

## EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE BOFEDALES PARA LA PROVISIÓN DE AGUA COMUNIDAD MICAYA

### GROUNDWATER EVALUATION OF BOFEDALES FOR WATER SUPPLY OF MICAYA COMMUNITY

Ing. Alexis Adolfo Romero Calle <sup>1 \* \$</sup> ; Ing. Andrea Verónica Vera Chávez <sup>2 \* \$</sup>

Recibido: Abril 15, 2022; Aceptado: Mayo 2, 2023

#### RESUMEN

Actualmente el altiplano boliviano es impactado por el cambio climático, afectando a las comunidades del área rural integralmente en su calidad de vida, por la escasez de agua. Los reservorios de agua naturales (glaciares) están desapareciendo ya que no pueden restaurar sus reservas en invierno debido a la incidencia de la alta radiación por la Anomalía del Atlántico Sur, ocasionando que ríos que eran alimentados por el deshielo se sequen o se vuelvan efímeros. El caso del agua subterránea proveniente de los bofedales o humedales andinos son estudiados para brindar una solución a este problema que ocasiona la migración de los habitantes de las comunidades a las ciudades poniendo en riesgo la seguridad alimentaria local del occidente del país.

El presente estudio determinó la demanda y oferta hídrica de los bofedales de la comunidad Micaya para el provisionamiento sustentable de agua, para lo cual se recopiló información de consumo de agua de la comunidad, se realizó un balance hídrico para determinar la oferta hídrica superficial de la cuenca que alimenta su río y se identificaron los suelos donde se encuentran los bofedales con ensayos geotécnicos y geofísicos, para determinar sus parámetros hidrogeológicos. Con la finalidad de diseñar un sistema de agua que ayude a amortiguar las necesidades hídricas de la población, mejorando el nivel de vida de los pobladores, reduciendo la migración, evitando la desaparición de la comunidad y por consecuencia aportando a la seguridad alimentaria del país.

**Palabras claves:** Bofedales, agua subterránea, humedales altoandinos.

#### ABSTRACT

The Bolivian altiplano is affected by climate change causing water shortages and affecting communities. Natural water reservoirs (glaciers) are disappearing since they cannot restore their reserves in winter due to high radiation incidence of South Atlantic Anomaly, this anomaly causes that rivers fed by the thaw become ephemeral or dry up. In the case of underground water of Andean wetlands or wetlands, they are studied to provide a solution to this problem that causes habitants migration from the communities to the cities putting at risk the local food security of the western part of the country.

In the study, the demand and supply of water in the wetlands of the Micaya community was determined, to study the sustainable provision of its water, for this it was collected the water consumption of the community data, and a water balance was carried out to determine the water surface supply of the basin that feeds its river, also the soils where the wetlands are found were identified with geotechnical and geophysical tests to determine their hydrogeological parameters. All of this was analyzed in order to design a water system that mitigate the water needs of the population,

improve the living standards of the community habitants, reduce the migration rate, and prevents the disappearance of the community, contributing to the Bolivians food security.

**Keywords:** Andean Wetlands (Bofedales), groundwater.

**Citación:** Romero Calle Alexis A., Vera Chávez Andrea V., **EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE BOFEDALES PARA LA PROVISIÓN DE AGUA COMUNIDAD MICAYA.** Revista Científica EMINENTE 2023, 7-2: 13-36.

<sup>1</sup> Ingeniero Civil – Carrera de Ingeniería Civil - Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería.

\* Corresponde al Autor (correo electrónico: aromeroc@est.emi.edu.bo u ing.aromeroc@gmail.com).

<sup>§</sup> Dirección de contacto Investigador primer autor: Miraflores C/República Dominicana - Telf.: (+591) 76167621 La Paz – Bolivia.

<sup>2</sup> Ingeniera Civil – Docente – Unidad Académica La Paz – Escuela Militar de Ingeniería.

\* Corresponde al autor (correo electrónico: averac@doc.emi.edu.bo).

