

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Balance hídrico del acuífero del proyecto Curipamba, sector “Las Naves”
provincia de Bolívar durante el periodo (2011-2019)

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera en Geología

Presentado por:

Dayanna Andreina Pilco Pazmiño

GUAYAQUIL - ECUADOR

2019-2020

DEDICATORIA

A Alexis, Elena, Roberto, Alan y Roco.

A Mélida e Iriana.

A Joselyne, Emily e Israel.

Gracias por su paciencia y su
compromiso.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la empresa Curimining S.A. por brindar todo tipo de apoyo a la investigación. A la institución ESPOL por brindar los conocimientos para ser ejecutados.

Gracias a la comunidad "Las Naves" por albergar el proyecto minero.

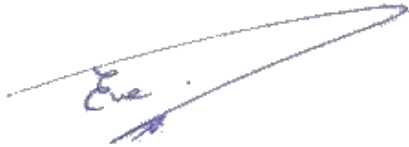
DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Yo, *Dayanna Pilco Pazmiño* doy mi consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Dayanna Andreina Pilco Pazmiño

EVALUADORES



Eva Rivas Pozo
PROFESOR DE LA MATERIA



Paola Romero Crespo
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El depósito “El domo” del proyecto minero “Curipamba”, a cargo de la empresa Curiming S.A apunta a ser un proyecto emblemático de segunda generación, con la futura explotación de cobre, plata, oro, molibdeno y zinc, posicionando a Ecuador como una posible potencia minera.

El proyecto se encuentra ubicado en una zona de gran pluviosidad, donde se debe tener un buen estudio hidrogeológico de la zona para evitar alguna afectación de fuentes hídricas en la futura explotación minera, por ende, se realiza el balance hídrico para conocer el comportamiento del agua subterránea y somera.

La pluviosidad del área de 2994 mm/año donde el 30 % se infiltra, el 37% de escurre y el 36 % se evapotranspira. El sistema se compone de dos acuíferos, el principal es somero con sellos de acuicludo de litología (Tobas y lapilli) y el secundario es inferior con sellos de acuitardo (Basalto, riolita, dacita) en profundidad. La gran cantidad de recarga es debida a la porosidad primaria y secundaria (litología y fracturación) que tienen las rocas para permitir el flujo hídrico.

El tipo de agua del acuífero corresponde al tipo bicarbonatada cálcica, bicarbonatada sódica, la calidad de ésta cumple con la mayoría de los límites máximos permisibles exceptuando coliformes totales, amonio, oxígeno disuelto y turbidez.

Palabras Clave: Balance hídrico, acuífero, hidroquímica, calidad de agua.

ABSTRACT

The deposit "The dome" of the mining project "Curipamba", in charge of the company Curiming SA aims to be an emblematic project of second generation, with the future exploitation of copper, silver, gold, molybdenum and zinc, positioning Ecuador as a Possible mining power.

The project is in an area of great rainfall, where you must have a good hydrogeological study of the area to avoid any involvement of water sources in the future mining, therefore, the water balance is performed to know the behavior of water underground and shallow.

The rainfall of the area of 2994 mm/year where 30% infiltrates, 37% drains and 36% evapotranspires. The system is made up of two aquifers, the main one is shallow with lithic acid seals (Tobas and lapilli) and the secondary one is lower with aquitard seals (Basalt, rhyolite, dacite) in depth. The large amount of recharge is due to the primary and secondary porosity (lithology and fracturing) that the rocks have to allow water flow.

The type of water in the aquifer corresponds to the type of calcium bicarbonate, sodium bicarbonate, its quality meets most of the maximum permissible limits except total coliforms, ammonium, dissolved oxygen and turbidity

Keywords: *Water balance, aquifer, hydrochemistry, water quality.*

ÍNDICE GENERAL

Contenido

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Preámbulo	1
1.1.1 Estudios previos	1
1.1.2 Justificación	2
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Ubicación.....	3
1.4 Diseño metodológico	3
1.5 Recursos	3
1.6 Objetivos.....	5
1.6.1 Objetivo general	5
1.6.2 Objetivos específicos	5
1.6.3 Alcance	5
1.7 Marco teórico	6
1.7.1 Estado de arte	12
2. METODOLOGÍA	16
2.1 Recopilación bibliográfica.....	17
2.2 Trabajo de campo	17
2.3 Homogenización de datos	18

2.4 Balance hídrico	19
2.4.1 Evapotranspiración.....	19
2.4.2 Escorrentía.....	20
2.4.3 Infiltración.....	21
2.4.4 Déficit y reservas.....	21
2.5 Piezometría	21
2.6 Caracterización hidroquímica	24
2.6.1 Calidad de agua.....	24
2.6.2 Balance iónico	24
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	25
3.1 Series meteorológicas: Precipitación y temperatura	25
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXO	51

ABREVIATURAS

msnm Metros sobre el nivel del mar

PNRH Plan nacional de Recursos hídricos

l/habitante/día Litros por cada habitante al día

m³/ha/año metros cúbicos por hectárea al año

SENAGUA Secretaría nacional del agua

FAO Organización de naciones unidas

TPR regresión de dos fases

PMFT Prueba máxima F penalizada

SNHT Prueba de Homogenización Normal Estándar

IFC Industry Foundation Classes

INAMIH Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

INEN Servicio Ecuatoriano de normalización

TULSMA Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

OMS Organización de las naciones unidas

SIMBOLOGÍA

pH potencial de hidrógeno

mg/L miligramos sobre litros

meq/L miliequivalentes por litros

mm/año milímetros por año

mm milímetros

°C grados centígrados

m metros

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Distribución del uso consuntivo del agua del Ecuador. Fuente: SENAGUA [3].....	11
Figura 3. 1 Grafica de la relación de precipitación y piezometría en el depósito "El domo".....	37
Figura 3. 2 Evolución hidroquímica del muestreo Curi-37	41
Figura 3. 3 Evolución hidroquímica del muestreo Curi-16	42
Figura 3. 4 Evolución hidroquímica del muestreo Curi-18	43
Figura 3. 5 Diagrama de Piper del muestreo de Curimining S.A dentro del periodo (2011-2018)	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Cronograma de actividades	3
Tabla 1. 2 Estaciones meteorológicas correspondientes al área de estudio.....	6
Tabla 1. 3 Métodos de rellenos de series meteorológicas	13
Tabla 1. 4 Métodos de determinación de Balance Hídrico.....	15
Tabla 2. 1 Emparejamiento de estaciones de la zona de estudios para la homogenización de sus series meteorológicas	19
Tabla 2. 2 Determinación de la evapotranspiración Mediante la metodología de Thornthwaite para el año 2011, estación Naves Chico.....	20
Tabla 2. 3 Unidades hidrogeológicas del “Arco volcánico Macuchi” correspondientes a la zona del depósito “El domo” Proyecto Curipamba, definidas en función de su granulometría.....	23
Tabla 3. 1 Precipitación medias anuales para las estaciones de la zona de estudio	25
Tabla 3. 2 Serie de precipitación homogenizada de la estación Naves Chico EMC-1 ..	26
Tabla 3. 3 Serie de temperatura homogenizada de la estación Naves Chico EMC-1 ...	26
Tabla 3. 4 Evapotranspiración de las Naves Chico EMC-1 por el método de Thornthwaite	29
Tabla 3. 5 Escorrentía determinada en los diferentes periodos de retorno	29
Tabla 3. 6 Determinación de la reserva total máxima en base a la litología.....	30
Tabla 3. 7 Calculo del déficit por año en base a la reserva máxima disponible	31
Tabla 3. 8 Calculo de excedente por año en base a la reserva máxima disponible	31
Tabla 3. 9 tasa de recarga (r) mediante la metodología de Turc	32
Tabla 3. 10 tasa de recarga (r) mediante la metodología de Cheeturvedi.....	33
Tabla 3. 11 Proyección del uso de agua consutivo del cantón Las Naves y Curimining S.A.....	34

ÍNDICE DE PLANOS

Mapa 1. 1 Ubicación de las concesiones mineras correspondientes al proyecto Curipamba	4
Mapa 1. 2 Estaciones meteorológicas del INAMHI: “Naves Chico” y “Barranco” propiedad de Curimining.	7
Mapa 1. 3 Microcuencas hidrográficas en la zona operativo del depósito el domo en la concesión las naves	8
Mapa 1. 4 Ubicación de pozos piezométricos ubicados dentro de la concesión de Curimining.....	9
Mapa 1. 5 Puntos de monitoreo de caudales bajos en el área de influencia de la zona operativa de Curiminig S. A.....	10
Mapa 3. 1 Mapa de isotermas dentro de las microcuencas correspondientes al área de influencia minera en las concesiones en la empresa Curimining S.A.	27
Mapa 3. 2 Mapa de isoyetas dentro de las microcuencas correspondientes al área de influencia minera en las concesiones en la empresa Curimining S.A.	28
Mapa 3. 3 Mapa piezométrico del depósito “El domo”	36
Mapa 3. 4 Perfil hidrogeológico del depósito “El domo”	38
Mapa 3. 5 Diagramas de Stiff de los muestreos del proyecto Curipamba.....	45

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La hidrogeología dentro de un proyecto minero es una prioridad, debido a que es fundamental estudiar las aguas subterráneas por su rol en el ecosistema, además de resguardar la calidad del agua, satisfacer la demanda de la comunidad y con la finalidad de evaluar la necesidad de drenaje en la mina.

El balance hídrico es una componente de la hidrogeología que ayuda a optimizar el uso del agua, para que ésta no se vea afectada por las actividades de uso doméstico o las actividades extractivas. Además, considera factores como: clima, evapotranspiración determinar el comportamiento del flujo de agua para que ésta no se vea afectada por las actividades extractivas. Además, considera factores como: clima, evapotranspiración, recarga y adicionalmente los usos del agua tanto de la comunidad como los del área operativa.

Curipamba es un proyecto minero metálico a cargo de la empresa Curimining S. A. desde el 2006; se posiciona como un proyecto de segunda generación y en mira a ser un proyecto minero emblemático del Ecuador que genere fuente de empleo. Actualmente la empresa está en la etapa de exploración, y este proyecto de materia integradora contribuye al desarrollo del conocimiento de los recursos hídricos para la línea de base del proyecto minero.

1.1 Preámbulo

1.1.1 Estudios previos

La compañía RTZ Mining PLC comienza sus exploraciones en el año de 1991 con un estudio regional de identificación de sedimentos de vertientes cerca del proyecto Curipamba[1]. Posteriormente Curimining toma a cargo el proyecto, donde RPA [1] estima que, para el futuro procesamiento, la demanda hídrica de 1 750 ton/día y teniendo como principal fuente el río Runayacu.

El único estudio hidrológico realizado en la zona corresponde al proyecto de grado realizado por Robles y Cundury [2], donde se trata los componentes de balance hídrico e hidroquímica durante el periodo 2011-2014.

1.1.2 Justificación

El proyecto es enfocado en el balance hídrico, más no en un estudio hidrogeológico completo. el balance hídrico es un componente de todo estudio hidrogeológico que analiza las entradas y salidas de agua con el fin de conocer su comportamiento para gestionar mejor su aprovechamiento o evitar alguna afectación en el futuro.

Las empresas mineras invierten en estudios hidrogeológicos que deben realizarse a lo largo de la vida de la mina. Esto es necesario tanto para evitar que el agua no entorpezca la propia explotación minera, como para que el agua no se vea afectada por las actividades extractivas.

1.2 Planteamiento del problema

El desarrollo minero extractivo ha extendido su avance en Ecuador. Las zonas mineras y los targets se encuentran en mayor parte en las regiones de Sierra y Oriente, donde la precipitación es elevada.

La presencia de agua en la explotación minera es un grave problema, tanto ambiental como económico. El agua al contacto con litología mineralizada adquiere la composición química de ésta, volviéndola ácida o con presencia anómala de sólidos disueltos, alterando así el ambiente donde el flujo hídrico circula.

Por otra parte, al verse interferida la explotación por exceso de agua ésta debe ser drenada. Además, la empresa minera tiene la obligación de tratar el agua que se altere en la explotación. El uso de medidas de mitigación como son el drenaje y tratamiento de aguas, pueden generar gastos elevados sino se considera desde el inicio de la actividad, la utilización de medidas de control y prevención.

1.3 Ubicación

El proyecto está situado en el cantón Las Naves, parte central-oeste del Ecuador. Las Naves pertenece a la provincia de Bolívar, limita al Norte con Quinsaloma, al este con Guaranda, al oeste con Ventanas y al sur con Echendía. Dentro del cantón se encuentran las concesiones mineras “Las Naves”, “Las Naves 1”, “Las Naves 2”, “Las Naves 3”, “Las Naves 5”, “Jordan 1”, “Jordan 2” (Mapa 1. 1, pág. siguiente), las cuales pertenecen al proyecto Curipamba. El depósito el Domo se encuentra ubicado en la concesión “Las Naves”.

1.4 Diseño metodológico

Las actividades programadas en el desarrollo del proyecto se detallan de manera general en la Tabla 1. 1.

Tabla 1. 1 Cronograma de actividades

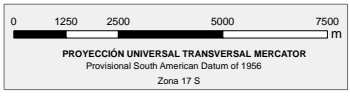
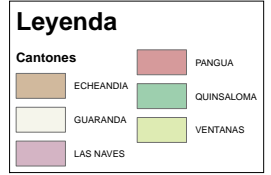
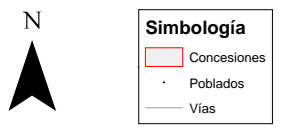
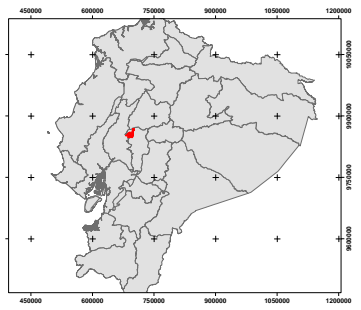
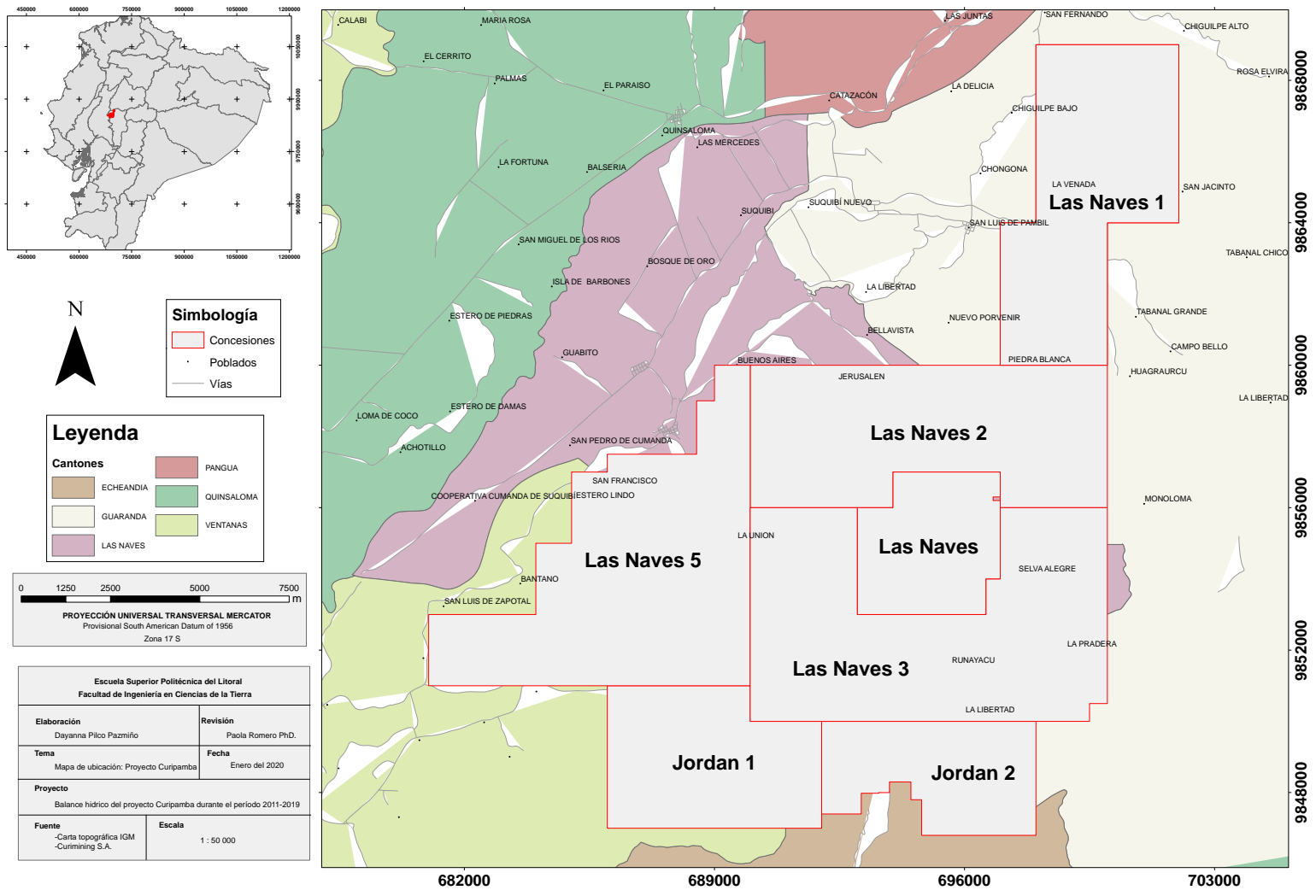
Actividades	Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Recopilación bibliográfica	X	X	X	X												
Redacción de capítulo 1					X	X	X									
Metodología								X								
Procesamiento de información									X	X	X	X				
Análisis de resultados y conclusiones													X	X	X	

1.5 Recursos

Se cuenta con información meteorológica en base a las estaciones del INAMIH (1990-2013) y estaciones agrometeorológicas de Curimining (2011-2018). Donde 3 estaciones de este conjunto disponen de datos de temperatura.

La información piezométrica y de aforos ha sido obtenida de la base de datos de Curimining S.A. Los análisis fisicoquímicos han sido realizados por la empresa GRUENTEC Cía. Ltda. con una frecuencia semestral desde el 2011 hasta el 2018.

