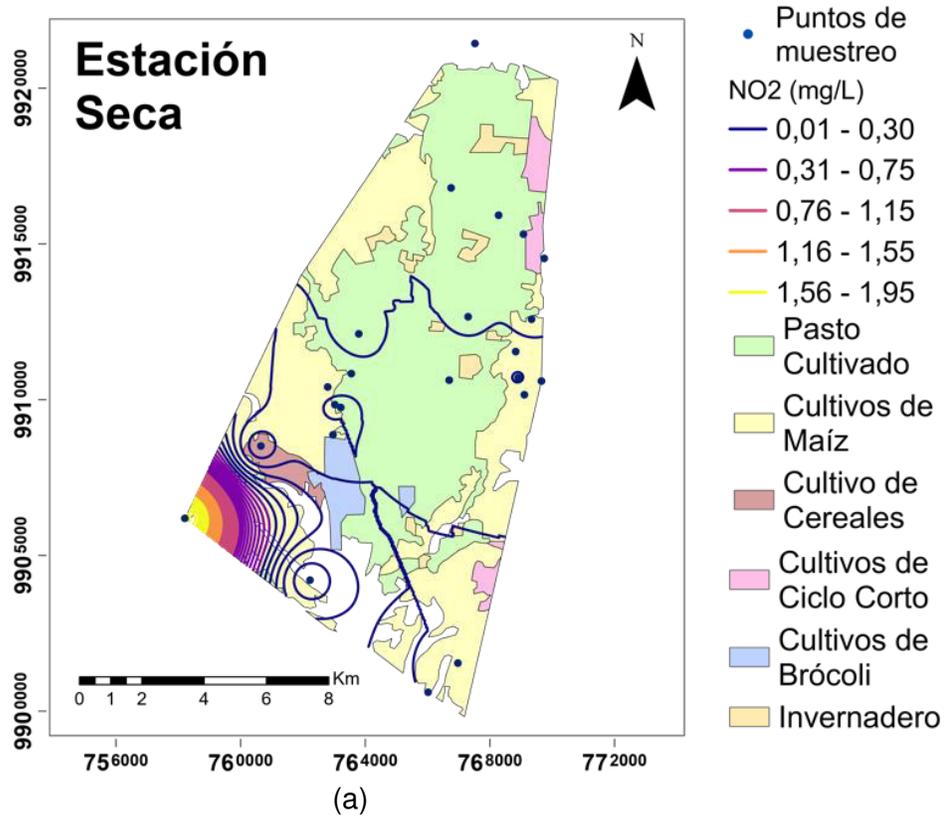


Figura 15. Distribución espacial y temporal de NO₂: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

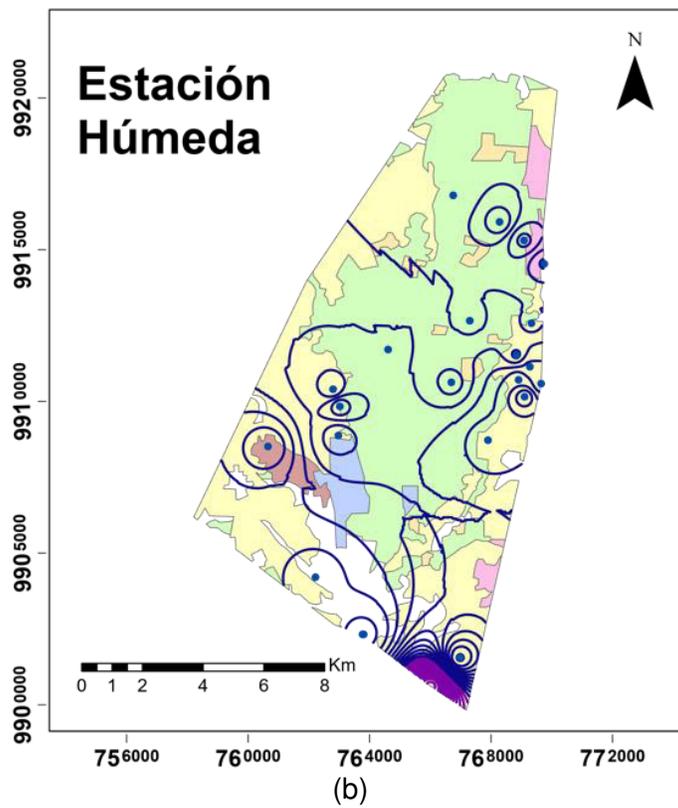
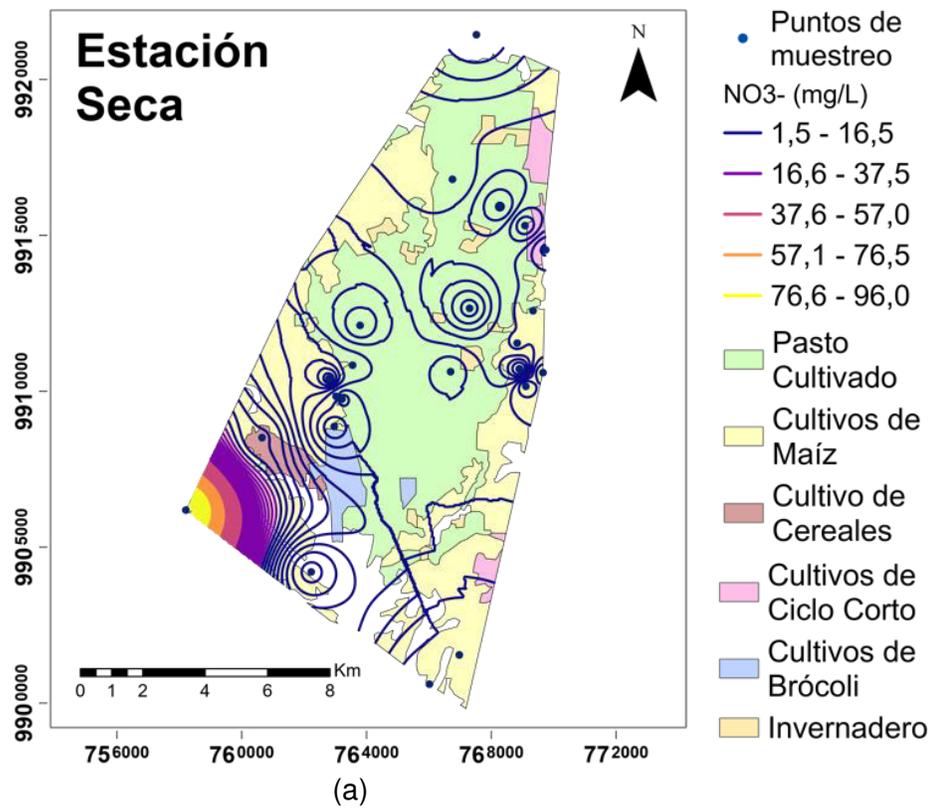