<sup>§</sup> Dirección de contacto Investigador segundo autor: La Pradera – Alto Irpavi Calle 5 N° 90 telf. (+591) 70518381 La Paz – Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

Los bofedales se forman en la naturaleza en zonas geoecológicas tales como el macizo andino, ubicadas sobre 4000 m de altitud, en planicies que se almacenan agua proveniente de las precipitaciones, deshielo de glaciares y principalmente alumbramientos superficiales de aguas subterráneas, por ello son ecosistemas frágiles que pueden ser fácilmente alterados si no se manejan sosteniblemente (FLORES 2002).

Los bofedales son unidades de vegetación con plantas adaptadas a drásticas condiciones climáticas y a la presencia casi constante de agua en el suelo, son fuentes de agua típicas del altiplano además de aglomerados de vegetación con la peculiaridad de almacenar o retener y purificar agua proveniente de la superficie, precipitaciones, deshielo de glaciares y principalmente alumbramientos de agua subterránea (LORINI, 2014).

El calentamiento global constituye un agravante en el proceso moderno de modificación del paisaje, configurando nuevos escenarios climáticos que obligan a las especies a adaptarse a modificaciones en los regímenes de temperatura y precipitación (LORINI, 2014)

Las curvas de tendencia muestran que ciertos glaciares podrían desaparecer en los próximos 30 años (Ramírez 2007) de continuar los niveles actuales de emisiones de gases de efecto invernadero y las tendencias actuales del calentamiento global. Si la función de regulación de flujos de los glaciares se halla amenazada por el calentamiento global, es preciso encontrar alternativas que permitan reemplazar dicha función (LORINI, 2014).

Para entender el comportamiento de los bofedales y más aún la posibilidad de captar agua a través de estos manteniendo su ecosistema volviéndolos un recurso de agua sostenible en el tiempo, es necesario un estudio hidrogeológico (ITURRASPE, 2010).

La hidrogeología de bofedales relaciona a los glaciares con el cambio en su comportamiento debido al cambio climático, estos son tópicos de mucho interés por la comunidad científica que busca otras soluciones recursos y estrategias para hacer frente a los fenómenos climáticos (SOLIZ FLORES H. L., 2011).

Numerosos investigadores han tratado el tema en profundidad, atendiendo no sólo a la extracción de turba sino también a la importancia de los procesos hidrológicos en el desarrollo y sustentabilidad de este tipo de ecosistemas (ITURRASPE, 2010).

Una medida de adaptación es apostar por obras de infraestructura como la construcción de represas y atajados para mitigar los efectos del cambio climático, a corto plazo a largo plazo pueden verse comprometidas por los costos de mantenimiento que acarrear, tomando en cuenta que el cambio climático viene asociado al incremento de eventos extremos como precipitaciones torrenciales, distribuidas en cortos periodos (LORINI, 2014).

Se estimó que un bofedal del nevado Illimani podría llegar a almacenar 45.000 m<sup>3</sup> de agua en su capa orgánica, regulando el caudal de lluvias y deshielo, amortizando drásticamente la escorrentía directa y manteniendo la ecología del sistema (SOLIZ FLORES H. L., 2011).

Tomando en cuenta la capacidad de represamiento de agua y regulación de caudales identificada para ciertos bofedales, es pertinente recomendar la promoción de acciones de ampliación de bofedales en áreas de recarga hídrica para las cuencas altoandinas, en la necesidad de sustituir, al menos parcialmente, la capacidad de represamiento y regulación de flujos de glaciares en retroceso. Bajo este enfoque de adaptación al cambio climático que incrementa la capacidad de resiliencia de los ganaderos altoandinos, se deberá promover la conformación de bofedales ecológicamente funcionales que puedan hacer frente a mayores condiciones de estrés hídrico en época de estiaje (LORINI, 2014).

El estudio propone analizar y diseñar una captación de agua subterránea de los bofedales del Municipio de Colquencha para provisionar de agua a la comunidad Micaya, La Paz Bolivia.

