

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TESIS

“DISEÑO DE COBERTURA DE CIERRE PARA EL CONTROL DE  
LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN  
UN DEPÓSITO DE DESMONTE”

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
CON MENCIÓN EN MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE

ELABORADO POR:  
CARLOS DARÍO CARRILLO BALBÍN

ASESOR:  
Dr. Ing. ALBERTO LANDAURO ABANTO

LIMA – PERÚ  
2023

**DEDICATORIA**

A mis padres, abuelos, esposa e hijas.

### **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la fortaleza necesaria para sobreponerme ante las adversidades.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>IV</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>RELACIÓN DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO I GENERALIDADES</b> .....	<b>18</b>
1.1 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....	18
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	22
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	22
1.3.1 Problema General .....	22
1.3.2 Problemas Específicos .....	23
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
1.4.1 Justificación de la Investigación .....	23
1.4.2 Importancia de la Investigación .....	24
1.5 OBJETIVOS .....	24
1.5.1 Objetivo General .....	24
1.5.2 Objetivos Específicos .....	24
1.6 HIPÓTESIS .....	25
1.6.1 Hipótesis General .....	25
1.6.2 Hipótesis Específicas .....	25
1.7 VARIABLES .....	25
1.7.1 Variables Independientes (X) .....	25
1.7.2 Variables Dependientes (Y) .....	25
1.7.3 Operacionalización de las Variables .....	25
<b>CAPÍTULO II EL MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>27</b>
2.1 BASES TEÓRICAS .....	27
2.1.1 Drenaje Ácido de Roca (DAR) .....	27
2.1.2 Pruebas Geoquímicas .....	30
2.1.2.1 Criterios de Evaluación de Resultados .....	31
2.1.2.1.1 Ensayos de Análisis Elemental .....	31
2.1.2.1.2 Potencial de Generación de Acidez .....	32
2.1.2.1.3 Criterios para Evaluación de Lixiviación de Metales .....	32
2.1.3 Diseño de Sistemas de Coberturas de Cierre .....	33
2.1.3.1 Sistemas de Cobertura SRD .....	34
2.1.3.2 Cobertura con Efecto de Barrera Capilar (CEBC) .....	35
2.1.4 Modelos Numéricos para Cierre .....	37

2.1.4.1	Código Numérico VADOSE/W .....	38
2.1.4.1.1	Función de Contenido Volumétrico de Agua .....	39
2.1.4.1.2	Función de Conductividad Hidráulica .....	44
2.2	MARCO CONCEPTUAL.....	47
2.2.1	Estándar de Calidad Ambiental (ECA)-Agua.....	47
2.2.2	Límite Máximo Permisible (LMP).....	47
2.2.3	Carga Contaminante de Metales .....	47
2.2.4	Precipitación.....	48
2.2.5	Evaporación.....	48
2.2.6	Infiltración.....	49
2.2.7	Suelo.....	49
2.2.8	Suelo Saturado y No Saturado .....	50
2.2.9	Succión.....	51
<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>		<b>53</b>
3.1	TIPO, NIVEL Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	53
3.1.1	Tipo de Investigación.....	53
3.1.2	Nivel de Investigación.....	53
3.1.3	Diseño de Investigación .....	53
3.2	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	54
3.2.1	Técnicas para Recopilación de Información .....	54
3.2.2	Instrumentos para Recopilación de Información .....	54
3.3	DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS.....	54
3.3.1	Condiciones Generales del Depósito de Desmonte .....	55
3.3.2	Caracterización Geoquímica .....	55
3.3.2.1	Composición Química.....	56
3.3.2.2	Generación de Acidez (DAR) .....	56
3.3.2.3	Lixiviación de Metales .....	58
3.3.2.4	Celdas de Humedad.....	58
3.3.3	Modelamiento Físico.....	59
3.3.3.1	Celdas de Prueba .....	60
3.3.3.2	Calibración Modelo Celda de Prueba.....	62
3.3.4	Modelamiento Numérico .....	67
3.3.4.1	Criterios de Diseño.....	67
3.3.4.2	Escenarios.....	68
3.3.4.3	Configuración del Sistema de Cobertura.....	68
3.3.4.4	Datos de Entrada del Modelo Integrado.....	70
3.3.4.4.1	Variables Meteorológicas.....	70
3.3.4.4.2	Propiedades de los Materiales.....	78
3.3.5	Análisis de la Infiltración .....	82
3.3.5.1	Escenario 1: Con Cobertura y PP Promedio.....	82
3.3.5.2	Escenario 2: Con Cobertura y PP Húmeda TR500 .....	85
3.3.5.3	Escenario 3: Sin Cobertura y PP Promedio.....	88
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>		<b>91</b>
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS .....	91
4.1.1	Análisis de Resultados .....	92

4.1.2	Contrastación de Hipótesis.....	95
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>98</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO 2: RESULTADOS Y SALIDAS DE LOS MODELOS.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO 3: ENSAYOS GEOQUÍMICOS .....</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXO 4: OTROS.....</b>	<b>134</b>
	<b>ANEXO 5: CURRICULUM VITAE.....</b>	<b>135</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo para la Oxidación de Pirita.....	29
Figura 2.2: Quebrada Cayesh (Ancash) Afectada por Drenaje ácido .....	30
Figura 2.3: Esquema Típico de un Sistema de Cobertura de Cierre .....	34
Figura 2.4: Esquema Típico de Coberturas del Tipo Barrera SR o SRD.....	35
Figura 2.5: Esquema Típico de una Cobertura del Tipo Barrera Capilar .....	36
Figura 2.6: Función de Contenido Volumétrico de Agua.....	40
Figura 2.7: Representación Esquemática de un Suelo No Saturado .....	50
Figura 2.8: Esquema de Suelo Saturado y No Saturado .....	51
Figura 2.9: Esquema de los Poros del Suelo y la Presión Negativa de Agua .....	52
Figura 3.1: Secuencia de Trabajo de la Investigación.....	54
Figura 3.2: Configuraciones de las Celdas de Prueba.....	60
Figura 3.3: Celdas de Prueba Construidas en la Unidad Minera .....	61
Figura 3.4: Infiltración y Precipitación Acumulada para la Celda de Prueba.....	63
Figura 3.5: Configuración de Cobertura N ° 6.....	64
Figura 3.6: Precipitación Ingresada al Modelo (agosto 2013-julio 2014) .....	66
Figura 3.7: Flujo de Agua Acumulada en la Base de la Capa de Arcilla.....	66
Figura 3.8: Configuración del Depósito de Desmonte y la Cobertura N°6 .....	70
Figura 3.9: Condición de Borde de Clima .....	71
Figura 3.10: Anomalías de Precipitación en el Periodo 2016-2017.....	74
Figura 3.11: Distribución Diaria de la PTA -Escenario 1 (Promedio).....	76
Figura 3.12: Distribución Diaria de la PTA -Escenario 2 (Húmedo TR 500) .....	76
Figura 3.13: PTA Acumulada -Escenario 1 (Promedio).....	77
Figura 3.14: PTA Acumulada - Escenario 2 (Húmedo TR 500).....	77
Figura 3.15: Curvas de Retención de Humedad de los Materiales de Suelo .....	80
Figura 3.16: Curvas de Conductividad de los Materiales de Suelo .....	81
Figura 3.17: Sistema de Cobertura Configurado - Escenario 1 .....	83
Figura 3.18: Balance Hídrico - Escenario 1 .....	84
Figura 3.19: Curva de Infiltración - Escenario 1.....	85
Figura 3.20: Sistema de Cobertura Configurado - Escenario 2 .....	86
Figura 3.21: Balance Hídrico - Escenario 2.....	86
Figura 3.22: Curva de Infiltración - Escenario 2.....	87
Figura 3.23: Depósito de Desmonte Configurado - Escenario 3 .....	88
Figura 3.24: Balance Hídrico - Escenario 3 .....	89
Figura 3.25: Curva de Infiltración - Escenario 3.....	90

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Diseños de Coberturas de Cierre de Minas en el Perú.....	20
Tabla 1.2: Diseños de Coberturas de Cierre de Minas en el Mundo.....	21
Tabla 1.3: Operacionalización de Variables .....	26
Tabla 2.1: Tipos de Pruebas Geoquímicas .....	31
Tabla 2.2: Criterios para Determinación de PAG .....	32
Tabla 3.1: Programa de Caracterización Geoquímica en Depósito de Desmonte .....	55
Tabla 3.2: Resultados de Ensayos ABA .....	57
Tabla 3.3: Resumen de Evaluación DAR .....	59
Tabla 3.4: Volumen de Infiltración en la Celda de Prueba .....	63
Tabla 3.5: Materiales Configurados en el Modelo Calibrado .....	64
Tabla 3.6: Propiedades de los Materiales de Cobertura.....	65
Tabla 3.7: Escenarios Evaluados para el Modelamiento .....	68
Tabla 3.8: Materiales Configurados en el Modelo.....	69
Tabla 3.9: PTA para Diferentes Periodos de Retorno (TR).....	72
Tabla 3.10: Eventos EFEN.....	73
Tabla 3.11: PTA por Escenarios .....	75
Tabla 3.12: Precipitación Media Mensual por Escenarios.....	75
Tabla 3.13: Variables Climáticas Ingresadas al Modelo.....	78
Tabla 3.14: Propiedades de los Materiales de la Cobertura .....	79
Tabla 3.15: Valores de PWP Considerados en el Modelo .....	81
Tabla 3.16: Propiedades Térmicas de los Materiales.....	82
Tabla 3.17: Resultados del Balance Hídrico - Escenario 1 .....	84
Tabla 3.18: Resultados del Balance Hídrico - Escenario 2.....	87
Tabla 3.19: Resultados del Balance Hídrico - Escenario 3.....	89
Tabla 4.1: Estimados de Infiltración por Escenarios .....	95

## RELACIÓN DE ABREVIATURAS

- ABA: Balance Acido Base.
- ECA: Estándar de Calidad Ambiental.
- CEBC: Cobertura con Efecto de Barrera Capilar.
- DAR: Drenaje Ácido de Roca.
- LMP: Límite Máximo Permisible.
- MINEM: Ministerio de Energía y Minas.
- MINAM: Ministerio del Ambiente.
- NAG: Generación de Acidez Neta
- PAG: Potencial de Generación de Acidez.
- PNN: Potencial Neto de Neutralización.
- PWP: Initial Pore-Water Pressure. Presión de Poro de Agua.
- SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- SWCC: Soil Water Characteristic Curve. Curva característica de almacenamiento de agua.
- SP, GP, ML, CL, o similares: Tipo de clasificación de suelos según USCS.
- SR: Storage-Release. Tipo de cobertura de almacenamiento y liberación.
- SDR: Storage – Divert – Release. Tipo de cobertura de Almacenamiento, Derivación y Liberación.
- USCS: Unified Soil Classification System. Sistema de Clasificación de Suelos Unificado.
- USDA: United States Department of Agriculture. Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

## RESUMEN

El Perú es un país que en los últimos años ha sostenido su economía basándose principalmente en el desarrollo de proyectos mineros, los cuales, como parte de su proceso productivo, generan grandes volúmenes de residuos mineros que al no ser manejados adecuadamente podrían generar impactos ambientales.

Con la finalidad de establecer condiciones adecuadas para que el desarrollo y cese del proyecto minero, la normatividad vigente como la Ley 280901, y su reglamento DS 033-2005-EM, exigen que el titular minero presente un plan de cierre de minas que incluya el presupuesto y las medidas para el aseguramiento de la estabilidad física y química de los residuos y componentes mineros susceptibles de generar impactos negativos. La estabilidad física busca evitar el deslizamiento de los materiales por causas naturales o geológicas, mientras que la estabilidad química busca evitar la generación de emisiones y efluentes que impliquen el incumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP).

Entre los principales residuos mineros asociados a los impactos ambientales se encuentran los relaves y los desmontes de mina, los cuales podrían generar drenaje ácido en caso de que estos materiales queden expuestos al ambiente sin ninguna medida de manejo adecuada. La apropiada caracterización del residuo minero, así como la predicción de la calidad del drenaje, y un manejo adecuado de estos materiales pueden evitar la formación de drenaje ácido.

La presente investigación tiene como objetivo principal aplicar la metodología de diseño de cobertura de cierre propuesto por la Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros del MINEM (2007), y determinar su influencia en

la reducción del impacto ambiental asociado al agua, en un depósito de desmonte de una mina a tajo abierto ubicada en Cusco, a una altitud aproximada de 4000 msnm.

La evaluación de la influencia de la colocación de un sistema de cobertura de cierre en un depósito de desmonte fue realizada por medio de tres escenarios (escenarios 1, 2 y 3) los cuales se basaron en modelar la infiltración de una cobertura existente aplicando el código numérico VADOSE/W (GEOSTUDIO 2012). La cobertura existente que fue construida en campo a pequeña escala por parte de la Unidad Minera presenta un espesor total de 0.8 m y está conformado por 0.4 m de material de préstamo en la superficie, 0.2 m de grava en la parte intermedia, y 0.2 m de arcilla en la base.

Previo a la evaluación de escenarios (1,2 y 3) se realizó un proceso de calibración del modelo considerando como datos de entrada los registros de información de la cobertura existente, con la finalidad de que el código numérico pueda reproducir los mismos niveles de infiltración de agua registrados en campo (60 mm/año). Posteriormente, en el mismo modelo calibrado, se incluyó al depósito de desmonte en la base de la cobertura de la celda de prueba y se evaluó su comportamiento en conjunto mediante los escenarios 1 2 y 3. El Escenario 1 consideró la colocación de una cobertura de cierre y una precipitación promedio multianual (826 mm). El Escenario 2, consideró la colocación de una cobertura de cierre y una precipitación que corresponde a un escenario extremo húmedo de 500 años de periodo de retorno (1553 mm). Finalmente, el Escenario 3, no consideró la colocación de una cobertura de cierre y la precipitación correspondiente fue la del promedio multianual (826 mm). En ninguno de los escenarios evaluados se consideró la precipitación extrema asociada a Eventos del Fenómeno El Niño (EFEN) debido a que los valores de precipitación

anual (767.1 mm para el periodo 1997-1998 y 734.6 mm para el periodo 2016-2017) se encuentran por debajo del promedio (826 mm), lo cual indicaría que la ubicación del depósito desmonte no se encuentra influenciada por las precipitaciones extraordinarias generadas por este tipo de fenómeno meteorológico.

De acuerdo con el análisis de resultados de los escenarios evaluados, la colocación de un sistema de cobertura de cierre sobre un depósito de desmonte si influye significativamente en la reducción de los volúmenes de agua asociados a la infiltración, situación que se puede ver reflejada con el incremento de la infiltración de 5% a 24 % cuando no se cuenta con una cobertura de cierre.

Los espesores propuestos de los materiales de suelo empleados (0.8 m), así como la infiltración estimada (5%) antes de ingresar al depósito de desmonte se encuentran en el orden de magnitud de los casos documentados por la guía del MINEM (2007), donde los espesores de los sistemas de coberturas varían entre 0.625m para la mina Run Jungle de Australia, y 2.1 m para la Mina Lorraine de Canadá, y la infiltración medida varía entre 0.4 % para la mina Barrick Goldstrike de Estados Unidos y 6.5 % para la mina Run Jungle de Australia.

El volumen de agua asociado al porcentaje de infiltración (5%) esperado no representaría ningún riesgo ambiental dado que, de acuerdo con los ensayos geoquímicos, el material del depósito de desmonte no cuenta con el potencial de generación de drenaje ácido (No PAG), y el agua de contacto generado cumpliría con los LMP y ECAs.

**Palabras claves:** Depósito de desmonte, cobertura de cierre, modelo numérico, calibración, escenarios, infiltración, fenómeno El Niño, Plan de Cierre de Minas, estabilidad química, y drenaje ácido.

## **ABSTRACT**

Peru is a country that in recent years has sustained its economy based mainly on the development of mining projects, which, as part of their production process, generate large volumes of mining waste that, if not properly managed, could generate environmental impacts.

In order to establish adequate conditions for the development and cessation of the mining project, current regulations such as Law 280901, and its regulation DS 033-2005-EM, require the mining owner to submit a mine closure plan that includes the budget and measures to ensure the physical and chemical stability of the waste and mining components likely to generate negative impacts. Physical stability seeks to prevent the slippage of materials due to natural or geological causes, while chemical stability seeks to avoid the generation of emissions and effluents that imply non-compliance with Environmental Quality Standards (ECA) and Maximum Permissible Limits (LMP).

Among the main mining wastes associated with environmental impacts are tailings and mine clearances, which could generate acid drainage if these materials are exposed to the environment without any proper management measures. Proper characterization of the mining waste, as well as prediction of drainage quality, and proper handling of these materials can prevent the formation of acid drainage (DAR).

The main objective of this research is to apply the closure cover design methodology proposed by the Guide for the Design of Mining Waste Deposit Covers of the MINEM (2007), and to determine its influence on the reduction of the environmental impact associated with water, in a waste deposit of an open pit mine located in Cusco at an altitude of approximately 4000 meters above sea level.

The evaluation of the influence of the placement of a closure cover system in a waste deposit was carried out through three scenarios (scenarios 1, 2 and 3) which were based on modeling the infiltration of an existing cover by applying the numerical code VADOSE/W (GEOSTUDIO 2012). The existing cover, which was built in a small-scale field by the Mining Unit, has a total thickness of 0.8 m and is made up of 0.4 m of borrow material on the surface, 0.2 m of gravel in the middle part, and 0.2 m of clay at the base.

Prior to the evaluation of scenarios (1, 2 and 3), a calibration process of the model was carried out, considering as input data the information records of the existing coverage, so that the numerical code can reproduce the same levels of water infiltration recorded in the field (60 mm/year). Subsequently, in the same calibrated model, the waste tank was included in the base of the test cell cover and its behavior was evaluated as a whole using scenarios 1, 2 and 3. Scenario 1 did consider the placement of a closure cover and a multi-year average rainfall (826 mm). Scenario 2 did consider the placement of a closure cover and precipitation that corresponds to an extreme wet scenario of 500 years of return period (1553 mm). Finally, Scenario 3 did not consider the placement of a closure cover and the corresponding precipitation was that of the multi-year average (826 mm). In none of the evaluated scenarios was the extreme precipitation associated with El Niño Phenomenon Events (EFEN) considered because the annual precipitation values (767.1 mm for the period 1997-1998 and 734.6 mm for the period 2016-2017) are below the average (826 mm), which would indicate that the location of the Desmonte deposit is not influenced by the extraordinary rainfall generated by this type of meteorological phenomenon.

According to the analysis of the results of the scenarios evaluated, the placement of a closure cover system over a waste tank does significantly influence the reduction of water volumes associated with infiltration, a situation that can be reflected with the increase in infiltration from 5% to 24% when there is no closure cover.

The proposed thicknesses of the soil materials used (0.8 m), as well as the estimated infiltration (5%) before entering the waste deposit are in the order of magnitude of the cases documented by the MINEM guide (2007), where the thicknesses of the cover systems vary between 0.625 m for the Run Jungle mine in Australia, and 2.1 m for Canada's Lorraine Mine, and measured infiltration ranges from 0.4% for the Barrick Goldstrike mine in the United States, and 6.5% for Australia's Run Jungle mine.

The volume of water associated with the expected infiltration percentage (5%) would not represent any environmental risk since, according to the geochemical tests, the material from the waste deposit does not have the potential to generate acid drainage (No PAG), and the contact water generated would comply with the LMPs and ECAs.

**Keywords:** Waste deposit, closure cover, numerical model, calibration, infiltration, El Niño phenomenon, Mine Closure Plan, chemical stability, and acid drainage.

## INTRODUCCIÓN

Los depósitos de desmonte de mina son componentes mineros donde se almacenan los residuos mineros sólidos provenientes del proceso de obtención de minerales.

Los residuos mineros que son almacenados en los depósitos de desmontes están conformados por fragmentos de roca de diferentes tamaños que al entrar en contacto con el agua y el aire podrían generar Drenaje Acido de Roca (DAR), la cual a su vez podría contaminar los cursos de agua superficiales que se encuentren en las inmediaciones de los componentes mineros. Estos residuos mineros también podrían contaminar el aire en caso de presentarse una dispersión de partículas con presencia de metales.

Con la finalidad de rehabilitar las áreas utilizadas o perturbadas debido a la actividad minera, el estado peruano, por medio de la Ley N° 28090 y su reglamento D.S. 033-2005-EM, exige que los titulares de las actividades mineras presenten un Plan de Cierre de Minas que incluya un presupuesto y las medidas para el aseguramiento de la estabilidad física y química de los residuos y componentes mineros susceptibles de generar impactos negativos, con la finalidad de establecer condiciones adecuadas para que el desarrollo y cese del proyecto minero se encuentre alineado con lo solicitado por la normatividad vigente. La estabilidad física busca evitar el deslizamiento de los materiales por causas naturales o geológicas, mientras que la estabilidad química busca evitar la generación de emisiones y efluentes que impliquen el incumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

Entre los métodos más conocidos y utilizados para asegurar la estabilidad química para el cierre de depósitos de desmonte se encuentra la colocación de un

sistema de cobertura de cierre que, de manera típica, podría estar conformada por diferentes materiales de baja permeabilidad, de origen natural (arena, grava, arcilla, suelo orgánico, o combinaciones) o sintéticos (geomalla, geomembrana, otros) dispuestos en capas de diferentes espesores, los cuales ayudaran a restringir el ingreso de agua y oxígeno hacia el botadero de desmonte.

Para evaluar el desempeño del sistema de cobertura de cierre existen códigos numéricos (software) que requieren como datos de entrada las variables climáticas y las propiedades geotécnicas e hidráulicas de los materiales de suelo que serán considerados en el sistema de cobertura de cierre.

La presente investigación tiene como objetivo diseñar un sistema de cobertura de cierre para un depósito de desmonte de una mina a tajo abierto por medio de la aplicación del código numérico unidimensional VADOSE/W.

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 Antecedentes Bibliográficos**

A continuación, se describen los antecedentes que fueron considerados para el desarrollo de la presente tesis:

Durand (2014), Tesis denominada “Aplicación Numérica para las Coberturas de Los Depósitos de Residuos Mineros”. Mediante la aplicación del código numérico VADOSE/W se realizó el diseño y el modelamiento de los niveles de infiltración de agua de 10 sistemas de coberturas de cierre colocados sobre un depósito de desmonte de mina ubicada en Huancavelica, Perú.

Los valores de infiltración obtenidos del modelamiento numérico de los 10 sistemas de coberturas de cierre fueron ajustados con un factor obtenido a partir del cociente entre la infiltración de agua medida en la mina Equity Silver ubicada en la parte interior y central de Columbia Británica, aproximadamente a 575 km al norte-noroeste de Vancouver; y la infiltración modelada para la misma mina Equity Silver con el código numérico VADOSE/W, el cual fue realizado a partir de la información de los parámetros geotécnicos e hidráulicos que se reportaron en MINAM (2007).

MINEM (2007). Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros presenta casos documentados de diseño de sistemas de coberturas de cierre para unidades mineras ubicadas alrededor del mundo, las cuales presentan diferentes condiciones de clima y diferentes características de materiales de residuos mineros.

En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de diseños de coberturas de cierre a nivel nacional descritos en la guía del MINEM (2007). Tres (03) unidades mineras se encuentran ubicadas en la sierra central y una (01) en el norte, donde la precipitación varía entre 731 mm y 1784 mm. Los casos descritos indican que para la colocación de la cobertura se utilizaron materiales de suelo natural. No se utilizaron geos sintéticos. En aquellos casos que el residuo minero es generador de acidez (PAG) se colocó una capa de material calcáreo. En el resto de los casos donde el residuo es No PAG se colocaron mayoritariamente materiales basados en suelo orgánico que sirven como sustrato para el desarrollo de la vegetación.

En la Tabla 1.2 se muestra un resumen de los casos de diseños de sistemas de coberturas de cierre a nivel internacional. Los casos describen los resultados del monitoreo por un periodo mínimo de 5 años en sistemas de coberturas de cierre de minas ubicadas en Australia (02), Canadá (03) y Estados Unidos (01), donde la precipitación varía entre 260 mm y 1600 mm. Todas las coberturas descritas cuentan con instrumentación para medir la humedad, succión y oxígeno. Los tipos de coberturas utilizados fueron los SR (almacenamiento y liberación) y CEBC (barrera capilar). Los sistemas de coberturas fueron construidos sobre residuos mineros de comportamiento PAG y No PAG. Los indicadores de la eficiencia de las coberturas fueron el porcentaje de saturación que estuvo por encima de 85 % y la infiltración que estuvo entre 0.07 % y 11 % de la precipitación anual.

**Tabla 1.1: Diseños de Coberturas de Cierre de Minas en el Perú**

Unidad Minera	Ubicación	Altitud (msnm)	Tipo de Minería	Componente Minero	Drenaje Ácido	Tipo de Cobertura	Configuración	Precipitación (mm)
UM. Recuperada. CIA Minera Buenaventura	Huancavelica. Perú	4600	Subterránea (Polimetálica)	Depósito de Relaves	No PAG	Natural con vegetación	-5 cm de estiércol; -20 cm tierra vegetal -40 cm de arcilla (40 %)	731
UM Yanacancha. CIA Minera MILPO.	Pasco. Perú	4200	Subterránea (plomo, cobre, zinc, plata y oro)	Depósito de Relaves	No PAG	Natural con vegetación	-5 cm tierra negra -10 cm tierra avícola	1784
UM. Quiulacocha. CIA Minera Centromin Perú.	Pasco. Perú	4300	Subterránea y Tajo Abierto (cobre, zinc, plomo y plata)	Depósito de Relaves	PAG	Natural con vegetación	-20 cm tierra vegetal -10 cm material calcáreo (CaCO <sub>3</sub> , 19.8 %) -20 cm arcilla (45%)	900
UM Yanacocha. CIA Minera Yanacocha	Cajamarca. Perú	3800	Tajo Abierto (Oro)	-	No PAG	Natural con vegetación	Suelo orgánico sin espesor definido	1216

PAG: Genera drenaje ácido.

No PAG: No genera drenaje ácido.

Fuente: MINEM (2007)

**Tabla 1.2: Diseños de Coberturas de Cierre de Minas en el Mundo**

Unidad Minera	Ubicación	Tipo de Minería	Componente Minero	Drenaje Ácido	Tipo de Cobertura	Configuración	Evaporación (mm)	Precipitación (mm)	Infiltración
Equity Silver	Canadá	Tajo Abierto (Oro, Plata y Cobre)	Depósito de Desmonte	PAG	CEBC	-50 cm morrena compactada -30 cm morrena no compactada	-	650	5%
Rum Jungle	Australia	Subterránea y Tajo Abierto (uranio, cobre, níquel y plomo)	Depósito de Desmonte	PAG	SR	-15 cm roca triturada -25 cm arcilla arenosa -22.5 cm arcilla	600	1600	2% y 11%
Barrick Goldstrike	Nevada. Estados Unidos	Subterránea y Tajo Abierto (oro)	Depósito de Desmonte	-	SR	-120 cm grano fino -5 cm de suelo superficial	1270	260	0.07 %-0.7 %
Mina de Oro Kidston	Queensland, Australia	Tajo Abierto (oro)	Depósito de Desmonte	PAG	SR	-150 cm desecho rocoso -50 cm desmonte arcilloso	1650	700	0.25 % - 1.1 %
Mina Kristineberg	Lulea. Suecia	Subterránea (cobre y zinc)	Depósito de Relaves	PAG	CEBC	-150 cm morrena -30 cm morrena compactada	300	600	15 %

PAG: Genera drenaje ácido.

No PAG: No genera drenaje ácido.

CEBC: Cobertura con efecto de barrera capilar.

SR: Cobertura de almacenamiento y liberación.

Fuente: MINEM (2007)

## **1.2 Descripción de la Realidad Problemática**

La minería es una de las principales actividades económicas del país que generan gran cantidad de residuos que, de no ser manejados de manera adecuada, podrían causar impactos en el ambiente, principalmente en el agua, cuyos efectos podrían estar presentes incluso hasta después del cierre definitivo de la operación minera. Los residuos mineros son potenciales generadores de Drenaje Ácido de Roca (DAR) que al interceptarse con los cursos de aguas colindantes podrían afectar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y el ecosistema acuático. “Los relaves y desmontes de mina pueden contener sulfuros metálicos que al quedar expuestos al oxígeno de la atmósfera, son oxidados y generan drenaje ácido, es decir, ácido sulfúrico y metales en solución, iniciando una fuente de contaminación que luego es difícil y costoso controlar”. MINEM (2007).

Actualmente, existe una metodología ampliamente estudiada para el manejo de los residuos mineros, el cual consiste en colocar un sistema de cobertura de cierre sobre el componente minero que se desea cerrar. La cobertura de cierre es una técnica que tiene por finalidad reducir la producción de drenaje ácido por medio de la disminución del ingreso de agua y oxígeno.

## **1.3 Formulación del Problema**

### **1.3.1 Problema General**

¿De qué manera influye el diseño de una cobertura de cierre para la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte?

### **1.3.2 Problemas Específicos**

- ¿De qué manera influye el diseño de una cobertura de cierre en la reducción del volumen de agua infiltrada en un depósito de desmonte?
- ¿De qué manera influye el diseño de una cobertura de cierre en la reducción de la carga contaminante de metales en un depósito de desmonte?

## **1.4 Justificación e Importancia de la Investigación**

### **1.4.1 Justificación de la Investigación**

La normatividad peruana vigente tales como la Ley 280901, y su reglamento DS 033-2005-EM, establece que todas las unidades mineras operativas y los proyectos de exploración minera deben presentar un plan de cierre de minas. Además de ello, indica que el titular minero debe constituir una garantía financiera a fin de garantizar la implementación del cierre de la mina que incluyan las actividades correspondientes hasta el post-cierre. El cierre de minas debe contener entre otros aspectos la evaluación de la estabilidad física y la estabilidad química, la recuperación o rehabilitación de terrenos, y la revegetación.

La apropiada caracterización de la mina, la predicción de la calidad del drenaje y el manejo de los desechos de mina pueden evitar la formación de DAR en la mayoría de los casos y minimizar la formación de DAR en todos los casos. La prevención del DAR debe comenzar en la exploración y continuar a lo largo del ciclo de vida de la mina. Muchas minas no producirán DAR debido a las características geoquímicas inherentes de sus desechos de mina o a las muy áridas condiciones climáticas. Además, las minas que implementen trabajos de pronóstico bien fundamentados y, cuando procedan, las medidas de prevención y programas de monitoreo también deberán ser capaces de evitar importantes problemas de DAR. INAP (2009)

## **1.4.2 Importancia de la Investigación**

Una adecuada evaluación de los materiales que conforman el sistema de coberturas de cierre de acuerdo con las características climáticas y geotécnicas permitirá controlar la generación de DAR, reduciendo el ingreso de agua y oxígeno hacia el depósito.

La estabilización química por medio del control del DAR y la restauración de las áreas donde anteriormente se ubicaban los residuos mineros permitirá contar con un ecosistema rehabilitado que promoverá la formación de hábitats naturales acordes con el entorno paisajístico.

La construcción de sistemas de coberturas de cierre permitirá el manejo del DAR y con ello se podría reducir los riesgos y los impactos ambientales, y los costos de rehabilitación y restauración que sean asumidos por el gobierno en caso de convertirse en un pasivo ambiental. Adicionalmente, estas buenas prácticas para el manejo del DAR podrían promover el apoyo de las comunidades campesinas para el desarrollo de la expansión de la Unidad Minera.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar la influencia del diseño de una cobertura de cierre para la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte que operó entre los años 1980 y 2012.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la influencia del diseño de una cobertura de cierre en la reducción del volumen de agua infiltrada en un depósito de desmonte.

- Determinar la influencia del diseño de una cobertura de cierre en la reducción de la carga contaminante de metales en un depósito de desmonte.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis General**

El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte.

### **1.6.2 Hipótesis Específicas**

- El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción del volumen de agua infiltrada en un depósito de desmonte.
- El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción de la carga contaminante de metales en un depósito de desmonte.

## **1.7 Variables**

### **1.7.1 Variables Independientes (X)**

X=Diseño de una cobertura de cierre.

X1=Propiedades de los materiales de la cobertura de cierre (porosidad, succión, conductividad hidráulica saturada, y curva de almacenamiento de agua).

X2=Configuración de los materiales de la cobertura de cierre (espesor y pendiente).

### **1.7.2 Variables Dependientes (Y)**

Y=Impacto ambiental en el agua.

Y1= Volumen de agua infiltrada.

Y2= Carga contaminante de metales.

### **1.7.3 Operacionalización de las Variables**

En la Tabla 1.3 se muestra la relación entre las variables, indicadores e índices.

**Tabla 1.3: Operacionalización de Variables**

<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Índices</b>
<b>Variables Independientes (X)</b>		
X= Diseño de una Cobertura de Cierre.		
X1=Propiedades de los materiales de la cobertura de cierre	X <sub>11</sub> =Porosidad X <sub>12</sub> =Succión X <sub>13</sub> =Conductividad hidráulica X <sub>14</sub> =Contenido volumétrico de agua	X <sub>11</sub> =volumen / volumen X <sub>12</sub> =kPa X <sub>13</sub> = cm/s X <sub>14</sub> = volumen / volumen
X2=Configuración de los materiales de la cobertura de cierre (espesor y pendiente).	X <sub>21</sub> =Espesor X <sub>22</sub> =Pendiente	X <sub>21</sub> =m X <sub>22</sub> =%
<b>Variables Dependientes (Y)</b>		
Y=Impacto Ambiental en el Agua.		
Y1= Volumen de agua infiltrada.	Y1= Volumen	Y1= mm/año
Y2= Carga contaminante de metales	Y2= Concentración	Y2= mg/L

Fuente: Elaboración Propia

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL

#### 2.1 Bases Teóricas

##### 2.1.1 Drenaje Ácido de Roca (DAR)

Según MINEM (2007), el DAR se origina por la oxidación de la pirita (sulfuro más abundante) cuando están expuestos al ambiente, mediante diferentes reacciones químicas y bioquímicas, donde intervienen el oxígeno, temperatura, pH, bacterias, superficie específica del mineral y estructura química.

En la primera etapa de la oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) se obtienen sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) y ácidos ( $\text{H}^+$ ). En una siguiente etapa la oxidación del hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) podría generar hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) gracias a la intervención de las bacterias como agente catalizador, o generar hidróxido de hierro ( $\text{FeO.OH}$ ) y acidez ( $\text{H}^+$ ). Finalmente, para condiciones de pH mayores a 4, el hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) precipita como hidróxido Férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) y genera acidez ( $\text{H}^+$ ). Mientras que para valores de pH menores a 4 el hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) puede oxidar a la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) generando los mismos resultados obtenidos en la etapa inicial, es decir, sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) y ácidos ( $\text{H}^+$ ).

Como resultado final de esta serie de reacciones, en la Ecuación 1 se describe la oxidación de la pirita, donde se puede observar que 1 mol de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) produce 2 moles de ácido sulfúrico ( $2\text{H}_2\text{SO}_4$ ).



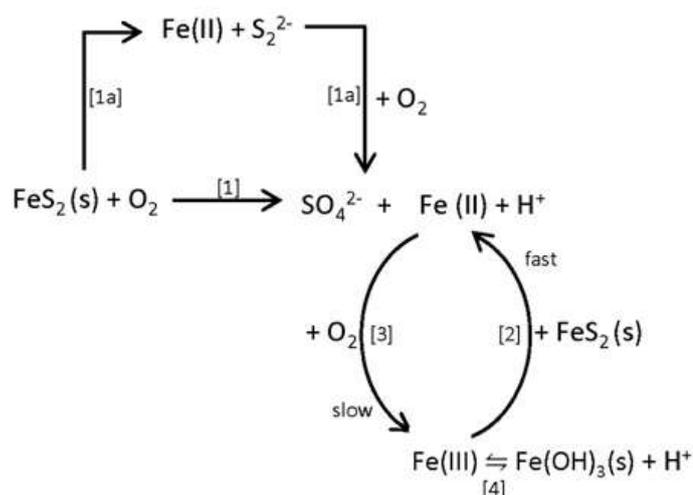
Según INAP (2009), el DAR se forma de manera natural cuando los sulfuros reaccionan con el agua y el aire. Esta situación se presenta con mayor intensidad en las mineras de tipo metálica y de carbón cuando se realizan actividades que incluyen la exposición del mineral al aire libre como la excavación y perforación del terreno natural. El DAR resulta de diferentes reacciones químicas que se generan en condiciones de pH neutras a ácidas.

En la Figura 2.1 se muestra de manera gráfica el proceso de oxidación de la pirita, donde:

- (1) : Oxidación directa de la pirita con el oxígeno.
- (1a): Disolución de la pirita previa a la oxidación directa mediante oxígeno.
- (2) : El hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) soluble actúa como oxidante de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y produce hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ). Esta reacción es considerablemente más rápida (hasta 3 veces más) respecto de la oxidación con oxígeno, y genera más acidez por 1 mol de pirita; siempre y cuando se cuenten con cantidades suficientes de hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) en condiciones ácidas de pH 4.5 y menores.
- (3) : La oxidación del hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) con oxígeno permitirá tener hierro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ), el cual permanecerá en solución y participará en la generación de DAR siempre y cuando se cuenten con condiciones ácidas. El oxígeno es importante para la respiración de las bacterias del tipo Acidithiobacillus genus,

quienes actuarán como agentes catalizadores para acelerar el proceso de oxidación.