Figura 16. Distribución espacial y temporal de NO₃⁻: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

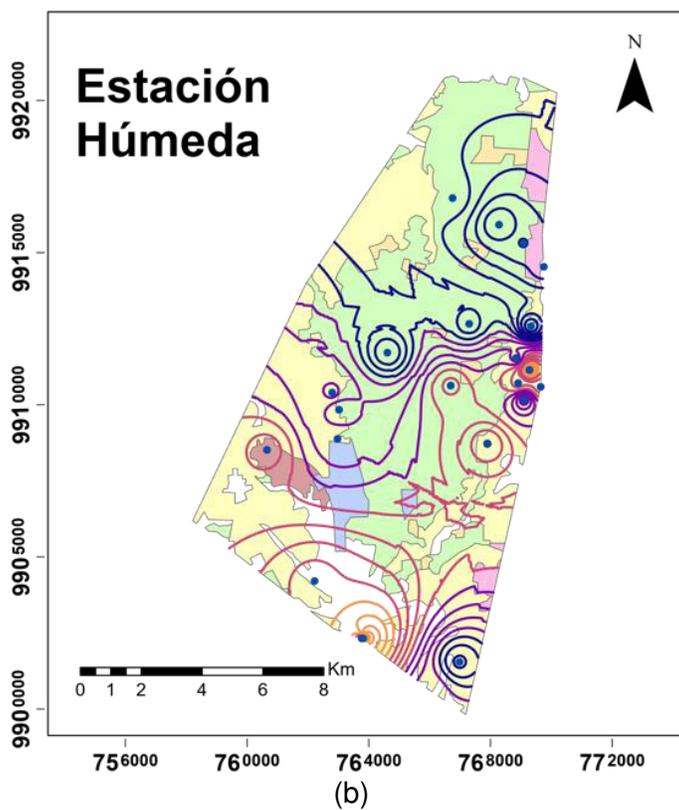
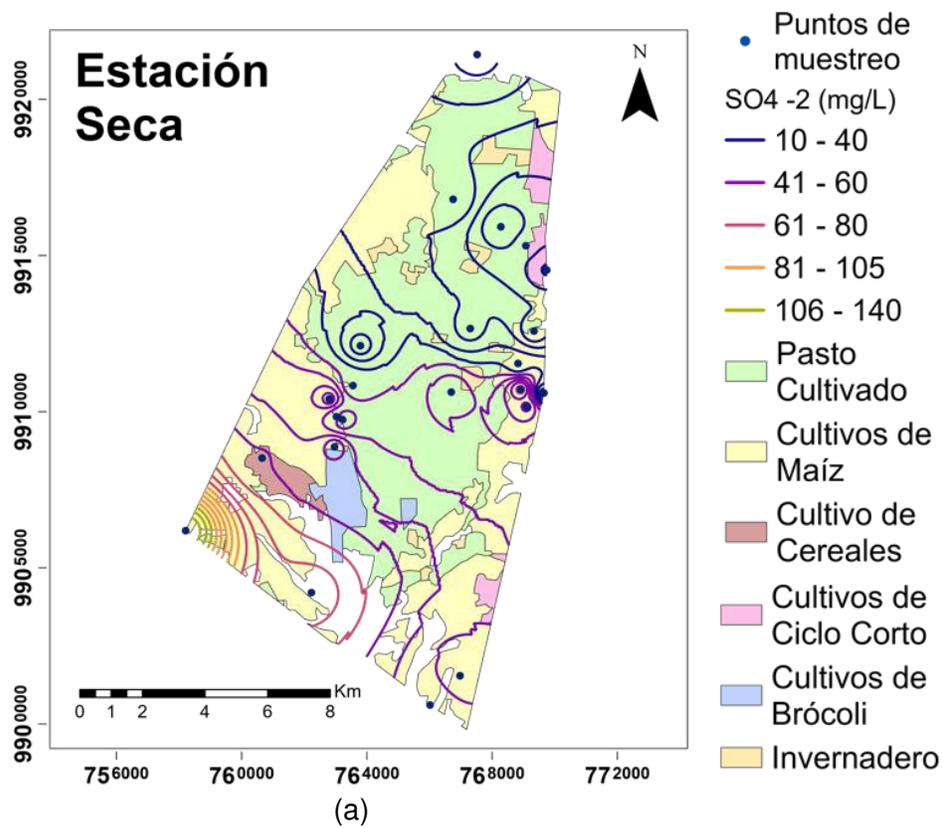


Figura 14. Distribución espacial y temporal de SO₄⁻²: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