## METODOLOGÍA

**Fase de Recopilación de información de base del lugar de estudio: hidrometeorológica, cuenca hidrográfica, información de pozos, datos de la población y otros.**

### Área de Estudio.

Se definió el área de estudio en la zona 19 sur en el sistema de coordenadas UTM-84 con una escala de 1:5000. La comunidad Micaya se encuentra en Bolivia, Departamento de La Paz, provincia Aroma, Municipio de Colquencha.

### Delimitación Física del lugar de Estudio.

### Imágenes Satelitales.

Las imágenes satelitales utilizadas para realizar los estudios fueron: El Modelo de Elevación Digital (DEM) resolución de píxel de 30[m]; Clasificación de Cobertura Terrestre (MODIS MCD12Q1) resolución de píxel de 500 [m] y La Base de Datos Armonizada de Suelos del mundo de la FAO resolución de píxel de 5000 [m].

Obtenidos de la base de datos de la Nasa por medio de la página de acceso Earth Explorer y el portal de suelos de la “FAO”. Todas las imágenes satelitales se trabajaron utilizando sistemas de información geográfico (SIG) mediante el software ArcGIS.

### Delimitación de la Microcuenca y Bofedal de Estudio.

La delimitación de la cuenca se realizó mediante ArcSWAT utilizando el modelo de elevación digital (DEM) obteniendo el perímetro de la cuenca hidrográfica su área y la red hídrica de la cuenca.

Los bofedales de la comunidad Micaya son de tipo esporádicos, teniendo entre sí grandes distancias de espacio vacío, por lo cual se procedió a delimitar el bofedal principal mayor y lograr la obtención del área y perímetro mediante SIG.

La zona delimitada, muestra valles ondulados con pendientes de hasta el 20%, los cauces de esta cuenca forman el río Micaya, que tiene cauces del tipo de primer orden hasta el segundo orden. Se tomó como salida natural de la cuenca la ubicación del bofedal en estudio.

### Cobertura Vegetal y Uso de Suelo.

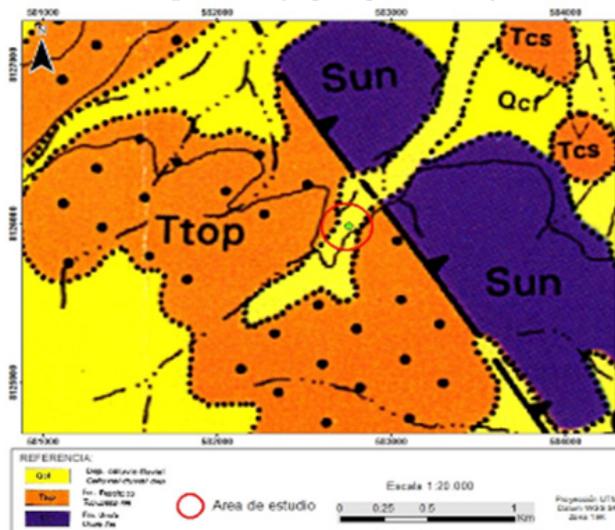
Se realizó una clasificación supervisada, obteniendo la cobertura vegetal, y la clasificación de uso de suelos

de la cuenca hidrográfica, mediante la imagen satelital MDC12Q1 utilizando el sistema de clasificación LCCS1 para cobertura vegetal y la clasificación LCCS2 para uso de suelo de la FAO.

### Geología del Bofedal.

Según el mapa de Servicio Geológico de Bolivia, la secuencia estratigráfica desde el basamento más antiguo a reciente la constituye Formación Uncía, formación Topohoco y culmina la secuencia con depósitos Coluvio Fluviales, Figura 1. La Formación Uncía (Sun) está constituida por una alternancia de lutitas y arenisca de color grisáceo esta unidad geológica aflora a 200 metros al Nor-este del área de estudio, luego se sobrepone depósitos de la Formación Topohoco (Ttop) que está dominado por materiales polimicticos, es decir, conglomerado y arcillas cuya coloración característica son marrón-rojizas y finalmente las cubre a las anteriores unidades depósitos denominado Coluvio-fluviales (Qcf) que es compuesta por mezclas de arcillas y gravas.

Figura 1. Mapa geológico de Micaya.



Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO DE BOLIVIA (1995), Carta Geológica de Bolivia, Hoja Calamarca 5943, Escala 1:100.000  
Publicación GGB Serie I-CGB-38.

### Hidrometeorología y Ubicación de Estaciones Pluviométricas.

Todos los datos hidrometeorológicos fueron recabados de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Para el estudio hidrológico de la oferta de agua superficial de la cuenca hidrográfica

de la cuenca. Las precipitaciones y temperaturas de acuerdo con las estaciones fueron estudiadas mediante la influencia que tienen en la cuenca. Según la ubicación de las estaciones más cercanas a la cuenca hidrográfica de estudio, se analizó el tipo de datos que se miden, los años de datos disponibles que se requieren para el análisis y cálculo hidrológico. Las estaciones adoptadas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Coordenadas de las estaciones meteorológicas (precipitación) cercanas a la cuenca hidrográfica de Micaya.

NOMBRE	X	Y	Z
Estación Meteorológica Collana-Aroma	576328,43	8130970,4	3911
Estación Meteorológica Conchamarca-Aroma	557679,56	8085106,9	3965
Estación Meteorológica Ayo Ayo-Aroma	605511,27	8109755,6	3888

Fuente: Elaboración propia

### Datos de Precipitación.

Se escogió la estación representativa de la cuenca hidrográfica, mediante el método de Polígonos de Thiessen para estimar la influencia de cada estación en la cuenca, dado que no se cuenta con ninguna estación dentro de su superficie, por ser de área muy pequeña podemos denominarla microcuenca.

Se rellenaron los años (1986-1993-2003-2004) de la Estación Meteorológica Conchamarca y (1984-1993) de la Estación Meteorológica Ayo-Ayo en base a la serie de datos histórica de la Estación Meteorológica Collana, a través del método de Completación por Correlación con Estaciones Vecinas, completando la información de precipitaciones anuales con las estaciones más próximas, para el cálculo de precipitación media anual de la cuenca hidrográfica. Como referencia a la precipitación que cae en la cuenca por los datos recolectados de las estaciones de 40 años consecutivos partiendo del año 1976 al 2016, un estudio más exacto de las precipitaciones se realiza con un análisis de probabilidad y estadística.

### Población del Proyecto.

Se consultó la población de la comunidad Micaya en el Instituto Nacional de Estadística (INE), el año 2012 contaba con 1000 habitantes, un censo poblacional de la comunidad realizado el año 2019 proporcionado por el

Instituto de Investigaciones Químicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) indica que actualmente existen 188 pobladores en la comunidad, se adoptó este dato como la población de inicial. Para el cálculo de la población futura según la Norma Boliviana 689, se adoptó un índice de crecimiento demográfico igual a 1%, porque la comunidad va decreciendo desde el año 2000 y según el índice 2.3.1(a) NB689 indica: Si el índice de crecimiento fuera negativo se debe adoptar como mínimo un índice de crecimiento de 1%. Se adoptó el método aritmético para la proyección de la población con periodo de diseño 20 años por las características explicadas.

### Descripción situacional o línea base del consumo de agua en Micaya.

Se coordinó con las autoridades y se identificó el consumo de agua en la comunidad Micaya a través de encuestas generales para el consumo domiciliario y encuestas particulares a los centros productivos para definir el consumo de agua de la comunidad, tanto a nivel domiciliario como productivo, se realizaron encuestas del tipo cerradas, con respuestas limitadas a 36 familias de las 48 familias que conforman la comunidad.

Dotación de agua.