- (4) El hierro férrico ( $\text{Fe}^{+2}$ ) puede ser removido del sistema acuoso como hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) previa oxidación con oxígeno y un proceso de hidrólisis.



**Figura 2.1: Modelo para la Oxidación de Pirita**

Fuente: INAP (2009)

El efecto combinado de las reacciones químicas (1) y (4), como suele presentarse cuando se tienen pH mayores a 4,5 generan el doble de acidez respecto de la reacción (1), tal como se puede observar en la reacción química de la oxidación de la pirita que se muestra en la Ecuación 2:



En la Figura 2.2 se muestra a la quebrada Cayesh en Ancash con un proceso avanzado de drenaje ácido.



**Figura 2.2: Quebrada Cayesh (Ancash) Afectada por Drenaje ácido**

Fuente: INIAGEM (2022)

### **2.1.2 Pruebas Geoquímicas**

Consiste en realizar una serie de análisis en laboratorio al residuo minero con la finalidad de determinar si el material presenta potencial para la generación de acidez (PAG), basados en los criterios internacionales propuestos por AMIRA, MEND e INAP. Estas evaluaciones se realizan a las muestras que son extraídas de los componentes mineros (depósito de desmonte y relaves, pilas de mineral, otros) mediante calicatas y testigos de perforación.

Los ocho (08) ensayos de laboratorio más comunes que se aplican a las muestras para un estudio geoquímico se encuentran agrupados en cuatro (04) grandes grupos: composición química (02), generación de acidez (02), lixiviación de metales (03) y pruebas cinéticas (01). El detalle de los ensayos se muestra en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1: Tipos de Pruebas Geoquímicas**

Pruebas Geoquímicas		Descripción
Composición Química	Análisis Elemental de Roca	Es utilizado para determinar la cantidad total de metales en la fase sólida.
	Mineralogía	Es una prueba realizada mediante rayos-X para identificar minerales con potencial de generación de acidez, tales como sulfuros, carbonatos y silicatos, y sulfosales.
Generación de Acidez (DAR)	Balance Acido Base (ABA)	Permite conocer si el material tiene el potencial de generación de acidez sobre la base del equilibrio entre los minerales que producen acidez y aquellos que lo neutralizan.
	Generación de Acidez Neta (NAG)	Es utilizado para verificar los resultados del ABA, y para evaluar la solubilidad de los productos de la oxidación completa de la muestra por peróxido de hidrógeno.
Lixiviación de metales	Análisis Lixiviado NAG	
	Extracción por Agitación en Frasco (SFE)	Es utilizada para estimaciones iniciales de la lixiviación de metales fácilmente solubles a corto plazo de las muestras sólidas sumergidas en agua destilada.
	Extracción por Precipitación Sintética (SPLP)	Es utilizada para estimar referencialmente la posible carga química del agua por el contacto inicial entre el residuo minero y la precipitación.
Pruebas Cinéticas	Celdas de Humedad (HCT)	Simula la aceleración de la meteorización de un material con respecto a las condiciones ambientales y evalúa las tasas de oxidación de sulfuros y liberación de metales.

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.2.1 Criterios de Evaluación de Resultados

#### 2.1.2.1.1 Ensayos de Análisis Elemental

Estos ensayos permiten conocer la composición química de los elementos en la fase sólida de las muestras obtenidas en campo.

En este tipo de ensayos se considera que los parámetros presentan concentraciones elevadas cuando estos exceden cinco veces el promedio de la abundancia en la naturaleza. (Smith - Huyck , 1999).

Los resultados de estos ensayos permiten tener una idea respecto de que elementos químicos podrían generar concentraciones altas en la fase líquida y que requieren un mayor nivel de estudio a fin de mitigar sus impactos en el medio ambiente.

### 2.1.2.1.2 Potencial de Generación de Acidez

Los resultados de los ensayos ABA (Balance Ácido Base) se evalúan mediante el indicador denominado Razón de Potencial Neto (RPN), el cual resulta del cociente entre el potencial de neutralización (PN) y el Potencial de Acidez (PA) de acuerdo con las guías internacionales como el MEND (2004) e INAP (2009).

Los ensayos NAG (Generación de Acidez Neta) muestran el efecto resultante de las reacciones de oxidación de sulfuros, liberación de acidez y el efecto de neutralización. El pH de la solución NAG proporciona indicios de las potenciales condiciones a futuro debido a que considera las reacciones reales a lo largo de la oxidación entre sulfuros y los minerales neutralizantes.

En la Tabla 2.2 se muestran los criterios establecidos para la evaluación PAG de las muestras evaluadas.

**Tabla 2.2: Criterios para Determinación de PAG**

Clasificación de Potencial de Acidez	Criterio
Potencial Generador de Acidez (PAG)	RPN menor a 1
	pH de NAG menor a 4.5
Incierto	RPN entre 1 y 2
No Generador de Acidez (No PAG)	RPN mayor que 2
	pH de NAG mayor o igual a 4,5

Fuente: MEND (2004) y AMIRA (2002)

### 2.1.2.1.3 Criterios para Evaluación de Lixiviación de Metales

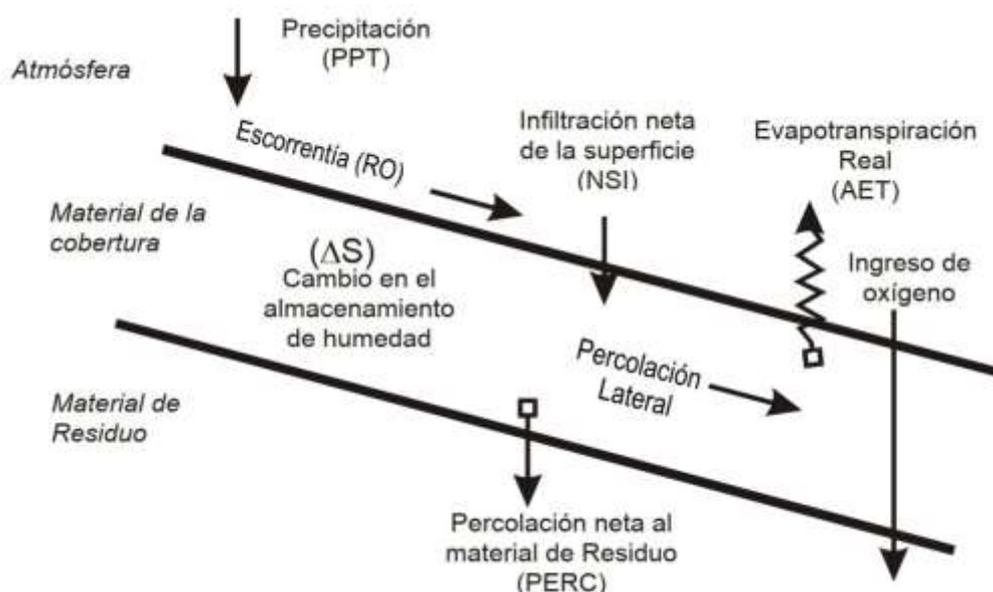
Consiste en comparar las concentraciones de los lixiviados con la normatividad de agua vigente como los LMP o ECA - Categoría 3 riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2). Los resultados de esta comparación permiten conocer de manera indirecta el comportamiento de la composición química de los lixiviados frente a las condiciones naturales.

### 2.1.3 Diseño de Sistemas de Coberturas de Cierre

Según el MEND (2004), el sistema de coberturas de cierre es una metodología que ha sido estudiada y aplicada en los últimos tiempos y que ha mostrado buenos resultados para el cierre de depósitos reactivos de desmonte de roca y relaves debido a que minimiza la degradación de los cuerpos receptores naturales. Asimismo, indica que el diseño del sistema de coberturas puede variar de acuerdo con las condiciones del lugar donde se encuentra el depósito. Sin embargo, todos los sistemas de coberturas tienen objetivos principales comunes el control del ingreso de oxígeno hacia el depósito manteniendo saturada la capa de la cobertura, minimizar el ingreso de agua hacia el depósito por medio de la colocación de un material de baja permeabilidad.

MEND (2004), señala también que entre los sistemas de coberturas de cierre más conocidos se encuentran los denominados SR (Storage-Release o de Almacenamiento y Liberación) o SDR (Storage – Divert – Release o de Almacenamiento, Derivación y Liberación), y la Cobertura con Efecto de Barrera Capilar (CEBC), las mismas que se detallan a continuación.

En la Figura 2.3 se muestra un esquema un esquema típico de un sistema de cobertura de cierre y su interrelación con las variables meteorológicas (precipitación, evapotranspiración) y parámetros hidrológicos (escorrentía, infiltración, percolación y almacenamiento de humedad).



**Figura 2.3: Esquema Típico de un Sistema de Cobertura de Cierre**

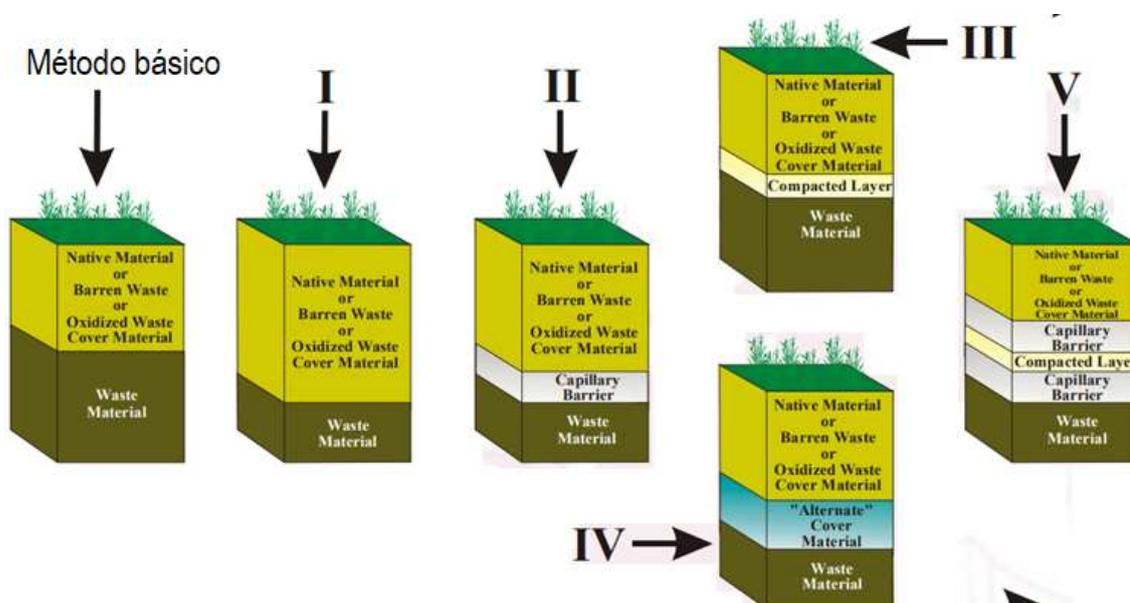
Fuente: MINEM (2007)

### 2.1.3.1 Sistemas de Cobertura SRD

Según MEND (2004), el sistema SRD es considerado para climas áridos y semi áridos, y consiste en colocar una capa impermeable sobre el depósito de desmonte o relaves para fomentar el almacenamiento y la saturación de agua de la cobertura durante la temporada de lluvias (época húmeda), y la liberación mediante la evapotranspiración durante la época seca o periodos largos de sequía, situación que permite controlar el ingreso de agua hacia el depósito y con ello el DAR.

Según el MINEM (2007), las coberturas SRD, también llamadas “alternativas”, “con equilibrio hídrico” o de “evapotranspiración, bajo condiciones áridas y semi áridas y colocadas sobre un terreno inclinado, favorecen a la reducción de la infiltración de la lluvia y a la lixiviación de metales en el depósito de residuos mineros. Este tipo de cobertura fomentan la escorrentía, evapotranspiración, el almacenamiento y el drenaje lateral. Un diseño típico de una cobertura SRD consiste en la colocación de un suelo de material fino sobre uno grueso.

En la Figura 2.4 se muestran diferentes configuraciones de una cobertura del tipo SR o SDR, que van desde una configuración básica (cobertura I) de una sola capa de suelo (capa de suelo natural) hasta una compleja (cobertura V) de 2 capas (capa compactada que podría ser arcilla y una capa de suelo natural para el crecimiento de la vegetación). El costo de una cobertura compleja es significativamente mayor respecto de una simple debido al tamaño de los espesores de las capas a considerarse. Se espera que una cobertura compleja presente un mejor rendimiento asociado a la reducción de los niveles de infiltración hacia el depósito de residuo minero.



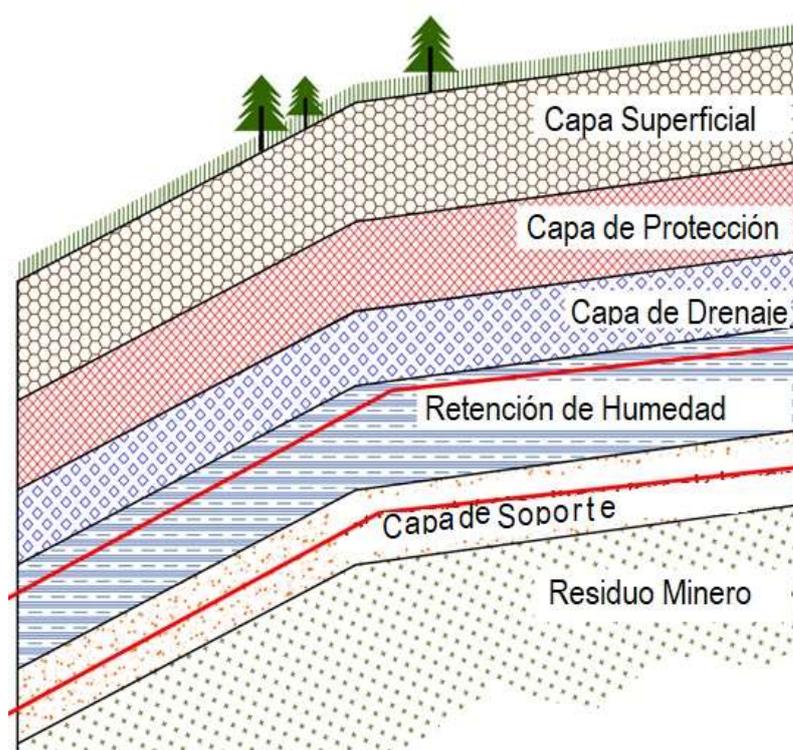
**Figura 2.4: Esquema Típico de Coberturas del Tipo Barrera SR o SRD**

Fuente: MEND (2004)

### 2.1.3.2 Cobertura con Efecto de Barrera Capilar (CEBC)

Según el MINEM (2007), este tipo de cobertura se sustenta sobre la teoría de la barrera capilar, la cual se presenta en materiales que cuentan con partículas finas como las arcillas. Este tipo de cobertura consiste en colocar una capa de material fino sobre una capa de material grueso. La capa fina retendrá mayor cantidad de agua respecto del material grueso debido principalmente al tamaño de poros más pequeños. Debido

a que la capa fina se mantendrá siempre con un nivel de saturación alto evitará el ingreso del agua hacia el depósito y reducirá el riesgo de generación de drenaje ácido. Por su parte el material grueso que se encuentra debajo del material fino fomentará la reducción de la conductividad hidráulica debido principalmente a que los gases ocuparan los espacios entre las partículas gruesas, los cuales inicialmente estuvieron ocupados con agua y que escurrieron debido a la baja capacidad de retención que se presenta en este tipo de material. En la Figura 2.5 se muestra un esquema típico de una cobertura de barrera capilar. Donde la capa superficial sirve como sustrato para la vegetación, la capa de drenaje (material grueso) que contribuye con el drenaje lateral, la capa de retención (material fino) de humedad es donde se retiene el agua con un alto grado de saturación, y la capa de soporte (material grueso) evitará interacción (efecto de rotura capilar) entre la capa de residuo mineral y la capa de retención de humedad.



**Figura 2.5: Esquema Típico de una Cobertura del Tipo Barrera Capilar**  
Fuente: Wilson (2007)

Según el MINEM (2007), para que se presente el efecto de barrera capilar la capa que retiene humedad (capa fina) debe presentar una conductividad hidráulica baja y la diferencia de conductividades hidráulicas con la capa gruesa debe ser de 2 a 3 órdenes de magnitud. Debido al riesgo de agrietamiento por parte de la arcilla en la capa de retención de humedad es recomendable utilizar suelos compuestos como arena limosa (SM), arena limosa con limo de baja plasticidad (SM-ML) y limo de baja plasticidad (ML).

#### **2.1.4 Modelos Numéricos para Cierre**

El modelamiento numérico es una técnica computacional que se basa en la aplicación de las leyes matemáticas para representar fenómenos físicos de diferente grado de complejidad y para predecir el comportamiento en el tiempo de los diseños propuestos a partir de modelos conceptuales. El modelamiento se puede realizar en una dimensión (1D), dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D) dependiendo principalmente de la geometría de la cobertura de cierre a construir y de los objetivos del proyecto.

Según el MINAM (2007), el modelamiento numérico es una herramienta importante para evaluar el comportamiento del flujo no saturado en una cobertura de suelo. Mediante un modelamiento es posible inferir la infiltración el movimiento del agua y su distribución en las capas de suelo que conforman la cobertura de cierre.

Según el MINAM (2007) existen diferentes códigos numéricos que son utilizados en el campo de la ingeniería para el cierre de componentes mineros debido a sus sofisticadas herramientas para realizar modelamientos de flujo de agua en medios no saturados, entre los cuales se encuentran el Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP), SOILCOVER, SEEP/W, VADOSE/W y SVFlux. Sin embargo,

algunos de estos códigos numéricos cuentan con versiones desactualizadas como es el caso del HELP y SVFlux. Para la presente investigación se optó por utilizar el código VADOSE/W (GEOSTUDIO 2012).

#### **2.1.4.1 Código Numérico VADOSE/W**

El código numérico VADOSE/W permite realizar análisis del comportamiento del agua en la zona no saturada del suelo y evaluar su interacción con la vegetación y la atmosfera mediante su módulo de condición de contorno de clima (*boundary condition climate*).

VADOSE/W es capaz de modelar escenarios complejos que van desde la infiltración del agua de lluvia hasta el derretimiento de nieve, evaporación del suelo, transpiración de las plantas, escorrentía y encharcamiento de agua.

VADOSE/W puede realizar el análisis de la infiltración para un régimen estacionario (se obtiene un solo valor de infiltración) o transitorio (se obtienen valores de infiltración para diferentes intervalos de tiempo).

Las propiedades del suelo ingresadas al VADOSE/W son determinantes para obtener una solución eficiente de las ecuaciones de elementos finitos los cuales están asociados a los resultados consistentes y representativos. Para ello VADOSE/W tiene integrado cuatro (04) modelos de materiales que se diferencian entre sí por la simplificación de las suposiciones de las propiedades térmicas, tal como se muestra a continuación:

- Modelo Térmico Completo
- Modelo Térmico Simplificado
- Modelo de Interfaz de Suelo
- Ninguno

El modelo térmico simplificado es utilizado para definir de manera rápida las propiedades térmicas del material cuando la temperatura en el agua y la evaporación no son importantes de evaluar. En caso de no tener claro que modelo utilizar se recomienda elegir el modelo térmico completo. El modelo de interfaz de suelo es utilizado generalmente para representar geomembranas, sistemas de drenaje y barreras que son colocados entre las capas de suelo evaluadas.

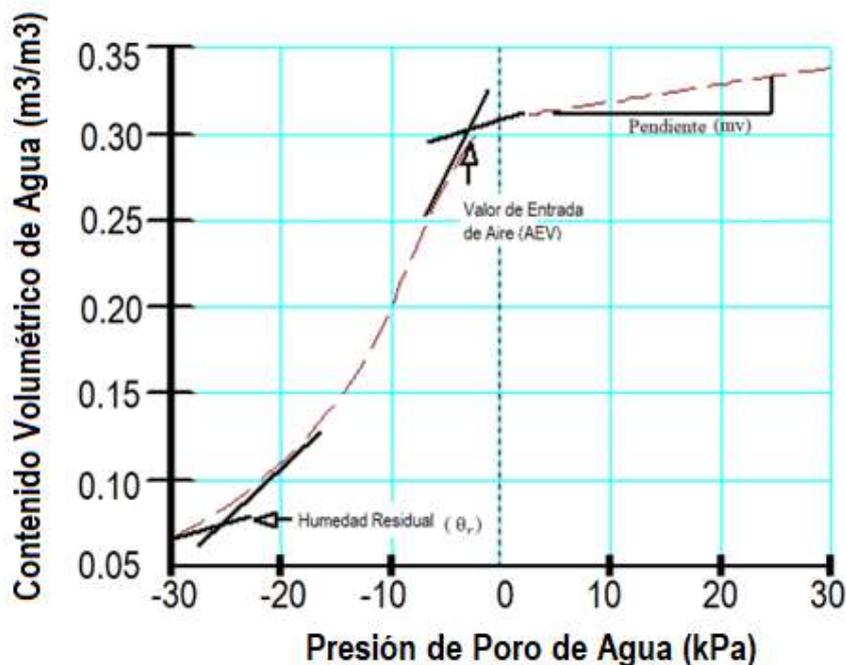
Los modelos de materiales descritos cuentan a su vez con funciones matemáticas de contenido de humedad y conductividad hidráulica las cuales tienen que ser incluidas en el modelo transitorio como datos de entrada.

#### **2.1.4.1.1 Función de Contenido Volumétrico de Agua**

La función de contenido de volumétrico de agua es la relación matemática entre la succión y el contenido de agua, y puede obtenerse directamente mediante ensayos de laboratorio o estimarse de manera indirecta a partir de algunos parámetros geotécnicos obtenidos en campo. Esta función representa la capacidad del suelo para almacenar agua bajo diferentes valores de succión.

El AEV es el valor de la presión en el cual el material del suelo empieza a drenar libremente. El AEV es una característica de los materiales de suelo y está relacionada con la mayor o menor capacidad de retención de agua y depende del tamaño de poro del material evaluado. La arena presenta un valor de AEV bastante menor comparado con la arcilla.

En la Figura 2.6 se muestra una función de contenido volumétrico de agua la cual se basa en tres características principales como son el Valor de Entrada de Aire (AEV), la pendiente de la función ( $m_v$ ) y el contenido de agua residual ( $\theta_s$ ) o saturación



**Figura 2.6: Función de Contenido Volumétrico de Agua**

Fuente: VADOSE/W

VADOSE/W cuenta con cuatro (04) métodos incorporados para generar la función de contenido volumétrico de agua. Uno de los métodos está basado en el tamaño de grano obtenido de una curva de distribución granulométrica. Otro de los métodos está basado en funciones matemáticas que se encuentran incorporados en el modelo, y los dos restantes son ecuaciones con datos puntuales que se basan en parámetros de ajuste de curvas conocidas.

### **Método 1: Tamaño de Grano de Kovacs Modificado**

Este método fue propuesto por Aubertin y otros (2003) a partir del método propuesto por Kovacs (1981). Estas modificaciones se hicieron para representar mejor el comportamiento de relaves de mina y suelos arcillosos.

La función de contenido volumétrico de agua se determina en un principio como la función de grado de saturación de dos componentes. El primero contribuye al agua que se almacena en el suelo mediante el fenómeno de capilaridad, las cuales están

asociadas a bajos valores de succión; y el segundo contribuye a la función considerando valores altos de succión, y la cantidad de agua en el suelo está asociada al fenómeno de la adhesión.

La función de saturación se determina a partir de la succión y las propiedades de los materiales tales como el tamaño y la forma de las partículas de suelo y la porosidad mediante la siguiente relación matemática que se muestra en la Ecuación 3:

$$S_r = \frac{\theta_w}{\eta} = S_{cap} + S_{adh}^*(1 - S_{cap}) \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- $S_r$  : Grado de saturación.
- $\theta_w$  : Contenido volumétrico de agua.
- $\eta$  : Porosidad.
- $S_{cap}$  : Grado de saturación debido a las fuerzas capilares.
- $S_{adh}^*$  : Grado limitado de saturación debido a la adhesión.
- $S_{adh}^* = \langle 1 - S_{adh} \rangle + 1$

El componente de saturación por adhesión está asociado con la película de agua que cubre a la partícula de suelo y depende de la succión, tamaño de las partículas, el coeficiente de forma y el tamaño de las partículas, las cuales se relacionan tal como se muestra en la Ecuación 4:

$$S_{adh} = AC_\psi \frac{\left(\frac{H_{co}}{\gamma\eta}\right)^{2/3}}{E^{1/3} \left(\frac{\gamma}{\gamma\eta}\right)^{1/6}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- $A$  : Parámetro de ajuste de curva.
- $\gamma$  : Succión.
- $\gamma\eta$  : Succión que permite garantizar un comportamiento adimensional.
- $E$  : Relación de vacíos.
- $C_\psi$  : Coeficiente de corrección.

$$C_\psi = 1 - \frac{\logaritmo\ natural\left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}\right)}{\logaritmo\ natural\left(1 + \frac{\gamma_o}{\gamma_r}\right)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

$\gamma_r$  : Succión para un contenido de agua residual.

$$\gamma_r = 0.86 \left( \frac{402.2}{E} \right)^{1.2} \text{ LímiteLíquido}(\%)^{1.74} \dots\dots\dots \text{Ecuación 6}$$

$H_{co}$  : Ascenso capilar promedio (cm).

Para suelos capilares:

$$H_{co} = \frac{402.2 (cm^2) \text{ LímiteLíquido}(\%)^{1.75}}{E} \dots\dots\dots \text{Ecuación 7}$$

$$H_{co} = \frac{b(cm^2)}{ED_{10}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 8}$$

Para suelos cohesivos:

$D_{10}$  : El diámetro de partícula (cm) correspondiente al 10% que pasa en la curva de tamaño de grano.

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \log(\text{Coeficiente de uniformidad}) + 1} \dots\dots\dots \text{Ecuación 9}$$

El componente de saturación por fuerzas capilares depende principalmente del diámetro del poro y la distribución del tamaño de poro, mediante la siguiente relación matemática mostrada en la Ecuación 10:

$$S_{cap} = 1 - \left[ \left( \frac{H_{co}}{\gamma} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[ -m \left( \frac{H_{co}}{\gamma} \right)^2 \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación 10}$$

Para suelos adhesivos:

$$m=1$$

$$A= 0.01$$

Para suelos cohesivos:

$$m=3 \times 10^{-5}$$

$$A= 7 \times 10^{-4}$$

## **Método 2: Función Ejemplo**

VADOSE/W cuenta con varias funciones típicas de contenido volumétrico de agua para los principales tipos de suelos como son la arena, grava, arcilla y limo. Estas

funciones requieren que como datos de entrada se ingresen los valores de contenido volumétrico de agua o la porosidad efectiva y el contenido de agua residual.

### **Método 3: Método de Fredlund and Xing (1994)**

Este método permite desarrollar la función de contenido volumétrico de agua en función de tres parámetros (Ecuación 11) y se recomienda utilizarlo cuando los valores de presión se encuentran entre 0 kPa y menos de  $10^6$  kPa.

$$\theta_w = C_\varphi \frac{\theta_s}{\left\{ \logaritmo\ natural \left[ 2.71828 + \left( \frac{\gamma}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \dots \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

Donde:

- $\theta_w$  : Contenido volumétrico de agua.
- $C_\varphi$  : Función de corrección.
- $\theta_s$  : Contenido volumétrico de agua saturada.
- $\gamma$  : Presión de poro de agua negativo.
- $a, m$  y  $n$  : Parámetros de ajuste de la curva de contenido volumétrico de agua.

El parámetro “a” (Ecuación 12) que está expresado en kPa es el punto de inflexión de la curva y está representado por un valor cercano al AEV. El parámetro “n” (Ecuación 14) controla la pendiente de la curva, y el “m” (Ecuación 13) controla el contenido de agua residual. A continuación, se muestran las fórmulas para el cálculo de estos tres parámetros.

$$a = \gamma_i \dots \dots \dots \text{Ecuación 12}$$

$$m = 3.67 \logaritmo\ natural \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \dots \dots \dots \text{Ecuación 13}$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72_{(s)} \gamma_i \dots \dots \dots \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- $\gamma_i$  : Presión de succión correspondiente para el contenido de agua que ocurre en el punto de inflexión de la curva.
- $s$  : Pendiente de la línea tangente a la función que pasa por el punto de inflexión de la curva.

#### **Método 4: Método de Van Genuchten, 1980**

Este método permite desarrollar la función de contenido volumétrico de agua en función de cuatro parámetros (Ecuación 15) y se recomienda utilizarlo cuando se conozcan los valores de ajuste de la curva, las mismas que también se pueden obtener mediante literatura.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{a}\right)^n\right]^m} \dots \dots \dots \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- $\theta_w$  : Contenido volumétrico de agua.
- $\theta_s$  : Contenido de volumétrico de agua saturado.
- $\gamma$  : Presión de poro negativo.
- $a, m$  y  $n$  : Parámetros de ajuste de la curva ( $a$  tiene unidades de presión).

#### **2.1.4.1.2 Función de Conductividad Hidráulica**

Para determinar la función de conductividad hidráulica insaturada, VADOSE/W cuenta con tres modelos incorporados que requieren como datos de entrada la función de contenido volumétrico de agua y la función de conductividad hidráulica saturada que se obtiene mediante ensayos de laboratorio. Sin embargo, a continuación, se describen los 2 modelos más utilizados (Fredlund et al, 1994 y Van Genuchten, 1980).

#### **Modelo 1: Fredlund et al (1994)**

En la Ecuación 16 se muestran las variables consideradas por método Fredlund et al (1994).

$$K_w = K_{sat} \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(2.71828^{\gamma}) - \theta(\gamma)}{2.71828^{\gamma i}} \theta(2.71828^{\gamma i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(2.71828^{\gamma}) - \theta_s}{2.71828^{\gamma i}} \theta'(2.71828^{\gamma i})} \dots \dots \dots \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- $K_w$  : Conductividad calculada para un contenido de agua específico o presión de agua de poro negativo.
- $K_{sat}$  : Conductividad hidráulica saturada.

- $\theta_s$  : Contenido volumétrico de agua.  
 $y$  : Logaritmo decimal de la presión de poro negativa.  
 $i$  : Intervalo entre el rango de  $j$  a  $N$ .  
 $j$  : Mínima presión de poro de agua negativa.  
 $N$  : Máxima presión de poro de agua negativa.  
 $\gamma$  : Succión correspondiente para el intervalo de  $j^{th}$ .  
 $\theta'$  : La primera derivada de  $\theta$ .

$$\theta = C(\gamma) \frac{\theta_s}{\left\{ \logaritmo\ natural \left[ 2.71828 + \left( \frac{\gamma}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \dots \dots \dots \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- $a$  : Valor aproximado de ingreso de aire al suelo.  
 $n$  : Parámetro de control de pendiente en el punto de inflexión en la curva de contenido volumétrico de agua.  
 $m$  : Parámetro relacionado con el contenido de agua residual.  
 $C(\gamma)$  : Función de corrección.

$$C(\gamma) = 1 - \frac{\logaritmo\ natural \left( 1 + \frac{\gamma}{C_r} \right)}{\logaritmo\ natural \left( 1 + \frac{1,000,000}{C_r} \right)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- $C_r$  : Constante relacionada con el contenido de agua residual.

### **Modelo 2: Van Genuchten (1980)**

En la Ecuación 19 se describe la conductividad hidráulica insaturada en función de la succión.

$$K_w = K_{sat} \frac{[1 - (a\gamma^{(n-1)})(1 + (a\gamma^n)^{-m})]^2}{((1 + a\gamma^n)^{\frac{m}{2}})} \dots \dots \dots \text{Ecuación 19}$$

Donde:

- $K_{sat}$  : Conductividad hidráulica saturada.  
 $a, m, n$  : Parámetros de ajuste de la curva.  
 $n = 1/(1 - m)$  .....Ecuación 20  
 $\gamma$  : Rango de succión requerido.

Los datos de entrada para determinar la conductividad hidráulica insaturada son la función de conductividad hidráulica saturada y los parámetros de ajuste “a” y “m” de la curva de contenido volumétrico de agua.

La pendiente de la función de conductividad hidráulica insaturada se calcula mediante la Ecuación 21:

$$S_p = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \left| \frac{d\theta_p}{d(\log \gamma_p)} \right| \dots \dots \dots \text{Ecuación 21}$$

Donde:

- $S_p$  : Pendiente de la función de conductividad hidráulica.
- $\theta_{s,r}$  : Contenido volumétrico de agua saturado y residual.
- $\theta_p$  : Contenido volumétrico de agua en el punto medio de la función de contenido volumétrico de agua.
- $\gamma_p$  : Succión matricial en el punto medio de la función de contenido volumétrico de agua.

Van Genuchten (1980) propuso la siguiente fórmula para estimar los parámetros “m” y “a”

Cuando  $S_p$  es calculado:

$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \dots \dots \dots \text{Ecuación 22}$$

Cuando  $S_p$  varía entre 0 y 1:

$$m = 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \dots \dots \dots \text{Ecuación 23}$$

Cuando  $S_p > 1$ :

$$a = \frac{1}{\gamma} (2^{\frac{1}{m}} - 1)^{(1-m)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 24}$$

## **2.2 Marco Conceptual**

### **2.2.1 Estándar de Calidad Ambiental (ECA)-Agua**

Según ANA (2020), el ECA es la medida de la concentración de los elementos y sustancias químicas, parámetros físico - químicos y biológicos en los cursos de agua superficiales o subterráneos que no tienen el potencial para afectar la salud humana ni el medio ambiente.

En la normatividad vigente se cuenta con los ECAs que fueron aprobados mediante D.S. N° 004-2017-MINAM.

### **2.2.2 Límite Máximo Permisible (LMP)**

Es la medida de la concentración de los parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos en los efluentes mineros o emisiones gaseosas que al ser excedidos podrían causar daños a la salud humana y al medio ambiente.

En la normatividad vigente se cuenta con los LMP para Efluentes de Actividades Minero-Metalúrgicas, los cuales fueron aprobados mediante D.S. N° 010-2010-MINAM.

### **2.2.3 Carga Contaminante de Metales**

Son los elementos químicos y sus compuestos que se encuentran disueltos en el agua, y que tienen el potencial de causar un impacto en el agua y exceder los ECAs.

Tienen su origen en la composición química de la roca y son los que están relacionados con la generación de DAR.

Según el INAIGEM (2022), los metales pueden estar disueltos o precipitar dependiendo de los valores de pH. Los metales con pH ácido menor a 5 están se pueden encontrar disueltos en el agua; sin embargo, si se incrementa el pH estos metales

disueltos precipitan. La coloración rojiza en algunos cursos de agua está asociada a la precipitación del Hierro.

#### **2.2.4 Precipitación**

Según Apithy (2003) y Bussière et al. (2003), la intensidad y duración de la precipitación podría generar un volumen significativo de agua que podría no ser manejado eficientemente por el sistema de cobertura, debido a que el agua saturaría la capa de almacenamiento y los excedentes ingresarían a las capas inferiores donde se encuentra el residuo minero generando filtraciones de agua y DAR.

Para evaluar el desempeño de un sistema de cobertura en términos de reducción de la tasa de infiltración, se debe considerar una condición crítica o conservadora, es decir que los niveles de precipitación sean los mayores posibles. Entre las condiciones conservadoras se puede considerar a la precipitación de los meses más húmedos (diciembre, enero y febrero), la precipitación de los años más húmedos, la precipitación asociada a un evento de Fenómeno del Niño (EFEN), o la precipitación de un escenario húmedo de un determinado periodo de retorno (100 años, 200 años o 500 años) resultante de un análisis estadístico. Se pueden considerar registros diarios o mensuales de precipitación.

#### **2.2.5 Evaporación**

La evaporación es una variable meteorológica que está relacionada con la pérdida de agua de suelo debido a la radiación solar.

Según INAP (2009), la evaporación es un factor importante que se debe considerar en el diseño de la cobertura debido a que permite que el agua se movlice hacía la atmosfera como vapor y evita en la medida de lo posible que se presente escorrentía y filtración hacia el cuerpo del depósito.