MAPA DE UBICACIÓN: PROYECTO CURIPAMBA



Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra	
Elaboración Dayanna Pilco Pazmiño	Revisión Paola Romero Ph.D.
Tema Mapa de ubicación: Proyecto Curipamba	Fecha Enero del 2020
Proyecto Balance hídrico del proyecto Curipamba durante el periodo 2011-2019	
Fuente -Carta topográfica IGM -Curriming S.A.	Escala 1 : 50 000

Mapa 1.1 Ubicación de las concesiones mineras correspondientes al proyecto Curipamba

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Estimar el balance hídrico en el acuífero del proyecto “Curipamba” sector “Las Naves” durante el periodo 2011-2019 mediante análisis de información climática, hidrológica, hidrogeológica y usos del agua para el resguardo de cuerpos hídricos que abastecen a sectores aledaños.

1.6.2 Objetivos específicos

Determinar unidades y parámetros hidrogeológicos mediante jornadas de campo para el análisis de la influencia de la actividad minera

Realizar análisis hidroquímicos para determinar tipos de fuentes de agua y posibles conexiones hídricas.

Calcular el balance hídrico en el proyecto Curipamba mediante el procesamiento de datos obtenidos en laboratorio y campo.

1.6.3 Alcance

Para la determinación del balance hídrico se han de necesitar datos de: meteorología, piezometría, flujometría y análisis fisicoquímicos. Los datos de todas las estaciones meteorológicas tienen grandes faltantes en años y meses. Además, solo 3 estaciones tienen datos de temperatura.

Las mediciones de piezometría han sido tomadas en pozos de perforación. Estos pozos no habían sido adaptados a piezómetros y han presentado dificultades técnicas y sociales, por lo cual no existe información de éstos en ciertos periodos.

Los análisis fisicoquímicos han sido tomados dos veces por año, pero estas mediciones no son representativas de las épocas húmeda y seca de la zona.

Las mediciones de caudal en los ríos se han realizado únicamente en puntos donde el caudal es bajo debido a que no se contaba con equipamiento para la medición de caudales altos.

1.7 Marco teórico

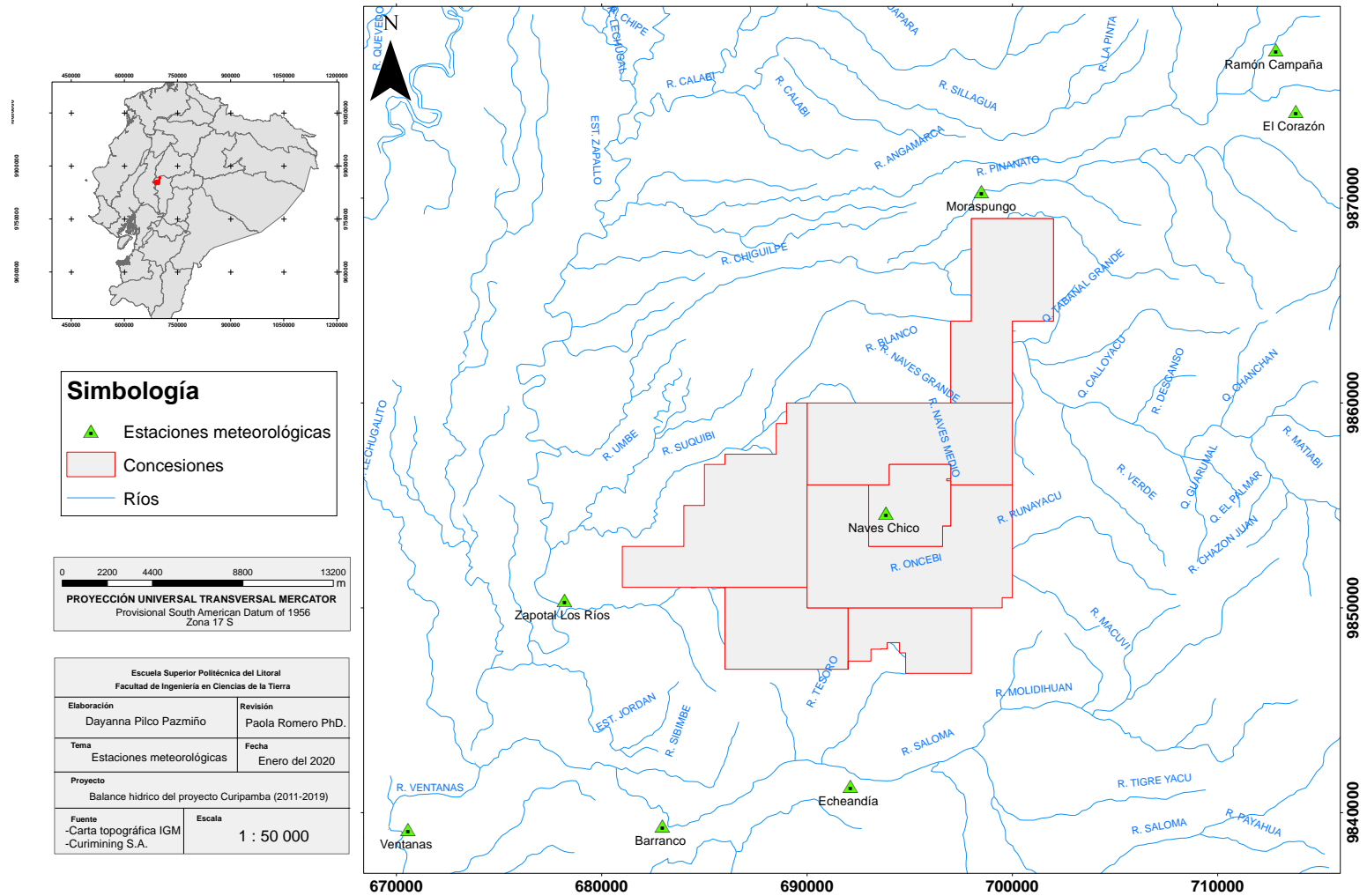
El proyecto se encuentra ubicado en la subcuenca del río Babahoyo, que a su vez está alojado en la cuenca del río Guayas. Se han delimitado las microcuencas Mapa 1. 3 en el área operativa del depósito “El domo” en la concesión las naves correspondientes a afluentes de los ríos Naves Chico, Naves Grande, El silencio, Las Naves y Selva Alegre.

Los datos de precipitación y temperatura se han tomado de las estaciones descritas en la Tabla 1. 2 representada en el Mapa 1. 2. Curimining ha realizado monitoreos de piezometría, donde en 24 piezométricos que corresponden a pozos perforados por exploración los cuales han sido adaptados mediante tubos PVC para la medición del parámetro piezométrico Mapa 1. 4. Por otra parte, desde el año 2011 hasta la actualidad, se cuenta con una red de 21 puntos monitoreo de caudal Mapa 1. 5 donde se han considerado exclusivamente los puntos donde los caudales son bajos.

Tabla 1. 2 Estaciones meteorológicas correspondientes al área de estudio.

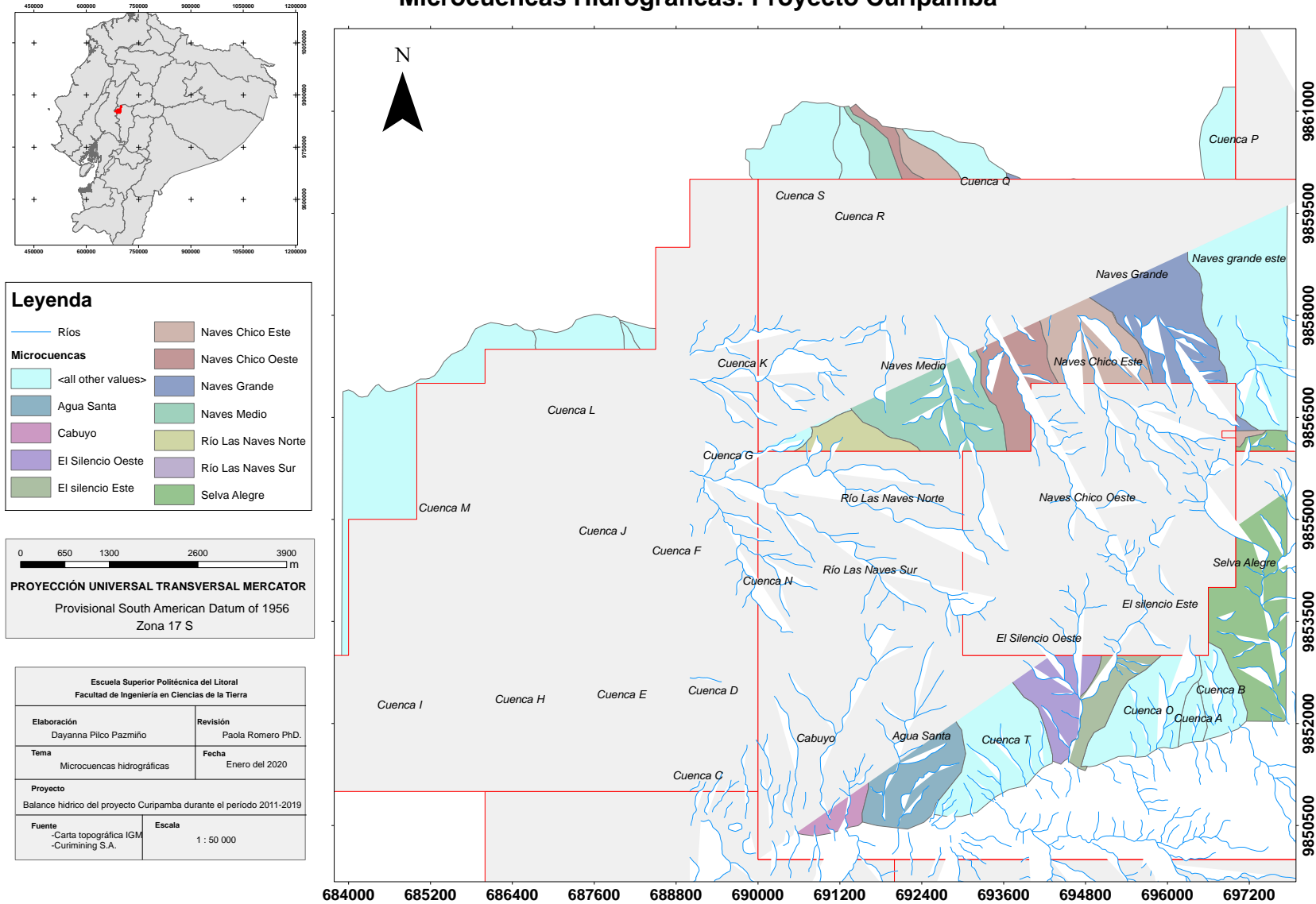
Código	Nombre	Tipo	Longitud	Latitud	Z
EMC1	Naves Chico	Agrometeorológica	693839	9854635	2929
EMC2	Barranco	Agrometeorológica	682957	9839357	2695.
M123	El Corazón	Meteorológica	713808	9874232	2473
M368	Moraspungo	Meteorológica	698499	9870310	2890
M370	Ramón Campaña	Meteorológica	712834	9877234	2467.8
M383	Echeandía	Meteorológica	692110	9841286	2213
M465	Ventanas	Meteorológica	670567	9839169	2580
M471	Zapotal Los Ríos	Meteorológica	678183	9850378	2269

Estaciones meteorológicas: Proyecto Curipamba



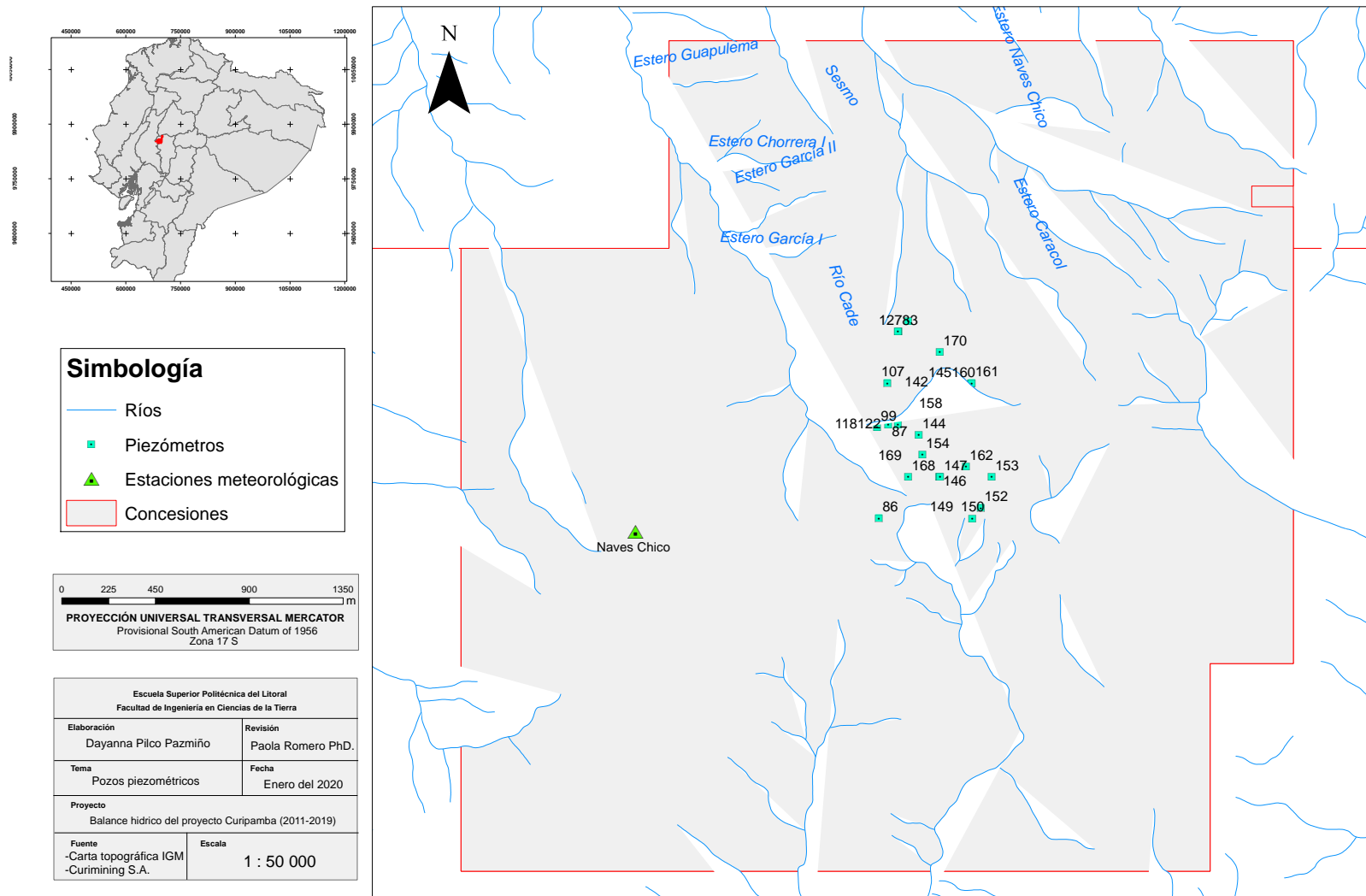
Mapa 1. 2 Estaciones meteorológicas del INAMHI: “Naves Chico” y “Barranco” propiedad de Curimining.

Microcuencas Hidrográficas: Proyecto Curipamba



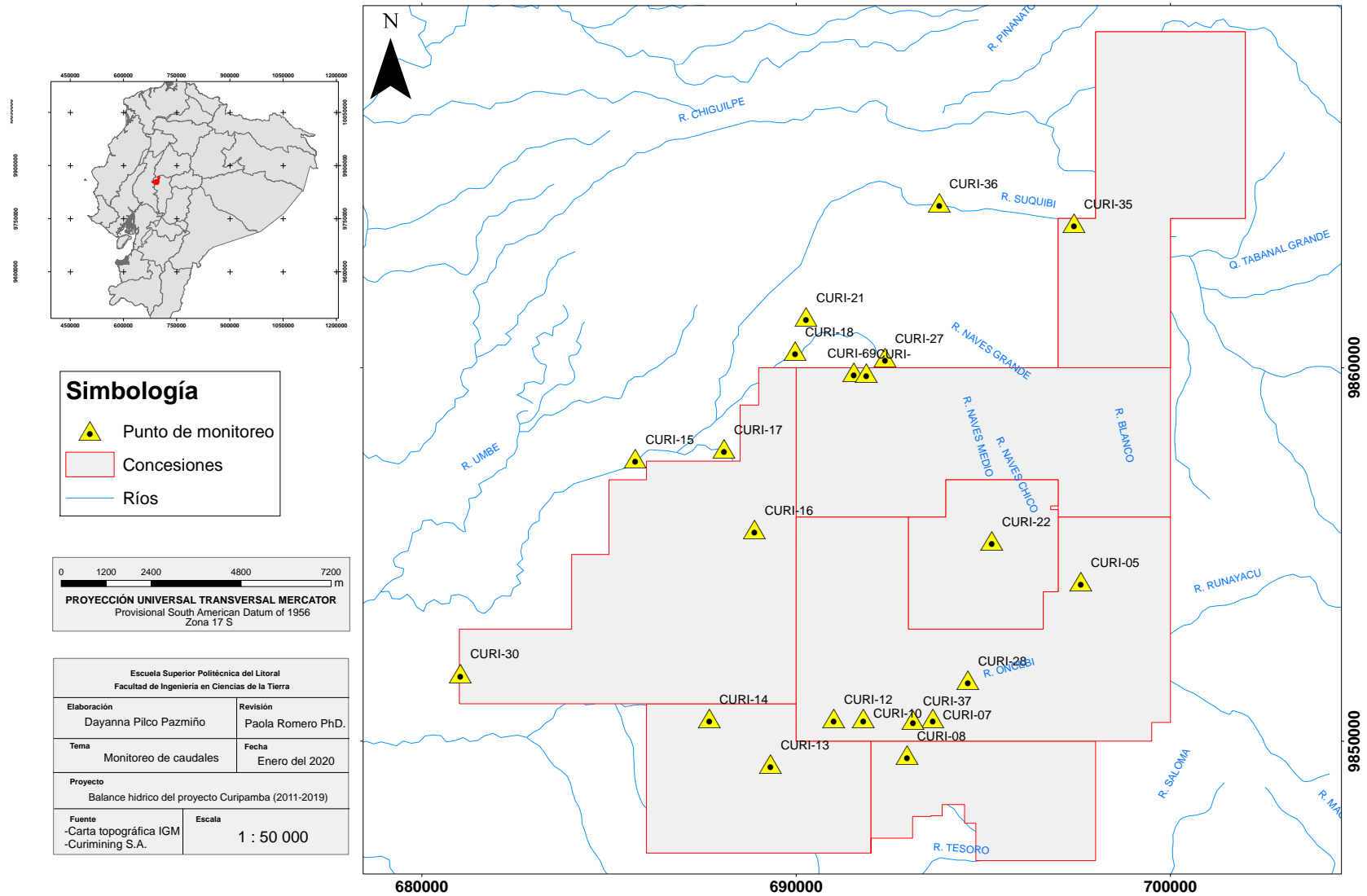
Mapa 1.3 Microcuencas hidrográficas en la zona operativo del depósito el domo en la concesión las naves

Pozos piezométricos: Proyecto Curipamba



Mapa 1. 4 Ubicación de pozos piezométricos ubicados dentro de la concesión de Curimining

Monitoreo de caudales



Mapa 1.5 Puntos de monitoreo de caudales bajos en el área de influencia de la zona operativa de Curimining S. A

Usos del agua

Ecuador, país agrícola, según las estadísticas de SENAGUA , destina la mayor parte de sus recursos hídricos en esta actividad (80%), seguido del uso doméstico (13%) y por último es uso industrial (7%)[3].