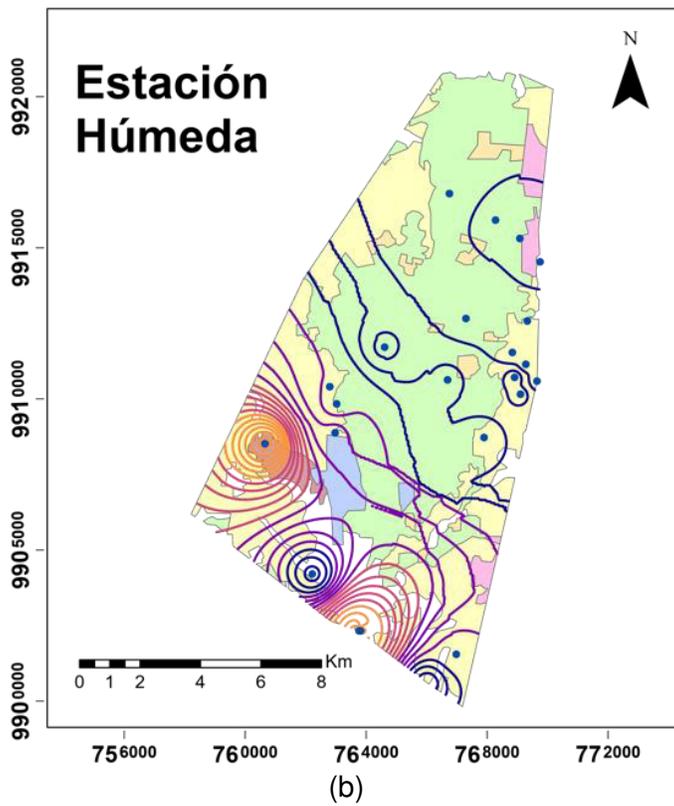
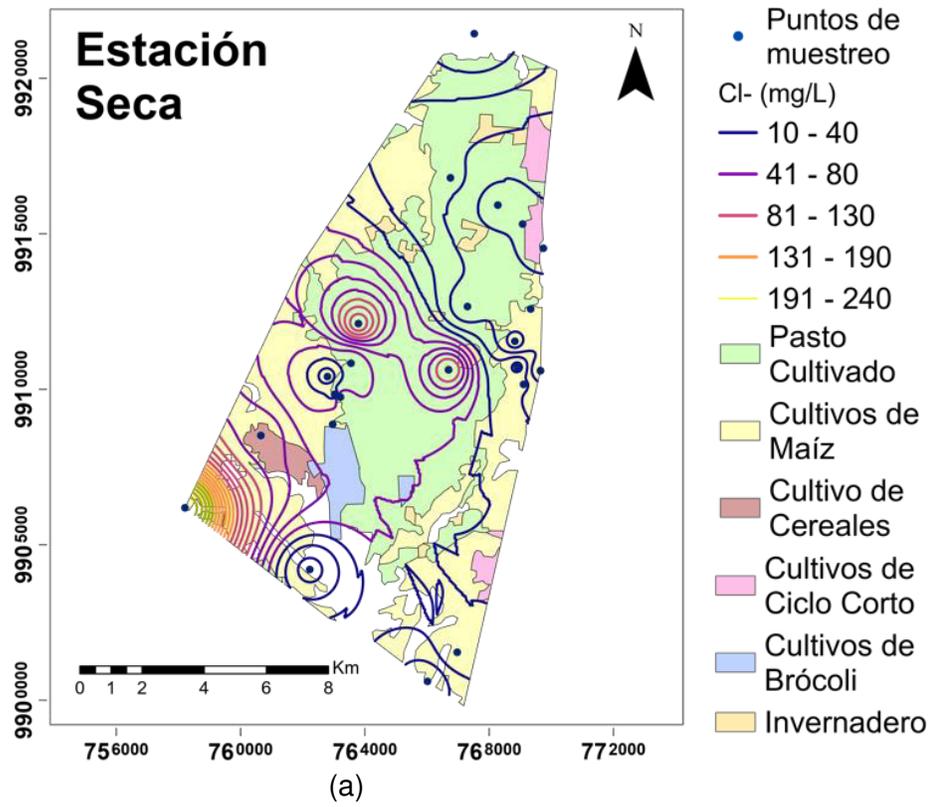


Figura 15. Distribución espacial y temporal de Cl⁻: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