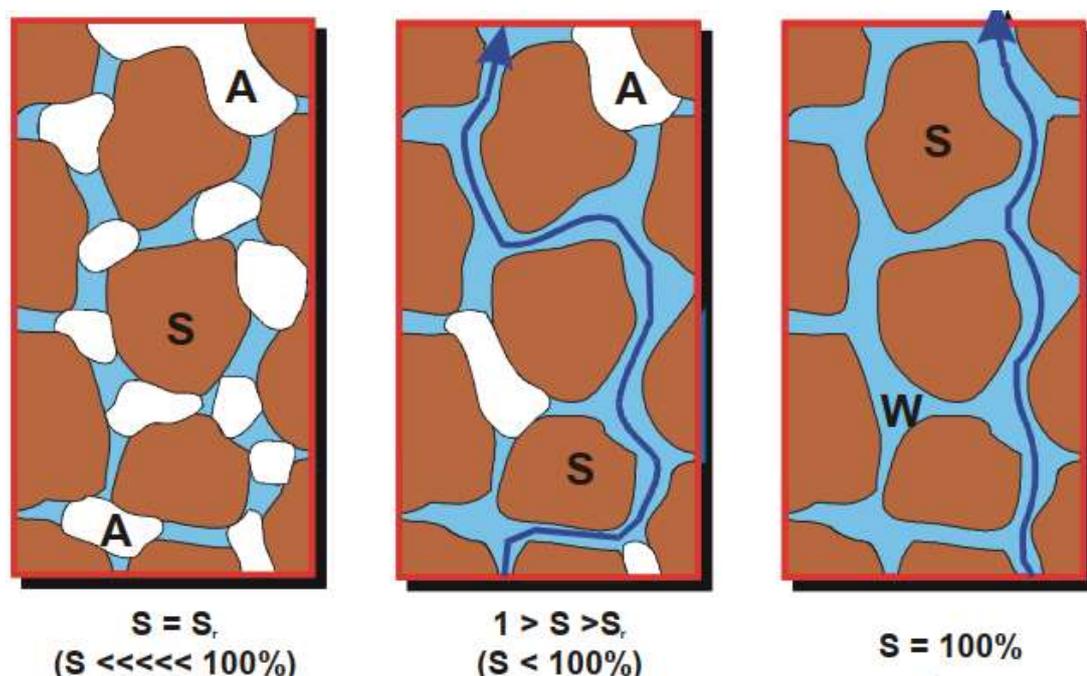
### **2.2.6 Infiltración**

Es un proceso físico que consiste en el ingreso de agua hacia un material de suelo determinado y esta influenciado por las condiciones climáticas (precipitación y la evaporación) y las características geotécnicas e hidráulicas (porosidad, SWCC y conductividad hidráulica). Dependiendo de las condiciones geotécnicas del suelo y la tasa de evaporación, el agua de lluvia podría escurrir lateralmente o infiltrarse. Si la evaporación es mayor que la precipitación se esperaría que no exista infiltración, en cambio si la precipitación es mayor que la evaporación se esperaría una infiltración de agua hacia las capas inferiores del suelo. La infiltración sobre un terreno natural tiene una relación directa con la recarga de los acuíferos, el cual resulta del cociente entre los milímetros de agua infiltrada y los milímetros de precipitación.

### **2.2.7 Suelo**

Según MEND (2004) el suelo es un medio físico compuesto por tres fases, como la partícula sólida, agua, y el aire. Una de las propiedades más fundamentales del suelo es la capacidad de intercambio de agua en diferentes direcciones. Los aspectos más importantes que tienen influencia con el diseño de coberturas de cierre es el almacenamiento y el movimiento del agua en el suelo no saturado. Un suelo tiene la capacidad de absorber agua y retenerla en su superficie.

En el Figura 2.7 se muestra de manera esquemática un suelo no saturado conformado con diferentes contenidos de humedad, donde “A” es el de aire presente en los espacios de vacíos, “S” parte solida del suelo, “W” es el agua almacenada en la parte no sólida, y “S” (fuera de los recuadros) es el contenido de humedad.



**Figura 2.7: Representación Esquemática de un Suelo No Saturado**

Fuente: CANMET (2002)

### 2.2.8 Suelo Saturado y No Saturado

Según Fredlund (2000), el suelo puede presentar dos (02) condiciones de acuerdo con su contenido de agua. La Figura 2.8 muestra el esquema de los estados del suelo saturado y no saturado.

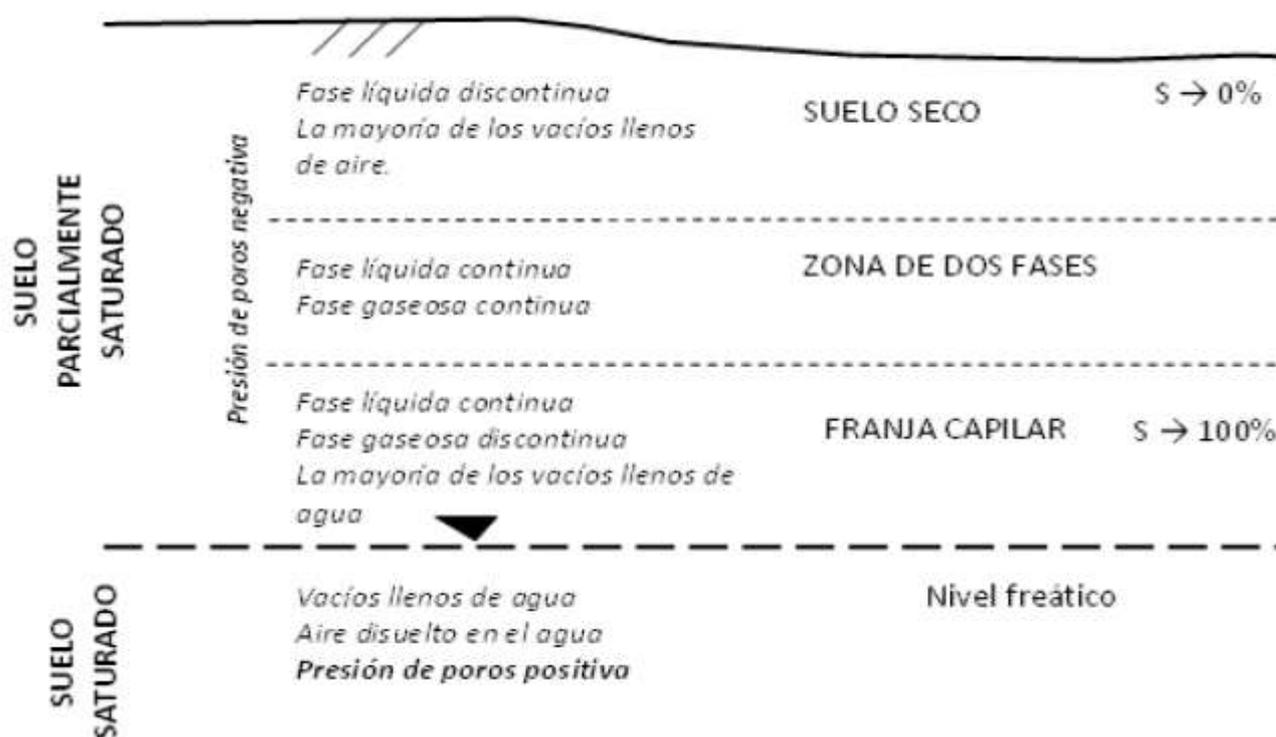
Los suelos saturados son denominados como tal debido a que los poros se encuentran llenos de agua. Estos suelos se ubican por debajo del nivel freático donde la presión de poros es positiva.

Los suelos no saturados se encuentran por encima del nivel freático donde la presión de poros es negativa. Estos suelos también son denominados parcialmente saturados, los cuales presentan las siguientes características:

- Los suelos ubicados inmediatamente por encima del nivel freático se encuentran en la zona capilar donde casi todos los poros se encuentran llenos de agua y el grado de saturación es 100%. Sin embargo, el suelo no podría

considerarse saturado. En estos suelos casi todos los poros son ocupados por el agua y domina el fenómeno de capilaridad.

- Los suelos que se encuentran cerca de la superficie se denominan suelos secos donde casi todos los poros se encuentran llenos de aire y el grado de saturación es 0%.
- Los suelos parcialmente saturados se ubican entre el suelo que se encuentra encima del nivel freático y el suelo seco. En este suelo el agua y aire llenan los poros, y el grado de saturación varía entre 20 % y 80 %.



**Figura 2.8: Esquema de Suelo Saturado y No Saturado**

Fuente: Fredlund (2000)

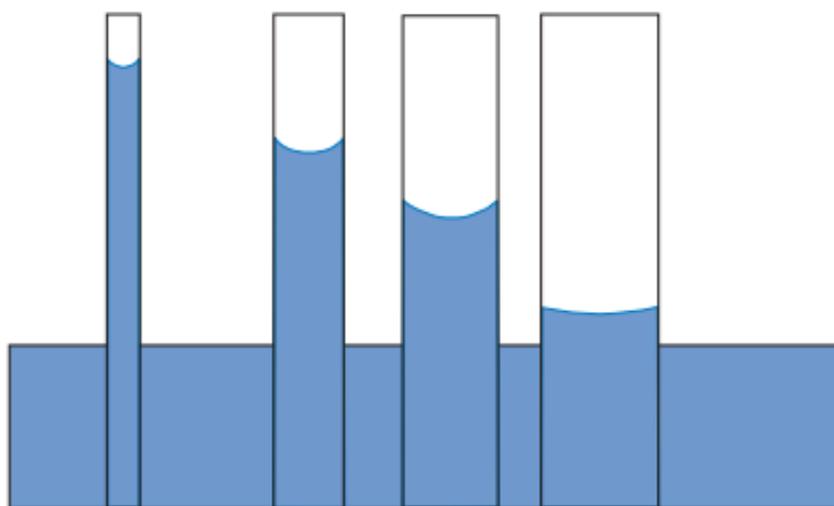
### 2.2.9 Succión

Según MEND (2004), la succión se define como la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua dentro del suelo. Un valor positivo de succión significa

que la presión de aire y agua es negativa. Por ejemplo, si el suelo presenta una succión de 100 kPa quiere decir que el agua se encuentra bajo una presión negativa de 100 kPa.

MEND (2004) señala que la presión negativa denominada succión matricial o potencial capilar está representada por las fuerzas de atracción y retención que se presenta entre las partículas sólidas y el agua del suelo, fuerzas que son denominadas capilares o de adhesión.

En la Figura 2.9 se puede observar los poros del suelo que están representados por los tubos capilares donde el agua presenta una presión negativa. También se observa que a medida que se incrementa el tamaño de las partículas (diámetro de tubos) disminuye la retención del agua del suelo (nivel de agua en los tubos).



**Figura 2.9: Esquema de los Poros del Suelo y la Presión Negativa de Agua**  
Fuente: MEND (2004)

Según Cardoso et al. (2006) señalan que la succión disminuye a medida que el suelo se va saturando; y por lo tanto se va incrementando el coeficiente de permeabilidad.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación**

##### **3.1.1 Tipo de Investigación**

La presente investigación es del Tipo Aplicada debido a que se aplicaron teorías científicas existentes con el propósito de prevenir el impacto ambiental relacionado con el drenaje ácido.

##### **3.1.2 Nivel de Investigación**

La presente investigación es de Nivel Explicativo - Correlacional debido a que se evaluaron los efectos de la variable independiente (cobertura de cierre de mina) sobre la variable dependiente (generación de drenaje ácido).

##### **3.1.3 Diseño de Investigación**

La presente investigación corresponde a un Diseño Experimental debido a que se establecieron criterios lógicos para el análisis del comportamiento de las variables por medio de escenarios o proyecciones.

## 3.2 Técnicas e Instrumentos para recopilación de Información

### 3.2.1 Técnicas para Recopilación de Información

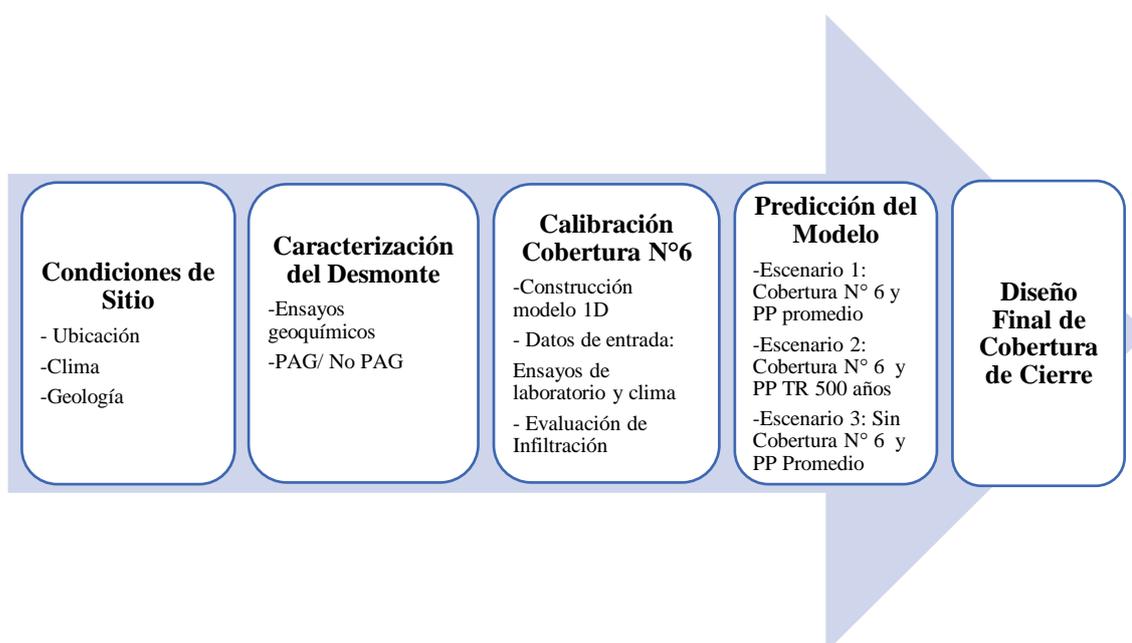
La técnica considerada para el desarrollo de la presente investigación fue la Observación. Se identificó la información relevante existente generada por la Unidad Minera para sus celdas de prueba, y se revisó información adicional de las estaciones meteorológicas ubicadas en el entorno del depósito de desmonte.

### 3.2.2 Instrumentos para Recopilación de Información

Los datos obtenidos de diferentes fuentes de información fueron sistematizados en hojas Excel, previo a su utilización en el desarrollo de los modelos.

## 3.3 Desarrollo del Trabajo de Tesis

La presente sección describe el contenido principal y las actividades realizadas para el diseño de un sistema de cobertura de cierre de acuerdo con la secuencia de pasos que se muestran en la Figura 3.1.



**Figura 3.1: Secuencia de Trabajo de la Investigación**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1 Condiciones Generales del Depósito de Desmonte

El depósito de desmonte se encuentra ubicado en el departamento del Cusco a una altitud aproximada de 4000 msnm.

La precipitación promedio anual se encuentra en el orden de los 760 mm. La época seca se presenta entre los meses de mayo y octubre, y la época húmeda entre noviembre y abril. La evaporación media anual se encuentra en el orden de los 1685 mm, la temperatura media en el orden de 7.5 °C y la humedad relativa promedio en el orden de 56 %.

El depósito de desmonte es un componente minero existente que forma parte de las instalaciones de una Unidad Minera que actualmente se encuentra en operación, y que entre los años 1980 y 2012 explotó un yacimiento tipo skarn del cual se extrajeron sulfuros y óxidos de cobre por el método de explotación a tajo abierto.

### 3.3.2 Caracterización Geoquímica

En la Tabla 3.1, se muestra el resumen de los ensayos geoquímicos de las 61 muestras evaluadas en los programas de muestreo realizados por la Unidad Minera entre el 2007 y el 2016.

**Tabla 3.1: Programa de Caracterización Geoquímica en Depósito de Desmonte**

Pruebas Geoquímicas		Número de Muestras
Composición Química	Análisis Elemental de Roca	48
	Mineralogía	8
Generación de Acidez (DAR)	Balance Acido Base (ABA)	61
	Generación de Acidez Neta (NAG)	45
Lixiviación de metales	Análisis Lixiviado NAG	45
	Extracción por Agitación en Frasco (SFE)	48
	Extracción por Precipitación Sintética (SPLP)	6
Pruebas Cinéticas	Celdas de Humedad (HCT)	1
Total de Muestras	-	61

Fuente: Unidad Minera

### **3.3.2.1 Composición Química**

De los resultados del análisis elemental de roca realizados en las cuatro (04) muestras en el 2014, las concentraciones de plata, arsénico, bismuto, cobre, molibdeno y selenio presentaron valores elevados en la fase sólida del desmonte. En casi todas las muestras las concentraciones de estos elementos excedieron 5 veces la abundancia promedio bajo condiciones naturales.

De los resultados del análisis mineralógico ensayado en una muestra del material de desmonte presentó una composición conformada por cuarzo (entre 15% y 22%), feldespato (entre 10% y 25%), plagioclasas (entre 19% y 48%), clorita (entre 3% y 5%), moscovita entre 3% y 7%, y calcita (entre 2% y 5%), yeso (4%) y granate (8%). No se registró presencia de pirita.

### **3.3.2.2 Generación de Acidez (DAR)**

#### **Ensayos ABA**

Las muestras presentaron pH en pasta con niveles que van desde neutro (7,4) a ligeramente alcalinos (8,4). Las concentraciones de azufre total en las calicatas variaron entre 0,04% y 0,5% en peso, mientras que en los sondajes variaron entre 0,3% y 2,4% en peso. También, los valores de azufre como sulfuros fueron en su mayoría más bajos que el azufre total.

De acuerdo con las clasificaciones potencial de neutralización de carbonato ( $\text{CO}_3\text{-RPN}$ ), la mayoría de las muestras de calicatas se clasificaron como No PAG, con excepción de una muestra que se clasificó como PAG y cuatro muestras que se clasificaron con potencial incierto. Todas las muestras de sondajes se clasificaron como No PAG. Estos detalles se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2: Resultados de Ensayos ABA**

Programa Geoquímico	N <sup>a</sup> de Muestras	pH	S - Total	S <sup>2</sup>	PA	PN	Potencial DAR	
			% en peso	% en peso	kg $\text{CaCO}_3\text{/t}$	kg $\text{CaCO}_3\text{/t}$	RPN	( $\text{CO}_3\text{-RPN}$ )
SRK 2007	5	4,3 - 6,6	1,5 - 2,8	0,02 - 0,2	0,6 - 5,3	-6 - 24	-1,1 - 39	<b>0,1 - 54</b>
UNI 2008	6	7,1 - 7,3	0,02 - 0,1	---	0,6 - 2,6	73 - 388	45 - 278	45 - 279
Golder 2009	2	6,5 - 8,2	0,2 - 1,4	0,01 - 0,3	8,4 - 43,1	39 - 84	2,0 - 5	1,1 - 2,0
Golder 2014	4	7,8 - 7,9	0,2 - 1,0	0,06 - 0,5	1,9 - 14,6	11 - 256	1,2 - 133	2 - 180
Golder 2014	3	6,2 - 7,6	0,6 - 1,2	0,05 - 0,2	1,6 - 5,3	1 - 114	0,2 - 22	1,8 - 22
Golder 2016 (muestras de sondajes)	26	7,7 - 8,4	0,04 - 0,6	<0,01 - 0,2	1,1 - 17,5	31 - 733	3 - 670	2,8 - 694
Golder 2016 (muestras de calicatas)	15	7,4 - 7,9	0,3 - 2,4	0,01 - 0,5	6,3 - 31,6	15 - 126	1,43 - 7,7	<b>0,9 - 8</b>

En **negrita** corresponden a PAG.

Fuente: Unidad Minera

En la Tabla 3 del Anexo 3 se muestran los resultados de los ensayos ABA para el “Botadero 23”, evaluados en los diferentes programas de investigación geoquímico.

### **Ensayos NAG**

Los resultados de pH de NAG presentaron características alcalinas a altamente alcalinas con valores de pH entre 9,2 y 11,8; por lo que las muestras clasifican como No PAG.

En la Tabla 4 del Anexo 3 se muestran los resultados de los ensayos NAG para el “Botadero 23” evaluados en los diferentes programas de investigación geoquímico.

### **3.3.2.3 Lixiviación de Metales**

De los resultados de Lixiviados NAG las concentraciones de las muestras de Golder (2014) y Golder (2016) se encuentran dentro de los LMP y ECA Categoría 3-D1 y Categoría 3-D2.

En los Lixiviados SFE de las muestras de Golder (2014) las concentraciones de las muestras se encuentran dentro de los LMP. Sin embargo, se observaron excedencias de los ECA Categoría 3-D1 y Categoría 3-D2 en los parámetros manganeso (1.1 mg/L respecto de 0.2 mg/L según la normativa para ambas categorías); y molibdeno (0.09 mg/L frente a 0.01 mg/L para riego y 0.5 mg/L para ganadería según la norma canadiense).

En la Tabla 5 del Anexo 3 se muestran los resultados de los ensayos de lixiviación SFE para el “Botadero 23”, evaluados en los diferentes programas de investigación geoquímico. Mientras que, en la Tabla 6 del mismo anexo se muestran los resultados de lixiviación NAG.

### **3.3.2.4 Celdas de Humedad**

De acuerdo con los resultados de los ensayos de celdas de humedad aplicado a una muestra de desmonte, el material clasifica como No PAG, lo cual confirma los resultados de las pruebas ABA.

Los cálculos de agotamiento indican que los minerales sulfurados se agotaron alrededor de la primera semana de ensayo en laboratorio, antes que se agote el PN total. Los tiempos de agotamiento indican que  $\text{CO}_3\text{-PN}$  se agotaría en aproximadamente 37 días luego de culminada la prueba. Estos detalles se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Resumen de Evaluación DAR**

Código de Muestra	Pruebas Estáticas					Pruebas Cinéticas			Potencial de Generación de Acidez	
	S <sup>2-</sup>	PN	CO <sub>3</sub> -PN	RPN	CO <sub>3</sub> -RPN	Tiempo de Agotamiento				
						S <sup>2-</sup>	PN	CO <sub>3</sub> -PN		
	%	Kg CaCO <sub>3</sub> /t	Kg CaCO <sub>3</sub> /t			Años	Años	Años	Pruebas Estáticas	Pruebas Cinéticas
B23-002	0,3	11	22,5	1,2	2,3	Agotado	Agotado	0,1	No PAG	No PAG

Fuente: Unidad Minera

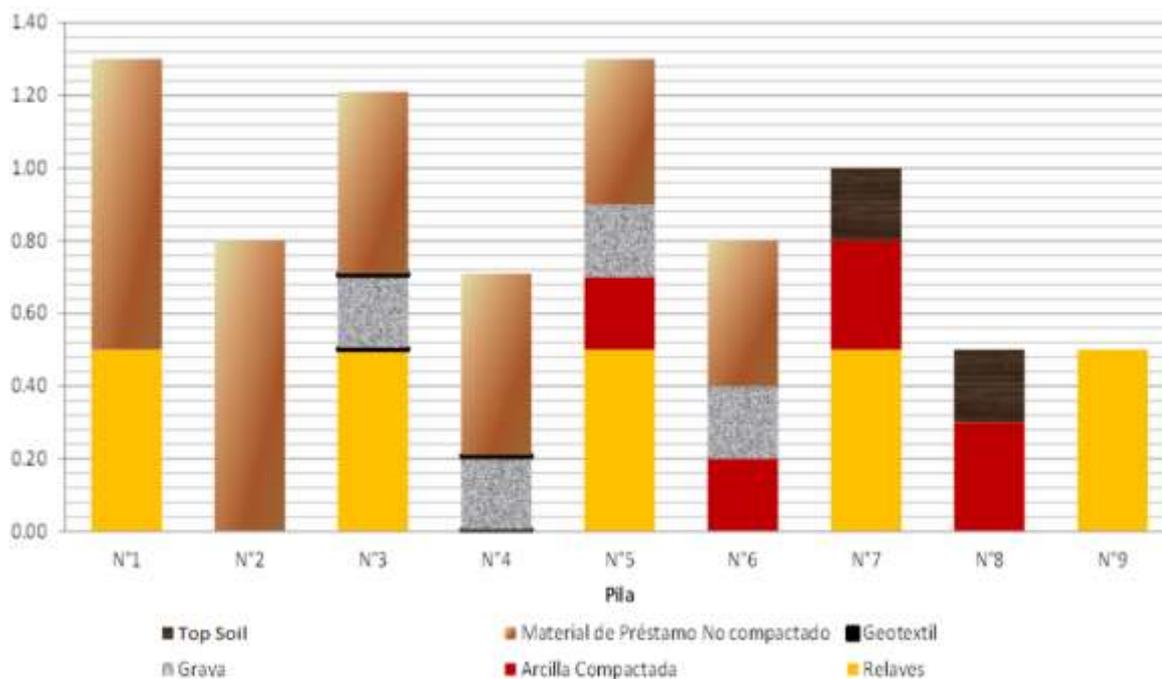
Respecto de los parámetros evaluados, se encontraron dentro de los LMP y ECAs, a excepción del manganeso cuyos valores oscilaron entre 0,04 mg/L y 0,45 mg/L. El ECA 3-D1 y ECA3-D2 presentan valores de 0,2 mg/L. El pH de los lixiviados se encontró entre 7,1 y 7,5.

En la Tabla 7-2 del Anexo 3 se muestran los resultados de los ensayos de celdas de humedad para el “Botadero 23”, evaluado mediante la muestra “B23-002”.

### 3.3.3 Modelamiento Físico

La metodología propuesta por el MINAM (2007) señala que los pasos principales para el diseño de un sistema de cobertura de cierre corresponden a la caracterización geoquímica, hidráulica y climática, el desarrollo de un modelamiento físico y el desarrollo de un modelamiento numérico.

Al respecto, la Unidad Minera viene realizando estudios desde el 2012 hasta la actualidad, uno de los cuales está relacionado con el modelamiento físico, para lo cual construyeron nueve (09) celdas de prueba dentro de la Unidad Minera que cuentan con diferentes configuraciones de materiales de suelo basados en los resultados de un diseño conceptual preliminar. En la Figura 3.2 se muestran las diferentes configuraciones evaluadas por la Unidad Minera mediante celdas de prueba (N° 1 al N° 9).

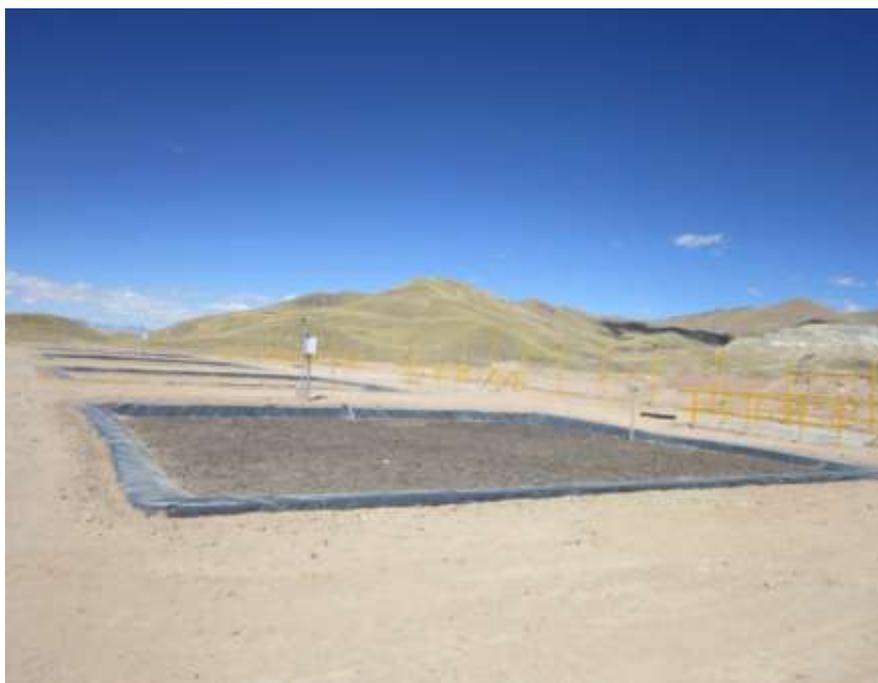


**Figura 3.2: Configuraciones de las Celdas de Prueba**

Fuente: Unidad Minera

### 3.3.3.1 Celda de Prueba

La celda de prueba es una poza experimental de 10m de largo y 12 m de ancho revestida con geomembrana donde se han colocado capas de suelo de diferentes espesores junto con instrumentos de medición de escorrentía, infiltración, contenido de humedad y de succión con la finalidad de evaluar su rendimiento en términos de infiltración. Para los registros de las variables climáticas se contó con una estación meteorológica local ubicado dentro de la Unidad Minera. En la Figura 3.3 se muestran las celdas de prueba construidas por la Unidad Minera.



**Figura 3.3: Celdas de Prueba Construidas en la Unidad Minera**

Fuente: Unidad Minera

Los materiales evaluados en las celdas de prueba fueron en su mayoría arenosos con presencia de arcilla y limo y relaves. También consideraron materiales de préstamo con alto contenido de arcillas con baja permeabilidad. Los materiales de préstamo son aquellos que provienen de otros sectores fuera de la Unidad Minera.

La información recolectada por la Unidad Minera de las celdas de prueba y que fue considerada para la presente investigación corresponde a un año de monitoreo continuo, comprendido entre agosto del 2013 y julio del 2014.

A continuación, se describe el proceso constructivo y manejo de cada una de las celdas de prueba:

- Se realizó una excavación de 10 m largo y 12 m de ancho.
- Se colocó un revestimiento de geomembrana de HDPE hasta cubrir todas las caras interiores y el fondo de la poza. Este revestimiento sirve para aislar las celdas del medio exterior e impedir el ingreso de agua subterránea.

- Se colocó un sistema de drenaje (tipo espina de pescado) conformado por tuberías ranuradas en la base de la poza para la medición de la infiltración.
- Se colocó el material de suelo mediante capas hasta que alcancen los espesores prediseñados. En cada una de estas capas de suelo se colocaron los instrumentos de medición de contenido de humedad y de succión. En la capa de suelo exterior se colocó adicionalmente un instrumento para la medición de la escorrentía.
- Se realizó el monitoreo mensual (12 campañas) para la descarga de información de infiltración, contenido de humedad, succión, escorrentía y variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) a fin de identificar y corregir posibles errores en los registros de los equipos de medición.

### **3.3.3.2 Calibración Modelo Celda de Prueba**

Para la presente investigación se seleccionó a la Celda de Prueba N°6 (cobertura N°6) debido a cuenta con registros continuos y confiables, y fue el que presentó mejor desempeño en cuanto al control de los niveles de infiltración. Previo a la evaluación de los escenarios propuestos (escenarios 1, 2 y 3) se realizó un proceso de calibración mediante un modelo numérico unidimensional con el código numérico VADOSE/W (GEOSTUDIO 2012) tomando como base la información los ensayos de laboratorio que se realizaron durante la construcción de las celdas de prueba, y los registros de los equipos instalados dentro de la celda de prueba.

Los ensayos de laboratorio considerados fueron granulometría, conductividad hidráulica del suelo y permeabilidad. Respecto a los registros provenientes de los sensores se tiene a la infiltración, succión y contenido de humedad, y de la estación

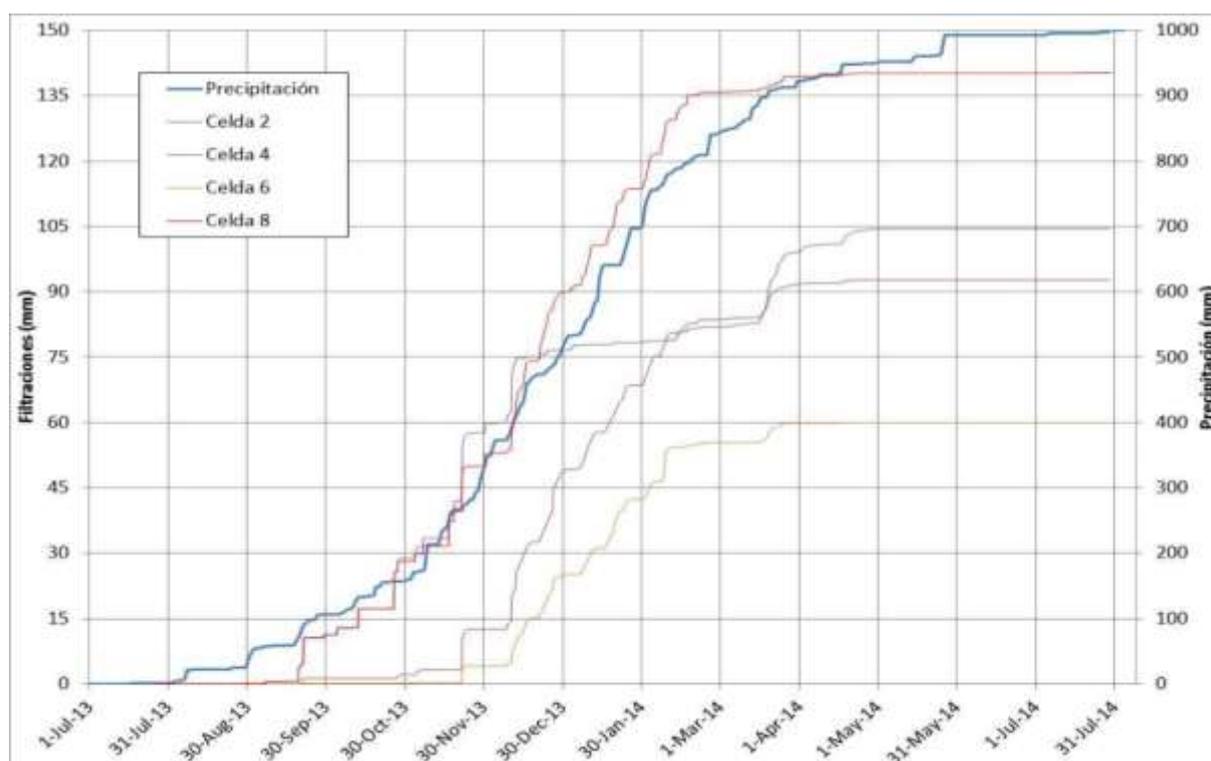
meteorológica a la precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los parámetros evaluados fueron la infiltración y la escorrentía, tal como se puede observar en la Tabla 3.4. La cobertura N°6 presenta un espesor total de 0.8 m y está conformada por arcilla compactada, grava y material de préstamo no compactado.

**Tabla 3.4: Volumen de Infiltración en la Celda de Prueba**

Cobertura	Configuración	Espesor (m)	Infiltración			Escorrentía	
			m <sup>3</sup>	mm	% de Precipitación	mm	% de Precipitación
N°6	Material de préstamo no compactado	0.4	7460	60	5.9	97	9.5
	Grava	0.2					
	Arcilla Compactada	0.2					

Fuente: Unidad Minera

En la Figura 3.4 se muestra que la infiltración en la Celda de Prueba fue 60 mm.



**Figura 3.4: Infiltración y Precipitación Acumulada para la Celda de Prueba**

Fuente: Unidad Minera

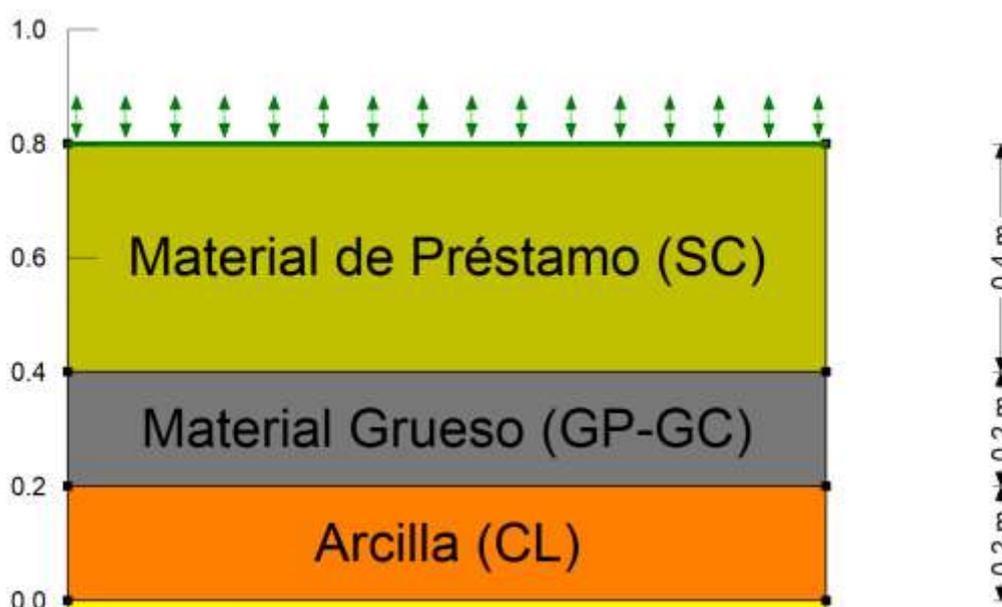
El modelamiento fue realizado con el código numérico VADOSE/W, para un paso de tiempo de diario (365 días) y un régimen transitorio (*Transient Coupled*), para el periodo 2013-2014. El modelo aplicado para la evaluación de los materiales del suelo fue el térmico simple (*Simplified Thermal*). En la Tabla 3.5 se muestran los espesores de los materiales de suelo configurados en el modelo.

**Tabla 3.5: Materiales Configurados en el Modelo Calibrado**

Capa	Clasificación USCS	Material	Espesor (m)	Función
Layer 3	SC	Material de Préstamo	0.4	Almacenamiento
Layer 2	GP-GC	Material Grueso	0.2	Protección de la capa de retención
Layer 1	CL	Arcilla	0.2	Retención de humedad

Fuente: Unidad Minera

En la Figura 3.5 se muestra la cobertura N°6 configurada en el modelo.



**Figura 3.5: Configuración de Cobertura N ° 6**

Fuente: Elaboración propia

Se ingresó la información geotécnica de los materiales de suelo en el módulo “*Keylin Materials*”, y luego de seleccionar los métodos “*Grain-size data*” (sub -

módulo “*Estimate Vol. Water Function*”) y el método Van Genuchten” (sub – módulo “*Estimate Hydraulic Conductivity Función*) se obtuvieron las curvas de almacenamiento de agua y de conductividad hidráulica, respectivamente.

En la Tabla 3.6 se muestran las propiedades hidráulicas de los materiales que fueron ingresados al modelo.