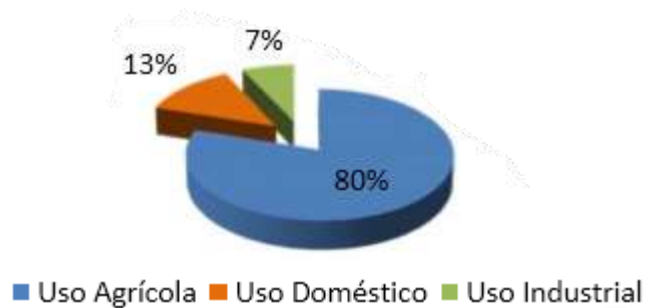


Figura 1. 1 Distribución del uso consuntivo del agua del Ecuador.

Fuente: SENAGUA [3].

Consumo humano

El PNRH predecía en el 2005 una demanda de 235 l/habitante/día con 15,5 millones de habitantes [3]. Hoy se supera esta cifra con 17 millones de ecuatorianos aproximadamente[4].

Minería

El porcentaje de agua usado en minería es muy bajo en Ecuador. En el proyecto Curipamba se pretende que el río Runayacu sea la principal fuente de abastecimiento [1]. El consumo de agua por parte de Curimining estima a 2 400 m³ por día para procesamiento en la planta [1].

Agrícola

El PNRH determinó a nivel nacional, una demanda de 12.200 m³/ha/año. Mientras que el Censo Agropecuario, establece que el área regada fue de 853 mil hectáreas del año 2001[3].

1.7.1 Estado de arte

El balance hídrico ha sido ampliamente usado en la agricultura, para conocer la tasa de evapotranspiración que tiene una zona, determinando así la cantidad de agua para irrigación [5]. Los diferentes métodos de aplicación de balance de aguas se han extendido en todas las áreas de ingeniería incluyendo la industria minera.

La minería ha ido evolucionando con el paso de los años y con ello las oportunidades de mejorar las técnicas de extracción de aguas, eficiencia de uso y el drenaje de operaciones mineras [6]. Conocer el balance hídrico de la zona ayuda a conocer cuánta agua se tendrá que manejar en las actividades extractivas y como esto afectará.

El método aplicado dependerá de los datos de entrada que se tenga y con el mejor ajuste a la zona. El método Hargreaves - Samani y Thornthwaite es comparado en zonas cálidas como África del Sur donde las condiciones climáticas cambian por ende las ecuaciones deben ser calibradas [7]. Por otra parte, en zonas más húmedas como la cuenca de Noguera Ribagorzana, España, se determinó mediante Thornthwaite la cantidad de agua infiltrada y con ello la lluvia útil para el aprovechamiento del recurso hídrico en la zona.

El agua dentro de la minería es la que más fácil se puede ver afectada si no se tiene un buen estudio hidrogeológico, entonces se usan análisis fisicoquímico para determinar la concentración de diferentes metales como Cu, Fe, Zn etc. en áreas aledañas [8].

Métodos de homogenización de series meteorológicas.

Los datos de toda serie de meteorológica están sujetos a errores ya sea por instrumentación, operador, ambiente, procedimiento de recolección, etc [9]. Estos datos deben ser corregidos mediante métodos estadísticos.

Las series meteorológicas son tratadas bajo la hipótesis de no ser una serie homogénea y que ésta experimenta por lo menos un punto de cambio o faltante [9]. Estas series

pueden ser descritas mediante ecuaciones de regresión con términos de error [10]. Si bien se toman estas suposiciones en ciertos escenarios climáticos pueden ser irrealistas.

En la Tabla 1. 3 se muestran los distintos tipos de métodos. Algunos de ellos siguen una tendencia lineal como la Regresión de dos fases (TPR) y Prueba F máxima penalizada (PMFT), pero los enfoques de cada uno son distintos. TPR trata a todo el rango de la serie como datos individuales sin importar la magnitud que tenga [11]. Por otra parte, la prueba máxima penalizada F (PMFT) trata la serie en conjunto sin importar la ubicación del punto de cambio siendo estos no muy repentinos.

El método de la razón implica estaciones con datos proporcionales entre sí, estableciendo un coeficiente entre ellos relacionando los datos entre si [11], mientras que la Prueba de Homogenización Normal Estándar (SNHT) requiere de una serie un poco más homogénea, y cuando hay puntos de cambio de mayor magnitud suele tener ciertos errores en el reconocimiento de éstos, además influye la ubicación del punto de cambio en la serie.

Tabla 1. 3 Métodos de rellenos de series meteorológicas

Método	Aplicabilidad
SNHT	Datos homogéneos y muestras iguales
PMFT	En cambios no muy repentinos en series
TPR	No importa la ubicación del punto de cambio
Método de la razón	Datos proporcionales

Métodos de determinación de balance hídrico

El balance hídrico se basa en el principio de la conservación de masas, el cual iguala la variación del volumen de aguas con las entradas y salidas de la cuenca [12]. Existen algunos métodos para estimar el balance hídrico de un acuífero, no hay uno mejor que

otro para esta determinación; se trata de identificar el que más se ajuste a los datos de entrada y a la zona de estudio además del correcto procesamiento de datos.

La FAO (Organización de Naciones Unidas) sugiere aplicar métodos más tradicionales de cálculo de balance de aguas pero en países en vías de desarrollo donde la base de datos contiene inconsistencias se utilizan métodos ajustables como Hargreaves [5]. El método de Hargreaves es usado ampliamente en el mundo de la agricultura ya que incluye las variables de temperatura y radiación solar [13]. A pesar de que estas variables por sí solas no pueden ajustarse a una zona, es posible realizar la calibración de la fórmula manteniendo una constante que se ajusta a la vegetación de la zona, de esta manera se disminuye el error de factores como dirección de viento, enfriamiento o calentamiento del área referente.[5]

Uno de los componentes principales que en la mayoría de los métodos se desprecia es el rol de la evapotranspiración, Thornthwaite considera éste y la precipitación como datos de entrada [14]. La precipitación y evapotranspiración son causadas debido a factores meteorológicos distintos y esta evapotranspiración es la que determina la infiltración dentro del terreno natural [15]. Gracias al cálculo de la evapotranspiración se conoce de manera más certera el clima de una zona.

Aparte del método de Thornthwaite, el método de Turc y Chaturvedi también considera las variables de temperatura y precipitación como método de entrada para la determinación de la tasa de recarga al acuífero, con la diferencia de que Turc usa la temperatura media anual y Chaturvedi únicamente la precipitación. El método de Chaturvedi es comúnmente usado en zonas cálidas y de baja pluviosidad (mayores a 380 mm/año) como la mayoría de sus estudios en India, con precipitaciones mayores al rango estimado, este podría tener errores [16].

El método de Blaney-Criddle relaciona temperatura, duración de la estación de crecimiento, precipitaciones mensuales y consumo de agua. A partir de estos resultados, se desarrolla una fórmula empírica, adiciona las variables de coeficientes empíricas según las épocas y el uso de agua en plantas (irrigación). [17] Otra de las opciones es utilizar softwares que crean modelos realistas y simplificados de la hidrogeología del lugar. como GoldSim Technology Group LLC [18] o Hidro-SIG [19].

Tabla 1. 4 Métodos de determinación de Balance Hídrico

Método	Datos de entrada
Hargreaves Samani	Temperatura, radiación solar.
Turc	Temperatura, precipitación.
Cheeturvedi	Precipitación.
Thornthwaite	Precipitación, temperatura.
Blaney-Criddle	Temperatura, Irrigación.
Softwares	Varios.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para la realización del proyecto se ha hecho la recopilación bibliográfica de datos de entrada: climáticos, geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la zona, además de jornadas de campo para el entendimiento de la toma de datos y así entender el comportamiento de estos para su procesamiento y posterior determinación del balance hídrico y calidad de agua. Así como se muestra en la Imagen 2. 1

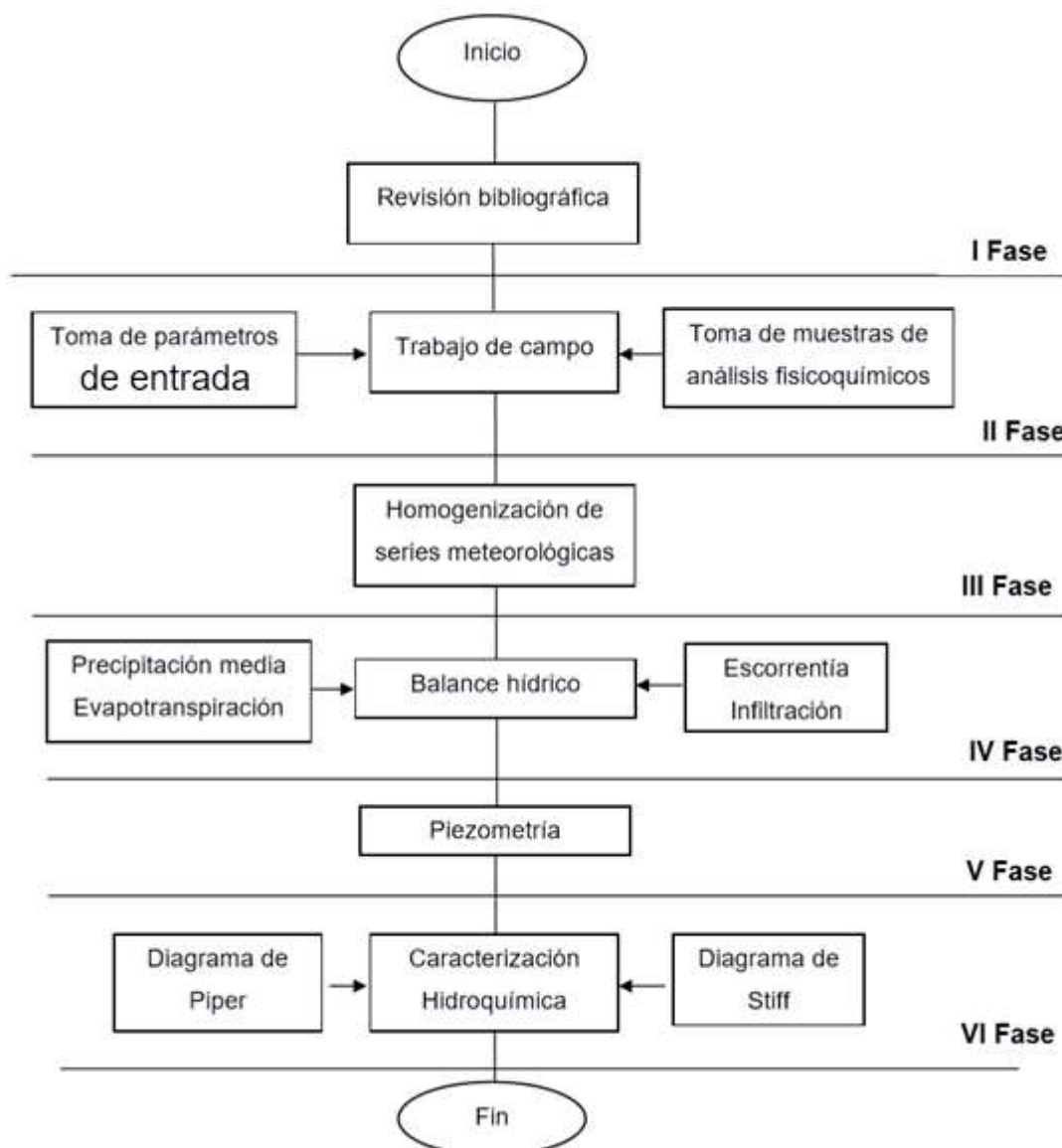


Imagen 2. 1 Esquema de la metodología usada en la determinación del balance hídrico del proyecto Curipamba (2011-2019)

2.1 Recopilación bibliográfica

Se realiza la búsqueda de información científica, estudios previos del proyecto, así como de las distintas metodologías usadas en el procesamiento de datos.

2.2 Trabajo de campo

Precipitación

Los datos de precipitación de las estaciones Curimining (EMC-1, EMC-2) son descargados directamente desde los equipos mensualmente, debido a problemas de memoria o de humedad. Por otra parte, los datos de las estaciones del INAMHI están disponible en la página oficial.

Aforos

El monitoreo de caudales ha sido realizado únicamente en puntos donde el caudal es bajo, los caudales altos han sido descartados debido a que se no se contaba con equipo para su medición.

El método de secciones es aplicado en la determinación del parámetro. El canal es seccionado en área iguales. En campo se mide la longitud del aforo, de esta sección se determinan tramos de 10 cm cada uno y en cada tramo se realiza la medición de velocidad y profundidad. Teniendo las mediciones de área y velocidad se determina el caudal medido [20] tal como en la ec 1.

$$Q = vA \qquad \text{ec 1}$$

Piezometría

Los datos fueron obtenidos mediante el uso de una sonda que es introducida en los pozos piezométricos hasta llegar al nivel saturado de los pozos.

Análisis fisicoquímicos

Los muestreos para análisis fisicoquímicos son tomados por el personal de Curimining capacitados por la empresa GRUENTEC. Se sigue el modelo IFC y el modelo TULSMA. Los muestreos se realizan con una periodicidad semestral desde el (2011-2018) y desde el mes de noviembre del 2019 se han realizado mensualmente (éstos últimos no fueron incluidos en este estudio).

2.3 Homogenización de datos

Se han usado los datos de precipitación y temperatura de las estaciones del INAMIH cercanas al proyecto, además de las estaciones instaladas por Curimining. Debido a que el comportamiento de las estaciones es muy similar, se usa el método de la razón para determinar un factor de proporcionalidad entre ellas y así determinar el dato faltante como se muestra en la ec 2

$$r = \frac{\sum bi}{\sum ai} \quad \text{ec 2}$$

r: factor de proporcionalidad

bi: serie incompleta

ai: serie completa

Debido a que la estación “El corazón” tiene la mayoría de sus datos completos y con poco error, es utilizada como la estación principal de confianza.

Las estaciones se han procesado como se muestra en la Tabla 2. 1, donde las series ya homogenizadas se han tomado como series completas. Además, en el caso de la estación “Zapotal – Los ríos” se ha usado una variante del método de la razón mostrado en la ec 3 tomando a dos o más estaciones de referencia.

$$Px = \frac{Pmx}{n} * \left(\frac{Pa}{Pma} + \frac{Pb}{Pmb} + \dots + \frac{Pn}{Pmn} \right) \quad \text{ec 3}$$

n : Número de estaciones

Pb : Dato de la serie B

Px : Dato faltante

Pmx : Promedio de la serie faltante

Pa : Dato de la serie a

Pma : Promedio de la serie a

Tabla 2. 1 Emparejamiento de estaciones de la zona de estudios para la homogenización de sus series meteorológicas

Estación completa	Estación incompleta
Corazón	Ramón Campaña
	Ventanas
Ramón Campaña	Moraspungo
Ventanas	Echeandía
Zapotál - Los ríos	Ventanas
	Echeandía

2.4 Balance hídrico

Se ha determinado el uso único de la estación EMC-1 Naves Chico para la determinación del balance hídrico, ya que es que aquí donde están agrupadas las microcuencas del proyecto.

2.4.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración se determina mediante el método de Thornthwaite, utilizando los índices de calor anual y mensual, tal como se muestra en la ec 4 y ec 5. Además, se corrige la temperatura en función de las horas de sol según la latitud de la zona tal como se muestra en el la **Tabla 2. 2**, estos cálculos se realizan en las hojas de Excel de la Universidad de Salamanca [21].

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \text{ec 4}$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad \text{ec 5}$$

Tabla 2. 2 Determinación de la evapotranspiración Mediante la metodología de Thornthwaite para el año 2011, estación Naves Chico

	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Total
T (°C)	19.8	19.2	19.3	19.3	20.5	20.4	20.5	20.6	20.6	19.7	19.3	20.0	19.8	
I (°C)	8.0	7.7	7.7	7.7	8.4	8.4	8.5	8.5	8.5	7.9	7.7	8.1	8.0	97.31
ETP sin corr (mm)	72.3	68.2	68.6	68.8	77.7	77.1	78.1	78.8	78.8	71.5	68.8	73.8	72.3	
nºdías mes	30	31	30	31	31	28.25	31	30	31	30	31	31	30.0	
nº horas luz	12.1	12.1	12	12	12	12	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1	
ETP corr. (mm)	72.9	71.1	68.6	71.1	80.3	72.6	81.4	79.4	82.8	72.7	72.3	77.5	72.9	902.8

2.4.2 Escorrentía

Según la metodología de Chow et al [22], el coeficiente de escorrentía puede ser definida en función de la pendiente y la cobertura vegetal del suelo, y ésta es multiplicada por la precipitación da finalmente la escorrentía.

$$\text{Escorrentía} = \text{Coeficiente de escorrentía} * \text{Precipitación} \quad \text{ec 6}$$

2.4.3 Infiltración

La ecuación de balance hídrico (ec 6) es usada para la determinación de la infiltración [23] ya que los demás parámetros han sido determinados. Cabe destacar que, el flujo hídrico infiltrado dentro del subsuelo también es dinámico y ocurre escorrentía subterránea la cual no es tomada en cuenta para el almacenamiento en el acuífero.

$$\text{Infiltración} = Pm - \text{Escorrentía} - \text{Evapotranspiración} \quad \text{ec 6}$$

2.4.4 Déficit y reservas

El método de Thornthwaite-Mather considera la litología del suelo para calcular el agua total disponible máxima (TAWmax) que puede retener el suelo. Los datos de entrada son precipitación media mensual y evapotranspiración, ésta puede ser calculada por cualquier otro método, pero en este caso se ha seguido el mismo método de Thornthwaite para realizarlo.