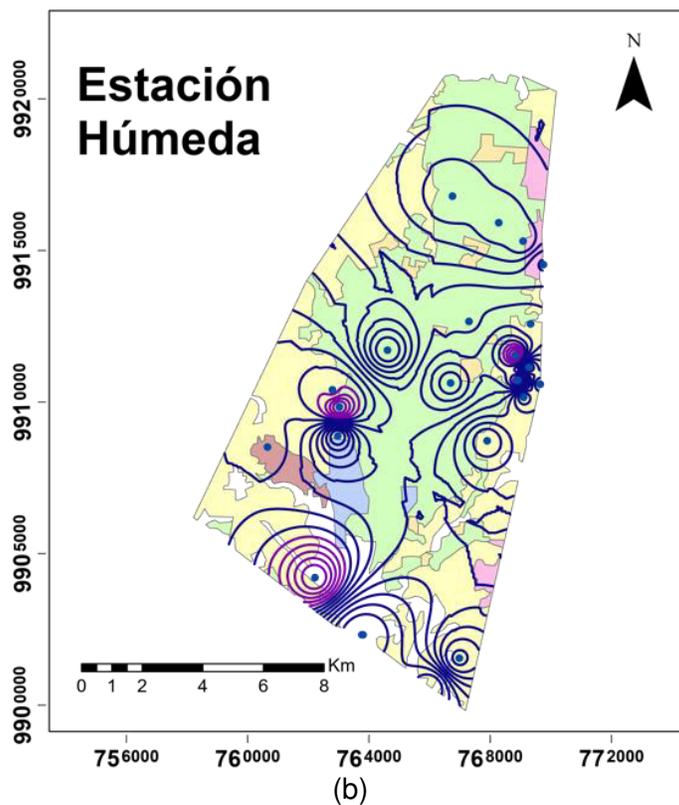
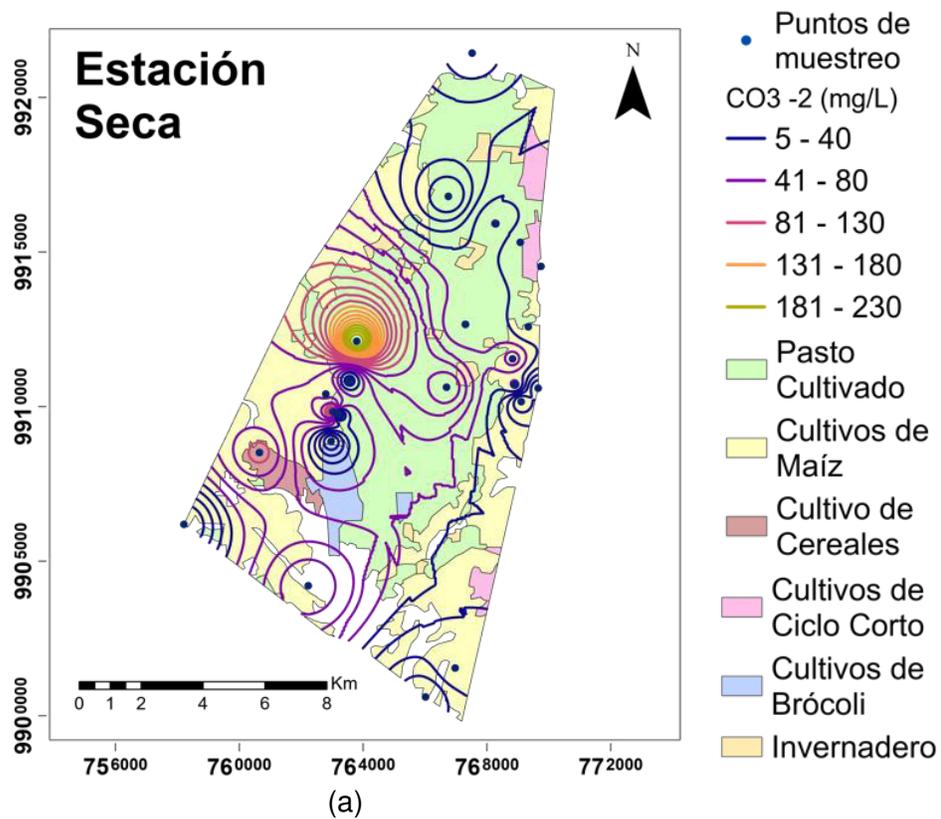


Figura 16. Distribución espacial y temporal de CO₃⁻²: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

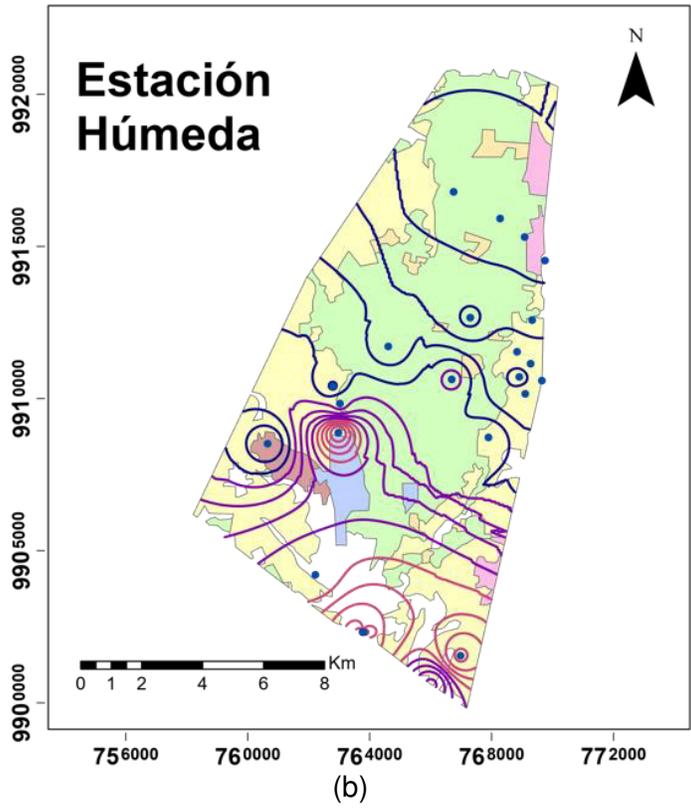
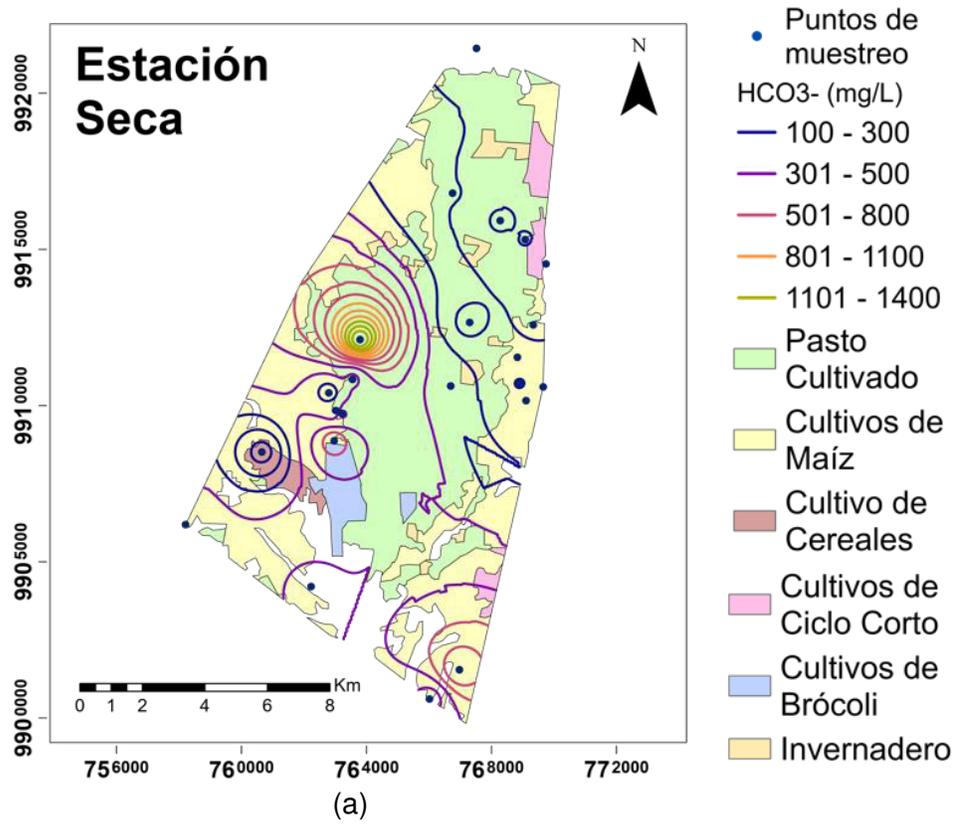


