



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

“ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE LA
CALIDAD DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS DEL CANTÓN DE
OTAVALO, ECUADOR”

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO/A EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORAS:

Farinango Vallejos Gladys Andrea
Saransig Revelo Carmen Elizabeth

DIRECTOR:

Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

Ibarra – 2021



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN

Ibarra, 28 de julio del 2021

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS DEL CANTÓN DE OTAVALO, ECUADOR", de autoría de las señoritas Gladys Andrea Farinango Vallejos y Carmen Elizabeth Saransig Revelo, estudiantes de la Carrera de INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES el tribunal tutor CERTIFICAMOS que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

Ing. Santiago Cabrera, MSc.
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

Ing. Gabriel Jácome MSc.
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Gabriel Jácome A.
DOCENTE FICAYA

Ing. Oscar Rosales MSc.
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TRITULACIÓN

Misión Institucional:

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003336342		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Farinango Vallejos Gladys Andrea		
DIRECCIÓN:	La Florida, Ibarra, Imbabura		
EMAIL:	gafarinangov2@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062632458	TELÉFONO MÓVIL:	0958765854

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1724160856		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Saransig Revelo Carmen Elizabeth		
DIRECCIÓN:	San Luis, Otavalo, Imbabura		
EMAIL:	cesaransigr@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062921 617	TELÉFONO MÓVIL:	0994804902

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS DEL CANTÓN DE OTAVALO, ECUADOR"
AUTOR (ES):	Gladys Andrea Farinango Vallejos Carmen Elizabeth Saransig Revelo
FECHA: DD/MM/AAAA	28 de julio de 2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Santiago Cabrera, MSc.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de julio de 2021

LOS AUTORES:



Farinango Vallejos Gladys Andrea

CC: 100333634-2



Saransig Revelo Carmen Elizabeth

CC: 1724160856

AGRADECIMIENTO

"Todos nuestros sueños pueden hacerse realidad, si tenemos el coraje de perseguirlos" Walt Disney

Agradecemos infinitamente a nuestras familias, por el esfuerzo, apoyo y motivación que nos han brindado para seguir adelante, por todo el cariño y sobre todo por la confianza puesta en nosotras.

A la Universidad Técnica del Norte y a cada uno de los docentes que fueron partícipes de nuestra formación académica, ya que, gran parte de los conocimientos que poseemos los hemos adquirido gracias a su dedicación y esfuerzo en nuestros días de estudiantes.

A la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado del cantón Otavalo, al Ing. Diego Benavides, a los miembros del laboratorio especialmente a la Quim. Verónica Vargas y al Ing. Michael Bermúdez quienes nos proporcionaron la información necesaria para el desarrollo de este estudio y al personal encargado de las fuentes de agua.

Asimismo, agradecemos de manera especial a nuestro director de tesis Ing. Santiago Cabrera MSc, por guiarnos en este proceso, por su apoyo y todo el conocimiento impartido, a nuestros asesores Ing. Gabriel Jácome MSc. e Ing. Oscar Rosales MSc. por sus indicaciones y orientación brindada pues fueron indispensables para la culminación de este trabajo.

Finalmente, queremos expresar nuestro agradecimiento a todos quienes nos apoyaron directa e indirectamente en el desarrollo de nuestra investigación. Cada uno de sus valiosos aportes están plasmados en este documento.

Andrea y Elizabeth

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Teresa Vallejos y a mi padre Gabriel Farinango por su amor, comprensión y apoyo incondicional para seguir adelante.

A mi hija Isis, mi compañerita de vida, mi más grande amor y mi mayor motivación para nunca rendirme y ser mejor persona cada día, gracias por ser mi fortaleza. ¡Esto es para ti!

A mis hermanos por su apoyo, por sus consejos, por ser esos amigos que han estado presentes en cada día de mi vida, por darme esos grandes empujones por salir adelante y por no darme por vencida.

A Bryan V., por coincidir en esta vida y estar en el momento indicado, por su amor, apoyo y consejos.

A Mary B. y Mauricio C. mis mejores amigos, mis hermanos de corazón, con quienes he compartido muchas vivencias y han sabido estar para mí, apoyándome, aconsejándome y reconfortándome en los momentos en que más lo necesitaba.

A mis amigos Alex C., Ely S., Bryan I., Gaby P., quienes me han demostrado que la vida con amigos es más bonita y por compartir conmigo este camino para alcanzar este logro académico.

Finalmente, dedico esta tesis a aquellas personas que desde el principio de la carrera me han apoyado, me han brindado sus consejos llenos de amor y sus palabras de motivación en mis momentos más difíciles.

“Lo logramos”

Con amor
Andrea Farinango Vallejos

DEDICATORIA

Es mi deseo como sencillo gesto de agradecimiento dedicar este trabajo de grado a Dios por su fidelidad, porque su voluntad es buena, tanto que me ha permitido culminar una meta muy anhelada, sin Él nada es posible.

A mi querida madre Fanny Revelo por su ejemplo de lucha y perseverancia ya que gracias a su esfuerzo y sacrificio he podido cumplir un sueño que desde el principio juntas compartimos.

A mi abuelita Emperatriz Aldás pues sin ella no lo habría logrado, ya que, sus cuidados, mimos, valores, consejos y su inmenso amor han hecho de mí una persona de bien, además, sus oraciones diarias me protegen y me han guiado siempre por el mejor camino.

A mis hermanos por creer en mí, por apoyarme en lo que les fue posible y porque este logro es también de ustedes. A mis sobrinos por su cariño y respeto, por alegrar mi vida con cada ocurrencia. A Daniel mi compañero de aventuras y sueños, porque al final del día todo se trata de con quien quieres viajar el resto de tu vida.

A mis queridos amigos Jessie, Consue, Gaby, Wendy, Jordy, Alex, Bryan y Andre quien además fue mi compañera de tesis, ¡lo logramos! Mi vida universitaria no hubiera sido lo mismo sin ustedes, talvez no volvamos a juntarnos en un aula de clase, pero cada momento compartido ha hecho de este proceso uno de los mejores de mi vida.

Con Amor, Elizabeth

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes o estado del arte.....	1
1.2 Problema de investigación y justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Hipótesis de la investigación	6
CAPÍTULO II.....	7
REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 Marco teórico referencial	7
2.1.1 Agua subterránea.....	7
2.1.1.1 Acuífero.....	7
2.1.2 Tipos de acuíferos	8
2.1.3 Usos del agua subterránea	9
2.1.4 Contaminación del agua subterránea.....	9
2.1.4.1 Fuentes contaminantes.....	10
2.1.4.2 Procesos puntuales de contaminación	10
2.1.4.3 Procesos difusos de contaminación.....	11
2.1.4.4 Principales contaminantes de las aguas subterráneas.....	11

2.1.4.5	Parámetros de calidad de agua potable (físicos, químicos y microbiológicos).....	11
2.1.5	Análisis espacio temporales de calidad del agua	15
2.1.6	Estándares de calidad de agua potable	16
2.1.6.1	Ley del Agua Potable Sana (SDWA).....	16
2.1.6.2	Norma de la calidad de agua para consumo humano y uso doméstico, vigente en el Ecuador.....	17
2.1.7	Estrategias para proteger las aguas subterráneas de la contaminación	17
2.1.7.1	Protección de captaciones.....	17
2.2	Marco legal.....	18
CAPÍTULO III		22
METODOLOGÍA.....		22
3.1	Descripción del área de estudio	22
3.2	Métodos	25
3.2.1	Caracterización de los acuíferos en base a su área de influencia, litología y uso de suelo.	25
3.2.1.1	Reconocimiento y delimitación del área de influencia	25
3.2.1.2	Adquisición de cartografía temática y evaluación de los cambios de cobertura vegetal.....	26
3.2.2	Determinación de la variación espacio temporal de la calidad de agua en los acuíferos.	28
3.2.2.1	Adquisición y tratamiento previo de datos	28
3.2.2.2	Estadística descriptiva	29
3.2.2.3	Imputación de datos.....	30
3.2.2.4	Pruebas de normalidad	32
3.2.2.5	Análisis de varianza.....	32
3.2.2.6	Regresión no lineal.....	33

3.2.2.7 Análisis de conglomerados	34
3.2.3 Comparación de calidad de agua de los acuíferos con la normativa nacional e internacional con respecto a calidad de agua potable para proponer estrategias para la protección y conservación.	34
3.2.3.1 Calidad de agua de los acuíferos.....	34
3.2.3.2 Estrategias de protección y conservación.....	35
3.3 Materiales y equipos.....	37
CAPÍTULO IV	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 Caracterización de los acuíferos en base a su área de influencia, litología y uso de suelo.....	38
4.1.1 Área de influencia de los acuíferos	38
4.1.2 Litología	40
4.1.3 Cambios de uso de suelo y cobertura vegetal.....	44
4.2 Variación espacio temporal de la calidad de agua en los acuíferos.....	49
4.2.1 Muestras de calidad de agua	49
4.2.2 Caracterización de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos.....	50
4.2.3 Imputación de datos	62
4.2.4 Análisis espacio temporal.....	63
4.3 Comparación de calidad de agua y estrategias de protección y conservación de los acuíferos.....	73
4.3.1 Calidad de agua.....	73
4.3.2 Propuesta de estrategias de protección y conservación.....	82
4.3.2.1 Estrategia 1. Gestión de los recursos hídricos	85
4.3.2.2 Estrategia 2. Perímetros de protección de las vertientes	89
4.3.2.3 Estrategia 3. Practicas agroecológicas para la conservación de zonas próximas a los acuíferos.....	93

4.3.2.4 Estrategia 4. Educación ambiental	97
CAPÍTULO V	101
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
5.1 Conclusiones.....	101
5.2 Recomendaciones	102
REFERENCIAS	103
ANEXOS.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de acuíferos según su hidrodinámica, hidráulica y litología.....	8
Tabla 2. Coordenadas de las vertientes. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 S	26
Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos.....	28
Tabla 4. Eficiencia del proceso de imputación múltiple	31
Tabla 5. Porcentaje de valores perdidos de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos	31
Tabla 6. Rangos e interpretación del coeficiente de determinación.	33
Tabla 7. Límites máximos permisibles	34
Tabla 8. Materiales y equipos.....	37
Tabla 9. Tipo de roca y formación geológica de los acuíferos.....	42
Tabla 10. Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal del periodo 2000-2018...	47
Tabla 11. Diferencias estadísticamente significativas a nivel espacial.....	64
Tabla 12. Diferencias estadísticamente significativas a nivel temporal	66
Tabla 13. Tanques de almacenamiento y distribución de agua potable en la zona urbana del cantón Otavalo.....	84
Tabla 14. Actores involucrados	85
Tabla 15. Gestión de los recursos hídricos.....	87
Tabla 16. Perímetros de protección de las vertientes.....	91
Tabla 17. Practicas agroecológicas para la conservación de zonas próximas a los acuíferos	95
Tabla 18. Educación ambiental.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formación geológica porosa, fracturada y karstificada	7
Figura 2. Área de estudio	24
Figura 3. Reconocimiento del área de estudio de las vertientes.....	25
Figura 4. Infraestructura que concentra el agua de las vertientes.....	36
Figura 5. Cuenca del río Jatunyacu.....	36
Figura 6. Formaciones geológicas de la cuenca del río Jatunyacu	41
Figura 7. Validación in situ de clasificación de los acuíferos según el tipo de roca.	43
Figura 8. Uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca del río Jatunyacu.....	46
Figura 9. Uso de suelo y cobertura vegetal del año 2020 de áreas cercanas a las vertientes	48
Figura 10. Medias de color verdadero y desviación estándar de las vertientes ...	50
Figura 11. Medias de turbiedad y desviación estándar de las vertientes	51
Figura 12. Medias de conductividad eléctrica y desviación estándar de las vertientes	51
Figura 13. Media de sólidos totales disueltos y desviación estándar de las vertientes	52
Figura 14. Media del potencial de hidrógeno y desviación estándar de las vertientes	53
Figura 15. Media de Temperatura y desviación estándar de las vertientes.....	53
Figura 16. Media de nitratos y desviación estándar de las vertientes.....	54
Figura 17. Media de nitritos y desviación estándar de las vertientes	55
Figura 18. Media de amonio y desviación estándar de las vertientes.....	55
Figura 19. Media de fósforo y desviación estándar de las vertientes	56
Figura 20. Media de hierro y desviación estándar de las vertientes	57
Figura 21. Media de flúor y desviación estándar de las vertientes.....	57

Figura 22. Media de sulfatos y desviación estándar de las vertientes	58
Figura 23. Media de alcalinidad y desviación estándar de las vertientes	59
Figura 24. Media de calcio y desviación estándar de las vertientes	59
Figura 25. Media de dureza cálcica y desviación estándar de las vertientes	60
Figura 26. Media de dureza total y desviación estándar de las vertientes	60
Figura 27. Media de coliformes totales y desviación estándar de las vertientes ..	61
Figura 28. Media de <i>E. coli</i> y desviación estándar de las vertientes	62
Figura 29. Valores imputados	63
Figura 30. Dendrograma para el análisis espacial que indica la agrupacion de las vertientes.	65
Figura 31. Representación gráfica de conductividad eléctrica con respecto a los años.	66
Figura 32. Diagramas de regresión de sólidos totales disueltos vs años.	67
Figura 33. Diagramas de regresión de potencial de hidrógeno vs años.....	68
Figura 34. Diagramas de regresión de amonio vs años.	69
Figura 35. Diagramas de regresión de coliformes totales vs años.....	70
Figura 36. Diagramas de regresión <i>E coli.</i> vs años.....	71
Figura 37. Dendrograma para el análisis temporal que indica la agrupacion de los periodos de las vertientes.	72
Figura 38. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a la normativa nacional e internacional.	76
Figura 39. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a la normativa nacional e internacional del potencial de hidrógeno.	77
Figura 40. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a la normativa nacional e internacional de solidos disueltos totales.	77
Figura 41. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de nitratos.	77

Figura 42. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de nitritos.....	79
Figura 43. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de amonio.....	80
Figura 44. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de coliformes totales.....	81
Figura 45. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de E. coli.	82
Figura 46. Actividades antrópicas susceptibles de contaminar las vertientes: a) La Magdalena, b) Punyaro, c) Neptuno y d) Turupamba	83

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES
“ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE LA
CALIDAD DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS DEL CANTÓN DE
OTAVALO, ECUADOR”

Trabajo de titulación

Farinango Andrea
Saransig Elizabeth

RESUMEN

Los acuíferos representan grandes reservas de agua subterránea, su calidad se ve afectada principalmente por la influencia de actividades antrópicas que se realizan entorno a las zonas de recarga. El presente estudio analizó la variación espacio temporal de la calidad de agua cruda de los acuíferos La Magdalena, Neptuno, Punyaro y Turupamba que abastecen de agua a la zona urbana del cantón Otavalo. Para ello se identificó a la cuenca hidrográfica del río Jatunyacu como el área de influencia. Por medio del análisis del tipo de roca, formaciones geológicas y uso de suelo y cobertura vegetal presentes en la cuenca se identificó que las vertientes La Magdalena y Turupamba representan acuíferos kársticos rodeados por tierras agropecuarias, mientras que las vertientes Neptuno y Punyaro representan acuíferos detríticos rodeados por áreas pobladas. Se determinó la variación espacio temporal de calidad de agua de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en los periodos 2003-2008 y 2014-2019, mediante el análisis de varianza Kruskal-Wallis y el análisis de grupos Cluster, obteniéndose que existe una variación espacial y temporal leve, siendo las vertientes La Magdalena y Turupamba las que presentan mayor variación en cuanto a valores de coliformes totales y *E. coli*. Se estableció que el agua de las vertientes es de buena calidad siendo necesario solo la cloración antes de su distribución, ya que los parámetros analizados están dentro de los estándares de calidad (AM097-A); razón por la cual se propuso estrategias direccionadas a la prevención de problemas futuros, como la delimitación de perímetros de protección, que garanticen la protección y conservación de los acuíferos.

Palabras clave: análisis espacio temporal, calidad de agua, acuíferos, área de influencia, zonas de recarga.

ABSTRACT

Aquifers represent large reserves of groundwater, its quality is mainly affected by the influence of anthropic activities carried out in recharge zones. This study analyzed the spatio-temporal variation of the raw water quality of La Magdalena, Neptuno, Punyaro and Turupamba aquifers that supply water to the urban area of the Otavalo. For this, the hydrographic basin of the Jatunyacu river was identified as the area of influence. Through the analysis of the type of rock, geological formations, land use, and vegetation cover, it was identified that the La Magdalena and Turupamba watersheds represent karst aquifers surrounded by agricultural lands, while the Neptuno and Punyaro watersheds represent detrital aquifers surrounded by populated areas. The spatio-temporal variation of water quality of the physical, chemical, and microbiological parameters was determined in the periods 2003-2008 and 2014-2019, by means of the Kruskal-Wallis analysis of variance and the Cluster analysis, obtaining that there is a slight spatial and temporal variation, being the La Magdalena and Turupamba watersheds the ones that present the greatest variation in terms of total coliforms and *E. coli* values. It was established that the water from the springs is of good quality, only chlorination being necessary before its distribution, since the parameters analyzed are within the quality standards (AM097-A). Therefore, the proposed strategies aimed at preventing future problems were proposed, such as the delimitation of protection perimeters, which guarantee the protection and conservation of aquifers.

Key words: spatial-temporal analysis, water quality, aquifers, area of influence, recharge zones.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes o estado del arte

El agua es un compuesto importante y esencial para la existencia de toda forma de vida en el planeta. Según la Comisión Nacional del Agua (2011) el 75 % de la superficie de la tierra es agua, sin embargo, el 97.5 % es agua salada, teniendo tan solo un 2.5 % de agua dulce que se encuentra distribuida en glaciares y capas polares (69 %), en la atmósfera, lagos y ríos (1 %) y en agua subterránea (30 %), esta última reserva resulta importante por ser una de las principales fuentes de suministro doméstico del mundo (Instituto Geológico y Minero de España, 2012).

Los acuíferos representan grandes reservas de agua subterránea, generalmente dulce o salobre y constituyen fuentes valiosas de este recurso, ya que abastecen aproximadamente al 50 % de la población mundial (World Water Assessment Programme, 2015). Este recurso es un factor que influye en la economía y contribuye al bienestar de los países en vías de desarrollo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2018). En lugares en los que las precipitaciones son escasas e irregulares y no es posible acceder con facilidad a agua superficial, el agua subterránea juega un papel muy importante (IGME, 2012).

Según Miletto (2017) en muchos casos los recursos hídricos subterráneos del mundo suelen ser compartidos por dos o más poblaciones, lo que crea desacuerdos ya que el agua representa un elemento insustituible y fundamental para la producción de alimentos y el normal funcionamiento de muchos sectores socioeconómicos. Sin embargo, esta situación se presenta como una oportunidad de cooperación conjunta mediante acuerdos o tratados de gestión de los recursos.

La presencia y calidad del agua subterránea depende no solo de su gestión sino también de un conjunto de factores económicos, sociales, geográficos y del sistema de gobierno de cada país. Según el BID (2018) en América Latina y el Caribe existe alrededor de un tercio de los recursos de agua dulce a nivel mundial, misma que es aprovechada y gestionada por aproximadamente el 8,6 % de la población, la cual se encuentra localizada mayormente en urbes (80 %). Sin embargo, esta región

presenta un índice de desarrollo medio ya que la desigualdad es uno de los rasgos sobresalientes de la sociedad latinoamericana, por lo que la gestión y aprovechamiento del agua no es eficiente (Auge, 2006).

Montaño et al. (1998) mencionan que el conocimiento previo de las condiciones y características de los acuíferos debe formar la base para el correcto establecimiento de un régimen administrativo y de control para la adecuada gestión del territorio. Además, según Cossío (2019) en América, los problemas relacionados con la calidad y caudal del agua subterránea se relacionan con la falta de información, lo cual limita el adecuado manejo sustentable del agua.

En Ecuador el agua disponible en su mayoría es subterránea, seguida de agua superficial (Burbano et al., 2015). Este recurso está destinado para consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, 2014), por esta razón el agua es considerada un recurso estratégico y esencial para la supervivencia humana y un condicionante del desarrollo económico (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Según Burbano (2011) en Ecuador el aprovechamiento del agua subterránea ha aumentado en los últimos años debido a factores antrópicos como el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial y agropecuario, la sequía, entre otras. A pesar de que el agua subterránea es un recurso muy abundante en el país y en muchas zonas es la única forma de abastecimiento. La falta de conocimiento ha limitado su gestión ya que no se dispone de información que permita establecer normas de protección y explotación controlada de los acuíferos. Además, la gestión del agua en muchos casos se asume por parte de los actores locales por lo cual la gestión pública y comunitaria del agua es indispensable (Sandoval-Moreno y Günther 2013).

1.2 Problema de investigación y justificación

El acceso a agua de calidad ha sido históricamente un factor que ha limitado el bienestar humano (Gacitúa, 2007). La calidad del agua subterránea depende en gran manera de las condiciones que presente el acuífero, como por ejemplo su litología,

la velocidad a la que circula el agua, la calidad del agua que infiltra, entre otras, sin embargo, las actividades humanas juegan un rol muy importante al momento de mantener esta calidad (Custodio y Llamas, 2001).

La alteración de la calidad de agua subterránea se produce por la acción de procesos naturales o antrópicos. A pesar de que el agua subterránea resulta ser difícil de contaminar, ya que el movimiento de un contaminante desde la superficie del suelo hasta el acuífero puede durar días o décadas antes que el impacto de la contaminación se pueda evidenciar (Rojas y Otálvaro, 2008). Sin embargo, hasta ese momento se encontrarán involucrados grandes volúmenes de agua y su saneamiento a diferencia de las aguas superficiales tardaría cientos de años, debido a su bajo ritmo de renovación, su inaccesibilidad, los altos costos económicos y la complicada ejecución desde el punto de vista técnico (IGME, 2012, Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

La meteorización química provocada por los aportes de la atmósfera al suelo y la disolución de rocas o minerales y fluidos geotérmicos que se mezclan con el agua subterránea es un proceso natural que puede ocasionar afectación en la calidad de agua ya que este fenómeno influencia en la presencia de arsénico, flúor y otros elementos en las aguas, condicionando su uso para el consumo humano cuando se presenta en elevadas concentraciones (Vivot et al., 2010; Bundschuh et al., 2021).

La creación de grandes núcleos urbanos, industriales y agrícolas, son una fuente potencial de contaminación, producen alteraciones en el flujo hidráulico de los acuíferos cuyos alcances en ocasiones son insospechados (Custodio y Llamas, 2001). Una de las actividades que más afecta a estas fuentes hídricas es la agropecuaria ya que genera residuos altamente tóxicos para el ambiente y el ser humano, debido al uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes para mejorar la productividad, mismos que permanecen por mucho tiempo en el subsuelo después de su infiltración (Auge, 2006).

Custodio y Llamas (2001) mencionan que en ocasiones el descuido y la falta de control en la gestión de aguas subterráneas han dado como resultado un proceso de deterioro en la calidad y cantidad de agua de los acuíferos a nivel mundial,

afectando al suministro y la disponibilidad de agua potable, sumado a los problemas en el desarrollo social y económico de la población. Por lo que el control de su calidad es indispensable, siendo necesario la realización de monitoreos que incluyen los análisis de sus características físicas, químicas y biológicas (MAE, 2015).

En la región sierra del Ecuador la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas tiene origen en los sistemas agrícolas tradicionales con un uso extensivo de pesticidas y fertilizantes, además de la deforestación y el cambio de uso de suelo (Izurieta et al., 2017). Según el Foro de los Recursos Hídricos (2013) la falta de protección efectiva de las fuentes de agua produce problemas en su calidad además de la pérdida algunas funciones ecosistémicas, mencionando además que en el país tan solo el 37 % de las cabeceras parroquiales protegen sus vertientes.

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado de Otavalo (2015) el cantón Otavalo refleja un proceso de deterioro avanzado, una grave perturbación de los recursos naturales y una ampliación de la frontera agrícola, ganadera y urbana. Factores que han alterado la calidad de las aguas subterráneas y han ocasionado un exceso de nitratos y fosfatos en los acuíferos. Por ende, el cuidado del agua subterránea y del entorno de los acuíferos es esencial para la existencia de vida (Gacitúa, 2007).

El presente estudio tiene el fin de generar propuestas para la protección y conservación de los acuíferos de la zona urbana del cantón Otavalo. Aportando eficazmente con el bienestar social, la protección del ambiente y con uno de los objetivos propuestos por la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Otavalo (EMAPAO-EP) que es: buscar acciones para contribuir con la preservación, protección y conservación del entorno ecológico de las fuentes hídricas aprovechables.

Por este motivo, la presente investigación permitirá: a) sistematizar la información recolectada en la red de monitoreo de la calidad de agua de los acuíferos en un periodo de 12 años realizados por el laboratorio de EMAPAO-EP, b) conocer la

variación espacio temporal de la calidad de agua y c) generar estrategias para la protección y conservación de los acuíferos.

El presente trabajo está inmerso dentro de los Objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2017 – 2021 Toda una Vida: Objetivo 1, con la Política 1.17 art. 66 numeral 2 y el Objetivo 3, Política 3.1 art. 10, 71, 74 de la Constitución de la República (2008). Donde señala que el Estado reconoce y garantiza a las personas el derecho a “una vida digna”; reconocen a la naturaleza como sujeto de derecho, lo que implica respetar integralmente su existencia, el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales y su restauración en caso de degradación o contaminación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar la variación espacio temporal de la calidad de agua de los acuíferos de la zona urbana del cantón Otavalo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los acuíferos en base a su área de influencia, litología y uso del suelo.
- Determinar la variación espacio temporal de la calidad de agua de los acuíferos.
- Comparar la calidad de agua de los acuíferos con la normativa nacional e internacional con respecto a agua potable para proponer estrategias de protección y conservación.

1.4 Hipótesis de la investigación

Ho: No existen diferencias en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los acuíferos del cantón Otavalo a nivel temporal y espacial.

Ha: Existen diferencias en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los acuíferos del cantón Otavalo a nivel temporal y espacial.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico referencial

2.1.1 Agua subterránea

El agua subterránea es producto de la infiltración natural del agua superficial la cual llega a los acuíferos, donde se acumula dinámicamente después de haber recorrido grandes distancias (Dragon, 2021). Es un recurso que juega un papel ecológico fundamental en el equilibrio de los ecosistemas y una de las principales fuentes de agua para consumo humano y agrícola, de ahí su importancia para la subsistencia de todos los seres vivos (Barranco, 2018).

2.1.1.1 Acuífero

Según Martínez et al. (2018) acuífero hace referencia a la formación geológica de rocas porosas, fracturadas o kársticas (Figura 1) presentes en el subsuelo, capaces de almacenar y transmitir agua en el interior de la corteza terrestre. Su recarga se da gracias a el agua procedente de las precipitaciones mismas que se infiltra en el terreno y posteriormente se acumula en los poros, grietas y/o fisuras de los materiales permeables, los cuales tienen la capacidad de almacenarla y transmitirla (Geotecnia, 2018).

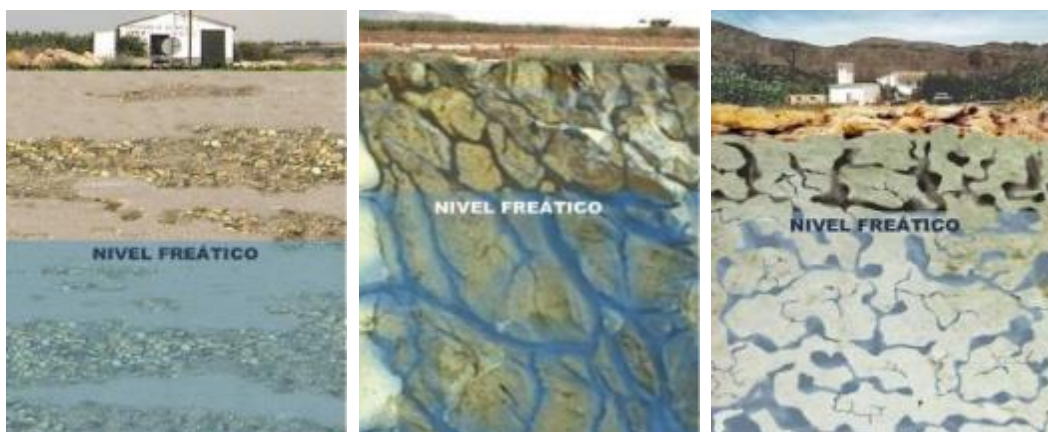


Figura 1. Formación geológica porosa, fracturada y karstificada
Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (2012)

2.1.2 Tipos de acuíferos

Martínez et al. (2006) clasifican los acuíferos según su comportamiento hidrodinámico, hidráulico y litológico, siendo esta última la que define la capacidad que tiene de almacenar y transmitir agua (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de acuíferos según su hidrodinámica, hidráulica y litología

Según su comportamiento hidrodinámico	
Acuífero	Fácil almacenamiento y transmisión de agua en grandes cantidades.
Acuitardo	Almacena y transmite agua lentamente y con dificultad.
Acuicludos	Almacenamiento apreciable de agua y capacidad de transferencia nula.
Acuífugos	Carecen de almacenamiento y transmisión de agua.
Según su comportamiento hidráulico o presión	
Libres o freáticos	El agua almacenada se encuentra directamente en contacto con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca.
Semiconfinados	Considerado semipermeable, ya que permite un cierto intercambio hídrico en función de las diferencias de presión.
Confinados o cautivos	Aislados totalmente de la atmósfera por unidades geológicas impermeables, estando saturado de agua en todas direcciones y por ello presenta una presión superior a la de la atmósfera.
Según su litología	
Detríticos	Formados por rocas o sedimentos detríticos, tales como, arenas, gravas, conglomerados, arcillas, limos, entre otras.
Fisurados	Denominados también kársticos o carbonatados, formados por rocas carbonatadas ya sean calizas, dolomías, yesos, mármoles, margocalizas u otro tipo de roca que presente diaclasado, fracturación o disolución como las rocas ígneas, metamórficas y detríticas bien consolidadas.

Fuente: Martínez et al. (2006); Geotecnia (2018); Hispagua (2020)

La permeabilidad de los acuíferos detríticos se debe a la porosidad intergranular (porosidad primaria) y su capacidad de contener y transmitir agua está en función del porcentaje de orificios disponibles entre las partículas (Geotecnia, 2018). El agua de estos acuíferos se caracteriza por presentar mucha variabilidad fisicoquímica, lo que implica que la calidad de agua es heterogénea, más salina y vulnerable, debido a que se encuentra más expuesta a la presencia de compuestos contaminantes en su mayoría procedentes de vertidos urbanos y agrícolas (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1990).

Los acuíferos carbonatados poseen permeabilidad elevada puesto que el agua puede circular a gran velocidad por medio de las grietas y fisuras, esto depende de la red de fracturación y del diaclasado (permeabilidad secundaria) pues las rocas sanas y masivas tienen una permeabilidad primaria muy reducida (Geotecnia, 2018). Las aguas de estos acuíferos poseen mineralización baja y dureza media, por lo general no presentan problemas de contaminación razón por la cual son aptas para el consumo humano y uso agrícola (ITGE, 1990).

2.1.3 Usos del agua subterránea

Según Martínez et al. (2018) la composición química del agua subterránea se ve alterada a lo largo de su recorrido a causa de los distintos procesos geoquímicos, por ende, sus captaciones se usan dependiendo de su calidad y composición. Los acuíferos proporcionan agua para el uso doméstico a aproximadamente al 50 % de la población mundial, por tal motivo el agua subterránea es utilizada principalmente para abastecimiento doméstico y debe pasar por un proceso de potabilización adecuado antes de poder ser consumida por el ser humano (WWAP, 2015).

Por otro lado, se añade el creciente uso agropecuario a nivel mundial, abasteciendo de agua de riego a aproximadamente 100 millones de hectáreas de los 300 millones que son regadas anualmente en el mundo, incluyendo también su uso en la cría de ganado y rodeos lecheros (Blarasin et al., 2014; Hogesteger y Wester, 2018). Otro uso muy significativo en la economía es el agua para uso industrial en distintos procesos (Guzmán et al., 2009).

2.1.4 Contaminación del agua subterránea

Es la alteración de la calidad natural del agua, haciéndola total o parcialmente inutilizable (IGME, 2012). La contaminación del agua subterránea puede ocurrir por procesos naturales debido a la presencia de altas concentraciones de minerales en el acuífero y por actividades antrópicas producidas por agentes contaminantes liberados al suelo o subsuelo (Herraiz, 2009) contaminantes que penetran al acuífero desde la superficie, atraviesan el suelo y llegan a la zona saturada (Sauquillo, 1994).

2.1.4.1 Fuentes contaminantes

Herraiz (2009) menciona que el deterioro de la calidad del agua subterránea se relaciona directa o indirectamente a procesos naturales y actividades humanas o a la combinación de ambas. Sin embargo, son las actividades humanas las fuentes fundamentales que provocan la alteración de este recurso (Auge, 2006).

- **Naturales:** la contaminación natural de acuíferos depende principalmente de su geología y de los procesos naturales de interacción en la geoquímica de las aguas subterráneas, debido a que estas aguas son propensas a presentar concentraciones de Arsénico de forma natural (Bundschuh et al., 2021).
- **Antrópicas:** la contaminación antrópica depende de los usos que el hombre hace del suelo, ya que influyen en la dinámica de recarga del acuífero y en la calidad del agua subterránea. Por ejemplo, la actividad ganadera la cual genera residuos orgánicos que pueden constituir un foco contaminante para el medio ambiente y las aguas subterráneas (Mendieta-Mendoza et al., 2020).

2.1.4.2 Procesos puntuales de contaminación

Afectan zonas localizadas debido a que esta contaminación tiene mayor intensidad cuando el foco contaminante se encuentra más cercano al acuífero, según IGME (2012) las actividades que provocan contaminación puntual de agua subterránea son:

- **Actividades domésticas:** generan los residuos sólidos y líquidos (aguas residuales), los cuales producen lixiviados y constituyen la mayor amenaza para la calidad del agua subterránea y residuos gaseosos poseen menor incidencia. Sin embargo, en áreas urbanas que presentan contaminación, pueden condicionar notablemente la composición del agua lluvia que constituye la fuente principal de recarga de los acuíferos.
- **Actividades industriales:** usan un sinnúmero de sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas y en algunos casos compuestos tóxicos, que representan posibles agentes contaminantes, esto dependiendo del tipo de

industria ya que los residuos de la producción son eliminados a través de la atmósfera, el suelo y las aguas superficiales o subterráneas.

2.1.4.3 Procesos difusos de contaminación

El IGME (2012) sostiene que los procesos difusos provocan contaminación dispersa en zonas amplias, donde es difícil identificar el foco principal de contaminación que suele ser provocada por actividades agropecuarias.

Probablemente sea la causa más generalizada y relevante del deterioro de la calidad del agua subterránea por su carácter difuso. Los contaminantes potenciales más significativos en este campo son los fertilizantes (nitrogenados), pesticidas y los vertidos de residuos animales o purines sobre el suelo.

2.1.4.4 Principales contaminantes de las aguas subterráneas

Por su diversidad, naturaleza, comportamiento y efectos los contaminantes principales, se dividen según el IGME (2012) en los siguientes grupos:

- **Contaminantes químicos:** incluye aquí una extensa gama de elementos orgánicos e inorgánicos, entre los más comunes están: iones normales, iones nitrogenados, materia orgánica, metales pesados y compuestos tóxicos y trazadores.
- **Contaminantes microbiológicos:** consiste en la propagación de enfermedades producidas por virus o bacterias las cuales pueden ser introducidas en el acuífero por medio de los vertidos de productos fecales de origen humano o animal.

2.1.4.5 Parámetros de calidad de agua potable (físicos, químicos y microbiológicos)

Sierra (2011) menciona que para determinar qué tan pura o contaminada está el agua es primordial medir ciertos parámetros físicos, químicos y microbiológicos de calidad del agua. La evaluación de estos ayuda a determinar el posible uso que se le puede dar según su calidad, entre los parámetros analizados están: color, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, sólidos disueltos totales,

temperatura, turbidez, dureza, nitratos y nitritos, fósforo, flúor, hierro y manganeso, sulfato, coliformes totales.

- **Color verdadero (CoV):** Se mide en unidades de platino-cobalto (UPt-Co), relacionado con la turbidez, en aguas naturales es un indicativo de la presencia de ciertos contaminantes generado por descargas industriales, desintegración de materia orgánica, disolución de minerales como el hierro (Fe) y magnesio (Mg) que está presente en el subsuelo, su coloración indica la posible presencia de óxidos metálicos. Se puede subdividir en color permanente y verdadero. Siendo el primero, el material suspendido y el segundo aquel color que permanece en el agua, tras ser removida la turbiedad (Sierra, 2011).
- **Conductividad Eléctrica (CE):** Su unidad de medida son los microSiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$). Representa la capacidad del agua para trasferir electricidad, además es la medida de sales y sólidos disueltos del agua natural. Cuanto mayor sea la conductividad del agua es decir si presenta un número grande de iones mayor será la cantidad de sólidos o sales disueltas (Valencia, 2007; Raffo, 2013).
- **Potencial de Hidrógeno (pH):** Es la intensidad de los medios ácidos o alcalinos del agua, que se encuentra en una escala de potencial de hidrógeno de 0 a 14. Considerándose ácidas aquellas aguas que presentan un pH inferior a 7 y básicas con un pH superior a 7. En las aguas naturales el pH ácido se debe a la presencia de CO_2 , ácidos fuertes provenientes de minerales con H_2SO_4 , HNO_3 , HCl o en muchas ocasiones a la contaminación industrial (Sierra, 2011). Por otro lado, las aguas alcalinas pueden establecerse por la presencia de sales de ácidos débiles, bases fuertes, iones CO_3^{2-} y HCO_3^- y ocasionalmente por la contaminación industrial.
- **Sólidos Disueltos Totales (SDT):** Es la medida en miligramos por litro (mg/l) de sólidos en una muestra de agua, la cual pasa a través de un poro nominal de $2.0 \mu\text{m}$ (o menos) en condiciones específicas. Este parámetro está estrechamente relacionado con la conductividad eléctrica, es decir, cuando mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica. Su origen puede ser diverso ya sea

orgánico e inorgánico (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) tanto para las aguas superficiales como para las aguas subterráneas (OMS, 2018).

- **Temperatura (T):** Se mide en Grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), en las aguas subterráneas por lo general muestran una temperatura muy poco variable pero la variabilidad de este parámetro puede afectar la velocidad de las reacciones químicas de origen orgánico y la viscosidad. Es importante ya que interviene en los procesos de tratamiento del agua. A temperatura superior a 40°C puede llegar a favorecer el crecimiento de los microorganismos y aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión (Valencia, 2007; Sierra, 2011).
- **Turbidez (Turb):** Se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) y representa aquel material suspendido (arcilla, fango, materia orgánica e inorgánica, componentes de color orgánico soluble, plancton, organismos microscópicos) que tiene la capacidad de dificultar la transmisión de la luz. Por ende, a mayor intensidad de luz dispersa, mayor nivel de turbulencia. Las causas que producen turbidez pueden ser naturales en cuanto a su origen orgánico e inorgánico y por la contaminación provocada por actividades antrópicas. Siendo una característica necesaria para el tratamiento de agua potable, ya que incidir en la elección del tratamiento a aplicar para su potabilización o uso, además puede generar rechazo en el consumidor por su estética (Sierra, 2011).
- **Amonio (N-NH_3):** Se mide en mg/l y se origina por procesos metabólicos, agricultura e industria, así como por desinfección de la cloramina. Pudiendo ser un indicador de contaminación bacteriana no muy peligroso, encontrándose los niveles habituales por debajo de 0.2 mg/l . Las aguas subterráneas anaeróbicas pueden contener incluso más de 3mg/l (Valencia, 2007).
- **Nitratos (N-NO_3^-) y Nitritos (N-NO_2^-):** Su unidad de medida es el mg/l . El nitrato es la forma principal del nitrógeno que se encuentra en las aguas naturales, que por reducción bacteriana o química se transforman en nitritos que son potencialmente tóxicos. Esto a causa de la meteorización de las

rocas o bien por oxidación bacteriana de la materia orgánica principalmente de animales (Valencia, 2007).

Su concentración suele aumentar como consecuencia de los residuos de actividades agropecuarias, vertidos de aguas residuales, por la expansión urbana y por el uso excesivo de fertilizantes. Dependiendo del cultivo el nitrógeno puede ser absorbido en un 25 u 85 %, mientras que los porcentajes restantes son absorbidos por el suelo (Dragon, 2021).

- **Fósforo ($P-P_04^{3-}$):** Se mide en mg/l, este elemento se encuentra habitualmente en aguas naturales o residuales. Es un nutriente primordial para el crecimiento de microorganismos ya que la excesiva carga de fósforo en aguas puede generar el crecimiento proliferado de macro y microorganismos fotosintéticos. Suele presentarse en soluciones acuosas como el ortofosfato (Sierra, 2011; Código Orgánico del Ambiente, 2017).
- **Flúor (F):** Su unidad de medida es el mg/l, es un elemento altamente corrosivo que reacciona con todas las sustancias orgánicas e inorgánicas, al ser el más reactivo y electronegativo de los elementos químicos. La presencia de flúor en el agua para consumo humano, requiere de una vigilancia constante debido a que es un compuesto altamente tóxico (Sierra, 2011). En aguas subterráneas, las concentraciones varían según el tipo de roca por la que fluye el agua, pero no suelen superar los 10 mg/l (OMS, 2018).
- **Hierro (Fe):** Este metal pesado generalmente se encuentra disuelto en aguas con pH bajo (Valencia, 2007). Su unidad de medida es el mg/l. En las aguas subterráneas se presentan con altas concentraciones (0.5 a 50 mg/l) debido al poder del disolvente que tiene el CO_2 sobre los estratos del suelo reduciendo los compuestos férricos a hierro soluble (Kiely, 2003).
- **Sulfato (SO_4^2-):** Se mide en mg/l, su presencia se debe principalmente a la disolución de los yesos, se encuentra disuelto en las aguas debido a su estabilidad y resistencia a la reducción, ya que tiende a formar sales con los metales pesados disueltos. Un incremento de los sulfatos presentes en el medio hídrico es indicador de un vertido próximo (Valencia, 2007).