En el procesamiento, se determina la ETR (evapotranspiración real) que es la evapotranspiración limitada a la precipitación de la zona. Además, se calcula el déficit, la reserva y el excedente. La reserva máxima se determina mediante la ec 7 donde TAW max (Maximum Total available water) está en términos de la profundidad radicular (raíces) y de TAW que representa la capacidad que tiene un suelo para retener agua y que está disponible para el uso de las plantas.

$$TAW_{max} = TAW * \text{Profundidad radicular (m)} * 1000 \quad \text{ec 7}$$

2.5 Piezometría

Los niveles freáticos han sido tomados mensualmente desde 2011 al 2018 teniendo valores entre 800-980 msnm. Estas mediciones son promediadas para cada año teniendo así hasta dónde llega la capa de agua dentro del subsuelo.

2.5.1 Unidades hidrogeológicas

La litología del lugar está muy bien definida debido al manejo de exploraciones geológicas de la empresa Curimining S.A, esta ventaja es utilizada para definir las unidades hidrogeológicas en función de su granulometría y conexión de espacios intersticiales que permiten la permeabilidad y porosidad de una roca para albergar el acuífero.

Se han definido las siguientes unidades hidrogeológicas identificadas en la Tabla 2. 3:

Acuífero

Esta unidad hidrogeológica está compuesta de rocas de granulometría arenosa, además está altamente fracturada. La litología consiste en brechas, andesitas y hialoclastitas. Estas son altamente porosas y permeables, la mayoría se encuentra alojada en la parte somera del depósito lo que permite la circulación del flujo hídrico.

Acuitardo

La unidad está compuesta de roca porosa pero no muy permeable, esta litología corresponde a basalto, riolita y diorita que a pesar de ser de granulometría apreciable pueden tener un cemento arcilloso, lo que dificulta su permeabilidad, sin embargo, gracias al alto grado de fracturación es posible que esta circule de una manera ventajosa.

Acuicludo

La unidad está compuesta de roca porosa pero no permeable, retiene el agua, pero no deja circularla, en estas se encuentra tobas dacíticas, riolíticas y sedimentarias y Lapillli las cuales están compuestas de matriz arcillosa-limosa.

Acuifugo

Estas rocas son cristalinas e impermeables, a pesar de estar en un sistema de fallas, se ha considerado que estas son las que delimitan al acuífero, ya que estas fallas son inferidas y muchas más inciertas en profundidad, donde se encuentran alojadas

Tabla 2. 3 Unidades hidrogeológicas del “Arco volcánico Macuchi” correspondientes a la zona del depósito “El domo” Proyecto Curipamba, definidas en función de su granulometría.

Unidades hidrogeológicas	Unidad geológica
Acuicludo	Tobas dacíticas
	Tobas riolíticas
	Tobas sedimentarias
	TOBA (UTU)
	Tobas andesíticas
	Toba
	Lapilli Tuff
	Tobas areniscas
Acuífero	Dacita autobrecha
	Andesita
	Andesita porfírica
	Brecha volcánica
	Brecha Gossan
	Dacita brecha
	Hialoclastita
	Brecha hidrotermal
Acuífugo	Lava andesítica
	Granodiorita
	Cuazodiorita
Acuitardo	Basalto
	Riolita
	Diorita

2.6 Caracterización hidroquímica

Las campañas de muestreo fueron realizadas semestralmente desde el año 2011 hasta el 2018, en puntos estratégicos de la concesión y sobre todo aguas abajo donde el agua podría verse mayormente afectada.

A partir de los muestreos físico – químicos determinados por la empresa acreditada GRUENTEC S.A la cual se encuentra acreditada en los ensayos de ph, conductividad, solidos suspendidos totales, solidos disueltos, oxígeno disuelto, sulfuro, cloro residual, cianuro libre, aniones (F, Cl, NO₂, NO₃, PO₄, SO₄), alcalinidad, amonio, cianuro, turbidez, metales,

Se determina la cantidad de mg/l en cada ion mayoritario del agua, siendo los cationes: Na, K, Ca, Mg y los aniones Cl, HCO₃, CO₃ y SO₄, la determinación porcentual de estos permite la tipificación del agua según el diagrama de Piper y la representación poligonal en el diagrama de Stiff.

2.6.1 Calidad de agua

Las muestras son comparadas con los estándares nacionales del INEN [24] Y TULSMA [25] y los internacionales de OMS [26].

2.6.2 Balance iónico

El balance iónico consiste en la suma de aniones y cationes, de donde el error de estos no debe ser mayor al 15 %, ya que eso significaría que existe un desajuste en los iones mayoritarios del agua [27].

Gracias al balance iónico se determinan únicamente 14 muestras para el análisis hidroquímico.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Series meteorológicas: Precipitación y temperatura

Las estaciones presentan mucha similitud en su precipitación media anual, siendo el máximo en la estación Naves chico con 2994.187 mm y el mínimo en la estación Echeandía con 2160.479 mm/año.

Tabla 3. 1 Precipitación medias anuales para las estaciones de la zona de estudio

Estación	Precipitación media anual (mm)
El corazón	2449.520
Ramón Campaña	2465.284
Moraspungo	2940.630
Ventanas	2528.343
Echeandía	2012.419
Zapotat los ríos	2408.625
Naves chico	2994.186
Barranco	2160.4792

Se detalla la serie meteorológica homogenizada de la estación Naves Chico EMC-1, ya que estas son las precipitaciones usadas en la determinación del balance hídrico. El depósito el domo, dentro de la concesión minera "las naves", cuenta con una alta pluviosidad que fluctúa entre los 3547 mm/año a 1724 mm/año Tabla 3. 1 que corresponde al valor más bajo registrado de la estación Naves Chico EMC-1 con un promedio anual de 2994 mm.

Tabla 3. 2 Serie de precipitación homogenizada de la estación Naves Chico EMC-1

Estación Meteorológica Naves EMC-1 Precipitación media mensual (mm)													
	Sept	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Anual
2011	46	59	22	89	946	516	240	1054	336	70	166	4	3547
2012	8	10	13	0	570	296	20	387	233	81	90	16	1724
2013	16	13	92	445	524	387	180	790	107	90	5	13	2660
2014	212	1	0	245	673	729	362	752	778	21	542	46	4361
2015	24	30	149	276	914	548	255	1120	357	0	0	6	3678
2016	14	18	90	68	610	332	154	679	216	45	32	27	2284
2017	2	16	23	143	547	367	430	464	507	89	11	14	2613

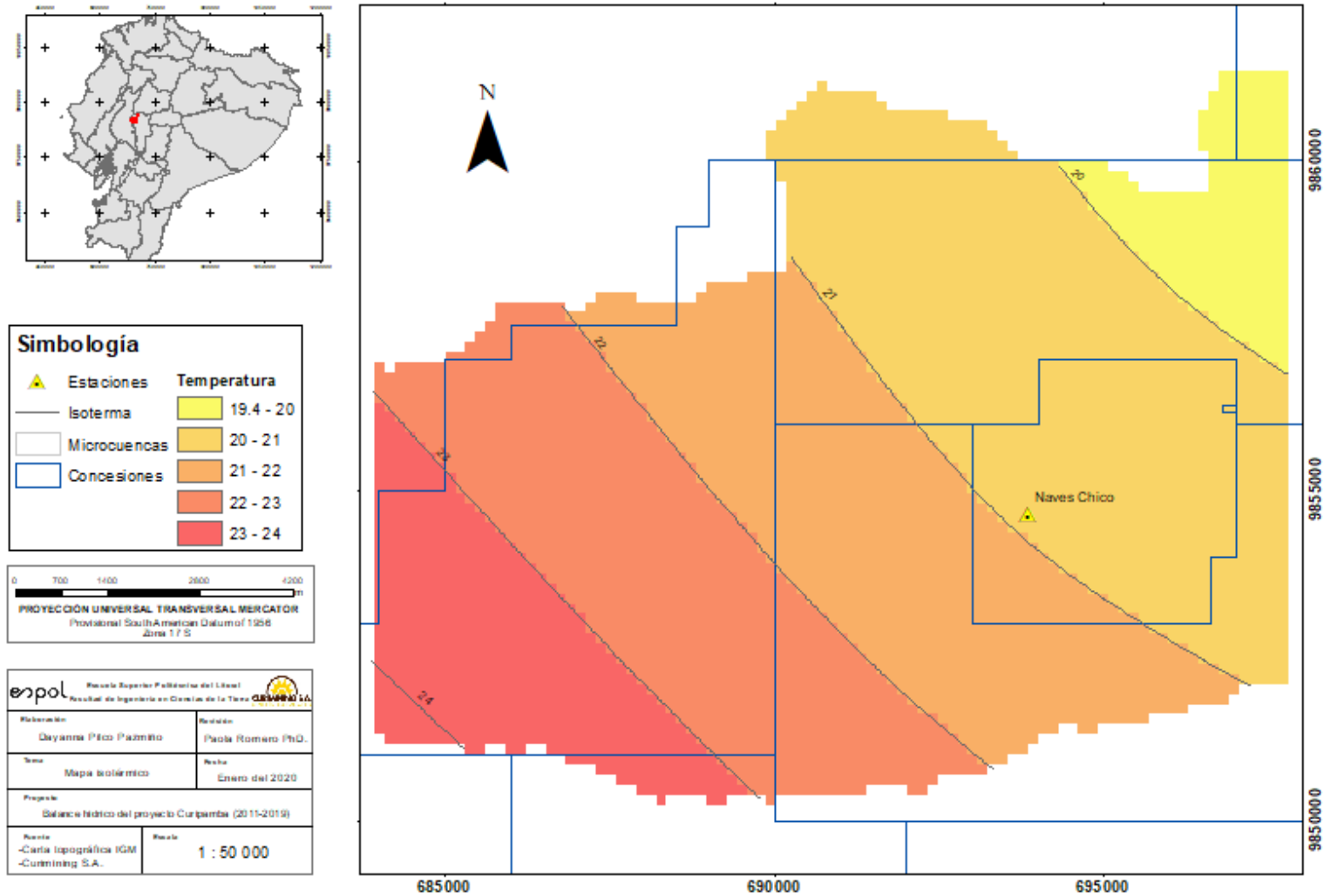
Las series de temperaturas también presentaban puntos faltantes en meses, donde se aplica el mismo método de la razón. Así, las temperaturas finales se describen en la Tabla 3. 3

Tabla 3. 3 Serie de temperatura homogenizada de la estación Naves Chico EMC-1

Estación Meteorológica Naves EMC-1 temperatura media mensual °C													
Año	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	
2011	21.6	20.0	21.6	21.7	21.9	22.1	23.3	22.3	22.5	21.5	21.2	21.7	
2012	21.4	20.8	20.8	20.9	21.6	21.8	23.0	22.0	22.2	21.2	20.9	21.6	
2013	20.8	20.2	20.4	20.7	20.5	21.3	22.4	21.5	21.6	20.7	20.3	21.0	
2014	20.5	17.5	17.5	17.6	20.5	20.4	20.5	20.6	20.7	21.0	21.0	20.5	
2015	21.6	20.7	21.6	21.7	20.7	21.1	21.6	22.0	22.0	21.7	21.2	21.7	
2016	21.4	20.8	20.8	20.9	21.6	21.8	23.0	22.0	22.2	21.2	20.9	21.6	
2017	21.5	20.6	20.4	20.7	21.5	22.1	22.2	22.3	22.0	21.4	20.9	21.2	

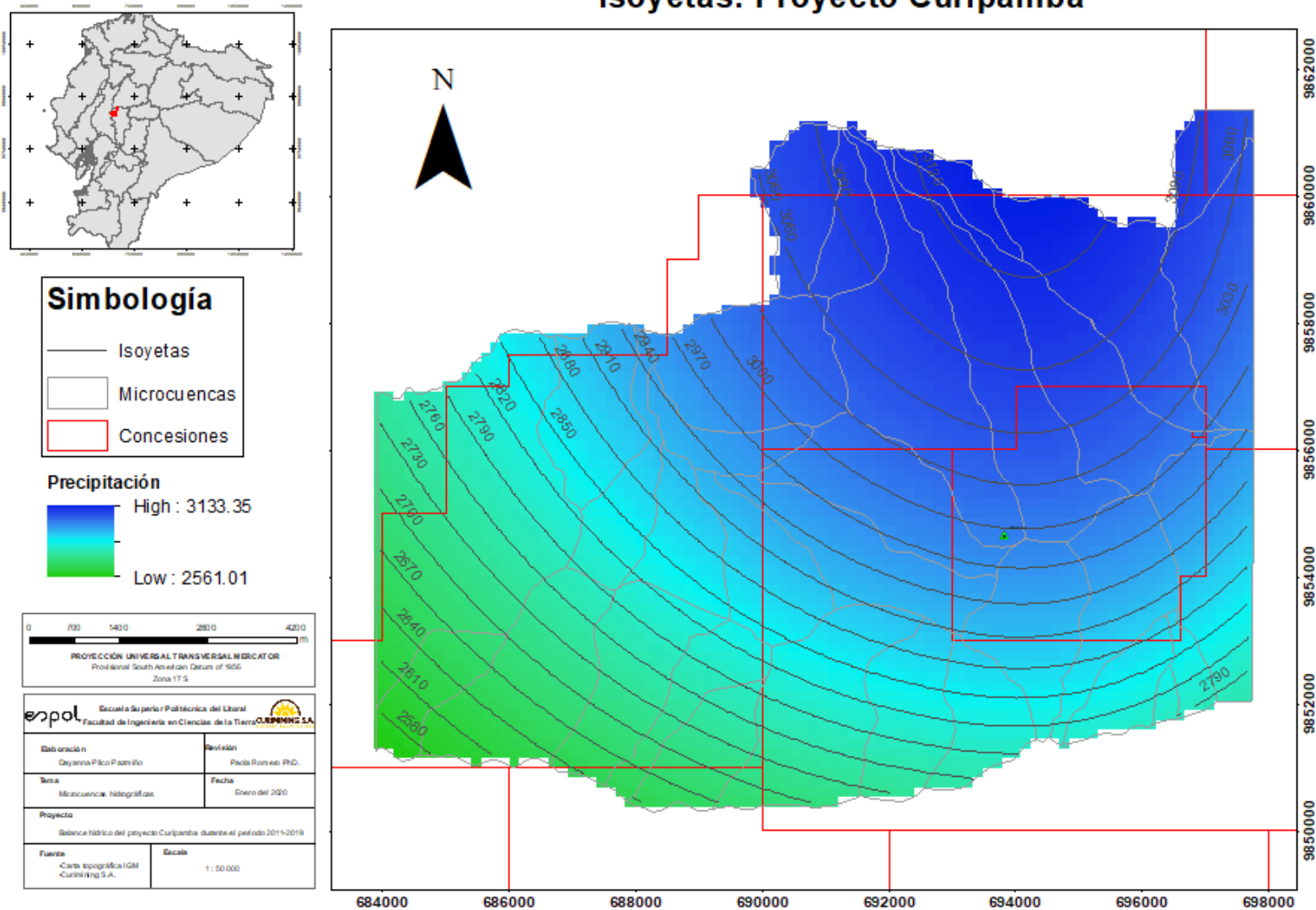
Gracias a la homogenización de series meteorológicas es posible realizar los mapas de isotermas Mapa 3. 1 e isoyetas Mapa 3. 2, ya que tienen una mejor representación de la precipitación y de la temperatura en zona de las microcuencas.

Isotermas: Proyecto Curipamba



Mapa 3. 1 Mapa de isotermas dentro de las microcuencas correspondientes al área de influencia minera en las concesiones en la empresa Curimining S.A.

Isoyetas: Proyecto Curipamba



Mapa 3. 2 Mapa de isoyetas dentro de las microcuencas correspondientes al área de influencia minera en las concesiones en la empresa Curimining S.A.

3.2 Balance hídrico

Evapotranspiración

Se han analizado los años por separado en la estación EMC-1 Naves Chico para así determinar los años húmedos y secos y así, conocer el comportamiento del terreno en ambas situaciones extremas. En la Tabla 3. 4 se encuentra descritos los resultados de la evapotranspiración de la estación.

Tabla 3. 4 Evapotranspiración de las Naves Chico EMC-1 por el método de Thornthwaite

ETP (mm)													
Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
2011	78	71	82	86	88	82	103	89	95	82	82	87	1025
2012	82	79	76	79	85	80	100	87	93	80	80	87	1007
2013	78	76	74	79	77	77	95	84	89	78	77	83	966
2014	83	63	61	63	84	76	85	83	0	87	90	86	861
2015	84	78	83	87	77	74	86	87	91	85	83	88	1002
2016	81	78	76	79	85	80	100	88	93	81	80	86	1007
2017	83	77	73	78	85	82	92	91	91	82	81	84	997

Escorrentía

Se determina una escorrentía teórica para los diferentes periodos de retorno y las diferentes precipitaciones desde el 2011-21017. A continuación, se detallan las precipitaciones máximas y mínimas registradas con su respectiva escorrentía teórica

Tabla 3. 5

Tabla 3. 5 Escorrentía determinada en los diferentes periodos de retorno

Periodo de retorno (Años)	Coeficiente de escorrentía	Precipitación (mm)						
		3547	1724	2660	4361	3678	2284	2613
		Escorrentía (mm)						
2	0.37	1312	638	984	1614	1361	845	967
5	0.4	1419	690	1064	1744	1471	914	1045
10	0.42	1490	724	1117	1832	1545	959	1097
25	0.46	1632	793	1224	2006	1692	1051	1202
50	0.49	1738	845	1303	2137	1802	1119	1280
100	0.53	1880	914	1410	2311	1949	1211	1385
500	0.6	2128	1034	1596	2617	2207	1370	1568

Infiltración

Asumiendo un promedio general de época seca y época húmeda en precipitación y evapotranspiración se comparan los límites mínimo y máximo de infiltración que se detallan que pueden surgir en la zona

$$\text{Infiltración} = P_m - \text{Escorrentía} - \text{Evapotranspiración}$$

$$\text{Infiltración max} = (4361 - 1614 - 861) \text{ mm/año}$$

$$\text{Infiltración max} = 1886 \text{ mm/año} \quad (27536 \text{ m}^3)$$

$$\text{Infiltración min} = (1724 - 1024 - 637) \text{ mm/año}$$

$$\text{Infiltración max} = 63 \text{ mm/año} \quad (919.8 \text{ m}^3)$$

TAW (Total Available water)

Para la determinación del total de agua disponible se realiza la caracterización de la litología en base a su granulometría y de la vegetación presente en la zona. El área es mayormente ganadera-agrícola, lo que clasifica en zonas de cultivo de raíces tipo arbustivas ya que las raíces no exceden el metro de profundidad. Además, la litología predominante es arcillosa-limosa con excepciones de sedimentos y andesitas de granulometría arenosa Tabla 3. 6.