**Tabla 3.6: Propiedades de los Materiales de Cobertura**

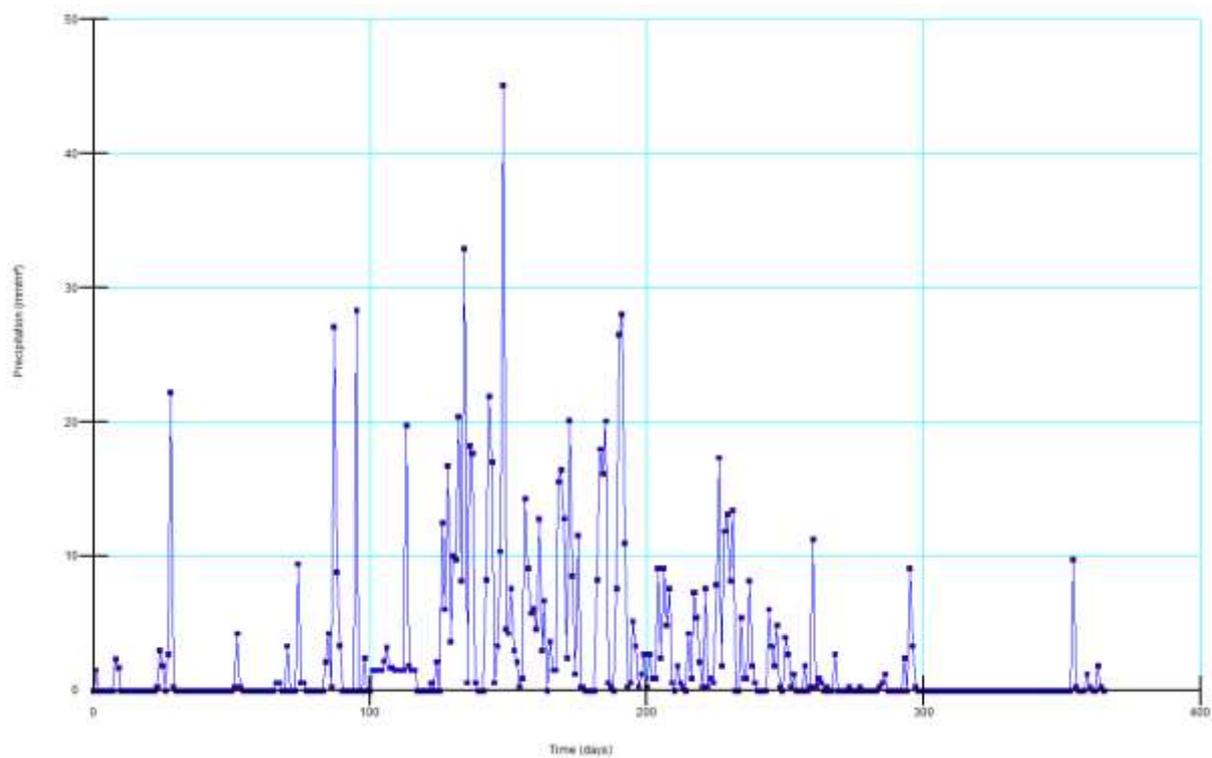
Tipo de Material	Contenido Volumétrico de Agua Saturada ( $\theta_s$ , cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Conductividad Hidráulica (ks, en m/día)	Diámetro de Partícula (en mm)		Limite Líquido (LL, en %)
			D <sub>10</sub>	D <sub>60</sub>	
Material de Préstamo	0.074	1.99E-02	0.001	4.0655	64
Material Grueso	0.022	1.90E+00	0.075	10.726	30
Arcilla	0.116	2.51E-04	0.005	0.1151	32

Fuente: Unidad Minera

Se consideró al clima como condición de borde (*Keyln Boundary Conditions*). Se consideraron las variables precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, para el periodo Agosto-2013-Julio 2014, cuyos registros se muestran en las tablas Anx2-4, Anx2-5 y Anx2-6, Anx2-7, y Anx2-8 del Anexo 2, respectivamente.

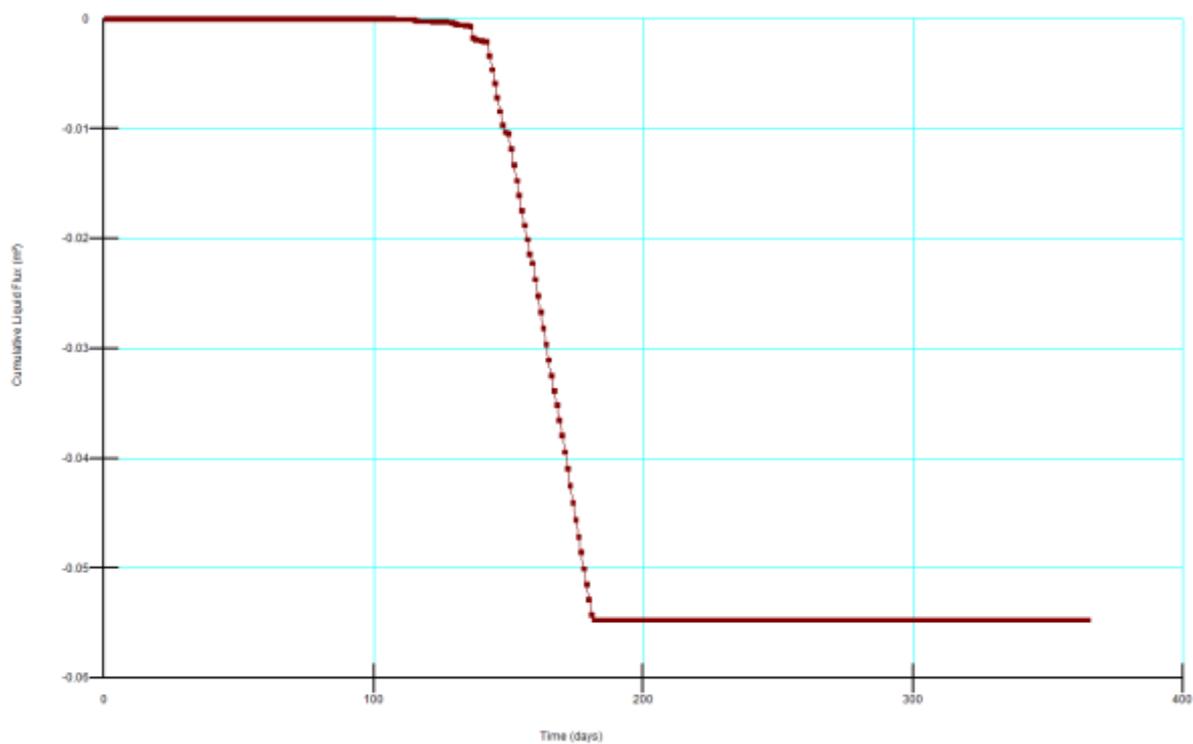
En la Figura 3.6 se muestra la precipitación como condición de borde.

El modelo pudo reproducir la infiltración medida en la cobertura N°6 en el mismo orden de magnitud tal como se puede observar en la Figura 3.7. La infiltración en la base de la capa donde se encuentra la arcilla es aproximadamente 60 mm.



**Figura 3.6: Precipitación Ingresada al Modelo (agosto 2013-julio 2014)**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.7: Flujo de Agua Acumulada en la Base de la Capa de Arcilla**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4 Modelamiento Numérico

Se realizó un modelamiento numérico unidimensional a fin de evaluar el desempeño del sistema de cobertura de la celda de prueba N|6 ante situaciones críticas aplicando el código numérico VADOSE/W.

#### 3.3.4.1 Criterios de Diseño

Para la presente investigación se establecieron una serie de criterios para condiciones críticas (criterios conservadores) con la finalidad de que el sistema de cobertura pueda tener un funcionamiento deseable a través del tiempo.

- Niveles de infiltración menores a 15 % respecto de la precipitación.
- No se incluyó una capa de *topsoil* en el sistema de cobertura, dado que la presencia de la vegetación favorece la pérdida de agua del suelo mediante la evapotranspiración.
- La precipitación más desfavorable corresponde un año hidrológico húmedo de 500 años de periodo de retorno.
- El sistema de cobertura fue modelado en una dimensión (1D) debido a que no se consideró el efecto de la pendiente.
- El modelamiento 1D fue realizado a paso de tiempo diario y para un (01) año hidrológico (agosto-julio).
- El valor de la infiltración obtenida mediante el modelamiento 1D representa el agua que ingresaría al depósito de desmonte. Estudios posteriores en 2D o 3D podrían estimar la infiltración en el pie del depósito de desmonte.

- El sistema de cobertura y las variables de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento evaluado en el proceso de calibración fueron los mismos que se consideraron para la evaluación de los escenarios 1, 2 y 3.

### 3.3.4.2 Escenarios

Tomando como base los resultados del modelo calibrado se realizó la evaluación del desempeño de la cobertura N°6 sobre el depósito de desmonte ubicado dentro de la Unidad Minera y que forma parte de la presente investigación.

Esta evaluación consistió en incluir el depósito de desmonte dentro del modelo calibrado de la cobertura N°6 y analizar los resultados de la infiltración bajo diferentes escenarios (1, 2 y3) los cuales están basados en la precipitación promedio y la húmeda extrema de 500 años de periodo de retorno, tal como se puede observar en la Tabla 3.7.

Se consideraron tres (03) escenarios, de los cuales dos (02) de ellos incluyen la cobertura N°6 y el restante no incluye ninguna cobertura.

**Tabla 3.7: Escenarios Evaluados para el Modelamiento**

Tipo	Denominación	Cobertura de Cierre	Precipitación	Paso de Tiempo
Escenario 1	Con Cobertura N°6 - Promedio	N°6: -0.4 m de Material de Préstamo	Año Hidrológico Promedio	365 días
Escenario 2	Con Cobertura N°6 - Húmedo TR500	-0.2 de Material Grueso. -0.2 m de arcilla	Año Hidrológico Húmedo-TR500	365 días
Escenario 3	Sin Cobertura N°6 - Promedio	Sin Cobertura	Año Hidrológico Promedio	365 días

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4.3 Configuración del Sistema de Cobertura

El sistema de cobertura que se consideró para el depósito desmonte fue el mismo que el de la cobertura N°6, el cual está conformado por tres (03) tipos de materiales

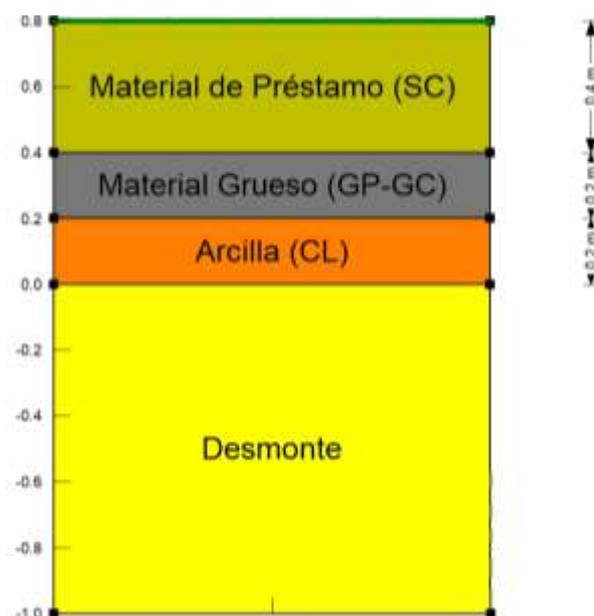
que en conjunto presentan un espesor total de 0.8 m. En la Tabla 3.8 se muestran los materiales con sus espesores y características geotécnicas.

**Tabla 3.8: Materiales Configurados en el Modelo**

Capa	Material	Espesor (m)	Clasificación USCS	Grava (%)	Arena (%)	Limo y Arcilla (%)
<i>Layer 3</i>	Material de Préstamo	0.4	SC	37.8	39	23.2
<i>Layer 2</i>	Material Grueso	0.2	GP-GC	56.4	32	11.6
<i>Layer 1</i>	Arcilla	0.2	CL	16.8	29.3	53.9

Fuente: Unidad Minera

El sistema de cobertura evaluado no consideró una capa de vegetación debido a que la vegetación contribuye a la pérdida de agua del sistema mediante la evapotranspiración y con ello reduce los niveles de ingreso de agua hacia la cobertura. Sin embargo, la vegetación si debe ser considerada cuando se finalice con la construcción de la cobertura, procurando en la medida de lo posible que las profundidades de las raíces de la vegetación considerada no excedan los 0.6 m a fin de no afectar la capa de arcilla (*Layer 1*), la cual se encarga de retener el agua para evitar su ingreso hacia el depósito de desmonte. En la Figura 3.8 se muestra la cobertura N°6 sobre el depósito de desmonte que fue configurada en el modelo.



**Figura 3.8: Configuración del Depósito de Desmonte y la Cobertura N°6**

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.4.4 Datos de Entrada del Modelo Integrado

El modelo integrado está conformado por la cobertura N°6 colocada sobre el depósito de desmonte, el cual está representado por un espesor de 1m para fines de la presente investigación.

##### 3.3.4.4.1 Variables Meteorológicas

En el modelo integrado se consideró una nueva condición de borde de clima (*Keyln Boundary Conditions*) donde las variables temperatura, humedad relativa y velocidad del viento son las mismas que se consideraron para el proceso de calibración, y cuyos registros provienen de la estación meteorológica local (agosto 2013-julio 2014). Los registros de estas variables se muestran en las tablas Anx2-5 al Anx2- 8 del Anexo 2.

Por su parte la precipitación para los años promedio y húmedo de TR 500 años fueron obtenidos de los registros de la estación meteorológica regional Yauri (agosto 1992 - julio 2019) los cuales se muestran en la Tabla Anx2-3 del Anexo 2.

La condición de borde de clima fue asignada a la capa exterior correspondiente a un “Material de Préstamo” (*Layer 3*), tal como se puede observar en la Figura 3.9.



**Figura 3.9: Condición de Borde de Clima**

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo 2 se muestran los datos climáticos ingresados al modelo tales como precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, para los escenarios evaluados.

A continuación, se describe un resumen de las variables meteorológicas consideradas en el modelo.

### **Precipitación**

Las series de precipitación para los años hidrológicos promedio y húmedo que se ingresaron en el modelo fueron obtenidos a partir del análisis estadístico de la precipitación total mensual de la estación meteorológica Yauri, para un periodo de 27 años comprendidos entre los años 1992 y el 2019. Los registros de la precipitación de la estación Yauri fueron agrupados en años hidrológicos con la finalidad de analizar el periodo de lluvias, es decir de agosto a julio, tal como se muestra en la Tabla Anx2 -3 del Anexo 2.

El análisis estadístico consistió en ordenar la precipitación total anual (PTA) de mayor a menor y se agruparlo en tres grupos (terciles). El análisis realizado determinó que la distribución mensual de la PTA del tercil más seco es diferente al del tercil más

húmedo y este a su vez, a la del tercil medio. El tercil seco presenta valores de PTA entre 778 mm y 592 mm; y el tercil húmedo entre 1180.1 mm y 864 mm.

Se calcularon las distribuciones porcentuales de estos terciles relacionando el promedio de la precipitación media mensual con el promedio de la PTA.

Finalmente se realizó un análisis estadístico mediante el software Easy Fit para determinar la PTA para diferentes periodos de retorno. Los valores de PTA se ajustaron mejor a la distribución de Wakeby. La PTA para diferentes periodos de retorno se muestra en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9: PTA para Diferentes Periodos de Retorno (TR)**

Tipo de Año	Período de Retorno	PTA
	(años)	(mm)
Seco	500	528.2
	200	533.6
	100	542.3
	50	558.9
	20	602.5
	10	658.0
	5	725.8
Promedio		825.8
Húmedo	5	914.5
	10	997.7
	20	1085.1
	50	1207.5
	100	1305.6
	200	1408.6
	500	1552.9

Fuente: Elaboración propia

Es posible que los datos de PTA para periodos de retorno mayores a 20 años puedan ser imprecisos debido a la extensión limitada de la serie de datos (27 años de registros en este caso). La incertidumbre de los estimados de PTA son mayores cuanto más extremo es el escenario evaluado.

El fenómeno El Niño (FEN) es el nombre dado al ocasional desarrollo anormal de aguas superficiales cálidas a lo largo de la costa norte de Perú y la de Ecuador. La formación del FEN está relacionada con el patrón de circulación cíclico del Océano Pacífico conocido como Oscilación Sur, el cual trae lluvias extremadamente altas y de larga duración, causando inundaciones severas. De acuerdo con el SENAMHI (2017), En el Perú se han presentado cuatro (04) eventos FEN, los cuales se describen en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10: Eventos EFEN**

EFEN		Magnitud
Inicio	Fin	
(Mes-Año)	(Mes-Año)	
Marzo 1972	Febrero 1973	Fuerte
Julio 1982	Noviembre 1983	Extraordinario
Marzo 1997	Setiembre 1998	Extraordinario
Diciembre 2016	Mayo 2017	Moderado

Fuente: SENAMHI (2017)

Dentro del periodo de evaluación de la precipitación (1992 – 2019) se identificaron dos eventos FEN que corresponden a los periodos 1997-1998 y 2016- 2017, donde la lluvia acumulada fue de 767.1 mm y 734.6 mm, respectivamente.

Ambos valores de precipitación se encuentran dentro del tercil de años secos y debajo del promedio (825.8 mm), por lo que se presume que la ubicación del depósito de desmonte no está influenciada por la ocurrencia de eventos extraordinarios que incrementan significativamente la precipitación con los eventos FEN.

De acuerdo con el SENAMHI (2017), en el verano del 2017 el Perú padeció una serie de desastres naturales como huacos y desbordes de ríos asociados a eventos de lluvia por encima del promedio registrado, situación que lo calificó como el tercer

fenómeno del Niño más intenso de los últimos 100 años para el Perú. Este evento fue denominado “El Niño Costero 2017”.

Según SENAMHI (2017), los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas administradas por el SENAMHI en Cusco indican que en promedio la lluvia presentó una distribución espacial irregular, donde en algunas estaciones se tenían valores por encima del promedio (superávits de lluvia) y otros por debajo (déficit de lluvia), como es el caso de la ubicación del depósito de desmonte.

En la Figura 3.10 se puede observar que se presentaron condiciones de superávit en las estaciones Urubamba (+6%), Colquepata (+67%), Paruro (+5%), y Sicuani (+6%); y condiciones de déficit en las estaciones Anta Ancachuro (-25%), Granja Kcayra (-19%), Ccatcca (-15%), Acomayo (-13%) y Yauri (19%).

CUSCO									
ANOMALÍAS PORCENTUALES (%) DE PRECIPITACIÓN DEL PERIODO LLUVIOSO 2016-2017									
Estación	Altitud	2016				2017			SET 2016-MAR 2017
		SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	
URUBAMBA	3863	-65	55	12	39	-19	-2	-11	+6
ANTA ANCACHURO	3340	-2	3	-11	-39	-48	-34	12	-25
COLQUEPATA	3729	-7	128	-47	60	-4	37	268	+67
GRANJA KCAYRA	3219	-56	66	-64	-25	-29	-30	15	-19
CCATCCA	3729	-7	-11	-74	-49	-3	2	20	-15
PARURO	3084	26	63	-60	-8	-21	38	41	+5
ACOMAYO	3160	-60	32	-73	-26	-18	-23	54	-13
SICUANI	3574	16	62	-19	-25	24	1	10	+6
YAURI	3927	-79	18	-60	-14	-12	-45	18	-19

>100%	60-100%	15-60%	+15--15%	-15%--60%	-60%--100%
-------	---------	--------	----------	-----------	------------

**Figura 3.10: Anomalías de Precipitación en el Periodo 2016-2017**

Fuente: SENAMHI (2017)

En la Tabla 3.11 se muestra la PTA para los años hidrológicos promedio y húmedo que fueron obtenidos de los registros de la estación Yauri.

**Tabla 3.11: PTA por Escenarios**

Escenario	Precipitación	
	Tipo	PTA (mm)
Escenario 1	Promedio	826
Escenario 2	Húmedo TR 500	1553
Escenario 3	Promedio	826

Fuente: Elaboración propia

Los valores de PTA fueron distribuidos de manera diaria (365 días) tomando como base los registros diarios de la estación meteorológica local que se muestran en la Tabla Anx2- 4 del Anexo 2. En la Tabla 3.12 se muestra resumidamente la precipitación media que se incluyó como dato de entrada al modelo por escenario.

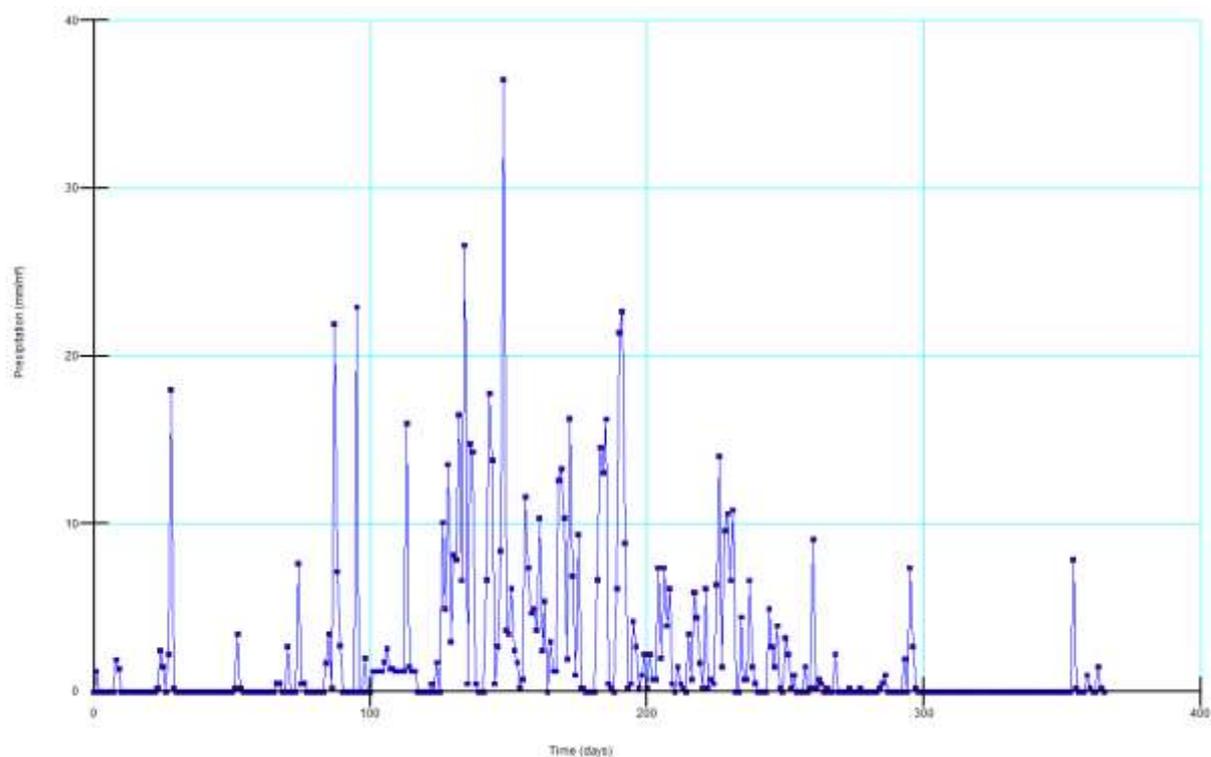
**Tabla 3.12: Precipitación Media Mensual por Escenarios**

Escenario	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
1 y 3	29.1	3.9	49.5	62.4	232.7	163.3	120.3	98.4	34.9	14.2	0	11.0
2	55.2	7.5	93.9	118.3	441.4	309.7	228.3	186.7	66.2	27.0	0	20.9

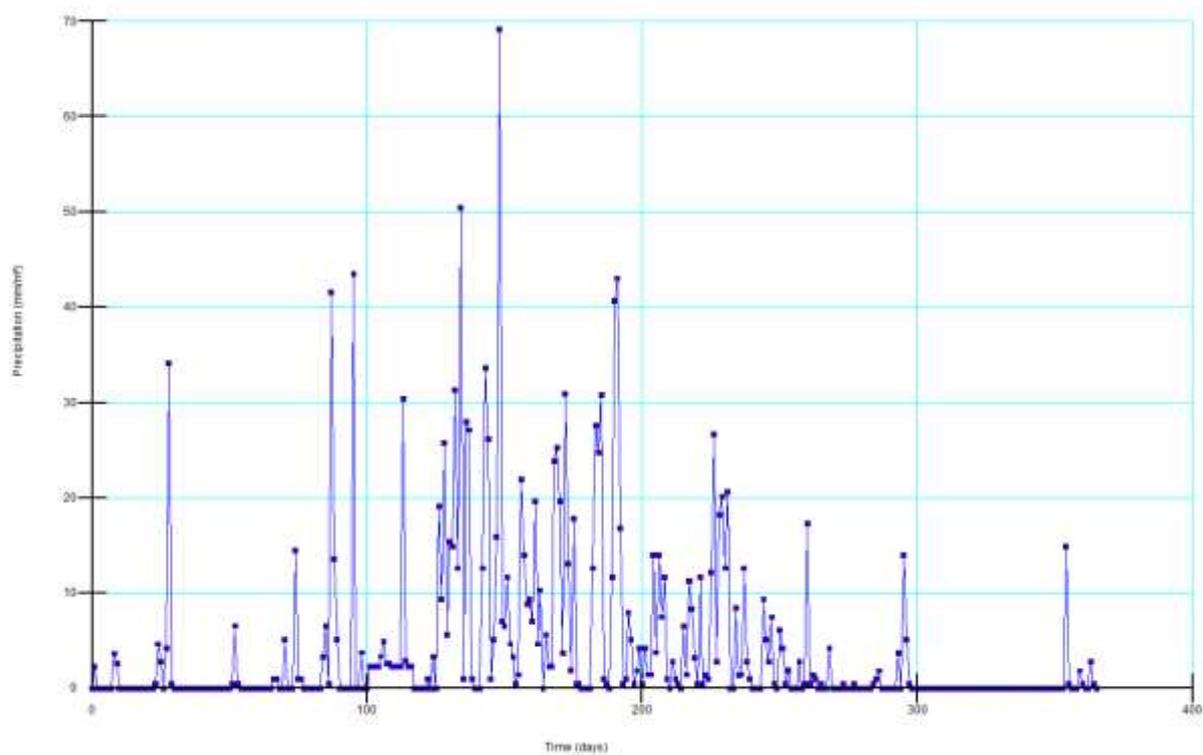
Fuente: Elaboración propia

Las figuras 3.11 y 3.12 muestran las distribuciones diarias (365 días) de las precipitaciones de los años promedio y húmedo TR 500, respectivamente. En el Anexo 2 se muestran los datos de precipitación ingresados al modelo, tanto para el año promedio (Tabla Anx2 -1) como para el año húmedo de TR 500 (Tabla Anx2 -2).

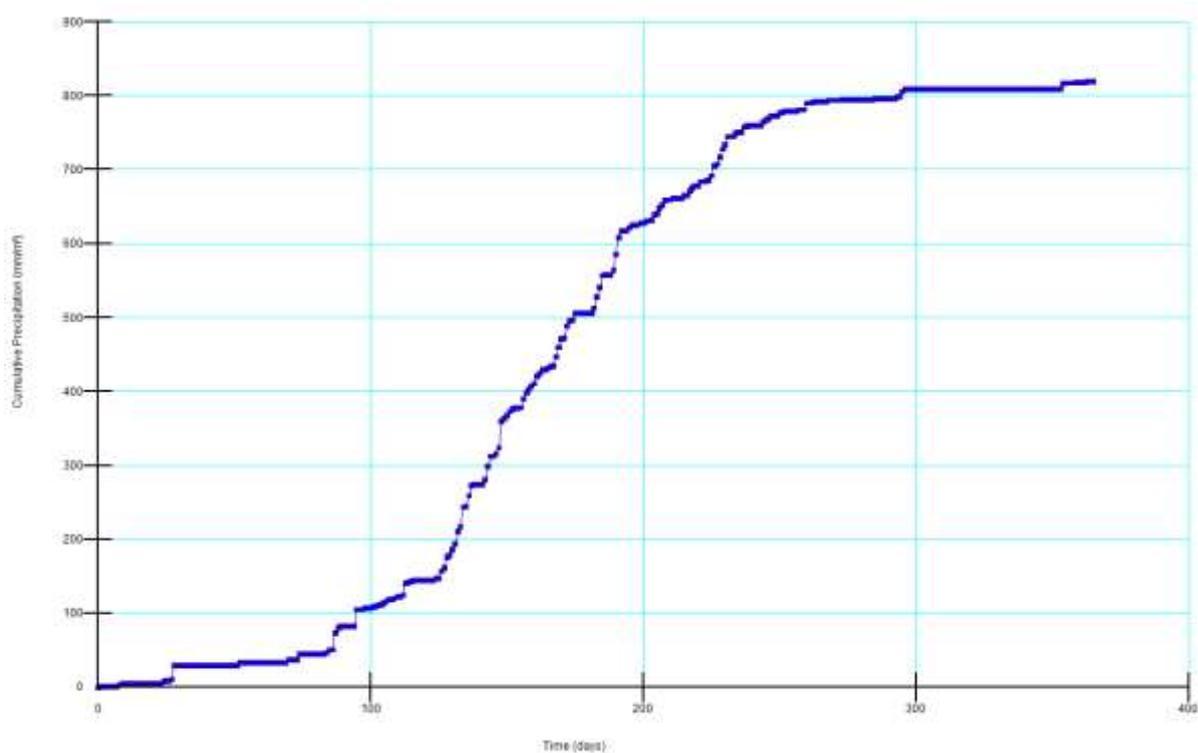
Las figuras 3.13 y 3.14 muestran las precipitaciones acumuladas que fueron generadas por el modelo para un periodo de 365 días correspondiente al año promedio (826 mm) y al año extremo húmedo de TR 500 (1553 mm), respectivamente.



**Figura 3.11: Distribución Diaria de la PTA -Escenario 1 (Promedio)**  
Fuente: Elaboración propia

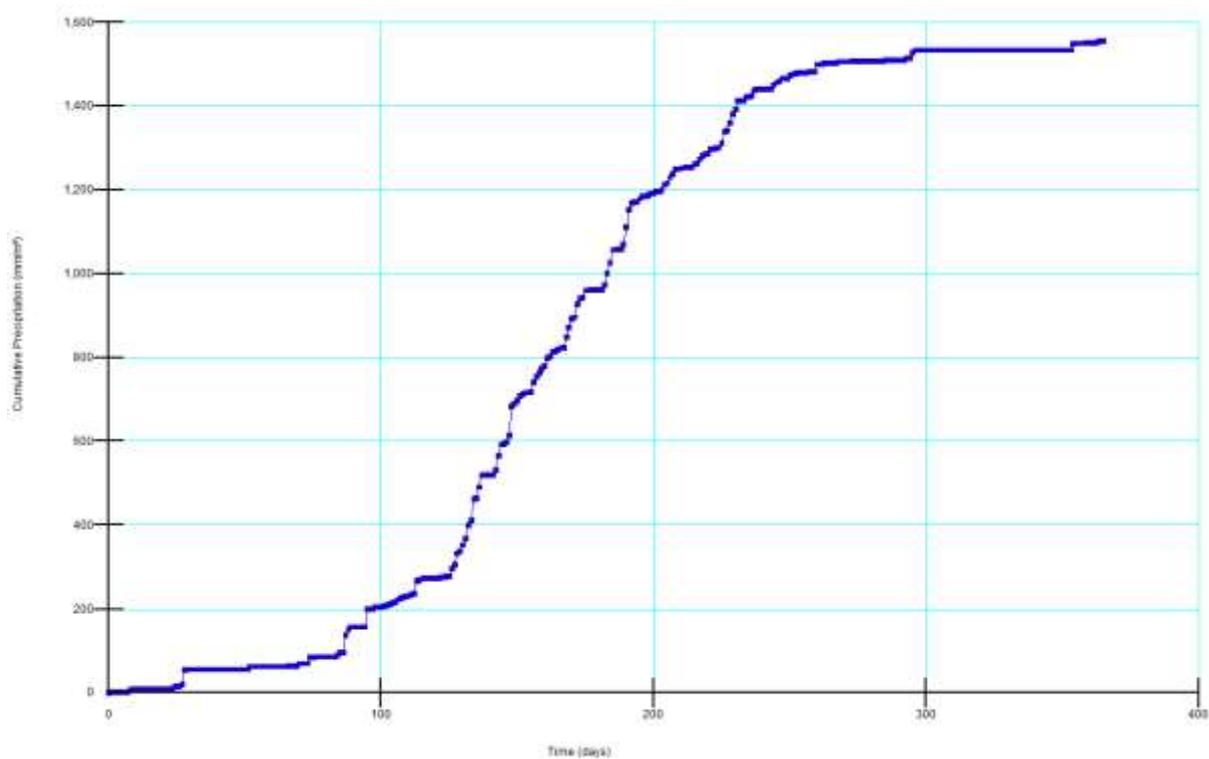


**Figura 3.12: Distribución Diaria de la PTA -Escenario 2 (Húmedo TR 500)**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.13: PTA Acumulada -Escenario 1 (Promedio)**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.14: PTA Acumulada - Escenario 2 (Húmedo TR 500)**

Fuente: Elaboración propia

### **Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Viento**

Las variables meteorológicas que se muestran en la Tabla 3.13 provienen de los registros de la estación meteorológica local de propiedad de la Unidad Minera y corresponde a un año de registros (agosto 2013 – julio 2014). Estos registros fueron considerados tanto para el proceso de calibración, como para los modelamientos numéricos de los escenarios 1, 2 y 3. En las tablas Anx2 -1 y Anx2 -2 del Anexo 2 se muestran los registros de estas variables.

**Tabla 3.13: Variables Climáticas Ingresadas al Modelo**

<b>Variable</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>
Temperatura Máxima (C°)	7.5	9.0	11.1	11.8	9.9	9.9	10.1	9.9	9.3	7.0	6.5	5.8
Temperatura Mínima (C°)	5.6	7.0	9.3	10.1	8.6	8.7	8.8	8.5	7.9	5.2	4.5	3.9
Humedad Relativa (%)	42.7	40.2	45.9	50.8	68.9	68.7	68.2	68.8	66.1	55.3	43.1	49.6
Velocidad del Viento (m/s)	1.3	1.5	1.4	1.6	1.2	1.1	1.4	1.8	1.6	1.8	1.8	2.0

Fuente: Unidad Minera

#### **3.3.4.4.2 Propiedades de los Materiales**

La cobertura considerada en el modelo integrado consideró la cobertura N°6, la cual está conformada por tres tipos de materiales que presentan un espesor total de 0.8 m, tales como “material de préstamo” (capa exterior) de 0.4 m de espesor, “material grueso” (capa intermedia) de 0.2 m de espesor, y “arcilla” (base de la cobertura) de 0.2 m de espesor.

El modelamiento consistió en colocar la cobertura de 0.8 m sobre un material de desmonte, que para fines de evaluación fue representado mediante un espesor de 1m.

En el modelo integrado se ingresaron las propiedades de las capas de suelo de la cobertura N°6 y la capa del depósito de desmonte.

En la Tabla 3.14 se muestran las propiedades geotécnicas e hidráulicas de los materiales que fueron asignados al modelo configurado.

**Tabla 3.14: Propiedades de los Materiales de la Cobertura**

Tipo de Material	Contenido Volumétrico de Agua Saturada ( $\theta_s$ , cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Conductividad Hidráulica (ks, en m/día)	Diámetro de Partícula (mm)		Limite Líquido (LL, en %)
			(D <sub>10</sub> )	(D <sub>60</sub> )	
Material de Préstamo	0.074	1.99E-02	0.001	4.0655	64
Material Grueso	0.022	1.90E+00	0.075	10.726	30
Arcilla	0.116	2.51E-04	0.005	0.1151	32
Desmonte	0.12	9.42E-03	0.18	8.05	35

Fuente: Unidad Minera

Con base en la información mostrada en la Tabla 3.14 se obtuvieron los parámetros hidráulicos denominados “curva de retención de humedad” y la “curva de conductividad” para cada uno de los materiales evaluados.

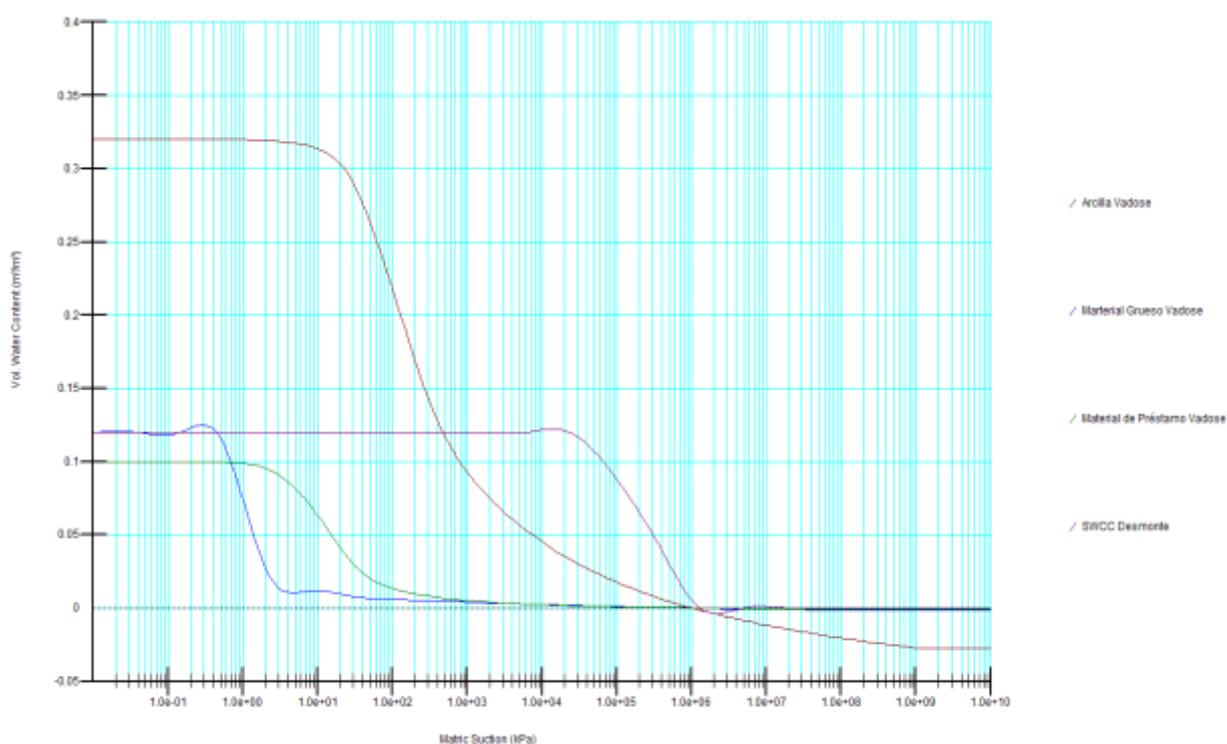
La curva de retención de humedad fue generada por código VADISE /W luego de seleccionar el método de estimación “*Grain-size data*”, e ingresar la porosidad efectiva, el LL y los tamaños de partículas del D<sub>10</sub>, D<sub>60</sub>, y seleccionando un rango de succión para generar la curva.