Figura 17. Distribución espacial y temporal de HCO₃⁻: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

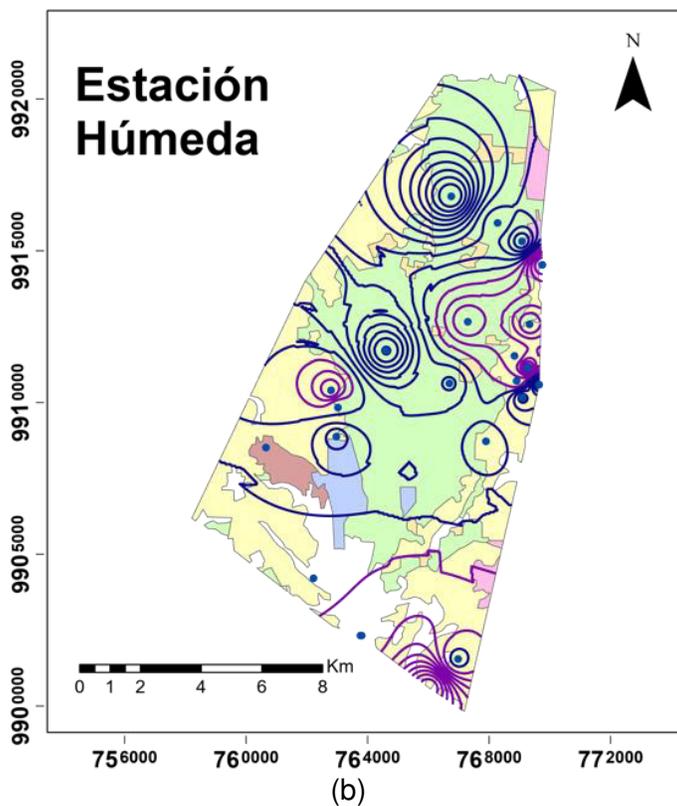
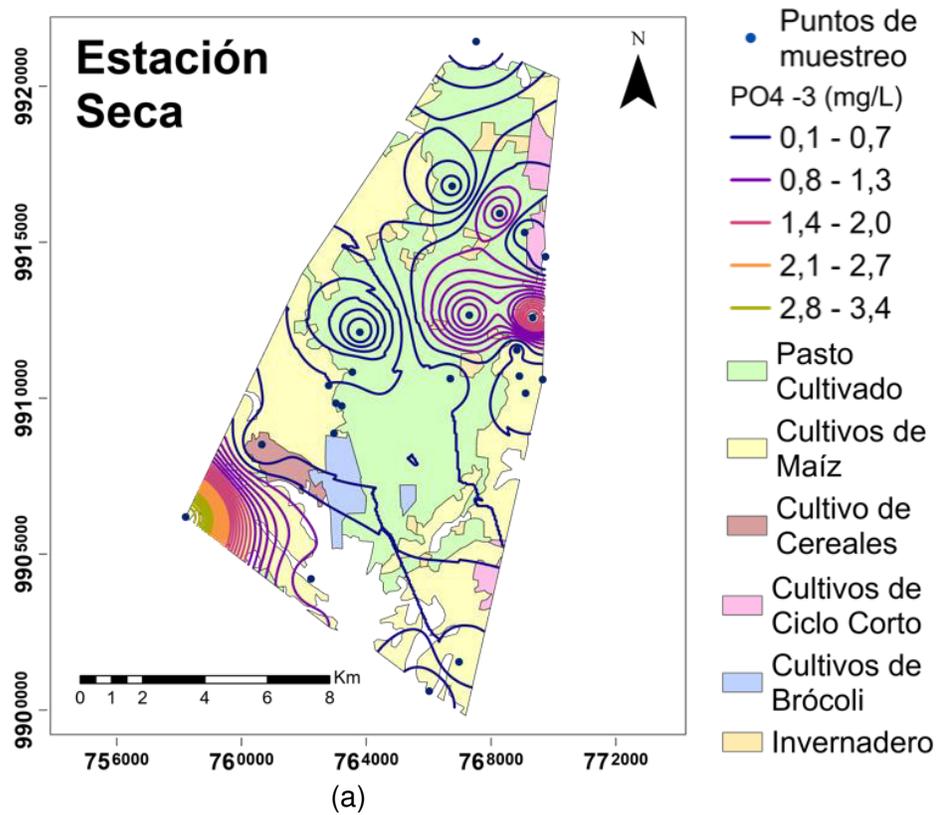


Figura 18. Distribución espacial y temporal de PO₄⁻³: (a) estación seca y (b) estación húmeda.