- **Dureza cálcica y dureza total (CaCO₃):** La dureza en el agua se debe a la presencia de cationes como: Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Sr⁺⁺, Ba⁺⁺, Fe⁺⁺⁺, Al⁺⁺⁺ y otros metales en forma de sólidos disueltos, su unidad de medida es el mg/l. En muchas ocasiones las aguas duras tienen la particularidad de que a altas temperaturas forman incrustaciones en los equipos mecánicos y las tuberías. A pesar de que las aguas que presentan estas características no ocasionan un problema sanitario, deben ser tratadas previo a su consumo (Puerta y Zapata, 2014).
- **Coliformes totales (CT):** Se mide considerando el Número Más Probable por 100 mililitros de agua (NMP/100ml). Están presentes tanto en aguas residuales como en aguas naturales (OMS, 2018). Son un indicador de la contaminación de las aguas, este término está designado a un grupo de especies bacterianas que tiene ciertas características bioquímicas en común, estando incluidos en este grupo los coliformes fecales característico por la presencia de excretas que pueden generar un riesgo potencial de contaminación por patógenos (Valencia, 2007; Sierra, 2011).
- **Coliformes fecales (CF) *Escherichia Coli* (*E. Coli*):** Se mide en NMP/100ml. Es una bacteria que se encuentra presente con frecuencia en el intestino distal de los organismos de sangre caliente. La mayoría de sus cepas son inocuas, sin embargo, pueden causar graves intoxicaciones alimentarias (Organización Mundial de la Salud, 2018). Es un indicador predominante en los análisis de calidad de agua, además de ser el más evaluado ya que siempre está presente en las heces humanas y animales (Sierra, 2011).

2.1.5 Análisis espacio temporales de calidad del agua

La calidad del agua comprende muchos parámetros que pueden variar espacial y temporalmente, ya sea por sus propiedades físicas, químicas, biológicas o hidrológicas (Gómez y Peñuela, 2016). Estos parámetros pueden estar relacionados con la presencia de diferentes contaminantes en el agua, condiciones ambientales, condiciones hidráulicas, entre otras. Por lo cual los parámetros de calidad de agua pueden variar de un sitio a otro y de un día a otro, y por esto, es importante contar

con métodos de análisis de datos que permitan evaluar de manera simultánea las múltiples relaciones que existen entre las variables (parámetros) y su evolución espacial y temporal, rol que cumplen los métodos estadísticos multivariados. Por otra parte, Rencher (2003) y Konan et al. (2020) mencionan que los análisis de varianza también es una técnica fundamental para explicar la evolución de las variables ambientales, donde se demostró que los parámetros analizados en su estudio varían espacial y temporalmente.

Rencher (2003) menciona que las técnicas estadísticas multivariadas se han usado en análisis de calidad de agua, ya que están conformados por un considerable número de variables y datos, con diferentes magnitudes, unidades y distribuciones. Entre los métodos multivariado más usados en el análisis de calidad de agua, pueden subdividirse en: métodos de reducción de dimensiones, métodos de agrupamiento, análisis de clasificación, modelos de regresión múltiple y análisis de correlación.

Para el agrupamiento y clasificación de la información se utiliza análisis de Clúster y análisis discriminantes, los cuales se usan comúnmente para estudiar la variabilidad espacial, estudiando la similitud entre periodos o estaciones de muestreo (Gómez y Peñuela, 2016). Las diferentes técnicas de análisis estadísticos multivariado han sido usadas como herramienta fundamental en la interpretación de los datos generados en un estudio ambiental sobre un cuerpo dulceacuícola, así como para la toma de decisiones para la conservación y manejo de estos.

2.1.6 Estándares de calidad de agua potable

Las Directrices de la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua potable, establecidas en Génova en 1993, son el punto de referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua potable (OMS, 2018).

2.1.6.1 Ley del Agua Potable Sana (SDWA)

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) establece estándares de agua potable basados en mantener el bienestar de la nación, identifica los posibles contaminantes que podrían afectar la salud pública y especifica los niveles máximos permisibles de contaminantes. Esto basado en la Ley del Agua Potable

Sana (SDWA) misma que requiere que la información sobre la calidad de agua potable esté disponible al público ya que es la principal pieza de protección de la calidad de las aguas de los Estados Unidos (EPA, 2018).

2.1.6.2 Norma de la calidad de agua para consumo humano y uso doméstico, vigente en el Ecuador

MAE (2015) menciona en el Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA) que el agua destinada para uso doméstico y consumo humano es obtenida de cuerpos de agua, superficiales o subterráneas, misma que posterior a su tratamiento puede ser empleada en actividades como: beber y preparar alimentos para consumo humano y satisfacer necesidades domésticas, ya sean estas individuales o colectivas, como por ejemplo la higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización describe en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108-2020, los requisitos que debe cumplir el agua potable para poder ser consumida por el humano, mismos que se aplican para agua potable de sistemas de abastecimiento públicos y privados a través de redes de distribución y tanqueros (Instituto Ecuatoriano de Normalización-INEN, 2020).

2.1.7 Estrategias para proteger las aguas subterráneas de la contaminación

Foster et al. (2002) sostienen que las estrategias para proteger las aguas subterráneas de la contaminación se ejecutan analizando el área de influencia del acuífero, la vulnerabilidad a la contaminación que presente, el inventario de las cargas contaminantes del subsuelo y a la población involucrada. Esto asegurando el equilibrio de los distintos intereses involucrados y con la finalidad de incluir las estrategias en agendas políticas de gestión de calidad de las aguas (Gárfias et al., 2008).

2.1.7.1 Protección de captaciones

López (2002) menciona que esta estrategia representa la forma más antigua de proteger el acuífero de la contaminación, restringiendo el uso del terreno que circunda al acuífero. Según el IGME (2012) la delimitación de perímetros de

protección tiene como objetivo proteger la calidad y cantidad de las aguas subterráneas, que se extraen de las captaciones para abastecimiento, esta estrategia es relevante ante el riesgo potencial que supone la actividad antrópica en los alrededores de las captaciones. Los perímetros de protección restringen o prohíben las actividades o infraestructuras susceptibles de contaminar las aguas subterráneas, o que puedan afectar el caudal, para esta estrategia se consideran tres zonas:

- **Zona inmediata o de restricciones absolutas:** en esta zona se prohíben todas las actividades que no tienen relación directa con las operaciones de extracción, va de los 100 a 400 m², se recomienda que estas zonas estén cercadas por una valla que impida el acceso a su interior.
- **Zona próxima o de restricciones máximas:** zonas definidas para proteger el acuífero de la contaminación microbiológica.
- **Zona alejada o de restricciones moderadas:** protege la captación de contaminantes de larga persistencia, realizado con criterios de tipo hidrogeológicos.

2.2 Marco legal

La Constitución de la República del Ecuador publicada en el Registro oficial No.449 del 20 de octubre del 2008, como la principal normativa nacional en el Art. 12, 32 y 66 señala el derecho humano que constituye el agua como patrimonio nacional y estratégico de uso público al constituir un elemento vital para la naturaleza y la existencia de los seres humanos. Además, en el título V, capítulo cuarto correspondiente al régimen de competencias, el Art. 264, numeral 4 señala a los municipios como la competencia de prestar servicios públicos de agua potable.

Según el título VI, capítulo primero del régimen de desarrollo en el Art. 276 numeral 4, el Estado ecuatoriano debe planificar la recuperación y conservación de la naturaleza que garantice el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua. Además de ser responsabilidad del Estado promover políticas redistributivas que permitan el acceso al agua, tal como lo menciona el capítulo tercero correspondiente a soberanía alimentaria en el Art. 281 y 282, prohibiendo su acaparamiento o

privatización a la vez que regula su uso y manejo conforme los principios de equidad, eficiencia y sostenibilidad ambiental.

El Estado ecuatoriano a través de la autoridad única del agua, será el encargado directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos destinados al consumo humano, conforme lo dispuesto en el capítulo quinto, correspondiente a los sectores estratégicos, servicios y empresas públicas, Art. 318. Además de regular toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, exclusivamente en las fuentes y zonas de recarga de agua con un enfoque ecosistémico, tal como lo señala el título VII, capítulo segundo, sección sexta correspondiente al agua, Art. 411 y 412.

Con el fin de llevar a cabo la normativa en la Constitución del Ecuador se remite la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua publicada en el Registro oficial N.º 305 del 6 de agosto de 2014, que presenta una estrecha relación con el tema de estudio debido a que en el título I, capítulo I de los principios, Art. 3, 4, 5 y 6 indica la importancia de garantizar el derecho humano al agua su permanencia y calidad ya sea de aguas superficiales, subterráneas o atmosféricas, mediante la regulación, gestión, preservación, conservación, uso y aprovechamiento, considerando la sostenibilidad y sustentabilidad.

En el título II, capítulo I correspondiente a la definición, infraestructura y clasificación de los recursos hídricos, el Art.13, menciona que las zonas de restricción es una forma de protección y conservación de los acuíferos, en donde se coordinará las actividades que se pueden realizar en ellas conforme lo establecido en esta Ley. El título IV, capítulo II de uso y aprovechamiento del agua subterránea y acuíferos, en el Art. 117 indica que el uso y aprovechamiento para la exploración y afloración de aguas subterráneas no debe perjudicar las condiciones del acuífero ni la calidad del agua ni el área superficial comprendida en el radio de influencia del pozo o galería.

En el Ecuador la constitución, consagra la salud como un derecho humano, por ende ratifica el Proyecto de Ley – Código Orgánico de Salud (2016), relacionándose con este estudio, ya que la Autoridad Sanitaria Nacional elabora la normativa sobre

calidad de agua de abastecimiento público, en base a los parámetros físicos, químicos, microbiológicos, radioactivos del agua cruda y procesada, además de los límites máximos permisibles fijados, como se lo menciona el título III, sección III de agua procesada, Art. 94, 96 y 100, en los que también se incluye como entes regulatorios a La Autoridad Única del Agua y Autoridad Ambiental Nacional para proteger la salud humana.

El Código Orgánico del Ambiente publicado en el Registro oficial No.983 del 12 de abril de 2017, promulgado por la constitución ecuatoriana, presenta relación con este estudio debido a las normas técnicas de monitoreo y seguimiento de la calidad de agua, conforme las reglas enmarcadas en este código, estableciendo facultades ambientales a la Autoridad Ambiental Nacional o Gobiernos Autónomos Descentralizados, para controlar el cumplimiento de los parámetros ambientales y la aplicación de normas técnicas de los componentes agua, como se menciona en el Art. 26 y 191.

El Acuerdo Ministerial 097-A, Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Libro VI, Anexo 1, indica los límites máximos permisibles para agua de consumo humano y uso doméstico, que junto con la Norma Técnica Ecuatoriana- Agua Potable INEN 1 108:2020 establecen los requisitos que debe cumplir el agua potable con el fin de precautelar la vida humana. El adecuado manejo de este recurso junto con la conservación y protección de las áreas de provisión de recursos hídricos, deben ser consideradas como prioridad para la gestión pública, teniendo en cuenta que la cantidad y calidad del agua condicionan la vida en todas sus formas.

Finalmente, el Estado ecuatoriano con el fin de responder a los intereses colectivos y comunes de toda la población, implementa el Plan Nacional de Desarrollo Toda una Vida, vigente en el periodo 2017-2021, destacando lo establecido en el eje 1, objetivo 1, el cual resalta el compromiso gubernamental de garantizar el acceso, uso y aprovechamiento justo, equitativo y sostenible del agua, además de la protección de sus fuentes. Mientras que en el objetivo 3, enfatiza el establecimiento de prácticas responsables con el ambiente y la población y el establecimiento de límites a las actividades extractivas cuando amenacen a las fuentes de agua.

Promoviendo agua segura para todos mediante el desarrollo de estrategias sostenibles, con el compromiso de todos los actores sociales involucrados en su cuidado y uso responsable, para promover una gestión integral hídrica y precautelar su calidad, disponibilidad y uso, con acciones de recuperación, conservación y protección de las fuentes de agua, de zonas de recarga, acuíferos y agua subterránea (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en el cantón Otavalo, provincia de Imbabura, localizado al norte del país, está conformado por once parroquias, dos urbanas: Jordán y San Luis y nueve rurales: Eugenio Espejo, Dr. Miguel Egas Cabezas, González Suárez, San José de Quichinche, San Juan de Ilumán, San Pablo del Lago, San Pedro de Pataquí, San Rafael y Selva Alegre. Presenta una extensión de 49 022 ha con un rango altitudinal que va de los 1 100 m.s.n.m., en la parroquia Selva Alegre, a los 4 700 m.s.n.m., en el cerro Imbabura, con una temperatura que oscila entre 9 a 21°C (Gobierno Autónomo Descentralizado de Otavalo, 2021).

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censo (2010) la proyección de la población para el año 2021 es de 127 416 habitantes, con una tasa de incremento poblacional anual de 1.44 %. El 62.47 % de la población se encuentra ubicado en el sector rural mientras que el 37.53 % restante pertenece al sector urbano. La nacionalidad Kichwa, el pueblo de Otavalo y un porcentaje del pueblo Kayambi constituyen el 57.24 %, seguida de la población mestiza con el 40.3 % y otras nacionalidades con el 2.46 %.

Las actividades predominantes son la manufactura con el 26.6 %, seguido de la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca con un 21.2 %, mientras que el resto de las actividades suman el 52.2 %. En cuanto a los servicios básicos que dispone la población del sector urbano, el 83.86 % cuenta con el servicio de agua potable, mientras que en el sector rural tan solo el 42.05 %. Con respecto al alcantarillado el 59.25 % de la población cuenta con este servicio (INEC, 2010).

El sistema de agua potable del cantón Otavalo es abastecido por las vertientes: Pataquí, Quichinche, San Francisco, San Pablo, Selva Alegre, La Magdalena, Neptuno, Punyaro y Turupamba, algunas de las cuales formaban parte de Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento de las comunidades en las que se encuentran ubicadas (Vega, 2006).

Para el presente estudio se evaluó la calidad del agua de las vertientes La Magdalena, Neptuno, Punyaro y Turupamba, mismas que abastecen de agua potable a la ciudad de Otavalo y poseen información suficiente en cuanto a análisis de calidad de agua, ya que su monitoreo a cargo de EMAPAO-EP se ha realizado periódicamente desde el año 2002 (Vega, 2006). Razón por la cual se ha delimitado hidrográficamente la cuenca que abarca en su superficie las cuatro vertientes y representa su área de influencia. (Figura 2).

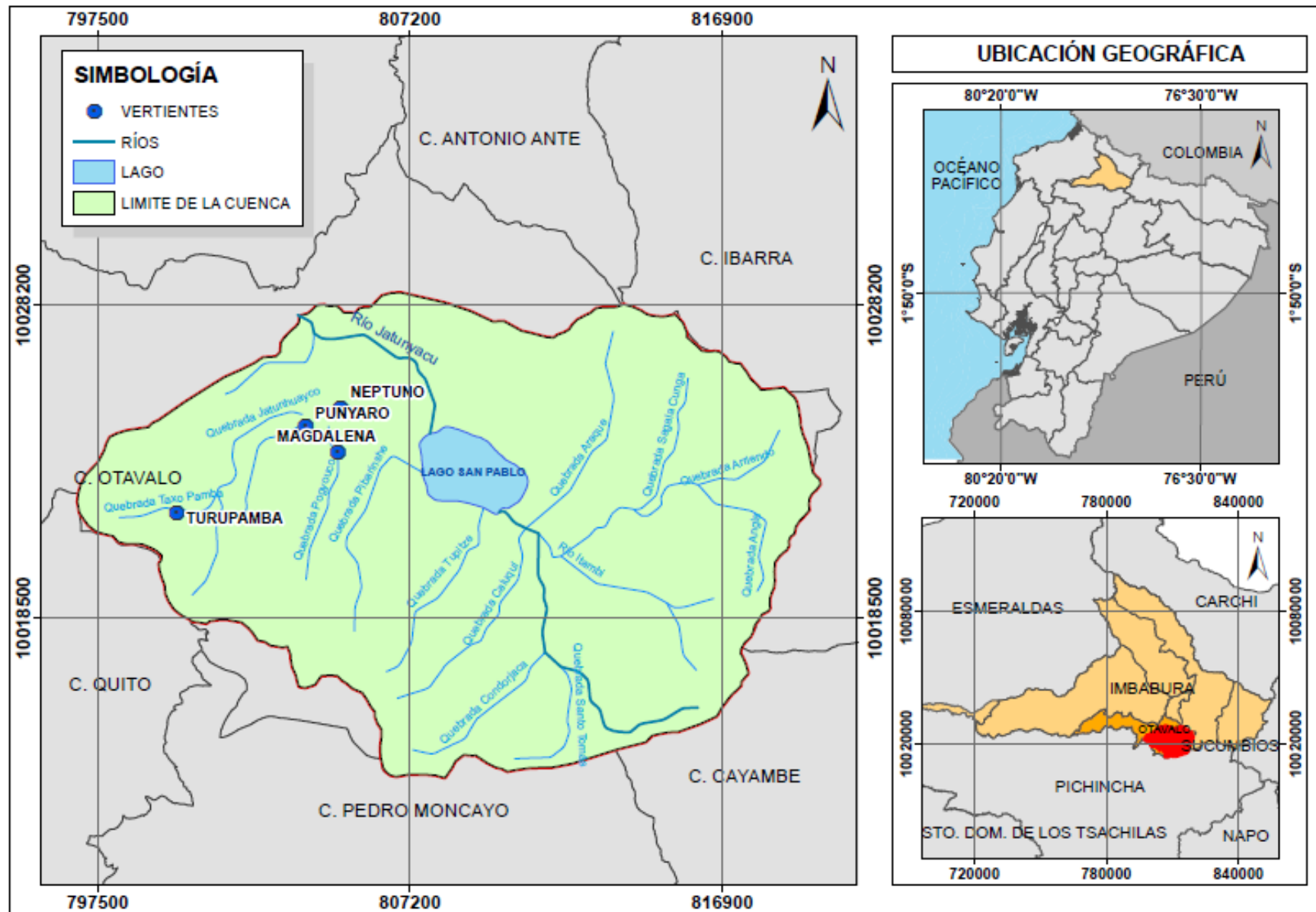


Figura 2. Área de estudio

3.2 Métodos

A continuación, se detalla la metodología que se aplicó para el análisis espacio temporal de la calidad de agua de los acuíferos de la zona urbana del cantón Otavalo, a partir del tipo de acuífero según su litología, cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca delimitada para el área de influencia, caracterización de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos y determinación de la variación espacio-temporal, para proponer estrategias de protección y conservación de los acuíferos, lo cual fue organizado con respecto a cada objetivo planteado.

3.2.1 Caracterización de los acuíferos en base a su área de influencia, litología y uso de suelo

3.2.1.1 Reconocimiento y delimitación del área de influencia

Se realizaron ocho salidas de campo para el reconocimiento de las vertientes de los acuíferos La Magdalena, Punyaro, Neptuno y Turupamba con el acompañamiento y supervisión de miembros de EMAPAO-EP encargados del cuidado y control de las vertientes (Figura 3).



Figura 3. Reconocimiento del área de estudio de las vertientes: a) La Magdalena, b) Punyaro, c) Neptuno y d) Turupamba

Se georreferenciaron mediante el navegador GPS las cuatro vertientes en coordenadas UTM, Datum: WGS 84_Zona 17S (Tabla 2).

Tabla 2. Coordenadas de las vertientes. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 S

Vertientes	Coordenadas X	Coordenadas Y	Altitud (m.s.n.m.)
La Magdalena	804956	10023628	2595
Punyaró	803963	10024460	2560
Neptuno	805053	10024999	2535
Turupamba	799953	10021757	2930

Considerando el criterio de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2018) menciona que una cuenca hidrográfica es un sistema que incluye ecosistemas, territorios, ríos menores, aguas subterráneas, entre otras, además de las interacciones que inciden en el curso del agua, por lo tanto, se delimitó el área de influencia considerando a la cuenca hidrográfica que posee en su territorio las cuatro vertientes analizadas.

Además, Rosas (2009) señala que la caracterización de superficies y la delimitación de cuencas hidrográficas se realiza a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), además describe la metodología utilizada en la delimitación de unidades hidrográficas, misma que se empleó para obtener la delimitación del área de estudio, posteriormente se representó la cartografía base de la cuenca a escala 1: 50 000 con el uso del software ArcGIS 10.4.

3.2.1.2 Adquisición de cartografía temática y evaluación de los cambios de cobertura vegetal

En base a las coberturas digitales en formato *shapefile* (shp) del Instituto Espacial Ecuatoriano se obtuvo información de litología editada en el año 2019 a escala 1: 50 000 en coordenadas UTM con Datum: WGS 84_Zona 17S. En software ArcGIS 10.4 se realizaron geo procesos mediante los campos de las tablas de atributos de “Tipo de roca” y “Geología”, con la finalidad de identificar la génesis de las rocas y las formaciones geológicas que se encuentran dentro del área de estudio y reconocer la litología de los acuíferos (Suárez, 1998; Geotecnia, 2018; Hispagua, 2020).

Se realizaron cuatro salidas de campo con la finalidad de validar in situ la información cartográfica obtenida del Instituto Espacial Ecuatoriano. Se asignó un total de cuatro puntos de validación, uno por cada vertiente, y se elaboró un registro fotográfico con el objetivo de identificar el tipo de roca y suelo presente en áreas cercanas a las vertientes, con base en las claves taxonómicas de órdenes, subórdenes y grandes grupos de suelos desarrolladas por Ortiz et al., (2014). Posteriormente se relacionó la información obtenida en campo con la información almacenada en las tablas de atributos de los archivos digitales para representar la cartografía geológica mediante el uso del software ArcGIS 10.4.

Para la elaboración de los mapas temáticos de uso de suelo se obtuvieron archivos digitales del Ministerio del Ambiente editados en el año 2018 en formato *shapefile* de cobertura vegetal de los años 2000 y 2018 a escala 1: 50 000 en coordenadas UTM con Datum WGS 84_Zona 17S. Se obtuvo la información de uso de suelo y cobertura vegetal mediante geo procesos entre el *shapefile* del MAE y el *shapefile* del área de estudio, y posteriormente se realizó la respectiva representación cartográfica.

Para la representación cartográfica las categorías consideradas fueron: Área poblada, Área sin cobertura vegetal, Bosque nativo, Infraestructura, Natural (agua), Páramo, Plantación forestal, Tierra agropecuaria, Vegetación arbustiva y Vegetación herbácea, empleando la metodología del Ministerio del Ambiente en la evaluación de la Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental del año 2015. Finalmente, se realizó el mapa de uso del suelo para los años en estudio mediante el software ArcGIS 10.4. Se calculó las áreas en unidades de hectáreas para cada categoría de los años 2000 y 2018, mediante el cálculo de áreas se determinó y comparó los cambios de uso de suelo cobertura vegetal que se han producido en la cuenca (Loredo et al., 2020). Además, se identificó in situ el uso del suelo y actividades antrópicas realizadas en los sitios aledaños de cada vertiente.

3.2.2 Determinación de la variación espacio temporal de la calidad de agua en los acuíferos.

3.2.2.1 Adquisición y tratamiento previo de datos

Se recopiló la información de los análisis mensuales de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de agua cruda desde el año 2002 hasta el 2019 (18 años) de las vertientes que abastecen de agua potable a la ciudad Otavalo, información que fue proporcionada por el laboratorio de EMAPAO-EP. Se elaboró una base de datos donde se codificó, las vertientes y la fecha de realización de la muestra. Cabe mencionar que de los 24 parámetros analizados por el laboratorio EMAPAO-EP siete son físicos, 15 químicos y dos microbiológicos (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Parámetros	Unidades	Metodología de referencia
Físicos		
Color verdadero (CoV)	UPt-Co	Standard Methods 2120 C
Color aparente (CoA)	UPt-Co	Standard Methods 2120 C
Conductividad Eléctrica (CE)	$\mu\text{S/cm}$	Standard Methods 2510 B
Potencial de Hidrógeno (pH)	UpH	Standard Methods 4500 H-B
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	Standard Methods 2540 C
Temperatura (T)	$^{\circ}\text{C}$	
Turbiedad (Turb)	NTU	Standard Methods 2130 B
Químicos		
Amonio (N-NH ₃)	mg/l	HACH 8038
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/l	HACH 8171
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/l	HACH 8507
Fósforo (P-PO ₄ ³⁻)	mg/l	HACH 8048
Flúor (F)	mg/l	HACH 8029
Hierro (Fe)	mg/l	HACH 8008
Manganeso (Mn ²⁺)	mg/l	HACH 8149
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/l	HACH 8051
Alcalinidad (CaCO ₃)	mg/l	
Calcio (Ca ²⁺)	mg/l	
Cloruros (Cl ⁻)	mg/l	
Dureza cálcica (CaCO ₃)	mg/l	
Dureza total (CaCO ₃)	mg/l	
Magnesio (Mg ²⁺)	mg/l	

Acidez (CaCO ₃)	mg/l	
Microbiológicos		
Coliformes totales (CT)	NMP/100ml	Standard Methods 9223 B
<i>Escherichia Coli (E. Coli.)</i>	NMP/100ml	Standard Methods 9223 B

Fuente: EMAPA-O, 2019

Los muestreos de los parámetros no fueron realizados periódicamente durante los 18 años, debido a la poca disposición del personal de la empresa, el escaso presupuesto y la falta de reactivos con los cuales se efectuó los análisis de laboratorio. Considerando la metodología de Valencia (2007) se realizó un tratamiento previo de datos con el fin de descartar los años y los parámetros con datos históricos insuficientes para llevar a cabo un adecuado análisis estadístico.

Inicialmente se descartaron los años 2009 y 2013 debido a que carecían de datos de muestreos en las vertientes La Magdalena (Mg), Punyaro (Py) y Neptuno (Np), así como los años 2012 y 2013 en la vertiente Turupamba (Tr). Por lo cual se determinó dos periodos de estudio de seis años cada uno, 2003-2008 (Periodo 1) y 2014-2019 (Periodo 2) con 72 meses de muestreo para cada periodo. Además, en el primer periodo el parámetro color aparente fue excluido por no presentar datos. Mientras que en el segundo periodo (2014-2019) los parámetros descartados fueron alcalinidad, calcio, cloruros, dureza cálcica, dureza total, magnesio y acidez ya que estos parámetros no se consideraron en los muestreos realizados por EMAPAO-EP a partir del año 2010.

Posteriormente se descartaron aquellos parámetros con altos porcentajes de datos insuficientes. Por lo cual en el primer periodo no se consideró a los parámetros: color verdadero, temperatura, turbiedad, acidez, cloruros, flúor, hierro, magnesio, manganeso y sulfatos. Mientras que en el segundo periodo los parámetros descartados fueron color aparente y manganeso.

3.2.2.2 Estadística descriptiva

Los métodos estadísticos descriptivos se usan para definir la muestra como primer paso para realizar un análisis, caracterizan las variables y ayudan eficazmente a resumir todos los datos recopilados, incluyendo el tamaño muestral (n), las medidas de centralización y las medidas de dispersión (Aroca et al., 2009).

Se sistematizó la información en el software SPSS con el fin de obtener una caracterización inicial de los parámetros de cada periodo y vertiente, en el cual se calculó las medidas de tendencia central. Aplicando la metodología mencionada por Bouza (2006) quien considera el cálculo del número de casos disponibles (n), media (X), máximo (Max), mínimo (Min), desviación estándar (SD) y mediana (Me).

3.2.2.3 Imputación de datos

Montenegro-Montenegro et al. (2015) sostienen que en la práctica la pérdida máxima de datos varía entre 1 y 20 %, dependiendo en muchas ocasiones de la exactitud del estudio, del área de investigación, entre otros factores. Benitez-Gilbert y Alvarez-Cobelas (2008) aplicaron técnicas de imputación en series temporales de datos ambientales a largo plazo, considerando la importancia del relleno de datos por diversas causas. La imputación es una manera adecuada de tratar los datos faltantes llenando los espacios con valores estimables, reduciendo el sesgo y además generando un conjunto de datos “limpios” es decir sin datos faltantes.

El patrón de pérdida de los datos faltantes es uno de los puntos a considerar, ya que este puede influir en la selección del método de imputación (Viada et al., 2016). Los patrones de pérdida pueden ser de manera completamente aleatoria (MCAR) cuando la ausencia de información depende de alguna variable en la matriz de datos, o de manera aleatoria (MAR), cuando la ausencia de los datos depende de variables presentes en la matriz de datos y excluye la variable perdida, finalmente, se denomina como no ignorables (NMAR) cuando la ausencia de los datos depende de la variable perdida (Montenegro-Montenegro et al., 2015).

Con base en el patrón de datos perdidos se seleccionó la técnica de imputación múltiple desarrollada por Little y Rubín (1987) que permite hacer un uso eficiente de los datos, obteniendo estimadores no sesgados, esta técnica sustituye los datos faltantes por $m > 1$ valores simulados para este caso ($m > 5$) (Templ et al., 2011). La imputación múltiple no intenta estimar cada valor faltante a través de valores simulados, sino más bien representa una muestra aleatoria de los valores perdidos. Obteniendo como resultado inferencias estadísticas válidas que reflejan

adecuadamente la incertidumbre debido a los valores perdidos; por ejemplo, intervalos de confianza válidos para parámetros (Yuan, 2010).

Esta técnica de imputación está basada en la relación existente entre la eficiencia de los estimadores y el número de imputaciones que los genera (Tabla 4). En el presente estudio se registró los parámetros que representaron una tasa de no respuesta del 20 % (0.2) con $m=5$ imputaciones, obteniendo la eficiencia del método de Imputación Múltiple del 96 %.

Tabla 4. Eficiencia del proceso de imputación múltiple

Imputaciones	Tasa de valores faltantes					
	M	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7
3		97 %	93 %	91 %	86 %	81 %
5		98 %	96 %	94 %	91 %	88 %
10		99 %	98 %	97 %	95 %	93 %
20		100 %	99 %	99 %	98 %	97 %

Fuente: (Medina y Galván, 2007)

Otra técnica aplicada fue la de imputación por la media, la cual identificó la distancia entre la variable a imputar y , y cada una de las unidades restantes (x o variables auxiliares) mediante alguna medida de distancia, se determinó la unidad más cercana a y , usando el valor de esta unidad para imputar el faltante (Montenegro-Montenegro et al., 2015).

Con la finalidad de obtener la base de datos completa, se imputaron los valores perdidos menores o iguales al 20 % de los parámetros: conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, sólidos disueltos, amonio, coliformes totales, *E. coli*, color aparente, temperatura, turbiedad, nitratos, nitritos, fósforo, flúor, hierro, sulfatos, alcalinidad, calcio, dureza cálcica y dureza total. Sin embargo, algunos de estos parámetros no fueron incluidos en uno de los periodos, pero se los incluye por su relevancia en el análisis general de calidad de agua (Tabla 5).

Tabla 5. Porcentaje de valores perdidos de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Periodo	2003 - 2008				2014 - 2019			
	Mg	Py	Np	Tr	Mg	Py	Np	Tr
Vertientes								

Parámetros físicos								
Color verdadero (CoV)	71	53	96	92	13	15	32	14
Conductividad Eléctrica (CE)	0	0	0	0	1	1	14	4
Potencial de Hidrógeno (pH)	0	0	0	0	1	1	15	4
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	10	14	10	10	1	1	14	4
Temperatura (T)	70	89	9	9	8	11	21	14
Turbiedad (Turb)	70	50	80	80	3	3	14	4
Parámetros químicos								
Amonio (N-NH ₃)	10	8	10	10	1	1	14	4
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	0	0	0	0	10	7	22	14
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	0	6	0	0	11	11	28	15
Fósforo (P-P ₀₄ ³⁻)	10	18	30	30	4	3	17	7
Flúor (F)	80	67	100	100	19	25	33	28
Hierro (Fe)	60	42	70	70	7	6	19	8
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	80	51	90	80	10	11	24	15
Alcalinidad (CaCO ₃)	20	18	20	10	100	100	100	100
Calcio (Ca)	10	17	20	10	100	100	100	100
Dureza cálcica (CaCO ₃)	10	10	20	10	100	100	100	100
Dureza total (CaCO ₃)	20	11	30	10	100	100	100	100
Parámetros microbiológicos								
Coliformes Totales (CT)	10	6	10	20	1	1	15	11
<i>Escherichia Coli</i> (<i>E. Coli</i>)	10	6	10	20	3	3	17	7

Nota: Valores perdidos <= 20 % en todas las vertientes y periodos.

Valores perdidos <= 20 % en algunas de las vertientes/ uno de los periodos.

3.2.2.4 Pruebas de normalidad

Para determinar la normalidad de los datos de este estudio se aplicó la metodología recomendada por Doornik y Hansen (2008) quienes sugieren el uso de distintas pruebas. Razón por la cual se empleó la prueba de Anderson-Darling, Ryan-Joiner y Kolmogorov-Smirnov, con un nivel de confianza del 95 % ($p < 0.05$), se planteó como hipótesis nula (H_0), que las variables siguen una distribución normal. Se estimó la distribución normal mediante el software Minitab 17.

3.2.2.5 Análisis de varianza

Se determinó la existencia de diferencias estadísticamente significativas a nivel espacial (entre las vertientes: La Magdalena, Punyaro, Neptuno y Turupamba) y temporal (periodo 2003-2008 y periodo 2014-2019) de los parámetros, mediante el

uso de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis (Vidal-Abarca et al., 2000; Gil-Marín et al., 2018, Konan et al., 2020), con un nivel de significancia ($p < 0.05$). La H_0 a nivel espacial indica que las medias son las mismas entre las vertientes y la H_0 a nivel temporal indica que las medias son las mismas entre los periodos de las vertientes, rechazándose H_0 cuando se obtuvo un $p\text{-value} < 0.05$. Además, se utilizó la prueba U de Mann-Whitney para observar de mejor manera la diferencia de medias entre dos poblaciones de datos a nivel espacial, al igual que en el estudio realizado por Wijeyaratne y Suvendran (2019). Estas pruebas fueron realizadas en el software SPSS.

Para este análisis y los dos siguientes se consideró únicamente aquellos parámetros con información completa (conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, sólidos disueltos totales, amonio, coliformes totales y *E. coli*) en los dos periodos y las cuatro vertientes.

3.2.2.6 Regresión no lineal

Para visualizar de mejor manera la variación espacial y temporal, se realizó graficas de correlación aplicando la metodología de Romić et al. (2020). Se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) para mostrar la eficiencia de la primera variable (parámetros), para la predicción de la segunda variable (tiempo), que puede oscilar entre +1 y -1 si dos variables están perfectamente correlacionadas (Tabla 6). El coeficiente de determinación se calculó utilizando Microsoft Excel con ajustes polinomiales de grado 2 y 3 para diagramas de dispersión.

Tabla 6. Rangos e interpretación del coeficiente de determinación.

R^2	Interpretación
1-0.9	Muy alta correlación
0.89-0.70	Alta correlación
0.69-0.50	Moderada correlación
0.49-0.30	Baja correlación
0.29-0.00	Sin ninguna correlación

Fuente: Jawadi et al. (2020).

3.2.2.7 Análisis de conglomerados

Finalmente, para determinar de forma objetiva la variación espacio temporal se aplicó un análisis de clasificación Clúster. A nivel espacial se consideró los valores promedios de los parámetros y de las vertientes, a nivel temporal se consideró los valores promedios de los parámetros y de los periodos de las vertientes. A los datos estandarizados se aplicó la técnica de Ward, la distancia euclidiana al cuadrado como medida de similaridad y la representación de los grupos a partir de dendrogramas, donde la distancia se expresa como el cociente estandarizado entre las distancias de enlace específicos, dividido por la distancia máxima de ligamiento, $(D_{link}/D_{max}) \times 100$ (Vidal-Abarca et al., 2000; Valencia, 2007; Yaday et al., 2013 y Affum et al., 2015). Este análisis se lo realizó en el software Infostat.

3.2.3 Comparación de calidad de agua de los acuíferos con la normativa nacional e internacional con respecto a calidad de agua potable para proponer estrategias para la protección y conservación.

3.2.3.1 Calidad de agua de los acuíferos

Se comparó los valores de los análisis de agua de las vertientes con los valores de referencia para calidad de agua de consumo humano y uso doméstico considerados en el Acuerdo Ministerial 097-A (Libro 6; Anexo1), la normativa ecuatoriana de agua potable INEN 1108-2020, la norma estadounidense para agua potable EPA 2018 y la normativa de salud a nivel mundial para agua potable OMS 2018, siguiendo la metodología utilizada por Baque-Mite et al. (2016). Se empleó los parámetros presentes tanto en la base de datos imputados como en las distintas normativas de calidad de agua, considerando los límites máximos permisibles (LMP) para cada parámetro (Tabla 7).

Tabla 7. Límites máximos permisibles

Normativa		AM. 097-A	INEN 2020	EPA 2018	OMS 2018
Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible			
Parámetros físicos					
Color Verdadero	U (Pt-Co)	75	15	15	15
Conductividad Eléctrica	us/cm	-	-	-	2500

Potencial de Hidrógeno	UpH	6.5 – 9.0	6.5 – 8.0	6.5 – 8.5	6.5 – 9.5
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	-	-	500	100
Turbiedad	NTU	100	5	5	5
Parámetros químicos					
Amonio	mg/l	-	-	-	0.5
Flúor	mg/l	1.5	1.5	4	1.5
Hierro	mg/l	1	-	0.3	0.3
Nitratos	mg/l	50	50	10	50
Nitritos	mg/l	0.2	3	1	3
Sulfatos	mg/l	500	-	250	250
Dureza Total	mg/l	-	-	-	500
Parámetros Microbiológicos					
Coliformes Totales	NMP/100ml	1000	0	0	0
<i>E. Coli</i>	NMP/100ml	-	0	0	0

Fuente: (MAE, 2015; INEN-1108, 2020; EPA, 2018; OMS, 2018)

Izurieta et al (2017) menciona que las normas de calidad de agua adoptadas en la mayoría de los países se imitan de las directrices de la OMS, sin embargo, cada país debe evaluar los riesgos locales y garantizar la seguridad de los consumidores. Por ende, la norma INEN 1 108:2020 en ciertos parámetros no cuenta con las directrices establecidas por la normativa mundial y se acoplado los parámetros y directrices necesarias de acuerdo con las distintas condiciones nacionales.

3.2.3.2 Estrategias de protección y conservación

Para la propuesta de estrategias de protección y conservación de las vertientes La Magdalena, Neptuno, Punyaro y Turupamba se analizó los resultados obtenidos en la caracterización del área de estudio y la evaluación espacio temporal de la calidad de agua. Debido a la similitud en los resultados analizados se agrupó a las vertientes La Magdalena-Turupamba y Neptuno-Punyaro. Se identificó las actividades que ponen en riesgo la calidad y cantidad de agua de las vertientes, considerando la metodología usada por Gárfias et al. (2008) que mencionan que la protección de captaciones es la forma más antigua de proteger el acuífero de la contaminación, restringiendo el uso del terreno que lo circunda.

Según el IGME (2012) para la protección de captaciones es necesario realizar una delimitación de perímetros de protección que tienen como objetivo proteger la calidad y cantidad de las aguas subterráneas. Es una estrategia relevante ante el riesgo potencial que supone la actividad antrópica en los alrededores de las captaciones. Además, los perímetros de protección restringen o prohíben las actividades o infraestructuras susceptibles de contaminar las aguas subterráneas, o que puedan afectar el caudal. Razón por la cual con un radio de 50m se identificaron todas las actividades susceptibles de contaminar las vertientes.

Las cuatro vertientes cuentan con una infraestructura que concentra el agua, la entuba y dirige a la planta potabilizadora correspondiente (Figura 4). Se identificó los procesos realizados por las distintas plantas de tratamiento, además, se constató si algún agente contaminante a influenciado en la variación de algún parámetro y por ende en el buen funcionamiento de las plantas potabilizadoras de cada una de las vertientes.



Figura 4. Infraestructura que concentra el agua de las vertientes: a) La Magdalena, b) Punyaro, c) Neptuno y d) Turupamba

Además, para la adecuada implementación de las estrategias se realizó un análisis de las partes interesadas conocido como "*Stakeholder analysis*" para determinar los actores sociales involucrados y los posibles ajustes en las estrategias propuestas para maximizar la participación colectiva y el impacto positivo (Fernández, 2010).

Se consideró a todos los individuos y organizaciones competentes dentro del manejo de los recursos naturales del cantón, posteriormente se planteó acciones encaminadas a la prevención de problemas futuros que, además, garanticen la protección y conservación de los acuíferos.

Según Rojas y Otálvaro (2008) el movimiento de un contaminante desde la superficie del suelo hasta el acuífero puede durar días o décadas antes que el impacto de la contaminación se pueda evidenciar. Sin embargo, hasta ese momento se encontrarán involucrados grandes volúmenes de agua y su saneamiento en muchas ocasiones tienen un alto costo económico y su ejecución resulta complicada desde el punto de vista técnico, por lo cual la prevención es la mejor estrategia para la protección de acuíferos con el fin de evitar mayores costos en los procesos de potabilización y evitar afectaciones graves a la salud.

3.3 Materiales y equipos

Para la elaboración de este estudio, se utilizó los siguientes materiales y equipos (Tabla 8).

Tabla 8. Materiales y equipos

Materiales	Equipos	Softwares
Libreta de apuntes	Computadora	ArcGIS 10.5, ArcMap
Cartografía del área	Cámara fotográfica	IBM SPSS Statistics 25.0
Archivos digitales en formato <i>shapefile</i>	GPS	MINITAB 17 INFOSTAT

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos propuestos.

4.1 Caracterización de los acuíferos en base a su área de influencia, litología y uso de suelo

4.1.1 Área de influencia de los acuíferos

El área de influencia de los acuíferos está representada por la cuenca del río Jatunyacu, la cual se encuentra ubicada en el extremo Este del cantón Otavalo (Figura 2), posee una extensión de 23 340 ha y representa el 46.86 % del territorio cantonal, el rango altitudinal se extiende desde 2 600 hasta 4 500 msnm, limita al noreste con el cantón Ibarra y al sur con la provincia de Pichincha (Figura 5). La unidad hidrográfica del río Jatunyacu representa una de las ocho microcuencas que forman parte de la subcuenca del río Ambi y esta subcuenca integra junto con la subcuenca del río Chota y el Ángel la cuenca hidrográfica del río Mira (Burbano et al., 2015).