En la Figura 3.15 se muestran las curvas de retención para cada uno de los materiales evaluados.

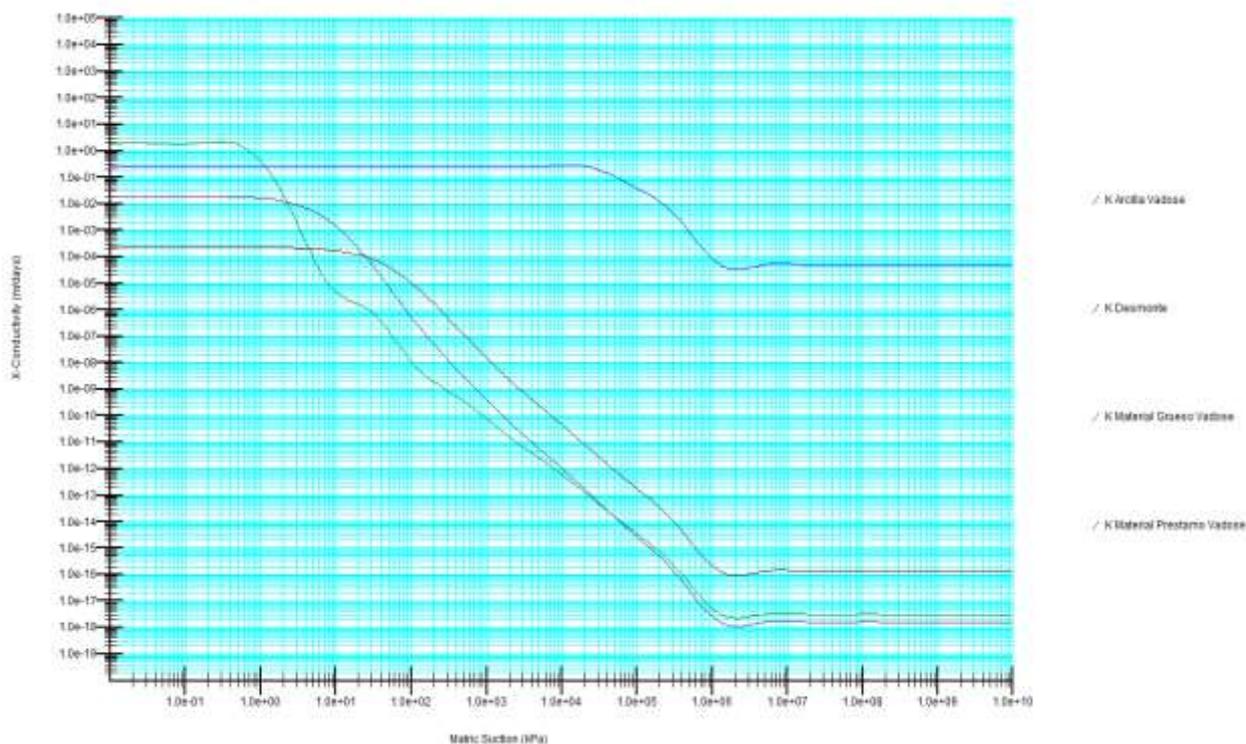
Respecto a la curva de conductividad, al igual que la curva de retención, también fue generada por código VADOSE/W luego de seleccionar el método de Van Genuchten y cargando la curva de retención de humedad que fue estimada y descrita

en el paso anterior. También se tuvo que ingresar los valores de conductividad (Ks), contenido residual de agua y de seleccionar el rango de succiones con fines de visualización.

En la Figura 3.16 se muestran las curvas de conductividad para cada uno de los materiales evaluados, las cuales fueron generadas en el mismo programa aplicando el método de Van Genuchten a partir de las curvas de retención de agua y la conductividad saturada.



**Figura 3.15: Curvas de Retención de Humedad de los Materiales de Suelo**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.16: Curvas de Conductividad de los Materiales de Suelo**

Fuente: Elaboración propia

Mediante la extensión “*Draw Mesh Properties*” del código VADOSE/W, se configuro la geometría del sistema de cobertura a modelar y se discretizó mediante una malla de elementos finitos de forma rectangular de ancho máximo de 1 m. De acuerdo con estas características se obtuvo un total de 92 nodos y 45 elementos.

Los valores de “PWP” (presión de poro de agua) fueron obtenidos de las campañas de monitoreo de las celdas de prueba y se muestran en la Tabla 3.15.

**Tabla 3.15: Valores de PWP Considerados en el Modelo**

Tipo de Material	PWP (kPa)
Material de Préstamo	-1000
Material Grueso	-100
Arcilla	-100
Desmonte	-150

Fuente: Unidad Minera

En la Tabla 3.16 se muestran los valores de “*Thermal Conductivity*” (capacidad de calor volumétrico) y “*Volumetric Heat Capacity*” (conductividad térmica) que fueron considerados en el modelamiento numérico.

**Tabla 3.16: Propiedades Térmicas de los Materiales**

Tipo de Material	Conductividad Térmica (kJ/día/m/°C)	Capacidad de Calor Volumétrico (kJ/m <sup>3</sup> /°C)
Material de Préstamo	125	2500
Material Grueso	125	2500
Arcilla	125	2500
Desmote	125	2500

Fuente: Elaboración propia

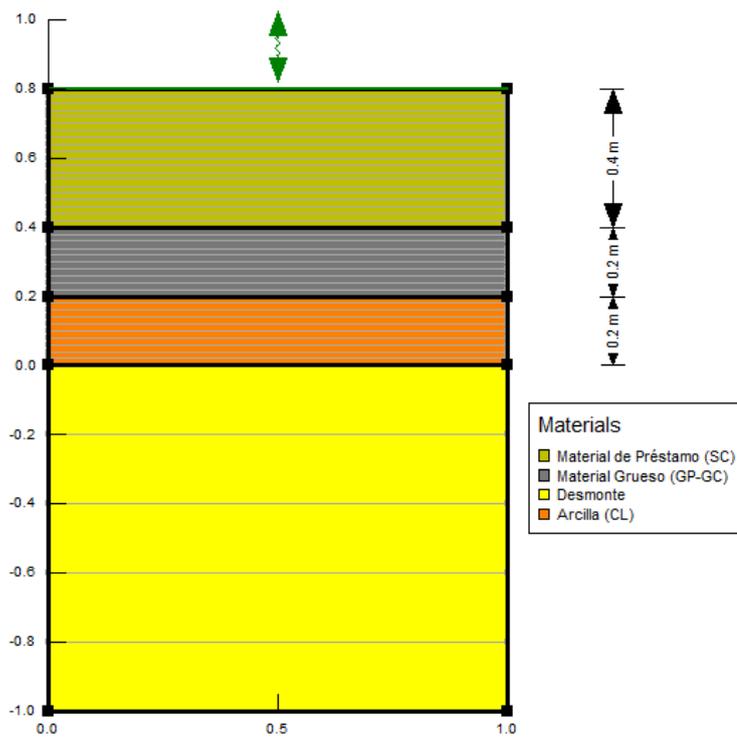
### 3.3.5 Análisis de la Infiltración

La evaluación de la infiltración, que corresponde a la cantidad de agua que ingresaría hacia el depósito de desmote, fue realizada mediante tres (03) escenarios, dos de los cuales (escenarios 1 y 2) si cuentan con una cobertura y el restante no cuenta con cobertura (Escenario 3).

Respecto a la infiltración para el escenario sin cobertura (Escenario 3) fue estimado tomando como base el modelo del Escenario 1. Las propiedades geotécnicas e hidráulicas de cada una de las capas del modelo del Escenario 1 fueron reemplazadas con la información correspondiente al depósito de desmote.

#### 3.3.5.1 Escenario 1: Con Cobertura y PP Promedio

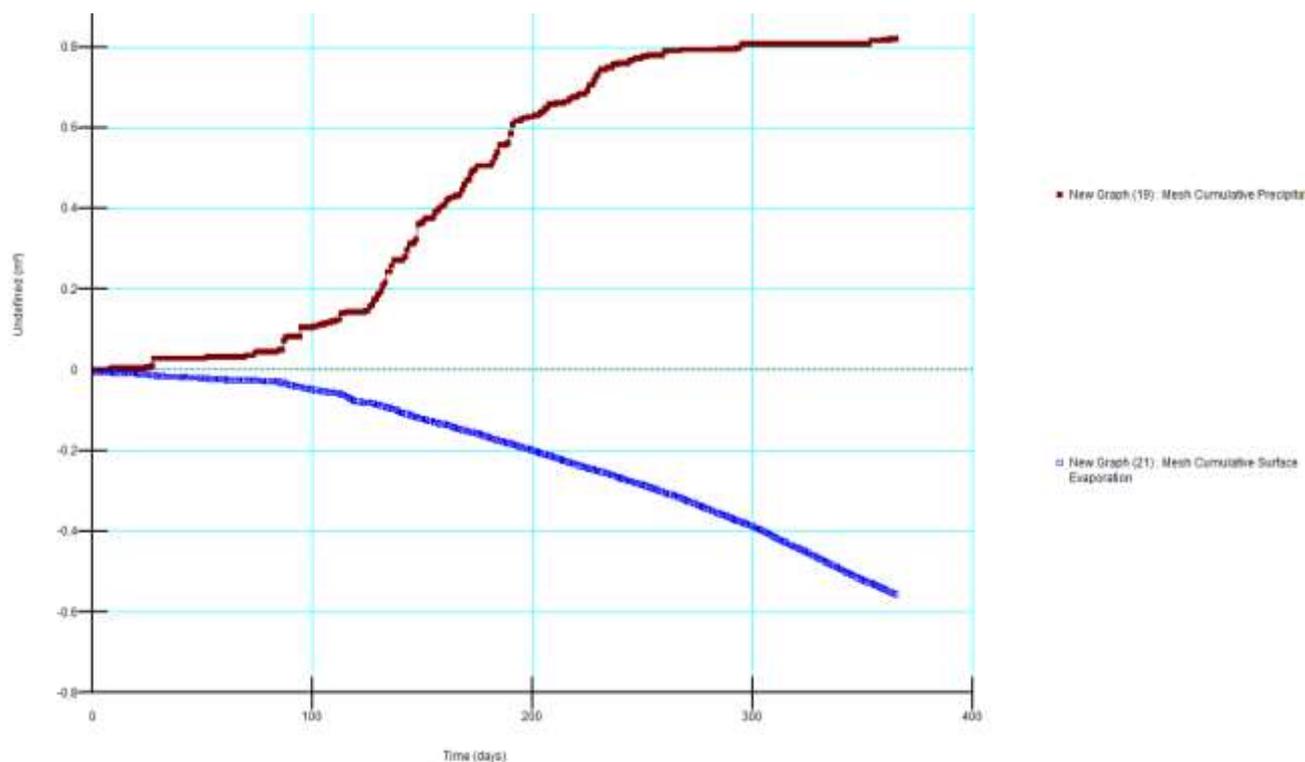
En la Figura 3.17 se muestra el sistema de cobertura para el Escenario 1 que fue configurado y discretizado con elementos rectangulares de 1 m de ancho.



**Figura 3.17: Sistema de Cobertura Configurado - Escenario 1**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.18 se muestra el balance hídrico donde la precipitación acumulada se encontraría en el orden de los 826 mm, y la evaporación acumulada en 555 mm.



**Figura 3.18: Balance Hídrico - Escenario 1**

Fuente: Elaboración propia

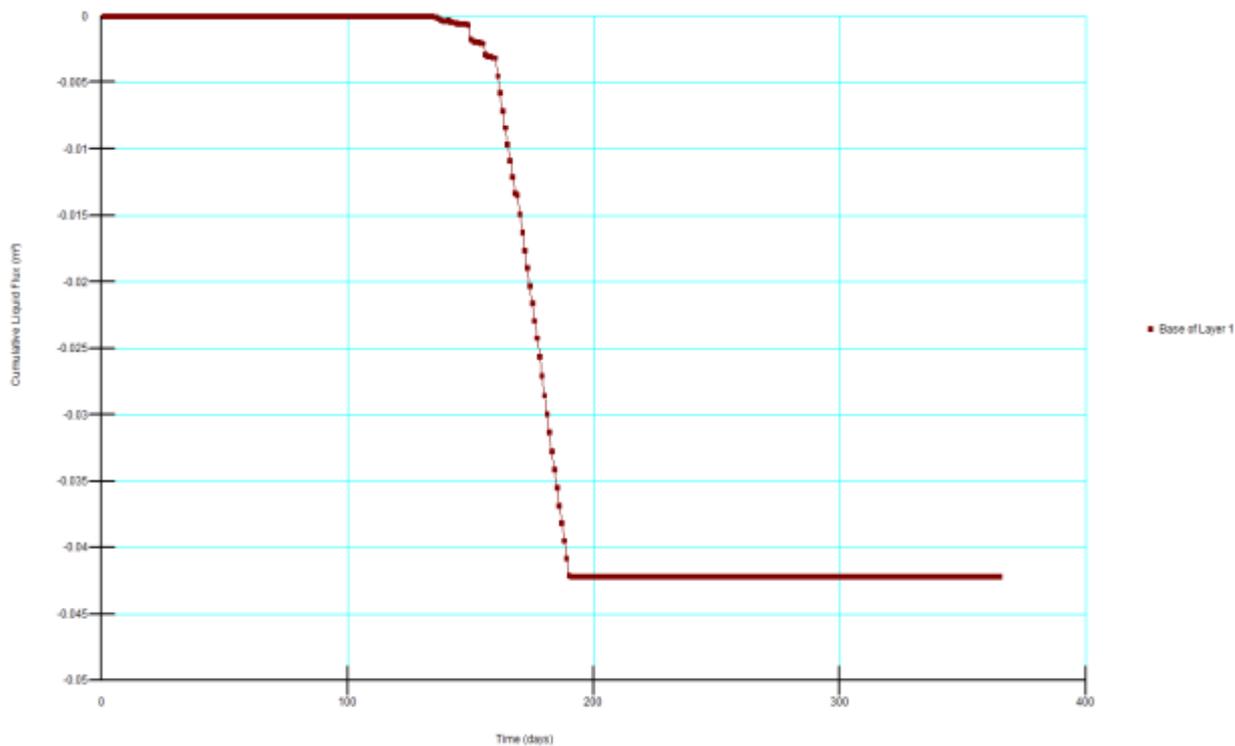
En la Tabla 3.17 se muestran los componentes principales del balance hídrico para el sistema de cobertura evaluado en 365 días, donde además se puede observar que las mayores pérdidas de agua se presentarían debido a la evaporación (67%).

**Tabla 3.17: Resultados del Balance Hídrico - Escenario 1**

Variable	Valor (mm)	Porcentaje (%)
Precipitación	826	100 %
Evaporación	555	67 %
Infiltración	42	5 %

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la infiltración es la medida del agua que ingresaría hacia el depósito de desmonte, esta fue estimada en la capa de arcilla (0 m – 0.2 m). La infiltración estaría en el orden de los 42 mm, que equivale a un 5% de la precipitación, tal como se puede observar en la Figura 3.19.



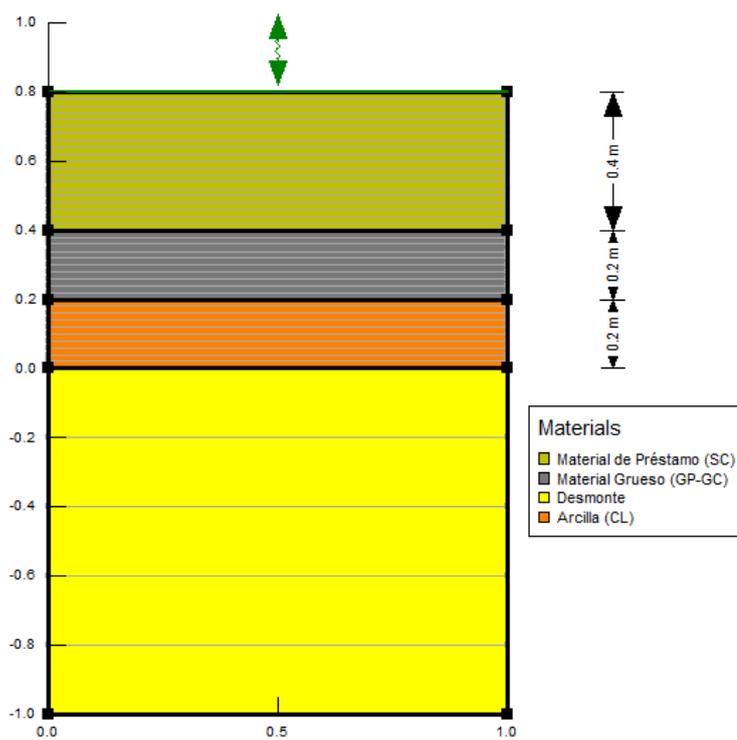
**Figura 3.19: Curva de Infiltración - Escenario 1**

Fuente: Elaboración propia

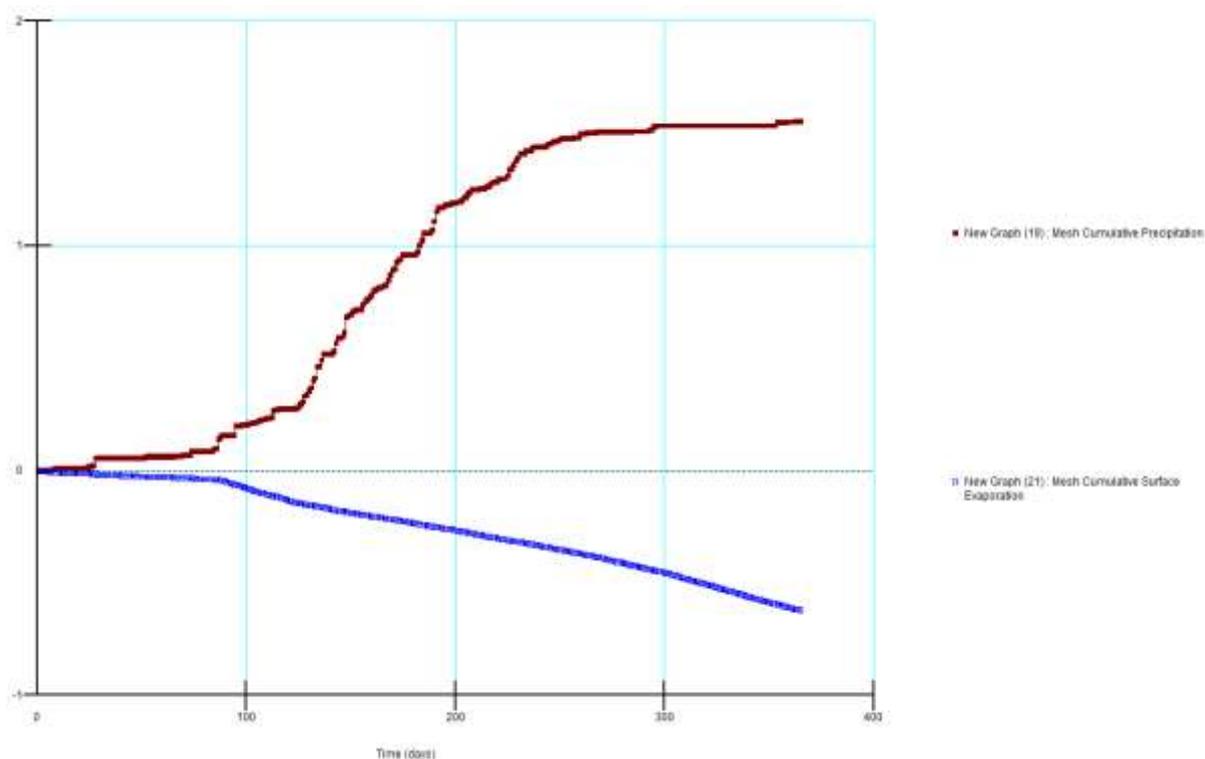
### 3.3.5.2 Escenario 2: Con Cobertura y PP Húmeda TR500

En la Figura 3.20 se muestra el sistema de cobertura para el Escenario 2 que fue configurado y discretizado con elementos rectangulares de 1 m de ancho.

En la Figura 3.21 se muestra el balance hídrico donde la precipitación acumulada estaría en el orden de los 1553 mm, y la evaporación acumulada en 555 mm.



**Figura 3.20: Sistema de Cobertura Configurado - Escenario 2**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.21: Balance Hídrico - Escenario 2**  
Fuente: Elaboración propia

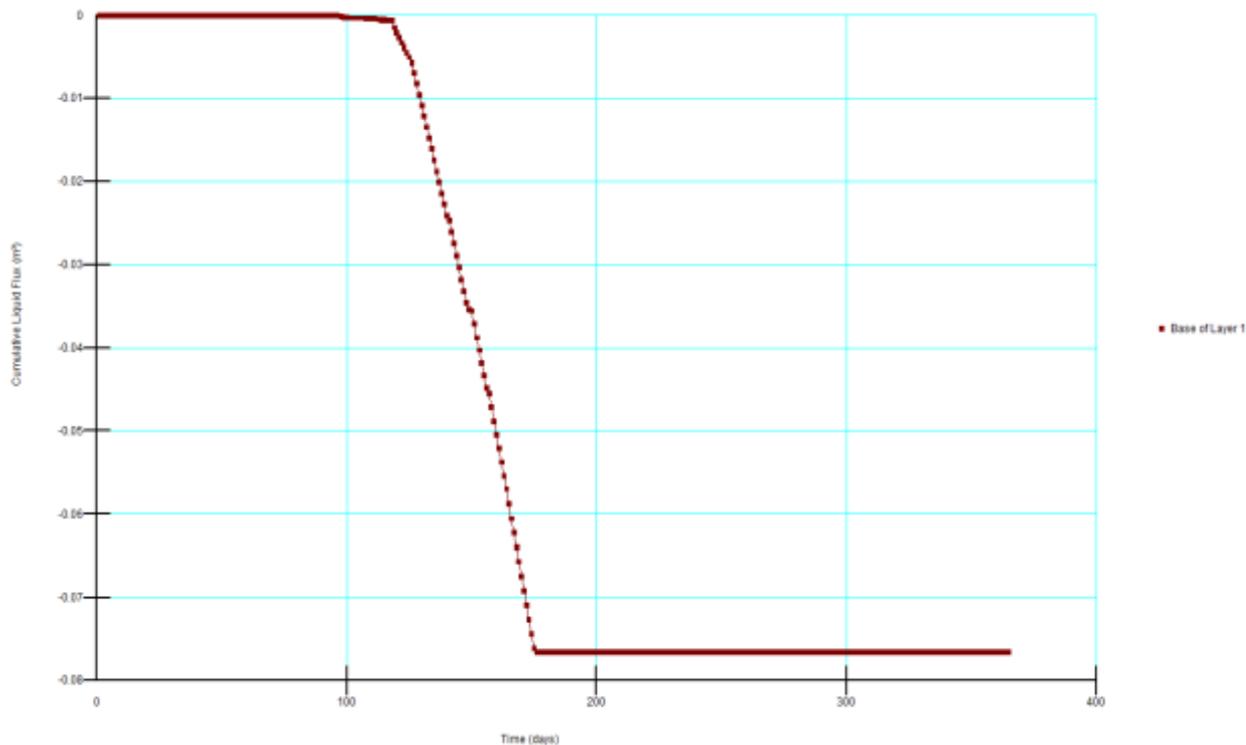
En la Tabla 3.18 se muestran los componentes principales del balance hídrico para el sistema de cobertura evaluado en 365 días, donde además se puede observar que las mayores pérdidas de agua se presentarían debido a la evaporación (36%).

**Tabla 3.18: Resultados del Balance Hídrico - Escenario 2**

Variable	Valor (mm)	Porcentaje (%)
Precipitación	1553	100 %
Evaporación	555	36 %
Infiltración	76	5 %

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la infiltración es la medida del agua que ingresaría hacia el depósito de desmonte, esta fue estimada (al igual que el Escenario 1) en la capa de arcilla (0 m - 0.2 m). La infiltración estaría en el orden de los 76 mm, que equivale a un 5% de la precipitación, tal como se puede observar en la Figura 3.22.

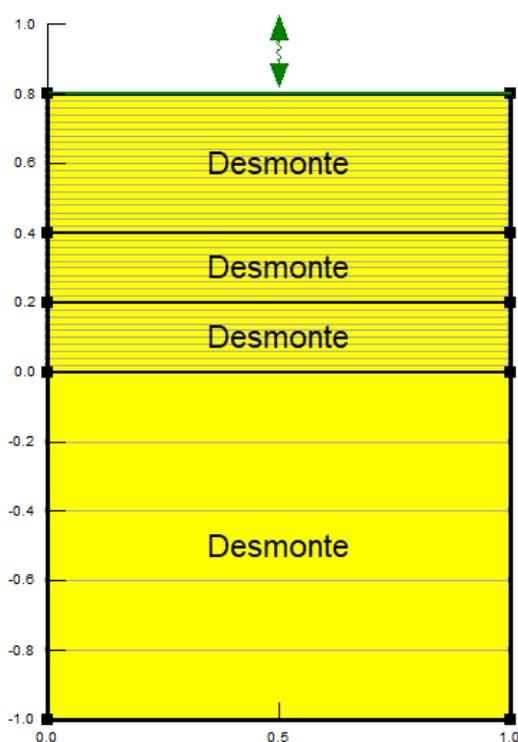


**Figura 3.22: Curva de Infiltración - Escenario 2**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5.3 Escenario 3: Sin Cobertura y PP Promedio

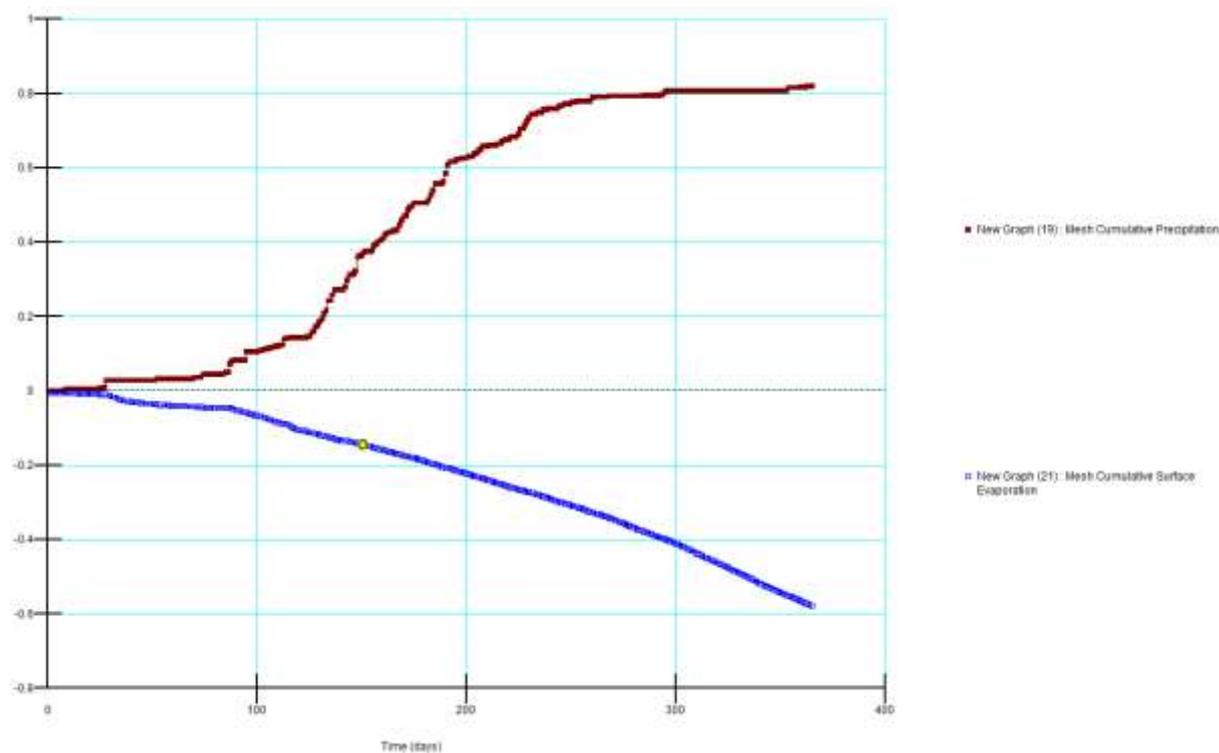
En la Figura 3.23 se muestra el sistema de cobertura para el Escenario 3 que fue configurado y discretizado con elementos rectangulares de 1 m de ancho. Este modelo es el mismo que se elaboró para el Escenario 1, donde el único cambio que se realizó fue el reemplazo de las propiedades geotécnicas e hidráulicas de las capas de material de préstamo, material grueso y arcilla, por el que corresponde al depósito de desmonte.



**Figura 3.23: Depósito de Desmonte Configurado - Escenario 3**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.24 se muestra el balance hídrico donde la precipitación acumulada estaría en el orden de los 826 mm, y la evaporación acumulada en 555 mm.



**Figura 3.24: Balance Hídrico - Escenario 3**

Fuente: Elaboración propia

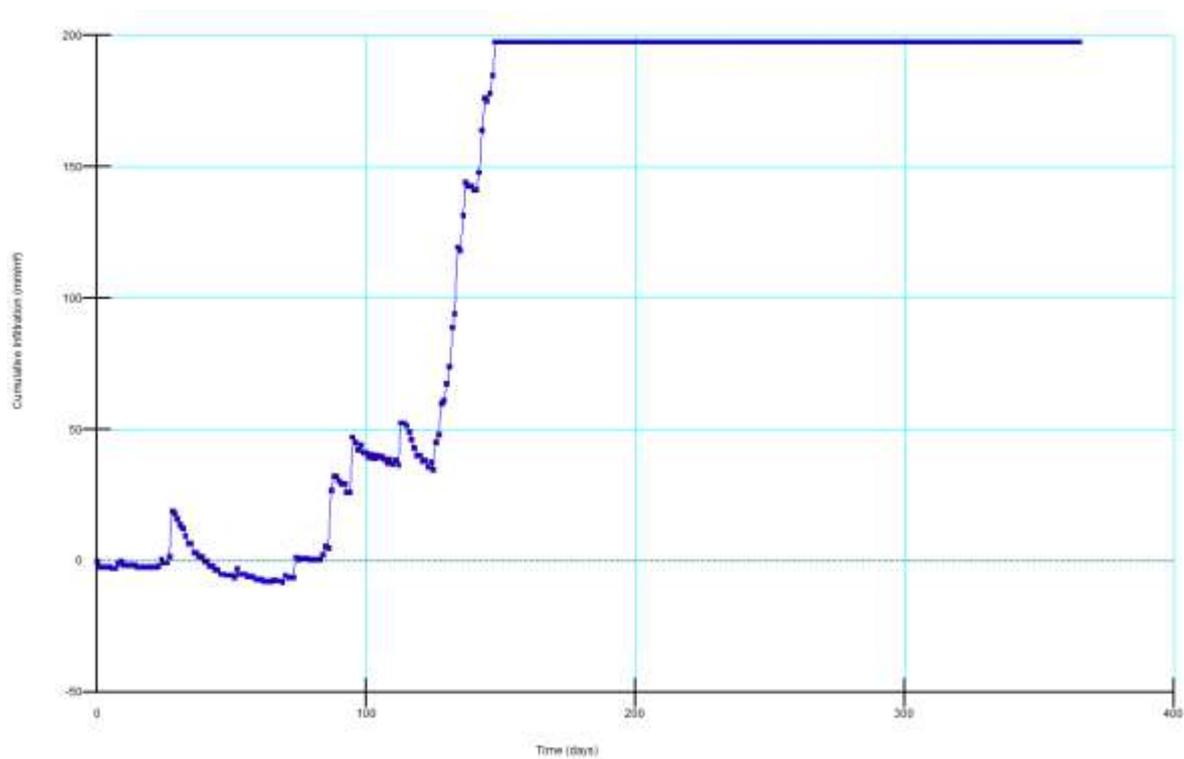
En la Tabla 3.19 se muestran los componentes principales del balance hídrico para el sistema de cobertura evaluado en 365 días, donde además se puede observar que las mayores pérdidas de agua se presentarían debido a la evaporación (67%).

**Tabla 3.19: Resultados del Balance Hídrico - Escenario 3**

Variable	Valor (mm)	Porcentaje (%)
Precipitación	826	100 %
Evaporación	555	67 %
Infiltración	197	24 %

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la infiltración es la medida del agua que ingresaría hacia el depósito de desmonte, esta fue estimada en el lado superficial de la capa de material de préstamo (0.4 m – 0.8 m). La infiltración estaría en el orden de los 197 mm, que equivale a un 24 % de la precipitación, tal como se puede observar en la Figura 3.25.



**Figura 3.25: Curva de Infiltración - Escenario 3**  
Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **4.1 Análisis de Resultados y Contrastación de Hipótesis**

Los resultados de las diferentes pruebas geoquímicas aplicadas a las muestras evaluadas determinaron que, las concentraciones de los parámetros evaluados se encuentran dentro de los LMP y ECAs, y que el material del depósito de desmonte se clasifica como No PAG. De acuerdo con los resultados de los ensayos cinéticos (celda de humedad), los cálculos de agotamiento indican que los minerales sulfurados se agotaron alrededor de la primera semana de ensayo en laboratorio, antes que se agote el PN total. Los tiempos de agotamiento estimaron que el  $\text{CO}_3\text{-PN}$  se agotaría en aproximadamente 37 días luego de culminada la prueba.

Por lo tanto, habiéndose descartado el riesgo de generación de drenaje ácido en el depósito de desmonte, los resultados que serán discutidos en la presente sección están referidos únicamente a los estimados de infiltración que ingresarían hacia el depósito de desmonte considerando o no una cobertura de cierre.

#### **4.1.1 Análisis de Resultados**

El sistema de cobertura considerado para el depósito de desmonte fue modelado en una dimensión (1D) con el código numérico VADOSE/W. Este modelo numérico requirió como datos de entrada parámetros geotécnicos e hidráulicos y de clima.

Los parámetros ingresados al modelo para la evaluación de la infiltración para los escenarios 1, 2 y 3 fueron obtenidos de los resultados de ensayos de laboratorio y pruebas de campo realizadas por la Unidad Minera entre los años 2013 y 2014.

Mientras que las variables de clima como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento fueron obtenidas de los registros de la estación meteorológica local, y la precipitación de la estación meteorológica Yauri.

La infiltración depende principalmente de los niveles de precipitación y de las características geotécnicas e hidráulicas de los materiales de suelo considerados para la cobertura de cierre.

Se analizaron los registros de 27 años de precipitación de la estación meteorológica Yauri para el periodo agosto 1992 – julio 2019 con la finalidad de contar con las precipitaciones medias anuales para los diferentes años hidrológicos extremos (seco y húmedo). Se ordenaron los registros de agosto a julio para evaluar la precipitación como un año hidrológico a fin de contar con el periodo completo de la temporada de lluvias. Con base en la información registrada para el periodo 1992-2019 se realizó un análisis estadístico de la precipitación mediante el programa Microsoft Excel para obtener la precipitación promedio, y el software EASY FIT para la precipitación media anual para un año húmedo de 500 años de periodo de retorno. Del análisis de los escenarios extremos realizados con EASY FIT se observó que los registros de precipitación (1992-2019) se ajustaron mejor a la distribución Wakeby.

Como resultado de este análisis se obtuvieron las precipitaciones medias anuales para diferentes periodos de retorno para años climáticos húmedos y seco, donde la precipitación media anual para un año húmedo de 500 años de periodo de retorno fue de 1553 mm. Este valor de precipitación es aproximadamente el doble de lo que se registró en los dos (02) últimos eventos del fenómeno del niño (EFEN) presentados en el periodo 1997-1998 y 2016-2017, donde la lluvia acumulada fue de 767.1 mm y 734.6 mm, respectivamente. Por lo tanto, se infiere que la ubicación del depósito de desmonte no está influenciada por la ocurrencia del fenómeno El Niño.