3.2 Discusión

La geología del suelo influye en la composición química del agua, pues se evidencia que las interacciones de la roca con el agua determinan la presencia de ciertos iones. En el diagrama de Piper (Figura 6) se observa que en general en el agua del acuífero de Mulaló no predomina ningún tipo de catión, sin embargo la presencia de magnesio y potasio se debe posiblemente a la existencia de biotitas; además, de plagioclasas por la presencia de sodio, calcio y la predominancia de bicarbonatos. De acuerdo a este diagrama el agua del acuífero de Mulaló es un agua bicarbonatada cálcica, pero hay puntos que son aguas bicarbonatadas sulfatadas y/o cloruradas o sódicas. Es decir, que el bicarbonato es el anión predominante en el agua subterránea y esto implica que hay una mayor disolución de plagioclasas (anortita y albita) que además de liberar iones de bicarbonato liberan iones de calcio y sodio. Estos resultados concuerdan con lo informado por otros autores que observaron hallazgos similares sobre la composición química en el agua subterránea de la cuenca de Loja en la que la presencia de anortitas lleva a la liberación de iones de calcio y bicarbonato [14], y en muestras de agua en manantiales como Tesalia, Hummocks, el Salitre y Quilotoa, que están ubicados cerca del área de estudio, son clasificadas como aguas bicarbonatadas alcalinotérricas por la presencia de magnesio y calcio, que en su mayoría representan la recarga meteórica de los sistemas geotérmicos investigados [42].

En caso de existir alguna alteración antropogénica se observa la presencia de nitratos, nitritos y fosfatos, y esto puede suceder debido al uso de fertilizantes nitrogenados y fosfatados o por la contaminación del agua subterránea por el agua residual, ya que hay oxidación de la materia orgánica o presencia de detergentes. En el caso de las zonas agrícolas se utilizan fertilizantes nitrogenados o fosfatados y estos son la causa de contaminación de los acuíferos poco profundos [43]. Así se demostró en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el acuífero de Daule, ya que las principales actividades agrícolas amenazan las aguas subterráneas con la contaminación por nitratos dadas las grandes necesidades de fertilizantes y agua [44]. La presencia de nitratos en la estación seca muestra la máxima concentración (76,6 – 96,0 mg/l) en la zona sur occidental (Figura 16a), mientras que en la estación húmeda la mayor concentración de nitratos (16,6 – 37,5 mg/l) se encuentra en el sur oriente del área de estudio. Los valores en la estación seca sobrepasan el límite máximo (50 mg/l) de los criterios de calidad de fuentes de agua para consumo humano y Doméstico (Tabla 2). Es decir, que la presencia de nitratos

conduce a la posibilidad que existe contaminación del acuífero de Mulaló por actividades agrícolas y posibles filtraciones de agua residual se evidencia durante la estación seca.

El diagrama de Wilcox (Figura 7) refleja que el agua de acuífero tiene las condiciones, en base al porcentaje de sodio y conductividad eléctrica, para utilizarse para riego. En el mapa de usos del suelo se observa que en su mayoría el suelo está destinado para la agricultura de maíz, cereales, brócoli, productos de ciclo corto e invernaderos, es así que en los puntos donde el agua se encuentra en categorías entre excelente, buena y admisible podría utilizarse para estos fines, mas no las que entran en categoría de dudosa e inadecuada.

La variación del nivel piezométrico del acuífero (Figura 5) es mínima entre estaciones y esto refleja que el nivel del agua oscila entre 10 cm y 2 m, además en época de sequía no existe una gran extracción de agua en el acuífero debido a la mínima disminución del nivel del agua. Por esto se logra visibilizar la existencia de una recarga en el acuífero en el centro del área de estudio, es así que los parámetros físicos e iones analizados (CE, temperatura, Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} y HCO_3^-) en la estación seca sus valores y concentraciones incrementan en este punto de recarga. Por otro lado en los mapas de los iones analizados se refleja que la concentración de estos a lo largo del acuífero incrementa en dirección sur, es decir que las concentraciones más pequeñas están en el norte del acuífero pero conforme se dirige al sur estos aumentan. En un estudio realizado en Chile [45] la CE varía de 31 a 1188 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y aumenta cuando el nivel piezométrico disminuye sin embargo en la zona central de nuestra área de estudio la CE (Figura 8) en el agua subterránea incrementa al igual que lo hace el nivel piezométrico (Figura 5) lo hace en la estación seca, esto sucede a partir de los 3000 msnm aproximadamente y los valores de CE se encuentra entre 2251 y 3825 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al igual que la temperatura que en la época seca su máximo se encuentra en esta zona alta de recarga alcanzando valores entre 21-23 °C.

3.3 Conclusiones

- La dinámica del acuífero, en base a los parámetros químicos analizados, muestra que el agua se mueve en dirección norte-sur, puesto que durante la estación húmeda se observa que los iones alcanzan sus picos de concentración en la zona sur del área de estudio.
- De acuerdo a los datos obtenidos de la concentración de nitratos al sur del área de estudio durante la época seca (Figura 16a) puede suponer la existencia de alteración antropogénica por contaminación por aguas residuales en el agua subterránea, debido a

que no es un acuífero tan profundo, al uso de fertilizantes nitrogenados o fosfatados puesto que se encuentra en un área donde se realizan actividades agrícolas y florícolas.