### Dotación media diaria.

Se adoptó una dotación mínima según la NB 689 la dotación mínima según la Tabla 2, tomando que, en zonas rurales, como caso excepcional, donde la disponibilidad de agua no llegue a cubrir la demanda de la población (consumo restringido), se debe calcular la dotación en base al caudal mínimo de la fuente y la población futura

**Tabla 2.** Dotación media diaria.

Zona	Población (habitantes)					
	Hasta 500	De 501 a 2000	De 2001 a 5000	De 5001 a 20000	De 20001 a 100000	Más de 100000
Altiplano	30-50	30-70	50-8	80-100	100-150	150-200
Valles	50-70	50-90	70-100	100-140	150-200	200-250
Llanos	70-90	70-110	90-120	120-180	200-250	250-350

Fuente: Norma Boliviana 689 (NB689)

## Fase de Estudio hidrológico para obtener la oferta de agua superficial.

### Análisis de Consistencia Curva de Doble Masa.

Se hizo un análisis de curva de doble masa buscando que la línea recta trazada por los correspondientes acumulados, entre dos estaciones sea continua y con buena correlación de datos, si en cambio se hallaba un rectar con quiebres y cambios de pendiente, se corrigió los datos para obtener la consistencia de estos. Se realizó el análisis de consistencia de los datos de la estación correlacionando, los datos de dos estaciones próximas (Estación Meteorológica de Conchamarca y Estación meteorológica de Ayo-Ayo), buscando cualquier defecto o anomalía de los datos. Relacionando la precipitación anual acumulada de la estación adoptada, con el correspondiente valor medio de la precipitación anual acumulada de estaciones vecinas.

### Análisis Probabilístico de Precipitaciones.

El análisis probabilístico de precipitaciones se realizó a través del estudio de una serie histórica de 30 años. A través del método de la distribución normal o Ley de Gauss. Para clasificar a través de la probabilidad de exceder, o no exceder la precipitación media anual, clasificando como año húmedo, año seco u año medio a través de puntos estandarizados para una probabilidad determinada, y se hizo el cálculo inverso suponiendo que el dato faltante es el valor bruto.

### Análisis de la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

Se calculó la evaporación potencial de referencia mediante el método FAO Penman- Monteith según la Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos ONU Roma 2006. El método fue aplicado para estimar la necesidad hídrica del Bofedal mediante el coeficiente de cultivo. Una vez hallados todos los parámetros se procedió a calcular la evapotranspiración de referencia, cumpliendo con los criterios de la FAO.

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273}\right) \cdot u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34u_2)}$$

ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia (mm día-1)  
 R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)

G: flujo del calor de suelo (MJ m-2 día-1)  
 T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)  
 u<sub>2</sub>: velocidad del viento a 2 m de altura (m s-1)  
 e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación (kPa)  
 e<sub>a</sub>: presión real de vapor (kPa)  
 Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C-1)  
 γ: constante psicrométrica (kPa °C-1)

### Análisis del Balance Hídrico.

El balance hídrico es un método físico directo que compara la precipitación total mensual de la cuenca y la demanda hídrica del suelo y el cultivo. La forma en que se idealizó el bofedal como si fuera el depósito en el cual puede tener una variación de reserva. A partir de las precipitaciones totales mensuales y la evapotranspiración de referencia mensual estimada, se calculó el balance del agua en el suelo para los años (2008-2009).

### Evapotranspiración del Cultivo (ET<sub>c</sub>)

El coeficiente de cultivo es un parámetro que refleja la cantidad de agua que requiere un cultivo para realizar su desarrollo en distintas épocas de su tiempo de vida. Se utilizó el método de coeficiente único de cultivo según la Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos ONU Roma 2006 de la FAO. Cabe aclarar que el bofedal es un humedal altoandino por lo cual se adoptaron los coeficientes de cultivo único que proporciona la FAO, Tabla 3. Tomando en cuenta las características del bofedal, aproximándose a un humedal de vegetación de tamaño máximo del cultivo de treinta centímetros. No se encontró ningún estudio o dato del coeficiente de cultivo único, de bofedales altoandinos.

Con estos coeficientes, se calculó la evapotranspiración de cultivo para definir las necesidades hídricas del bofedal.

$$ET_c = ET_o \cdot K_c$$

ET<sub>c</sub>: evapotranspiración del cultivo [mm d-1],  
 K<sub>c</sub>: coeficiente del cultivo [adimensional],  
 ET<sub>o</sub>: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d-1].