El análisis de los resultados se basa en la evaluación de la infiltración que ingresaría hacia el depósito de desmonte, bajo diferentes condiciones de precipitación (promedio y húmedo de 500 años) y considerando o no un sistema de cobertura. Estas consideraciones fueron analizadas mediante 3 escenarios (1, 2 y 3) que fueron modelados con el código numérico VADOSE/W, que fue previamente calibrado con información registrada en la cobertura N°6. El valor de la infiltración registrada en la cobertura N°6 para el periodo agosto 2013 y julio 2014, y que fue reproducido por el modelo, fue de 60 mm, valor que corresponde al 5% de la precipitación medida en la estación meteorológica local. Los parámetros geotécnicos e hidráulicos fueron obtenidos de los ensayos de laboratorio y de campo realizados por la Unidad Minera. Las variables climáticas para el periodo agosto 2013 y julio del 2014 como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación fueron obtenidos de los registros de la estación meteorológica local ubicado dentro de la Unidad Minera.

Los escenarios 1 y 2 consideraron la presencia de un sistema de cobertura de 0.8 m de espesor conformado por tres (03) tipos de materiales de suelo los cuales

presentan diferentes propiedades geotécnicas e hidráulicas. Este sistema de cobertura presenta la misma configuración que el de la cobertura N°6. Cada uno de estos escenarios (1, 2 y 3) consideraron diferentes valores de precipitación que fueron obtenidos de la estación Yauri por medio de un análisis estadístico para un periodo de 27 años comprendidos entre 1992 y 2019.

El Escenario 1 consideró una precipitación correspondiente a la del promedio multianual correspondiente a 826 mm, y el Escenario 2 consideró una precipitación extrema húmeda de 500 años de periodo de retorno, correspondiente a 1553 mm. En el Escenario 1 se esperaba una infiltración de 42 mm que equivale a un 5% de la precipitación (826 mm). En el Escenario 2 se esperaba una infiltración de 76 mm equivalente a un 5 % de la precipitación.

Por su parte, el Escenario 3 no consideró ninguna cobertura sobre el depósito de desmonte. El valor de la precipitación considerada corresponde a la del promedio multianual equivalente a 826 mm. En este escenario se esperaba una infiltración de 197 mm que equivale a un 24 % de la precipitación.

Los porcentajes de infiltración (5%) se mantienen constantes para los escenarios 1 y 2 a pesar de contar con diferentes niveles de precipitación, lo cual permite inferir que, este porcentaje depende principalmente de las propiedades y geotécnicas e hidráulicas de los materiales de suelo de la cobertura, que para la presente investigación fueron las mismas para los escenarios 1 y 2.

Si bien la cobertura modelada no es del todo impermeable, los volúmenes de agua asociados a la infiltración no representarían ningún riesgo al medio ambiente debido a que el material del depósito de desmonte no cuenta con el potencial de generar drenaje ácido, tal como indican los ensayos geoquímicos.

De acuerdo con los resultados de los modelos, los escenarios con cobertura (1 y 2) presentarían una infiltración del orden del 5% del valor de la precipitación evaluada. Este valor de infiltración se incrementaría a 24 % cuando no se considera la colocación de una cobertura de cierre sobre el depósito de desmonte.

En la Tabla 4.1 se muestra la comparación de los niveles de infiltración que ingresarían hacia el depósito de desmonte, para cada uno de los escenarios evaluados.

**Tabla 4.1: Estimados de Infiltración por Escenarios**

Escenario	Cobertura		Espesor (m)	Precipitación (mm)	Infiltración	
					mm	% de precipitación
Escenario 1	Nº6 (0.8 m)	Material de préstamo	0.4	826	42	5%
		Grava	0.2			
		Arcilla compactada	0.2			
Escenario 2	Nº6 (0.8 m)	Material de préstamo	0.4	1553	76	5%
		Grava	0.2			
		Arcilla compactada	0.2			
Escenario 3	Sin Cobertura		No aplica	826	197	24%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 Contrastación de Hipótesis

Respecto a la hipótesis general planteada en la presente investigación: “El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte” se debe indicar que, de acuerdo con los resultados de los escenarios 1, 2 y 3, la colocación de un sistema de cobertura de cierre sobre un depósito de desmonte si influye significativamente en la reducción de los volúmenes de agua asociados a la infiltración, situación que se puede ver reflejada con el incremento de la infiltración de 5% (escenarios 1 y 2) a 24 % (Escenario 3). cuando no se cuenta con una cobertura de cierre

El código numérico VADOSE/W, que fue previamente calibrado con información medida en campo (cobertura N°6), permitió evaluar el efecto combinado entre los materiales del sistema de cobertura propuesto y el clima mediante escenarios, y contar con resultados confiables.

Respecto a la carga contaminante de metales asociado a los volúmenes de agua por infiltración, estos no tendrían ningún impacto significativo en el cuerpo receptor ubicado cerca del depósito de desmonte debido a que el material del depósito de desmonte no tiene el potencial de generar drenaje ácido (no PAG) y los volúmenes de agua son pequeños y cercanos al 5% de la precipitación anual.

## CONCLUSIONES

- El porcentaje de infiltración que ingresaría hacia el depósito de desmonte por medio de un sistema de cobertura de 0.8 m conformado por 0.4 m de material de préstamo, 0.2 m de grava y 0.2 m de arcilla, estaría en el orden del 5% a pesar de considerar diferentes valores de precipitación correspondiente a los años promedio (826 mm) y extremo húmedo de 500 años de periodo de retorno (1553 mm).
- La infiltración que ingresaría hacia el depósito de desmonte se reduciría significativamente de 24 % a 5% cuando se considera la colocación de un sistema de cobertura de cierre de 0.8 m de espesor total (0.4 m de material de préstamo, 0.2 m de grava y 0.2 m de arcilla).
- Los niveles de infiltración esperados que están en el orden del 5 % no representaría ningún riesgo ambiental dado que, de acuerdo con los ensayos geoquímicos, el material del depósito de desmonte no cuenta con el potencial de generación de drenaje ácido (No PAG). Se espera que la calidad del agua reportada en el pie del depósito de desmonte cumpla con los LMP y ECAs.
- El espesor del sistema de cobertura propuesto (0.8), así como la infiltración estimada (5%) que ingresaría hacia el depósito de desmonte se encuentran en el orden de magnitud de los casos documentados por la guía del MINEM (2007); donde los espesores totales de las coberturas varían entre 0.625 m para la mina Run Jungle de Australia, y 2.1 m para la Mina Lorraine de Canadá, y la infiltración medida varía entre 0.4 % para la mina Barrick Goldstrike de Estados Unidos y 6.5 % para la mina Run Jungle de Australia.

## RECOMENDACIONES

- Realizar la revegetación del depósito de desmonte luego de construir el sistema de cobertura final, para lo cual se considerarán especies nativas tales como la “llama ichu” (*Festuca rigidifolia*), “Iro” (*Festuca ortophylla*) y “Chilliwa” (*Festuca dolichophylla*), las cuales mostraron buena adaptabilidad al clima y al suelo cuando fueron considerados en la revegetación de otros componentes mineros que se encuentran dentro de la misma Unidad Minera. La revegetación se realizará mediante la colocación de plántulas o esquejes de una o dos especies descritas considerando un espaciamiento de 0.5m entre si (40,000 plantas/hectárea), y previa aplicación de estiércol de ganado considerando una proporción de entre 5 toneladas/hectárea y 10 toneladas/hectárea.
- Realizar una evaluación hidráulica de la poza de colección y el sistema de impermeabilización del depósito de desmonte considerando la precipitación asociada a los años hidrológicos extremos húmedos como el de 500 años de periodo de retorno a fin de asegurar que estos componentes hidráulicos puedan manejar eficientemente los volúmenes de agua asociados a estos eventos.
- Realizar campañas de ensayos geotécnicos de laboratorio de las canteras que eventualmente sirvan para el diseño de un sistema de cobertura de cierre con la finalidad de contar con registros actualizados.
- Realizar ensayos geoquímicos de los materiales de suelo que conforman el sistema de cobertura de cierre a fin de determinar si estos cuentan con el potencial de generar drenaje ácido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIRA International Ltd. (2002). ARD Test Handbook – Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage. Environmental Geochemistry International Pty. Ltd. and Ian Wark Institute, University of South Australia.
- Aduvire Pataca, Ernesto Oswaldo (2006). Drenaje Ácido de Mina Generación y Tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Autoridad Nacional del Agua, ANA (2020). Glosario de Términos de la Ley N°29338, Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento Aprobado Mediante Decreto Supremo N°001-2010-AG.
- Durand Pacheco, P. (2014). Aplicación numérica para las coberturas de los depósitos de residuos mineros. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería.
- International Network for Acid Prevention, INAP (2009). Global Acid Rock Drainage - Guide (GARD - Guide).
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, INAIGEM (2022). El Drenaje Ácido de Roca y sus Potenciales Impactos Ambientales.
- Lu Ning y Likos W. J. (2004). Unsaturated Soils Mechanics.
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM), 2006. Guía para la Elaboración de Planes de Cierre de Pasivos Ambientales Mineros.
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM), 2007. Guía Para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros.

Mine Environment Neutral Drainage Program, MEND (2004). Design, Construction and Performance Monitoring of Cover Systems for Waste Rock and Tailings. Report 2.21.4.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI (2017). Informe El Niño Costero 2017-Condiciones Termo - pluviométricas a Nivel Nacional.

Smith & Huyck (1999). An Overview of the Abundance, Relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals. Reviews in Economic Geology.

Wilson Ward (2007). Coberturas para Contención de Residuos. Curso de Especialización en Cierre de Minas y Pasivos Ambientales, Pontificia Universidad católica del Perú.

## ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<p><b><u>Problema general</u></b></p> <p>¿De qué manera influye el diseño de una cobertura de cierre para la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte?</p> <p><b><u>Problemas Específicos</u></b></p> <p>1. ¿De qué manera influye el diseño de una cobertura de cierre en la reducción del volumen de agua infiltrada en un depósito de desmonte?</p> <p>2. ¿De qué manera influye el diseño de una cobertura de cierre en la reducción de la carga contaminante de metales en un depósito de desmonte?</p>	<p><b><u>Objetivo general</u></b></p> <p>Determinar la influencia del diseño de una cobertura de cierre para la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte.</p> <p><b><u>Objetivos específicos</u></b></p> <p>1. Determinar la influencia del diseño de una cobertura de cierre en la reducción del volumen de agua infiltrada en un depósito de desmonte.</p> <p>2. Determinar la influencia del diseño de una cobertura de cierre en la reducción de la carga contaminante de metales en un depósito de desmonte.</p>	<p><b><u>Hipótesis general</u></b></p> <p>El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción del impacto ambiental en el agua en un depósito de desmonte.</p> <p><b><u>Hipótesis específica</u></b></p> <p>1. El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción del volumen de agua infiltrada en un depósito de desmonte.</p> <p>2. El diseño de la cobertura de cierre influye significativamente en la reducción de la carga contaminante de metales en un depósito de desmonte.</p>	<p><b><u>Variable independiente</u></b></p> <p>X= Diseño de una cobertura de cierre.</p> <p>X1=Propiedades de los materiales de la cobertura de cierre.</p> <p>X2=Configuración de los materiales de la cobertura de cierre (espesor y pendiente).</p> <p><b><u>Variable dependiente</u></b></p> <p>Y=Impacto ambiental en el agua.</p> <p>Y1= Volumen de agua infiltrada.</p> <p>Y2= Carga contaminante de metales</p>	<p><b><u>Indicadores de X</u></b></p> <p>X<sub>11</sub>=Porosidad (volumen/volumen)</p> <p>X<sub>12</sub>=Succión (kPa)</p> <p>X<sub>13</sub>=Conductividad hidráulica saturada (cm/s)</p> <p>X<sub>14</sub>=Contenido volumétrico de agua (volumen/volumen)</p> <p>X<sub>21</sub>=Espesor (m)</p> <p>X<sub>22</sub>=Pendiente (%)</p> <p><b><u>Indicadores de Y</u></b></p> <p>Y1=Volumen (mm/año)</p> <p>Y2=Concentración (mg/L)</p>	<p><b><u>Tipo de Investigación</u></b></p> <p>Aplicativo, censal.</p> <p><b><u>Nivel de Investigación</u></b></p> <p>Explicativo - Correlacional</p> <p><b><u>Diseño de la Investigación</u></b></p> <p>Experimental. Cuasi experimental</p> <p><b><u>Población y muestra</u></b></p> <p>Un (01) depósito de desmonte.</p> <p>Población=Muestra</p> <p><b><u>Técnicas</u></b></p> <p>Observación</p> <p><b><u>Instrumentos</u></b></p> <p>Guía de Observación</p>

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 2: RESULTADOS Y SALIDAS DE LOS MODELOS

**Tabla Anx 2 -1: Datos Climáticos Ingresados al Modelo - Escenario 1 (con cobertura, PP promedio) y Escenario 3 (sin cobertura, PP promedio)**

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
1	13.0	11.2	33.8	33.8	1.67	1.2
2	7.8	6.0	47.7	47.7	1.36	0.0
3	8.3	6.4	40.7	40.7	1.23	0.0
4	7.9	5.8	41.7	41.7	1.12	0.0
5	4.6	2.9	62.5	62.5	0.67	0.0
6	10.3	8.6	49.0	49.0	1.80	0.0
7	7.5	5.9	57.0	57.0	2.00	0.0
8	6.9	5.0	59.0	59.0	1.70	1.9
9	7.2	5.5	62.0	62.0	1.80	1.4
10	6.6	4.8	33.0	33.0	1.10	0.0
11	9.4	6.7	25.0	25.0	0.94	0.0
12	5.7	3.3	21.6	21.6	0.90	0.0
13	6.6	4.2	26.2	26.2	0.88	0.0
14	7.4	5.3	35.5	35.5	1.08	0.0
15	7.7	5.5	25.3	25.3	1.02	0.0
16	8.4	5.9	27.9	27.9	1.00	0.0
17	9.2	7.2	32.9	32.9	1.06	0.0
18	8.9	6.7	31.2	31.2	1.11	0.0
19	8.9	6.6	30.1	30.1	0.90	0.0
20	8.0	5.8	27.3	27.3	1.06	0.0
21	8.7	6.5	26.5	26.5	1.30	0.0
22	8.6	6.5	29.0	29.0	1.33	0.0
23	7.5	6.1	45.6	45.6	1.97	0.2
24	6.5	5.8	70.8	70.8	1.73	2.5
25	7.1	5.5	41.3	41.3	1.65	1.5
26	4.6	2.6	30.7	30.7	0.83	0.0
27	5.3	3.5	47.5	47.5	1.25	2.2
28	3.1	2.4	81.9	81.9	0.61	18.0
29	5.5	4.5	67.7	67.7	1.31	0.2
30	6.5	4.9	60.2	60.2	1.48	0.0
31	7.5	5.8	51.7	51.7	1.16	0.0
32	3.3	2.2	65.5	65.5	0.10	0.0
33	5.4	3.2	31.0	31.0	1.50	0.0
34	6.0	3.5	31.0	31.0	1.30	0.0
35	7.1	4.9	33.0	33.0	1.60	0.0
36	12.5	10.7	18.3	18.3	2.14	0.0
37	9.2	7.1	29.8	29.8	1.25	0.0
38	8.2	6.6	47.9	47.9	1.30	0.0
39	8.2	6.3	45.3	45.3	1.25	0.0
40	8.6	6.4	33.2	33.2	1.08	0.0
41	9.3	7.4	37.3	37.3	1.16	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
42	8.9	6.8	45.9	45.9	1.70	0.0
43	9.3	7.3	41.2	41.2	1.56	0.0
44	9.4	7.3	35.8	35.8	1.45	0.0
45	9.2	7.1	30.1	30.1	1.68	0.0
46	9.4	7.1	23.9	23.9	1.48	0.0
47	9.6	7.5	26.0	26.0	1.54	0.0
48	6.3	4.8	32.5	32.5	0.46	0.0
49	9.5	7.6	28.0	28.0	1.90	0.0
50	14.0	12.5	42.2	42.2	2.95	0.0
51	9.4	7.7	55.6	55.6	1.81	0.2
52	9.9	7.8	59.5	59.5	1.42	3.5
53	9.7	7.7	47.8	47.8	0.90	0.2
54	10.1	8.2	46.0	46.0	1.54	0.0
55	10.1	8.3	57.2	57.2	1.74	0.0
56	9.1	7.5	61.2	61.2	1.63	0.0
57	11.3	9.3	41.2	41.2	1.74	0.0
58	9.2	7.2	40.8	40.8	1.53	0.0
59	9.5	7.5	42.8	42.8	1.64	0.0
60	8.7	6.7	45.2	45.2	1.48	0.0
61	9.1	7.3	30.9	30.9	1.85	0.0
62	9.7	7.6	30.9	30.9	2.21	0.0
63	9.1	7.2	33.5	33.5	2.09	0.0
64	10.0	8.1	32.8	32.8	1.43	0.0
65	10.2	8.5	41.3	41.3	1.55	0.0
66	10.8	9.5	45.7	45.7	1.70	0.5
67	10.6	8.9	48.4	48.4	1.65	0.5
68	10.4	8.6	42.8	42.8	1.47	0.0
69	9.0	7.1	47.7	47.7	1.49	0.0
70	9.6	7.7	54.1	54.1	1.53	2.7
71	8.8	7.4	63.8	63.8	1.40	0.0
72	11.2	9.2	38.8	38.8	1.17	0.0
73	10.2	8.1	29.5	29.5	1.65	0.0
74	7.9	6.5	64.5	64.5	1.10	7.6
75	8.0	7.1	62.1	62.1	1.05	0.5
76	9.1	7.9	62.8	62.8	0.96	0.5
77	12.8	11.1	41.3	41.3	1.34	0.0
78	13.8	11.8	29.5	29.5	1.22	0.0
79	14.5	12.4	24.1	24.1	1.59	0.0
80	14.0	12.0	26.5	26.5	1.18	0.0
81	14.4	12.0	19.6	19.6	1.53	0.0
82	13.9	11.8	25.1	25.1	1.47	0.0
83	12.8	11.1	44.6	44.6	1.35	0.0
84	12.4	10.5	53.2	53.2	1.14	1.7
85	9.3	8.0	73.5	73.5	0.70	3.4
86	10.9	9.8	64.5	64.5	1.29	0.2
87	10.6	9.0	64.7	64.7	1.06	21.9

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
88	10.1	8.4	71.1	71.1	0.83	7.1
89	9.1	7.8	75.5	75.5	1.10	2.7
90	12.2	10.6	44.2	44.2	1.50	0.0
91	13.2	11.4	34.9	34.9	1.34	0.0
92	13.8	12.0	32.3	32.3	1.13	0.0
93	12.1	10.1	21.8	21.8	1.76	0.0
94	12.1	10.0	38.2	38.2	1.56	0.0
95	10.9	9.3	64.9	64.9	1.51	22.9
96	11.0	9.6	64.8	64.8	1.20	0.0
97	12.0	10.1	52.9	52.9	1.50	0.0
98	11.1	9.8	61.9	61.9	1.18	2.0
99	14.6	13.0	38.2	38.2	1.16	0.0
100	14.9	13.2	30.4	30.4	1.72	0.0
101	14.4	12.2	29.6	29.6	0.96	1.2
102	11.52	9.77	44.42	44.4	1.63	1.2
103	12.41	10.75	43.25	43.3	1.63	1.2
104	11.66	9.82	48.75	48.8	1.78	1.2
105	10.85	9.33	62.96	63.0	2.53	1.8
106	10.62	9.10	70.75	70.8	1.48	2.6
107	10.98	9.20	67.08	67.1	2.70	1.4
108	12.49	10.44	59.79	59.8	1.70	1.4
109	12.61	11.00	56.96	57.0	1.24	1.2
110	12.04	9.98	53.67	53.7	1.86	1.2
111	12.46	10.83	44.00	44.0	1.95	1.2
112	11.32	9.37	45.46	45.5	1.71	1.2
113	9.57	7.49	82.17	82.2	1.68	16.0
114	8.82	7.65	76.96	77.0	1.68	1.5
115	10.11	8.41	56.38	56.4	1.13	1.2
116	16.1	14.8	31.2	31.2	1.82	1.2
117	12.2	10.3	37.0	37.0	1.34	0.0
118	11.8	9.8	38.2	38.2	1.42	0.0
119	11.3	9.2	47.8	47.8	1.80	0.0
120	11.3	9.3	49.9	49.9	1.69	0.0
121	11.7	9.9	47.1	47.1	1.45	0.0
122	10.3	8.7	56.4	56.4	1.87	0.5
123	12.3	10.8	51.2	51.2	1.42	0.0
124	10.9	9.2	54.4	54.4	1.74	1.7
125	11.6	10.4	50.8	50.8	2.04	0.0
126	9.0	7.6	72.6	72.6	0.93	10.1
127	9.9	8.4	70.8	70.8	1.46	4.9
128	9.1	7.5	72.8	72.8	1.15	13.6
129	10.0	8.8	72.0	72.0	1.12	3.0
130	9.8	8.5	74.0	74.0	1.72	8.1
131	8.3	7.3	81.5	81.5	1.65	7.9
132	9.4	8.3	75.5	75.5	1.18	16.5
133	9.0	8.0	77.1	77.1	0.96	6.6

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
134	8.7	7.5	79.0	79.0	0.69	26.6
135	10.1	8.8	67.8	67.8	1.09	0.5
136	9.7	8.5	73.6	73.6	1.38	14.8
137	8.7	7.6	75.8	75.8	1.25	14.3
138	10.5	9.2	64.0	64.0	1.06	0.5
139	9.9	8.5	51.8	51.8	1.69	0.0
140	10.9	9.3	47.4	47.4	1.15	0.0
141	11.3	9.6	49.0	49.0	0.90	0.0
142	10.0	8.5	64.2	64.2	1.25	6.7
143	9.3	8.1	74.9	74.9	1.36	17.7
144	9.8	8.5	71.5	71.5	1.23	13.8
145	10.0	8.8	72.3	72.3	0.67	0.5
146	10.4	8.9	68.8	68.8	1.12	2.7
147	8.4	7.4	79.2	79.2	1.35	8.4
148	9.9	8.5	70.2	70.2	1.20	36.5
149	8.8	7.7	80.1	80.1	1.28	3.7
150	9.4	8.5	77.0	77.0	1.05	3.4
151	11.4	10.2	69.1	69.1	1.37	6.1
152	10.4	9.2	73.4	73.4	1.29	2.5
153	9.9	8.7	74.3	74.3	0.83	1.7
154	8.8	7.9	70.1	70.1	0.58	0.2
155	11.5	10.0	58.4	58.4	0.93	0.7
156	11.1	9.6	61.6	61.6	1.05	11.6
157	9.5	8.6	78.5	78.5	0.97	7.4
158	9.3	8.5	80.0	80.0	1.11	4.7
159	9.9	8.7	78.9	78.9	1.00	4.9
160	9.4	8.5	76.2	76.2	1.25	3.7
161	9.5	8.4	75.8	75.8	0.95	10.3
162	10.6	9.4	71.6	71.6	1.25	2.5
163	10.2	8.7	74.9	74.9	1.05	5.4
164	12.6	11.5	61.0	61.0	0.83	0.0
165	9.8	8.1	65.5	65.5	1.33	3.0
166	10.4	9.3	69.3	69.3	0.88	1.2
167	11.3	10.0	64.7	64.7	1.04	1.2
168	10.5	9.3	69.3	69.3	1.17	12.6
169	7.8	6.9	80.7	80.7	0.87	13.3
170	8.7	7.7	75.2	75.2	1.60	10.3
171	9.6	8.7	73.7	73.7	1.07	1.9
172	9.2	7.9	75.5	75.5	1.23	16.3
173	9.5	8.6	78.1	78.1	1.25	6.9
174	11.4	10.1	67.6	67.6	0.80	1.0
175	7.8	6.8	82.5	82.5	0.72	9.4
176	9.9	9.0	70.5	70.5	1.03	0.2
177	10.5	8.9	56.6	56.6	1.52	0.2
178	10.1	8.5	51.7	51.7	1.86	0.0
179	8.8	7.4	50.8	50.8	0.90	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
180	10.3	8.8	53.4	53.4	1.04	0.0
181	10.9	9.2	47.5	47.5	1.08	0.0
182	9.6	8.1	62.2	62.2	1.06	6.7
183	9.7	8.4	73.2	73.2	1.25	14.5
184	9.4	8.2	75.9	75.9	1.36	13.1
185	8.8	7.8	78.4	78.4	1.40	16.2
186	8.7	7.8	77.3	77.3	1.09	0.5
187	10.2	8.6	52.6	52.6	1.54	0.2
188	9.5	7.9	50.3	50.3	1.11	0.0
189	9.8	8.3	62.9	62.9	1.16	6.1
190	8.7	7.5	78.0	78.0	1.38	21.4
191	8.6	7.4	75.5	75.5	1.57	22.7
192	8.1	7.0	79.6	79.6	1.25	8.9
193	11.1	9.9	61.4	61.4	1.13	0.2
194	10.7	9.2	59.1	59.1	1.18	0.5
195	10.3	8.9	71.9	71.9	1.23	4.2
196	10.8	9.6	70.3	70.3	1.17	2.7
197	9.6	8.1	71.0	71.0	0.97	0.2
198	8.7	7.7	75.0	75.0	1.03	1.0
199	10.5	9.2	69.4	69.4	1.63	2.2
200	11.5	10.1	66.4	66.4	1.50	0.2
201	11.5	10.2	65.1	65.1	1.95	2.2
202	10.7	9.2	68.2	68.2	1.72	0.7
203	12.5	11.0	60.6	60.6	1.40	0.7
204	10.9	9.6	65.3	65.3	1.38	7.4
205	10.2	8.5	69.7	69.7	1.35	2.0
206	9.9	8.5	67.4	67.4	1.70	7.4
207	10.2	8.9	73.6	73.6	2.03	3.9
208	10.3	9.2	73.7	73.7	1.25	6.1
209	11.0	9.6	62.5	62.5	2.06	0.5
210	10.3	8.8	64.9	64.9	1.74	0.0
211	10.6	9.2	69.6	69.6	1.63	1.5
212	9.6	8.0	70.3	70.3	1.92	0.5
213	10.0	8.2	65.8	65.8	2.42	0.2
214	9.9	8.0	63.8	63.8	2.35	0.0
215	9.2	7.6	65.0	65.0	1.45	3.4
216	9.9	8.3	68.4	68.4	1.66	0.7
217	10.1	8.6	69.7	69.7	1.55	5.9
218	11.3	10.1	69.4	69.4	1.72	4.4
219	10.7	9.2	70.3	70.3	1.98	1.7
220	10.4	9.2	68.5	68.5	1.71	0.2
221	11.0	9.2	66.5	66.5	1.49	6.2
222	10.9	9.2	66.8	66.8	1.84	0.2
223	10.1	8.6	68.8	68.8	1.72	0.7
224	9.6	8.5	71.8	71.8	1.51	0.5
225	10.5	9.0	69.8	69.8	1.77	6.4

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
226	9.2	8.1	77.7	77.7	1.85	14.0
227	8.3	6.9	78.0	78.0	1.69	1.5
228	8.8	7.4	73.6	73.6	1.65	9.6
229	9.3	8.2	77.5	77.5	1.87	10.6
230	9.8	8.6	75.0	75.0	1.56	6.6
231	8.6	7.6	79.1	79.1	1.93	10.8
232	9.5	8.5	74.4	74.4	1.39	0.0
233	10.0	8.8	68.8	68.8	1.14	0.0
234	10.9	9.3	67.3	67.3	2.02	4.4
235	9.4	8.1	73.9	73.9	1.63	0.7
236	11.6	10.2	67.3	67.3	1.55	0.7
237	10.6	9.2	71.3	71.3	1.42	6.6
238	10.4	9.2	70.6	70.6	1.70	1.5
239	9.8	8.9	71.5	71.5	2.07	0.5
240	11.3	9.9	58.5	58.5	2.72	0.0
241	8.8	7.0	50.5	50.5	2.12	0.0
242	8.5	6.8	54.8	54.8	2.24	0.0
243	9.2	7.5	56.9	56.9	0.94	0.0
244	8.9	7.6	75.2	75.2	1.34	4.9
245	9.3	8.3	73.8	73.8	1.01	2.7
246	10.6	9.0	67.2	67.2	1.41	1.5
247	9.9	8.7	73.0	73.0	1.32	3.9
248	10.0	8.6	69.0	69.0	1.12	0.2
249	11.2	9.6	62.6	62.6	1.45	0.0
250	10.5	9.0	67.9	67.9	1.51	3.2
251	9.8	8.5	73.7	73.7	1.72	2.2
252	9.7	8.6	69.7	69.7	1.43	0.2
253	8.7	7.3	72.0	72.0	2.04	1.0
254	9.4	8.0	65.3	65.3	1.33	0.0
255	9.3	7.5	61.0	61.0	1.20	0.0
256	10.3	8.8	65.0	65.0	1.21	0.0
257	11.8	10.4	63.8	63.8	1.25	1.5
258	10.8	9.4	63.4	63.4	2.00	0.0
259	9.7	8.1	67.0	67.0	2.20	0.2
260	9.5	7.9	66.9	66.9	1.87	9.1
261	8.7	7.6	70.5	70.5	1.66	0.2
262	9.4	8.2	68.8	68.8	1.93	0.7
263	8.9	7.6	70.3	70.3	1.96	0.5
264	8.6	7.0	71.0	71.0	1.09	0.0
265	7.2	5.7	67.1	67.1	1.24	0.2
266	8.9	7.2	59.5	59.5	1.88	0.0
267	8.4	6.8	63.0	63.0	1.51	0.0
268	8.8	7.3	68.3	68.3	1.79	2.2
269	8.3	6.7	56.8	56.8	1.49	0.0
270	6.7	4.7	50.2	50.2	1.44	0.0
271	7.8	6.0	52.9	52.9	1.75	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
272	8.8	7.3	62.4	62.4	2.33	0.0
273	10.0	8.7	64.4	64.4	2.07	0.2
274	8.6	6.8	51.9	51.9	1.65	0.0
275	8.0	6.1	50.8	50.8	1.53	0.0
276	8.9	7.4	53.9	53.9	1.45	0.0
277	9.0	7.3	62.2	62.2	1.95	0.2
278	9.5	7.9	53.5	53.5	1.43	0.0
279	8.1	6.0	43.5	43.5	1.57	0.0
280	7.3	5.2	42.2	42.2	1.32	0.0
281	6.8	4.9	53.9	53.9	1.57	0.0
282	8.1	6.1	49.3	49.3	1.72	0.0
283	6.7	4.9	49.2	49.2	1.77	0.0
284	7.4	6.0	62.8	62.8	2.03	0.2
285	6.5	5.3	73.6	73.6	1.57	0.5
286	7.9	6.4	65.6	65.6	2.63	1.0
287	6.1	4.5	65.5	65.5	1.84	0.0
288	6.5	4.9	63.8	63.8	1.68	0.0
289	8.7	6.6	46.5	46.5	1.27	0.0
290	6.6	4.7	46.5	46.5	1.34	0.0
291	6.1	4.4	56.7	56.7	1.33	0.0
292	7.6	6.0	55.5	55.5	1.77	0.0
293	7.2	5.3	65.7	65.7	1.96	2.0
294	7.6	5.9	64.4	64.4	1.80	0.0
295	5.6	4.2	73.2	73.2	3.25	7.4
296	6.5	5.4	75.2	75.2	2.47	2.7
297	5.1	3.2	55.4	55.4	1.95	0.2
298	3.3	1.2	47.3	47.3	1.36	0.0
299	4.8	2.7	45.6	45.6	1.50	0.0
300	5.8	3.8	46.3	46.3	1.53	0.0
301	7.4	5.4	48.7	48.7	1.44	0.0
302	6.7	4.5	45.4	45.4	2.02	0.0
303	6.5	4.4	51.5	51.5	2.39	0.0
304	6.3	4.2	47.2	47.2	1.95	0.0
305	6.9	4.9	44.8	44.8	1.30	0.0
306	7.1	5.1	41.7	41.7	1.51	0.0
307	6.9	4.7	35.3	35.3	1.49	0.0
308	6.1	3.9	31.0	31.0	1.68	0.0
309	6.7	4.5	36.3	36.3	1.63	0.0
310	7.3	5.2	34.8	34.8	1.68	0.0
311	7.1	4.7	29.9	29.9	2.60	0.0
312	5.7	3.4	31.9	31.9	2.34	0.0
313	5.8	3.7	41.6	41.6	2.05	0.0
314	6.3	4.5	57.2	57.2	1.73	0.0
315	6.9	5.0	52.6	52.6	1.88	0.0
316	6.2	4.1	43.1	43.1	1.82	0.0
317	5.8	3.7	37.9	37.9	1.55	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
318	5.8	3.9	39.4	39.4	1.24	0.0
319	6.3	4.2	42.7	42.7	1.38	0.0
320	6.8	4.9	53.6	53.6	1.67	0.0
321	6.8	4.9	53.0	53.0	1.61	0.0
322	7.4	5.3	46.8	46.8	1.56	0.0
323	4.8	2.8	40.5	40.5	2.03	0.0
324	4.6	2.6	43.5	43.5	2.20	0.0
325	7.6	5.8	45.6	45.6	2.63	0.0
326	6.7	4.8	50.8	50.8	1.95	0.0
327	6.6	4.7	48.2	48.2	1.81	0.0
328	6.5	4.5	45.0	45.0	1.95	0.0
329	6.5	4.6	48.8	48.8	2.28	0.0
330	7.2	5.2	43.6	43.6	1.83	0.0
331	5.9	3.8	43.1	43.1	2.02	0.0
332	5.5	3.6	51.8	51.8	1.94	0.0
333	7.2	5.3	46.6	46.6	1.75	0.0
334	8.2	6.1	33.0	33.0	1.68	0.0
335	7.5	5.4	38.6	38.6	1.81	0.0
336	6.8	5.0	45.1	45.1	1.90	0.0
337	6.3	4.4	50.9	50.9	2.31	0.0
338	6.3	4.6	51.5	51.5	2.78	0.0
339	6.1	3.9	41.0	41.0	2.64	0.0
340	5.0	2.6	33.5	33.5	2.03	0.0
341	5.8	3.9	41.1	41.1	1.56	0.0
342	7.1	5.0	45.2	45.2	1.98	0.0
343	6.8	5.0	53.6	53.6	1.98	0.0
344	6.7	5.0	52.7	52.7	1.90	0.0
345	6.7	4.7	52.2	52.2	1.91	0.0
346	6.3	4.3	46.8	46.8	1.40	0.0
347	6.2	4.0	40.0	40.0	1.35	0.0
348	5.4	3.3	33.3	33.3	1.36	0.0
349	6.5	4.4	41.3	41.3	2.05	0.0
350	5.9	3.8	57.0	57.0	2.49	0.0
351	4.6	2.7	59.4	59.4	2.31	0.0
352	6.3	4.7	54.1	54.1	2.09	0.0
353	6.5	4.8	51.2	51.2	1.89	0.0
354	5.4	4.1	78.7	78.7	1.69	7.9
355	4.2	2.5	71.5	71.5	1.78	0.2
356	4.3	2.5	50.7	50.7	2.15	0.0
357	5.3	3.0	36.3	36.3	2.67	0.0
358	3.6	1.5	41.5	41.5	2.38	0.0
359	3.7	1.5	65.2	65.2	2.40	1.0
360	4.2	2.3	50.8	50.8	2.47	0.2
361	6.0	3.8	33.2	33.2	2.26	0.0
362	4.5	2.7	44.4	44.4	1.71	0.0
363	6.8	5.4	66.5	66.5	2.47	1.5

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
364	7.1	5.6	58.1	58.1	1.36	0.2
365	5.7	3.7	51.0	51.0	1.74	0.0