4.1.2 Litología

Se identificaron 21 tipos de roca (Anexo 1) donde las lavas de composición andesítica, aglomerados y brechas volcánicas cubren una superficie de 5 301 ha y las lavas andesíticas de grano fino a medio, aglomerados y flujos laharíticos poseen una superficie de 4 856 ha, las mismas que fueron los tipos de roca con mayor superficie en la cuenca. Además, se determinaron 11 tipos de formaciones geológicas (Figura 6; Anexo 2) de las cuales se destacan los Volcánicos Mojanda con una superficie de 6 068 ha y Volcánicos Imbabura con un área de 5 001 ha. Moreno et al. (2015) mencionan que los tipos de roca presentes en la cuenca pertenecen a la edad Cuaternaria, siendo las más comunes los conglomerados de arenas y gravas no consolidadas; Este tipo de roca favorece la recarga hídrica debido a la permeabilidad (Gómez-Niño, 2020).

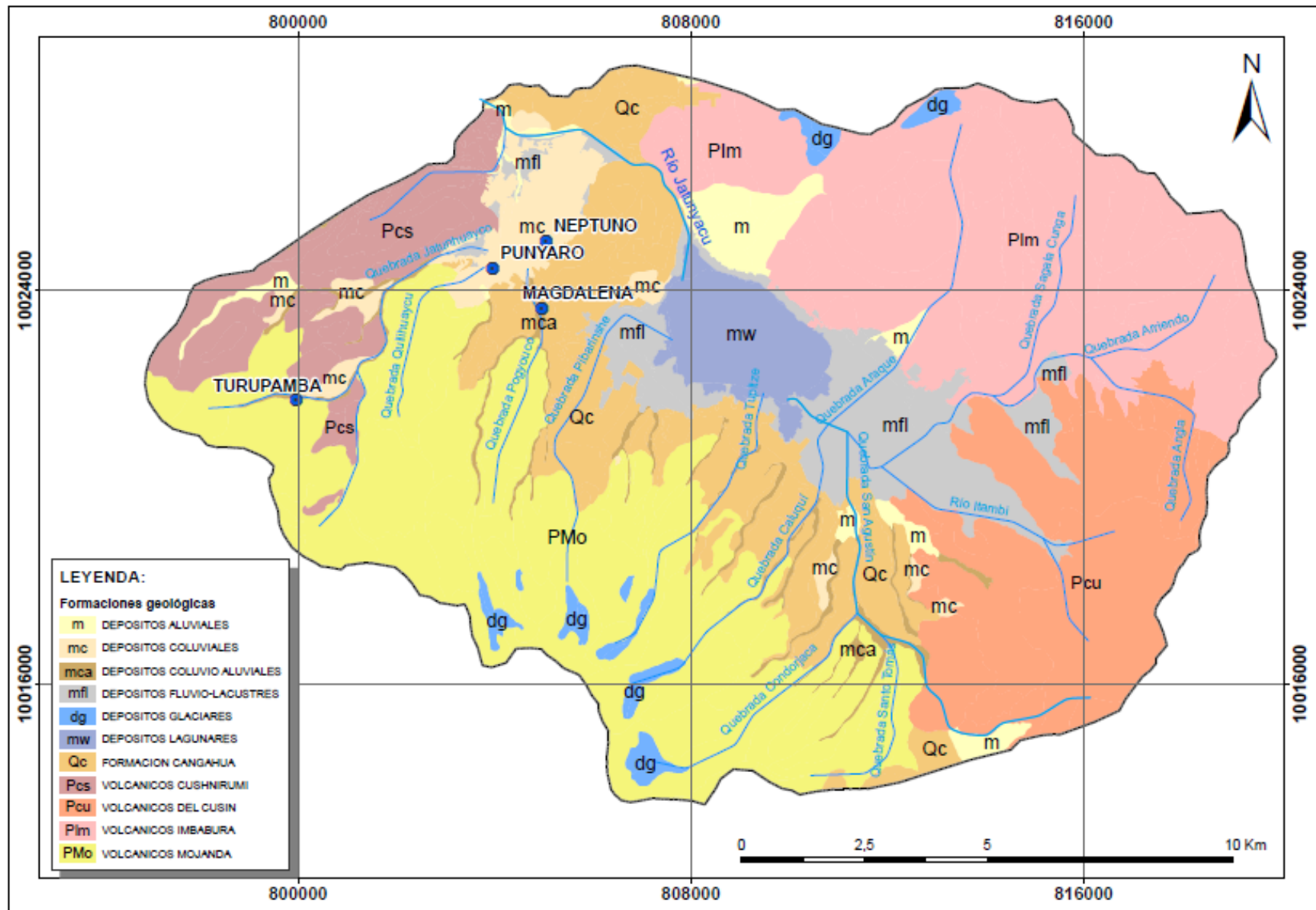


Figura 6. Formaciones geológicas de la cuenca del río Jatunyacu

El tipo de roca y formación geológica presente en los acuíferos La Magdalena, Neptuno Punyaro y Turupamba está representada por 4 tipos de roca y 3 tipos de formaciones geológicas, las mismas que desde el punto de vista litológico determinan la presencia de 2 tipos de acuíferos (Suárez, 1998; Geotecnia, 2018; Hispagua, 2020) (Tabla 9).

Tabla 9. Tipo de roca y formación geológica de los acuíferos

Acuífero	Tipo de roca	Formación geológica	Litología del acuífero
La Magdalena	Depósitos de ceniza y piroclastos de pómez, inmersos en una matriz arcillosa.	Depósitos coluvio aluviales	Fisurado
Punyaro	Depósitos de clastos, gravas, arenas en matriz areno-arcilloso.	Depósitos Coluviales	Detrítico
Neptuno	Depósitos de detritos angulosos de material andesítico e intrusivos dispuestos en matriz areno arcilloso.	Depósitos Coluviales	Detrítico
Turupamba	Lavas andesíticas a dacíticas	Volcánicos Mojanda	Fisurado

La clasificación litológica determinó que La Magdalena y Turupamba corresponden a acuíferos fisurados, denominados también kársticos o carbonatados, ya que están compuestos por rocas formadas por más del 50 % de minerales carbonatados, ya sean calizas, dolomías, yesos, mármoles, margocalizas u otro tipo de roca con presencia de diaclasas, fracturación o disolución presente en las rocas ígneas, metamórficas y detríticas bien consolidadas. Además, se identificó a las vertientes de Neptuno y Punyaro como acuíferos detríticos debido a que están formados por rocas o sedimentos detríticos, tales como, arenas, gravas, conglomerados, arcillas y/o limos (Hispagua, 2020).

Jaramillo y Merchán (2018) utilizaron información cartográfica de litología proporcionada por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca del año 2005 y ponderaron la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca en la parroquia Angochagua. Los resultados indicaron que la parroquia presenta nueve tipos de roca, considerando que las rocas suaves o permeables que presentan microporos, fallas o fracturas (calizas) favorecen la recarga de los acuíferos, mientras que las

rocas duras con presencia de poros finos (sedimentos detríticos) no favorecen dicha recarga.

De acuerdo con la validación realizada en campo (Figura 7) fue posible reconocer tanto la estratificación fina de sedimentos no consolidados (aluviales, eólicos o lacustres) como la saprolita derivada de roca consolidada donde los minerales aún conservan la estructura de la roca original (Ortiz et al., 2014). El registro fotográfico permitió identificar piroclastos de pómez inmersos en una matriz arcillosa en la vertiente La Magdalena (Figura 7a), clastos y arenas en matriz areno-arcillosa en la vertiente Punyaro (Figura 7b), detritos angulosos de material andesítico en matriz areno-arcillosa en la vertiente Neptuno (Figura 7c) y roca ígnea (dacítica) en la vertiente Turupamba (Figura 7d).

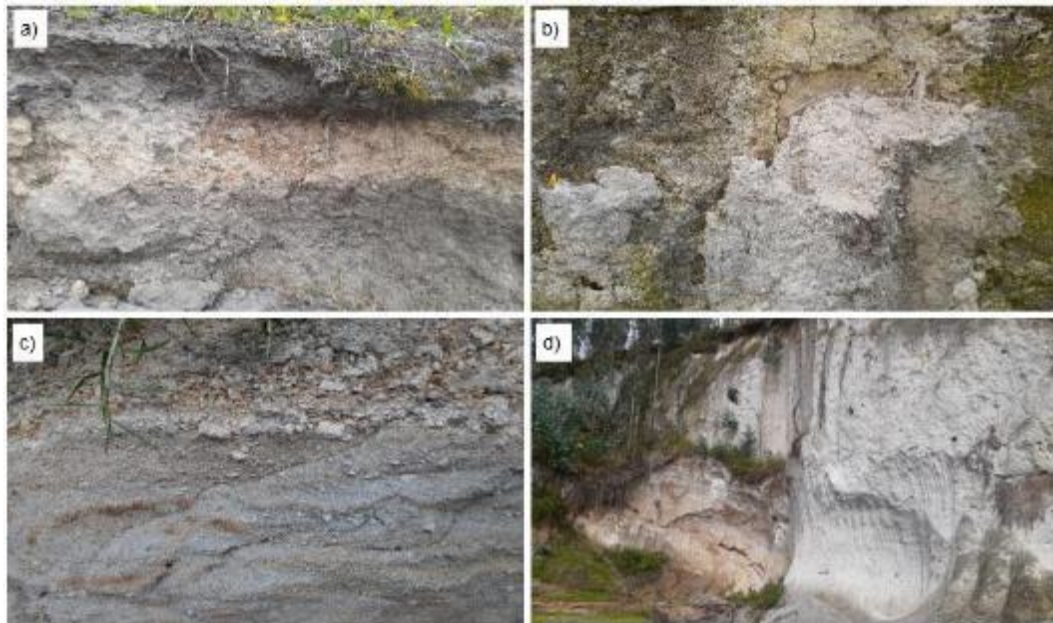


Figura 7. Validación in situ de clasificación de los acuíferos según el tipo de roca.
a) Vertiente La Magdalena b) Vertiente Punyaro c) Vertiente Neptuno y d)
Vertiente Turupamba

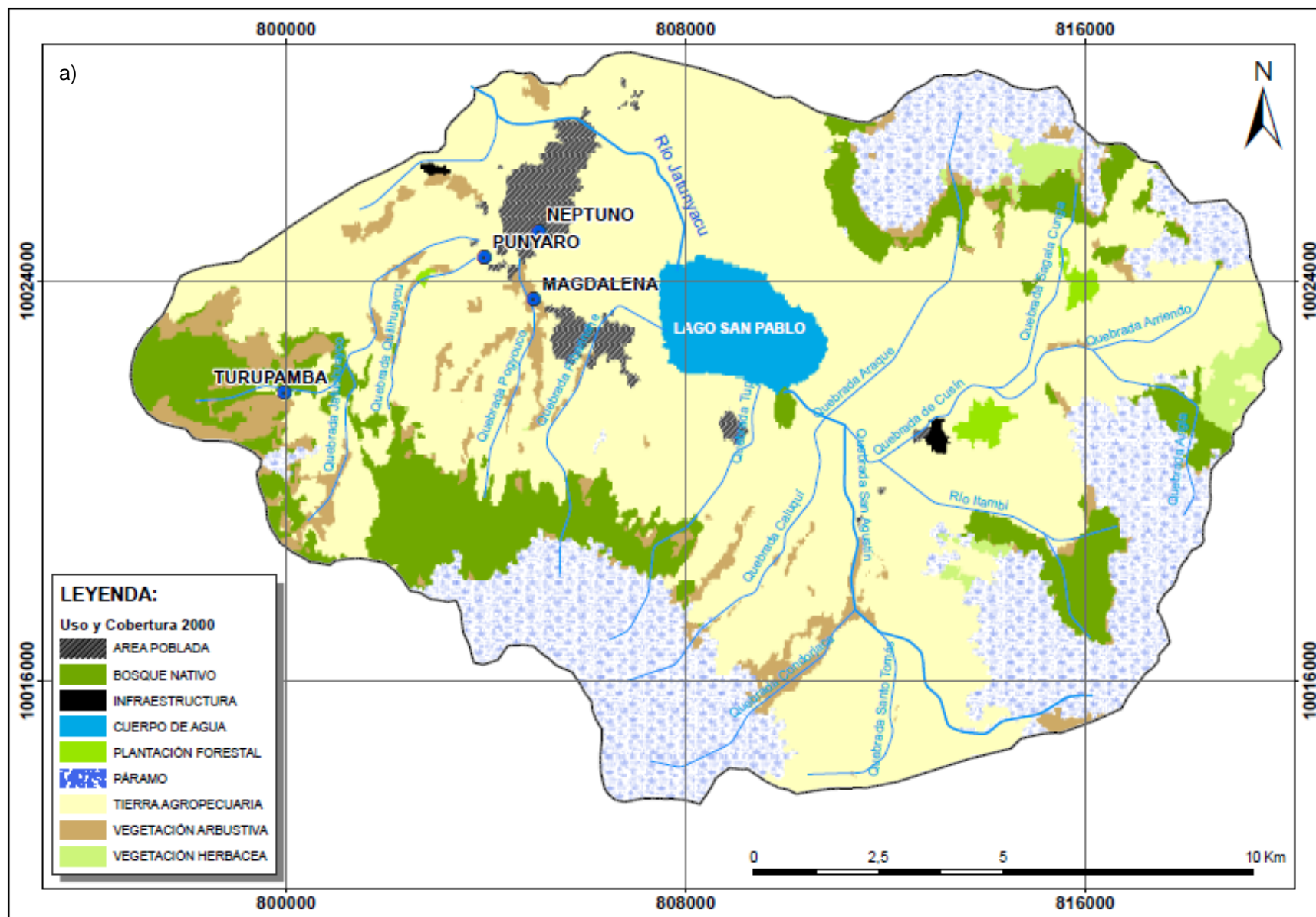
El IGME (2012) menciona que los acuíferos fisurados carecen de porosidad intergranular debido a que las rocas carbonatadas no son permeables de manera natural. No obstante, suelen ser fracturadas naturalmente por acción de la débil acidez de las aguas, provocando fracturas que favorecen la circulación. Estos acuíferos drenan agua de excelente calidad, sin embargo, son más vulnerables a la contaminación, debido a su baja capacidad de autodepuración, por lo que un foco

de contaminación alejado de la vertiente puede ocasionar alteraciones en la calidad química natural del agua.

Los acuíferos detríticos presentan una velocidad de transmisión de agua mucho más lenta, debido a que están constituidos por materiales granulares, donde el agua se acumula y circula lentamente por los poros o intersticios de los sedimentos que lo constituyen. Además, la calidad del agua de estos acuíferos está relacionada con la naturaleza de los materiales en los que fluye, razón por la cual es muy variable (en ocasiones baja) pudiendo tener un cierto grado de salinidad natural. Sin embargo, son menos vulnerables a la contaminación, debido a la capacidad de autodepuración que posee el medio detrítico, ya que ante un foco de contaminación el propio material detrítico ayuda a restituir la calidad del agua (IGME, 2012).

4.1.3 Cambios de uso de suelo y cobertura vegetal

El mapa de uso de suelo y cobertura vegetal del año 2000 (Figura 8a; Tabla 10) mostró nueve de las diez categorías encontradas, mientras que el mapa del año 2018 presentó todas las categorías (Figura 8b; Tabla 10). Las categorías más sobresalientes para los dos años fueron: Tierras agropecuarias, Páramo y Bosque nativo, encontrando cambios en todas las categorías durante el periodo 2000 al 2018 (Figura 8).



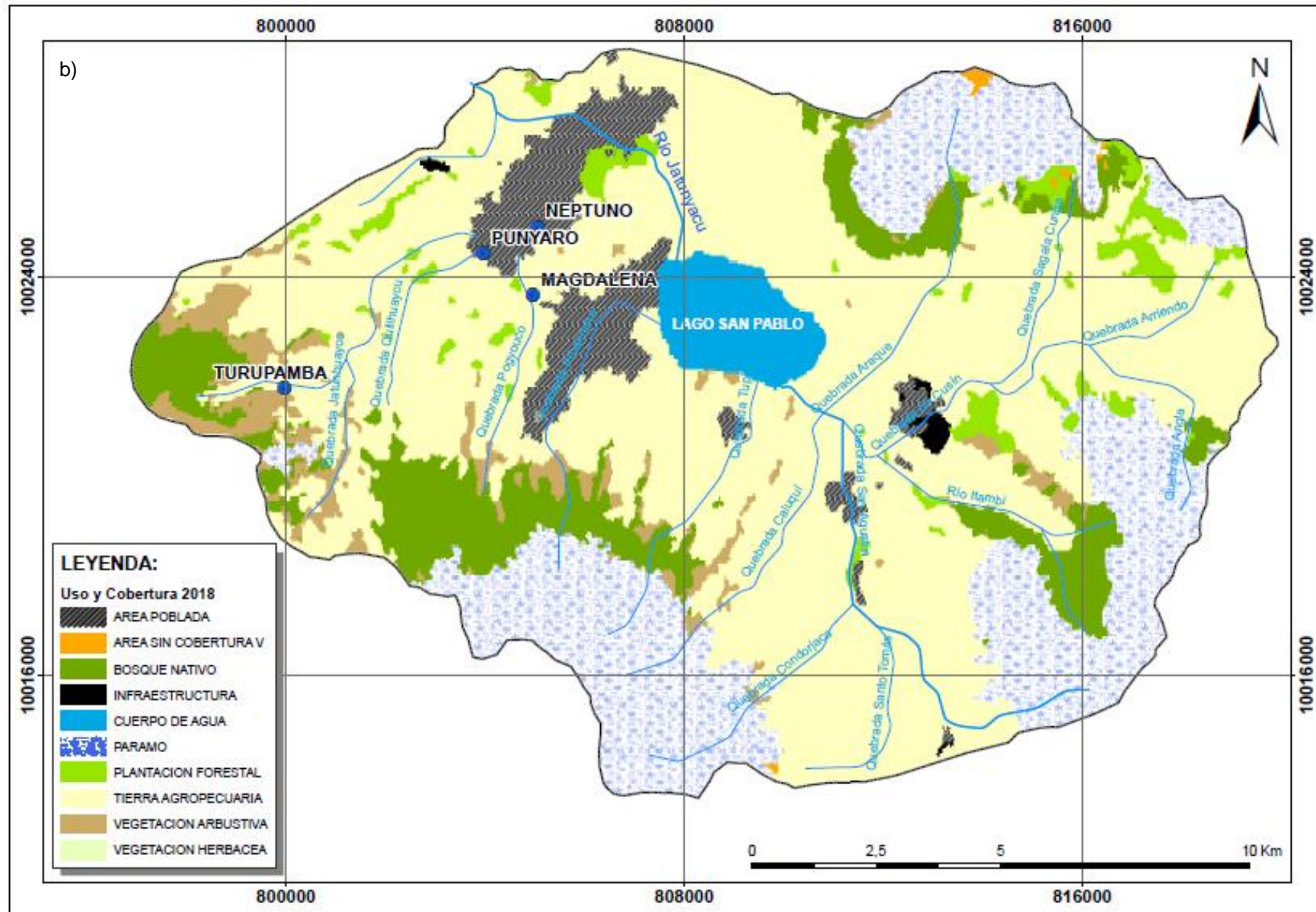


Figura 8. Uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca del río Jatunyacu a) año 2000 y b) año 2018.

La variación de las categorías de uso de suelo y cobertura vegetal más significativa se detectó en las áreas pobladas y plantaciones forestales, debido al incremento de la superficie de 510 a 1 258 ha y de 121 a 688 ha respectivamente, lo cual indica un constante crecimiento poblacional y el remplazo de la cobertura vegetal, el Bosque nativo disminuyó de 2 600 a 2 166 ha, que ha sido remplazado en su mayoría por Tierra agropecuaria y Vegetación arbustiva (Tabla 10). A pesar de que Tierra Agropecuaria remplazó a varias categorías de uso en el periodo 2000 – 2018, esta disminuyó de 13 247 a 12 963 ha debido a que fue remplazada en su mayoría por Área poblada.

Tabla 10. Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal del periodo 2000-2018

Categorías de uso de suelo y cobertura vegetal	2000		2018		Variación	
	ha	%	ha	%	ha	%
Área Poblada	510.39	2.19	1258.36	5.39	747.97	1.47
Área Sin Cobertura Vegetal	sd	sd	33.72	0.14		
Bosque Nativo	2600.30	11.14	2165.61	9.28	- 434.69	-0.17
Infraestructura	32.76	0.14	62.28	0.27	29.52	0.90
Cuerpo de agua	643.41	2.76	638.91	2.74	- 4.5	-0.01
Páramo	4654.10	19.94	4621.68	19.80	- 32.43	-0.01
Plantación Forestal	120.58	0.52	688.17	2.95	567.59	4.71
Tierra Agropecuaria	13247.04	56.76	12962.77	55.54	- 284.26	-0.02
Vegetación Arbustiva	1230.40	5.27	908.14	3.89	- 322.26	-0.26
Vegetación Herbácea	300.80	1.29	0.09	0.00	- 300.71	-1.00

Nota: sd: sin datos

De acuerdo con el GAD-Otavalo (2015) el cantón refleja un proceso de deterioro ambiental avanzado, una grave perturbación de los recursos naturales y una ampliación de la frontera agrícola, ganadera y urbana. Identificando de esa manera que las actividades antrópicas han influenciado en los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal del cantón y por ende de la cuenca del río Jatunyacu, así como de las áreas que rodean a las vertientes en estudio.

La verificación in situ de las actividades antrópicas (Figura 9) corroboró los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal obtenidos cartográficamente en el periodo 2000-2018. En la vertiente La Magdalena se detectó un cambio de Vegetación arbustiva a Tierra agropecuaria (Figura 9a), en la vertiente Punyaro las

Tierras agropecuarias cambiaron a Áreas pobladas (Figura 9b), en la vertiente Neptuno no se detectaron cambios en cuanto a categoría de uso, manteniéndose el Área poblada (Figura 9c) y finalmente en la vertiente Turupamba el Bosque nativo fue remplazado por Tierras agropecuarias (Figura 9d). Representando las categorías de uso de suelo antrópicas el 64.29% del área de la cuenca.



Figura 9. Uso de suelo y cobertura vegetal del año 2020 de áreas cercanas a las vertientes. a) Vertiente La Magdalena b) Vertiente Punyaro c) Vertiente Neptuno y d) Vertiente Turupamba

Loredo et al. (2020) al evaluar los cambios de cobertura natural y uso del suelo de la cuenca baja del río Nazas en el periodo 1990-2016 por medio de la interpretación visual de imágenes satelitales, identificaron que en 26 años se deforestó el 32.1 % de las coberturas naturales, ratificando que las actividades antrópicas, principalmente la agricultura y la expansión poblacional influyen en el remplazo de la cobertura natural, lo que ha generado una disminución acelerada de las superficies originales. Reconociendo, además, la necesidad de crear políticas públicas, que contribuyan en el aprovechamiento sustentable del agua y en la conservación de los ecosistemas de la región.

4.2 Variación espacio temporal de la calidad de agua en los acuíferos

4.2.1 Muestreos de calidad de agua

Considerando los años, meses y parámetros de muestreo, el número completo de datos esperados para cada vertiente es de 5 184. Sin embargo, la información proporcionada por EMAPAO-EP durante los 18 años generó 2 829 datos para La Magdalena, 2 880 para Punyaro, 2 421 para Neptuno y 2 560 para Turupamba (Anexo 4a; Anexo 5), representando el 55, 56, 47 y 49 % de datos generales para cada vertiente respectivamente.

En el primer periodo al sistematizar los 23 parámetros se obtuvo como resultado 1 120 datos para La Magdalena, 1 179 para Punyaro, 993 para Neptuno y 1 005 para Turupamba (Anexo 4b), lo cual representa el 68, 71, 60 y 61 % del valor esperado de datos (1 656) respectivamente. Mientras que para el segundo periodo de los 17 parámetros se obtuvo 1 098 datos para La Magdalena, 1 086 para Punyaro, 915 para Neptuno y 1 017 para Turupamba (Anexo 4c), representan el 90, 89, 75 y 83 % del valor esperado de datos (1 224) respectivamente.

Finalmente, el primer periodo constó de 13 parámetros, donde se presentaron 863 datos para La Magdalena, 855 para Punyaro, 822 para Neptuno y 840 para Turupamba (Anexo 4d), representando el 92, 91, 88 y 90 % del valor esperado de datos (936) respectivamente. El segundo periodo constó de 14 parámetros y se obtuvo 954 datos para La Magdalena, 953 datos para Punyaro, 817 datos para Neptuno y 917 datos Turupamba (Anexo 4e), representando el 95, 95, 81 y 91 % del valor esperado de datos (1 008) respectivamente.

Valencia (2007) en el “Estudio estadístico de la calidad de las aguas en la cuenca hidrográfica del Río Ebro” con datos del periodo 1983-2002 eligió únicamente las estaciones de muestreo que presentaron datos a lo largo de este periodo, además se eligió dos meses de muestreo de cada año para todas las estaciones ya que presentaron una falta de homogeneidad en la recogida de la información y por ende se consideró el semestre de invierno y verano.

4.2.2 Caracterización de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Los estadísticos descriptivos de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los dos periodos (Anexo 6a-b), muestran la caracterización de agua de las vertientes:

El color verdadero para el segundo periodo no mostró variaciones significativas, siendo Turupamba la vertiente en la que la media y desviación estándar presentó concentraciones elevadas con 2.80 y ± 2.70 UPt-Co respectivamente (Figura 10). Sierra (2011) y Deloya-Martínez (2006) consideran la relación de este parámetro con la turbidez, además, sostienen que en aguas naturales el color verdadero es un indicador de la presencia de ciertos contaminantes generados ya sea por descargas industriales, desintegración de materia orgánica, disolución de minerales o por la presencia de óxidos metálicos.

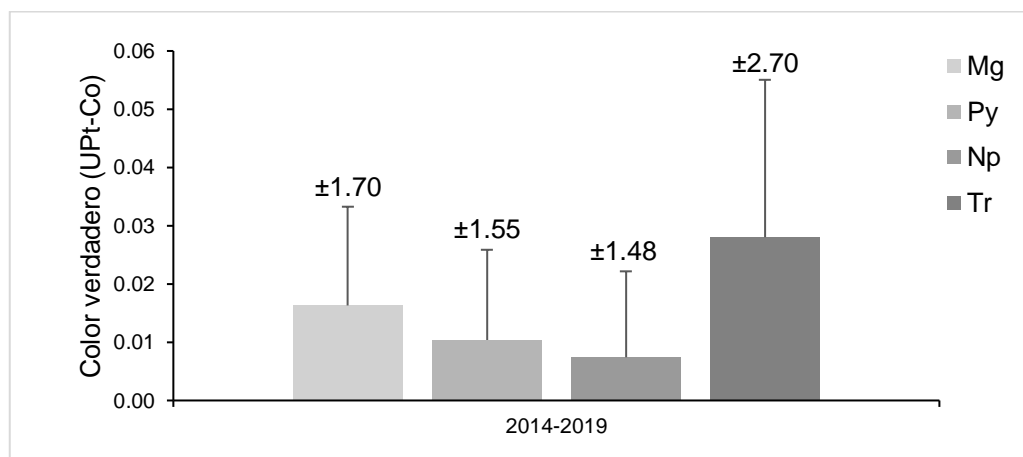


Figura 10. Medias de color verdadero y desviación estándar de las vertientes

La turbiedad en el segundo periodo indicó que Turupamba es la vertiente con la media más elevada con 0.81 NTU además de desviaciones estándar muy altas para las cuatro vertientes (Figura 11). Estas concentraciones son bajas en comparación al estudio de Sandoval y Sisa (2020) el cual tiene valores que varían de 3.75 a 7.81 NTU. Estos valores bajos de turbidez en el agua cruda se deben a la poca presencia de material y partículas en suspensión en la fuente es específico ya que son provenientes de agua subterránea.

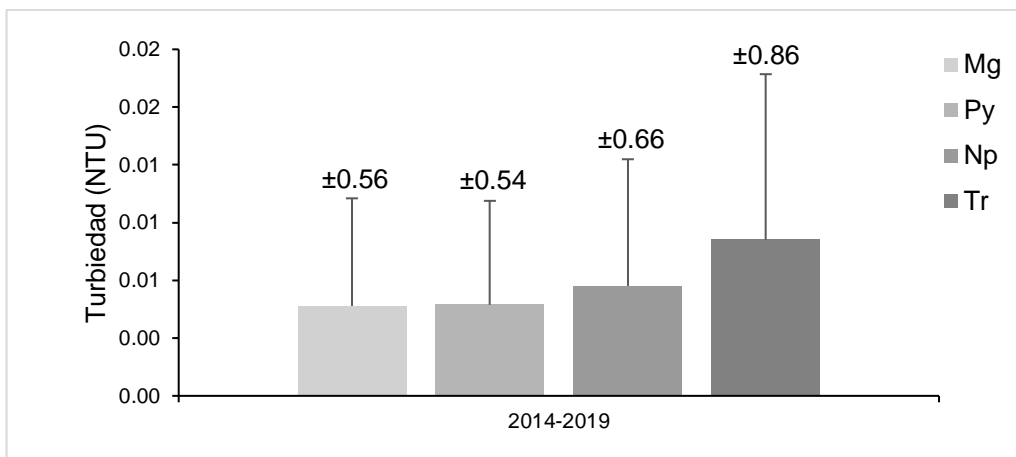


Figura 11. Medias de turbiedad y desviación estándar de las vertientes

Con respecto a la conductividad eléctrica los valores de la media se mostraron relativamente constantes para los dos periodos, siendo Turupamba la vertiente con la media más baja en los dos periodos con respecto a las demás, en cuanto a la desviación estándar La Magdalena presentó el valor más elevado con ± 45.34 microSiemens/cm en el primer periodo (Figura 12). Cuanto mayor sea la conductividad eléctrica del agua mayor será la cantidad de sólidos o sales disueltas (Raffo, 2013). Sandoval y Sisa (2020) dan a conocer los resultados de conductividad eléctrica determinados en campo y de los ensayos de laboratorio de sólidos totales disueltos los cuales arrojan valores similares, debido a la estrecha relación de estos dos parámetros.

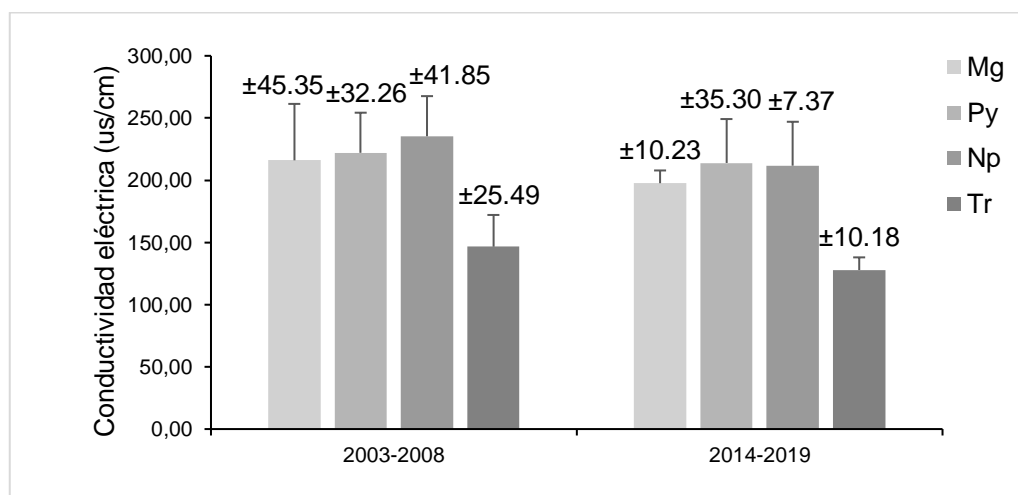


Figura 12. Medias de conductividad eléctrica y desviación estándar de las vertientes

Los sólidos disueltos totales presentaron medias similares entre las vertientes de cada periodo a excepción de Turupamba la cual presentó medias bajas de 66.19 y 60.68 mg/l respectivamente para cada periodo (Figura 13) y con desviaciones estándar bajas. Al igual que en el estudio de Aznar (2000) con estos valores no existe una restricción para el uso de dicha agua, al presentar baja salinidad. Además de relacionarse con distintos factores como la pureza química del agua, la cual indica una menor concentración de electrolitos.

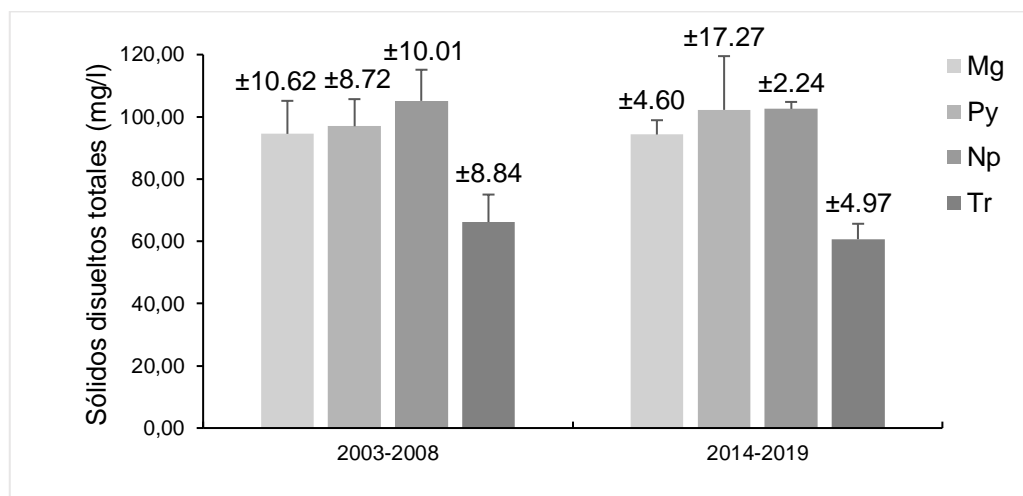


Figura 13. Media de sólidos totales disueltos y desviación estándar de las vertientes

En cuanto al potencial de hidrógeno las medias más elevadas están presentes en La Magdalena y Neptuno en los dos periodos, que varían de 6.88 a 6.92 UpH valores que representan un pH levemente ácido con tendencia a neutro (Figura 14). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-EPA (2018) afirma que 7 es el valor del pH del agua pura, valor que tiene cierta relación con los obtenidos en este estudio, sin embargo, lo ideal sería que el agua de las vertientes mantenga su pH óptimo.

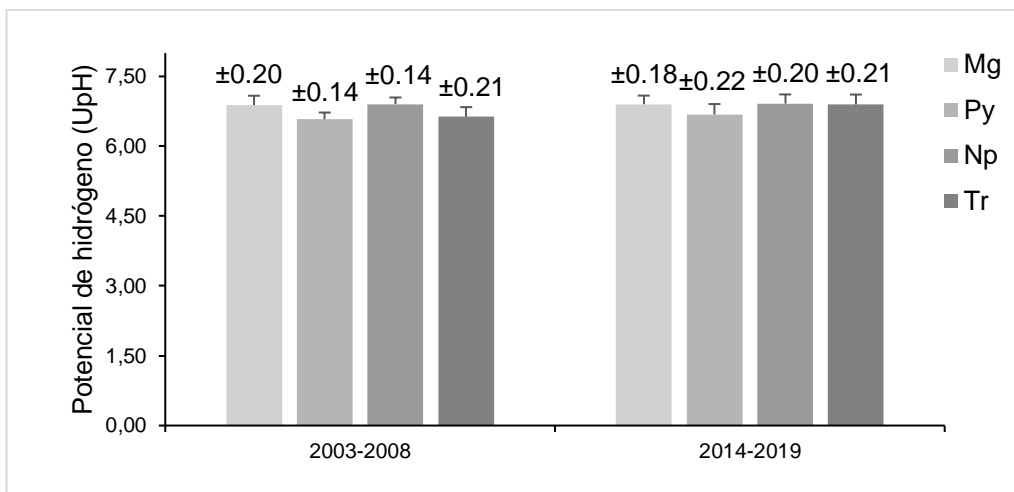


Figura 14. Media del potencial de hidrógeno y desviación estándar de las vertientes

La temperatura en el periodo 2014-2019 presentó la media más elevada en Neptuno con 18.84 °C, a pesar de esto es similar a la media de las otras vertientes (Figura 15). Según Kalola et al. (2020) la temperatura es importante porque la velocidad de las reacciones químicas generalmente aumenta a temperaturas más altas. El agua subterránea con temperaturas más altas superiores a los 25° C puede disolver más minerales de rocas circundantes, y por lo tanto incrementar la conductividad eléctrica.

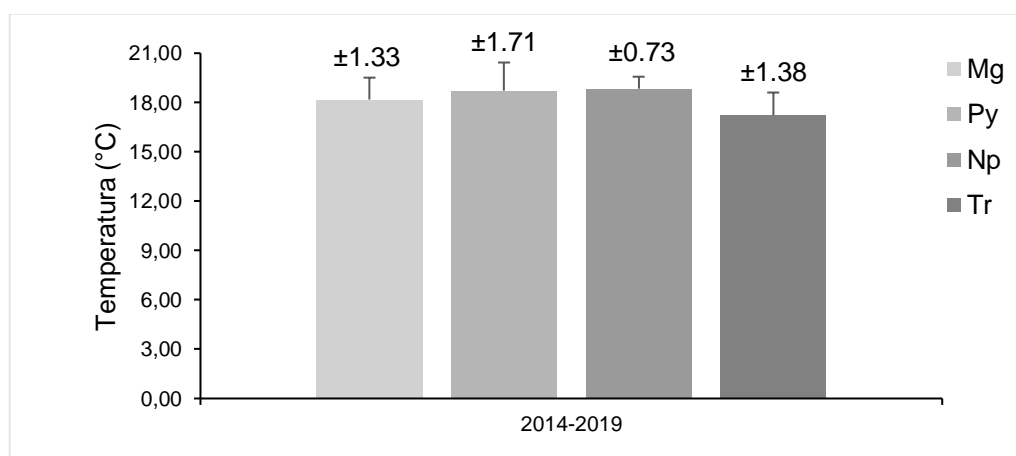


Figura 15. Media de Temperatura y desviación estándar de las vertientes

En cuanto a los nitratos del primer periodo, La Magdalena presentó la media más alta (3.09 mg/l), siendo Turupamba la vertiente con la desviación estándar más elevada de ± 2.93 . En cuanto al segundo periodo las cuatro vertientes presentaron

medias similares de aproximadamente de 1.11 mg/l, con una desviación estándar alta (± 1.24) para Neptuno (Figura 16).

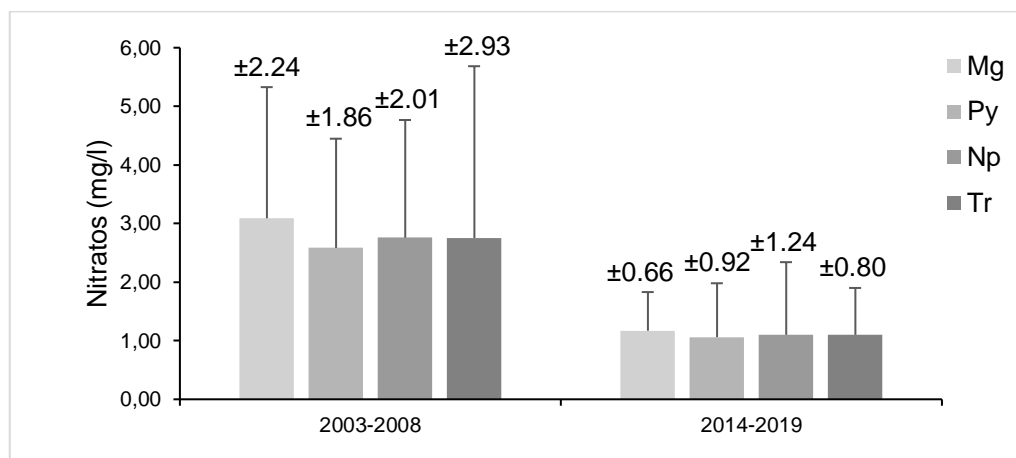


Figura 16. Media de nitratos y desviación estándar de las vertientes

Los nitritos en el primer y segundo periodo presentaron el valor más elevado en Neptuno de 0.03 y 0.014 mg/l respectivamente, con la desviación estándar más alta para la misma vertiente de ± 0.055 y ± 0.050 respectivamente (Figura 17) A pesar de esto los valores de nitratos y nitritos son mínimos, su presencia puede deberse a una posible fuente de contaminación por nitritos por el uso excesivo de fertilizantes de las zonas aledañas a las vertientes, además del incremento de zona urbana, debiéndose a contaminación difusa y puntual (Bolaños et al., 2017).

Por el contrario, Sandoval y Sisa (2020) en su estudio realizado en la comunidad de Aglla presenta valores de 0.00 mg/l de nitratos lo cual indica que el agua tiene baja cantidad de materia orgánica disuelta, además de que las actividades pecuarias y agrícolas del sector no infringen en el aumento de la concentración de estos parámetros dado que en las zonas rurales estas actividades son las responsables de incrementar los niveles de nitrógeno orgánico en el agua.

Según Wijeyaratne y Suvendran (2019) la clasificación de este parámetro para calidad de agua potable para valores de 0-6 es considerado en la categoría II en la cual el agua es segura para su uso, pero no tiene una calidad de agua ideal, ya que los recursos de esta categoría pueden provocar leves efectos adversos para la salud en algunas ocasiones, valores máximos que están incluidos en esta categoría para las cuatro vertientes.

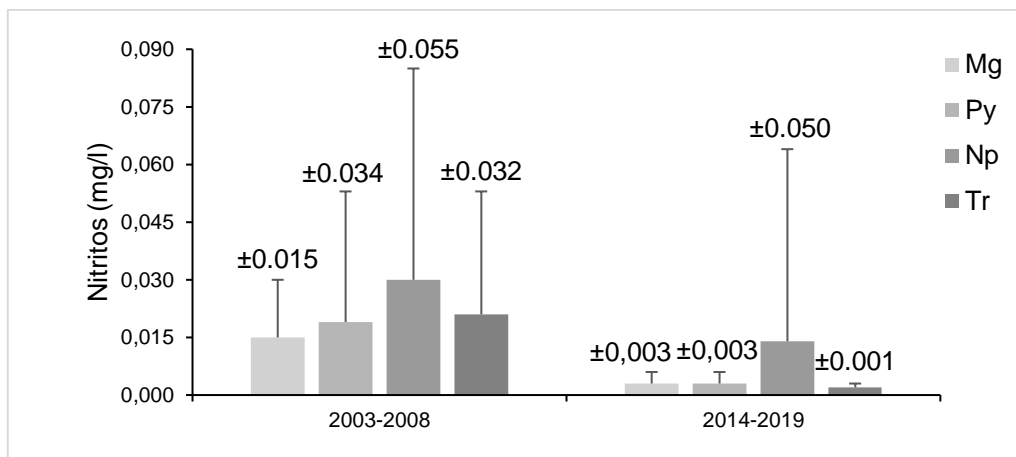


Figura 17. Media de nitritos y desviación estándar de las vertientes

El amonio presentó medias similares en las cuatro vertientes para el primer periodo y segundo periodo que variaron de 0.03 a 0.04 mg/l y 0.02 a 0.03 mg/l respectivamente con la desviación estándar más elevada en el primer periodo en Neptuno (± 0.10 mg/l) (Figura 18). Las bajas concentraciones de nitrógeno amoniacal en las muestras se deben claramente a la poca presencia de materia orgánica degradada en el agua (Sandoval y Sisa, 2020). Valencia (2007) menciona que el amonio representa un indicador de contaminación bacteriana poco peligroso, con niveles que van por debajo de 0.2 mg/l y 3 mg/l en el caso de las aguas subterráneas anaerobias.