**Tabla 3.** Coeficiente de humedal con vegetación pequeña según FAO.

Humedal Vegetación Pequeña h <sub>max</sub> =0.3 m		
K <sub>c</sub> <sub>ini</sub>	K <sub>c</sub> <sub>med</sub>	K <sub>c</sub> <sub>fin</sub>
1.05	1.1	1.1

Fuente: Elaboración propia

## Fase de Estudio de suelos, caracterización con ensayos geotécnicos y geofísicos.

### Muestreo de Suelos, Alterados e Inalterados.

Se realizó el muestreo de suelo adyacente al bofedal, mediante la excavación de dos calicatas. De las cuales, se tomaron 5 muestras alteradas y 2 inalteradas de cada calicata. La primera calicata denominada “POZO 1” ubicada a 5.10 metros de la parte superior del bofedal y la segunda calicata denominada “POZO 2” a 15.80 metros de la parte inferior del bofedal. La ubicación de estos pozos se determinó en base a la estimación de la pendiente intuitiva que seguiría el agua subterránea mediante el uso de una wincha e identificando el camino que sigue la vegetación. Además, se trazó una primera aproximación de la ruta de excavación para la obra de toma de 34.14 metros de distancia entre ambas calicatas.

**Tabla 4.** Muestreo de calicatas según profundidad.

UBICACIÓN	CALICATAS	MUESTREO		
		PROFUNDIDAD (m)	ALTERADAS	INALTERADAS
AGUAS ARRIBA DEL BOFEDAL	“POZO 1”	0.5	MUESTRA 1	
		0.8	MUESTRA 2	BLOQUE 1
		1.1	MUESTRA 3	
		1.5	MUESTRA 4	
		1.6		BLOQUE 2
		2	MUESTRA 5	
AGUAS ABAJO DEL BOFEDAL	“POZO 2”	0.5	MUESTRA 1	
		0.8	MUESTRA 2	BLOQUE 1
		1.1	MUESTRA 3	
		1.5	MUESTRA 4	
		2		BLOQUE 2
		2.4	MUESTRA 5	

Fuente: Elaboración propia

De todas las muestras en la Tabla 4, solo se utilizó para los ensayos las muestras de mayor profundidad para ambas calicatas. Las demás muestras fueron utilizadas para hacer el perfil estratigráfico. Se requirió de los servicios de los laboratorios de la empresa LABOMAT para los ensayos de permeámetro y clasificación de suelos de las muestras del “POZO 2”. Se realizaron los mismos ensayos en los laboratorios de la EMI para las muestras del “POZO 1”.

### Clasificación del Suelo del Estrato Efectivo

Se realizaron los siguientes ensayos: Contenido de Humedad (ASTM – D2216); Límites de Consistencia de

Atterberg (ASTM – D4318); Análisis granulométrico por tamizado (ASTM – D6913) y Análisis granulométrico por hidrómetro (ASTM – D422-63). Solo se clasificaron muestras más profundas por pertenecer al estrato efectivo del acuífero.

### Permeabilidad o Conductividad Hidráulica.

Se realizó el ensayo según la Normativa Brasileña (NBR 14545) colocando una probeta de suelo inalterado de la muestra BLOQUE 2 POZO 1 dentro de un molde de 11.5 cm de largo y 10.57 cm de diámetro verificando que no existan grietas ni concavidades, enrasando, colocando papel filtro y sellándola herméticamente, dejando saturar la muestra con un flujo de agua constante por 2 días, o hasta que salga un flujo de agua contante por el drenaje de fondo. Se determinó la conductividad hidráulica del estrato efectivo por donde se identificó que provenía el agua, mediante el aparato permeámetro, sacando de ambos pozos la muestra más profunda en bloques como se observa en la Tabla 4, realizando el ensayo de carga variable con la muestra BLOQUE 2 del POZO 1 en los laboratorios de la EMI y se solicitó a LABOMAT realizar un ensayo de carga constante con la muestra BLOQUE 2 del POZO 2. Los ensayos fueron realizados en distintos lugares para reducir el tiempo de ejecución además observar la continuidad y extensión del estrato efectivo entre ambos pozos.