Tabla 3. 6 Determinación de la reserva total máxima en base a la litología

TAW max (mm)	Litología
60	Coluvial, basalto, andesita, hialoclastita, brecha, intrusivo
80	Sedimento, dacita,
100.5	Lapilli
180	Toba, grainstone
187.5	Riolita

Una vez definida la reserva máxima que el suelo puede contener, se realiza el balance hídrico con cada cantidad de reserva máxima, determinando así el déficit Tabla 3. 7 y el excedente

Tabla 3. 8 por cada año, donde el año meteorológico comienza en enero y termina en diciembre suponiendo una reserva inicial de 0 mm.

Gran parte de la precipitación en la zona queda como excedente, así como en el año 2011 donde de los 3547 mm precipitados son excedentes (2519-2647) mm, lo que corresponde al 70% de la precipitación, este mismo excedente puede tomarse como escorrentía, superficial, subsuperficial o subterránea incluso parte de esta se recarga en el acuífero.

Por otra parte, el excedente en un año seco (2012), donde de los 1724 mm precipitados es de (1032-883) lo que corresponde a un 60%-50% lo cual sigue representando una gran porción de excedente dentro del terreno.

Tabla 3. 7 Calculo del déficit por año en base a la reserva máxima disponible

	Déficit mm						
TAW	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
60	131.4	314.5	206.2	68.5	297.6	210.4	270.8
80	111.4	274.5	186.2	42.3	277.6	190.4	250.8
100.5	90.9	253.8	165.7	21.8	257.1	169.9	230.3
180	11.4	174.3	86.2	0	177.6	90.4	150.8
187.5	3.9	166.8	78.7	0	170.1	82.9	143.3

Tabla 3. 8 Calculo de excedente por año en base a la reserva máxima disponible

	Excedente mm						
TAW	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
60	2647	1032	1842	3509	2915	1485	1827
80	2627	991.6	1802	3463	2875	1465	1801
100.5	2606	970.9	1761	3422	2834	1445	1781
180	2527	891.4	1602	3320	2675	1365	1701
187.5	2519	883.9	1587	3313	2660	1358	1694

Con el fin de comparar los resultados obtenidos, se calcula la tasa de recarga con las metodologías de Turc y Cheeturvedi, las cuales tienen datos de entrada de precipitación y temperatura.

Turc

Turc considera las variables de precipitación y temperatura [16], correspondiendo el total de la recarga al 55%-82% de la precipitación Tabla 3. 9.

Tabla 3. 9 tasa de recarga (r) mediante la metodología de Turc

	Precipitación (mm/año)	Temperatura (°C)	L	r	%
2011	3547	21.8	868.2	2701.41	76.2
2012	1724	21.5	860.9	946.35	54.9
2013	2660	20.9	845.5	1850.36	69.6
2014	4361	19.9	816.0	3557.55	81.6
2015	3508	21.5	859.5	2671.20	76.1
2016	2284	21.5	860.9	1473.80	64.5
2017	2613	21.4	857.7	1794.15	68.7

L* ecuación cuadrática en función de temperatura; r* tasa de recarga, %* porcentaje de recarga en función de la precipitación

Cheeturvedi

Esta metodología de Cheeturvedi determina que la recarga corresponde al 10 % aproximadamente de la precipitación según los resultados en Tabla 3. 10 [16], sin embargo estos resultados no tienen sentido, ya que esta zona es de gran recarga en sus acuíferos según muestra la piezometría. Si bien es cierto, el método de Cheeturvedi es usado para precipitaciones mayores a 380 mm/año, no es confiable en mayores precipitaciones y en esta zona es de alta pluviosidad.

Tabla 3. 10 tasa de recarga (r) mediante la metodología de Cheeturvedi

	Precipitación (mm/año)	r	%
2011	3547	350	9.9
2012	1724	248	14.4
2013	2660	307	11.5
2014	4361	384	8.8
2015	3508	348	9.9
2016	2284	286	12.5
2017	2613	304	11.6

r* tasa de recarga, %* porcentaje de recarga en función de la precipitación

La recarga no solo es la cantidad que infiltra en el suelo y va a el acuífero, sino que también incluye el porcentaje de agua que corresponde a escorrentía sub-superficial y de escorrentía subterránea, además del agua dinámica dentro del acuífero.

Entonces se determinó la recarga del acuífero en base a Turc, donde tienen los valores de tasa de recarga en años húmedos: 2701 mm (76.2% de la precipitación) y secos: 946 mm (54% de la inversión).

Por otra parte, utilizando la metodología de Cheeturvedi la tasa de recarga se tiene que corresponde al 10 % de la precipitación aproximadamente en la zona.

Consumo de agua

Se ha tomado el consumo de agua proyectado en Curimining S.A. tanto en la planta de beneficio como el consumo de agua del personal minero Tabla 3. 11. Además, se ha tomado en cuenta el uso de agua de la parroquia las naves, donde se encuentra asentado el proyecto minero Curipamba y específicamente la zona del depósito el domo, con el fin de estimar el recurso hídrico y asegurar su abastecimiento tanto a las comunidades como a la actividad extractiva.

Tabla 3. 11 Proyección del uso de agua consutivo del cantón Las Naves y Curimining S.A

Consumo de agua				
	Habitantes	Consumo por habitante	Subtotal	Subtotal
Curimining	Proyección 1-9 años	L/día	L/día	m3/día
Plana de beneficio		2'400.000	2'400.000	2.400
Trabajadores				
Administración	67	235	15.745	16
Contratistas mineros	91	235	21.385	21
Procesamiento	87	235	20.445	20
Total			2'457.575	2.458
Ciudad				
Las naves	13129	235	3'085.315	3.085
Total			3'085.315	3.085

Piezometría

Se ha realizado el mapa piezométrico de la zona (Mapa 3. 3) gracias a la base de datos de Curimining, donde los pozos cubren una pequeña zona de la concesión.

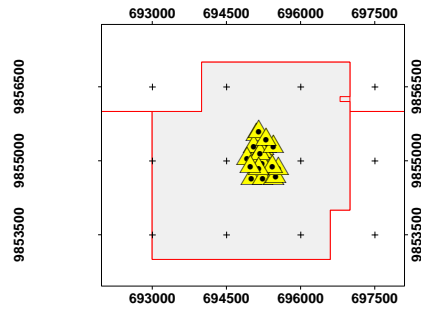
El perfil hidrogeológico (Mapa 3. 4) construido en la zona gracias al perfil geológico proporcionado por Curimining S.A. y en base a las unidades hidrogeológicas determinadas en la metodología del proyecto, define los acuíferos superficiales alojados en la andesita, donde estos se encuentran sellados por un acuicludo inferior correspondientes a los lapilli, tobas y demás litología arcillosa. Se definen también acuíferos secundarios sellados por un acuitardo, teniendo una potencia inferior a lo acuíferos principales someros.

No es conveniente definir un acuífugo en este perfil hidrogeológico, ya que la zona está altamente fracturada debido al sistema de fallas que está presente en el depósito. Éste mismo sistema de fallas es el que permite el libre acceso del agua en las rocas, haciendo que se aloje en ellas y a la vez permita la mineralización de éstas haciendo la zona económicamente rentable bajo las condiciones favorables.

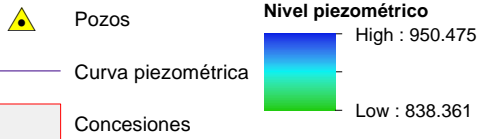
Por otra parte, la gráfica de la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** muestra que los niveles piezométricos tienden a caer bruscamente ante una ligera época seca en el año 2014, sin embargo, este comportamiento no es el mismo en los años posteriores donde la recarga del acuífero se hace de una manera exitosa alojando una reserva que mantiene constante el nivel piezométrico durante los años 2016 y 2017.

Se define el comportamiento de los ríos principales del proyecto como río ganador y río perdedor **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** . El río Runayacu es el que alimenta principalmente al sistema hidrográfico, gracias a la reserva y recarga exitosa dentro de los acuíferos de la zona los acuíferos alimentan al río Suquibí en época seca.

Mapa piezométrico



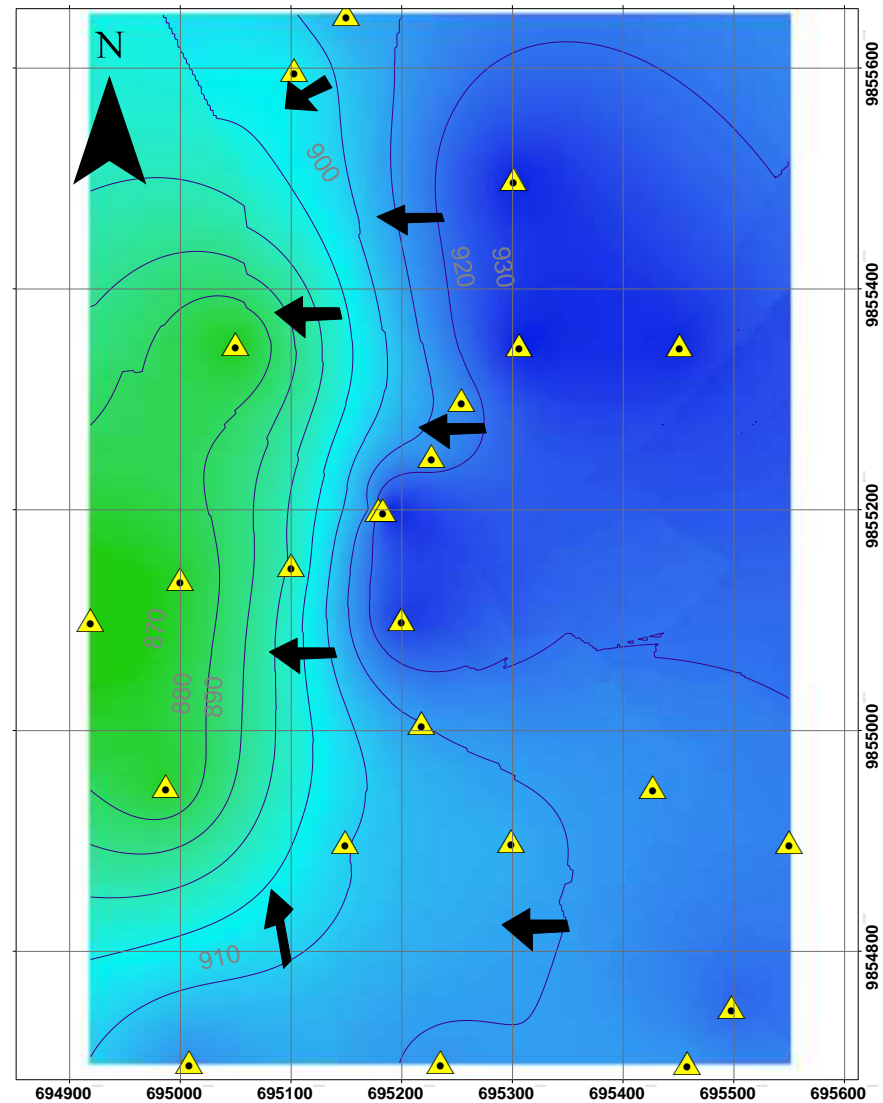
Simbología



PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSAL MERCATOR
Provisional South American Datum of 1956
Zona 17 S

Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Elaboración		Revisión	
Dayanna Pilco Pazmiño		Paola Romero PhD.	
Tema		Fecha	
Mapa piezométrico		Enero del 2020	
Proyecto			
Balance hídrico del proyecto Curipamba (2011-2019)			
Fuente		Escala	
-Carta topográfica IGM -Curimining S.A.		1 : 50 000	



Mapa 3. 3 Mapa piezométrico del depósito “El domo”

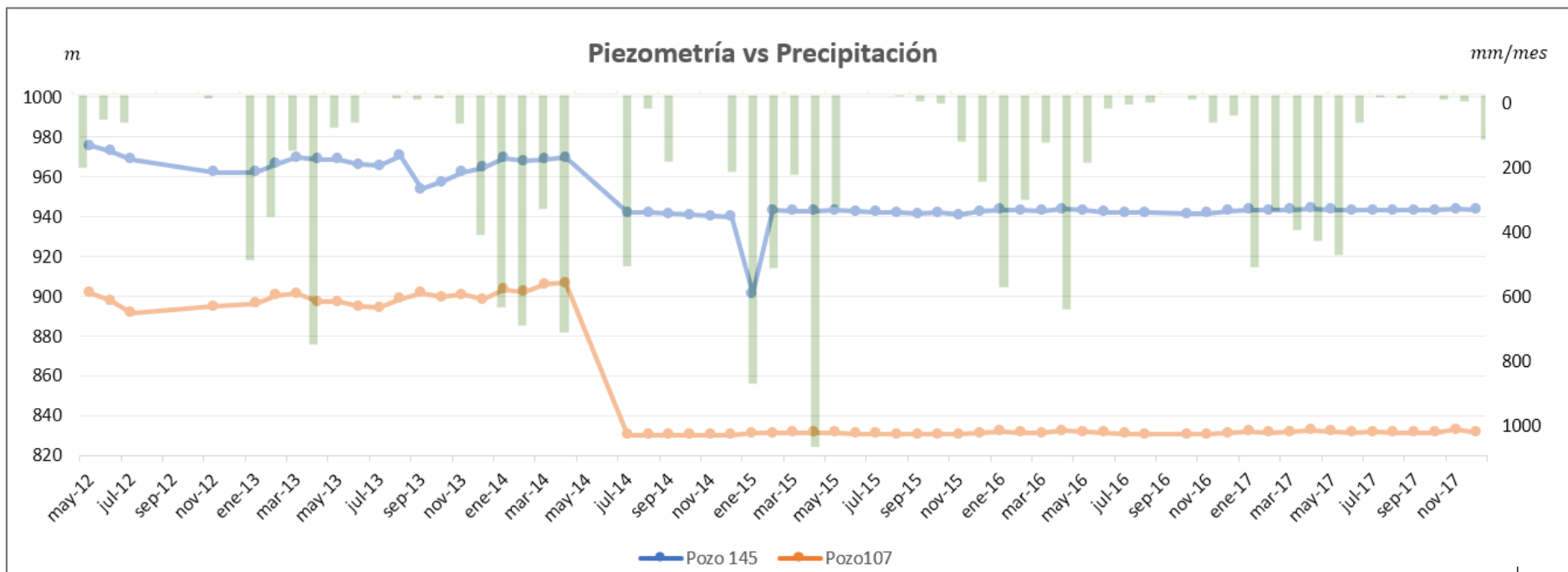
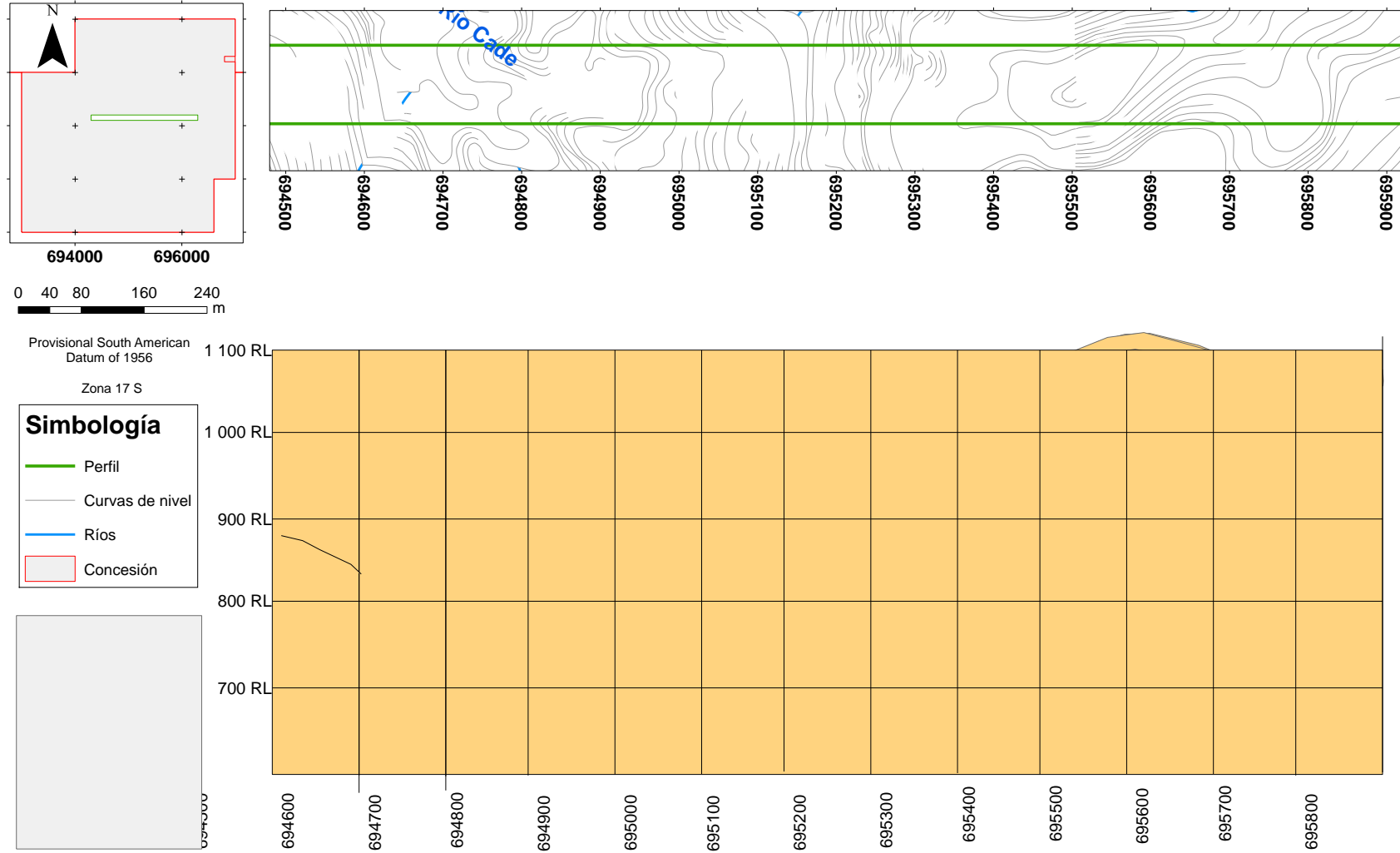