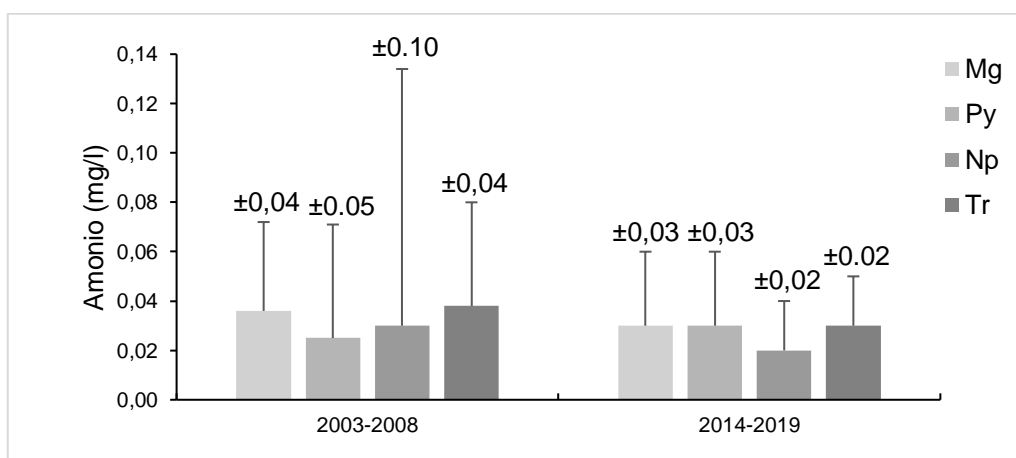


Figura 18. Media de amonio y desviación estándar de las vertientes

En el caso del fósforo los valores de medias más elevadas se presentaron en el primer periodo, siendo Punyaro la vertiente con la media más elevada para los dos periodos de 0.50 y 0.26 mg/l respectivamente. Además de que presentaron valores

muy altos de desviaciones estándar para las mismas ± 0.37 y ± 0.19 mg/l respectivamente (Figura 19). De acuerdo a la investigación de Ramos (2016) se puede corroborar que la presencia de este compuesto puede estar atribuida al tipo de suelo, que para el estudio en esta zona el suelo gredoso y procede de la descomposición de piedras calizas, además de ser ligero y de buen drenaje. Por el contrario, Puerta y Zapata (2014) encontraron en los pozos de agua de Los Ríos un promedio de 15.75 mg/l de fosfatos, debiéndose estos valores de agua subterránea como el resultado de contaminación por detergentes, estiércol y heces, los cuales producen eutrofización de los cuerpos de agua.

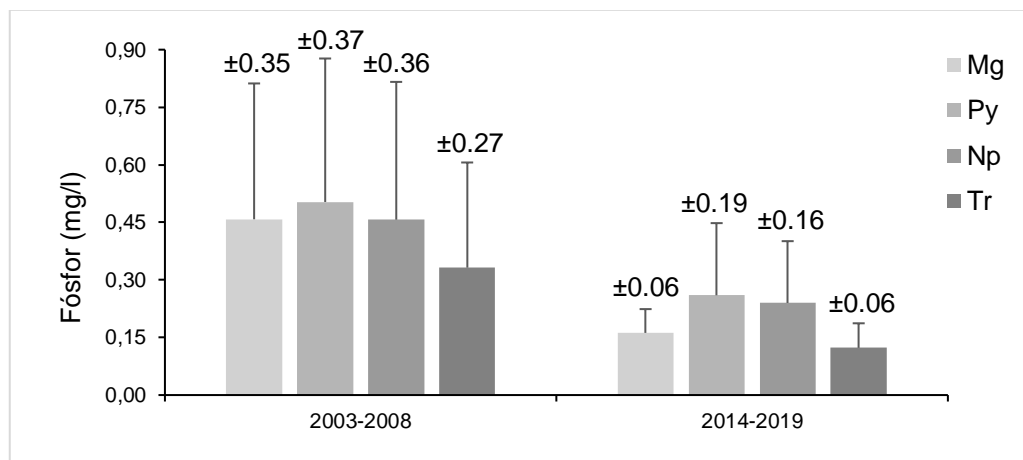


Figura 19. Media de fósforo y desviación estándar de las vertientes

La vertiente Turupamba presentó la media más elevada de 0.06 mg/l de hierro en el segundo periodo, además de una desviación estándar muy alta ± 0.05 para la misma (Figura 20). En el estudio de Sandoval y Sisa (2020) las bajas concentraciones de hierro en el agua son un claro indicador que este elemento se encuentra en su forma más estable no soluble, lo cual confirma la presencia de oxígeno y la inexistencia de condiciones anaerobias. Estos resultados son favorables ya que al tener poca existencia de hierro evita obstrucciones en las tuberías, además de evitar que el agua tenga un sabor, olor y color indeseable antes de su consumo.

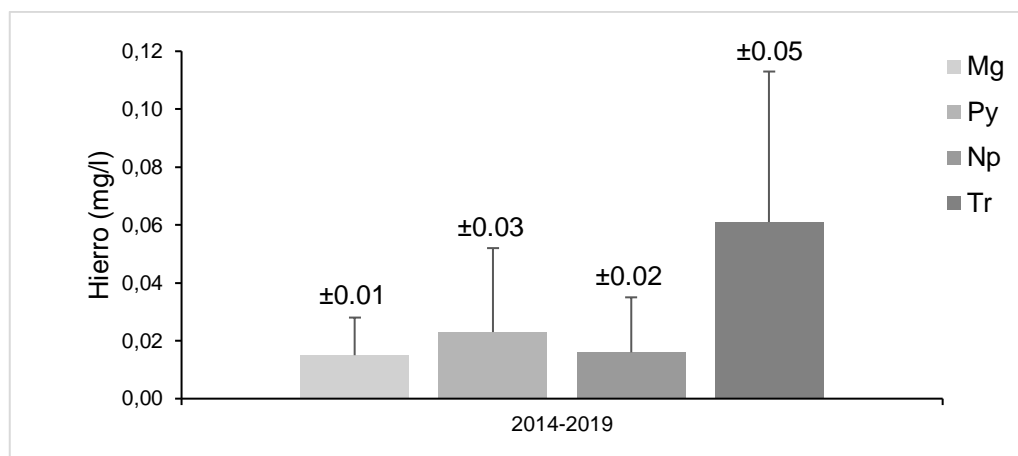


Figura 20. Media de hierro y desviación estándar de las vertientes

El flúor en el segundo periodo, Neptuno presentó la media más elevada, con 0.34 mg/l y una desviación estándar muy alta (± 0.34 mg/l) para la vertiente Turupamba (Figura 21). Este contaminante de origen natural es bajo y se presenta fundamentalmente en aguas subterráneas en concentraciones de hasta 67 mg/l, mientras que, en la mayoría de las aguas superficiales, en niveles < 0.1 mg/l. Además, el flúor acuoso está controlado principalmente por el pH y las concentraciones de otros componentes. Varios autores han concluido que el flúor es adsorbido por las arcillas a pH ácido, mientras que el pH alcalino es más favorable para la disolución del flúor (Zango, et al., 2019; Mukherjee y Singh, 2020).

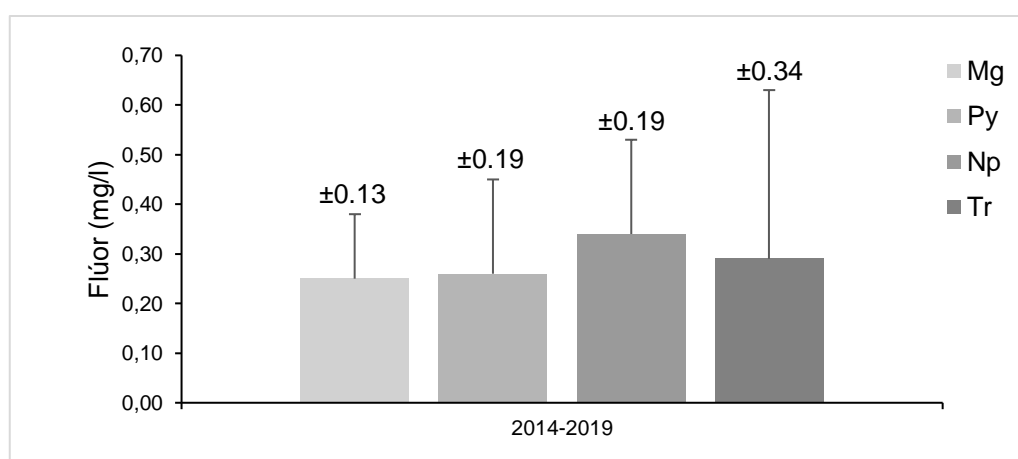


Figura 21. Media de flúor y desviación estándar de las vertientes

El valor más elevado de sulfatos en el segundo periodo se presentó en La Magdalena con 0.49 mg/l, con desviaciones estándar muy altas en específico en Punyaro con

± 1.04 mg/l (Figura 22). Según OMS (2018) las concentraciones más altas suelen encontrarse en las aguas subterráneas y provenientes de fuentes naturales. Severiche y González (2012) en el artículo “Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado” coincide en que los sulfatos no suelen originar problemas de potabilidad en las aguas de consumo humano, pero contenidos superiores a 200 mg/L pueden causar trastornos gastrointestinales en los niños.

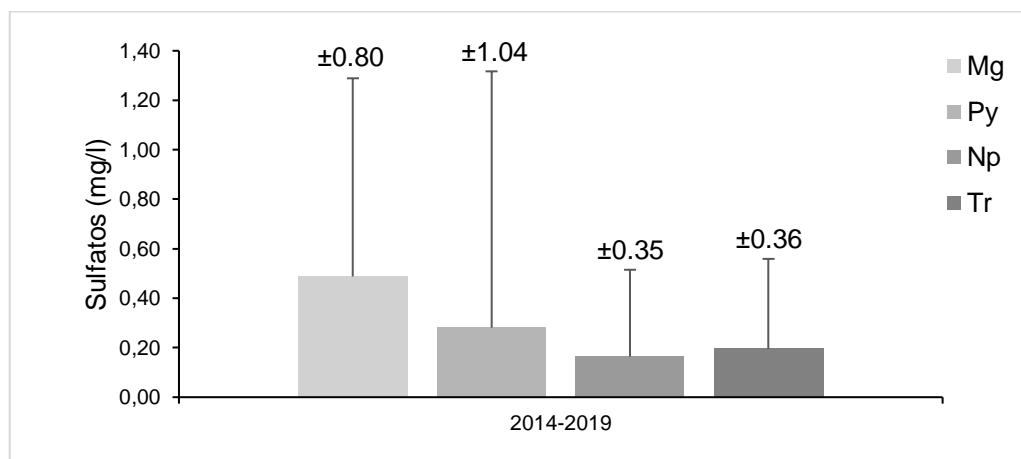


Figura 22. Media de sulfatos y desviación estándar de las vertientes

Los valores de las medias de alcalinidad se caracterizaron solo en el primer periodo, manifestándose que Punyaro fue la vertiente con la media más elevada de 104.68 mg/l. Por otro lado, las desviaciones estándar de este parámetro se mostraron relativamente homogéneas a diferencia de Turupamba que fue la vertiente con el valor de la desviación estándar más bajo ± 13.96 mg/l (Figura 23). Torres et al. (2010) señalan que la alcalinidad del agua se debe a la presencia de carbonatos y bicarbonatos en solución, los mismos que son muy comunes en aguas subterráneas y enfatizan que las aguas con alta alcalinidad generan un alto pH del sustrato.

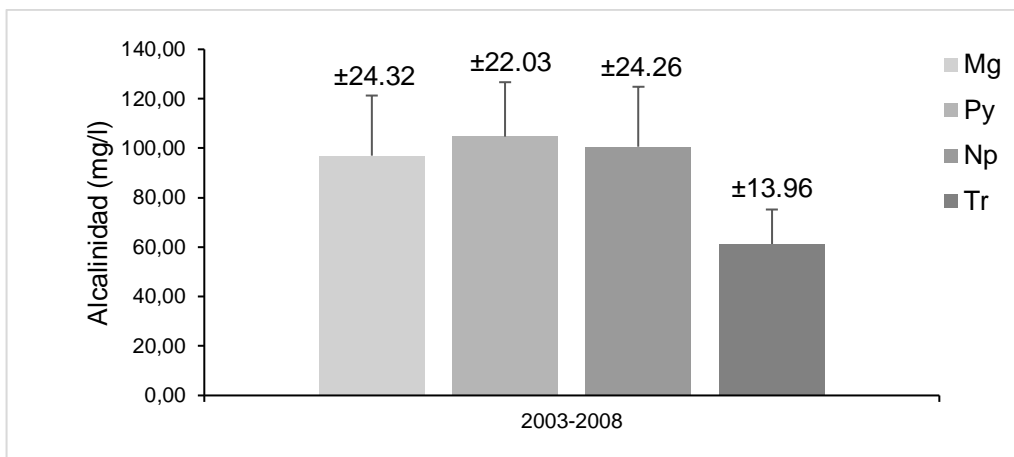


Figura 23. Media de alcalinidad y desviación estándar de las vertientes

El calcio fue analizado solo en el primer periodo y tanto los valores de la media como los de la desviación estándar mostraron cierta elevación en la vertiente Punyaro con 16.86 y ± 2.21 mg/l respectivamente (Figura 24). El IGME (2012) sostiene que el principal catión presente en la mayoría de las aguas naturales suele ser el calcio, debido a su amplia difusión en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, la concentración de este elemento varía ampliamente en las aguas subterráneas con valores que van de los 10 a los 250 mg/l.

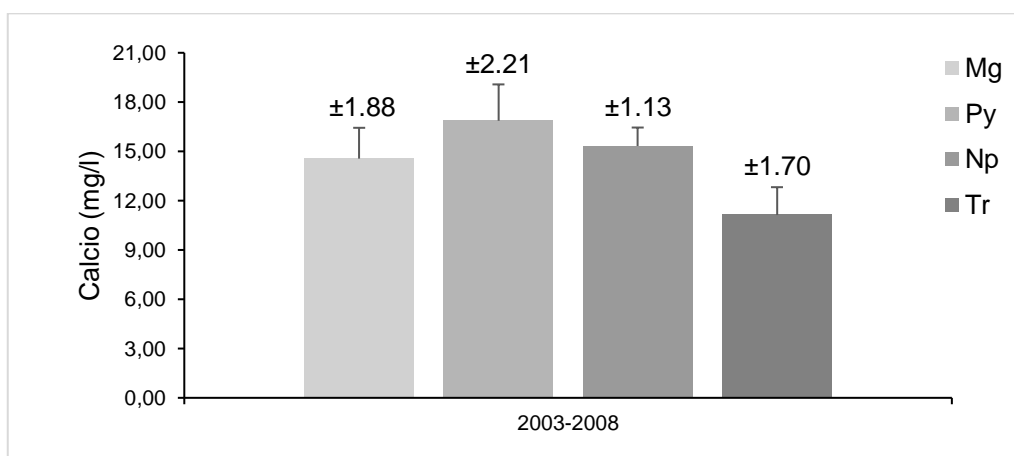


Figura 24. Media de calcio y desviación estándar de las vertientes

La dureza cálcica se analizó solo en el primer periodo, donde los valores de las medias no variaron significativamente en las vertientes La Magdalena, Punyaro y Neptuno, siendo Turupamba la vertiente con el valor de la media más baja con 28.78 mg/l, en cuanto a la desviación estándar Neptuno obtuvo el valor más bajo con ± 2.10 mg/l (Figura 25). Sandoval y Sisa (2020) expresan que los valores de dureza

cálcica del agua están dados por la cantidad del mineral del calcio disuelto en la misma, esto debido a la cantidad de calcio y magnesio presente en las rocas por donde el agua circula.

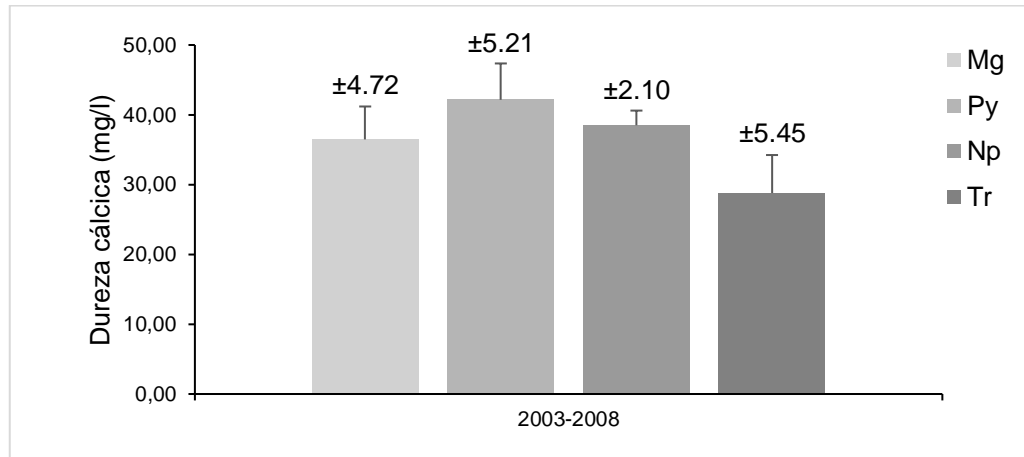


Figura 25. Media de dureza cálcica y desviación estándar de las vertientes

En el caso de la dureza total, misma que se analizó solo en el primer periodo, el valor de la media más bajo al igual que en el caso anterior lo obtuvo Turupamba con 52. 2 mg/l CaCO₃, en cuanto a la desviación estándar los valores más elevados los presentaron La Magdalena y Turupamba con ± 8.98 y ± 9.01 mg/l CaCO₃ respectivamente (Figura 26). Sandoval y Sisa (2020) obtuvieron valores de dureza total que se encuentra en un rango de 23 a 33 mg/l CaCO₃, por lo que consideran que el agua es blanda. Según la OMS (2018) el agua es blanda si la concentración de la dureza total está dentro del rango de 0 a 60 mg/l CaCO₃.

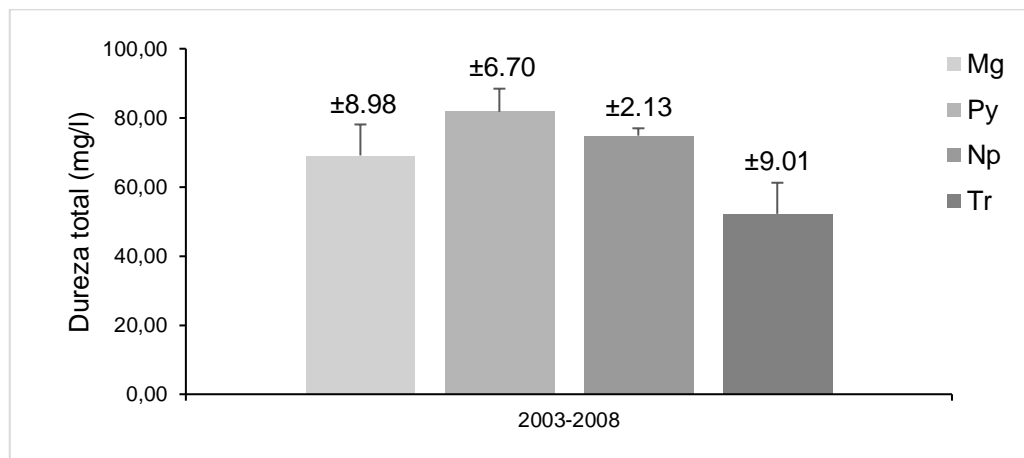


Figura 26. Media de dureza total y desviación estándar de las vertientes

Los valores de las medias de coliformes totales fueron elevados para La Magdalena y Turupamba en los dos periodos, sin embargo, fue en el segundo periodo donde las medias variaron significativamente con 218.42 y 102.52 NMP/100ml respectivamente, además las desviaciones estándar más altas se identificaron de igual manera en el segundo periodo y en las dos vertientes ya mencionadas ($\pm 538,13$ y $\pm 304,58$ NMP/100ml respectivamente) (Figura 27).

Los coliformes totales representan un indicador de contaminación por patógenos, debido a su estrecha relación con un grupo de especies bacterianas incluidos los coliformes fecales (Valencia, 2007; Sierra, 2011). Ramos et al. (2008) en su estudio de contaminación bacteriana manifiestan que los valores de coliformes totales que registraron oscilan entre 230 NMP para el nivel superficial y 4 600 NMP para el nivel profundo, mismos que estuvieron dentro de los límites permisibles establecidos por la legislación colombiana.

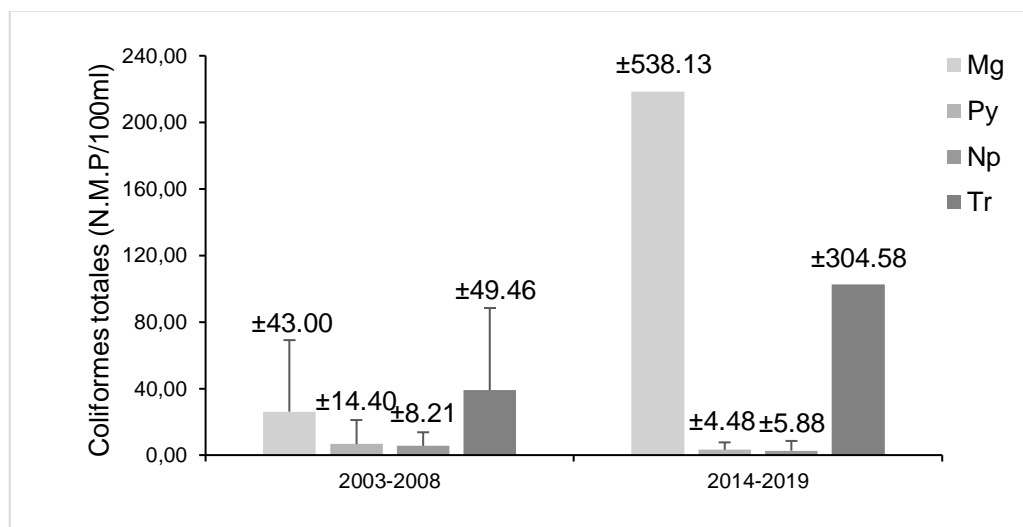


Figura 27. Media de coliformes totales y desviación estándar de las vertientes

Con respecto a *E. coli*, el valor de la media más elevado se dio en la vertiente Turupamba en el primer periodo con 1.74 NMP/100ml, mientras que para el segundo periodo en la vertiente Neptuno el valor de la media fue 0 NMP/100ml, en el caso de la desviación estándar la vertiente La Magdalena obtuvo el valor más elevado con $\pm 10,60$ NMP/100ml (Figura 28). *E. Coli*, es una bacteria que se encuentra presente con frecuencia en el intestino distal de los organismos de sangre caliente. La mayoría de sus cepas de son inocuas, sin embargo, pueden causar

graves intoxicaciones alimentarias (OMS, 2018). Valores altos de *E. Coli* están relacionados con las descargas de aguas residuales que son vertidas directamente hacia las fuentes hídricas o llegan a ellas por medio de fisuras en el sistema de alcantarillado.

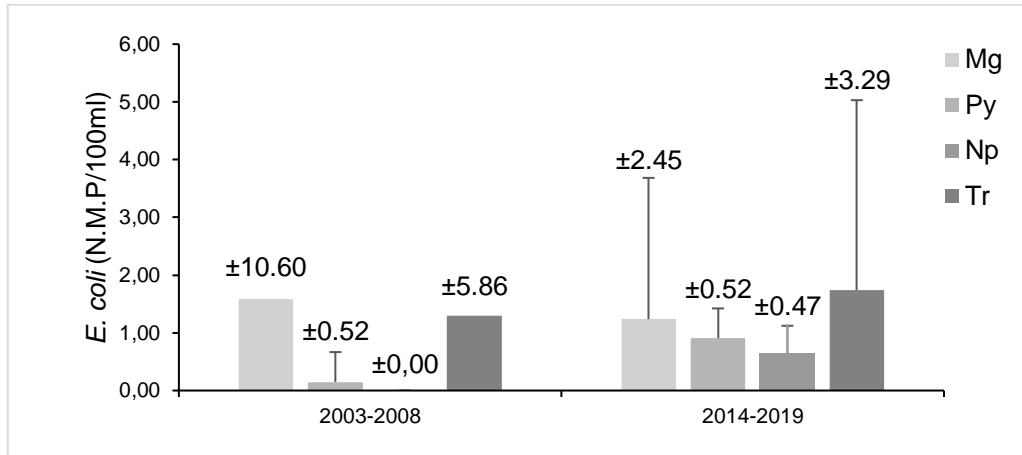


Figura 28. Media de *E. coli* y desviación estándar de las vertientes

4.2.3 Imputación de datos

Se imputó 588 datos (9 %) correspondientes a los 14 parámetros analizados en los 2 periodos, 473 por el método de imputación múltiple y 115 por el método de imputación de la media, representando el 81 y 19 % respectivamente (Figura 29). Benitez-Gilabert y Alvarez-Cobelas (2008) al aplicar técnicas de imputación múltiple en series temporales de datos ambientales a largo plazo, obtuvieron inferencias estadísticas válidas que reflejaron adecuadamente la incertidumbre debida a los valores perdidos, con intervalos de confianza válidos.

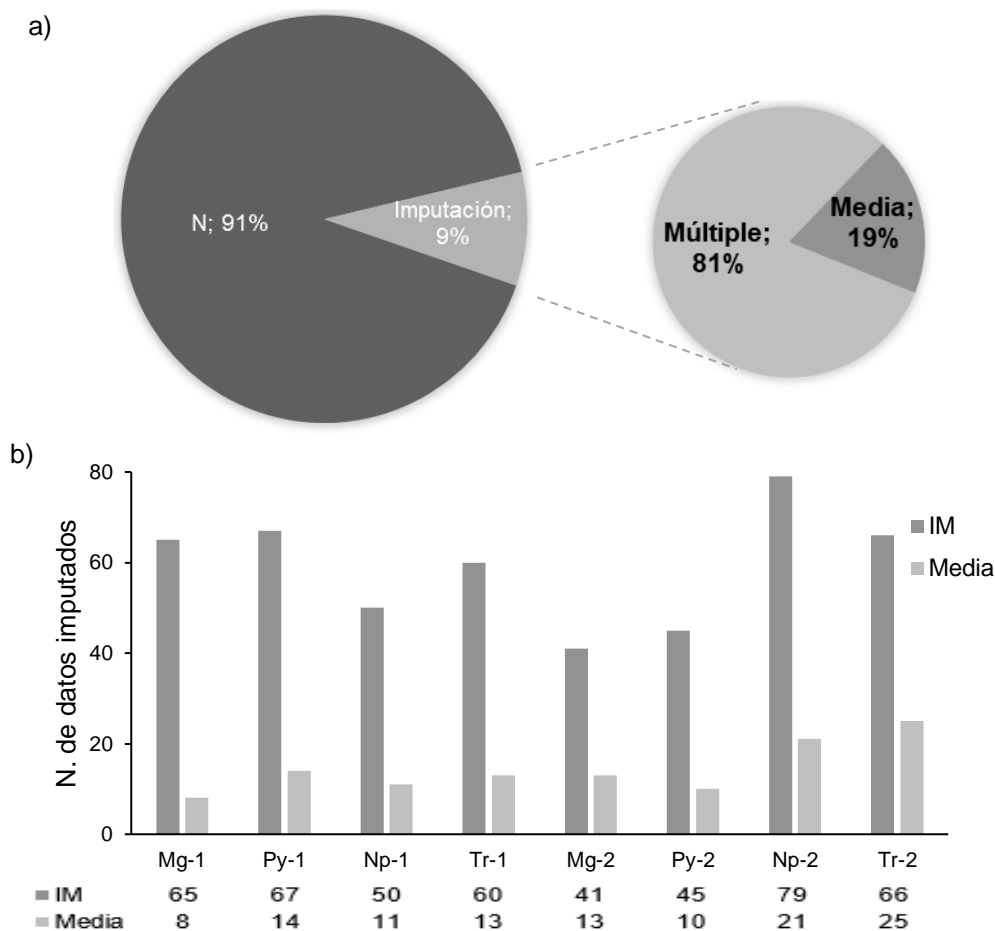


Figura 29. Valores imputados. a) Porcentajes de datos imputados por la técnica de imputación múltiple y la media. b) Valores imputados para cada periodo

4.2.4 Análisis espacio temporal

Con un 95 % de confianza se rechazó la hipótesis nula para la mayoría de los parámetros de los dos periodos a excepción del potencial de hidrógeno, el cual presentó una distribución normal (Anexo 7 y Anexo 8). Bouza (2006) señala que muchos datos de calidad de agua presentan una distribución que no es normal.

Los parámetros presentaron diferencias estadísticamente significativas a nivel espacial con un nivel de significancia de $p < 0.05$ (Tabla 11). Al realizar la diferencia entre pares Turupamba-Magdalena no presentaron diferencias estadísticamente significativas del amonio y *E. coli*, entre Punyaro-Neptuno los parámetros amonio y coliformes totales, y finalmente entre Magdalena-Neptuno con el potencial de hidrógeno.

Tabla 11. Diferencias estadísticamente significativas a nivel espacial

	Prueba de Kruskal- Wallis	U de Mann-Whitney (Diferencia entre pares)					
		Tr-Mg	Tr-Py	Tr-Np	Mg-Py	Mg-Np	Py-Np
Conductividad Eléctrica	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
Potencial de Hidrógeno	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.00	0.000
Sólidos Disueltos Totales	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Amonio	0.000	1.00	0.00	0.00	0.001	0.000	0.753
Coliformes Totales	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
<i>E Coli</i>	0.000	1.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000

Nota: Mg: La Magdalena, Py: Punyaro, Np: Neptuno, Tr: Turupamba.

Valores marcados con negrilla: Rechazo de la hipótesis nula H_0 ($p < 0.05$)

El resultado del análisis multivariado (Análisis de Clúster) a nivel espacial indicó que efectivamente existe una variación espacial entre las vertientes. Formándose dos grupos estadísticamente significativos a una distancia de $(D_{link}/D_{max}) \times 100 < 64$, con un coeficiente cofenético de 0.99. El primer grupo incluyó las vertientes Turupamba y La Magdalena las cuales representan acuíferos fisurados, que se encuentran ubicadas en la zona suburbana del cantón, el uso actual del suelo que las rodea está destinado a tierras agropecuarias y valores similares (elevados) de coliformes totales y *E. coli*, lo cual indica la influencia de las actividades antrópicas en los valores de los parámetros microbiológicos. Además, las medias de potencial de hidrógeno y amonio presentaron un mayor grado de similitud en las dos vertientes.

El segundo grupo está conformado por las vertientes Punyaro y Neptuno, acuíferos detriticos, ubicados en la zona urbana del cantón, inmersas en la urbe y están caracterizadas por valores similares (bajos) de coliformes totales y *E. coli*. Además de que las medias de conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, potencial de hidrógeno, y amonio están estrechamente relacionadas por lo cual presentaron una menor distancia y mayor grado de similitud (Figura 30). A pesar de presentan estas similitudes las vertientes presentaron una variación espacial ya que las medias de los parámetros de las vertientes variaron entre sí.

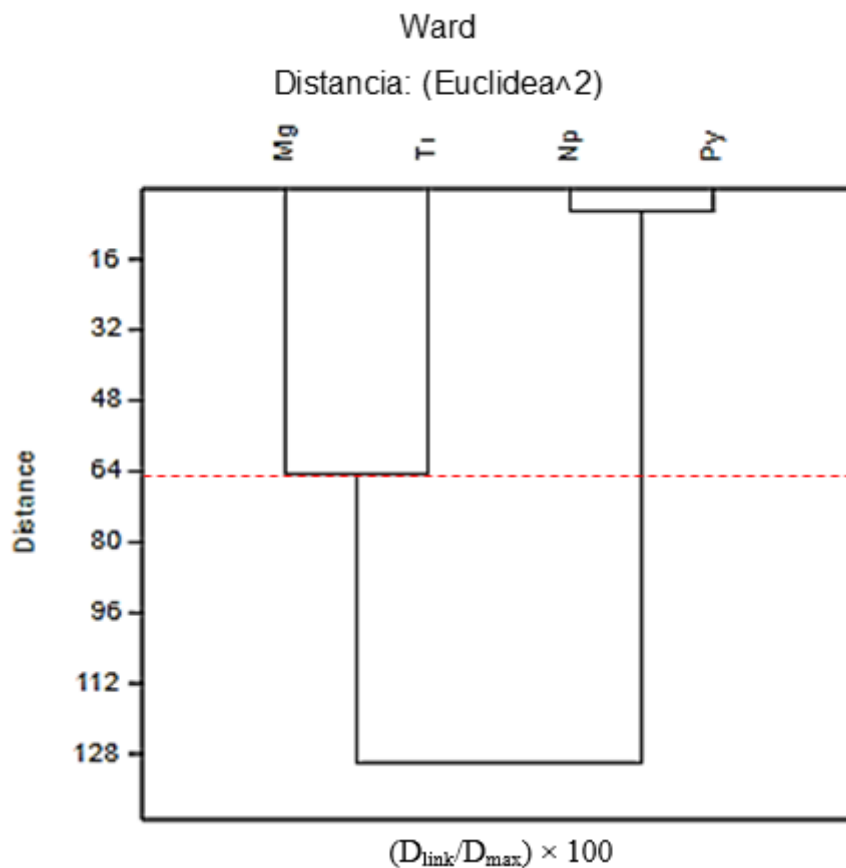


Figura 30. Dendrograma para el análisis espacial que indica la agrupación de las vertientes.

Nota: Se considera (vertiente-parámetros) como parámetros de agrupación (conductividad eléctrica, sólidos disueltos, potencial de hidrógeno, amonio, coliformes totales y *E. coli*)

Aceptando la H_a de la investigación, que indica que existen diferencias de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los acuíferos de la zona urbana del cantón Otavalo a nivel espacial, similar al estudio de “Evaluación espacial y temporal de la calidad del agua de la quebrada Las Delicias–Cerros Orientales de Bogotá”, en el cual el análisis estadístico aplicado, revela que existe variabilidad estadísticamente significativa, en donde la variación está explicada por los parámetros demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y *E. coli* en su mayoría (Guerrero, 2019).

Los parámetros presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Se logró evidenciar que ciertos parámetros no presentaron diferencias entre los periodos ya que las medias de los periodos no mostraron una variación temporal (Tabla 12).

Tabla 12. Diferencias estadísticamente significativas a nivel temporal

Prueba de Kruskal-Wallis				
	La Magdalena	Punyaró	Neptuno	Turupamba
Conductividad Eléctrica	0.352	0.965	0.000	0.000
Potencial de Hidrógeno	0.300	0.007	0.252	0.000
Sólidos Disueltos Totales	0.040	0.000	0.446	0.000
Amonio	0.790	0.236	0.000	0.748
Coliformes Totales	0.158	0.230	0.005	0.047
<i>E Coli</i>	0.065	0.000	1.000	0.001

Nota: Valores marcados con negrilla: Rechazo de la hipótesis nula H_0 ($p < 0.05$)

La conductividad eléctrica presentó una variación temporal moderadamente homogénea para las cuatro vertientes. Únicamente en la regresión polinómica de nivel 3 se obtuvo un coeficiente de determinación que va de alto a muy alto, lo cual implica que los datos tienen un buen ajuste a la curva de regresión para las cuatro vertientes, es decir existe una buena predicción de los valores de la conductividad eléctrica con respecto al tiempo (Figura 31).

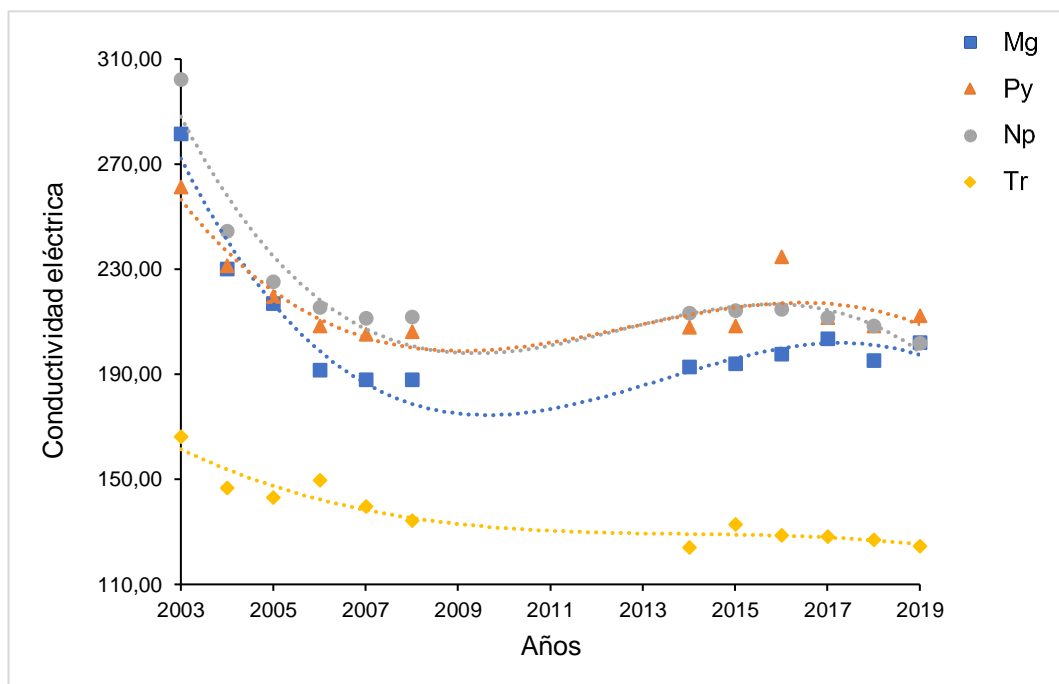


Figura 31. Representación gráfica de conductividad eléctrica con respecto a los años.

Nota: Las figuras fuera de las líneas son los valores atípicos de las vertientes. Los coeficientes de determinación (R^2) son: Mg $\rightarrow 0.95$, Py $\rightarrow 0.82$, Np $\rightarrow 0.92$ y Tr $\rightarrow 0.89$.

Los sólidos disueltos al igual que el anterior parámetro presentaron una variación temporal levemente homogénea. En la regresión polinómica de nivel 3 se logró obtener un coeficiente de determinación muy alto para La Magdalena, alto para Punyaro y Turupamba y moderado para Neptuno mostrando que los datos tienen un buen ajuste a la curva de regresión (Figura 32).

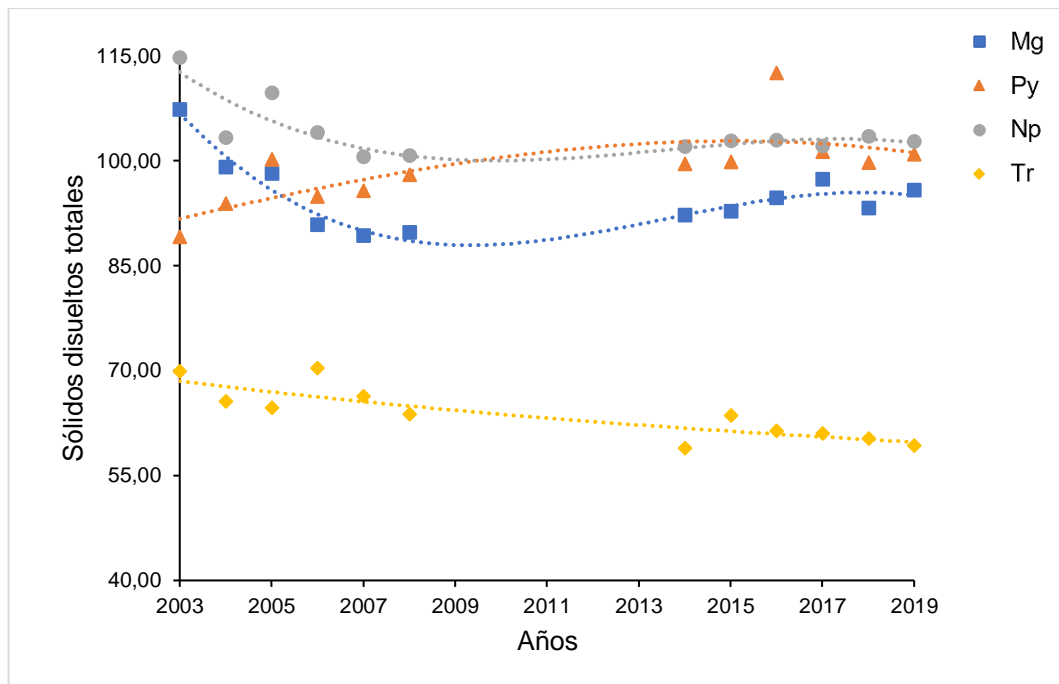


Figura 32. Diagramas de regresión de sólidos totales disueltos vs años.

Nota: Las figuras fuera de las líneas son los valores atípicos de las vertientes. Los coeficientes de determinación (R^2) son: Mg \rightarrow 0.92, Py \rightarrow 0.71, Np \rightarrow 0.53 y Tr \rightarrow 0.73.

El potencial de hidrógeno presentó una variación temporal moderadamente homogénea con una tendencia levemente ascendente, es decir se observó que de un estado alcalino va incrementado su valor a la neutralidad hasta llegar a ácido a largo plazo. En la regresión polinómica (nivel 3) se logró obtener un coeficiente de determinación alto para Punyaro y Turupamba, por lo tanto, los datos presentaron un buen ajuste a la curva de regresión. No obstante Neptuno y La Magdalena mostraron un coeficiente moderado y bajo respectivamente, debido a la gran cantidad de valores atípicos (Figura 33).