**Tabla Anx 2 -2: Datos Climáticos Ingresados al Modelo - Escenario 2 (con cobertura, PP TR 500 años)**

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
1	13.0	11.2	33.8	33.8	1.7	2.3
2	7.8	6.0	47.7	47.7	1.4	0.0
3	8.3	6.4	40.7	40.7	1.2	0.0
4	7.9	5.8	41.7	41.7	1.1	0.0
5	4.6	2.9	62.5	62.5	0.7	0.0
6	10.3	8.6	49.0	49.0	1.8	0.0
7	7.5	5.9	57.0	57.0	2.0	0.0
8	6.9	5.0	59.0	59.0	1.7	3.6
9	7.2	5.5	62.0	62.0	1.8	2.6
10	6.6	4.8	33.0	33.0	1.1	0.0
11	9.4	6.7	25.0	25.0	0.9	0.0
12	5.7	3.3	21.6	21.6	0.9	0.0
13	6.6	4.2	26.2	26.2	0.9	0.0
14	7.4	5.3	35.5	35.5	1.1	0.0
15	7.7	5.5	25.3	25.3	1.0	0.0
16	8.4	5.9	27.9	27.9	1.0	0.0
17	9.2	7.2	32.9	32.9	1.1	0.0
18	8.9	6.7	31.2	31.2	1.1	0.0
19	8.9	6.6	30.1	30.1	0.9	0.0
20	8.0	5.8	27.3	27.3	1.1	0.0
21	8.7	6.5	26.5	26.5	1.3	0.0
22	8.6	6.5	29.0	29.0	1.3	0.0
23	7.5	6.1	45.6	45.6	2.0	0.5
24	6.5	5.8	70.8	70.8	1.7	4.7
25	7.1	5.5	41.3	41.3	1.6	2.8
26	4.6	2.6	30.7	30.7	0.8	0.0
27	5.3	3.5	47.5	47.5	1.3	4.2
28	3.1	2.4	81.9	81.9	0.6	34.1
29	5.5	4.5	67.7	67.7	1.3	0.5
30	6.5	4.9	60.2	60.2	1.5	0.0
31	7.5	5.8	51.7	51.7	1.2	0.0
32	3.3	2.2	65.5	65.5	0.1	0.0
33	5.4	3.2	31.0	31.0	1.5	0.0
34	6.0	3.5	31.0	31.0	1.3	0.0
35	7.1	4.9	33.0	33.0	1.6	0.0
36	12.5	10.7	18.3	18.3	2.1	0.0
37	9.2	7.1	29.8	29.8	1.3	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
38	8.2	6.6	47.9	47.9	1.3	0.0
39	8.2	6.3	45.3	45.3	1.3	0.0
40	8.6	6.4	33.2	33.2	1.1	0.0
41	9.3	7.4	37.3	37.3	1.2	0.0
42	8.9	6.8	45.9	45.9	1.7	0.0
43	9.3	7.3	41.2	41.2	1.6	0.0
44	9.4	7.3	35.8	35.8	1.5	0.0
45	9.2	7.1	30.1	30.1	1.7	0.0
46	9.4	7.1	23.9	23.9	1.5	0.0
47	9.6	7.5	26.0	26.0	1.5	0.0
48	6.3	4.8	32.5	32.5	0.5	0.0
49	9.5	7.6	28.0	28.0	1.9	0.0
50	14.0	12.5	42.2	42.2	2.9	0.0
51	9.4	7.7	55.6	55.6	1.8	0.5
52	9.9	7.8	59.5	59.5	1.4	6.6
53	9.7	7.7	47.8	47.8	0.9	0.5
54	10.1	8.2	46.0	46.0	1.5	0.0
55	10.1	8.3	57.2	57.2	1.7	0.0
56	9.1	7.5	61.2	61.2	1.6	0.0
57	11.3	9.3	41.2	41.2	1.7	0.0
58	9.2	7.2	40.8	40.8	1.5	0.0
59	9.5	7.5	42.8	42.8	1.6	0.0
60	8.7	6.7	45.2	45.2	1.5	0.0
61	9.1	7.3	30.9	30.9	1.9	0.0
62	9.7	7.6	30.9	30.9	2.2	0.0
63	9.1	7.2	33.5	33.5	2.1	0.0
64	10.0	8.1	32.8	32.8	1.4	0.0
65	10.2	8.5	41.3	41.3	1.5	0.0
66	10.8	9.5	45.7	45.7	1.7	0.9
67	10.6	8.9	48.4	48.4	1.6	0.9
68	10.4	8.6	42.8	42.8	1.5	0.0
69	9.0	7.1	47.7	47.7	1.5	0.0
70	9.6	7.7	54.1	54.1	1.5	5.1
71	8.8	7.4	63.8	63.8	1.4	0.0
72	11.2	9.2	38.8	38.8	1.2	0.0
73	10.2	8.1	29.5	29.5	1.6	0.0
74	7.9	6.5	64.5	64.5	1.1	14.5
75	8.0	7.1	62.1	62.1	1.1	0.9
76	9.1	7.9	62.8	62.8	1.0	0.9
77	12.8	11.1	41.3	41.3	1.3	0.0
78	13.8	11.8	29.5	29.5	1.2	0.0
79	14.5	12.4	24.1	24.1	1.6	0.0
80	14.0	12.0	26.5	26.5	1.2	0.0
81	14.4	12.0	19.6	19.6	1.5	0.0
82	13.9	11.8	25.1	25.1	1.5	0.0
83	12.8	11.1	44.6	44.6	1.4	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
84	12.4	10.5	53.2	53.2	1.1	3.3
85	9.3	8.0	73.5	73.5	0.7	6.5
86	10.9	9.8	64.5	64.5	1.3	0.5
87	10.6	9.0	64.7	64.7	1.1	41.6
88	10.1	8.4	71.1	71.1	0.8	13.6
89	9.1	7.8	75.5	75.5	1.1	5.2
90	12.2	10.6	44.2	44.2	1.5	0.0
91	13.2	11.4	34.9	34.9	1.3	0.0
92	13.8	12.0	32.3	32.3	1.1	0.0
93	12.1	10.1	21.8	21.8	1.8	0.0
94	12.1	10.0	38.2	38.2	1.6	0.0
95	10.9	9.3	64.9	64.9	1.5	43.5
96	11.0	9.6	64.8	64.8	1.2	0.0
97	12.0	10.1	52.9	52.9	1.5	0.0
98	11.1	9.8	61.9	61.9	1.2	3.7
99	14.6	13.0	38.2	38.2	1.2	0.0
100	14.9	13.2	30.4	30.4	1.7	0.0
101	14.4	12.2	29.6	29.6	1.0	2.3
102	11.5	9.8	44.4	44.4	1.6	2.3
103	12.4	10.7	43.3	43.3	1.6	2.3
104	11.7	9.8	48.8	48.8	1.8	2.3
105	10.9	9.3	63.0	63.0	2.5	3.4
106	10.6	9.1	70.8	70.8	1.5	4.9
107	11.0	9.2	67.1	67.1	2.7	2.6
108	12.5	10.4	59.8	59.8	1.7	2.6
109	12.6	11.0	57.0	57.0	1.2	2.3
110	12.0	10.0	53.7	53.7	1.9	2.3
111	12.5	10.8	44.0	44.0	2.0	2.3
112	11.3	9.4	45.5	45.5	1.7	2.3
113	9.6	7.5	82.2	82.2	1.7	30.4
114	8.8	7.7	77.0	77.0	1.7	2.9
115	10.1	8.4	56.4	56.4	1.1	2.3
116	16.1	14.8	31.2	31.2	1.8	2.3
117	12.2	10.3	37.0	37.0	1.3	0.0
118	11.8	9.8	38.2	38.2	1.4	0.0
119	11.3	9.2	47.8	47.8	1.8	0.0
120	11.3	9.3	49.9	49.9	1.7	0.0
121	11.7	9.9	47.1	47.1	1.5	0.0
122	10.3	8.7	56.4	56.4	1.9	0.9
123	12.3	10.8	51.2	51.2	1.4	0.0
124	10.9	9.2	54.4	54.4	1.7	3.3
125	11.6	10.4	50.8	50.8	2.0	0.0
126	9.0	7.6	72.6	72.6	0.9	19.2
127	9.9	8.4	70.8	70.8	1.5	9.3
128	9.1	7.5	72.8	72.8	1.1	25.7
129	10.0	8.8	72.0	72.0	1.1	5.6

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
130	9.8	8.5	74.0	74.0	1.7	15.4
131	8.3	7.3	81.5	81.5	1.7	14.9
132	9.4	8.3	75.5	75.5	1.2	31.3
133	9.0	8.0	77.1	77.1	1.0	12.6
134	8.7	7.5	79.0	79.0	0.7	50.5
135	10.1	8.8	67.8	67.8	1.1	0.9
136	9.7	8.5	73.6	73.6	1.4	28.0
137	8.7	7.6	75.8	75.8	1.2	27.1
138	10.5	9.2	64.0	64.0	1.1	0.9
139	9.9	8.5	51.8	51.8	1.7	0.0
140	10.9	9.3	47.4	47.4	1.1	0.0
141	11.3	9.6	49.0	49.0	0.9	0.0
142	10.0	8.5	64.2	64.2	1.3	12.6
143	9.3	8.1	74.9	74.9	1.4	33.7
144	9.8	8.5	71.5	71.5	1.2	26.2
145	10.0	8.8	72.3	72.3	0.7	0.9
146	10.4	8.9	68.8	68.8	1.1	5.1
147	8.4	7.4	79.2	79.2	1.4	15.9
148	9.9	8.5	70.2	70.2	1.2	69.2
149	8.8	7.7	80.1	80.1	1.3	7.0
150	9.4	8.5	77.0	77.0	1.1	6.5
151	11.4	10.2	69.1	69.1	1.4	11.7
152	10.4	9.2	73.4	73.4	1.3	4.7
153	9.9	8.7	74.3	74.3	0.8	3.3
154	8.8	7.9	70.1	70.1	0.6	0.5
155	11.5	10.0	58.4	58.4	0.9	1.4
156	11.1	9.6	61.6	61.6	1.0	22.0
157	9.5	8.6	78.5	78.5	1.0	14.0
158	9.3	8.5	80.0	80.0	1.1	8.9
159	9.9	8.7	78.9	78.9	1.0	9.3
160	9.4	8.5	76.2	76.2	1.3	7.0
161	9.5	8.4	75.8	75.8	1.0	19.6
162	10.6	9.4	71.6	71.6	1.2	4.7
163	10.2	8.7	74.9	74.9	1.1	10.3
164	12.6	11.5	61.0	61.0	0.8	0.0
165	9.8	8.1	65.5	65.5	1.3	5.6
166	10.4	9.3	69.3	69.3	0.9	2.3
167	11.3	10.0	64.7	64.7	1.0	2.3
168	10.5	9.3	69.3	69.3	1.2	23.8
169	7.8	6.9	80.7	80.7	0.9	25.2
170	8.7	7.7	75.2	75.2	1.6	19.6
171	9.6	8.7	73.7	73.7	1.1	3.7
172	9.2	7.9	75.5	75.5	1.2	30.9
173	9.5	8.6	78.1	78.1	1.2	13.1
174	11.4	10.1	67.6	67.6	0.8	1.9
175	7.8	6.8	82.5	82.5	0.7	17.8

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
176	9.9	9.0	70.5	70.5	1.0	0.5
177	10.5	8.9	56.6	56.6	1.5	0.5
178	10.1	8.5	51.7	51.7	1.9	0.0
179	8.8	7.4	50.8	50.8	0.9	0.0
180	10.3	8.8	53.4	53.4	1.0	0.0
181	10.9	9.2	47.5	47.5	1.1	0.0
182	9.6	8.1	62.2	62.2	1.1	12.6
183	9.7	8.4	73.2	73.2	1.3	27.6
184	9.4	8.2	75.9	75.9	1.4	24.8
185	8.8	7.8	78.4	78.4	1.4	30.8
186	8.7	7.8	77.3	77.3	1.1	0.9
187	10.2	8.6	52.6	52.6	1.5	0.5
188	9.5	7.9	50.3	50.3	1.1	0.0
189	9.8	8.3	62.9	62.9	1.2	11.7
190	8.7	7.5	78.0	78.0	1.4	40.6
191	8.6	7.4	75.5	75.5	1.6	43.0
192	8.1	7.0	79.6	79.6	1.2	16.8
193	11.1	9.9	61.4	61.4	1.1	0.5
194	10.7	9.2	59.1	59.1	1.2	0.9
195	10.3	8.9	71.9	71.9	1.2	7.9
196	10.8	9.6	70.3	70.3	1.2	5.1
197	9.6	8.1	71.0	71.0	1.0	0.5
198	8.7	7.7	75.0	75.0	1.0	1.9
199	10.5	9.2	69.4	69.4	1.6	4.2
200	11.5	10.1	66.4	66.4	1.5	0.5
201	11.5	10.2	65.1	65.1	2.0	4.2
202	10.7	9.2	68.2	68.2	1.7	1.4
203	12.5	11.0	60.6	60.6	1.4	1.4
204	10.9	9.6	65.3	65.3	1.4	14.0
205	10.2	8.5	69.7	69.7	1.3	3.7
206	9.9	8.5	67.4	67.4	1.7	14.0
207	10.2	8.9	73.6	73.6	2.0	7.5
208	10.3	9.2	73.7	73.7	1.2	11.7
209	11.0	9.6	62.5	62.5	2.1	0.9
210	10.3	8.8	64.9	64.9	1.7	0.0
211	10.6	9.2	69.6	69.6	1.6	2.8
212	9.6	8.0	70.3	70.3	1.9	0.9
213	10.0	8.2	65.8	65.8	2.4	0.5
214	9.9	8.0	63.8	63.8	2.4	0.0
215	9.2	7.6	65.0	65.0	1.4	6.5
216	9.9	8.3	68.4	68.4	1.7	1.4
217	10.1	8.6	69.7	69.7	1.6	11.2
218	11.3	10.1	69.4	69.4	1.7	8.4
219	10.7	9.2	70.3	70.3	2.0	3.2
220	10.4	9.2	68.5	68.5	1.7	0.5
221	11.0	9.2	66.5	66.5	1.5	11.7

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
222	10.9	9.2	66.8	66.8	1.8	0.5
223	10.1	8.6	68.8	68.8	1.7	1.4
224	9.6	8.5	71.8	71.8	1.5	0.9
225	10.5	9.0	69.8	69.8	1.8	12.1
226	9.2	8.1	77.7	77.7	1.9	26.6
227	8.3	6.9	78.0	78.0	1.7	2.8
228	8.8	7.4	73.6	73.6	1.7	18.2
229	9.3	8.2	77.5	77.5	1.9	20.1
230	9.8	8.6	75.0	75.0	1.6	12.6
231	8.6	7.6	79.1	79.1	1.9	20.6
232	9.5	8.5	74.4	74.4	1.4	0.0
233	10.0	8.8	68.8	68.8	1.1	0.0
234	10.9	9.3	67.3	67.3	2.0	8.4
235	9.4	8.1	73.9	73.9	1.6	1.4
236	11.6	10.2	67.3	67.3	1.6	1.4
237	10.6	9.2	71.3	71.3	1.4	12.6
238	10.4	9.2	70.6	70.6	1.7	2.8
239	9.8	8.9	71.5	71.5	2.1	0.9
240	11.3	9.9	58.5	58.5	2.7	0.0
241	8.8	7.0	50.5	50.5	2.1	0.0
242	8.5	6.8	54.8	54.8	2.2	0.0
243	9.2	7.5	56.9	56.9	0.9	0.0
244	8.9	7.6	75.2	75.2	1.3	9.3
245	9.3	8.3	73.8	73.8	1.0	5.1
246	10.6	9.0	67.2	67.2	1.4	2.8
247	9.9	8.7	73.0	73.0	1.3	7.5
248	10.0	8.6	69.0	69.0	1.1	0.5
249	11.2	9.6	62.6	62.6	1.5	0.0
250	10.5	9.0	67.9	67.9	1.5	6.1
251	9.8	8.5	73.7	73.7	1.7	4.2
252	9.7	8.6	69.7	69.7	1.4	0.5
253	8.7	7.3	72.0	72.0	2.0	1.9
254	9.4	8.0	65.3	65.3	1.3	0.0
255	9.3	7.5	61.0	61.0	1.2	0.0
256	10.3	8.8	65.0	65.0	1.2	0.0
257	11.8	10.4	63.8	63.8	1.2	2.8
258	10.8	9.4	63.4	63.4	2.0	0.0
259	9.7	8.1	67.0	67.0	2.2	0.5
260	9.5	7.9	66.9	66.9	1.9	17.3
261	8.7	7.6	70.5	70.5	1.7	0.5
262	9.4	8.2	68.8	68.8	1.9	1.4
263	8.9	7.6	70.3	70.3	2.0	0.9
264	8.6	7.0	71.0	71.0	1.1	0.0
265	7.2	5.7	67.1	67.1	1.2	0.5
266	8.9	7.2	59.5	59.5	1.9	0.0
267	8.4	6.8	63.0	63.0	1.5	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
268	8.8	7.3	68.3	68.3	1.8	4.2
269	8.3	6.7	56.8	56.8	1.5	0.0
270	6.7	4.7	50.2	50.2	1.4	0.0
271	7.8	6.0	52.9	52.9	1.8	0.0
272	8.8	7.3	62.4	62.4	2.3	0.0
273	10.0	8.7	64.4	64.4	2.1	0.5
274	8.6	6.8	51.9	51.9	1.6	0.0
275	8.0	6.1	50.8	50.8	1.5	0.0
276	8.9	7.4	53.9	53.9	1.5	0.0
277	9.0	7.3	62.2	62.2	2.0	0.5
278	9.5	7.9	53.5	53.5	1.4	0.0
279	8.1	6.0	43.5	43.5	1.6	0.0
280	7.3	5.2	42.2	42.2	1.3	0.0
281	6.8	4.9	53.9	53.9	1.6	0.0
282	8.1	6.1	49.3	49.3	1.7	0.0
283	6.7	4.9	49.2	49.2	1.8	0.0
284	7.4	6.0	62.8	62.8	2.0	0.5
285	6.5	5.3	73.6	73.6	1.6	0.9
286	7.9	6.4	65.6	65.6	2.6	1.9
287	6.1	4.5	65.5	65.5	1.8	0.0
288	6.5	4.9	63.8	63.8	1.7	0.0
289	8.7	6.6	46.5	46.5	1.3	0.0
290	6.6	4.7	46.5	46.5	1.3	0.0
291	6.1	4.4	56.7	56.7	1.3	0.0
292	7.6	6.0	55.5	55.5	1.8	0.0
293	7.2	5.3	65.7	65.7	2.0	3.7
294	7.6	5.9	64.4	64.4	1.8	0.0
295	5.6	4.2	73.2	73.2	3.3	14.0
296	6.5	5.4	75.2	75.2	2.5	5.1
297	5.1	3.2	55.4	55.4	2.0	0.5
298	3.3	1.2	47.3	47.3	1.4	0.0
299	4.8	2.7	45.6	45.6	1.5	0.0
300	5.8	3.8	46.3	46.3	1.5	0.0
301	7.4	5.4	48.7	48.7	1.4	0.0
302	6.7	4.5	45.4	45.4	2.0	0.0
303	6.5	4.4	51.5	51.5	2.4	0.0
304	6.3	4.2	47.2	47.2	2.0	0.0
305	6.9	4.9	44.8	44.8	1.3	0.0
306	7.1	5.1	41.7	41.7	1.5	0.0
307	6.9	4.7	35.3	35.3	1.5	0.0
308	6.1	3.9	31.0	31.0	1.7	0.0
309	6.7	4.5	36.3	36.3	1.6	0.0
310	7.3	5.2	34.8	34.8	1.7	0.0
311	7.1	4.7	29.9	29.9	2.6	0.0
312	5.7	3.4	31.9	31.9	2.3	0.0
313	5.8	3.7	41.6	41.6	2.1	0.0

Día	Temperatura (C°)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
314	6.3	4.5	57.2	57.2	1.7	0.0
315	6.9	5.0	52.6	52.6	1.9	0.0
316	6.2	4.1	43.1	43.1	1.8	0.0
317	5.8	3.7	37.9	37.9	1.5	0.0
318	5.8	3.9	39.4	39.4	1.2	0.0
319	6.3	4.2	42.7	42.7	1.4	0.0
320	6.8	4.9	53.6	53.6	1.7	0.0
321	6.8	4.9	53.0	53.0	1.6	0.0
322	7.4	5.3	46.8	46.8	1.6	0.0
323	4.8	2.8	40.5	40.5	2.0	0.0
324	4.6	2.6	43.5	43.5	2.2	0.0
325	7.6	5.8	45.6	45.6	2.6	0.0
326	6.7	4.8	50.8	50.8	1.9	0.0
327	6.6	4.7	48.2	48.2	1.8	0.0
328	6.5	4.5	45.0	45.0	1.9	0.0
329	6.5	4.6	48.8	48.8	2.3	0.0
330	7.2	5.2	43.6	43.6	1.8	0.0
331	5.9	3.8	43.1	43.1	2.0	0.0
332	5.5	3.6	51.8	51.8	1.9	0.0
333	7.2	5.3	46.6	46.6	1.8	0.0
334	8.2	6.1	33.0	33.0	1.7	0.0
335	7.5	5.4	38.6	38.6	1.8	0.0
336	6.8	5.0	45.1	45.1	1.9	0.0
337	6.3	4.4	50.9	50.9	2.3	0.0
338	6.3	4.6	51.5	51.5	2.8	0.0
339	6.1	3.9	41.0	41.0	2.6	0.0
340	5.0	2.6	33.5	33.5	2.0	0.0
341	5.8	3.9	41.1	41.1	1.6	0.0
342	7.1	5.0	45.2	45.2	2.0	0.0
343	6.8	5.0	53.6	53.6	2.0	0.0
344	6.7	5.0	52.7	52.7	1.9	0.0
345	6.7	4.7	52.2	52.2	1.9	0.0
346	6.3	4.3	46.8	46.8	1.4	0.0
347	6.2	4.0	40.0	40.0	1.4	0.0
348	5.4	3.3	33.3	33.3	1.4	0.0
349	6.5	4.4	41.3	41.3	2.1	0.0
350	5.9	3.8	57.0	57.0	2.5	0.0
351	4.6	2.7	59.4	59.4	2.3	0.0
352	6.3	4.7	54.1	54.1	2.1	0.0
353	6.5	4.8	51.2	51.2	1.9	0.0
354	5.4	4.1	78.7	78.7	1.7	14.9
355	4.2	2.5	71.5	71.5	1.8	0.5
356	4.3	2.5	50.7	50.7	2.1	0.0
357	5.3	3.0	36.3	36.3	2.7	0.0
358	3.6	1.5	41.5	41.5	2.4	0.0
359	3.7	1.5	65.2	65.2	2.4	1.9

<b>Día</b>	<b>Temperatura (C°)</b>		<b>Humedad Relativa (%)</b>		<b>Velocidad del Viento (m/s)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>
	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>		
360	4.2	2.3	50.8	50.8	2.5	0.5
361	6.0	3.8	33.2	33.2	2.3	0.0
362	4.5	2.7	44.4	44.4	1.7	0.0
363	6.8	5.4	66.5	66.5	2.5	2.8
364	7.1	5.6	58.1	58.1	1.4	0.5
365	5.7	3.7	51.0	51.0	1.7	0.0

**Tabla Anx 2 -3: Registros de Precipitación (1992 - 2019)-Estación Regional**

<b>Estación Yauri</b>	<b>Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)</b>		<b>Altitud: 3927 msnm</b>
	<b>Este: 239 903</b>	<b>Norte: 8 360 548</b>	

<b>Año</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Anual</b>
1992 - 1993	45.3	0.0	59.8	75.6	37.8	269.3	107.2	133.6	106.5	15.5	0.0	0.8	851.4
1993 - 1994	15.0	7.7	93.7	173.7	154.7	208.0	220.0	191.9	57.4	16.7	0.0	0.0	1138.8
1994 - 1995	0.0	22.2	13.1	66.4	100.6	155.6	151.4	208.1	77.5	8.2	0.0	0.0	803.1
1995 - 1996	2.8	10.8	53.8	37.6	128.2	160.4	187.8	109.2	96.9	16.9	0.0	0.0	804.4
1996 - 1997	20.3	13.6	29.2	51.1	106.8	246.5	203.7	121.6	67.5	3.2	0.0	0.0	863.5
1997 - 1998	26.2	38.4	14.6	91.7	122.6	216.8	150.7	82.1	21.5	0.0	2.5	0.0	767.1
1998 - 1999	3.6	0.8	48.3	47.0	48.0	141.6	225.0	155.7	133.2	3.6	0.0	0.0	806.8
1999 - 2000	0.8	47.8	52.9	45.3	151.2	164.8	194.6	161.6	41.3	4.2	5.6	0.0	870.1
2000 - 2001	12.7	6.2	78.5	25.5	169.1	265.9	230.1	255.4	99.5	32.0	0.9	4.3	1180.1
2001 - 2002	4.8	4.2	30.7	27.3	64.9	113.4	290.2	147.3	73.0	24.7	0.5	16.7	797.7
2002 - 2003	0.0	40.5	56.0	56.5	142.3	169.3	228.1	193.5	40.9	5.7	0.8	0.0	933.6
2003 - 2004	5.5	34.8	10.8	73.7	129.2	214.5	167.7	84.5	48.4	0.0	1.8	10.7	781.6
2004 - 2005	17.7	25.0	20.0	63.0	103.7	116.0	176.5	121.6	44.7	1.1	1.8	0.0	691.1
2005 - 2006	4.8	5.6	55.9	41.9	159.9	285.7	131.5	175.4	46.0	0.8	6.0	0.0	913.5
2006 2007	9.7	18.6	59.1	63.2	110.6	142.3	133.9	103.0	61.7	6.6	0.0	3.4	712.1
2007 2008	0.0	16.3	36.3	43.5	117.7	197.9	104.3	75.7	1.2	4.9	5.8	0.0	603.6
2008 - 2009	0.0	0.2	43.4	24.8	92.4	112.9	164.2	102.6	44.5	5.5	0.0	1.4	591.9
2009 2010	0.0	2.0	43.8	172.6	133.9	170.2	163.3	119.7	32.0	10.2	0.0	0.0	847.7
2010 - 2011	0.0	1.7	16.2	36.0	176.7	123.6	251.6	137.8	74.7	10.0	0.0	1.9	830.2
2011 - 2012	10.6	36.1	16.9	75.1	137.6	171.5	266.8	191.4	78.1	11.4	0.0	0.1	995.6
2012 - 2013	0.0	11.3	33.4	76.5	211.6	169.0	164.8	82.3	8.6	2.7	14.4	3.4	778.0
2013 - 2014	20.1	0.0	29.4	53.0	156.1	142.8	122.3	89.9	23.6	9.1	0.0	5.5	651.8
2014 - 2015	3.5	41.4	99.7	18.2	192.9	183.0	112.7	118.4	131.6	13.9	0.5	1.5	917.3
2015 - 2016	17.3	20.6	30.1	26.4	142.6	112.1	167.9	64.9	112.0	1.7	0.1	9.2	704.9

Estación Yauri				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 3927 msnm			
				Este: 239 903			Norte: 8 360 548						
2016 - 2017	3.2	4.7	43.3	20.5	126.7	168.0	105.6	168.2	68.4	22.6	0.1	3.2	734.6
2017 - 2018	0.0	12.1	57.7	66.3	156.4	143.1	201.0	98.3	19.2	1.1	6.9	16.4	778.5
2018 - 2019	30.1	2.3	103.3	48.1	85.5	226.6	207.0	150.5	76.5	12.5	1.8	3.0	947.3
<b>Promedio</b>	<b>9.4</b>	<b>15.7</b>	<b>45.6</b>	<b>59.3</b>	<b>128.1</b>	<b>177.4</b>	<b>178.9</b>	<b>135.0</b>	<b>62.5</b>	<b>9.1</b>	<b>1.8</b>	<b>3.0</b>	<b>825.8</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>10.8</b>	<b>18.2</b>	<b>37.8</b>	<b>112.1</b>	<b>104.3</b>	<b>64.9</b>	<b>1.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>591.9</b>
<b>Máximo</b>	<b>45.3</b>	<b>47.8</b>	<b>103.3</b>	<b>173.7</b>	<b>211.6</b>	<b>285.7</b>	<b>290.2</b>	<b>255.4</b>	<b>133.2</b>	<b>32.0</b>	<b>14.4</b>	<b>16.7</b>	<b>1180.1</b>

**Tabla Anx 2 -4: Registros de Precipitación (2013-2014) - Estación Local**

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm			
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435						
<b>Día</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	
1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	20.2	0.3	6.1	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.9	0.6	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	28.6	0.0	14.4	0.3	4.3	1.8	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	12.6	9.2	0.0	0.9	4.9	0.3	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.6	0.0	6.1	5.8	7.7	7.4	0.3	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.6	2.5	16.9	6.1	26.7	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	4.6	28.3	2.1	4.0	0.0	0.0	0.0	
8	2.4	0.0	0.0	0.0	10.1	12.9	11.1	0.3	2.8	0.0	0.0	0.0	
9	1.7	0.0	3.4	1.5	9.8	3.1	0.3	7.7	0.3	0.0	0.0	0.0	
10	0.0	0.0	0.0	1.5	20.6	6.7	0.6	0.3	1.2	0.0	0.0	0.0	

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					
11	0.0	0.0	0.0	1.5	8.3	0.0	5.2	0.9	0.0	0.3	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	1.5	33.2	3.7	3.4	0.6	0.0	0.6	0.0	0.0
13	0.0	0.0	9.5	2.2	0.6	1.5	0.3	8.0	0.0	1.2	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.6	3.2	18.4	1.5	1.2	17.5	1.8	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.6	1.7	17.8	15.7	2.8	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	1.7	0.6	16.6	0.3	12.0	0.3	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	12.9	2.8	13.2	11.4	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	2.4	0.9	8.3	0.3	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	20.3	0.9	13.5	0.9	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.3	0.0	1.5	8.3	8.6	9.2	0.0	0.6	2.4	0.0	9.8
21	0.0	4.3	0.0	20.0	22.1	1.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
22	0.0	0.3	0.0	1.9	17.2	11.7	9.2	5.5	0.3	9.2	0.0	0.0
23	0.3	0.0	2.1	1.5	0.6	0.3	4.9	0.9	0.0	3.4	0.0	0.0
24	3.1	0.0	4.3	1.5	3.4	0.3	7.7	0.9	0.0	0.3	0.0	0.0
25	1.8	0.0	0.3	0.0	10.4	0.0	0.6	8.3	2.8	0.0	0.0	1.2
26	0.0	0.0	27.3	0.0	45.4	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.3
27	2.8	0.0	8.9	0.0	4.6	0.0	1.8	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
28	22.4	0.0	3.4	0.0	4.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.3	0.0	0.0	0.0	7.7	8.3		0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
30	0.0	0.0	0.0	0.6	3.1	18.1		0.0	0.3	0.0	0.0	0.3
31	0.0		0.0		2.2	16.3		0.0		0.0		0.0
<b>Total</b>	<b>36.3</b>	<b>4.9</b>	<b>61.7</b>	<b>77.7</b>	<b>290.0</b>	<b>203.5</b>	<b>150.0</b>	<b>122.7</b>	<b>43.5</b>	<b>17.8</b>	<b>0.0</b>	<b>13.8</b>

**Tabla Anx 2 -5: Registros de Temperatura Máxima (2013-2014) - Estación Local**

<b>Estación Meteorológica Local</b>	<b>Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)</b>		<b>Altitud: 4 018 msnm</b>
	<b>Este: 243 259</b>	<b>Norte: 8 345 435</b>	

<b>Día</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>
1	13.0	3.3	9.7	12.1	12.3	8.8	8.8	10.0	8.9	8.6	6.9	7.5
2	7.8	5.4	9.1	12.1	10.9	11.5	8.7	9.9	9.3	8.0	7.1	6.8
3	8.3	6.0	10.0	10.9	11.6	11.1	10.2	9.2	10.6	8.9	6.9	6.3
4	7.9	7.1	10.2	11.0	9.0	9.5	9.5	9.9	9.9	9.0	6.1	6.3
5	4.6	12.5	10.8	12.0	9.9	9.3	9.8	10.1	10.0	9.5	6.7	6.1
6	10.3	9.2	10.6	11.1	9.1	9.9	8.7	11.3	11.2	8.1	7.3	5.0
7	7.5	8.2	10.4	14.6	10.0	9.4	8.6	10.7	10.5	7.3	7.1	5.8
8	6.9	8.2	9.0	14.9	9.8	9.5	8.1	10.4	9.8	6.8	5.7	7.1
9	7.2	8.6	9.6	14.4	8.3	10.6	11.1	11.0	9.7	8.1	5.8	6.8
10	6.6	9.3	8.8	11.5	9.4	10.2	10.7	10.9	8.7	6.7	6.3	6.7
11	9.4	8.9	11.2	12.4	9.0	12.6	10.3	10.1	9.4	7.4	6.9	6.7
12	5.7	9.3	10.2	11.7	8.7	9.8	10.8	9.6	9.3	6.5	6.2	6.3
13	6.6	9.4	7.9	10.9	10.1	10.4	9.6	10.5	10.3	7.9	5.8	6.2
14	7.4	9.2	8.0	10.6	9.7	11.3	8.7	9.2	11.8	6.1	5.8	5.4
15	7.7	9.4	9.1	11.0	8.7	10.5	10.5	8.3	10.8	6.5	6.3	6.5
16	8.4	9.6	12.8	12.5	10.5	7.8	11.5	8.8	9.7	8.7	6.8	5.9
17	9.2	6.3	13.8	12.6	9.9	8.7	11.5	9.3	9.5	6.6	6.8	4.6
18	8.9	9.5	14.5	12.0	10.9	9.6	10.7	9.8	8.7	6.1	7.4	6.3
19	8.9	14.0	14.0	12.5	11.3	9.2	12.5	8.6	9.4	7.6	4.8	6.5
20	8.0	9.4	14.4	11.3	10.0	9.5	10.9	9.5	8.9	7.2	4.6	5.4
21	8.7	9.9	13.9	9.6	9.3	11.4	10.2	10.0	8.6	7.6	7.6	4.2
22	8.6	9.7	12.8	8.8	9.8	7.8	9.9	10.9	7.2	5.6	6.7	4.3
23	7.5	10.1	12.4	10.1	10.0	9.9	10.2	9.4	8.9	6.5	6.6	5.3
24	6.5	10.1	9.3	16.1	10.4	10.5	10.3	11.6	8.4	5.1	6.5	3.6

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					
25	7.1	9.1	10.9	12.2	8.4	10.1	11.0	10.6	8.8	3.3	6.5	3.7
26	4.6	11.3	10.6	11.8	9.9	8.8	10.3	10.4	8.3	4.8	7.2	4.2
27	5.3	9.2	10.1	11.3	8.8	10.3	10.6	9.8	6.7	5.8	5.9	6.0
28	3.1	9.5	9.1	11.3	9.4	10.9	9.6	11.3	7.8	7.4	5.5	4.5
29	5.5	8.7	12.2	11.7	11.4	9.6		8.8	8.8	6.7	7.2	6.8
30	6.5	9.1	13.2	10.3	10.4	9.7		8.5	10.0	6.5	8.2	7.1
31	7.5		13.8		9.9	9.4		9.2		6.3		5.7
<b>Promedio</b>	<b>7.5</b>	<b>9.0</b>	<b>11.1</b>	<b>11.8</b>	<b>9.9</b>	<b>9.9</b>	<b>10.1</b>	<b>9.9</b>	<b>9.3</b>	<b>7.0</b>	<b>6.5</b>	<b>5.8</b>

**Tabla Anx 2 -6: Registros de Temperatura Mínima (2013-2014) - Estación Local**

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					

Día	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
1	11.2	2.2	7.6	10.1	10.8	7.9	7.8	8.2	7.6	6.8	4.9	5.4
2	6.0	3.2	7.2	10.0	9.2	10.0	7.8	8.0	8.3	6.1	5.1	5.0
3	6.4	3.5	8.1	9.3	10.4	9.6	8.6	7.6	9.0	7.4	4.7	4.4
4	5.8	4.9	8.5	9.6	7.6	8.6	7.9	8.3	8.7	7.3	3.9	4.6
5	2.9	10.7	9.5	10.1	8.4	8.5	8.3	8.6	8.6	7.9	4.5	3.9
6	8.6	7.1	8.9	9.8	7.5	8.7	7.5	10.1	9.6	6.0	5.2	2.6
7	5.9	6.6	8.6	13.0	8.8	8.5	7.4	9.2	9.0	5.2	4.7	3.9
8	5.0	6.3	7.1	13.2	8.5	8.4	7.0	9.2	8.5	4.9	3.4	5.0

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					
9	5.5	6.4	7.7	12.2	7.3	9.4	9.9	9.2	8.6	6.1	3.7	5.0
10	4.8	7.4	7.4	9.8	8.3	8.7	9.2	9.2	7.3	4.9	4.5	5.0
11	6.7	6.8	9.2	10.7	8.0	11.5	8.9	8.6	8.0	6.0	5.0	4.7
12	3.3	7.3	8.1	9.8	7.5	8.1	9.6	8.5	7.5	5.3	4.1	4.3
13	4.2	7.3	6.5	9.3	8.8	9.3	8.1	9.0	8.8	6.4	3.7	4.0
14	5.3	7.1	7.1	9.1	8.5	10.0	7.7	8.1	10.4	4.5	3.9	3.3
15	5.5	7.1	7.9	9.2	7.6	9.3	9.2	6.9	9.4	4.9	4.2	4.4
16	5.9	7.5	11.1	10.4	9.2	6.9	10.1	7.4	8.1	6.6	4.9	3.8
17	7.2	4.8	11.8	11.0	8.5	7.7	10.2	8.2	7.9	4.7	4.9	2.7
18	6.7	7.6	12.4	10.0	9.3	8.7	9.2	8.6	7.6	4.4	5.3	4.7
19	6.6	12.5	12.0	10.8	9.6	7.9	11.0	7.6	8.2	6.0	2.8	4.8
20	5.8	7.7	12.0	9.4	8.5	8.6	9.6	8.5	7.6	5.3	2.6	4.1
21	6.5	7.8	11.8	7.5	8.1	10.1	8.5	8.8	7.0	5.9	5.8	2.5
22	6.5	7.7	11.1	7.7	8.5	6.8	8.5	9.3	5.7	4.2	4.8	2.5
23	6.1	8.2	10.5	8.4	8.8	9.0	8.9	8.1	7.2	5.4	4.7	3.0
24	5.8	8.3	8.0	14.8	8.9	8.9	9.2	10.2	6.8	3.2	4.5	1.5
25	5.5	7.5	9.8	10.3	7.4	8.5	9.6	9.2	7.3	1.2	4.6	1.5
26	2.6	9.3	9.0	9.8	8.5	7.4	8.8	9.2	6.7	2.7	5.2	2.3
27	3.5	7.2	8.4	9.2	7.7	8.8	9.2	8.9	4.7	3.8	3.8	3.8
28	2.4	7.5	7.8	9.3	8.5	9.2	8.0	9.9	6.0	5.4	3.6	2.7
29	4.5	6.7	10.6	9.9	10.2	8.1		7.0	7.3	4.5	5.3	5.4
30	4.9	7.3	11.4	8.7	9.2	8.4		6.8	8.7	4.4	6.1	5.6
31	5.8		12.0		8.7	8.2		7.5		4.2		3.7
<b>Promedio</b>	<b>5.6</b>	<b>7.0</b>	<b>9.3</b>	<b>10.1</b>	<b>8.6</b>	<b>8.7</b>	<b>8.8</b>	<b>8.5</b>	<b>7.9</b>	<b>5.2</b>	<b>4.5</b>	<b>3.9</b>