- El diagrama de Wilcox que sirve para calificar las aguas que se usarían para riego muestra que es posible hacer uso del agua del acuífero de Mulaló, puesto que se clasifica como excelente a buena o buena a admisible; sin embargo hay puntos mencionados anteriormente donde el agua debe ser tratada para poder asignarle ese uso. En cuanto a los límites máximos permitidos de acuerdo a los usos descritos en la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes del Recurso, el agua no es apta para consumo humano y para riego puede ser apta, en base a los nitritos y sulfatos, puesto que no sobrepasan dichos límites.
- El agua del acuífero de Mulaló es bicarbonatada cálcica y magnésica por la presencia de plagioclasas ricas en calcio y biotitas en el acuífero.
- La composición química del agua subterránea en el acuífero depende mucho de la zona de recarga, es decir que la infiltración es más alta, y en el acuífero de Mulaló esta área se encuentra en la zona centro donde la CE y los iones como Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} y HCO_3^- muestran picos en sus concentraciones en la estación seca. Por otro lado, en la estación húmeda la disolución es más alta, por lo que las concentraciones de los parámetros físicos y químicos no alcanzan valores altos.

3.4 Recomendaciones

- Es esencial tomar más muestras del agua subterránea del acuífero de Mulaló, puesto que no se puede generalizar los resultados con datos de varios días únicamente.
- No se puede determinar en esencia si es posible ingerir el agua por lo que recomienda analizar los parámetros físicos, químicos y biológicos recomendados en las normativas con las que deseemos comparar.
- Se considera necesario tomar muestras de suelo para clasificar el tipo de suelo que influye en la infiltración del agua dentro del acuífero.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Antúñez y L. Guanoquiza, «La contaminación ambiental en los acuíferos de Ecuador,» *Visión Contable*, n° 19, p. 64–101, 2019.
- [2] P. Carrión, X. Quiñonez, F. Morante, J. Montalván, G. Herrera y J. Plaza, «Geometric Model of a Coastal Aquifer to Promote the Sustainable Use of Water. Manglaralto, Ecuador,» *Water*, vol. 13, n° 7, p. 923, 2021.
- [3] Organización Mundial de la Salud [OMS], «Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda,» Ginebra, 2011.
- [4] P. Burek, Y. Satoh, G. Fische, M. Kahil, A. Scherzer, S. Tramberend, L. Nava, Y. Wada, S. Eisner, M. Flörke, N. Hanasaki, P. Magnuszewski, B. Cosgrove y D. Wiberg, «Water Futures and Solution - Fast Track Initiative (Final Report),» International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, 2016.
- [5] M. Llamas, «La inserción de las aguas subterráneas en los sistemas de gestión integrada,» *Boletín Geológico y Minero*, vol. 110, 1999.
- [6] H. Vaux, «Groundwater under stress: the importance of management,» *Environmental Earth Sciences*, vol. 62, n° 1, p. 19–23, 2011.
- [7] D. Machiwal y M. Jha, «Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques,» *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 4, pp. 80-110, 2015.
- [8] N. Burbano, S. Becerra y E. Pasquel, «Introducción a la Hidrogeología del Ecuador,» INAHMI, Quito, Ecuador, 2015.
- [9] Secretaría Nacional del Agua [SENAGUA], «Boletín de la Estadística sectorial del Agua,» Quito, 2017.
- [10] S. Castillo, S. Barrezueta y J. Arbito, «Evaluación de la calidad de aguas subterránea de la parroquia La Peaña, provincia El Oro,» *Ciencia UNEMI*, vol. 12, n° 31, pp. 64-73, 2019.
- [11] M. Camacho, «Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible,» *ANALES*, vol. 1, n° 372, pp. 78-92, 2014.
- [12] L. Cañadas, El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador, M. d. A. (MAG) y P. N. d. R. A. (PRONAREG), Edits., Quito: Banco Central del Ecuador, 1983, p. 210.

- [13] F. Alcalá, O. Larrea y L. Peñafiel, «Balance neto de agua subterránea en la cuenca alta del río Pita, Región Alto-Andina de Ecuador,» de *El Agua Subterránea: Recurso sin Fronteras: Hidrogeología Regional.*, vol. 1, Salta, Universidad Nacional de Salta, 2018.
- [14] Á. Ruiz, Á. Pérez, R. Serrano, D. Maza, J. Leiva y J. Salazar, «Hydrochemical characterization of groundwater in the Loja Basin (Ecuador),» *Applied Geochemistry*, vol. 104, pp. 1-9, 2019.
- [15] C. Manciatì, J. Taupin, N. Patris, C. Leduc y C. Casiot, «Diverging Water Ages Inferred From Hydrodynamics, Hydrochemical and Isotopic Tracers in a Tropical Andean Volcano-Sedimentary Confined Aquifer System,» *Frontiers in Water*, vol. 3, 2021.
- [16] J. Ordoñez, «Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico,» Sociedad Geográfica de Lima, Lima, Perú, 2011.
- [17] J. López, J. Fornés, G. Ramos y F. Villarroya, *Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo*, Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España, 2009.
- [18] S. S. D. Foster y P. J. Chilton, «Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, vol. 358, n° 1440, pp. 1957-1972, 2003.
- [19] A. Aguilar, B. Jiménez, E. Valiente, G. Ponce, S. Villanueva, A. Botello, B. López, G. Herrera, J. Carrillo, A. Cardona, M. Mazari, M. Aguilar, A. Espinosa, N. Durán y L. Zambrano, *Calidad del agua : un enfoque multidisciplinario*, México: UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas, 2010.
- [20] B. Hart, B. Maher y I. Lawrence, «New generation water quality guidelines for ecosystem protection,» *Freshwater Ecology*, vol. 2, n° 2, pp. 347-359, 1999.
- [21] C. Sierra, *Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico*, Medellín, Colombia: Universidad de Medellín, Ediciones de la U, 2011.
- [22] D. Martínez, J. Chávez, Á. Bustamante, Ó. Palacios, M. d. I. I. d. Bauer, L. T. Chávez y M. de la Isla de Bauer, «Variación espacial de la calidad del agua para uso agrícola del acuífero costero del Valle del Mayo, Sonora, México,» *Hidrobiológica*, vol. 26, n° 1, 2016.
- [23] U. Karmegam, S. Chidambaram, M. Prasanna, P. Sasidhar, S. Manikandan, G. Johnsonbabu, V. Dheivanayaki, P. Paramaguru, R. Manivannan, K. Srinivasamoorthy y P. Anandhan, «A study on the mixing proportion in groundwater samples by using Piper diagram and Phreeqc model,» *Chinese Journal of Geochemistry*, vol. 30, n° 4, pp. 490-495, 2011.