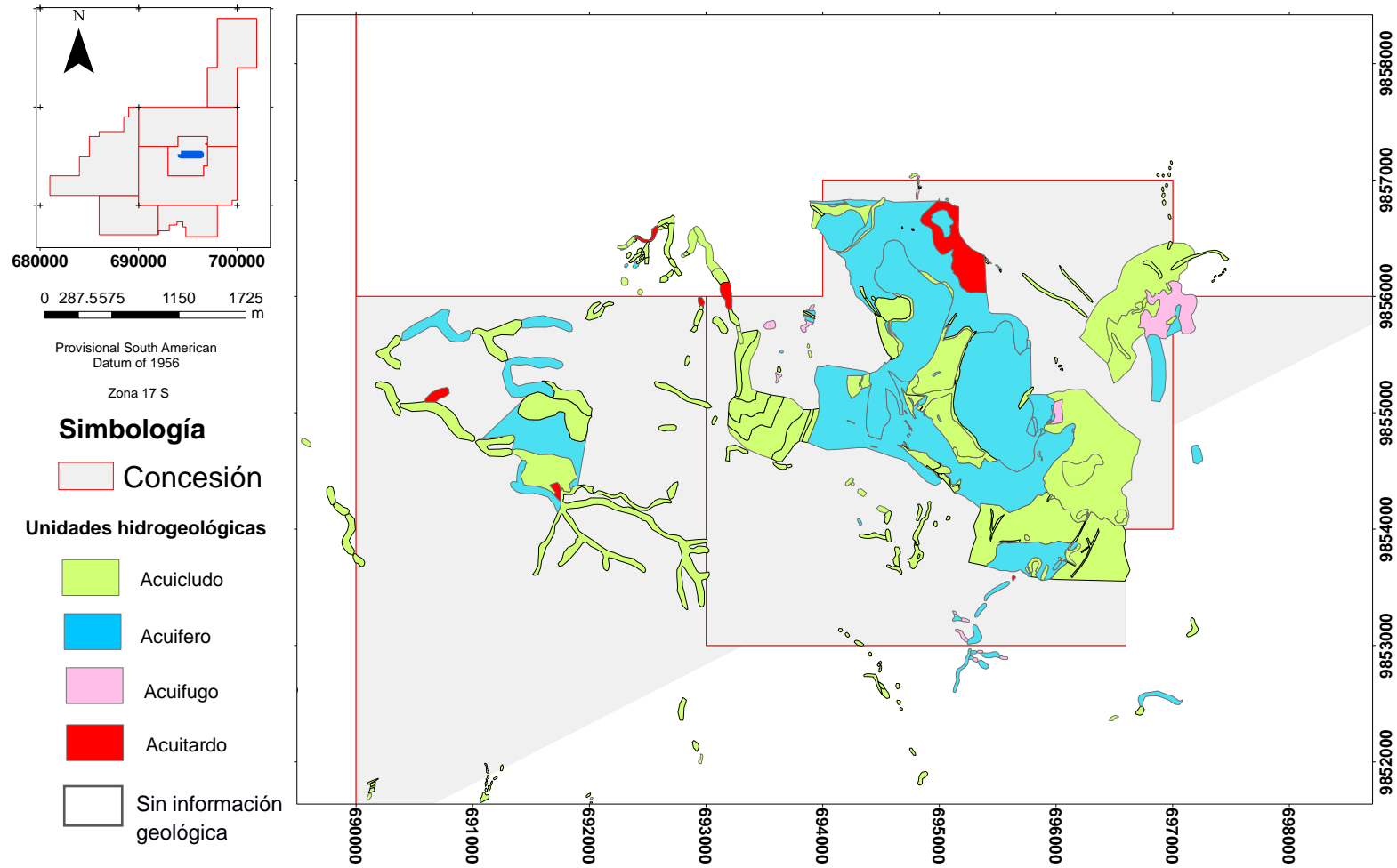
Figura 3. 1 Grafica de la relación de precipitación y piezometría en el depósito "El domo"

Perfil Hidrogeológico



Mapa 3. 4 Perfil hidrogeológico del depósito “El domo”

Unidades hidrogeológicas



Mapa 3.4.1 Mapa de unidades hidrogeológicas en superficie del proyecto Curipamba

Hidroquímica

Se disponen de 61 muestras analizadas desde el 2011-2018 que muestran gran similitud en sus composiciones iónicas entre los meses húmedos y secos, sin embargo realizando el balance iónico se observa un mayor porcentaje de error hasta el 70%, debido a la diferencia entre aniones y cationes. Para la interpretación hidroquímica se utilizaron 12 muestras de las 61 muestras, debido a que contienen un error aceptable de hasta el 15 %, las demás muestras han sido descartadas debido a sus altos porcentajes de error en su balance iónico (ANEXO D)

El diagrama de Piper Figura 3. 5 representa los puntos de muestreos de la zona donde la acumulación se centra en tipo bicarbonatada cálcica, estas muestras tienen una gran composición porcentual en iones mayoritarios de bicarbonatos, calcio además de sodio y magnesio, esta composición se mantiene similar a lo largo de toda la zona como se muestra en el Mapa 3. 5 donde los diagramas de stiff muestran la composición iónica del agua en los diferentes puntos de muestreos en la zona de influencia minera a ser ejercida por Curimining S.A.

Así, se analiza la evolución de ciertos puntos muestreados, tanto las muestras Curi-16, Curi-37 y Curi-18 han mantenido similares composiciones a lo largo de los años desde el 2012 al 2018, como se muestran en las Figura 3. 3 y Figura 3. 4 Sin embargo durante los meses de mayo del 2016 se presentan una concentración mayor del ión sodio, a diferencia de los demás muestreos