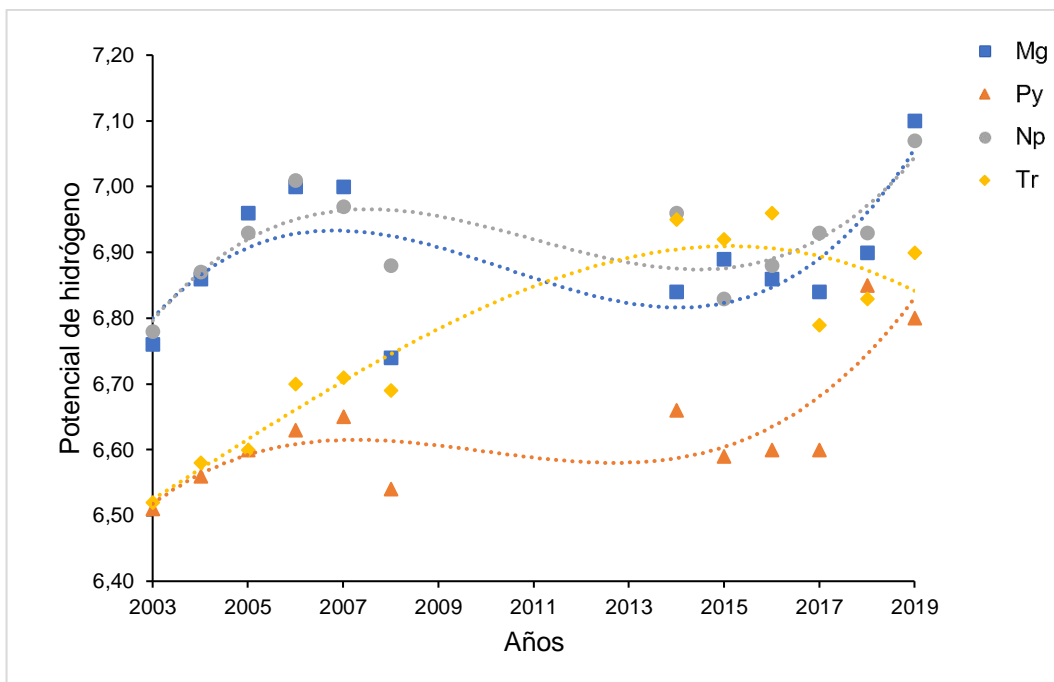


Figura 33. Diagramas de regresión de potencial de hidrógeno vs años.

Nota: Las figuras fuera de las líneas son los valores atípicos de las vertientes. Los coeficientes de determinación (R^2) son: Mg \rightarrow 0.48, Py \rightarrow 0.71, Np \rightarrow 0.66 y Tr \rightarrow 0.90.

El amonio (Figura 34) presentó una variación temporal levemente ascendente, con bajas concentraciones para los últimos años, debido a la poca presencia de materia orgánica degradada en el suelo. Con la regresión polinómica de nivel 2 y 3 se logró obtener un coeficiente de determinación alto para La Magdalena y Punyaro, por lo cual los datos presentaron un buen ajuste a la curva de regresión, mientras que para las otras dos vertientes este valor fue bajo debido a que la mayoría de los años presentaron valores atípicos.

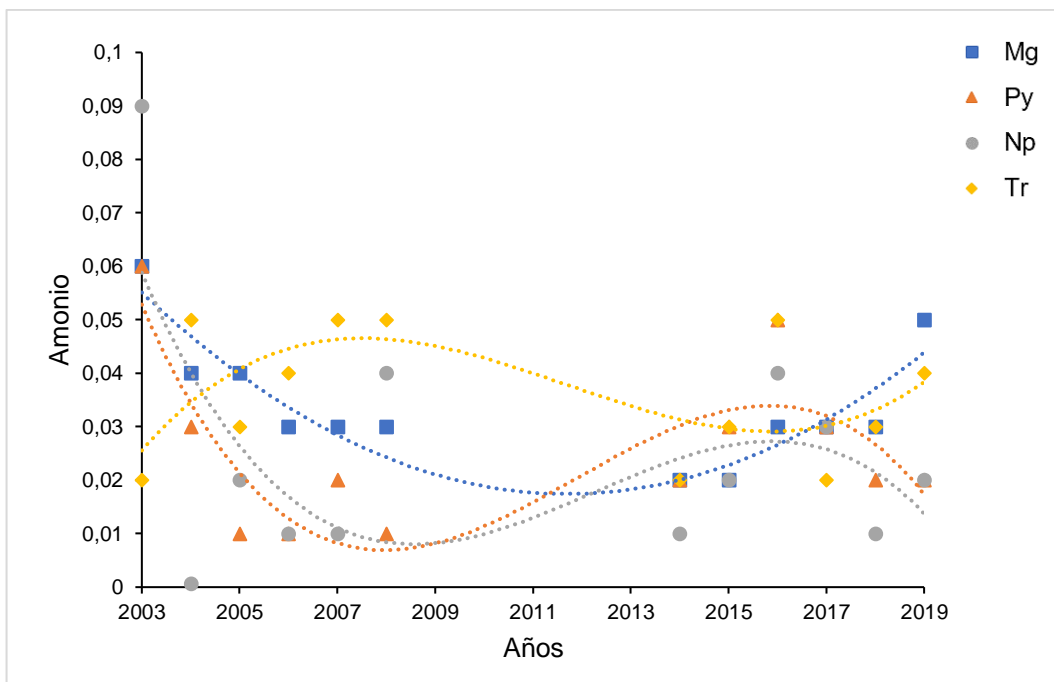


Figura 34. Diagramas de regresión de amonio vs años.

Nota:Las figuras fuera de las líneas son los valores atípicos de las vertientes. Los coeficientes de determinación (R^2) son: Mg \rightarrow 0.85, Py \rightarrow 0.71, Np \rightarrow 0.33 y Tr \rightarrow 0.34.

Los coliformes totales presentaron una variación descendente para las vertientes Punyaro y Neptuno y ascendente para las vertientes La Magdalena y Turupamba (Figura 35). Únicamente en la regresión polinómica de nivel 3 se logró obtener un coeficiente de determinación alto para Punyaro, mientras que las demás vertientes presentaron un coeficiente de determinación bajo.

En los primeros años de muestreo Punyaro y Neptuno presentaron concentraciones altas debido a que el uso y cobertura del suelo que las rodeaba para esos años fue de tierras agropecuarias y zona urbana respectivamente. Concentraciones que fueron disminuyendo hasta el año 2019 debido al uso actual de suelo el cual cambió a zona urbana para Punyaro. En el caso de La Magdalena y Turupamba presentaron en los primeros años vegetación arbustiva y bosque nativo respectivamente. Mostrándose para el año 2019 concentraciones altas, debido al uso actual del suelo, el cual cambió a tierras agropecuarias, las que han influenciado en el incremento de estas concentraciones.

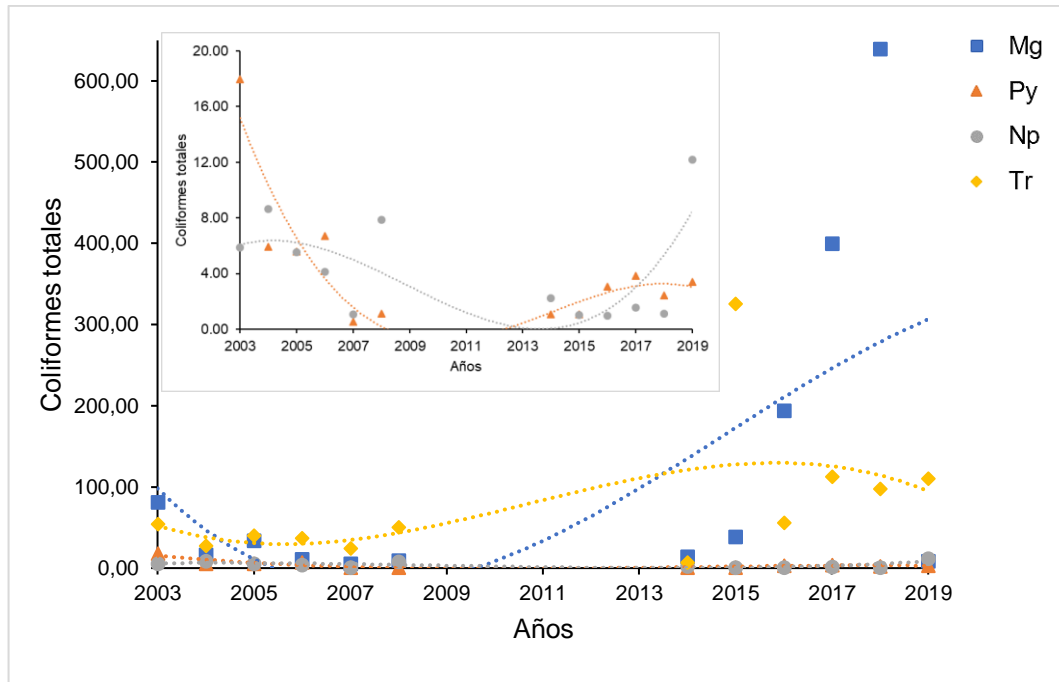


Figura 35. Diagramas de regresión de coliformes totales vs años.

Nota: Las figuras fuera de las líneas son los valores atípicos de las vertientes. Los coeficientes de determinación (R^2) son: Mg \rightarrow 0.37, Py \rightarrow 0.85, Np \rightarrow 0.49 y Tr \rightarrow 0.26.

E. coli (Figura 36) presentó una variación levemente homogénea, siendo Turupamba y Magdalena las vertientes con mayores concentraciones, respecto a las otras dos vertientes. Únicamente en la regresión polinómica de nivel 2 y 3 se logró obtener un coeficiente de determinación moderado para La Magdalena y Punyaro, alto para Neptuno, mientras que Turupamba mostró un coeficiente bajo.

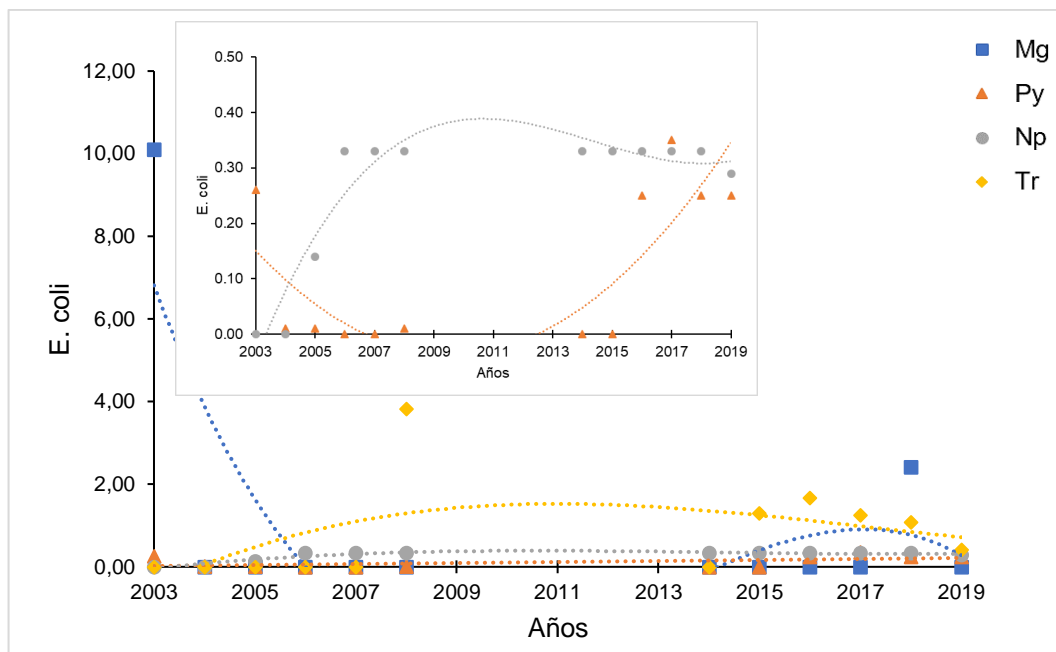


Figura 36. Diagramas de regresión *E. coli*. vs años.

Nota: Las figuras fuera de las líneas son los valores atípicos de las vertientes. Los coeficientes de determinación (R^2) son: Mg \rightarrow 0.61, Py \rightarrow 0.68, Np \rightarrow 0.90 y Tr \rightarrow 0.23.

El resultado del análisis multivariado (Análisis de Clúster) a nivel temporal, indicó que efectivamente existe una variación entre los periodos de las vertientes (Figura 37). Formándose tres grupos estadísticamente significativos a una distancia $(D_{link}/D_{max}) \times 100 < 143$, con un coeficiente cofenético de 0.81. El primer grupo estuvo conformado únicamente por la vertiente La Magdalena del segundo periodo el cual presentó las medias más elevadas para los coliformes totales, parámetro que marca su disimilitud de los otros grupos. En el caso del segundo grupo, conformado por la vertiente Turupamba del primer y segundo periodo, influenciado por la similitud de las medias de la conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y *E. coli*, a pesar de esta similitud entre los periodos de esta vertiente si existe una variación ya que su distancia euclideana es amplia en comparación a los otros grupos.

En cuanto al tercer grupo lo conformaron La Magdalena del primer periodo, Neptuno y Punyaro en sus dos periodos. Debido a la estrecha similitud de las medias de conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, sólidos disueltos totales y amonio. A pesar de estar conformando un grupo se puede evidenciar claramente 3 subgrupos, en el que la Magdalena del primer periodo presentaron las medias más

elevadas de coliformes totales y *E. coli*. Neptuno del primer periodo presentó la media más elevada de conductividad eléctrica. En cuanto a Punyaro primero y segundo periodo y Neptuno del segundo periodo se pudo visualizar una estrecha relación de la conductividad eléctrica, además de valores bajos de coliformes totales y *E. coli*.

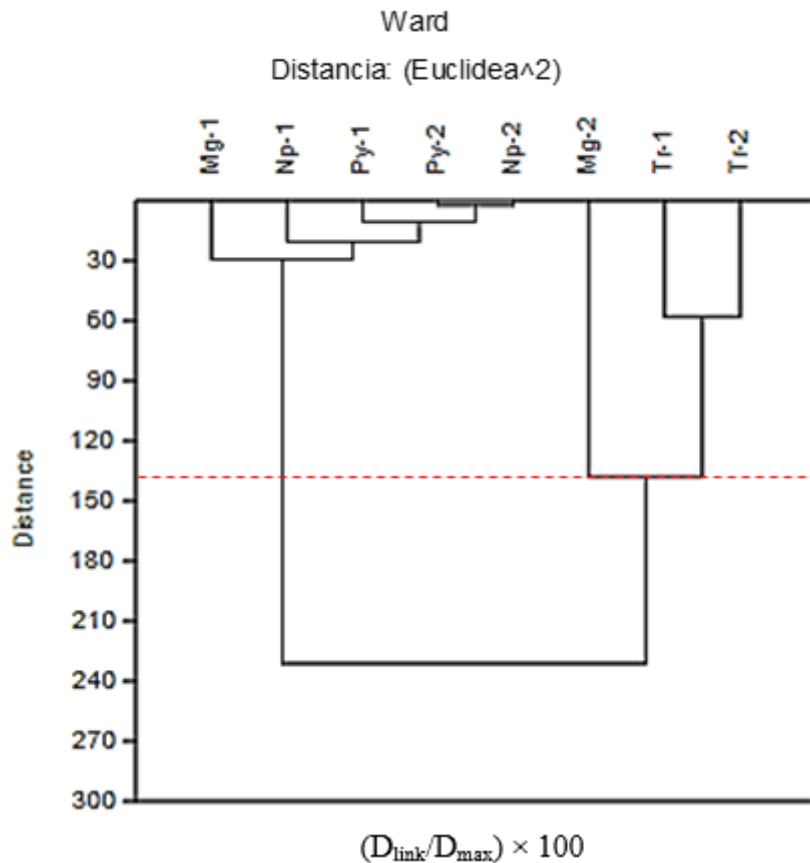


Figura 37. Dendrograma para el análisis temporal que indica la agrupación de los periodos de las vertientes.

Nota: Se considera como (Vertiente-periodo/parámetros) parámetros de agrupación (conductividad eléctrica, sólidos disueltos, potencial de hidrógeno, amonio, coliformes totales y *E. coli*)

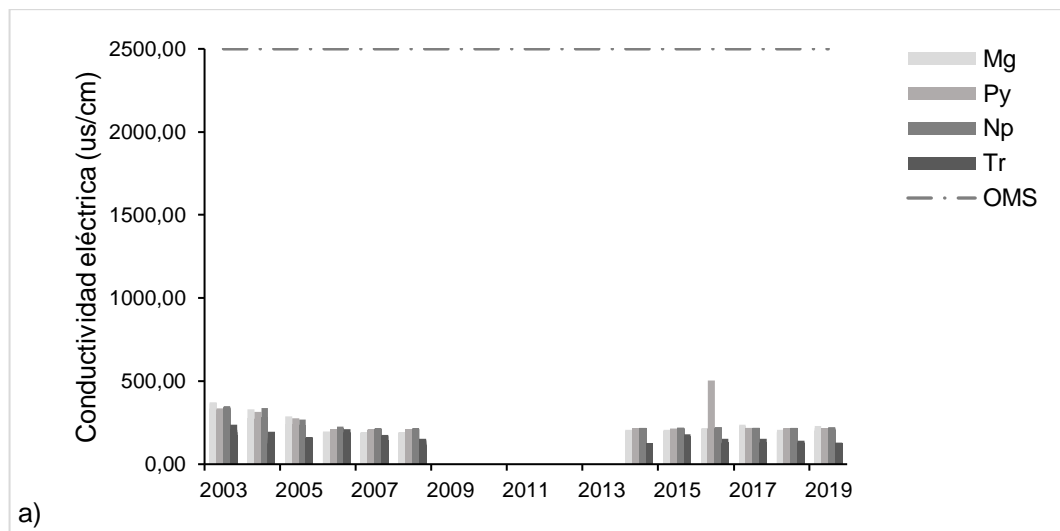
Los parámetros antes mencionados presentaron diferencias estadísticamente significativas a nivel temporal, las cuales fueron leves, a excepción de los coliformes totales, que presentaron diferencias elevadas. Aceptando la H_a de la investigación, es decir existen diferencias de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los acuíferos de la zona urbana del cantón Otavalo a nivel temporal. La variación baja de estos parámetros puede deberse a que provienen de agua subterránea en la que las actividades antrópicas aun no ocasionan afectaciones

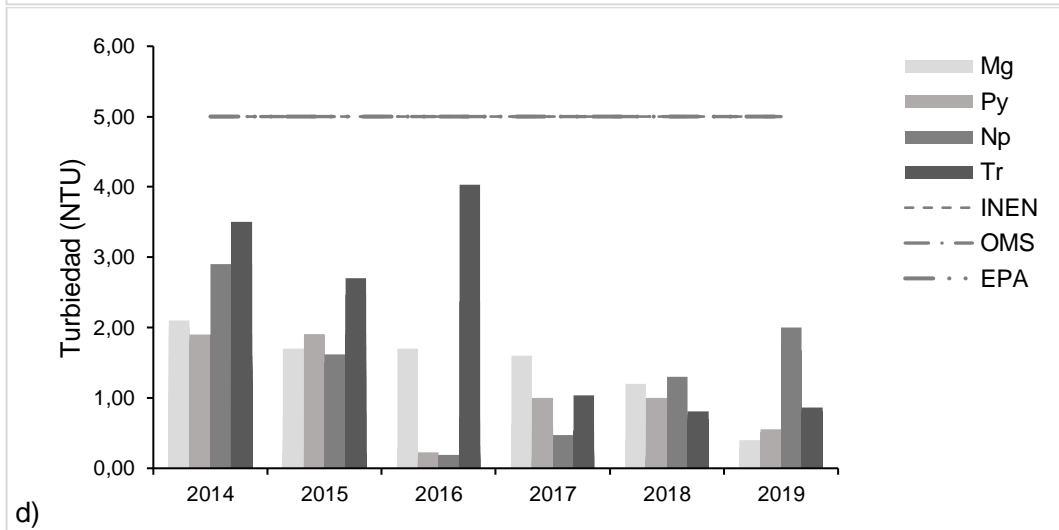
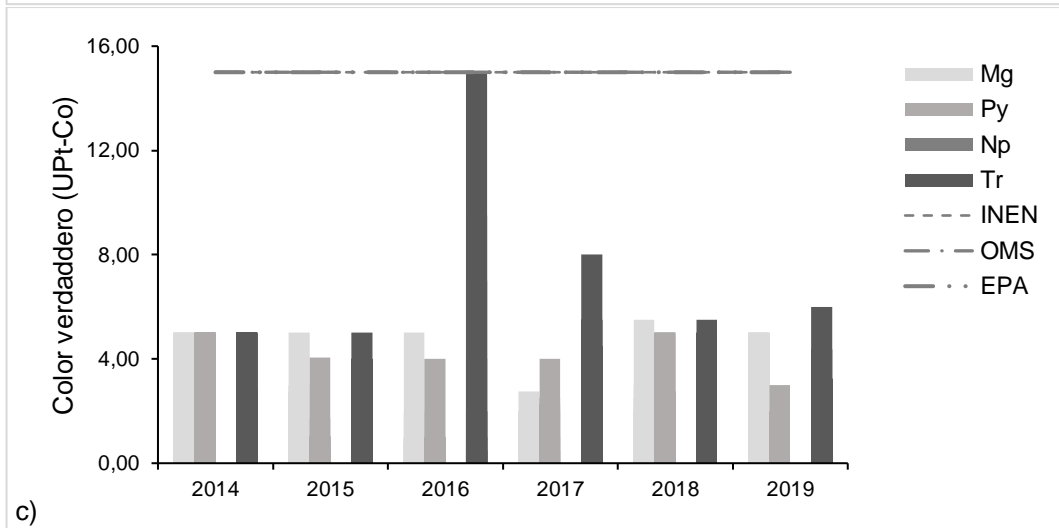
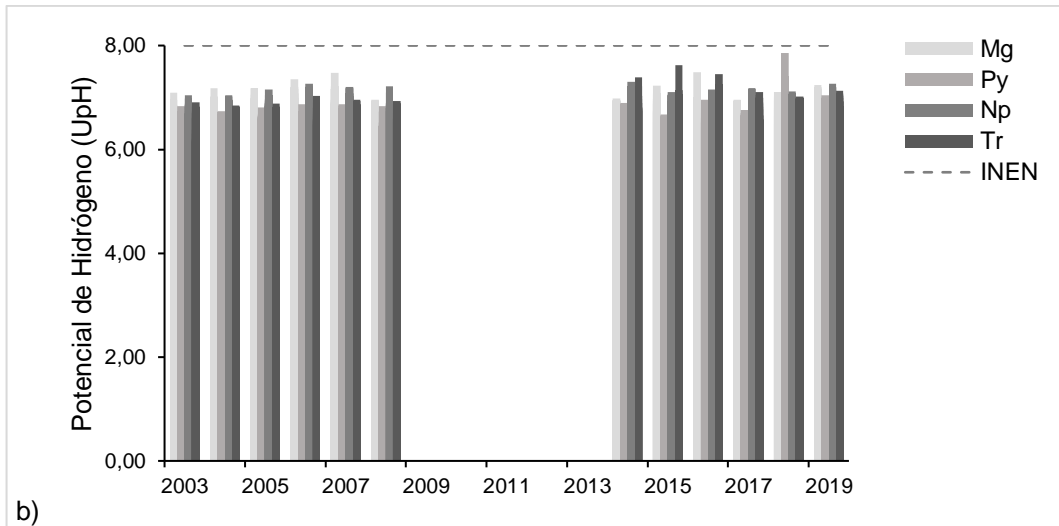
al recurso, similar a lo encontrado en el estudio de Konan et al. (2020) en donde la prueba de Kruskal-Wallis y el ANOVA para agua de pozo muestran variaciones estacionales significativas moderadas en los valores de los parámetros Turbidez, PO_4^{3-} , NH_4^{+} , NO_3^{-} , K^{+} y Cl^{-} , variaciones que pueden estar relacionadas con aguas profundas, recarga por infiltración de agua de lluvia rica en materia orgánica de origen superficial o por hidrólisis de minerales en el acuífero (K^{+} , Cl^{-}).

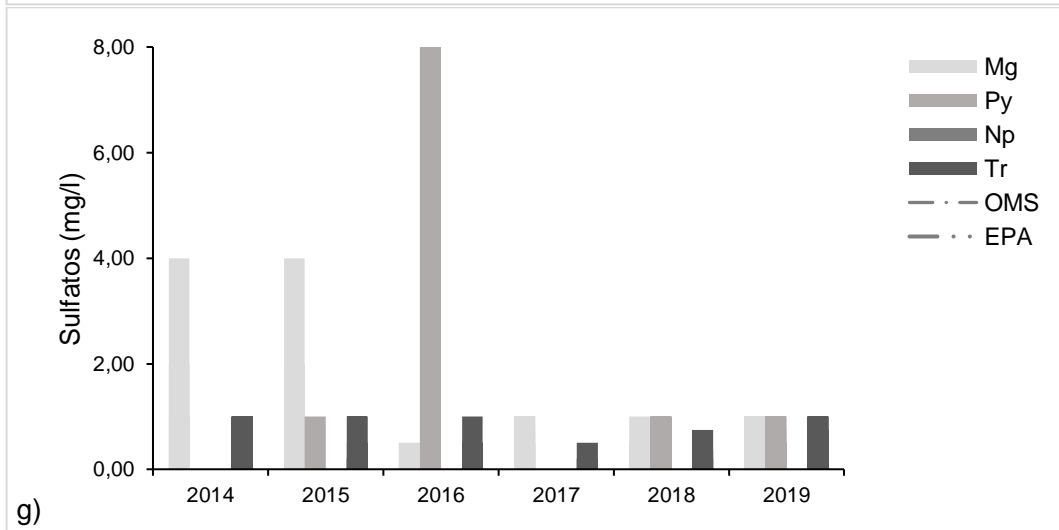
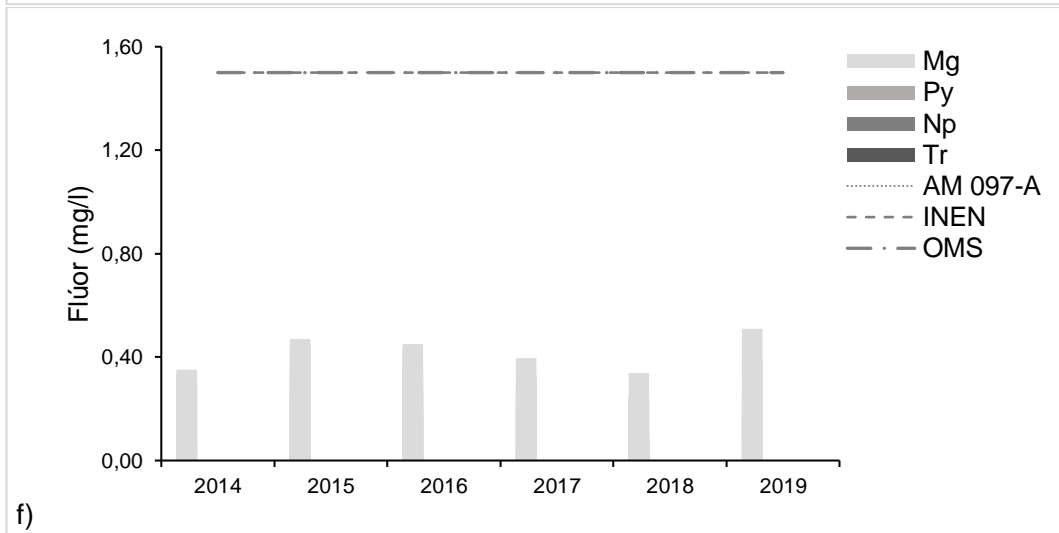
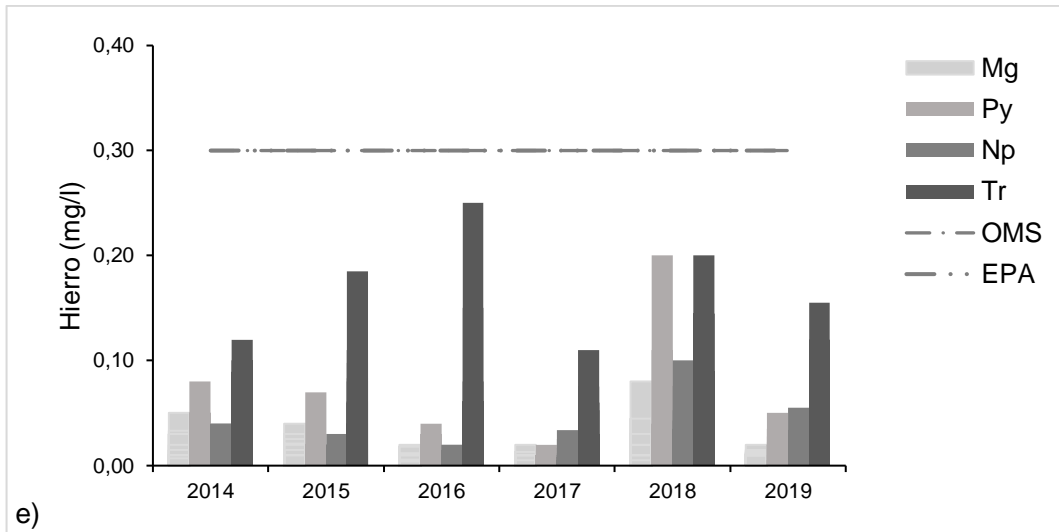
4.3 Comparación de calidad de agua y estrategias de protección y conservación de los acuíferos

4.3.1 Calidad de agua

Los parámetros conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno (valor máximo), color verdadero, turbiedad, hierro, flúor, sulfatos y dureza total de agua cruda de las vertientes La Magdalena, Punyaro, Neptuno y Turupamba se encontraron en el rango de aceptabilidad de calidad ambiental según los límites máximos permisibles (LMP) de las normativas AM 097A, INEN-1 108:2020, EPA:2018 y OMS:2018 (Figura 38).







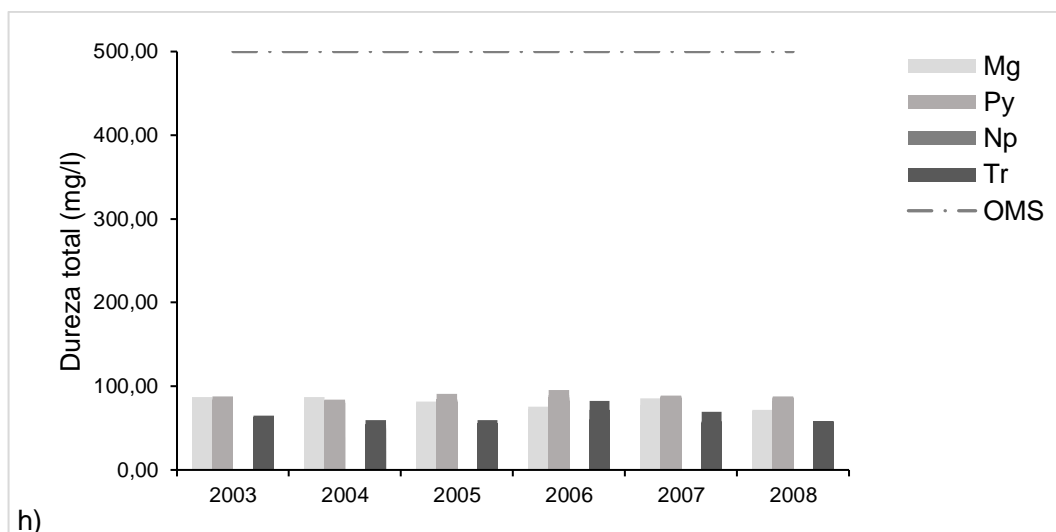


Figura 38. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a la normativa nacional e internacional.

Nota:LMP a) conductividad eléctrica, según la OMS-2018: 2500 us/cm; b) potencial de hidrógeno, AM. 097-A: 9.0, INEN:8.0, EPA: 8.5, OMS:9.5 UpH; c) color verdadero, AM. 097-A: 75, de 15 U (Pt-Co) según INEN, EPA y OMS; d) turbiedad ,AM 097-A 100NTU, de 5 NTU según INEN, EPA y OMS; e) hierro, AM 097A 1 mg/l y de 0.3 mg/l según EPA y OMS; f) flúor, LMP de 1.5 mg/l según AM 097-A, INEN y OMS; g) sulfatos, 500 mg/l según AM 097-A y de 250 según EPA y OMS y h) dureza total, 500 mg/l según OMS. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

Se evidenció que ciertos parámetros no cumplen con las normativas anteriormente descritas, lo que puede deberse a efectos naturales y/o antrópicos.

El potencial de hidrógeno presentó valores inferiores a los límites mínimos permisibles 0.69, 21.53, 11.81 % de los muestreos para las vertientes La Magdalena, Punyaro y Turupamba respectivamente (Figura 39). Sandoval y Sisa (2020) indican que valores bajos de este parámetro causa problemas de corrosividad y manchas en las tuberías, además, disminuye la eficacia de los desinfectantes de cloro. Por lo cual es esencial que estos valores se encuentren dentro de los límites permisibles para mantener la integridad de las tuberías y prolongar la vida útil de la red de distribución de agua.

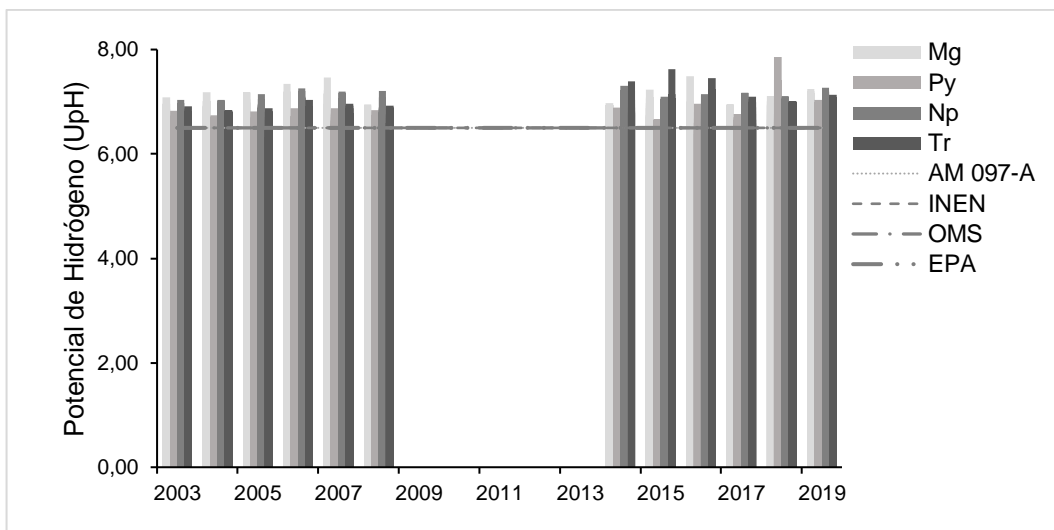


Figura 39. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a la normativa nacional e internacional del potencial de hidrógeno.

Nota: LMP de 6.5 UpH según las normativas AM.097-A, INEN, EPA y OMS. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

Los sólidos totales no aplican en la normativa nacional pero en cuanto a la normativa internacional se puede evidenciar que el 17.36, 45.83 y 87.50 % de las muestras, de La Magdalena, Punyaro y Neptuno respectivamente, se encontraron fuera de los límites máximos permisibles para la OMS, pero en cuanto a la EPA si cumplieron con el LMP (Figura 10).

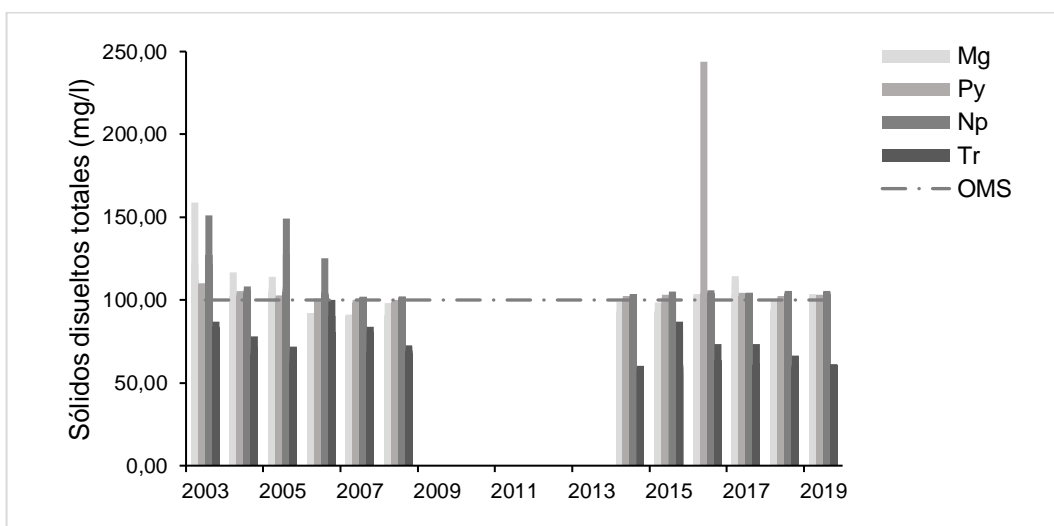


Figura 40. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a la normativa nacional e internacional de sólidos disueltos totales.

Nota: LMP según las normativas EPA: 500 mg/l, OMS: 100 mg/l. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

Los nitratos estuvieron dentro de los límites máximos permisibles para la normativa nacional, pero en cuanto a la EPA el 2.08 % de las muestras de Turupamba sobrepasó el límite máximo permisible (Figura 41). Los muestreos que excedieron los LMP no son elevados, apenas dos muestreos para este caso lo cual no es muy representativo, estos valores que exceden los LMP pueden deberse a muchos factores como puede ser una inadecuada toma en la muestra o digitación del dato, provocando este valor atípico.

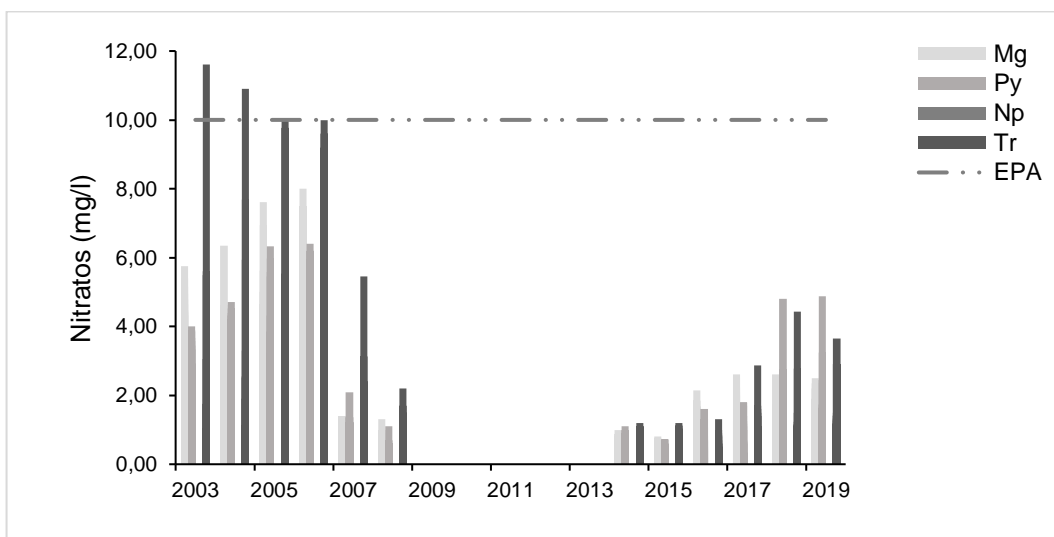


Figura 41. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de nitratos.

Nota: LMP de 50 mg/l según las normativas AM. 097A, INEN y OMS; Según la EPA: 10 mg/l. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

Para los nitritos en base al AM 097-A el 0.69, 2.78 y 0.69 % de las muestras de agua cruda sobrepasaron los límites máximos permisibles para Punyaro, Neptuno y Turupamba respectivamente (Figura 42). Se puede observar que el número de muestreos que excedió el LMP no es elevado (1 a 4 muestreos) al igual que en el caso de los nitratos. A pesar de esto en el supuesto de que no se diera por las condiciones antes dichas es necesario mencionar que valores que superen el LMP se debe a una posible fuente de contaminación por el uso excesivo de fertilizantes de las zonas aledañas a las vertientes, además del incremento de la zona urbana, ya sea por contaminación difusa y puntual (Bolaños et al., 2017).

En cuanto a la normativa INEN 1 108 se recomienda que este parámetro no debe exceder los 3 mg/l lo cual indica que el agua si es apta para el consumo, al igual que para la EPA y OMS.

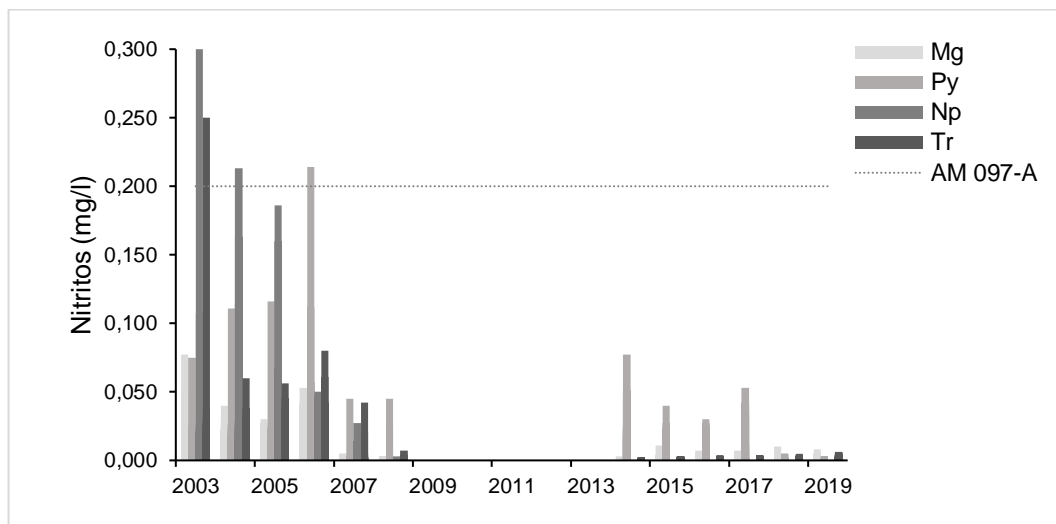


Figura 42. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de nitritos.