- [24] S. Kumar, «Interpretation of groundwater chemistry using piper and chadha's diagrams: a comparative study from perambalur taluk,» *Elixir Geoscience* 54, pp. 12208-12211, 2013.
- [25] L. V. Wilcox, «Circular 969. Classification and Use of Irrigation Waters,» US Department of Agriculture, 1955.
- [26] R. Amer, R. Ripperdan, T. Wang y J. Encarnación, «Groundwater quality and management in arid and semi-arid regions: Case study, Central Eastern Desert of Egypt,» *Journal of African Earth Sciences*, vol. 69, pp. 13-25, 2012.
- [27] N. Raju, «Hydrogeochemical parameters for assessment of groundwater quality in the upper Gunjanaeru River basin, Cuddapah District, Andhra Pradesh, South India,» *Environmental Geology*, vol. 52, nº 6, pp. 1067-1074, 2007.
- [28] M. Salifu, F. Aidoo, M. S. Hayford, D. Adomako y E. Asare, «Evaluating the suitability of groundwater for irrigational purposes in some selected districts of the Upper West region of Ghana,» *Applied Water Science* 7, p. 653–662, 2017.
- [29] K.-T. Chang, «Geographic Information System,» *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 2019.
- [30] C. Funk, A. Verdin, J. Michaelsen, P. Peterson, D. Pedreros y G. Husak, «A global satellite-assisted precipitation climatology,» *Earth System Science Data*, vol. 7, nº 2, p. 275–287, 2015.
- [31] C. Manciatì, «Etude de l'interaction surface–souterrain du système aquifère tumbaco–cumbaya en équateur, avec un approche hydrodynamique et géochimique,» Université Montpellier 2, 2014.
- [32] C. Manciatì, J. Taupin, N. Patris, J. Cartagena, E. Pasquel y B. Cáceres, «Hydrodynamical, geochemical and isotopic preliminary results of Andean groundwater in an active volcanic zone, Mulalo (Ecuador),» Unpublished, 2015.
- [33] A. Piper, «A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses,» *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 25, nº 6, pp. 914-928, 1944.
- [34] A. Fallahati, H. Soleimani, M. Alimohammadi, E. Dehghanifard, M. Askari, F. Eslami y L. Karami, «Impacts of drought phenomenon on the chemical quality of groundwater resources in the central part of Iran—application of GIS technique,» *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, nº 1, pp. 1-19, 2020.
- [35] M. Dhanasekarapandiana, S. Chandrana, D. Saranya y V. Kumar, «Spatial and temporal variation of groundwater quality and its suitability for irrigation and drinking purpose using

- GIS and WQI in an urban fringe,» *Journal of African Earth Sciences*, vol. 124, pp. 270-288, 2016.
- [36] C. Schloeder, N. Zimmermann y M. J. Jacobs, «Comparison of Methods for Interpolating Soil Properties Using Limited Data,» *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, n° 2, p. 470–479, 2001.
- [37] K. Johnston, J. V. Hoef, K. Krivoruchko, N. Lucas y J. Ver Hoef, *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, United States of America: ESRI, 2001.
- [38] Ministerio del Ambiente [MAE], «Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes del Recurso Agua,» de *Acuerdo Ministerial 097-A*, 2015.
- [39] A. González, J. Fagundo, J. Carrillo y R. Rodríguez, «Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México,» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 64, n° 3, pp. 319-333, 2012.
- [40] A. Correa, G. Rodríguez, M. Arango y G. Zapata, «Petrografía, geoquímica y geocronología U-Pb de las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, Colombia,» *Boletín de Geología*, vol. 41, n° 1, pp. 29-54, 2019.
- [41] E. Chulde, «Caracterización petrográfica, geoquímica y petrogenética de los Gabros Hornbléndicos expuestos en La Carolina (Guallupe). Implicaciones regionales en la configuración de la cordillera occidental septentrional del Ecuador.,» *GEOLatitud*, vol. 1, n° 1, pp. 76-95, 2017.
- [42] S. INGUAGGIATO, S. HIDALGO, B. BEATE y J. BOURQUIN, «Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc,» *Geofluids*, vol. 10, n° 4, p. 525–541, 2010.
- [43] L. Albert, «Nitratos y nitritos,» de *Introducción a la Toxicología ambiental*, Metepec, Estado de México, Centro panamericano de ecología humana y salud. División de salud y ambiente. Organización panamericana de la salud, 1997, pp. 279-296.
- [44] L. Ribeiro, J. C. Pindo y L. Dominguez-Granda, «Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method,» *Science of The Total Environment*, vol. 574, p. 1674–1683, 2017.
- [45] M. Taucare, L. Daniele, B. Viguier, A. Vallejos y G. Arancibia, «Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile,» *Science of The Total Environment*, vol. 772, 2020.