**Tabla Anx 2 -7: Registros de Humedad Relativa (2013-2014) - Estación Local**

<b>Estación Meteorológica Local</b>	<b>Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)</b>		<b>Altitud: 4 018 msnm</b>
	<b>Este: 243 259</b>	<b>Norte: 8 345 435</b>	

<b>Día</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>
1	33.8	65.5	30.9	21.8	51.2	70.1	78.4	65.8	75.2	51.9	44.8	38.6
2	47.7	31.0	33.5	38.2	54.4	58.4	77.3	63.8	73.8	50.8	41.7	45.1
3	40.7	31.0	32.8	64.9	50.8	61.6	52.6	65.0	67.2	53.9	35.3	50.9
4	41.7	33.0	41.3	64.8	72.6	78.5	50.3	68.4	73.0	62.2	31.0	51.5
5	62.5	18.3	45.7	52.9	70.8	80.0	62.9	69.7	69.0	53.5	36.3	41.0
6	49.0	29.8	48.4	61.9	72.8	78.9	78.0	69.4	62.6	43.5	34.8	33.5
7	57.0	47.9	42.8	38.2	72.0	76.2	75.5	70.3	67.9	42.2	29.9	41.1
8	59.0	45.3	47.7	30.4	74.0	75.8	79.6	68.5	73.7	53.9	31.9	45.2
9	62.0	33.2	54.1	29.6	81.5	71.6	61.4	66.5	69.7	49.3	41.6	53.6
10	33.0	37.3	63.8	44.4	75.5	74.9	59.1	66.8	72.0	49.2	57.2	52.7
11	25.0	45.9	38.8	43.3	77.1	61.0	71.9	68.8	65.3	62.8	52.6	52.2
12	21.6	41.2	29.5	48.8	79.0	65.5	70.3	71.8	61.0	73.6	43.1	46.8
13	26.2	35.8	64.5	63.0	67.8	69.3	71.0	69.8	65.0	65.6	37.9	40.0
14	35.5	30.1	62.1	70.8	73.6	64.7	75.0	77.7	63.8	65.5	39.4	33.3
15	25.3	23.9	62.8	67.1	75.8	69.3	69.4	78.0	63.4	63.8	42.7	41.3
16	27.9	26.0	41.3	59.8	64.0	80.7	66.4	73.6	67.0	46.5	53.6	57.0
17	32.9	32.5	29.5	57.0	51.8	75.2	65.1	77.5	66.9	46.5	53.0	59.4
18	31.2	28.0	24.1	53.7	47.4	73.7	68.2	75.0	70.5	56.7	46.8	54.1
19	30.1	42.2	26.5	44.0	49.0	75.5	60.6	79.1	68.8	55.5	40.5	51.2
20	27.3	55.6	19.6	45.5	64.2	78.1	65.3	74.4	70.3	65.7	43.5	78.7
21	26.5	59.5	25.1	82.2	74.9	67.6	69.7	68.8	71.0	64.4	45.6	71.5
22	29.0	47.8	44.6	77.0	71.5	82.5	67.4	67.3	67.1	73.2	50.8	50.7
23	45.6	46.0	53.2	56.4	72.3	70.5	73.6	73.9	59.5	75.2	48.2	36.3
24	70.8	57.2	73.5	31.2	68.8	56.6	73.7	67.3	63.0	55.4	45.0	41.5

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					
25	41.3	61.2	64.5	37.0	79.2	51.7	62.5	71.3	68.3	47.3	48.8	65.2
26	30.7	41.2	64.7	38.2	70.2	50.8	64.9	70.6	56.8	45.6	43.6	50.8
27	47.5	40.8	71.1	47.8	80.1	53.4	69.6	71.5	50.2	46.3	43.1	33.2
28	81.9	42.8	75.5	49.9	77.0	47.5	70.3	58.5	52.9	48.7	51.8	44.4
29	67.7	45.2	44.2	47.1	69.1	62.2		50.5	62.4	45.4	46.6	66.5
30	60.2	30.9	34.9	56.4	73.4	73.2		54.8	64.4	51.5	33.0	58.1
31	51.7		32.3		74.3	75.9		56.9		47.2		51.0
<b>Promedio</b>	<b>42.7</b>	<b>40.2</b>	<b>45.9</b>	<b>50.8</b>	<b>68.9</b>	<b>68.7</b>	<b>68.2</b>	<b>68.8</b>	<b>66.1</b>	<b>55.3</b>	<b>43.1</b>	<b>49.6</b>

**Tabla Anx 2 -8: Registros de Velocidad del Viento (2013-2014) - Estación Local**

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					

Día	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
1	1.7	0.1	2.2	1.8	1.4	0.6	1.4	2.4	1.3	1.6	1.3	1.8
2	1.4	1.5	2.1	1.6	1.7	0.9	1.1	2.4	1.0	1.5	1.5	1.9
3	1.2	1.3	1.4	1.5	2.0	1.0	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	2.3
4	1.1	1.6	1.5	1.2	0.9	1.0	1.1	1.7	1.3	2.0	1.7	2.8
5	0.7	2.1	1.7	1.5	1.5	1.1	1.2	1.6	1.1	1.4	1.6	2.6
6	1.8	1.3	1.6	1.2	1.1	1.0	1.4	1.7	1.5	1.6	1.7	2.0
7	2.0	1.3	1.5	1.2	1.1	1.3	1.6	2.0	1.5	1.3	2.6	1.6
8	1.7	1.3	1.5	1.7	1.7	1.0	1.2	1.7	1.7	1.6	2.3	2.0

Estación Meteorológica Local				Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, WGS84)						Altitud: 4 018 msnm		
				Este: 243 259			Norte: 8 345 435					
9	1.8	1.1	1.5	1.0	1.7	1.2	1.1	1.5	1.4	1.7	2.1	2.0
10	1.1	1.2	1.4	1.6	1.2	1.1	1.2	1.8	2.0	1.8	1.7	1.9
11	0.9	1.7	1.2	1.6	1.0	0.8	1.2	1.7	1.3	2.0	1.9	1.9
12	0.9	1.6	1.6	1.8	0.7	1.3	1.2	1.5	1.2	1.6	1.8	1.4
13	0.9	1.5	1.1	2.5	1.1	0.9	1.0	1.8	1.2	2.6	1.5	1.4
14	1.1	1.7	1.1	1.5	1.4	1.0	1.0	1.9	1.2	1.8	1.2	1.4
15	1.0	1.5	1.0	2.7	1.2	1.2	1.6	1.7	2.0	1.7	1.4	2.1
16	1.0	1.5	1.3	1.7	1.1	0.9	1.5	1.7	2.2	1.3	1.7	2.5
17	1.1	0.5	1.2	1.2	1.7	1.6	2.0	1.9	1.9	1.3	1.6	2.3
18	1.1	1.9	1.6	1.9	1.1	1.1	1.7	1.6	1.7	1.3	1.6	2.1
19	0.9	2.9	1.2	2.0	0.9	1.2	1.4	1.9	1.9	1.8	2.0	1.9
20	1.1	1.8	1.5	1.7	1.3	1.2	1.4	1.4	2.0	2.0	2.2	1.7
21	1.3	1.4	1.5	1.7	1.4	0.8	1.3	1.1	1.1	1.8	2.6	1.8
22	1.3	0.9	1.4	1.7	1.2	0.7	1.7	2.0	1.2	3.3	1.9	2.1
23	2.0	1.5	1.1	1.1	0.7	1.0	2.0	1.6	1.9	2.5	1.8	2.7
24	1.7	1.7	0.7	1.8	1.1	1.5	1.2	1.6	1.5	2.0	1.9	2.4
25	1.6	1.6	1.3	1.3	1.4	1.9	2.1	1.4	1.8	1.4	2.3	2.4
26	0.8	1.7	1.1	1.4	1.2	0.9	1.7	1.7	1.5	1.5	1.8	2.5
27	1.3	1.5	0.8	1.8	1.3	1.0	1.6	2.1	1.4	1.5	2.0	2.3
28	0.6	1.6	1.1	1.7	1.1	1.1	1.9	2.7	1.8	1.4	1.9	1.7
29	1.3	1.5	1.5	1.5	1.4	1.1		2.1	2.3	2.0	1.8	2.5
30	1.5	1.9	1.3	1.9	1.3	1.3		2.2	2.1	2.4	1.7	1.4
31	1.2		1.1		0.8	1.4		0.9		2.0		1.7
<b>Promedio</b>	<b>1.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>1.8</b>	<b>1.6</b>	<b>1.8</b>	<b>1.8</b>	<b>2.0</b>

## ANEXO 3: ENSAYOS GEOQUÍMICOS

Tabla 3: Resultados de Balance Ácido Base (ABA) - Zona Tintaya

Programa Geoquímico	Procedencia	Litología	Código	pH en pasta	S(T)	S-SO <sub>2</sub>	S(S <sup>2-</sup> )	CIT	PA	PN	CO <sub>2</sub> -PN	PNN	RPN	CO <sub>2</sub> -RPN	Potencial DAR			
					%	% S	% S		%	kg CaCO <sub>2</sub> /t	kg CaCO <sub>2</sub> /t	kg CaCO <sub>2</sub> /t			kg CaCO <sub>2</sub> /t	RPN	CO <sub>2</sub> -RPN	
Golder 2014			B20-001	7.5	0.20	0.06	0.16	0.45	5.00	38.00	37.50	33.00	7.60	7.50	No PAG	No PAG		
			B20-002	7.9	0.65	0.11	0.55	0.45	17.19	34.00	37.50	16.81	1.98	2.18	Incierto	No PAG		
			B20-003	7.8	0.12	0.04	0.09	4.16	2.81	331.00	346.69	328.19	117.69	123.27	No PAG	No PAG		
			B20-004	8.0	0.17	0.01	0.16	0.83	5.00	65.00	69.17	60.00	13.00	13.83	No PAG	No PAG		
			B20-005	7.7	0.22	0.09	0.15	1.03	4.69	79.00	85.84	74.31	16.85	18.31	No PAG	No PAG		
			B20-006	7.9	0.43	0.10	0.34	5.54	10.63	372.00	461.70	361.38	35.01	43.45	No PAG	No PAG		
			B20-007	8.0	0.20	0.01	0.19	1.57	5.90	131.00	130.84	125.10	22.20	22.18	No PAG	No PAG		
			Mínimo	8.0	0.12	0.01	0.09	0.45	2.81	34.00	37.50	16.81	1.98	2.18	---	---	---	---
			Máximo	7.5	0.65	0.11	0.55	5.54	17.19	372.00	461.70	361.38	117.69	123.27	---	---	---	---
			Promedio	7.8	0.28	0.06	0.23	2.00	7.32	150.00	167.03	142.68	30.62	32.96	---	---	---	---
Estudios Anteriores UNI 2008	Botadero 20		---	6.5	0.03	---	---	---	0.84	26.25	26.30	25.41	31.19	31.31	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.08	---	---	---	2.55	25.00	25.00	22.45	9.79	9.80	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.19	---	---	---	5.95	86.25	86.30	80.30	14.51	14.50	No PAG	No PAG		
			---	7.9	0.40	---	---	---	12.52	167.50	167.50	154.98	13.37	13.38	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.13	---	---	---	3.96	181.25	181.30	177.29	45.73	45.78	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.09	---	---	---	2.71	207.50	207.50	204.79	76.67	76.57	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.22	---	---	---	7.00	261.25	261.30	254.25	37.33	37.33	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.12	---	---	---	3.63	165.00	165.00	161.37	45.49	45.45	No PAG	No PAG		
			---	8.1	0.05	---	---	---	1.45	126.88	126.90	125.43	87.51	87.52	No PAG	No PAG		
			---	7.9	0.04	---	---	---	1.30	110.00	110.00	108.70	84.39	84.62	No PAG	No PAG		
			---	8.1	0.03	---	---	---	0.83	43.75	43.80	42.92	52.94	52.77	No PAG	No PAG		
			---	8.0	0.06	---	---	---	1.87	170.00	170.00	168.13	91.08	90.91	No PAG	No PAG		
			---	8.1	0.04	---	---	---	1.15	137.50	137.50	136.35	119.88	119.57	No PAG	No PAG		
			---	7.3	0.06	---	---	---	1.74	60.00	60.00	58.26	34.52	34.48	No PAG	No PAG		
			---	7.3	0.26	---	---	---	8.14	95.00	95.00	86.86	11.68	11.67	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.03	---	---	---	0.94	186.88	186.90	185.93	198.05	198.83	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.06	---	---	---	1.90	112.50	112.50	110.60	59.34	59.21	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.02	---	---	---	0.66	32.50	32.50	31.84	49.25	49.24	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.06	---	---	---	1.74	127.50	127.50	125.76	73.07	73.26	No PAG	No PAG		
			---	8.0	0.04	---	---	---	1.39	216.25	216.30	214.86	156.11	155.61	No PAG	No PAG		
			---	7.5	0.18	---	---	---	5.58	236.25	236.30	230.67	42.32	42.35	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.07	---	---	---	2.27	123.75	123.80	121.48	54.48	54.54	No PAG	No PAG		
			---	7.9	0.05	---	---	---	1.45	83.13	83.10	81.68	57.42	57.31	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.06	---	---	---	1.93	101.88	101.90	99.94	52.67	52.80	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.06	---	---	---	1.89	278.75	278.80	276.86	147.60	147.51	No PAG	No PAG		
			---	7.4	0.07	---	---	---	2.05	347.50	347.50	345.45	169.38	169.51	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.02	---	---	---	0.62	75.63	75.60	75.00	121.46	121.94	No PAG	No PAG		
			---	7.8	0.03	---	---	---	0.84	27.50	27.50	26.66	32.75	32.74	No PAG	No PAG		
			---	7.5	0.07	---	---	---	2.32	210.00	210.00	207.68	90.47	90.52	No PAG	No PAG		
			---	7.7	0.03	---	---	---	0.79	55.00	55.00	54.21	69.50	69.62	No PAG	No PAG		
---	Mínimo	8.1	0.02	---	---	0.62	25.00	25.00	22.45	9.79	9.80	---	---	---	---			
---	Máximo	6.5	0.40	---	---	12.52	347.50	347.50	345.45	198.05	198.83	---	---	---	---			
---	Promedio	7.5	0.09	---	---	2.73	135.94	135.95	133.20	71.00	71.02	---	---	---	---			
SRK 2007			---	6.3	1.48	1.38	0.10	---	3.10	0.90	5.00	-2.20	0.29	1.61	PAG	Incierto		
			---	6.9	1.79	1.77	0.02	---	0.60	6.10	8.20	5.50	10.17	13.67	No PAG	No PAG		
			---	6.8	2.21	2.11	0.10	---	3.10	18.90	21.60	15.80	6.10	6.97	No PAG	No PAG		
			---	6.8	2.40	2.38	0.02	---	0.60	17.90	19.80	17.30	29.83	33.00	No PAG	No PAG		
			---	7.1	0.04	0.02	0.02	---	0.60	2.40	0.50	1.80	4.00	0.83	No PAG	PAG		
			---	7.4	0.03	0.01	0.03	---	0.09	2.10	0.50	2.01	23.33	5.56	No PAG	No PAG		
			---	Mínimo	7.4	0.03	0.01	0.02	---	0.09	0.90	0.50	-2.20	0.29	0.83	---	---	
			---	Máximo	6.3	2.40	2.38	0.10	---	3.10	18.90	21.60	17.30	29.83	33.00	---	---	
---	Promedio	6.9	1.33	1.28	0.05	---	1.35	8.05	9.27	6.70	12.29	10.27	---	---				
Golder 2016	Botadero 23 SG-B23-01		GQ-B2301-01	8.2	0.16	0.03	0.04	3.64	4.06	92.84	82.78	87.68	22.85	20.38	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-02	8.0	0.09	0.02	0.01	9.81	2.19	214.20	223.10	211.30	97.92	101.99	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-03	8.0	0.10	0.02	0.02	1.18	2.50	37.16	26.84	33.94	14.86	10.73	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-04	7.9	0.54	0.05	0.23	1.91	15.31	53.83	43.44	36.42	3.52	2.84	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-05	8.0	0.60	0.08	0.12	5.73	16.25	128.10	130.31	108.80	7.88	8.02	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-06	7.9	0.15	0.04	<0.01	1.03	3.44	31.16	23.42	26.32	9.06	6.81	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-07	7.8	0.12	0.05	0.01	19.12	2.19	427.60	434.84	423.70	195.47	198.78	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-08	7.9	0.47	0.16	0.02	8.22	9.69	176.53	186.94	161.40	18.22	19.30	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-09	8.0	0.44	0.08	0.07	3.12	11.25	78.40	70.96	64.21	6.97	6.31	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-10	8.1	0.17	0.03	0.01	10.44	4.38	223.30	237.43	217.80	51.04	54.27	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-11	7.9	0.52	0.21	0.03	2.21	9.69	58.25	50.26	41.48	6.01	5.19	No PAG	No PAG		
			GQ-B2301-12	8.3	0.25	0.06	0.07	8.16	5.94	169.50	185.58	161.40	28.55	31.26	No PAG	No PAG		
			---	Mínimo	8.3	0.09	0.02	<0.01	1.03	2.19	31.16	23.42	26.32	3.52	2.84	---	---	
			---	Máximo	7.8	0.60	0.21	0.23	19.12	16.25	427.60	434.84	423.70	195.47	198.78	---	---	
---	Promedio	8.0	0.30	0.07	0.06	6.21	7.24	140.91	141.33	131.20	38.53	38.82	---	---				

Programa Geoquímico	Procedencia	Litología	Código	pH en pasta	S(T)	S-SO <sub>2</sub>	S(S <sup>2-</sup> )	CIT	PA	PN	CO <sub>3</sub> -PN	PNN	RPN	CO <sub>3</sub> -RPN	Potencial DAR		
					%	% S	% S	%	kg CaCO <sub>3</sub> /t			RPN	CO <sub>3</sub> -RPN				
Golder 2016	Botadero 23 SG-B23-03	---	GQ-B2303-01	7.8	0.29	0.09	<0.01	2.95	6.25	73.57	67.09	64.20	11.77	10.73	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-02	7.9	0.40	0.06	0.07	4.18	10.63	102.00	95.06	89.10	9.60	8.95	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-03	8.1	0.47	0.04	0.17	4.47	13.44	103.00	101.66	87.84	7.67	7.57	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-04	8.0	0.63	0.07	0.16	2.29	17.50	54.90	52.08	34.58	3.14	2.98	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-05	7.9	0.20	0.09	0.01	4.08	3.44	107.20	92.79	100.80	31.19	26.99	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-06	7.8	0.35	0.09	0.02	2.72	8.13	73.86	61.86	62.57	9.09	7.61	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-07	7.7	0.46	0.23	<0.01	2.64	7.19	70.31	60.04	55.48	9.78	8.35	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-08	7.9	0.18	0.08	<0.01	5.81	3.13	141.20	132.13	135.40	45.18	42.28	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-09	7.9	0.40	0.14	0.01	3.33	8.13	76.96	75.73	64.06	9.47	9.32	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-10	7.9	0.64	0.22	0.03	2.43	13.13	63.60	55.26	42.96	4.85	4.21	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-11	7.9	0.59	0.25	<0.01	4.85	10.63	121.30	110.30	102.30	11.42	10.38	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-12	8.2	0.18	0.02	<0.01	7.42	5.00	166.80	168.75	161.00	33.36	33.75	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-13	8.4	0.04	<0.01	0.01	33.35	1.09	733.20	758.46	731.90	670.35	693.45	No PAG	No PAG	
		---	GQ-B2303-14	8.0	0.37	0.03	0.07	24.15	10.63	487.00	549.23	475.10	45.84	51.69	No PAG	No PAG	
	---	Mínimo	8.4	0.04	0.02	<0.01	2.29	1.09	54.90	52.08	34.58	3.14	2.98	---	---		
	---	Máximo	7.7	0.64	0.25	0.17	33.35	17.50	733.20	758.46	731.90	670.35	693.45	---	---		
	---	Promedio	7.9	0.37	0.11	0.04	7.48	8.45	169.64	170.03	157.66	64.48	65.59	---	---		
	---	Botadero 23 TP-B23-03	---	GQ-TPB23-04	7.7	0.49	0.20	0.48	1.69	9.06	53.79	38.43	37.99	5.94	4.24	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-04	---	GQ-TPB23-05	7.6	0.32	0.12	0.02	0.38	6.25	15.17	8.64	4.85	2.43	1.38	No PAG	Incierto
	---	Botadero 23 TP-B23-05	---	GQ-TPB23-06	7.7	1.28	0.72	0.07	3.97	17.50	96.74	90.29	55.46	5.53	5.16	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-05	---	GQ-TPB23-07	7.6	1.41	0.87	0.01	3.06	16.88	76.36	69.59	30.89	4.53	4.12	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-05	---	GQ-TPB23-08	7.9	0.61	0.16	0.09	2.36	14.06	63.89	53.67	44.22	4.54	3.82	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-19	---	GQ-TPB23-09	7.4	1.51	1.15	0.01	0.44	11.25	16.12	10.01	-32.58	1.43	0.89	Incierto	PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-19	---	GQ-TPB23-10	7.6	1.19	0.62	0.04	3.01	17.81	82.19	68.46	43.81	4.61	3.84	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-20	---	GQ-TPB23-11	7.5	2.43	1.80	0.03	1.77	19.69	46.59	40.25	-31.78	2.37	2.04	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-20	---	GQ-TPB23-12	7.7	0.69	0.23	0.11	3.22	14.38	76.00	73.23	53.75	5.29	5.09	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-20	---	GQ-TPB23-13	7.7	1.20	0.72	0.04	1.11	15.00	26.32	25.24	-12.38	1.75	1.68	Incierto	Incierto
	---	Botadero 23 TP-B23-21	---	GQ-TPB23-14	7.8	0.60	0.08	0.16	5.90	16.25	126.30	134.18	107.00	7.77	8.26	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-21	---	GQ-TPB23-15	7.7	0.63	0.30	0.02	1.46	10.31	42.78	33.20	22.46	4.15	3.22	No PAG	No PAG
	---	Botadero 23 TP-B23-22	---	GQ-TPB23-16	7.6	1.99	1.52	0.01	1.72	14.69	46.06	39.12	-18.12	3.14	2.66	No PAG	No PAG
---	Botadero 23 TP-B23-22	---	GQ-TPB23-17	7.7	1.25	0.24	0.39	2.54	31.56	62.06	57.77	21.75	1.97	1.83	Incierto	Incierto	
---	Botadero 23 TP-B23-22	---	GQ-TPB23-18	7.7	1.78	0.96	0.06	2.09	25.63	55.93	47.53	-1.48	2.18	1.85	No PAG	Incierto	
---	Mínimo	7.9	0.32	0.08	0.01	0.38	6.25	15.17	8.64	-32.58	1.43	0.89	---	---			
---	Máximo	7.4	2.43	1.80	0.48	5.90	31.56	126.30	134.18	107.00	7.77	8.26	---	---			
---	Promedio	7.6	1.16	0.65	0.10	2.31	16.02	59.09	52.64	21.72	3.84	3.34	---	---			
Golder 2014	---	---	B23-001	7.8	0.47	0.15	0.33	3.16	10.31	256.00	263.35	245.69	24.82	25.54	No PAG	No PAG	
	---	---	B23-002	7.8	1.02	0.72	0.30	0.27	9.40	11.00	22.50	1.60	1.17	2.39	Incierto	No PAG	
	---	---	B23-005	7.9	0.17	0.11	0.06	4.10	1.90	253.00	341.69	251.00	133.16	179.84	No PAG	No PAG	
	---	---	B23-006	7.9	0.55	0.11	0.45	2.30	14.06	204.00	191.68	189.94	14.51	13.63	No PAG	No PAG	
	---	Mínimo	7.9	0.17	0.11	0.06	0.27	1.90	11.00	22.50	1.60	1.17	2.39	---	---		
	---	Máximo	7.8	1.02	0.72	0.45	4.10	14.06	256.00	341.69	251.00	133.16	179.84	---	---		
---	Promedio	7.8	0.55	0.27	0.29	2.46	8.92	181.00	204.81	172.06	43.41	55.35	---	---			
Estudios Anteriores Golder 2014	---	---	AP13-BO23-001	7.6	1.21	1.04	0.17	1.40	5.31	114.00	116.67	108.69	21.46	21.96	No PAG	No PAG	
	---	---	AP13-BO23-002	6.6	0.56	0.51	0.05	0.23	1.56	13.00	19.17	11.44	8.32	12.27	No PAG	No PAG	
	---	---	AP13-BO23-003	6.2	0.76	0.60	0.16	0.11	5.00	1.00	9.17	-4.00	0.20	1.83	PAG	Incierto	
	---	Mínimo	7.6	0.56	0.51	0.05	0.11	1.56	1.00	9.17	-4.00	0.20	1.83	---	---		
---	Máximo	6.2	1.21	1.04	0.17	1.40	5.31	114.00	116.67	108.69	21.46	21.96	---	---			
---	Promedio	6.8	0.84	0.72	0.13	0.58	3.96	42.67	48.34	38.71	9.99	12.02	---	---			
Estudios Anteriores UNI 2008	---	---	---	7.1	0.06	---	---	---	1.74	78.75	78.80	77.01	45.13	45.29	No PAG	No PAG	
	---	---	---	7.2	0.08	---	---	---	2.59	222.50	222.50	219.91	85.76	85.91	No PAG	No PAG	
	---	---	---	7.1	0.06	---	---	---	1.96	127.50	127.50	125.54	64.99	65.05	No PAG	No PAG	
	---	---	---	7.2	0.02	---	---	---	0.60	73.13	73.10	72.52	121.44	121.83	No PAG	No PAG	
	---	---	---	7.3	0.05	---	---	---	1.39	387.50	387.50	386.11	278.34	278.78	No PAG	No PAG	
	---	---	---	7.3	0.05	---	---	---	1.63	160.00	160.00	158.37	98.02	98.16	No PAG	No PAG	
	---	Mínimo	7.3	0.02	---	---	---	---	0.60	73.13	73.10	72.52	45.13	45.29	---	---	
	---	Máximo	7.1	0.08	---	---	---	---	2.59	387.50	387.50	386.11	278.34	278.78	---	---	
---	Promedio	7.2	0.05	---	---	---	---	1.65	174.90	174.90	173.24	115.61	115.84	---	---		
SRK 2007	---	---	---	4.8	2.74	2.69	0.05	---	1.60	-0.60	8.00	-2.20	-0.38	5.00	PAG	No PAG	
	---	---	---	4.3	1.54	1.37	0.17	---	5.30	-5.70	0.50	-11.00	-1.08	0.09	PAG	PAG	
	---	---	---	5.8	2.82	2.80	0.02	---	0.60	23.80	32.30	23.20	39.67	53.83	No PAG	No PAG	
	---	---	---	6.5	2.12	2.09	0.03	---	0.90	7.80	12.00	6.90	8.67	13.33	No PAG	No PAG	
	---	---	---	6.6	2.07	1.91	0.16	---	5.00	14.60	15.90	9.60	2.92	3.18	No PAG	No PAG	
	---	Mínimo	6.6	1.54	1.37	0.02	---	---	0.60	-5.70	0.50	-11.00	-1.08	0.09	---	---	
---	Máximo	4.3	2.82	2.80	0.17	---	---	5.30	23.80	32.30	23.20	39.67	53.83	---	---		
---	Promedio	5.6	2.26	2.17	0.09	---	---	2.68	7.98	13.74	5.30	9.96	15.09	---	---		



Tabla 8: Resultados del Análisis del Lixiviado de NAO

Table with columns for Procedencia, Código, pH NAO, and various chemical elements (Be, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Ni, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, Zn) and their respective concentrations.

Nota: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua aptos para el D.S. N° 034-2017-MINAM. Cat. 3-01: Categoría Riego de Vegetales. Cat. 3-02: Categoría Sereno de Animales. Límites Máximos Permisibles para Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minerometalúrgicas aptos para D.S. N° 010-2015-MINAM. En ausencia del ECA para molibdeno, se comparan los resultados con COME (1999). Legenda: XXX: Valores que sobrepasan la ECA Categoría 3 para Riego Cat. 3-01. XXX: Valores que sobrepasan la ECA Categoría 3 para Sereno Animal Cat. 3-02. X: Valores que sobrepasan los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes mineros LMP D.S. N° 010-2015-MINAM.



Tabla 4: Resultados de la Prueba de Generación de Ácido Neto (NAG) - Zona Tintaya

Procedencia	Litología	Código	pH en pasta	NAG (kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t)		NAG pH		
				(pH 4,5)	(pH 7,0)			
Roca de Desmonte - Tintaya	Botadero 20	---	B20-002	7.9	0.1	0.1	11.0	
		---	B20-003	7.8	0.1	0.1	11.3	
		---	B20-006	7.9	0.1	0.1	11.5	
	Botadero 23	---	B23-002	7.8	0.1	0.1	10.5	
		---	B23-006	7.9	0.1	0.1	11.4	
		B23-01	GQ-B2301-01	8.2	<0.01	<0.01	11.7	
			GQ-B2301-02	8.0	<0.01	<0.01	10.4	
			GQ-B2301-03	8.0	<0.01	<0.01	11.2	
			GQ-B2301-04	7.9	<0.01	<0.01	11.6	
			GQ-B2301-05	8.0	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2301-06	7.9	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2301-07	7.8	<0.01	<0.01	11.7	
			GQ-B2301-08	7.9	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2301-09	8.0	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2301-10	8.1	<0.01	<0.01	11.8	
			GQ-B2301-11	7.9	<0.01	<0.01	11.4	
			GQ-B2301-12	8.3	<0.01	<0.01	11.4	
		B23-03	GQ-B2303-01	7.8	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2303-02	7.9	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2303-03	8.1	<0.01	<0.01	11.6	
			GQ-B2303-04	8.0	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2303-05	7.9	<0.01	<0.01	11.4	
			GQ-B2303-06	7.8	<0.01	<0.01	11.4	
			GQ-B2303-07	7.7	<0.01	<0.01	11.2	
			GQ-B2303-08	7.9	<0.01	<0.01	11.5	
			GQ-B2303-09	7.9	<0.01	<0.01	10.6	
			GQ-B2303-10	7.9	<0.01	<0.01	10.9	
			GQ-B2303-11	7.9	<0.01	<0.01	11.2	
			GQ-B2303-12	8.2	<0.01	<0.01	11.4	
			GQ-B2303-13	8.4	<0.01	<0.01	9.6	
			GQ-B2303-14	8.0	<0.01	<0.01	11.3	
		TP-B23-03	GQ-TPB23-04	7.7	<0.01	<0.01	9.9	
		TP-B23-04	GQ-TPB23-05	7.6	<0.01	<0.01	-	
	TP-B23-05	GQ-TPB23-06	7.7	<0.01	<0.01	10.8		
		GQ-TPB23-07	7.6	<0.01	<0.01	11.0		
	TP-B23-19	GQ-TPB23-08	7.9	<0.01	<0.01	11.3		
		GQ-TPB23-09	7.4	<0.01	<0.01	9.7		
	TP-B23-20	GQ-TPB23-10	7.6	<0.01	<0.01	10.5		
		GQ-TPB23-11	7.5	<0.01	<0.01	10.1		
		GQ-TPB23-12	7.7	<0.01	<0.01	11.2		
	TP-B23-21	GQ-TPB23-13	7.7	<0.01	<0.01	10.4		
		GQ-TPB23-14	7.8	<0.01	<0.01	10.9		
		GQ-TPB23-15	7.7	<0.01	<0.01	10.0		
	TP-B23-22	GQ-TPB23-16	7.6	<0.01	<0.01	10.1		
		GQ-TPB23-17	7.7	<0.01	<0.01	11.1		
		GQ-TPB23-18	7.7	<0.01	<0.01	10.7		
				Minimo	8.4	<0.01	<0.01	11.8
				Máximo	7.4	<0.01	<0.01	9.6
				Promedio	7.8	<0.01	<0.01	10.6
	Botadero 28	---	B28-003	8.4	0.1	0.1	11.4	
		---	B28-007	8.3	0.1	0.1	10.8	
	Botadero 70 (Construcción Depósito de Relaves Tintaya)	---	B70-001	8.4	0.1	0.1	11.5	
		---	B70-002	8.3	0.1	0.1	11.2	
---		B70-007	8.4	0.1	0.1	11.2		
Material de relleno		DTNT-17-009	8.8	<0.01	---	9.2		
Material de relleno		DTNT-17-010	8.6	<0.01	---	11.8		
Reactivación del Tajo Tintaya - Zona Norte	Diorita	ATNT-17-001	8.2	<0.01	---	7.6		
	Pórfido Monzonítico 1	ATNT-17-003	9.1	<0.01	---	10.8		
	Pórfido Monzonítico 3	ATNT-17-005	9.4	<0.01	---	11.5		
	Endoskarn Diorita	ATNT-17-007	8.4	<0.01	---	11.7		
	Endoskarn Pórfido Monzonítico	ATNT-17-009	9.0	<0.01	---	11.6		
	Skarn Mineralizado	ATNT-17-012	8.6	<0.01	---	11.4		
	Botadero - Relleno	ATNT-17-013	8.4	<0.01	---	11.8		
	Botadero - Relleno	ATNT-17-016	8.6	<0.01	---	11.3		
	Aluvial	ATNT-17-020	6.9	<0.01	---	9.0		
				Minimo	6.9	<0.01	---	7.6
			Máximo	9.4	<0.01	---	11.8	
			Promedio	7.8	<0.01	---	8.5	

## ANEXO 4



**Ley N°30035**  
Respositorio Nacional Digital



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
INGENIERIA**

**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA EN EL PORTAL DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
DE LA UNI**

**1. DATOS PERSONALES**

Apellidos y nombres: Carlos Dario Carrillo Balbin

D.N.I: 43084989

Teléfono casa: ----

celular: 994 635 816

Correos electrónicos: ccarrillo2013@gmail.com

**2. DATOS ACADÉMICOS**

Grado académico: Bachiller

Mención: Ingeniería Agrícola

**3. DATOS DE LA TESIS**

Título:

“Diseño de Cobertura de Cierre para el Control de la Generación de Drenaje Ácido de Mina en un Depósito de Desmonte”

Año de publicación: 2023

A través del presente, no autorizo a la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Ingeniería, la publicación electrónica a texto completo en el Repositorio Institucional, el citado título.

Firma:

Fecha de recepción: 28/12/2023

## ANEXO 5: CURRICULUM VITAE

## CARLOS DARIO CARRILLO BALBIN

DNI: 43084989  
 CIP:163954  
 Celular: 994 635 816  
 Correo: ccarrillo2013@gmail.com



Empresa	Cargo	Periodo	Función
WSP Perú	Especialista Ambiental Senior - Recursos Hídricos	2022-actualidad	Líder de tareas de línea base de hidrología, inventario de fuentes de agua e infraestructura hidráulica, estudios de faja marginal, y permisos y derechos de uso de agua.
Golder Associates Perú S.A.	Ingeniero Agrícola Intermedio	2017-2022	Responsable de elaboración de los estudios técnicos relacionados con los aspectos hídricos de los estudios ambientales para proyectos mineros, y de los permisos y derechos de uso de agua. Responsable de instalación de estaciones meteorológicas portátiles; instalación de estaciones hidrométricas; descarga de transductores de presión, estimación de Longitud de Zona de Mezcla (Lzdm) en el cuerpo receptor.
Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Ingeniero Especialista en Recursos Hídricos	2016-2016	Responsable de la elaboración de los estudios de aprovechamiento hídrico para el otorgamiento de las licencias de uso agua con fines poblacionales y/o agrarios en el marco de la Resolución Jefatural N° 484-2012-ANA (Metodología de Formalización de Usos de Agua Poblacional y Agrario).

Fuente: Elaboración propia

- Ingeniero Agrícola  
Universidad Nacional Agraria La Molina
- Maestría en Minería y Medio Ambiente  
Universidad Nacional de Ingeniería (Egresado)

## CURRICULUM VITAE

### CARLOS DARIO CARRILLO BALBIN

DNI: 43084989  
 CIP:163954  
 Telephone: 994 635 816  
 Email: ccarrillo2013@gmail.com



Company	Responsability	Period	Function
WSP Perú	Senior Environmental Specialist - Water Resources	2022-current	Leader of hydrology baseline tasks, inventory of water sources and hydraulic infrastructure, marginal belt studies, and water use permits and rights.
Golder Associates Perú S.A.	Intermediate Agricultural Engineer	2017-2022	Responsible for preparing technical studies related to water aspects of environmental studies for mining projects, and permits and rights to use water. Responsible for installing portable weather stations; installation of hydrometric stations; download of pressure transducers, estimation of Mixing Zone Length (Lzdm) in the receiving body.
Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Engineer Specialist in Water Resources	2016-2016	Responsible for the preparation of water use studies for the granting of water use licenses for population and/or agricultural purposes within the framework of Headquarters Resolution No. 484-2012-ANA (Methodology for Formalization of Population and Agricultural Water Uses).

Source: Own elaboration

- Agricultural Engineer  
La Molina National Agrarian University
- Master in Mining and Environment  
National University of Engineering (Finished)