Nota: LMP de 3 mg/l según las normativas INEN y OMS. Según la EPA: 1 mg/l y AM. 097A: 0.2 mg/l. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

En el estudio de Sandoval y Sisa (2020) se obtuvo resultados de nitratos y nitritos bajos, lo cual indica que el agua tiene baja cantidad de materia orgánica disuelta, además, de que las actividades pecuarias y agrícolas del sector no infringen en el aumento de la concentración de estos parámetros, dado que en las zonas rurales estas actividades son las responsables de aumentar los niveles de nitrógeno orgánico en el agua. Schmidt et al. (2017) en su investigación indican que las bajas concentraciones de nitratos y nitritos en el agua evitan la generación de problemas en la salud humana, demostrando que el agua de la comunidad de Aglla, al carecer de estos parámetros puede ser consumida normalmente sin que exista el riesgo a la salud de sus habitantes.

En el caso del amonio no aplica valor de LMP para la normativa nacional, pero en cuanto a la OMS el 0.69 % de las muestras excedió el LMP para la vertiente Neptuno (Figura 43). Ese porcentaje de valores perdidos no es muy representativo

para definir la existencia de una contaminación por dicho parámetro, a la vez que puede ser considerado como un valor atípico.

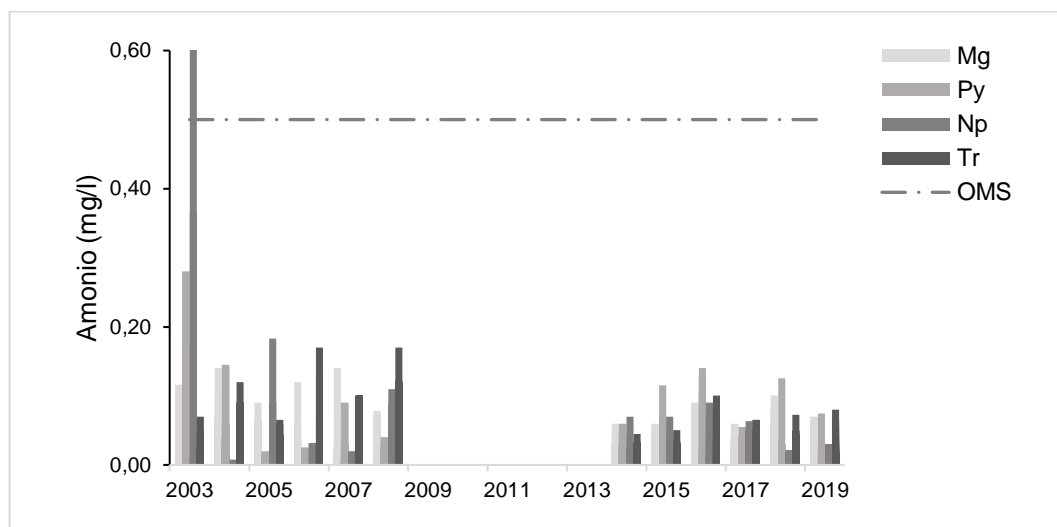


Figura 43. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de amonio.

Nota: LMP de 0.5 mg/l según la normativa OMS. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

Los coliformes totales fue el parámetro que presentó mayor número de muestreos, excediendo el límite máximo permisible en las tres normativas para agua potable, en 97.22, 37.50, 48.61 y 95.14 % para La Magdalena, Neptuno, Punyaro y Turupamba respectivamente (Figura 44), siendo Turupamba y La Magdalena las vertientes que presentaron las concentraciones más elevadas, las que alcanzaron los 2 500 MNP/100ml respectivamente. Cabe indicar que el muestreo del parámetro fue de agua cruda y según el AM 097-A este parámetro es admimisible. La OMS (2018) indica que los coliformes totales están presentes tanto en aguas residuales como en aguas naturales. En la investigación de Ramos (2016) se reportó la presencia de coliformes en las muestras del agua entre 2 100 a 4 600 NMP/100ml, producto de la materia fecal de ganado en la parte superior de las vertientes, el cual en época de lluvia se infiltra hacia las vertientes pudiendo provocar así estas concentraciones.

Misi, et al. (2018) también reflejó en su estudio niveles elevados de recuentos de coliformes fecales, desprendiéndose de los resultados que las actividades antropogénicas están contaminando los recursos hídricos subterráneos. Lo que

indica la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación patógena. Por lo tanto, las letrinas de pozo en los suburbios de alta densidad sin servicio, los efluentes de alcantarillado de los sistemas colapsados en los suburbios de alta densidad son las fuentes de contaminación fecal. Los lixiviados de los vertederos y los efluentes industriales también están contaminando las aguas subterráneas.

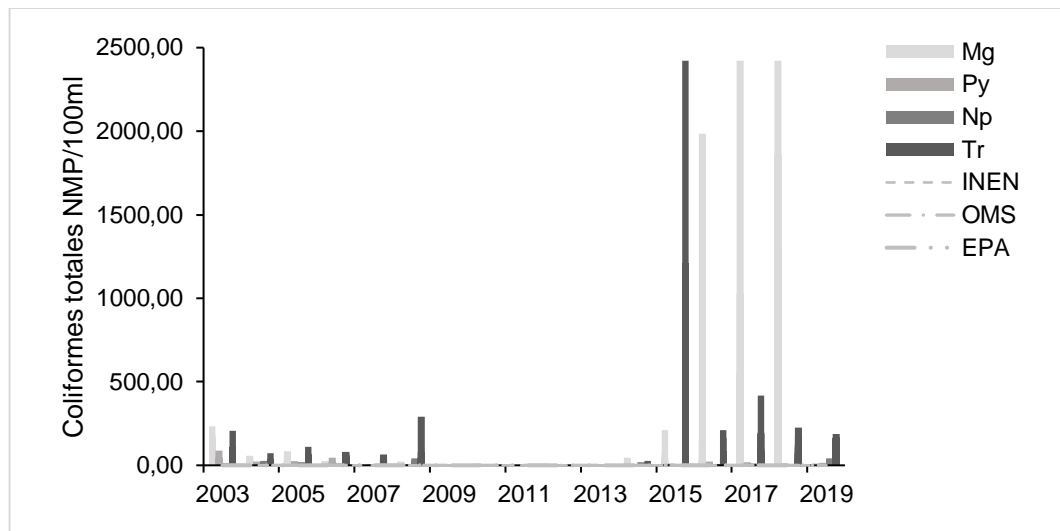


Figura 44. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de coliformes totales.

Nota: LMP de 0 NMP/100ml según las normativas INEN, EPA y OMS. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

Para el caso de *E. coli* el 5.56, 2.78 y 13.89 % son los porcentajes de los muestreos que excedieron los límites máximos permisibles en las vertientes La Magdalena, Punyaro y Turupamba respectivamente (Figura 45), exceden los límites permisibles con respecto a las normativas para agua potable, en mayores concentraciones Turupamba y La Magdalena, pero no con valores tan elevados como en el caso del agua cruda de la que se abastecen algunas plantas de tratamiento de agua potable de EMAPS (2017) y EPMAPS (2017) en los cuales se reportó la presencia de 140 345 NMP/100ml y 134 045 NMP/100ml coliformes fecales para las aguas crudas previo a su ingreso a las plantas de tratamiento de agua potable de Guayllabamba y Yaruquí.

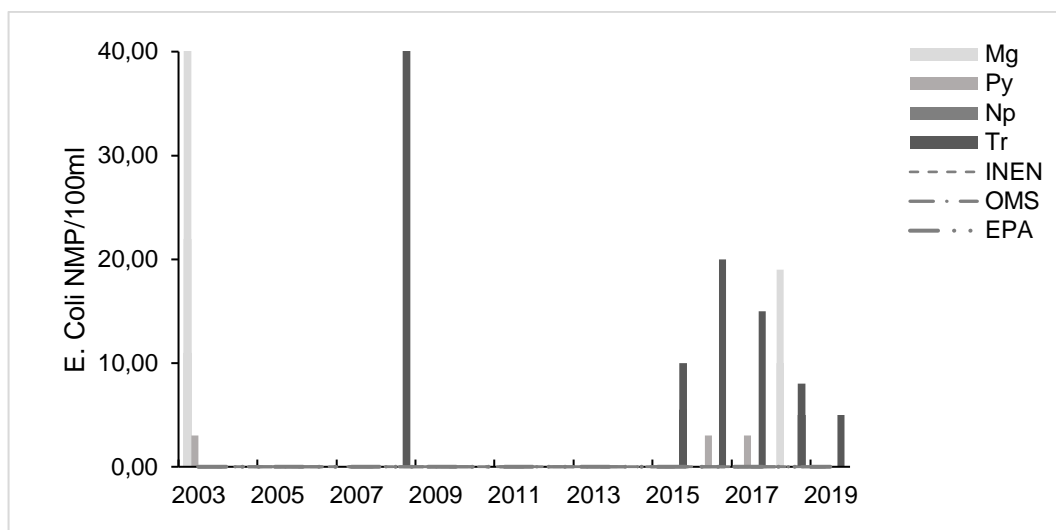


Figura 45. Comparación de la calidad de agua de las vertientes con respecto a normativa nacional e internacional de *E. coli*.

Nota: LMP de 0 NMP/100ml según las normativas INEN, EPA y OMS. La línea de tendencia de las normativas que se indica en la figura es aquella más cercana a los valores de los muestreos de los parámetros.

La norma INEN 1 108:2020 en ciertos parámetros no cuenta con directrices establecidas por la OMS o EPA. Izurieta et al. (2017) menciona que esto puede deberse a distintas consideraciones y políticas excesivamente restrictivas que ponen en peligro la salud pública al no permitir su aplicación efectiva por razones económicas, poniendo en riesgo la seguridad de los consumidores. Es importante mencionar que la OMS tiene como labor ayudar a los países en vías de desarrollo a preparar sus propias normas y reglamentos nacionales considerando sus condiciones ambientales, sociales, económicos y culturales específicas.

4.3.2 Propuesta de estrategias de protección y conservación

Se identificaron siete de las actividades antrópicas susceptibles de contaminar las aguas subterráneas. Considerando la agricultura, ganadería, deforestación y escorrentía proveniente de quebradas en la vertiente La Magdalena, los asentamientos poblacionales y actividades económicas en la vertiente Neptuno. Los asentamientos poblacionales y el vertido de aguas residuales (servidas e industriales) de las quebradas Cuzcungo y Mojanda en la vertiente Punyaro y la agricultura, ganadería y asentamientos poblacionales que no cuentan con sistema de alcantarillado en la vertiente Turupamba suponen un riesgo potencial de

contaminación, ya que estas actividades se realizan a pocos metros de las vertientes (Figura 46).



Figura 46. Actividades antrópicas susceptibles de contaminar las vertientes: a) La Magdalena, b) Punyaro, c) Neptuno y d) Turupamba

Auge (2006) menciona que la actividad agropecuaria genera residuos altamente tóxicos para el ambiente y el ser humano, debido al uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes nitrogenados, además de los vertidos de residuos animales o purines sobre el suelo los que permanecen por mucho tiempo después de su infiltración. Asimismo, los procesos de urbanización son la causa principal de la impermeabilización del suelo, lo que reduce la infiltración de la lluvia y a su vez la evaporación, generando mayor escorrentía y menor caudal en acuífero (Herraiz, 2009). Además, el IGME (2012) señala que las actividades domésticas generan aguas residuales, las cuales producen lixiviados y constituyen la mayor amenaza para la calidad del agua subterránea.

Parra (2007) menciona que la agricultura y ganadería se relacionan con la contaminación por nitratos de agua subterránea ya que es producida por el uso masivo de fertilizantes nitrogenados y por la mala gestión de purines en la actividad ganadera. Además, Álvarez et al. (2011) al evaluar la contaminación de acuíferos producida por actividades de saneamiento y reúso de efluentes constataron que

existe contaminación por nitratos en los acuíferos semiconfinados-confinados en la zona sur del área de estudio, mencionan que la contaminación por nitratos es un problema relevante que afecta la calidad de las aguas subterráneas y supone un riesgo potencial para la salud por lo que plantean la necesidad de establecer rigurosas pautas de gestión para garantizar la protección de los acuíferos.

En las plantas potabilizadoras los coliformes totales, *E. coli* y turbiedad son parámetros que requieren tratamiento para evitar la alteración de la calidad de agua. Las plantas potabilizadoras de las vertientes La Magdalena, Neptuno y Punyaro se encuentran ubicadas dentro de la infraestructura que delimita a cada vertiente, cuentan con un proceso de filtración por medio de rocas y la desinfección de aguas se realiza mediante el empleo de cloro. San Francisco representa la planta potabilizadora de la vertiente Turupamba, cuenta con una planta compacta con filtros, además es la única planta potabilizadora que usa polímeros (policloruro de aluminio) para reducir la turbiedad, posteriormente el agua es clorada y en todos los casos llevada a distintos tanques almacenamiento para su posterior distribución (Tabla 13).

Tabla 13. Tanques de almacenamiento y distribución de agua potable en la zona urbana del cantón Otavalo

Vertientes	Planta potabilizadora	Coordenadas x_y	Caudal (l/s) potabilizado	Tanques de almacenamiento	Distribución zona urbana
La Magdalena	La Magdalena	804956 10023628	38.17	Buenos Aires	Centro – Norte
Neptuno	Neptuno	805053 10024999	14.42	Rey Loma	Noreste
Punyaro	Punyaro	803963 10024460	81.85	Buenos Aires	Centro
			39.03	San Juan	Noroeste
Turupamba	San Francisco	802048 10024272	10.25	San Francisco	Sur

Berdonces (2008) y Quirós (2004) mencionan que el cloro es el agente de desinfección más empleado, debido a su fácil disponibilidad en forma gaseosa, líquida o sólida, es capaz de destruir la mayoría de microorganismos patógenos presentes en el agua en condiciones ambientales, además actúa rápidamente, es de fácil manejo y aplicación, de bajo costo y la dosificación no constituye riesgo ni en humano ni en animales.

Se identificó a dos actores sociales y seis organizaciones competentes dentro del manejo de los recursos naturales del cantón (Tabla 14). Quienes son un elemento esencial en la planificación de las estrategias. Se identifico los patrones y contextos de interacción entre las partes interesadas, por un lado, están los dirigentes de los pobladores que viven en las cercanías de las vertientes y por otro el sector público encargado de realizar y ejecutar las políticas públicas que logran efectuar las estrategias.

Tabla 14. Actores involucrados

Actores internos	Actores externos
	– GAD municipal de Otavalo
	– Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Otavalo (EMAPAO- EP)
– Barrio La Magdalena	
– Barrio Punyaro	– Ministerio del Ambiente y Agua (MAE).
– Barrio La Florida	– Agencia de control y regulación del agua (ARCA)
– Comunidad Turupamba	– Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
	– Ministerio de Salud Pública (MSP).

Se propuso cuatro estrategias para la conservación y protección de los acuíferos con base en la gestión de los recursos hídricos, los perímetros de protección de las cuatro vertientes, la agroecología como herramienta para la conservación de las zonas cercanas a las captaciones de agua y la educación ambiental.

4.3.2.1 Estrategia 1. Gestión de los recursos hídricos

La falta de información coherente y sistemática afecta la forma en la que los ciudadanos y las partes interesadas perciben al agua subterránea, lo cual limita la comprensión de su importancia y en varios casos genera políticas fragmentadas además de la ausencia de estrategias de manejo a largo plazo (Cossío, 2019). Por lo cual es indispensable que los esfuerzos educativos, de difusión y de toma de decisiones se lleven a cabo por parte de actores sociales internos y externos para una mayor sensibilización del tema.

Montaño et al. (1998) mencionan la importancia que adquiere el conocimiento de los acuíferos para la gestión del territorio y para mantener las condiciones de vida

de sus habitantes. Por lo cual, con el fin de consolidar la gestión de las fuentes hídricas que abastecen de agua a la zona urbana del cantón Otavalo. Se propone implementar en la gestión de EMAPAO-EP la Gestión del Recurso Hídrico (GRH) orientada a la creación de políticas públicas con un enfoque ecosistémico de prácticas sustentables que integren el desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas que rodean a las vertientes (Tabla 15).

Esta estrategia tiene como responsables principales a él GAD- Otavalo, EMAPAO-EP y el MAE y está dirigida a la ciudadanía Otavaleña, con el fin de lograr una gestión íntegra de este recurso con la formulación e implementación de políticas públicas para la gestión de los recursos hídricos, con lo cual se pretende evitar la alteración de las aguas subterráneas, así como garantizar el uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales relacionados con los acuíferos, la distribución equilibrada de este recurso a la ciudad de Otavalo y la gestión a nivel de cuenca hidrográfica.

Objetivo general

Incorporar la gestión de los recursos hídricos en la gestión ambiental de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Otavalo (EMAPA-O), focalizando las acciones necesarias a nivel de cuenca hidrográfica.

Objetivos específicos

- Formular un reglamento que regule el uso y aprovechamiento del suelo que colinda con las vertientes para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas.
- Promover por medio de políticas públicas la gestión y el aprovechamiento coordinado de las vertientes y los recursos naturales relacionados.
- Difundir las acciones de gestión de los recursos hídricos por medio de un Sistema de Información.

Tabla 15. Gestión de los recursos hídricos

Proyecto	Actividades	Presupuesto	Responsables
Proyecto de gestión integrada de las fuentes de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="562 400 1346 475">– Crear el grupo formulador del reglamento que involucre a todos los actores en la gestión. <li data-bbox="562 491 1346 619">– Analizar los problemas futuros y las soluciones, estableciendo los objetivos, la población potencial y la factibilidad legal, política, ambiental y administrativa. <li data-bbox="562 635 1346 762">– Realizar un estudio minucioso de las características físicas, químicas y microbiológicas de los acuíferos para la adecuada la toma de decisiones que beneficie a todos los grupos interesados. <li data-bbox="562 778 1346 1241">– Escribir el plan de acción de la política pública que regule el uso y aprovechamiento del suelo, que colinda con las vertientes y la gestión de los recursos naturales relacionados, que debe incluir los siguientes aspectos: <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="600 962 1346 1042">• Políticas que regulen fuentes no puntuales de contaminación (como fertilizantes y pesticidas). <li data-bbox="600 1058 1346 1090">• Políticas de monitoreo e investigación de la calidad de agua. <li data-bbox="600 1106 1346 1137">• Políticas de zonificación y gestión integrada de cuencas. <li data-bbox="600 1153 1346 1233">• Políticas con principios preventivos en la gestión de la calidad de agua. <li data-bbox="562 1257 1346 1337">– Colaborar con organizaciones e investigadores que fomenten el uso de la evidencia en la mejora de las políticas. 	\$ 45 000	GAD municipal de Otavalo Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Otavalo (EMAPAO-EP) Ministerio del Ambiente y Agua (MAE). Agencia de control y regulación del agua (ARCA)

-
- Asignar recursos para promover investigaciones que incorporen la necesidad de la implementación de políticas públicas.
-
- Implementar espacios donde se impulse la necesidad de las políticas públicas dirigidas a la gestión de los recursos hídricos.
 - Crear espacios informáticos de fácil acceso.
 - Socializar con los actores internos para el cumplimiento de las políticas de gestión utilizando un lenguaje entendible y accesible para el público en general con el fin de promover mayor confianza en las instituciones responsables.
-

4.3.2.2 Estrategia 2. Perímetros de protección de las vertientes

Según Cossío (2019) en la actualidad la base tecnológica y científica para el manejo de aguas subterráneas ha mejorado, generando avances en la comprensión generalizada de los acuíferos, lo cual facilita la identificación y el desarrollo de estrategias sostenibles de explotación. Por medio de las cuales es posible determinar la geometría y extensión de los acuíferos, las zonas de recarga, los volúmenes de agua almacenada, además de estimar y monitorear las características físicas y químicas del agua almacenada, incluyendo el movimiento de los contaminantes provenientes de actividades naturales o antrópicas, así como delimitar los perímetros de protección de forma técnica y eficaz.

Por lo cual varios países latinoamericanos consideran estos adelantos científicos en la formulación de marcos de regulación y en la creación de estrategias de manejo de recursos hídricos, ya que la delimitación de perímetros de protección permitirá considerar el riesgo o vulnerabilidad de contaminación de las aguas subterráneas, así como el área óptima para salvaguardar las vertientes, analizando el estado físico de la superficie que rodea las vertientes, el comportamiento litológico e hidráulico del acuífero, la distancia de las fuentes de contaminación y la importancia social y económica del recurso (Tabla 16).

Esta estrategia tiene como responsables principales a el GAD- Otavalo, EMAPAO-EP y a la ARCA y está dirigida, específicamente a los pobladores que habitan las áreas cercanas a las vertientes, con el fin de generar ordenanzas que garanticen el establecimiento e implementación de los perímetros de protección para las cuatro vertientes, empleando diferentes criterios dependiendo de las características propias de cada acuífero, para salvaguardar el agua subterránea de la contaminación, restringiendo y/o prohibiendo actividades dentro de los perímetros de protección.

Objetivo general

Determinar los perímetros de protección donde se restrinjan o prohíban las actividades susceptibles de contaminar las aguas subterráneas o que afecten el caudal aprovechado para el abastecimiento de la ciudad de Otavalo

Objetivos específicos

- Caracterizar a los acuíferos.
- Establecer la vulnerabilidad de los acuíferos.
- Crear ordenanzas para regular actividades dentro de los perímetros de protección en las vertientes.

Tabla 16. Perímetros de protección de las vertientes

Proyecto	Actividades	Presupuesto	Responsables
Proyecto de regulación de actividades antrópicas cercanas a las vertientes	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar las zonas de recarga de los acuíferos. - Analizar la tipología del acuífero, las unidades geológicas, la divisoria superficial de aguas subterráneas y vertientes, la piezometría y direcciones de flujo. <hr/> <ul style="list-style-type: none"> - Aplicar métodos paramétricos para determinar la vulnerabilidad intrínseca. - Utilizar el índice DRASTIC para acuíferos detríticos, caracterizando los siguientes parámetros: <ul style="list-style-type: none"> • Profundidad del nivel piezométrico, recarga, tipo de acuífero, tipo de suelo, topografía, tipo de zona no saturada, permeabilidad del acuífero, ponderar los parámetros. - Utilizar el índice GOP para acuíferos carbonatados, caracterizando los siguientes parámetros: <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de acuífero, naturaleza, profundidad del nivel piezométrico, ponderar los parámetros. - Delimitar los perímetros de protección de la calidad basados en métodos específicos para acuíferos detríticos o kársticos. - Promover sistemas de monitoreo para comprobar la efectividad del perímetro de protección delimitado. 	\$ 12 000	<p>GAD municipal de Otavalo Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Otavalo (EMAPA-O). Agencia de control y regulación del agua (ARCA)</p>

-
- Proponer ordenanzas que restrinjan y/o prohíban actividades antrópicas susceptibles de contaminar el agua subterránea en los perímetros de protección.
 - Socializar las ordenanzas con los actores internos y garantizar su cumplimiento.
-

4.3.2.3 Estrategia 3. Practicas agroecológicas para la conservación de zonas próximas a los acuíferos

Los contaminantes no puntuales son transportados por fenómenos hidrológicos que trasladan sólidos disueltos o suspendidos que incluyen sedimentos, nutrientes, sustancias químicas y contaminantes patógenos que se filtran a las aguas subterráneas, alterando su calidad. Al ser contaminantes difíciles de regular directamente, se propone un control o regulación de las actividades que los generan. Campling et al. (2020) mencionan que las practicas agroecológicas son las mejores prácticas de gestión para la conservación del área de influencia de los acuíferos, además de ser sustentables al contrarrestar los impactos adversos en la calidad del agua, como la erosión del suelo, la utilización de productos químicos (fertilizantes y pesticidas), el transporte no deseado de sedimentos, el enriquecimiento de nutrientes (fósforos o nitrógeno) y otros contaminantes.

Por lo tanto, con el fin de tomar medidas de prevención contra problemas futuros por contaminación de fuentes difusas, se propone implementar estrategias de prácticas agroecológicas, en las zonas próximas a las vertientes La Magdalena y Turupamba ya que son propensas a posibles afectaciones de la calidad de agua por malas prácticas agropecuarias, además de ser acuíferos kársticos y con alta permeabilidad que permiten que los nutrientes se filtren en el acuífero y viajen largas distancias. Estas medidas son de fácil aplicabilidad ya que no requieren de altas inversiones o de grandes adaptaciones en el sistema agrícola y ofrecen claros beneficios a los agricultores como el incremento de la productividad. Se propondrá distintos programas que permitan el involucramiento de los actores sociales ya que cumplen un rol de vital importancia para que estos se hagan prácticos.

Esta estrategia tiene como responsables el GAD- Otavalo, EMAPAO-EP y el MAG, la cual está dirigida a los pobladores localizados en zonas próximas a las vertientes, con el fin de lograr su implementación de forma voluntaria, promoviendo la prevención de la alteración de la calidad de agua subterránea (Tabla 17).

Objetivo general

Fomentar prácticas agroecológicas para la conservación del área de influencia de los acuíferos del cantón Otavalo, que permitan prevenir la contaminación del agua subterránea por fuentes difusas.

Objetivos específicos

- Determinar las prácticas sustentables para la conservación de los acuíferos, en relación con la realidad de las zonas próximas a las vertientes.
- Promover la aplicación de las practicas sustentables para la conservación de los acuíferos.
- Monitorear las practicas agroecológicas, en el área de influencia de los acuíferos.

Tabla 17. Practicas agroecológicas para la conservación de zonas próximas a los acuíferos

Proyecto	Actividades	Presupuesto	Responsables
Proyecto de buenas prácticas agroecológicas en zonas próximas a las vertientes	<p>– Encuestas y entrevistas a los habitantes (cercanos a las vertientes) de las actividades agropecuarias realizadas e identificación de cuáles son las técnicas aplicadas para llevar a cabo estas actividades antrópicas.</p> <p>– Reuniones con diferentes actores involucrados para socializar las técnicas, con el fin de obtener un mayor intercambio cualitativo de información.</p> <p>– Identificar las condiciones hidrológicas y ambientales en la cuenca hidrográfica delimitada.</p> <p>– Determinar técnicas adecuadas para el área de estudio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Labranza de conservación para reducir la erosión y los flujos de sedimentos. • Agricultura de contorno y cultivo en franjas. • Uso de cultivos de cobertura y rotación adecuada de los cultivos. • Agricultura de precisión para el manejo de nutrientes y plagas. • Pastoreo rotativo. • Manejo de estiércol y ganado • Estructuras de detención de sedimentos y humedales construidos donde sea necesario. <p>– Realizar un manual de las actividades agroecológicas idóneas para cada área circundante de las vertientes.</p>	\$ 2 500.00	MAG, GAD-Otavalo y a la EMAPAO-EP, instituciones educativas, comunidad, agricultores, investigadores

-
- Buscar financiamiento para su implementación con el fin de que las medias sean adoptadas sin perjudicar a los agricultores.
 - Socializar de las ventajas de implementar estas estrategias.
 - Capacitar continuamente a la población para implementar las prácticas sustentables y los beneficios que esto produce.
 - Monitoreo de prácticas agroecológicas e informe.
 - Evaluar la percepción de los habitantes en adoptar esta estrategia.
-

4.3.2.4 Estrategia 4. Educación ambiental

La disponibilidad de agua subterráneas de calidad se está viendo comprometida debido a distintos factores como el cambio de uso de suelo, el crecimiento poblacional, actividades industriales, entre otras actividades antrópicas que ponen en peligro la calidad del recurso hídrico, además de ocasionar una presión y daños sobre los recursos naturales, generando una afectación ambiental, cambios locales y globales a futuro. La educación ambiental es fundamental ya que es un medio por el cual las personas adquieren conocimientos, valores, actitudes, destrezas y habilidades que permitan actuar responsablemente en el cuidado ambiental, optando por la conservación y protección del patrimonio natural de forma sostenible (MAE, 2018).

Esta estrategia tiene como fin promover conciencia ambiental por el cuidado del agua considerando el entendimiento y análisis de las conductas, creencias, principios, acciones y prácticas en relación al agua. Proporcionando una mejor comprensión de las diferentes problemáticas, mediante la creación y difusión de programas relacionados con la protección de los acuíferos, además que involucren las afectaciones que produce el cambio de uso de suelo, las presiones que provocan las actividades antrópicas, el uso de pesticidas y fertilizantes, descargas directas de aguas servidas, la importancia de la conservación y protección de los servicios ecosistémicos, con énfasis en las fuentes de agua subterránea. Con la implementación de esta estrategia se pretende fortalecer el compromiso individual y colectivo en la búsqueda y contribución de soluciones para fomentar el desarrollo de concienciación ambiental en el cantón Otavalo, que permita la protección y conservación de las captaciones de agua, a la vez que se espera incrementar el apoyo de las partes locales interesadas.

Esta estrategia tiene como responsables principales el GAD- Otavalo, EMAPAO-EP, instituciones educativas, su planificación y realización pretende lograr una amplia difusión y acogida de los temas de educación ambiental impartidos a los habitantes para proporcionar una concienciación del cuidado del recurso hídrico (Tabla 18).

Objetivo general

Fomentar el desarrollo de concienciación ambiental en el cantón Otavalo, que permita la protección y conservación de las captaciones de agua subterránea.

Objetivos específicos

- Establecer información oportuna y relevante para todos los actores interesados.
- Identificar los factores locales sociales, culturales y políticos a quienes se va a impartir los programas de educación ambiental.
- Identificar metodologías, técnicas y recursos para la difusión y socialización de los temas de educación ambiental.
- Evaluar el conocimiento adquirido por los actores beneficiados en educación ambiental.

Tabla 18. Educación ambiental

Proyecto	Actividades	Presupuesto	Responsables	
Proyecto de educación ambiental para la protección y conservación de los acuíferos del cantón Otavalo	– Creación de programas de educación ambiental: <ul style="list-style-type: none"> • Protección de fuentes hídricas. • Alteraciones del cambio de uso de suelo. • Presiones que provocan las actividades antrópicas y cambio de uso de suelo en el agua subterránea. • Afectaciones del agua subterránea por el uso de pesticidas y fertilizantes. 			
	– Promover la coordinación con los actores involucrado. – La temática deberá ser impartida a los siguientes grupos: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema educativo (educación inicial, básica, general unificada y educación superior). • Asociaciones de agricultura y ganadería. • Miembros que conforman el núcleo familiar. • Servidores públicos y privados, entre otros. 	\$ 1 700.00	MAG, GAD Otavalo, GADS parroquiales, comunidad, instituciones educativas, agricultores, investigadores.	
	– Contar con el personal idóneo para impartir las charlas para cada grupo. – Elaborar de material dinámico, didáctico y participativo de las estrategias de educación ambiental. – Charlas participativas en instituciones educativas, públicas y privadas. – Casas abiertas que promuevan una educación ambiental. – Caminatas.			

-
- Adquisición de equipos y materiales a emplearse en los programas de educación ambiental.
 - Difundir información por medio de materiales físicos (trípticos, posters, artículos) visuales (spots, videos, artículos, programas, documentales), auditivos (difusiones por radio), en medios de comunicación locales y alternativos.
-
- Realizar encuestas para verificar el nivel de conocimiento adquirido en los distintos niveles.
-

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Las actividades antrópicas principalmente la agricultura y la expansión poblacional influyen en el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal, generan una disminución acelerada de las superficies originales y alteran el funcionamiento de los ecosistemas.

Las vertientes La Magdalena y Turupamba al ser acuíferos fisurados y estar rodeados por tierras agropecuarias son más susceptibles a ser contaminados, lo contrario ocurre con Punyaro y Neptuno, ya que representan acuíferos detríticos y están ubicados en áreas pobladas. Sin embargo, a pesar de las distintas condiciones que presentan los acuíferos es necesario el control de actividades en los perímetros de protección de cada una de las vertientes.

Se acepta la hipótesis alternativa, ya que si existen diferencias en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los acuíferos del cantón Otavalo a nivel temporal y espacial. Las variaciones estuvieron influenciadas por la variabilidad de los coliformes totales y *E. coli*, los cuales presentaron concentraciones más elevadas en las vertientes La Magdalena y Turupamba.

La calidad de agua cruda de las vertientes según las directrices del AM 097-A indican que los valores de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos se encuentran por debajo de los valores máximos permisibles a excepción de los nitritos y potencial de hidrógeno. Dado que los valores no están muy alejados de los LMP no pueden causar afectaciones considerables en las fuentes de abastecimiento de agua.

Las fuentes de agua que se emplean para abastecer a la zona urbana del cantón Otavalo son de buena calidad y pueden seguir siendo usadas para el consumo humano y ser potabilizadas para poder estar dentro la normativa de agua potable INEN 1 108:2020.

Las actividades antrópicas que requieren control dentro de los perímetros de protección son: agricultura y ganadería en el caso de La Magdalena y Turupamba y el control de actividades económicas para Neptuno y Punyaro.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda integrar a todas las vertientes que abastecen de agua al cantón Otavalo en la base de datos del Ministerio del Ambiente y Agua para generar una eficiente administración del uso y aprovechamiento del agua en el cantón.

Es recomendable que en los análisis mensuales de calidad de agua realizados por el laboratorio de EMAPAO-EP se considere el mayor número de fuentes de captación de agua para el consumo humano, las cuales estén distribuidas por toda la cuenca para que en estudios futuros se pueda aplicar métodos de interpolación, realizar análisis geoestadísticos y determinar de mejor manera el análisis espacial y temporal de las vertientes.

Monitorear periódicamente el sistema de alcantarillado y las actividades antrópicas que se desarrollan alrededor de las vertientes con el fin de evitar la contaminación por lixiviados de aguas servidas o por filtración de agentes contaminantes.

Se recomienda la creación e implementación de políticas públicas basadas en la gestión integrada de los recursos hídricos que contribuyan en el aprovechamiento sustentable del agua.

REFERENCIAS

- Affum, A., Osa, S., Nyarko, B., Afful, S., Fianko, J., Akiti, T., y Affum, E. (2015). Total, coliforms, arsenic and cadmium exposure through drinking water in the Western Region of Ghana: application of multivariate statistical technique to groundwater Quality. *Environ Monit Assess*, 187 (2), 4-23. doi: 10.1007 / s10661-014-4167-x
- Álvarez, A., D'Elía, M., Paris, M., Fasciolo, G. y Barbazza, C. (2011). Evaluación de la contaminación de acuíferos producida por actividades de saneamiento y re-uso de efluentes en el norte de la provincia de Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 43(1), 19-39.
- Aroca, P., García, C. y López, J. (2009). Estadística descriptiva e inferencial. *Revista el auge de la estadística en el siglo XX*, (22), 165-176.
- Auge, M. (2006). *Agua Subterránea deterioro de calidad y reserva*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias Geológicas.
- Aznar, A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Revista interdisciplinaria de gestión ambiental*, 2(3), 12-19.
- Banco Interamericano de Desarrollo-BID (2018). Proceso Regional de las Américas: Foro Mundial del Agua 2018: Informe subregional Centroamérica: Informe ejecutivo 1.
- Baque- Mite, R., Simba-Ochoa, L., González-Ozorio, B., Suatunce, P., Díaz-Ocampo, E. y Cadma-Arevalo, L. (2016). Quality of water intended for human consumption in a canton of Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 9(20), 109-115.
- Barranco, A. (2018) *El agua subterránea y su importancia socio ambiental*. México. Universitarios Potosinos.
- Benitez-Gilabert, M. y Álvarez-Cobelas, M. (2008). *Missing data recovery in enviromental time series*, 4 (3), 326-335.

- Berdonces, J. L. (2008). La problemática del tratamiento del agua potable. *Medicina naturista*, 2(2), 22-28.
- Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Felizzia, J., Maldonado, L., Bécher, F. y Giuliano, J. (2014). *El agua subterránea y la actividad ganadera-Tambera*. Argentina: UniRio Editora.
- Bolaños, J., Cordero, G. y Segura, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 30(4). Octubre. doi: 10.18845/tm.v30i4.3408
- Bouza, R. (2006). *Estudio y Evolución Espacial- Temporal de tendencias en datos históricos de calidad de aguas. Aplicación a la cuenca hidrográfica del Río Ebro (1981-2005)* (Tesis de doctorado). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Bundschuh, J., Schneider, J., Ayaz, J., Khan, N., Herath, I., Parvez, F., Tomaszewska, B., Guimaraes, L., Prakash, J., López, D., Fernández, A., Pérez, A., Morales, N., Alarcón, N., Baisch, P., Mohan, D. y Mukherjee, A. (2021). Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts, *Science of The Total Environment*, 780(1), 14627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146274>.
- Burbano, N. (2011). La hidrogeología del Ecuador. Aguas termominerales en el Ecuador.
- Burbano, N., Becerra, S. y Pasquel, E. (2015). Introducción a la Hidrogeología del Ecuador. Quito, Ecuador: INAHMI.
- Campling, P., Joris, I., Calliera, M., Capri, E., Marchis, B., Kuczyńska, A., Vereijken, T., Majewska, Z., Belmans, E., Borremans, L., Dupon, E., Pauwelyn, E., Mellander, P., Fennell, C., Fenton, O., Burgess, E., Puscas, A., Gil, E., Lopez, M., Francès, G., Andersen, E., Lajer, A., Nowakowska, M. y Suciú, N. (2020). A multi-actor, participatory approach to identify policy and technical barriers to better farming practices that protect our drinking water sources. *Science of the Total Environment*. 16-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142971>

- Código Orgánico del Ambiente- COA. (2017). Quito- Ecuador. Registro Oficial N° 983 de 12 de abril del 2017.
- Código Orgánico de Salud (2016). Registro Oficial, Supl. 423 (22 de diciembre de 2006).
- Comisión Nacional del Agua (2011). El agua en el mundo –Estadísticas del agua en México.
- Constitución de la República del Ecuador (2008). Quito- Ecuador. Obtenido de Registro Oficial No.449 del 20 de octubre del 2008.
- Cossío Klüver, MAD (2019). Un recurso natural invisible: los acuíferos transfronterizos. *Agenda Internacional*, 26(37), 137-157. <https://doi.org/10.18800/agenda.201901.005>
- Custodio, E. y Llamas, M. (2001). Hidrología Subterránea, Tomo I : Barcelona. España, Ediciones Omega, SA.
- Deloya-Martínez, A. (2006). Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales. *Revista Tecnología en Marcha*, 19(2), 29-31.
- Doornik, J. A. y Hansen, H. (2008). An omnibus test for univariate and multivariate normality. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 70(s1), 927-939. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x>.
- Dragon, K. (2021). Identification of groundwater conditions in the recharge zone of regionally extended aquifer system with use of water chemistry and isotopes (Lwówek region, Poland), *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34(1), 100787. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100787>
- EMAPS (2017). *Calidad de Agua Potable en Plantas de Tratamiento. Parámetros Operativos de Control de Calidad de Agua en Plantas de Tratamiento Periodo noviembre 2017 Calidad de Agua Potable en Plantas de Tratamiento. D. d.* Producción. Quito: Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito.

Environmental Protection Agency- EPA (2018). Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables. EPA 822-F-18-001 Office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC Obtenido: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/dwtable2018.pdf>

EPMAPS (2017). *Parámetros Operativos de Control de Calidad de Agua en Plantas de Tratamiento Periodo Enero-Diciembre 2017 Calidad de Agua Potable en Plantas de Tratamiento. D. d. Producción*. Quito: Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito.

Fernández, J. I. P. (2010). Las partes interesadas en la gestión turística de los parques naturales andaluces. Identificación de interrelaciones e intereses. *Revista de estudios regionales*, (88), 147-175.

Foro de los Recursos Hídricos. (abril de 2013). *La Consulta Prelegislativa sobre el proyecto de Ley de Aguas: Una oportunidad para solucionar viejos problemas*. <http://www.camaren.org/files/2013/04/consultapreleg.pdf>

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M. (2002). Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team. WHO-PAHO-CEPIS y UNESCO-ROSTLAC-PHI. Banco Mundial Washington DC. p 127.

Gacitúa, P. (2007) *Caracterización físico-química del agua potable en la comuna de María Pinto, Región Metropolitana, Chile, D - Universidad de Chile*. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/detail.action?docID=3198276>.

Gárfias, J., Expósito, J. y Llanos, H. (2008). Delimitación de las zonas de protección mediante métodos analíticos y un modelo numérico de agua subterránea, acuífero Margarita, Cuba. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1), 7-20.

Geotecnia. (2018). Definición de acuífero. Recuperado de: <http://geotecniafacil.com/que-es-un-acuifero/>

- Gil-Marín, J., Vizcaino, C. y Montaña, N. (2018). Assessment of surface water quality using water quality index. (WQI) Case study: Guarapiche River Basin, Monagas, Venezuela. *Anales Científicos*, 79 (1): 111 - 119. doi:<http://dx.doi.org/10.21704/ac.v79i1.1146>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Otavalo - GAD–Otavalo. (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Otavalo - Provincia de Imbabura. Otavalo : Gobierno Autónomo Descentralizado de Otavalo.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Otavalo. (2021). Situacion geografica. Recuperado de: <https://www.otavalo.gob.ec/otavalo/situacion-geografica.html>
- Gómez, I. y Peñuela, G. (2016). Revisión de los métodos estadísticos multivariados usados en el análisis de calidad de aguas. *Revista Mutis* 6(1), 54-63, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1112>
- Gómez-Niño, H. I. (2020). Análisis de niveles piezométricos y patrones de captación de agua subterránea en el acuífero cuaternario de Yopal, Casanare, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(2), 89-103.
- Guerrero, M. (2019). *Evaluación temporal y espacial de la calidad del agua de la quebrada Las Delicias (cerros orientales de Bogotá) mediante un análisis estadístico multivariado*. (Tesis de pregrado). Universidad Cooperativa de Colombia, Bogota.
- Guzmán, E., Hernández, J., García, J., Rebollar, S., De la Garza, M. y Hernández, D. (2009). Consumo de agua subterránea en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 43(7), 749-761.
- Herraiz, A. S. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 97-114.
- Hispagua. (2020). Hidrogeología. Sistema Español de Información sobre el Agua. <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia#4>

- Hogesteger, J. y Wester, P. (2018). Gestión del agua subterránea de uso agrícola: Los retos de la sostenibilidad socio-ambiental y la equidad. *Cuadernos de geografía*, (101), 51-70. doi: 10.7203/CGUV.101.13720
- Instituto Geológico y Minero de España-IGME (2012). *Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica*. Madrid: Loreto Fernández Ruiz. https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/AGUAS%20SUBTERRANEAS%20de7_tcm30-215716.pdf
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España – ITGE (1990). *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Granada*. Recuperado de https://aguas.igme.es/igme/publica/libro75/lib_75.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (2020). NTE INEN 1108:2020-04. Agua para Consumo Humano. Requisitos, Sexta revisión. Quito.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo – INEC, (2010).
- Izurietta, R., Campaña, A., Calles, J., Estévez, E. y Ochoa, T. (2017). *Calidad del Agua en las Américas Riegos y Oportunidades*. Obtenido de <https://www.ianas.org/images/books/wb09.pdf>
- Jaramillo, M. y Merchan, T. (2018). Evaluación de las zonas de recarga hídrica en relación a las formaciones vegetales en la parroquia Angochagua (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibará, Ecuador.
- Kiely, G. (2003). Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Madrid: Mc Graw Hill.
- Kalola, M., Kgabi, N. y Mukendwa, H. (2020). Geochemical assessment of groundwater in the Kuiseb River basin in Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*,9-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102956>.
- Konan, K., Kouame, I., Dao, A., Noufe, D., Koffi, J. y Kamagate, B. (2020). Analysis of the qualitative evolution of groundwater in the Abouabou área in the Port-Bouët municipality (Abidjan, Cote d'Ivoire). *Geoscience and Environment Laboratory, UFR Science and Environmental Management*,

Nangui Abrogoua University, 02 BP 801 Abidjan 02, Cote d'Ivoire, 1-10.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05268>

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (2014)
Obtenido de Registro Oficial N° 305 de 63 de agosto del 2014.