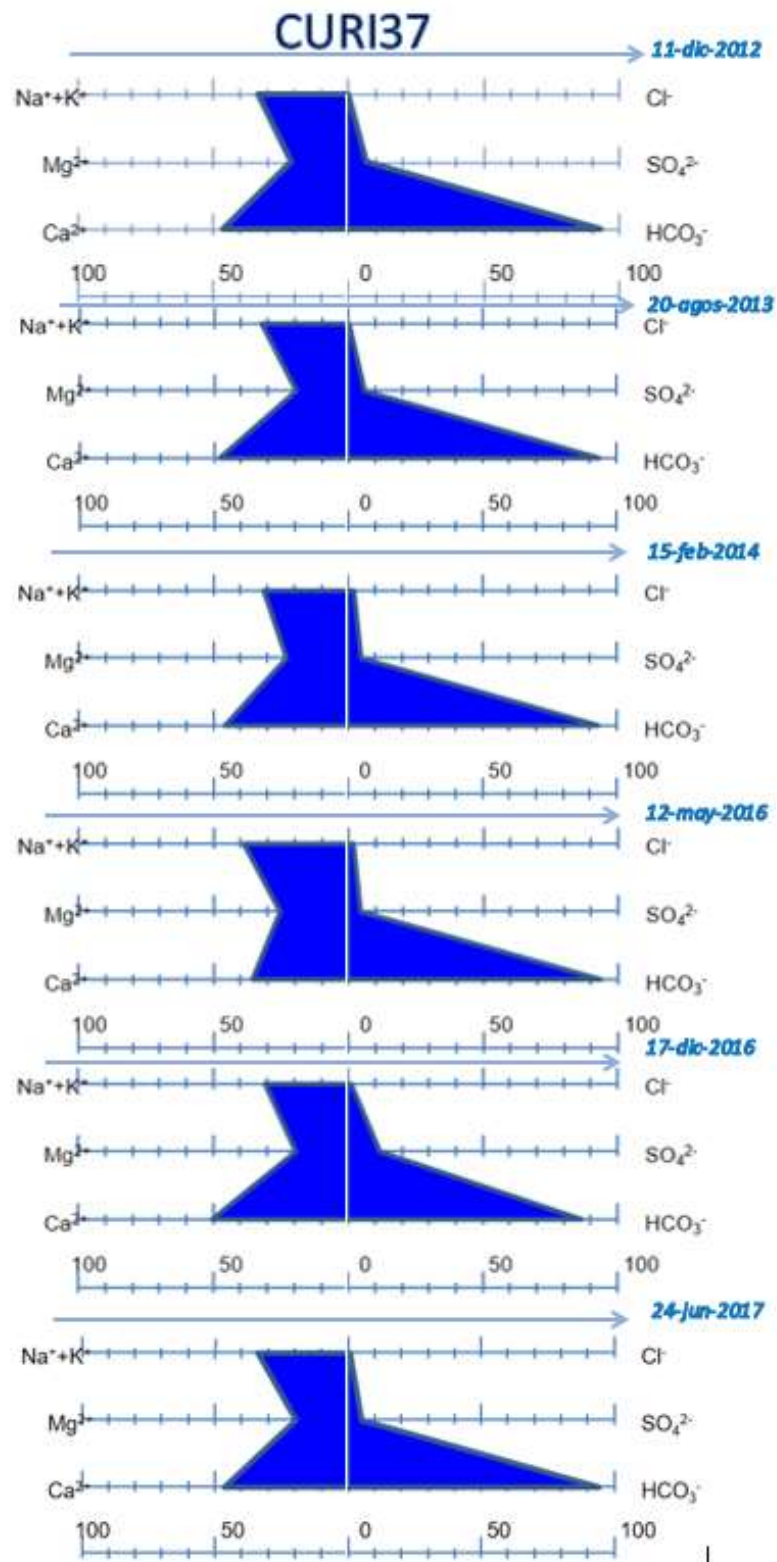


Figura 3. 2 Evolución hidroquímica del muestreo Curi-37

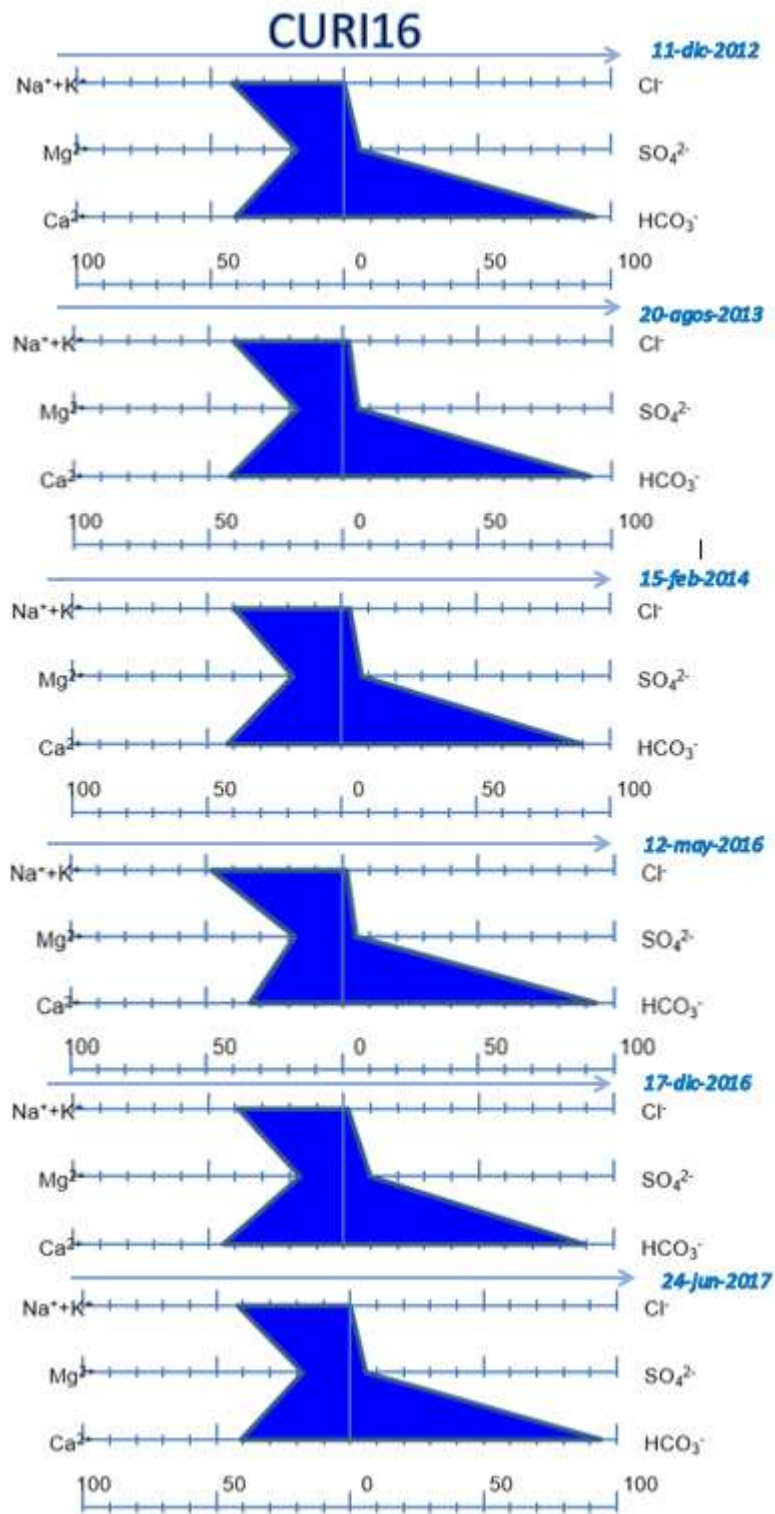


Figura 3. 3 Evolución hidroquímica del muestreo Curi-16

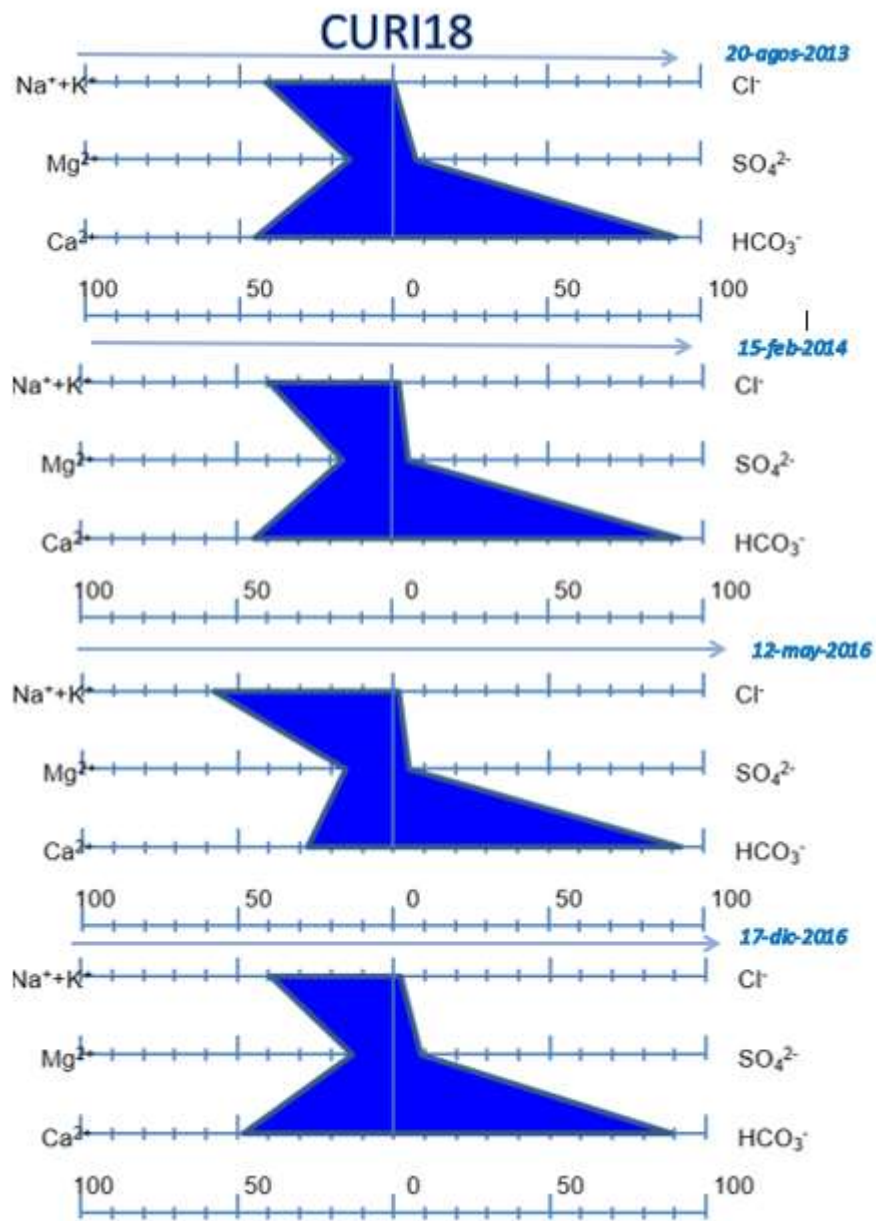


Figura 3. 4 Evolución hidroquímica del muestreo Curi-18

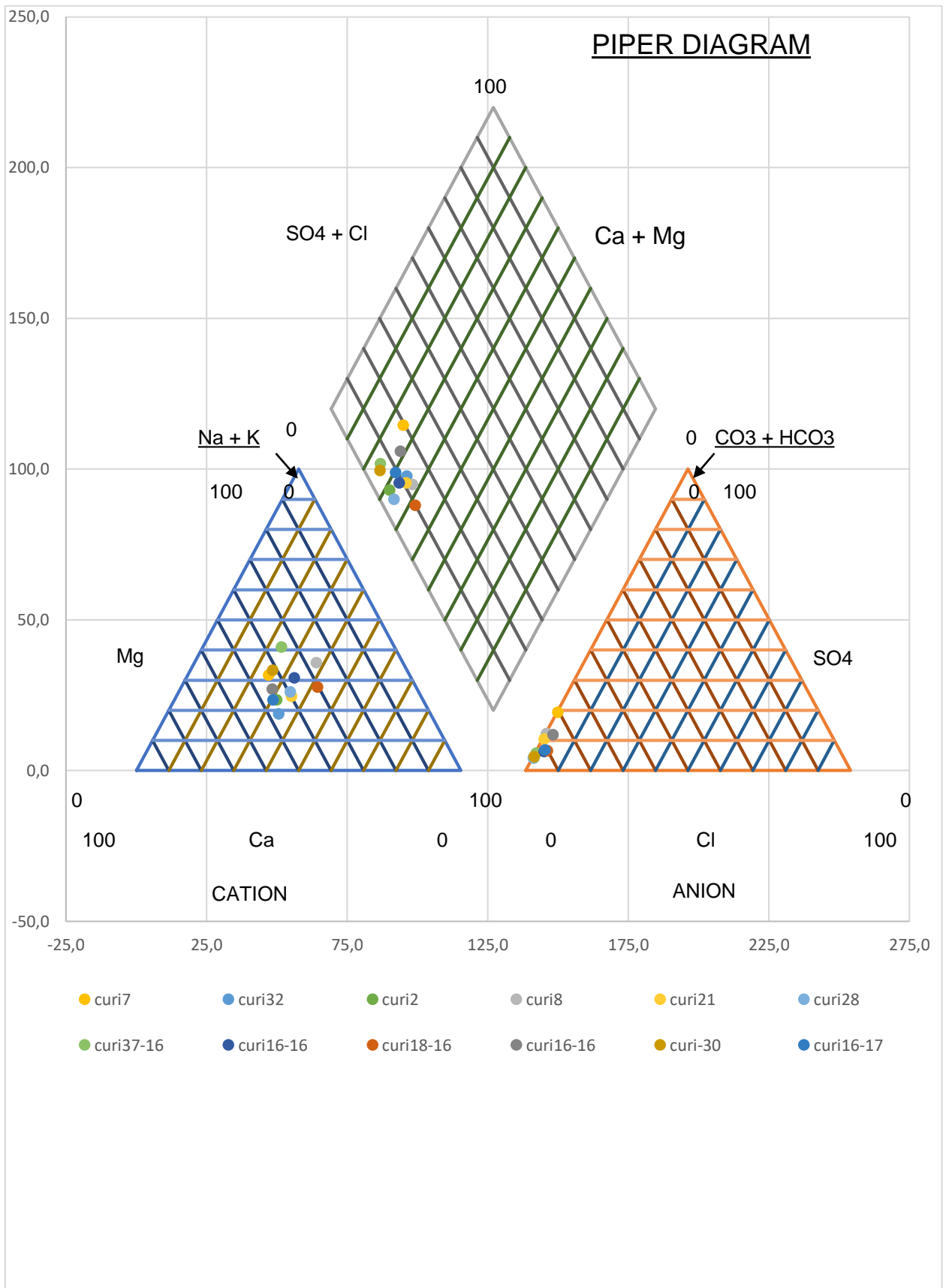
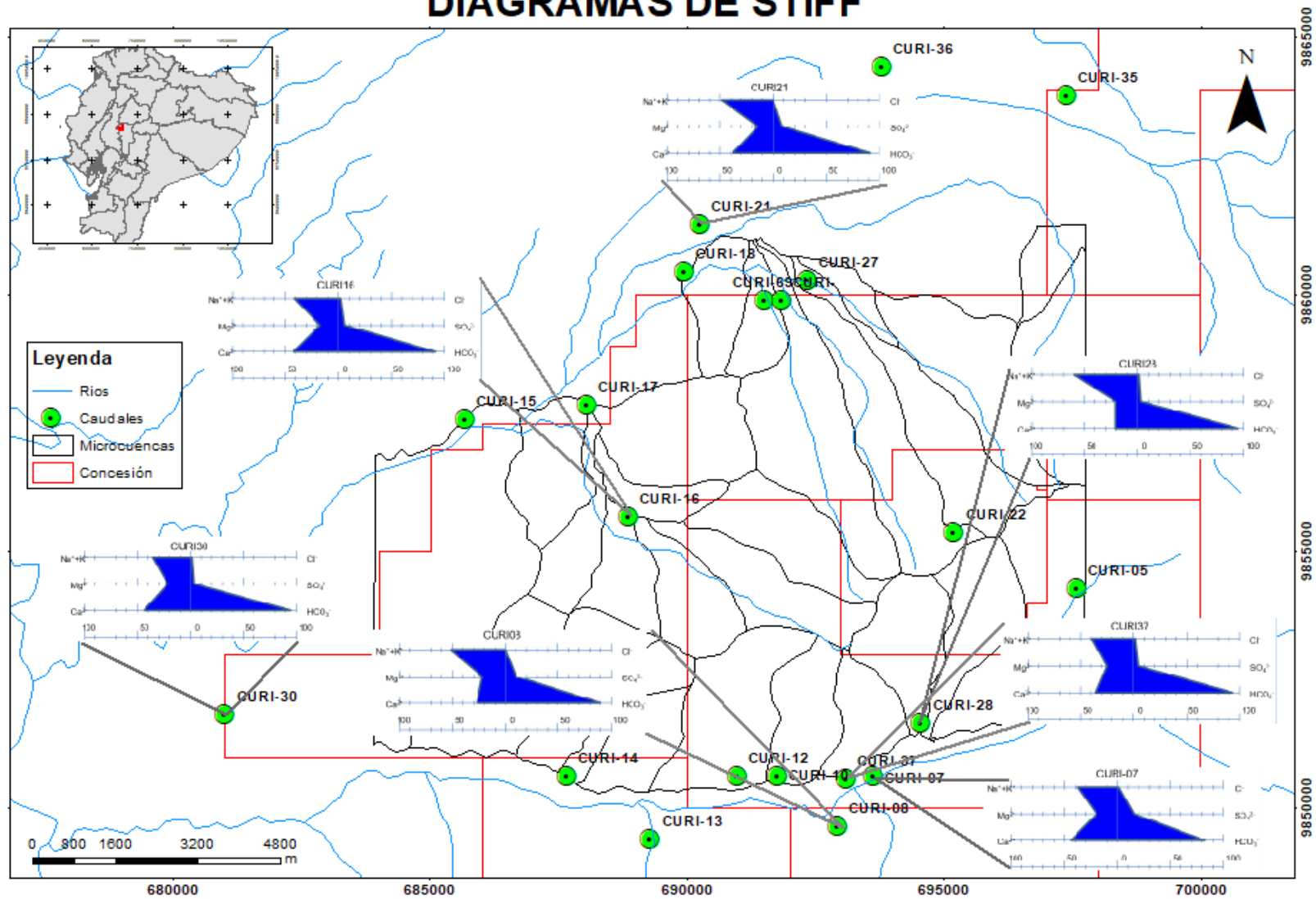


Figura 3. 5 Diagrama de Piper del muestreo de Curimining S.A dentro del periodo (2011-2018)

DIAGRAMAS DE STIFF



Mapa 3. 5 Diagramas de Stiff de los muestreos del proyecto Curipamba

Calidad de agua

Las 12 muestras analizadas son comparadas con los estatutos nacionales de TULSMA e INEM y las internaciones de la OMS, donde se definen los límites máximos permisibles de calidad de agua de consumo humano en base a la cantidad en mg/l establecida en dichos parámetros. A continuación, se detallan los valores de las muestras y se demarcan los valores anómalos. (ANEXO D)

Curi02, Curi07, Curi08, Curi16, Curi 30, Curi37 contiene valores excedentes de coliformes totales, estos exceden por 8 000 mg/l el valor permisible máximo de TULSMA lo cual indica un factor de riesgo evidente en calidad de agua en el sector.

Por otra parte, los valores turbidez exceden el límite permisible del INEN, pero se encuentra dentro de los parámetros del TULSMA. Las muestras Curi08, Curi21, Curi28, Curi30 y Curi32 presentan valores mayores a 5 mg/l sin embargo estas no lo exceden por mucho al límite máximo permisible.

El nivel de amonio se encuentra excedente en los pozos Curi32, Curi30 y Curi28 donde están sobrepasando el doble de la cantidad permitida según la legislación TULSMA. Por otra parte, el valor del cloruro es ligeramente alto en el muestreo del pozo Curi32. Finalmente, el oxígeno disuelto presenta un valor ligeramente mayor (0.1 mg/l) en el muestreo según el límite de la OMS.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La unidad acuífera está formada por brechas dacíticas, volcánicas, gossan, andesita porfídítica e hialoclastita y ésta alcanza una potencia de 200 metros aproximadamente. El acuífero se encuentra en estado libre a confinado por una unidad superior de tipo acuicludo formada por tobas dacíticas, andesíticas, riolíticas, sedimentarias y lapilli tuff,

No se determinaron parámetros hidrodinámicos debido a que se requieren realizar ensayos de bombeo y recuperación, los cuales no pudieron ser realizados porque no se cuenta con la autorización del uso del agua del SENAGUA.

El análisis hidroquímico se realizó exclusivamente en muestras de agua superficial, no se cuenta con datos de análisis químicos en muestras de agua subterránea y no se pudo realizar muestreo de esta debido a que los piezómetros están tapados. Lo cual limitó el análisis de conexión hídrica entre el agua superficial y subterránea.

Recomendaciones

Realizar ensayos de bombeo en los piezómetros ubicados sobre el acuífero en estado libre y en los piezómetros ubicados sobre el acuífero confinado, con la finalidad de determinar la transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

Se recomienda realizar análisis físico químico de muestras de agua subterránea además de acondicionar los pozos a piezómetros.

Es preferible no utilizar la metodología de Cheeturvedi para la determinación de la tasa de recarga en la zona ya que los valores de precipitación del área son muy elevados y el método genera un gran porcentaje de error.

Si los muestreos de análisis físicoquímicos deben realizarse por lo menos 2 veces al año éstos deben ser en fechas representativas de las épocas húmedas y seca que se tiene en la región.

Se recomienda la medición de caudales de alto valor ya que estos tienen una principal
Los muestreos de análisis físicoquímicos deben realizarse por lo menos 2 veces al año en fechas representativas de las épocas húmedas y seca que se tiene en la región.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] RPA, “Technical Report on the Preliminary Economic Assessment for the Curipamba Project – El Domo Deposit, Central Ecuador,” Vancouver, 2019.
- [2] J. Robles and J. Cunudri, “Análisis hidrogeológico del proyecto ‘Curipamba’, en el sector ‘Las Naves’, provincia de Bolivar durante el periodo 2011-2014.,” Quito, 2015.
- [3] SENAGUA, “Diagnóstico de la Estadística del Agua en Ecuador.” p. 13, 2011.
- [4] INEC, “Contador Poblacional,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>.
- [5] G. H. Hargreaves and Z. A. Samani, “Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature.,” *Am. Soc. Agric. Eng.*, pp. 96–99, 1985.
- [6] S. A. Northey, G. M. Mudd, T. T. Werner, N. Haque, and M. Yellishetty, “Sustainable water management and improved corporate reporting in mining,” *Water Resour. Ind.*, vol. 21, no. October 2018, p. 100104, 2019.
- [7] M. E. Moeletsi, S. Walker, and H. Hamandawana, “Comparison of the hargreaves and samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa,” *Phys. Chem. Earth*, vol. 66, pp. 4–15, 2013.
- [8] D. Balvin, J. Tejedó, and H. Lozada, *Agua, minería y contaminación: Caso Southern Peru*, Labor. Ilo, 1995.
- [9] X. L. Wang, “Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 368–384, 2008.
- [10] J. Reeves, J. Chen, X. L. Wang, R. Lund, and Q. Q. Lu, “A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data,” *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 46, no. 6, pp. 900–915, 2007.
- [11] H. Alexandersson, “A homogeneity test applied to precipitation data,” *J. Climatol.*, vol. 6, no. 6, pp. 661–675, 1986.
- [12] S. A and C. T, *Métodos de cálculo de balance hídrico*. Madrid: Instituto de hidrología de España - UNESCO, 1981.
- [13] A. Torres Hernández and R. Vásquez Vásquez, “Prospección de la estimación de

- la evapotranspiración de referencia, bajo las condiciones del valle de Chaca, Arica-Chile,” *Idesia*, vol. 31, no. 2, pp. 25–29, 2013.
- [14] J. Pkaba, “Balance hidrico de la cuenca de Noguera Ribagorzana,” *Geographicalia*, no. 3, pp. 109–127, 1979.
- [15] C. W. THORNTHWAITE, “An approach toward a rational classification of climate,” *Geogr. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 55–94, 1948.
- [16] M. Vélez Otálvaro and L. Vásquez Ariza, “Métodos para determinar la recarga en acuíferos,” *Av. en Recur. Hidraul.*, no. 11, pp. 51–62, 2004.
- [17] H. F. Blaney and W. D. Criddle, “Determining consumptive use and irrigation water requirements,” *United States Dep. Agric.*, vol. Technical, pp. 1–59, 1962.
- [18] E. Alvarado, “Metología del cálculo de balance de aguas en operaciones mineras a tajo abierto,” *II Congr. Reg. IPMA – LATNET*, pp. 299–309, 2017.
- [19] O. Mesa *et al.*, “Hidro-Sig: Una Herramienta Para La Estimación De Balances Hidrológicos De Colombia,” no. January, p. 13, 1999.
- [20] C.W. Fetter, *Applied Hydrogeology*, 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [21] Universidad de Salamanca, “Evapotranspiración_ Thornthwaite.” Salamanca, 2019.
- [22] V. Te Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied hydrology*. McGraw Hill, 1988.
- [23] Univerdidad de Cartagena, “Cálculo de balance hídrico en el suelo mediante el método de Thornthwaite.” Cartagena, 2008.
- [24] A. potable: Requisitos, “Agua Potable. Requisitos. Nte Inen 1108,” *Inst. Ecuatoriano Norm.*, vol. 1108, no. 5, pp. 1–10, 2014.
- [25] M, “Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes : Recurso Agua,” *TULAS Texto unificado Legis. Secund. del Minist. del Ambient.*, pp. 8–9, 2011.
- [26] Organización Mundial de la Salud, “Guías para la calidad del agua potable,” *WHO Chron.*, vol. 38, no. 3, pp. 104–108, 1984.
- [27] J. Sánchez, “Hidroquímica: conceptos fundamentales,” no. April. Univerdidad de Salamanca, p. 51500, 2012.

ANEXO

ANEXO A: Homogenización de series meteorológicas

Anexo A 1 Serie de precipitación homogenizada de la estación el Corazón

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado Anual
1996	443	391	415	377	106	15	15	27	39	39	58	84	2009
1997	294	353	557	250	199	187	112	100	239	225	351	551	3415
1998	387	323	347	327	385	141	51	46	34	37	32	73	2183
1999	239	583	1262	831	238	44	26	9	132	74	147	351	3935
2000	295	428	601	529	191	47	3	2	67	23	38	129	2351
2001	470	349	425	380	243	8	8	0	30	67	100	138	2218
2002	259	491	722	474	234	40	10	13	23	73	72	253	2663
2003	350	428	341	457	143	37	26	33	4	79	29	137	2064
2004	274	319	597	255	303	57	6	1	70	99	27	140	2148
2005	431	416	312	303	15	8	4	3	25	14	68	223	1824
2006	267	481	574	408	126	85	3	46	41	17	78	165	2291
2007	361	288	327	389	159	97	17	8	8	15	49	116	1833
2008	608	624	669	527	295	87	79	60	30	76	28	139	3223
2009	423	406	527	279	126	34	9	23	3	20	32	314	2194
2010	348	464	313	595	193	49	49	11	24	24	60	402	2532
2011	416	510	390	648	54	78	78	7	30	26	45	214	2495
2012	558	514	487	452	244	95	10	4	16	65	104	120	2667
2013	435	427	447	256	178	19	6	8	14	54	22	182	2047
Promedio mensual	381	433	517	430	191	63	28	22	46	57	74	207	2450

Anexo A 2 Serie de precipitación homogenizada de la estación Ramón Campaña

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado anual
1996	295	368	303	367	94	13	18	29	37	38	34	116	1713
1997	433	439	535	393	161	176	105	88	267	211	329	517	3654
1998	364	213	372	360	489	189	95	43	37	32	32	69	2294
1999	284	550	490	780	254	63	28	14	100	56	138	321	3077
2000	263	433	564	406	151	34	2	8	35	26	32	83	2035
2001	541	324	556	375	167	7	7	0	28	56	141	177	2380
2002	277	535	778	518	217	42	9	2	11	85	68	219	2759
2003	389	428	321	0	215	32	27	15	4	67	25	106	1616
2004	257	449	676	285	320	52	10	0	56	51	41	110	2308
2005	315	426	305	284	15	12	5	3	6	0	58	218	1648
2006	303	555	523	562	127	56	0	38	59	16	86	225	2550
2007	370	258	330	325	190	115	115	8	9	19	52	98	1887
2008	575	682	612	422	214	93	90	75	52	67	35	140	3056
2009	448	332	816	349	99	41	15	44	6	24	25	311	2509
2010	418	602	395	744	279	44	41	23	17	17	84	440	3103
2011	471	697	410	722	21	70	104	2	28	28	50	209	2810
2012	717	503	440	462	243	109	27	0	10	81	95	131	2818
2013	509	377	492	292	202	20		14	30	44	11	168	2159
Promedio mensual	402	454	495	425	192	65	41	23	44	51	74	203	2465