López, (2002). Estrategias para proteger las aguas Subterráneas de la contaminación. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, (2), 9-16.

Loredo, E. G. L., Ceballos, S. I. V., Castro, M. V., González, G. J., Gaytán, G. C., Hernández, H. R. y Cantú, M. E. M. (2020). Análisis de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región centro-norte de México. El caso de la cuenca baja del río Nazas. *Revista Ecosistemas*, 29(1).

Martínez, P. E., Martínez, P. y Castaño, S. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. México: Editorial Aedos.

Martínez, P., Martínez, P., Montero, E., Villarroja, F., Leoches, M., Díaz, S. y Castaño, S. (2018). *Hidrogeología. Principios y Aplicaciones*. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/reader.action?docID=5636222&query=acuifero%2B>

Mendieta-Mendoza, A., Rentería-Villalobos, M., Chávez-Flores, D., Santellano-Estrada, E., Pinedo-Álvarez, C. y Ramos-Sánchez, V. (2020). Reconnaissance of chemically vulnerable areas of an aquifer under arid conditions with agricultural uses. *Agricultural Water Management*, (233),106100. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106100>.

Miletto, M., Kirchheim, R., Rucks, J., Bello, E., Da Franca, N. y Dos Anjos, R. (2017). El recurso invisible Acuíferos transfronterizos: una oportunidad de cooperación internacional. *Serie sobre elementos de Políticas*, 3.

Ministerio del Ambiente del Ecuador - MAE (2015). Acuerdo Ministerial No. 097-A. Registro oficial N° 387 (suscrito 4 de noviembre, 2015).

Ministerio del Ambiente del Ecuador - MAE (2018). Estrategia Nacional de Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible 2017 - 2030. Primera edición Quito- Ecuador.

- Misi, A., Gumindoga, W. y Hoko, Z. (2018). An assessment of groundwater potential and vulnerability in the Upper Manyame Sub-Catchment of Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Partes A / B / C*, (105), 72–83. doi: 10.1016 / j.pce.2018.03.003
- Medina, F. y Galván, M. (2007). *Imputación de datos: teoría y práctica*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M. y Paris, M. (1998). *Acuíferos regionales en América Latina: Sistema Acuífero Guaraní; capítulo argentino-uruguayo*. Argentina: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canada.
- Montenegro-Montenegro, E., Oh, Y. y Chesnut, S. (2015). Do not be afraid of missing data: Modern approaches to handle missing information. *Revista UCR*, 30,44. <http://dx.doi.org/10.15517/ap.v29i119.18812>
- Moreno, J., Avilés, L., Aguirre, Á., Cañar, M. y Tapia, G. (2015). *Generación de geoinformación para la gestión geomorfológica*.
- Mukherjee, I. y Singh, U., (2020). Fluoride abundance and its release mechanisms in groundwater together with associated risks to human health in a geologically heterogeneous semi-arid region of eastern India. *Microchemical Journal*, (152), 10430. doi: 10.1016 / j.microc.2019.104304
- Organización Mundial de la Salud – OMS (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Ginebra.
- Ortiz, C., Gutiérrez, M. y Gutiérrez, E. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Décima Segunda Edición.
- Parra, M. M. (2007). La contaminación del agua subterránea por prácticas ganaderas. *Tierra y tecnología: revista de información geológica*, (32), 103-117.

- Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. (2017). *Toda una Vida*. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo - Semplades.
- Puerta, D. y Zapata, M. (2014). *Documentación de los procesos operativos para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villasantana* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Quirós, F. R. (2004). Empleo de cloro y cloraminas en la desinfección del agua: cloración y subproductos. *Química e industria: QeI*, (548), 12-24.
- Ramos, L., Vidal, L., Vilarly, S. y Saavedra, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la Bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 87-98.
- Ramos, A. (2016). *Evaluación microbiológica y físico-química de la calidad del agua para consumo humano de la junta administradora de agua potable Galten – Guilbut ubicada en el cantón Chambo* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Raffo, E. (2013). Tratado del agua y la legislación peruana. *Industrial Data*, 16 (2), 106-117
Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81632390013>
- Romić, D., Castrignanò, A., Romić, M., Buttafuoco, G., Bubalo M., Ondrašek, G. y Zovko, M. (2020). Modelling spatial and temporal variability of water quality from different monitoring stations using mixed effects model theory. *Science of The Total Environment*, 704, 135875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135875>.
- Rencher, A. (2003). *Methods of Multivariate Analysis 2nd edition*. Estados Unidos: Wi-ley-Interscience.
- Rojas, L. y Otálvaro, M. (2008). Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del valle del cauca, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (23), 69-84.
- Rosas, L. (2009). Manual de procedimientos de delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas, caso Ecuador. UICN SUR, Quito, Ecuador, 34.

- Sandoval-Moreno, A. y Günther, M. G. (2013). La gestión comunitaria del agua en México y Ecuador: otros acercamientos a la sustentabilidad. *Ra Ximhai*, 9 (2), 165-179. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46128964012>
- Sandoval, D. N. y Sisa, B. D. (2020). *Evaluación del Sistema de Tratamiento de Agua para Consumo Humano en el Barrio Aglla Parroquia Checa* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Sauquillo, A. (1994). La contaminación de las aguas subterráneas. Situación en España. *Ingeniería del agua*, 1(3), 31-40. doi: <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2642>
- Schmidt P., Sedaghat N., Rosel P. y Fierro, T. (2017). Medición de nitratos y nitritos en agua y saliva de población rural precordillerana de la VIII región. *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*, 72(2), 119–124. <https://doi.org/10.4067/S0718-48162012000200003>
- Severiche, C. y González, H. (2012). “Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado”, *Ing. USBMed*, 3(2), 6–11.
- Sierra, C. (2011). *Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico*. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/utnortesp/reader.action?docID=3198982&ppg=1>
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en Zonas Tropicales*, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Templ, M., Kowarik, A. y Filzmoser, P. (2011). Iterative stepwise regression imputation using standard and robust. *Elsevier*, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2011.04.012>
- Torres, A. P., Lopez, R. G. y Mickelbart, M. V. (2010). Manejo de la alcalinidad en sustratos hidropónicos. *Extensión de Perdue*, 1-5. <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-242-SW.pdf>

- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza -UICN (2018). Cuenca hidrográfica. Recuperado de: https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/cuenca_hidrografica.pdf
- Valencia, J. (2007). *Estudio estadístico de la calidad de las aguas en la cuenca hidrográfica del Río Ebro* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid E.T.S. de Ingenieros Agrónomos, Madrid.
- Vega, R. (2006). *Estudios hidrológicos e hidrogeológicos para optimizar el aprovechamiento de las vertientes que abastecen el sistema de agua potable de la ciudad de Otavalo – Provincia de Imbabura – Republica del Ecuador*.
- Viada, C., Bouza, C., Ballesteros, J., Fors, M., Robaina, M. y Uranga, R. (2016). Revisión sistemática de los métodos de imputación de datos faltantes. *Experiencias en la modelación de la toma de decisiones en la salud humana, medio ambiente y desarrollo humano* 2, 130. <https://www.researchgate.net/publication/289248594>
- Vidal-Abarca, M., Suárez, M., Moreno, J., Gómez, R. y Sánchez, I. (2000). Hidroquímica de un Río de características semiáridas (Río Chicamo; Murcia). Análisis espacio - temporal. *Limnetica*, 15,57-73.
- Vivot, E., Rugna, C., Gioco, A., Sánchez, C., Ormaechea, M. y Sequin, C. (2010). Quality of groundwater for agricultural uses in Villaguay department, Entre Ríos. *AUGMDOMUS*, 2,1-15.
- Wijeyaratne, W. y Suvendran, S. (2019). In depth analysis of groundwater quality and use of Moringa oleifera leaf powder treatment to improve physico-chemical properties and drinkability of contaminated groundwater. *Environmental nanotechnology, nonitoring y management*, 11, 100199. doi: 10.1016 / j.enmm.2018.100199
- World Water Assessment Programme- WWAP (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos Hídricos en el mundo. Agua para un mundo sostenible.

- Yaday, I., Devi, N., Mohan, D., Shihua, Q. y Singh, S. (2013). Assessment of groundwater quality with special reference to arsenic in Nawalparasi district, Nepal using multivariate statistical technique. *Environ Earth Sci*, 72 (1), 259–273. doi: 10.1007 / s12665-013-2952-4
- Yuan, Y. (2010). Multiple Imputation for Missing Data: Concepts and New Development.
<http://facweb.cdm.depaul.edu/sjost/csc423/documents/multipleimputation.pdf>
- Zango, M., Sunkari, E., Abu, M. y Lermi, J. (2019). Hydrogeochemical controls and human health risk assessment of groundwater fluoride and boron in the semi-arid North East región of Ghana. *Journal Geochemical Exploration.*, 207, 106363. doi: 10.1016 / j. gexplo.2019.106363

ANEXOS

Anexo 1. Tipos de roca

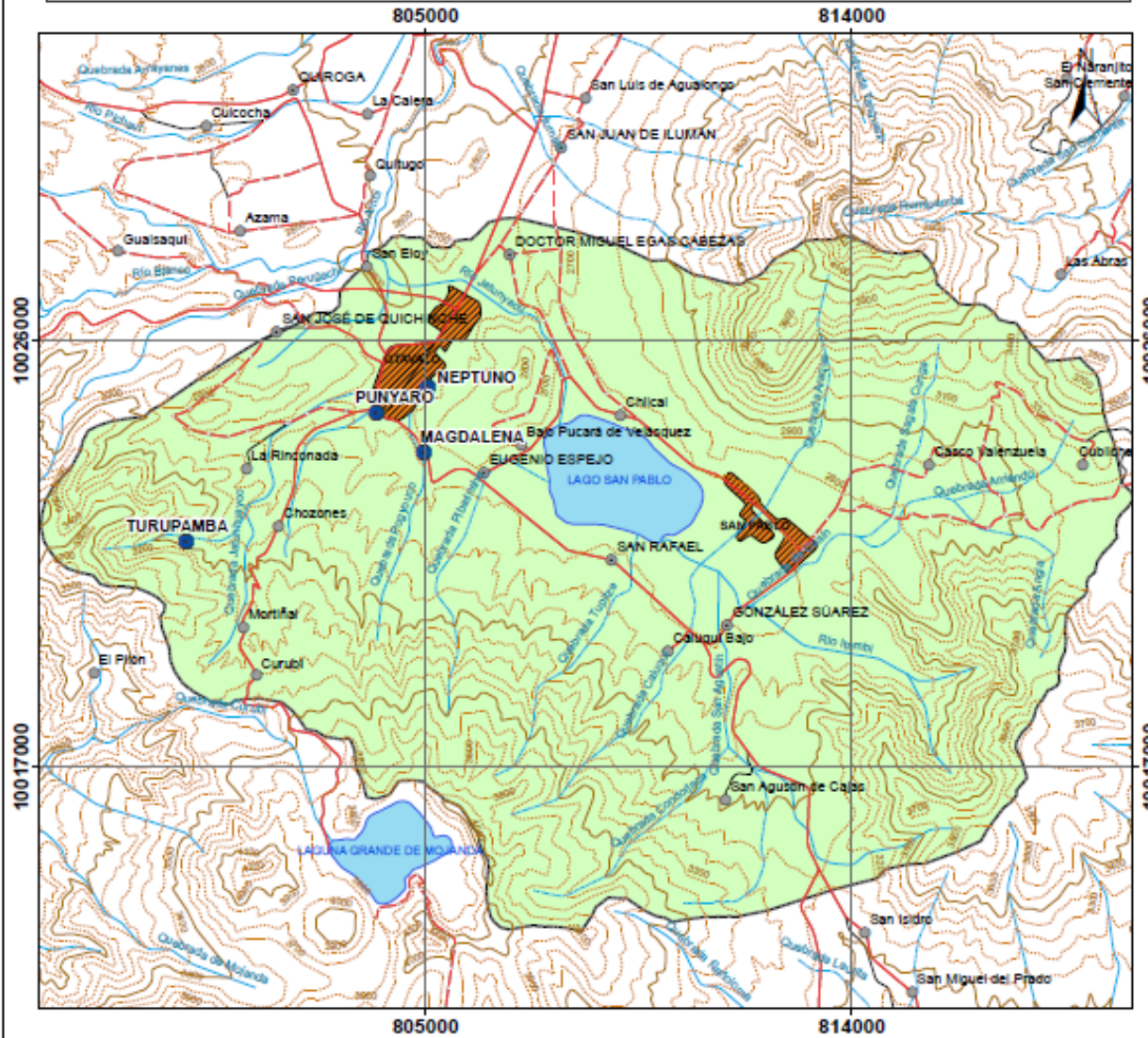
Tipo de roca	ha	%
Andesita y aglomerados	152	0.65
Clastos subredondeados a subangulares, asociados a material limoso y arenoso	72	0.31
Depósito de toba volcánica y ceniza, en la base se encuentran piroclastos, pómez y lapilli	931	3.99
Depósitos de ceniza y piroclastos de pómez, inmersos en una matriz arcillosa	61	0.26
Depósitos de clastos, gravas, arenas en matriz areno-arcilloso	153	0.65
Depósitos de detritos angulosos de material andesítico e intrusivos dispuestos en matriz areno arcilloso	693	2.97
Depósitos lagunares	735	3.15
Flujos de lava recubiertos por depósitos de tobas volcánicas y cenizas, en la base se encuentran piroclastos, pómez y lapilli	280	1.20
Flujos de lava recubiertos por tobas andesíticas de color café claro, ceniza y lapilli	33	0.14
Fragmentos de rocas angulares mal clasificados, inmersos en una matriz arcillosa	644	2.76
Lavas andesíticas a dacíticas	764	3.27
Lavas andesíticas de grano fino a medio, aglomerados y flujos laharíticos	4 856	20.81
Lavas andesíticas y basaltos mesocráticos compactos de grano fino a medio	2 993	12.82
Lavas de composición andesítica, aglomerados y brechas volcánicas	5 301	22.71
Lavas de composición andesítica, depósitos piroclásticos y domos dacíticos	1 400	6.00
No aplicable	1 020	4.37
Recubiertos por depósitos de toba volcánica y ceniza, en la base se encuentran piroclastos, pómez y lapilli	1 382	5.92
Secuencias volcánicas miocénicas holocénicas	9	0.04
Sedimentos de grano fino con mayor contenido de limos y arcillas	1 413	6.06
Tillitas. arenas, gravas y bloques de composición variable	359	1.54
Toba andesítica de color café claro, ceniza y lapilli	87	0.37
Área total	23 340	100.00

Anexo 2. Formaciones geológicas

Geología	Ha	%
Depósitos Aluviales	620	2.66
Depósitos Coluviales	781	3.35
Depósitos Coluvio Aluviales	421	1.80
Depósitos Fluvio-Lacustres	1 706	7.31
Depósitos Glaciares	359	1.54
Depósitos Lagunares	735	3.15
Formación Cangahua	3 050	13.07
Volcánicos Cushnirumi	1 453	6.23
Volcánicos Del Cusin	3 146	13.48
Volcánicos Imbabura	5 001	21.43
Volcánicos Mojanda	6 068	26.00
Área total	23340	100

Anexos 3. Cartografía

MAPA BASE DE LA CUENCA DEL RÍO JATUNYACU



PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR UTM
DATUM WGS 1984, ZONA 17 HEMISFERIO SUR

LEYENDA:

- VERTIENTES
- Poblados**
- CABECERA CANTONAL
- ⊙ CABECERA PARROQUIAL
- ⊙ POBLADO
- Curvas de nivel**
- ÍNDICE
- INTERMEDIA
- Vías**
- RUTA PRIMARIA
- RUTA SECUNDARIA
- RUTA LOCAL
- Ríos simples**
- PERENNE
- INTERMITENTE
- SECO
- ZONA URBANA
- LAGOS
- LIMITE DE LA CUENCA

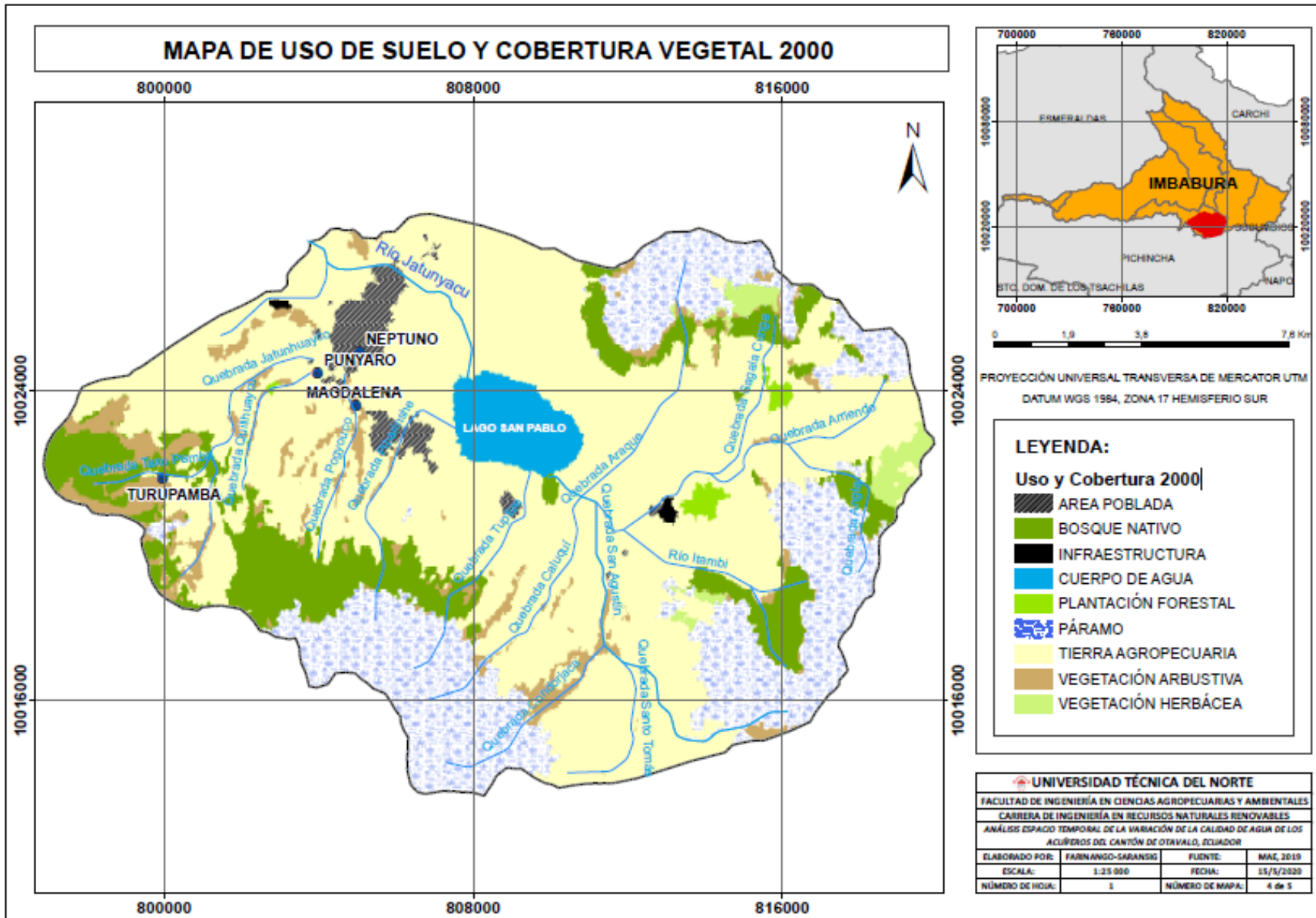
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

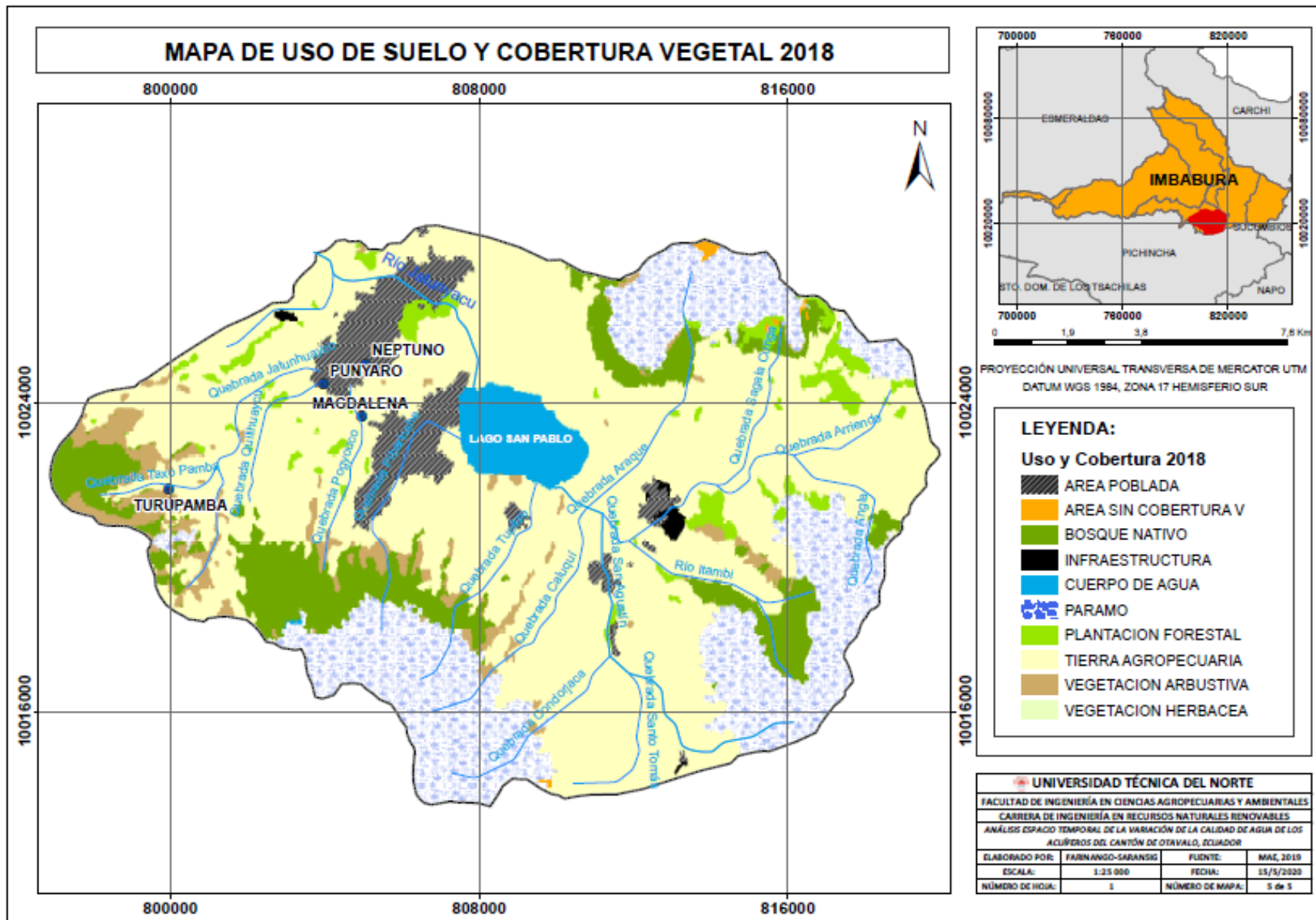
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS DEL CANTÓN DE OTAVALO, ECUADOR

ELABORADO POR:	FARINANGO-SARANSIG	FUENTE:	SNL 2013
ESCALA:	1:25 000	FECHA:	15/5/2020
NÚMERO DE HOJA:	1	NÚMERO DE MAPA:	2 de 5





Anexo 4. Registro fotográfico

Anexo 4a) Recopilación de los análisis mensuales de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las vertientes



Anexo 4b) Georreferenciación y reconocimiento del área de estudio



Anexo 4c) Vertiente La Magdalena



Anexo 4d) Vertiente Punyaro



Anexo 4e) Vertiente Neptuno



Anexo 4f) Vertiente Turupamba



Anexo 5. Cantidad de muestreos de parámetros físicos, químicos y microbiológicos:

Anexo 5a) Cantidad de muestreos de parámetros físicos, químicos y bilógicos periodo 2002-2019

	La Magdalena	Punyaro	Neptuno	Turupamba
Parámetros físicos				
Color verdadero	108	127	58	82
Color aparente	30	28	4	4
Conductividad Eléctrica	187	187	174	183
Potencial de Hidrógeno	187	187	173	183
Sólidos Disueltos Totales	172	175	166	172
Temperatura	108	90	84	81
Turbiedad	130	147	110	117
Parámetros químicos				
Amonio	179	181	157	175
Nitratos	181	181	166	175
Nitritos	178	175	162	174
Fósforo	173	172	152	155
Flúor	94	106	60	69
Hierro	135	150	107	121
Manganeso	94	110	82	56
Sulfatos	113	138	91	105
Alcalinidad	67	59	59	70
Calcio	69	61	63	69
Cloruros	43	36	29	32
Dureza Cálcica	70	67	64	72
Dureza Total	64	65	58	70
Magnesio	55	55	48	53
Acidez	29	23	25	19
Parámetros microbiológicos				
Coliformes totales	182	181	165	157
<i>E. Coli</i>	181	179	164	166
Σ	2829	2880	2421	2560

Anexo 5b). Cantidad de muestreos de parámetros físicos, químicos y biológicos periodo 2003-2008

	La Magdalena	Punyaró	Neptuno	Turupamba
Parámetros físicos				
Color verdadero	21	34	3	6
Conductividad Eléctrica	72	72	71	72
Potencial de Hidrógeno	72	72	71	72
Sólidos Disueltos Totales	64	62	65	66
Temperatura	20	8	7	11
Turbiedad	25	36	12	15
Parámetros químicos				
Amonio	66	66	63	66
Nitratos	72	72	71	72
Nitritos	70	68	71	72
Fósforo	62	59	54	49
Flúor	12	24	2	1
Hierro	32	42	21	23
Manganeso	13	31	18	2
Sulfatos	15	35	10	14
Alcalinidad	61	59	55	63
Calcio	64	60	59	62
Cloruros	41	36	29	28
Dureza Cálcica	65	65	59	64
Dureza Total	59	64	54	62
Magnesio	54	55	48	48
Acidez	24	23	21	17
Parámetros microbiológicos				
Coliformes totales	68	68	64	59
<i>E. Coli</i>	68	68	65	61
Σ	1120	1179	993	1005

Anexo 5c). Cantidad de muestreos de parámetros físicos, químicos y biológicos periodo 2014-2019

	La Magdalena	Punyaro	Neptuno	Turupamba
Parámetros físicos				
Color verdadero	63	61	49	62
Color aparente	29	28	4	4
Conductividad Eléctrica	71	71	62	69
Potencial de Hidrógeno	71	71	61	69
Sólidos Disueltos Totales	71	71	62	69
Temperatura	66	64	57	62
Turbiedad	70	70	62	69
Parámetros químicos				
Amonio	71	71	62	69
Nitratos	65	67	56	62
Nitritos	64	64	52	61
Fósforo	69	70	60	67
Flúor	58	54	48	52
Hierro	67	68	58	66
Manganeso	57	51	46	44
Sulfatos	65	64	55	61
Parámetros microbiológicos				
Coliformes totales	71	71	61	64
<i>E. Coli</i>	70	70	60	67
Σ	1098	1086	915	1017

Anexo 5d). Cantidad de muestreos de parámetros físicos, químicos y biológicos periodo 2003-2008

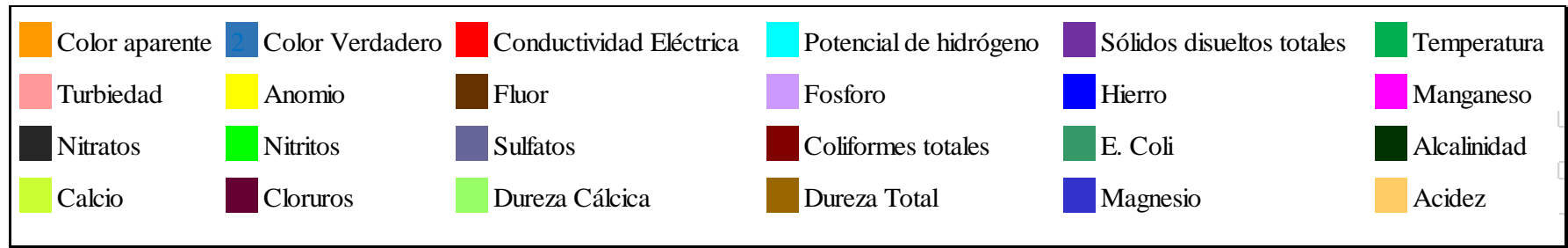
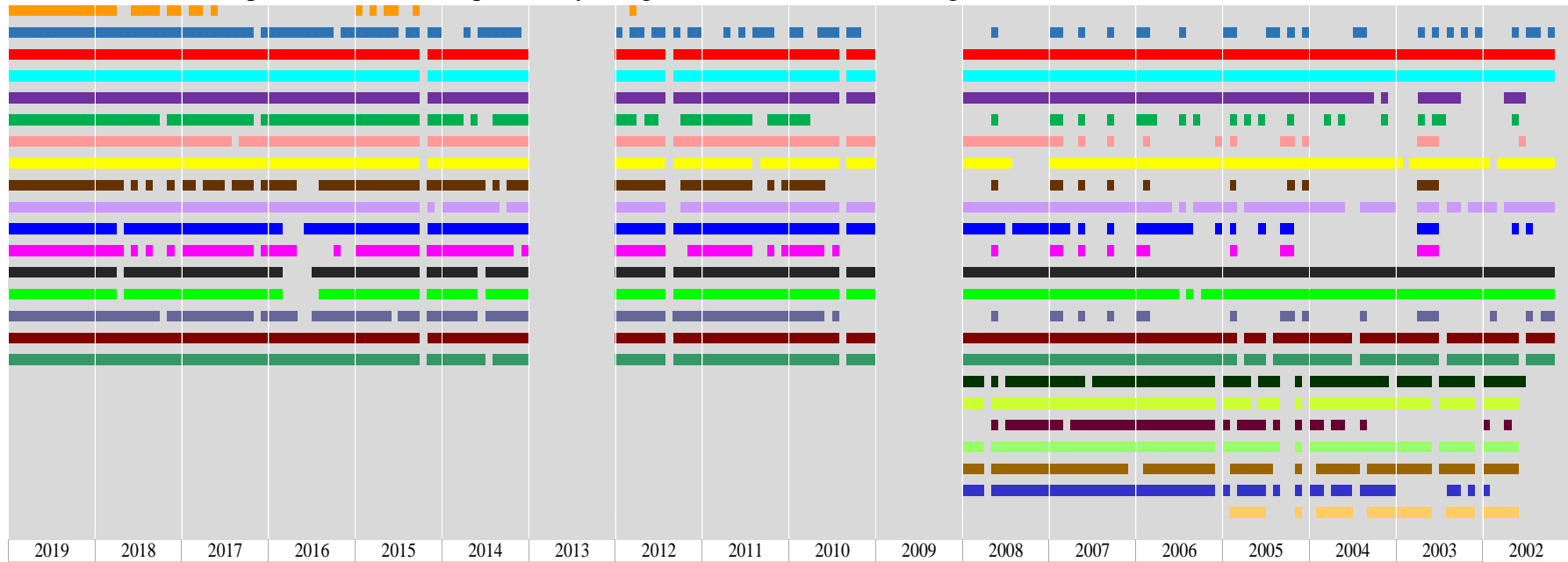
	La Magdalena	Punyaró	Neptuno	Turupamba
Parámetros físicos				
Conductividad Eléctrica	72	72	71	72
Potencial de Hidrógeno	72	72	71	72
Sólidos Disueltos Totales	64	62	65	66
Parámetros químicos				
Amonio	66	66	63	66
Nitratos	72	72	71	72
Nitritos	70	68	71	72
Fósforo	62	59	54	49
Alcalinidad	61	59	55	63
Calcio	64	60	59	62
Dureza Cálctica	65	65	59	64
Dureza Total	59	64	54	62
Parámetros microbiológicos				
Coliformes totales	68	68	64	59
<i>E. Coli</i>	68	68	65	61
Σ	863	855	822	840

Anexo 5e). Cantidad de muestreos de parámetros físicos, químicos y biológicos periodo 2014-2019

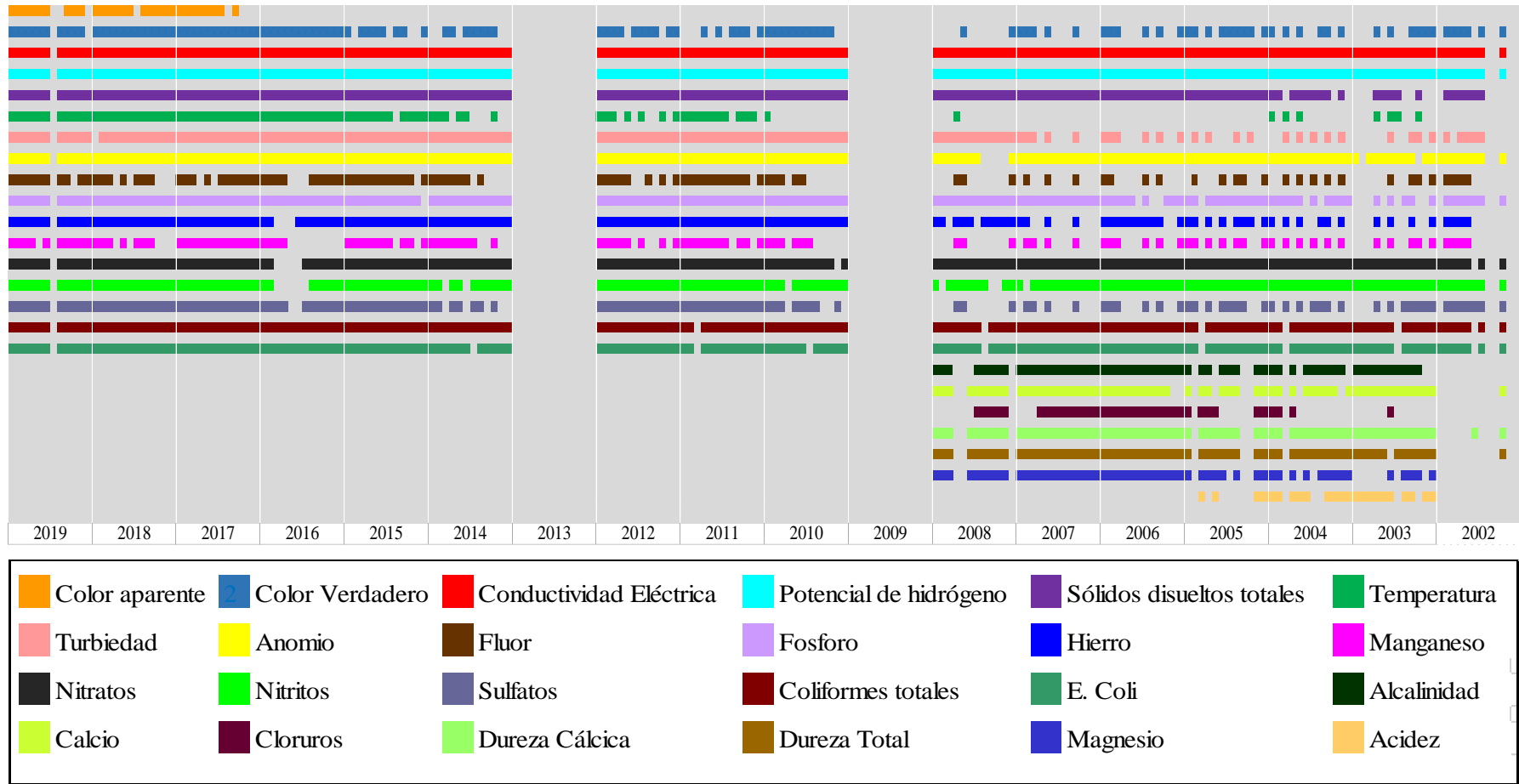
	La Magdalena	Punyaró	Neptuno	Turupamba
Parámetros físicos				
Color verdadero	63	61	49	62
Conductividad Eléctrica	71	71	62	69
Potencial de Hidrógeno	71	71	61	69
Sólidos Disueltos Totales	71	71	62	69
Temperatura	66	64	57	62
Turbiedad	70	70	62	69
Parámetros químicos				
Amonio	71	71	62	69
Nitratos	65	67	56	62
Nitritos	64	64	52	61
Fósforo	69	70	60	67
Hierro	67	68	58	66
Sulfatos	65	64	55	61
Parámetros microbiológicos				
Coliformes totales	71	71	61	64
<i>E. Coli</i>	70	70	60	67
Σ	954	953	817	917

Anexo 6. Series de parámetros físicos, químicos y biológicos

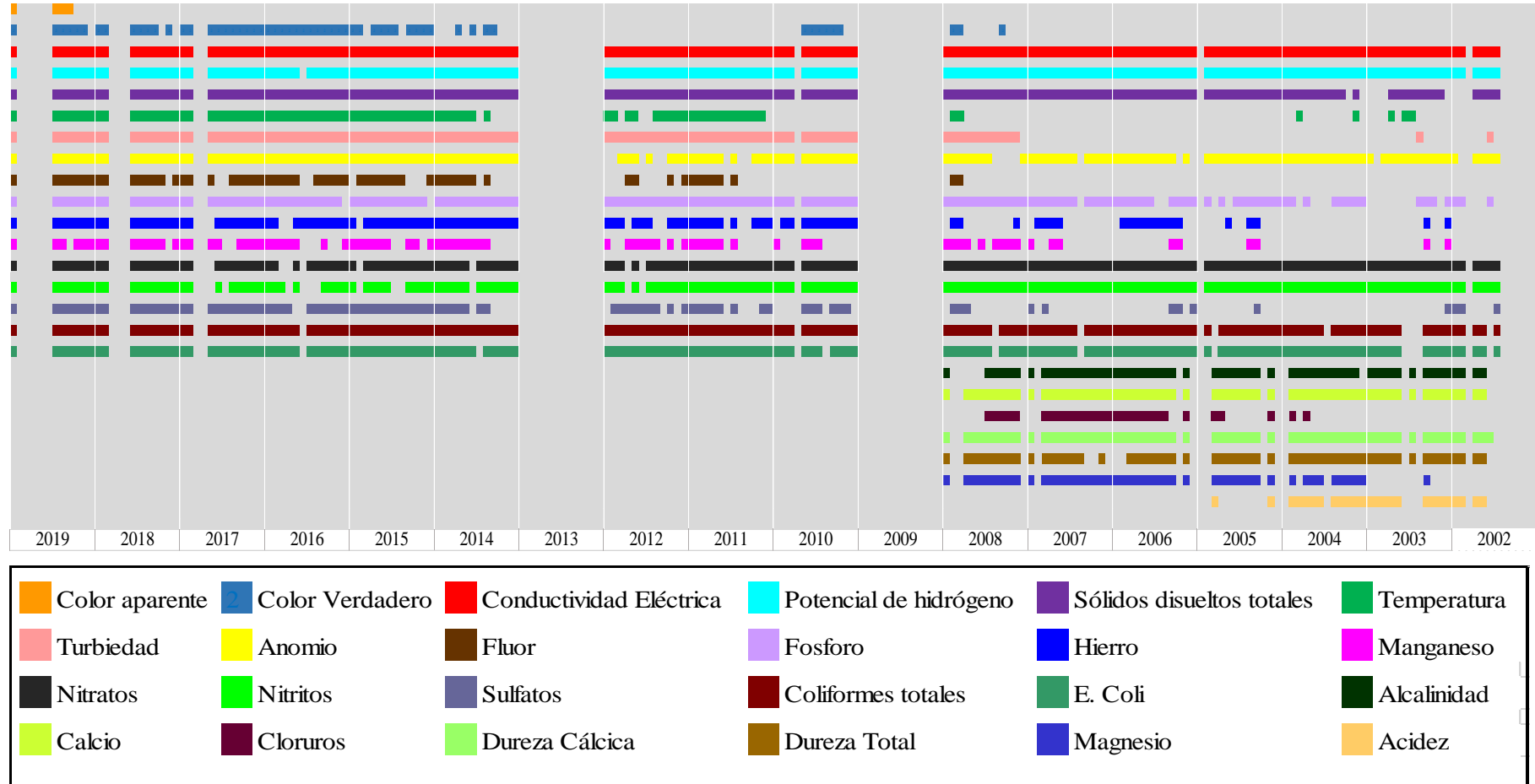
Anexo 6a). Series de parámetros físicos, químicos y biológicos de la vertiente La Magdalena



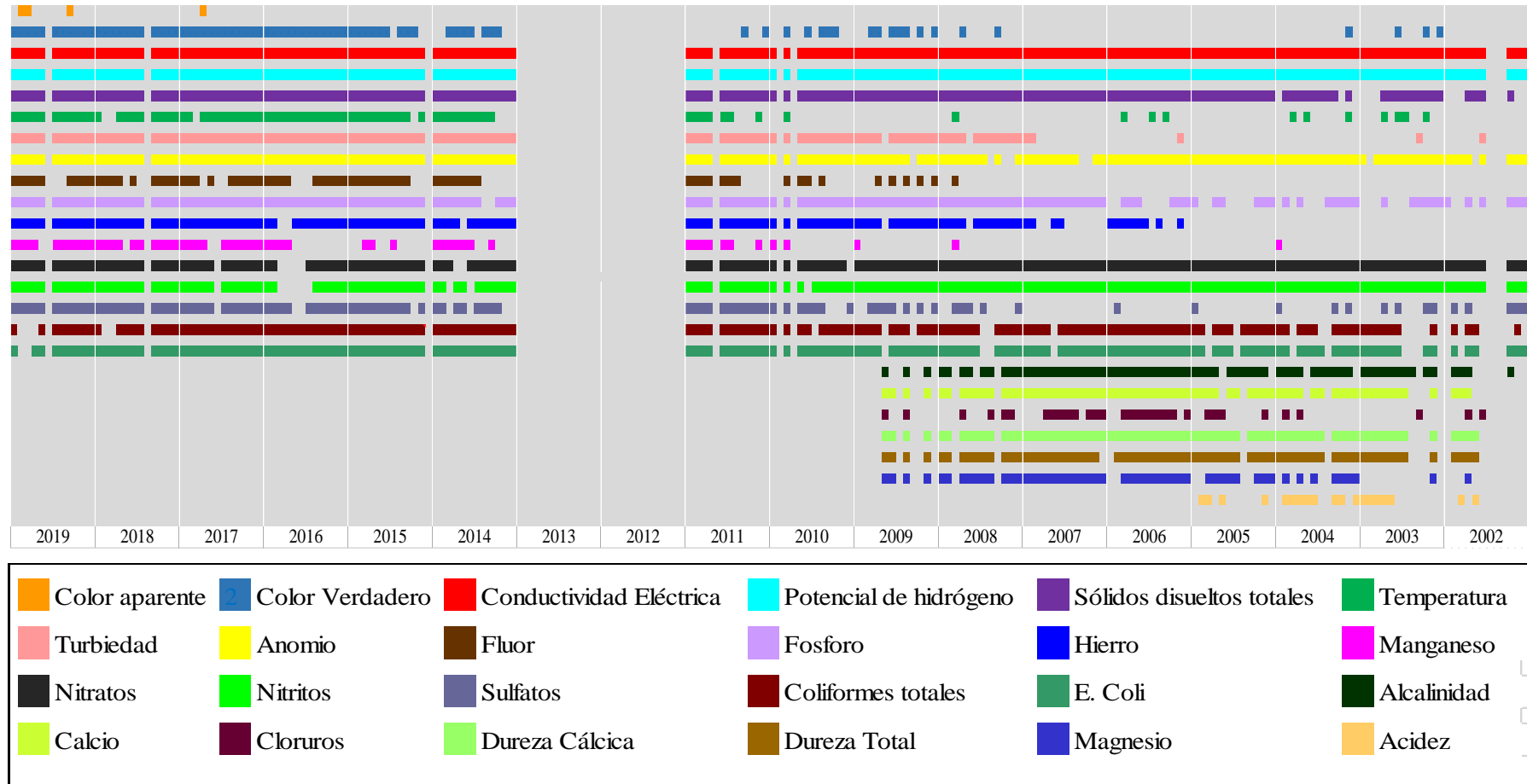
Anexo 6b). Series de parámetros físicos, químicos y biológicos de la vertiente Punyaro



Anexo 6c). Series de parámetros físicos, químicos y biológicos de la vertiente Neptuno



Anexo 6d). Series de parámetros físicos, químicos y biológicos de la vertiente Turupamba



Anexo 7. Estadísticos descriptivos

Anexo 7a). Estadísticos descriptivos 2003-2008

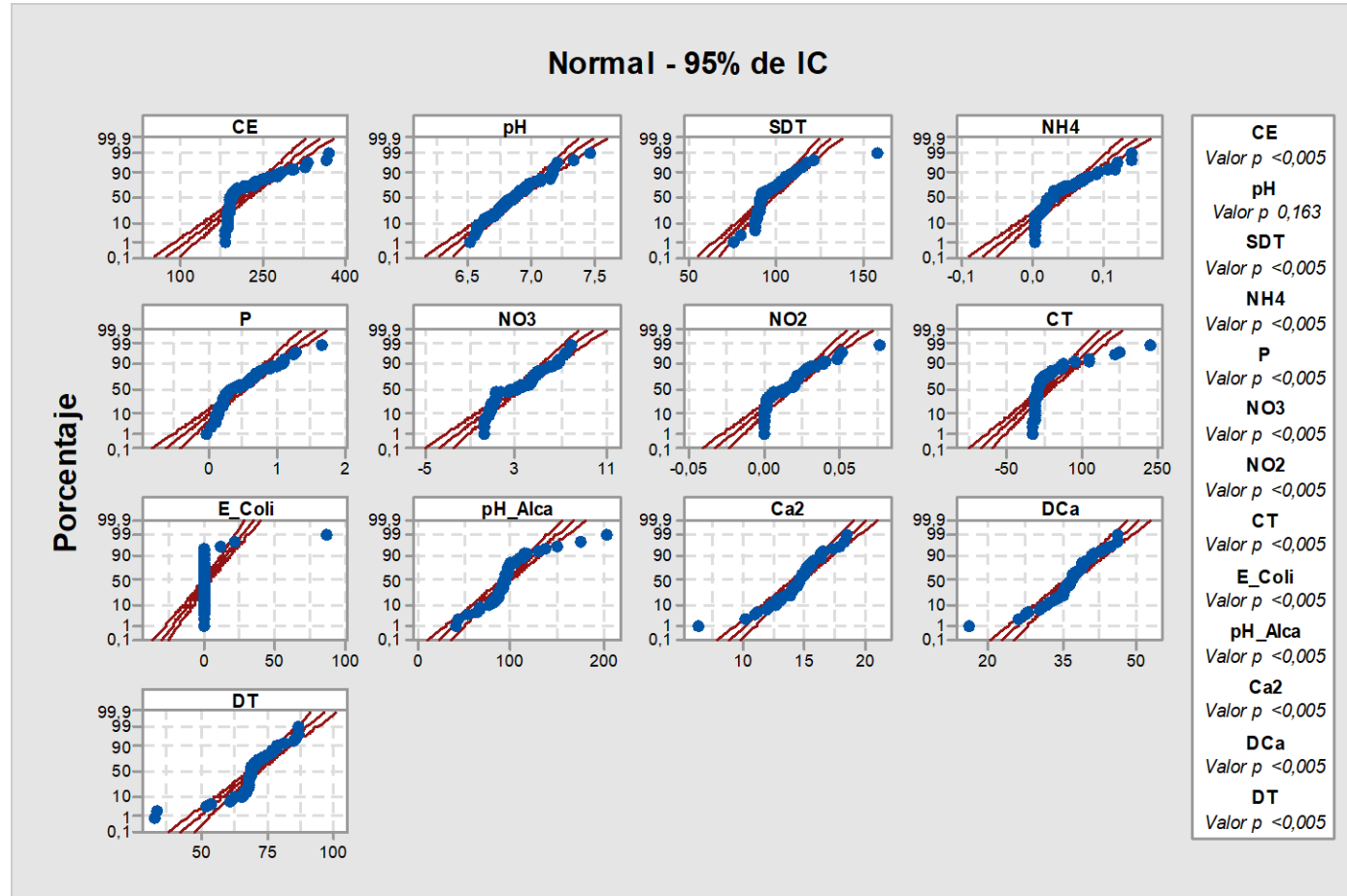
Parámetros	La Magdalena					Punyaró					Neptuno					Turupamba				
	n	Min	Max	X	SD	n	Min	Max	X	SD	n	Min	Max	X	SD	N	Min	Max	X	SD
Parámetros físicos																				
Conductividad Eléctrica	72	182.80	371.00	216.00	45.35	72	200.00	334.00	222.03	32.26	71	208.00	349.00	235.35	41.85	72	115.50	239.00	146.60	25.49
Potencial de Hidrógeno	72	6.51	7.47	6.88	0.20	72	6.19	6.87	6.58	0.14	71	6.56	7.26	6.91	0.14	72	6.14	7.03	6.63	0.21
Sólidos Disueltos Totales	64	79.50	159.00	94.54	10.62	62	54.50	110.00	96.98	8.72	65	99.00	151.00	105.14	10.01	66	54.90	100.00	66.19	8.84
Parámetros químicos																				
Amonio	66	0.00	0.14	0.04	0.04	66	0.00	0.28	0.03	0.05	63	0.00	0.73	0.03	0.10	66	0.00	0.17	0.04	0.04
Fósforo	62	0.00	1.68	0.46	0.35	59	0.12	1.46	0.50	0.37	54	0.08	1.12	0.46	0.36	49	0.00	1.28	0.33	0.27
Nitratos	72	0.22	8.00	3.09	2.24	72	0.10	6.40	2.58	1.86	56	0.16	7.29	2.76	2.01	72	0.03	11.60	2.75	2.93
Nitritos	70	0.000	0.077	0.015	0.015	68	0.000	0.210	0.019	0.034	52	0.000	0.300	0.030	0.055	72	0.000	0.250	0.021	0.032
Alcalinidad	61	41.36	204.80	96.99	24.32	59	47.80	196.00	104.68	22.03	55	44.80	198.00	100.61	24.26	63	27.26	113.60	61.26	13.96
Calcio	64	6.27	18.44	14.56	1.88	60	7.82	22.90	16.86	2.21	59	9.21	18.42	15.33	1.13	62	5.10	17.25	11.12	1.70
Dureza Cálrica	65	15.69	46.04	36.47	4.72	65	19.62	57.20	42.15	5.21	59	32.05	46.10	38.50	2.10	64	12.75	48.40	28.78	5.45
Dureza Total	59	32.37	86.87	69.10	8.98	64	39.23	95.30	81.73	6.70	54	68.82	80.66	74.84	2.13	62	22.56	82.72	52.20	9.01
Parámetros biológicos																				
Coliformes totales	68	0.00	235.00	26.10	43.00	68	0.00	89.00	6.66	14.40	64	0.00	42.00	5.51	8.21	59	0.00	291.00	38.92	49.46
<i>E. Coli</i>	68	0.00	87.00	1.59	10.60	68	0.00	3.00	0.15	0.52	65	0.00	0.00	0.00	0.00	61	0.00	46.00	1.29	5.86

Anexo 7b). Estadísticos descriptivos 2014-2019

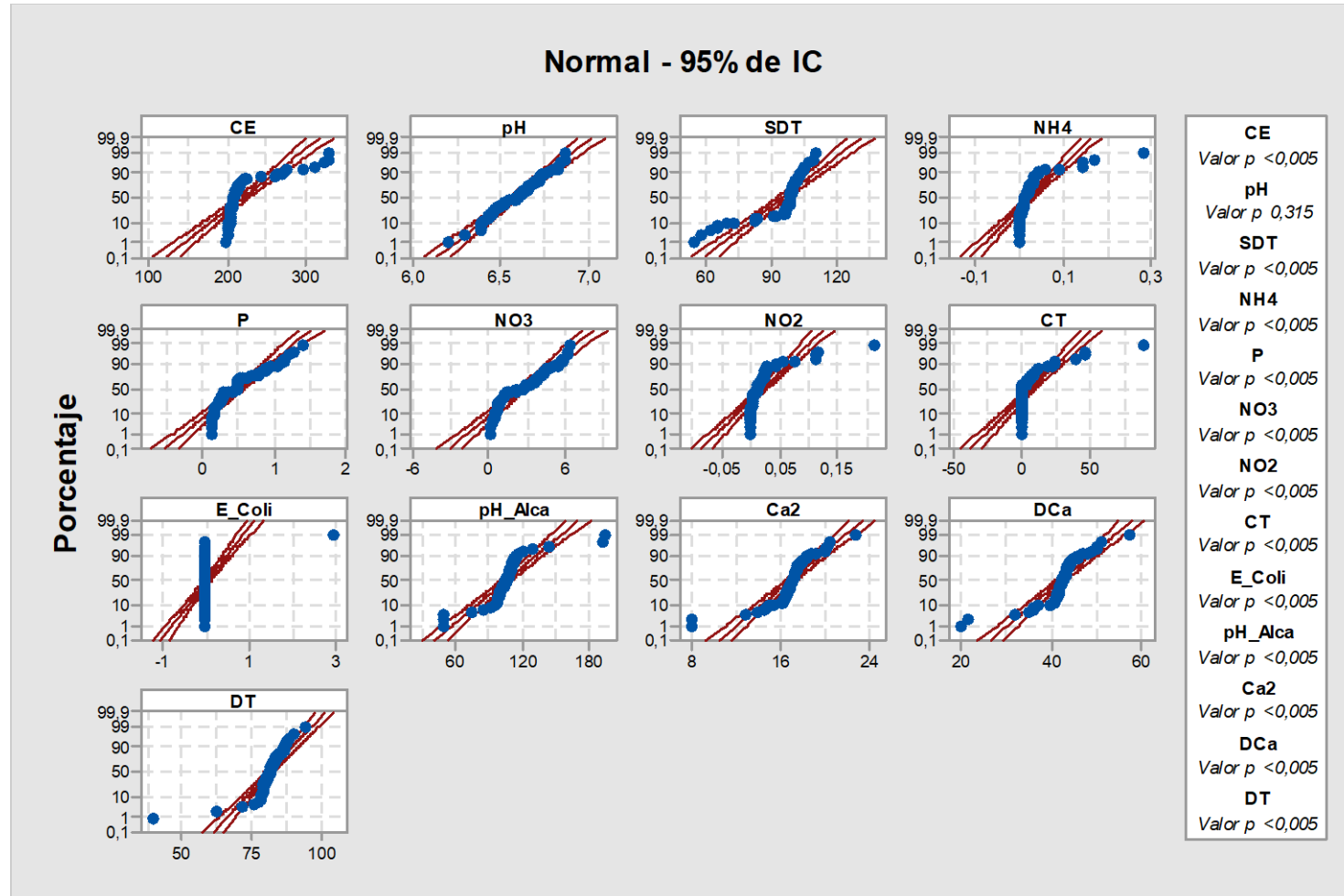
Parámetros	La Magdalena					Punyaró					Neptuno					Turupamba				
	n	Min	Max	X	SD	n	Min	Max	X	SD	n	Min	Max	X	SD	N	Min	Max	X	SD
Parámetros físicos																				
Color verdadero	63	0.00	5.51	1.63	1.70	61	0.00	5.00	1.04	1.55	49	0.00	5.51	0.74	1.48	62	0.00	15.00	2.80	2.70
Conductividad Eléctrica	71	181.40	238.00	197.62	10.23	71	192.10	504.00	213.88	35.30	62	188.10	221.00	211.70	7.37	69	112.70	181.70	127.82	10.18
Potencial de Hidrógeno	71	6.41	7.49	6.90	0.18	71	6.38	7.86	6.68	0.22	61	6.50	7.30	6.92	0.20	69	6.39	7.62	6.90	0.21
Sólidos Disueltos Totales	71	86.70	114.30	94.32	4.60	71	91.80	244.00	102.24	17.27	62	92.40	105.70	102.56	2.24	69	53.50	86.80	60.68	4.97
Temperatura	66	13.70	21.90	18.18	1.33	64	14.60	22.70	18.72	1.71	57	17.00	21.70	18.84	0.73	62	12.60	20.40	17.23	1.38
Turbiedad	70	0.05	2.10	0.47	0.56	70	0.04	1.90	0.47	0.54	62	0.01	2.90	0.57	0.66	69	0.13	4.03	0.81	0.86
Parámetros químicos																				
Amonio	71	0.00	0.10	0.03	0.03	71	0.00	0.14	0.03	0.03	62	0.00	0.09	0.02	0.02	69	0.00	0.10	0.03	0.02
Flúor	58	0.00	0.51	0.25	0.13	54	0.00	0.91	0.26	0.19	48	0.13	0.99	0.34	0.19	52	0.00	1.64	0.29	0.34
Fósforo	69	0.00	0.37	0.16	0.06	70	0.10	1.23	0.26	0.19	60	0.08	1.23	0.24	0.16	67	0.01	0.37	0.12	0.06
Hierro	67	0.00	0.08	0.02	0.01	68	0.00	0.20	0.02	0.03	58	0.00	0.10	0.02	0.02	66	0.00	0.25	0.06	0.05
Nitratos	65	0.15	2.60	1.17	0.66	67	0.03	4.87	1.06	0.92	56	0.04	6.67	1.10	1.24	62	0.00	4.43	1.10	0.80
Nitritos	64	0.000	0.011	0.003	0.003	64	0.000	0.020	0.003	0.003	52	0.000	0.300	0.014	0.050	61	0.000	0.006	0.002	0.001
Sulfatos	65	0.00	4.00	0.49	0.80	64	0.00	8.00	0.28	1.04	55	0.00	1.00	0.16	0.35	61	0.00	1.00	0.20	0.36
Parámetros biológicos																				
Coliformes totales	71	0.00	2420.00	218.42	538.13	71	0.00	24.00	3.17	4.48	61	0.00	41.00	2.62	5.88	64	0.00	2420.00	102.52	304.58
<i>E. Coli</i>	70	0.00	19.00	1.24	2.45	70	0.00	3.00	0.91	0.52	60	0.00	1.00	0.65	0.47	67	0.00	20.00	1.74	3.29

Anexo 8. Gráficas de probabilidad periodo 2003-2008

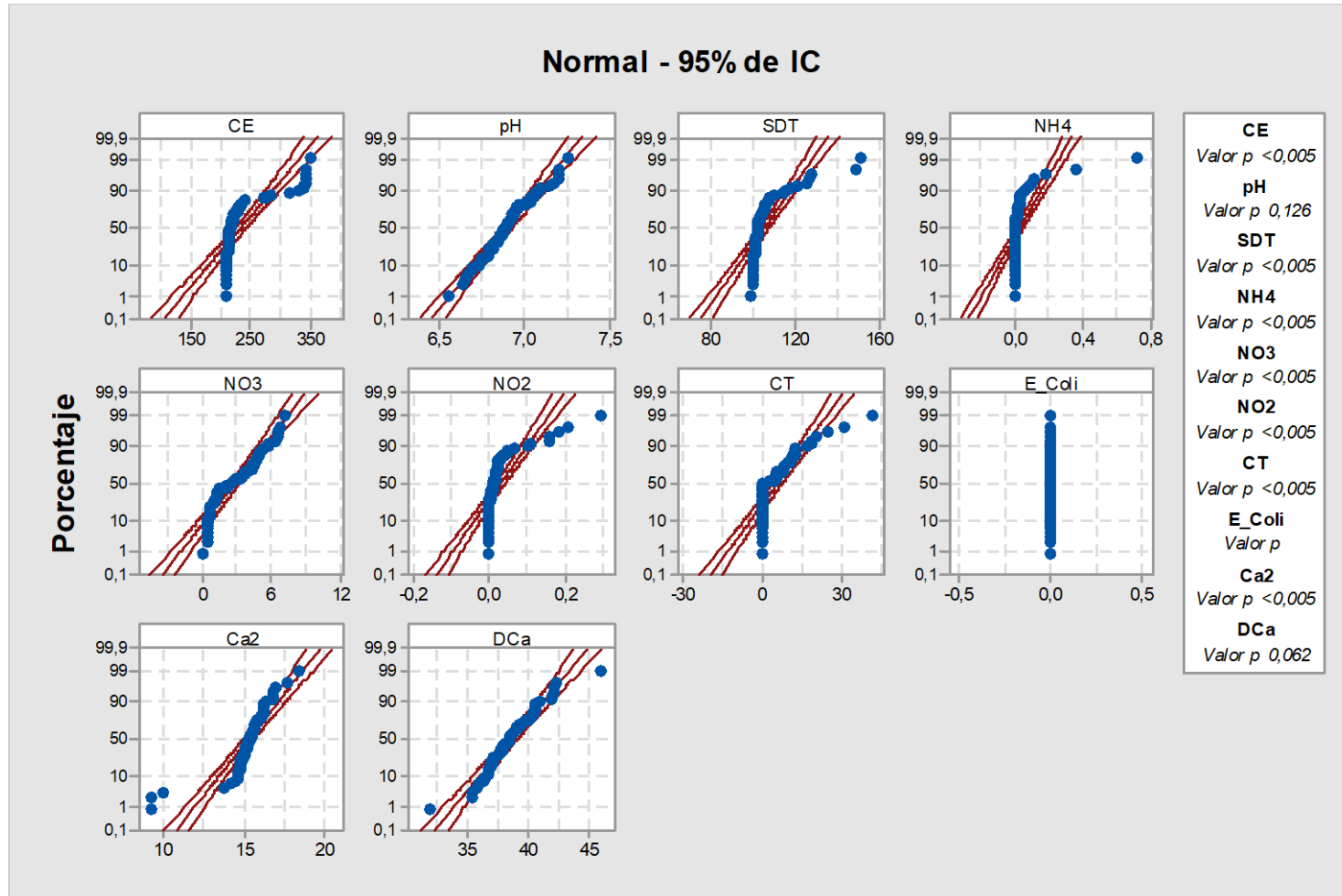
Anexo 8a). La Magdalena



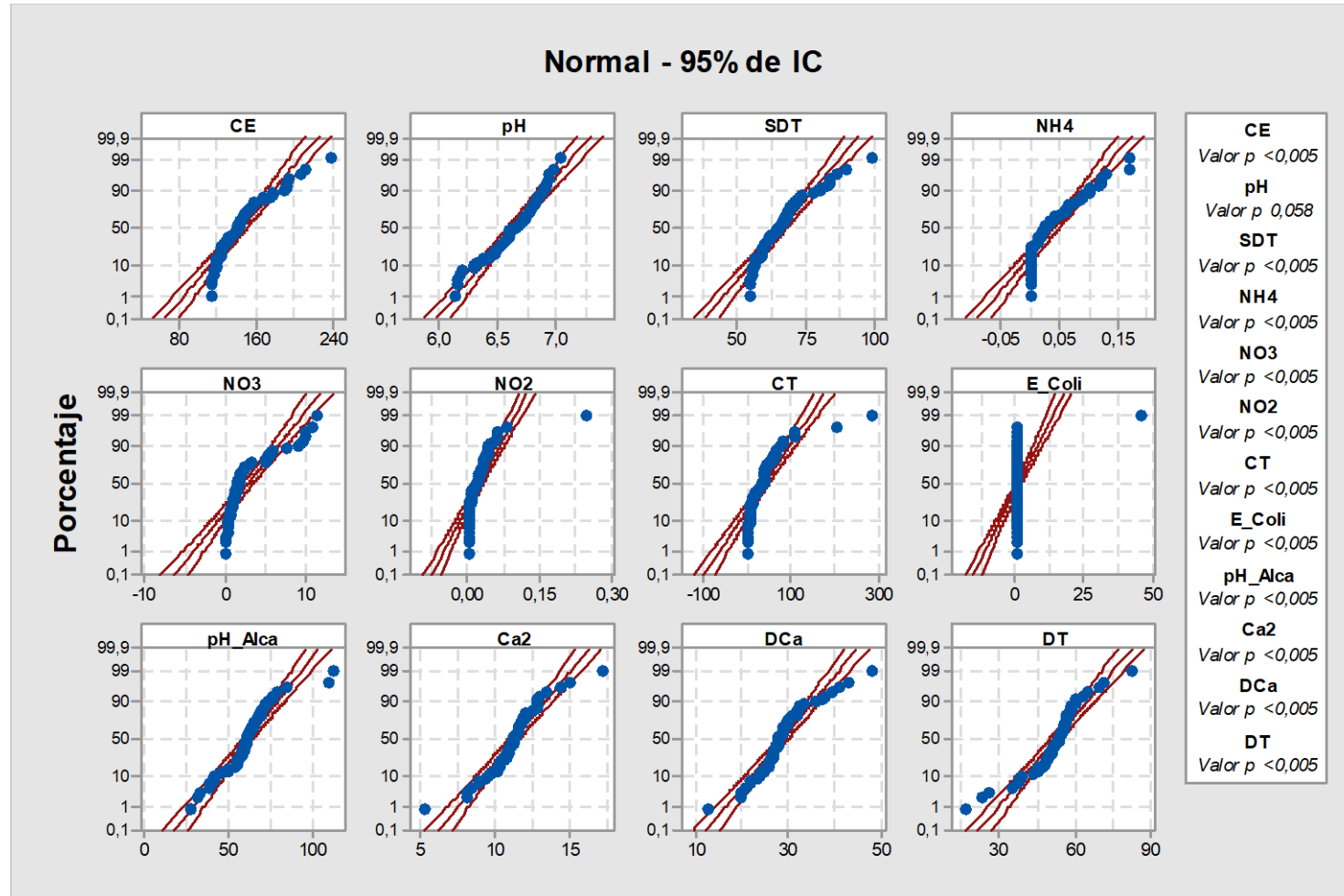
Anexo 8b). Punyaro



Anexo 8c). Neptuno

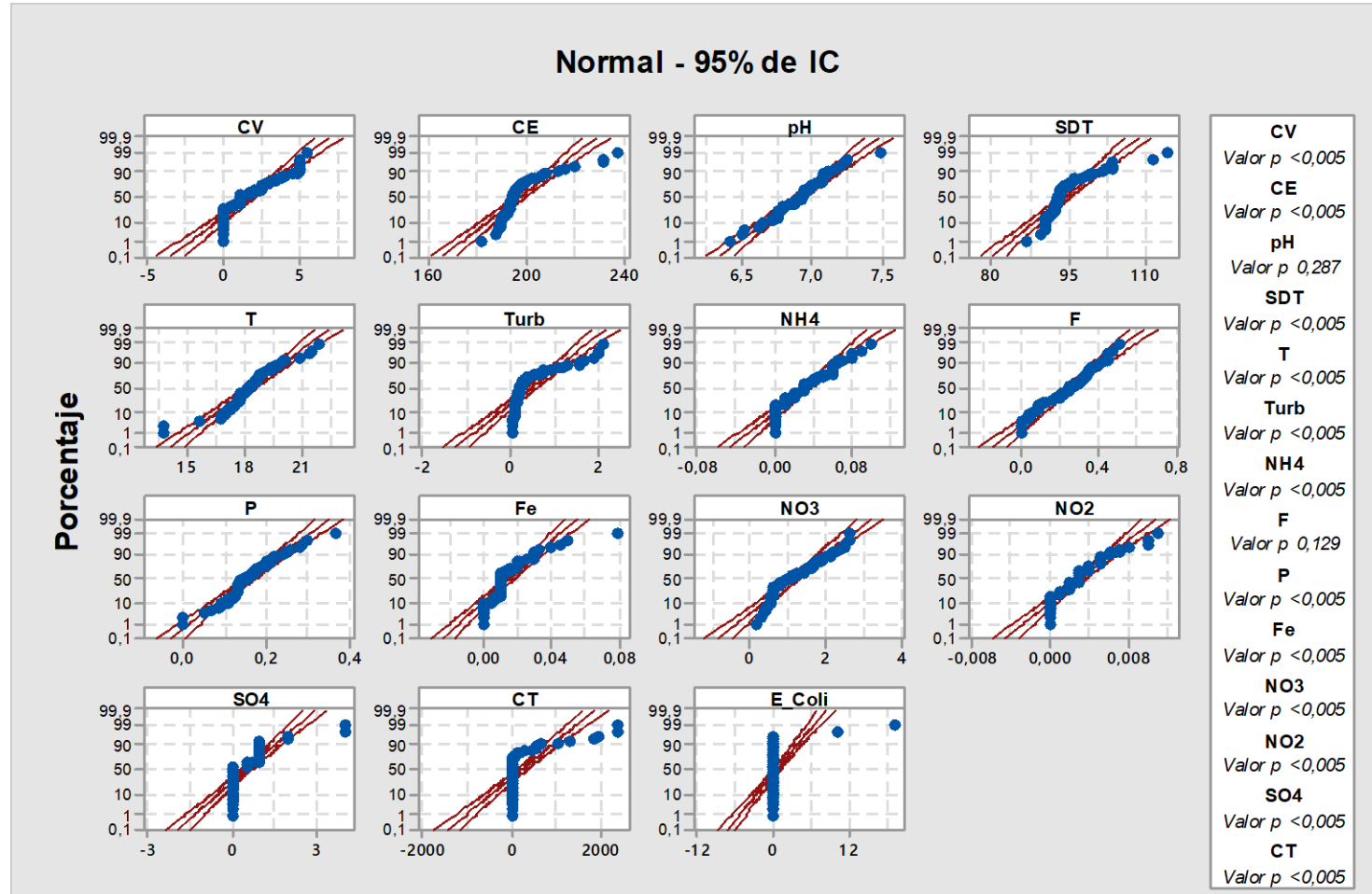


Anexo 8d). Turupamba

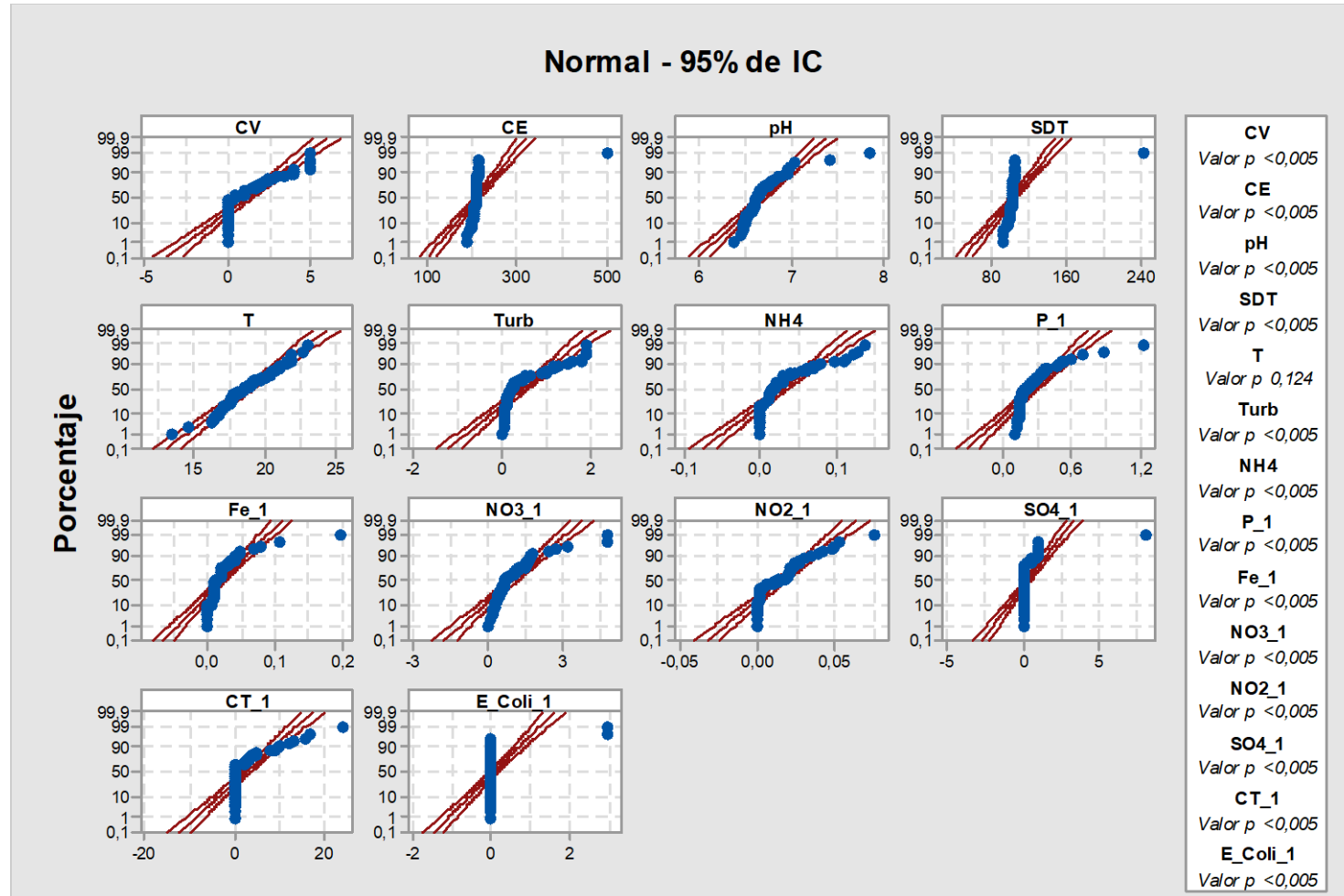


Anexo 9. Gráficas de probabilidad periodo 2014-2019

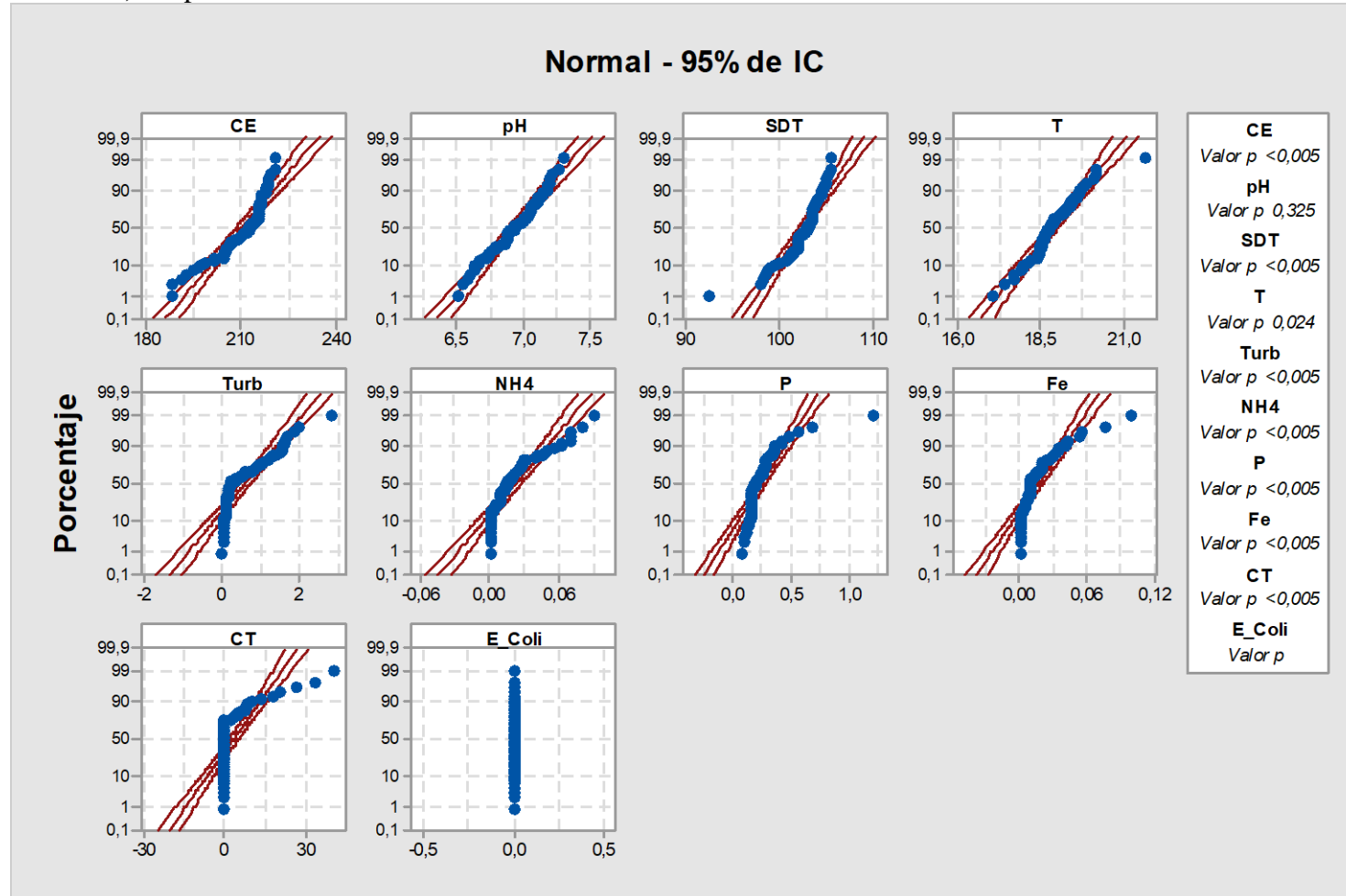
Anexo 9a). La Magdalena



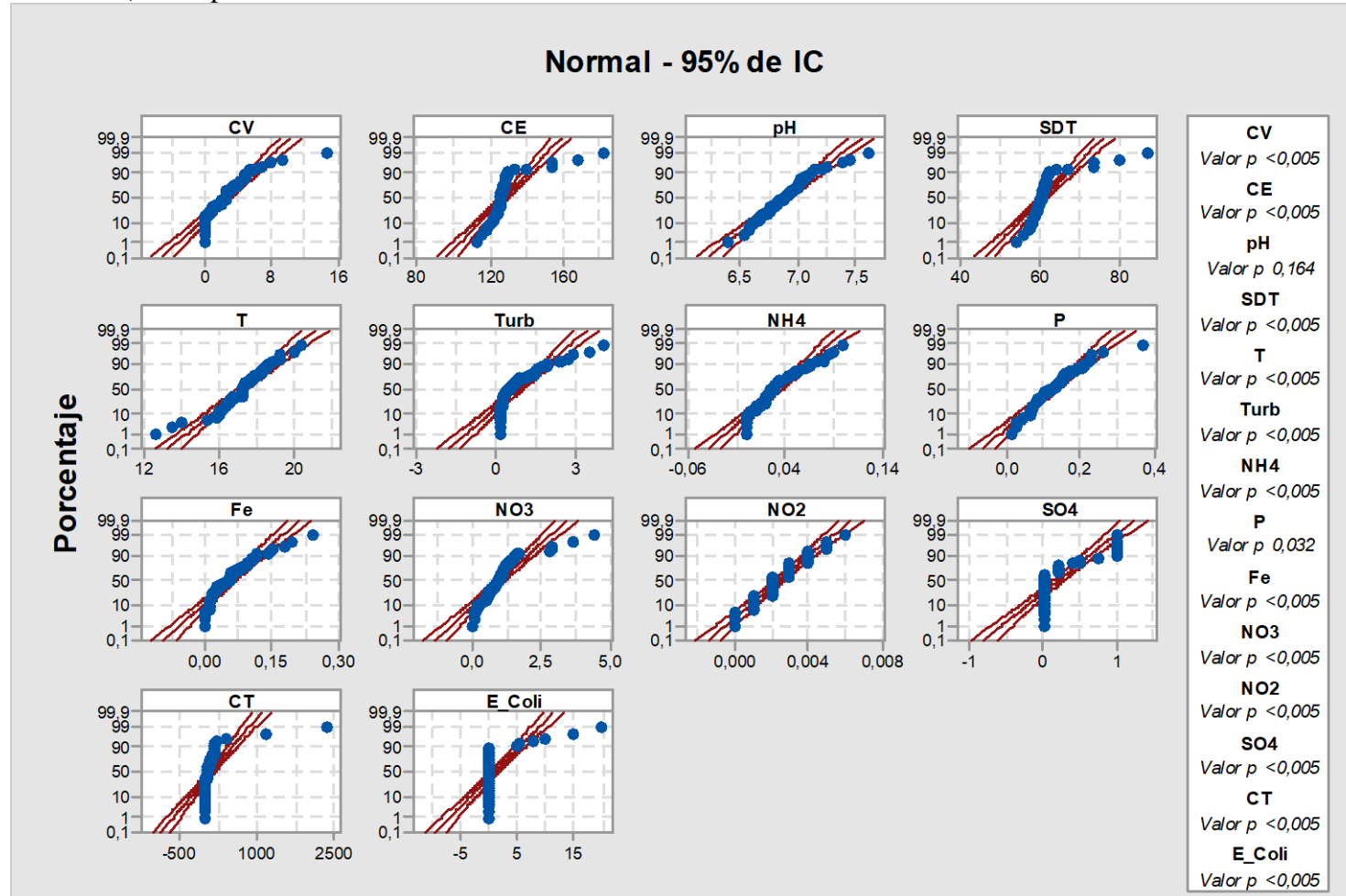
Anexo 9b). Punyaro



Anexo 9c). Neptuno



Anexo 9d). Turupamba



Anexo 10

Anexo 10a). Prueba de Kruskal- Wallis y U de Man Whitney a nivel espacial

	Prueba de Kruskal-Wallis						
	U de Mann-Whitney (Diferencia entre pares)						
	Tr-Mg	Tr-Py	Tr-Np	Mg-Py	Mg-Np	Py-Np	
Color Verdadero	0.000	0.014	0.000		0.380		
Conductividad Eléctrica	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
Potencial de Hidrógeno	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.00	0.000
Sólidos Disueltos Totales	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Temperatura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.796	0.001	1.000
Turbiedad	0.004	0.001	0.046	1.000	1.000	1.000	1.000
Amonio	0.000	1.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.753
Fósforo	0.000	0.00	0.00	0.00	0.013	1.000	0.074
Hierro	0.000	0.00	0.00	0.00	0.397	1.000	0.800
Nitratos	0.008	0.356	1.000	0.023	0.594	0.161	0.017
Nitritos	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Sulfatos	0.015	1.000	0.127		0.013		
Coliformes Totales	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
<i>E Coli</i>	0.000	1.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
Alcalinidad	0.000	0.000	0.000		0.00		
Calcio	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dureza calcica	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dureza total	0.000	0.000	0.000		0.000		

Mg: La Magdalena, Py: Punyaro, Np: Neptuno, Tr: Turupamba.

Valores marcados con negrilla: Rechazo de la hipótesis nula Ho ($p < 0.05$)

Anexo 10b) Prueba de Kruskal-Wallis a nivel temporal

Variación de medias a nivel temporal				
	La Magdalena	Punyaro	Neptuno	Turupamba
Conductividad Eléctrica	0.352	0.965	0.000	0.000
Potencial de Hidrógeno	0.300	0.007	0.252	0.000
Sólidos Disueltos Totales	0.040	0.000	0.446	0.000
Amonio	0.790	0.236	0.000	0.748
Fósforo	0.000	0.000		
Nitratos	0.000	0.000		0.000
Nitritos	0.000	0.796		0.000
Coliformes Totales	0.158	0.230	0.005	0.047
<i>E Coli</i>	0.065	0.000	1.000	0.001

Negrilla: Rechazo la hipótesis nula H_0 ($p < 0.05$)