Anexo A 3 Serie de precipitación homogenizada de la estación Moraspungo

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado Anual
1996	323	714	581	262	106	30	32	15	12	12	69	242	2397
1997	380	500	677	449	415	318	210	185	305	234	592	609	4873
1998	816	505	652	627	558	179	123	45	50	21	74	47	3695
1999	240	846	693	435	441	28	49	7	65	71	75	374	3323
2000	210	324	617	467	172	10	3	2	23	3	5	141	1976
2001	569	498	481	469	142	9	6	2	29	15	65	201	2485
2002	290	548	832	697	263	53	11	9	15	44	42	334	3138
2003	559	496	709	581	245	91	41	58	8	74	9	309	3180
2004	216	447	599	417	381		139	24	16	95	19	96	2449
2005	361	385	348	368	19	9	13	2	13	16	21	149	1704
2006	256	830	657	651	142	15	0	13	13	8	99	106	2790
2007	414	475	591	429	203	55	59	12	9	17	27	104	2395
2008	752	826	917	600	262	89	103	58	55	90	27	97	3876
2009	397	2	588	246	150	39	2	11	3	19	25	203	1684
2010	424	553	712	605	183	74	62	17	19	44	60	443	3195
2011	615	873	372	841	49	108	100	4	23	37	19	255	3296
2012	636	800	803	466	511	106	21	7	4	36	58	114	3560
2013	551	569	865	483	175	37	9	19	15	45	16	133	2916
Promedio mensual	445	566	650	505	245	74	54	27	38	49	72	220	2941

Anexo A 4 Serie de precipitación homogenizada de la estación Ventanas

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado anual
1996	363	1044	751	46	1	0	0	0	0	0	0	116	2319
1997	602	359	1120	1075	472	450	160	620	623	686	1151	1220	8538
1998	1457	1434	1093	757	483	486	261	26	4	7	55	62	6124
1999	158	399	548	442	250	0	7	0	4	10	18	243	2079
2000	165	278	462	543	100	0	0	0	68	24	38	132	1810
2001	958	296	542	400	46	0	2	0	0	0	0	123	2365
2002	181	448	612	539	139	0	0	0	5	0	0	246	2170
2003	517	358	408	223	33	38	10	0	0	0	54	51	1690
2004	90	322	358	335	202	0	0	0	33	2	0	38	1379
2005	192	165	135	359	0	0	4	3	0	0	0	48	906
2006	267	809	400	37	76	33	0	0	0	0	22	135	1779
2007	435	209	514	260	98	38	0	0	0	0	0	155	1708
2008	465	829	468	492	191	0	0	4	18	41	11	24	2541
2009	508	203	217	123	36	0	0	0	0	0	0	359	1446
2010	481	410	516	441	156	0	53	0	11	0	17	326	2412
2011	584	352	138	355	31	23	60	5	8	0	0	106	1662
2012	526	485	768	486	283	15	0	0	0	0	0	47	2610
2013	345	445	543	500	107	0	0	0	2	4	0	27	1973
Promedio mensual	461	491	533	412	150	60	31	37	43	43	76	192	2528

Anexo A 5 Serie de precipitación homogenizada de la estación Echeandía

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado anual
1996	317	535	394	184	32	12	59	5	26	14	57	121	1756
1997	318	420	607	364	303	279	142	90	222	141	498	828	4210
1998	539	390	421	531	634	189	123	36	18	49	42	68	3038
1999	256	600	523	374	229	15	36	9	30	72	91	360	2595
2000	212	243	408	265	119	62	6	8	35	9	8	92	1467
2001	735	371	412	448	98	6	12	5	12	22	49	138	2305
2002	290	433	629	550	174	10	0	0	15	61	73	242	2479
2003	373	251	286	323	166	59	12	25	6	86	31	167	1784
2004	133	226	475	331	181	10	12	2	23	1	25	76	1494
2005	172	160	317	415	4	0	3	2	19	23	61		1176
2006	291	672	528	265	128	28	27	21	36	10	51	111	2168
2007	316	433	445	294	286	64	0	0	22	53	144	57	2112
2008	628	714	543	345	134	0	32	33	12	28	8	17	2494
2009	356	142	152	86	25	0	0	0	0	0	0	252	1014
2010	337	288	362	309	109	0	37	0	8	0	12	229	1691
2011	311	47	23	34	3	5	5	2	17	7	11	93	558
2012	424	459	783	412	124	43	2	3	2	25	23	52	2353
2013	228	329	536	251	79	12	4	4	14	17	7	51	1531
Promedio mensual	347	373	436	321	157	44	28	13	29	34	66	174	2012

Anexo A 6 Serie de precipitación homogenizada de la estación Zapotal

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado anual
1996	219	493	358	79	12	4	21	2	9	5	21	77	1301
1997	627	1282	1070	440	484	554	43	26	545	248	510	649	6479
1998	613	553	466	440	367	208	119	20	8	20	31	42	6479
1999	132	206	227	247	23	50				0		135	1020
2000	145	192	48	441	105	26	0	0	3	3	5	20	988
2001	541	219	304	277	48	2	5	2	4	8	18	85	1512
2002	76	1123	1027	642	26	0	4	0	0	11	27	209	3143
2003	364	510	97	145	42	39	5	10	4	15	0	156	1387
2004	79	344	461	216	123	4	4	1	4	8	9	38	967
2005	88	151	437	313	52	14	0	0	0	0	0	68	1123
2006	194	584	475	174	0	0	6	5	8	0	17	53	1515
2007	188	285	491	553	809	501	0	10	0	2	10	95	2944
2008	662	744	644	567	271	21	34	37	51	0	0	48	3079
2009	286	466	462	228	144	84	1	0	0	8	9	38	1671
2010	481	649	426	518	448	143	12	0	14	9	55	473	3226
2011	738	384	243	452	69	67	114	1	4	4	4	198	2277
2012	586	711	570	432	164	13	4	0	0	2	13	74	2569
2013	283	458	326	476	65	2	0	0	0	7	0	61	1678
Promedio mensual	350	520	452	380	181	96	22	7	42	20	46	153	

Anexo A 7 Serie de precipitación homogenizada de la estación Barranco

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Acumulado anual
2011	558	84	42	61	4	9	23	1	15	4	5	203	1009
2012	785	743	618	525	523	93	5	1	15	4	5	203	3520
2013	321	463	756	354	93	93	25	25	11	10	2	8	2160
2014	436	484	923	476	352	1	1	0	3	1	0	43	2721
2015	218	589	428	442	245	80	17	0	0	2	3	116	2140
2016	388	368	306	260	62	23	10	1	14	14	17	278	1741
2017	404	534	298	305	290	29	1	2	4	29	2	97	1996
2018	166	613	462	304	289	29	1	2	4	29	2	96	1998
Promedio mensual	410	485	479	341	232	45	10	4	8	12	4	131	2160

ANEXO B: Piezometría

ANEXO B 1 Niveles Piezométricos de los pozos del proyecto “Curipamba”

Pozo	X	Y	Profundidad	Elevación	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
83	695103	9855599	124	950	901	895	909			900	908
86	695008	9854700	225	942	927		918	921	923	927	927
99	695000	9855138	126	881	861		857	858	858	858	858
100	695100	9855150	114	903	885		886	890	891	897	896
103	695179	9855200	294	952	924						
107	695050	9855350	150	929	897	898	860	831	831	832	830
118	694919	9855100	126	858	838						
120	695150	9855649	141	932	907	911	913	931	925		
142	695254	9855300	274	975	929	930	924	920	917		
144	695200	9855101	303	961	922	920	942			971	969
145	695306	9855349	252	994	970	965	952	939	943	943	942
146	695299	9854900	219	951	944		905	911	911	914	913
149	695235	9854700	249	938	915		923	924	924	923	923
150	695458	9854699	216	948	927		917			920	
151	695227	9855249	257	975	929	923	918				
152	695498	9854750	399	979	933						
153	695550	9854899	260	998	960		916	921	922	920	920
154	695218	9855007	258	951	926		915	919	919	922	920
158	695183	9855200	300	951	951						
160	695451	9855349	270	1010	951	950	958	931		953	952
162	695427	9854949	230	1000	930		920	919	919	923	928
168	695149	9854899	126	924	909						
169	694987	9854950	153	872	860		853	857	857	860	859
170	695301	9855500	288	1005	951	948	953			956	943

ANEXO C: Escorrentía

ANEXO C 1 Coeficiente de escorrentía en función de la cobertura vegetal y la pendiente.

Fuente: Chow et al [22].

Character of surface	Return Period (years)						
	2	5	10	25	50	100	500
Developed							
Asphaltic	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concrete/roof	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Grass areas (lawns, parks, etc.)							
<i>Poor condition (grass cover less than 50% of the area)</i>							
Flat, 0–2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Average, 2–7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Steep, over 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Fair condition (grass cover on 50% to 75% of the area)</i>							
Flat, 0–2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Average, 2–7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Steep, over 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Good condition (grass cover larger than 75% of the area)</i>							
Flat, 0–2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Average, 2–7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Steep, over 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Undeveloped							
Cultivated Land							
Flat, 0–2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Average, 2–7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Steep, over 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pasture/Range							
Flat, 0–2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Average, 2–7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Steep, over 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Forest/Woodlands							
Flat, 0–2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Average, 2–7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Steep, over 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

ANEXO D: Hidroquímica

ANEXO D 1 Balance iónico de las muestras de análisis físico químico del proyecto Curipamba

SAMPLE	curi7	curi32	curi2	curi8	curi21	curi28	curi37-16	curi16-16	curi18-16	curi16-16	curi-30	curi16-17
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO3-	53	38	38	68	40	62	52	26	28	32	56	44
SO4=	10	4	1.3	7.5	3.7	2.1	2.5	1.4	1.6	3.5	2.1	2.6
Cl-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.42	0.6	0.52	0.1	0.69
NO3-	0.1	0.3	0.5	0.92	0.72	1	1.2	1.2	2.5	0.45	1.7	1
sum aniones	63.2	42.4	39.9	76.52	44.52	65.2	55.8	29.02	32.7	36.47	59.9	48.29
Na+	5.7	5.6	4.1	9.4	5.2	7.5	5.3	3.3	4.6	3.8	5.2	4.7
K+	1.5	1.5	0.93	1.7	1.3	1.3	1.9	1.1	1.5	0.77	0.78	0.9
Ca++	8.6	6.6	5.1	5.8	5.1	7.5	6.6	3.1	2.9	5.2	7.4	6.2
Mg++	3.8	1.6	1.6	4.7	1.9	3	4.7	1.6	1.6	1.9	3.6	1.9
sum cationes	19.6	15.3	11.73	21.6	13.5	19.3	18.5	9.1	10.6	11.67	16.98	13.7
Error (%)	-4.9	4.1	-11.5	-13.1	-10.7	-9.4	7.4	-5.9	-6.4	-2.9	-8.2	-15.5

ANEXO D 2 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi02	Límites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Solidos suspendidos totales	12	1500		
Oxígeno disuelto	8.4			No menor a 6
Dureza	19			5000
Turbidez	4		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3- 1.5	
Cloruro	0.6	5		250
Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5
nitrato	0.5	50	50	10
Nitrito	<0.1	0.2-1.5	3	1
Sulfato	1.3	< 500		
Cianuro	<0.02			0.1
Microbiológicos				
Coliformes totales	2400			50
Coliformes fecales	<30			600
Metales totales				
Aluminio	0.03	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.008	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01

Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	0.03	2	2	1
Cromo	<0.0005	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	0.06	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.0045	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Níquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	4.1	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	0.0024			0.1
Zinc	0.0003	0.01-0.05		5

ANEXO D 3 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi07	Límites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Sólidos suspendidos totales	9	1500		
Oxígeno disuelto	8.8			no menor a 6
Dureza	37			5000
Turbidez	<4		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.5	5		250
Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5

nitrato	0.1	50	50	10
Nitrito	<0.3	0.2-1.5	3	1
Sulfato	10	< 500		
Cianuro	<0.02			0.1
Microbiológicos				
Coliformes totales	11000			50
Coliformes fecales	4600			600
Metales totales				
Aluminio	0.02	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.005	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	0.0004	2	2	1
Cromo	<0.0005	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	0.04	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.0024	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Níquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	5.7	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	0.0031			0.1
Zinc	0.0066	0.01-0.05		5

ANEXO D 4 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi08	Limites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Solidos suspendidos totales	<5	1500		
Oxígeno disuelto	9.2			no menor a 6
Dureza	7			5000
Turbidez	5		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.2	5		250
Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5
nitrato	0.2	50	50	10
Nitrito	<0.1	0.2-1.5	3	1
Sulfato	1.4	< 500		
Cianuro	<0.02			0.1
Microbiológicos				
Coliformes totales	11000			50
Coliformes fecales	11000			600
Metales totales				
Aluminio	0.01	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.004	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	<0.0002	2	2	1
Cromo	<0.0005	0.05	0.05	

Estaño	<0.0005			2
Hierro	<0.02	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.0016	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Níquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	1.9	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	<0.0005			0.1
Zinc	0.0098	0.01-0.05		5

ANEXO D 5 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi16	Límites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Sólidos suspendidos totales	<5	1500		
Oxígeno disuelto	6.6			no menor a 6
Dureza	16			5000
Turbidez	<4		5	100
Aniones y no metálicos				
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.52	5		250
Fluoruro	<0.05	1.5	1.5	1.5
nitrato	0.45	50	50	10
Nitrito	<0.05	0.2-1.5	3	1
Sulfato	3.5	< 500		
Cianuro	<0.001			0.1

Microbiológicos				
Coliformes totales	46000			3000
Coliformes fecales	90			600
Metales totales				
Aluminio	0.02	0.2		0.2
Antimonio	<0.0001	0.02	0.02	
Arsénico	<0.0005	0.01	0.01	0.05
Bario	0.0043	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.02	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0001	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0001			0.2
Cobre	<0.005	2	2	1
Cromo	<0.0002	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	<0.02	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.0029	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0002	0.07		
Níquel	<0.001	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	0.0005	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	3.8	< 20		200
Uranio	<0.0001	0.015		0.02
Vanadio	0.0013			0.1
Zinc	<0.005	0.01-0.05		5

Limites máximos permisibles				
Curi21	mg/L	OMS	INEN	TULSMA

Solidos suspendidos totales	10	1500		
Oxígeno disuelto	8.8			no menor a 6
Dureza	12			5000
Turbidez	11		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.6	5		250
Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5
nitrato	1.3	50	50	10
Nitrito	<0.1	0.2-1.5	3	1
Sulfato	1.7	< 500		
Metales totales				
Aluminio	0.013	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.009	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	0.001	2	2	1
Cromo	<0.0005	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	<0.02	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.002	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Níquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025

Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	2.5	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	0.0008			0.1
Zinc	0.001	0.01-0.05		5

ANEXO D 6 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi28	Límites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Sólidos suspendidos totales	18	1500		
Oxígeno disuelto	5.2			no menor a 6
Dureza	32			5000
Turbidez	12		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.4	5		250
Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5
nitrato	0.9	50	50	10
Nitrito	<0.1	0.2-1.5	3	1
Sulfato	4.9	< 500		
Metales totales				
Aluminio	0.04	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.013	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75

Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	0.0011	2	2	1
Cromo	<0.0005	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	0.04	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.0064	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Níquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	4.2	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	0.0038			0.1
Zinc	0.002	0.01-0.05		5

ANEXO D 7 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi30	Limites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Solidos suspendidos totales	9	1500		
Oxígeno disuelto	8.7			no menor a 6
Dureza	14			5000
Turbidez	6		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.4	5		250

Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5
nitrato	1	50	50	10
Nitrito	<0.1	0.2-1.5	3	1
Sulfato	1.7	< 500		
Metales totales				
Aluminio	0.03	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.007	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	0.079	2	2	1
Cromo	<0.0005	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	0.03	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.0035	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Niquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	0.0006	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	3.5	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	0.0019			0.1
Zinc	0.016	0.01-0.05		5

ANEXO D 8 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi32	Limites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Solidos suspendidos totales	<5	1500		
Oxígeno disuelto	8			no menor a 6
Dureza	23			5000
Turbidez	9		5	100
Aniones y no metálicos				
Amonio	<0.1			0.05
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	5.1	5		250
Fluoruro	<0.1	1.5	1.5	1.5
nitrato	0.3	50	50	10
Nitrito	<0.3	0.2-1.5	3	1
Sulfato	4	< 500		
Cianuro	<0.02			0.1
Microbiológicos				
Coliformes totales	<0.30			50
Coliformes fecales	<0.30			600
Metales totales				
Aluminio	0.06	0.2		0.2
Antimonio	<0.0005	0.02	0.02	
Arsénico	<0.001	0.01	0.01	0.05
Bario	0.009	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.05	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0002	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0002			0.2
Cobre	0.0004	2	2	1

Cromo	<0.0005	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	0.09	0.5-50		0.3
Litio	0.006			2.5
Manganeso	0.01	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0005	0.07		
Níquel	<0.0002	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	<0.0002	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.001	0.01	0.04	0.01
Sodio	5.6	< 20		200
Uranio	<0.0002	0.015		0.02
Vanadio	0.0015			0.1
Zinc	0.003	0.01-0.05		5

ANEXO D 9 Comparación de la composición en mg/l con estándares de calidad de agua

Curi37	Limites máximos permisibles			
	mg/L	OMS	INEN	TULSMA
Solidos suspendidos totales	<5	1500		
Oxígeno disuelto	7.5			no menor a 6
Dureza	34			5000
Turbidez	<4		5	100
Aniones y no metálicos				
Cloro residual	<0.1		0.3-1.5	
Cloruro	0.59	5		250
Fluoruro	<0.05	1.5	1.5	1.5
nitrato	0.11	50	50	10

Nitrito	<0.05	0.2-1.5	3	1
Sulfato	9.4	< 500		
Cianuro	<0.001			0.1
Microbiológicos				
Coliformes totales	11000			3000
Coliformes fecales	<30			600
Metales totales				
Aluminio	0.04	0.2		0.2
Antimonio	<0.0001	0.02	0.02	
Arsénico	<0.0005	0.01	0.01	0.05
Bario	0.0046	0.07	0.7	1
Berilio	<0.0002			0.1
Boro	<0.02	0.05	2.4	0.75
Cadmio	<0.0001	0.03	0.003	0.01
Cobalto	<0.0001			0.2
Cobre	0.024	2	2	1
Cromo	<0.0002	0.05	0.05	
Estaño	<0.0005			2
Hierro	<0.02	0.5-50		0.3
Litio	<0.0005			2.5
Manganeso	0.018	0.4		0.1
Mercurio	<0.0001	0.006	0.006	0.001
Molibdeno	<0.0002	0.07		
Níquel	<0.001	0.07	0.07	0.025
Plata	<0.0001	0.1		0.05
Plomo	0.0009	0.01	0.01	0.05
Selenio	<0.0001	0.01	0.04	0.01
Sodio	4.9	< 20		200
Uranio	<0.0001	0.015		0.02
Vanadio	0.0031			0.1
Zinc	<0.005	0.01-0.05		5