### Determinación del Agua Subterránea.

#### Sondeo Eléctrico Vertical y Tomografía Eléctrica.

Se realizó un ensayo geofísico con la empresa LABOMAT, con el objetivo de detectar la secuencia estratigráfica del subsuelo y establecer a qué tipo de acuífero corresponde el sector de estudio mediante una línea tomográfica.

Para la ejecución del estudio se empleó la configuración dipolo-dipolo, con un resistivímetro de la marca Instrumental International, con la transmisión y la recepción de datos preconfigurados. Alimentación de hasta 450 Watts y Receptor de 12 V, por otra parte, el equipo tiene su propia fuente de alimentación continua con capacidad de suministro de 150, 250, 400 y 700 V AC/DC con potencia máxima de 50 Hertz, cables y accesorios. En la Figura 2 se observa la toma de datos en campo para ser almacenados en la memoria interna

y en gabinete se hace la interpretación geológica para identificar la secuencia estratigráfica.

La transmisión se realizó mediante cables de 200 metros de distancia con cuatro carretas. Para el contacto a tierra, se utilizaron electrodos de hierro inoxidables y la recepción se realizó mediante los electrodos de cobre los cuales miden la diferencia potencial, luego la diferencia de potencia es recepcionada directamente mediante un amperímetro. El ensayo de campo abarcó una distancia horizontal de 100 m y llegando a los 25 m de profundidad de inspección.

Figura 2. Trabajo de campo ensayo geofísico



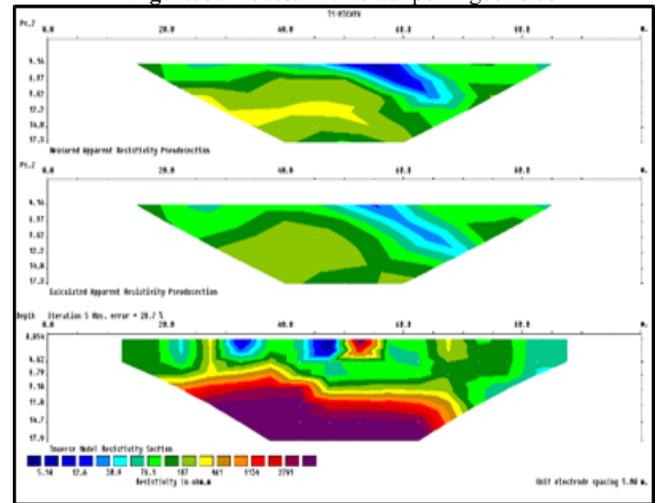
Fuente: Elaboración propia

### Descripción Geológica.

Para la interpretación se ha utilizado el software RES2INV Ver 3.55 de Geotomo de Geosoft. Este permitió una interpretación computarizada mediante un ajuste iterativo de las curvas y procesos de filtrado en base a elementos finitos de las resistividades. Además, mediante el uso de patrones de resistividad se realizó la interpretación hasta conseguir un modelo de iso-resistividades que marca las anomalías litoestratigráfica o estructurales del ambiente geológico y finalmente para tener una mejor comprensión se pasó a un perfil estratigráfico que muestra el contenido litológico donde se aprecia los espesores y profundidades de cada estrato atravesado, ya sea de arcillas, gravas o rocas que están saturados o secos.

Se ajustaron los modelos de resistividad y se filtró hasta por 5 iteraciones para optimizar el error, luego fueron ajustados o restituidos a la sección topográfica de cada tomo. Se puede observar en la Figura 3 la interacción de los datos que consiste en realizar cálculos de discretización y primer modelo pseudo-estratigráfico.

Figura 3. Procesamiento del perfil geofísico



Fuente: Informe geofísico de LABOMAT.

### Fase de Caracterización de las aguas subterráneas.

#### Topografía del Área del Proyecto.

Se realizó la topografía del área del proyecto utilizando el dron Mavic 2 pro. El plan de vuelo consto de 7 misiones de relevamiento abarcando 97 hectáreas, cada misión se realizó a 130 m de altura tomando fotografías con una cámara de 21 mega pixeles, el solape entre fotografías fue de un 80% transversal y longitudinalmente, a una velocidad de 5 m/s.

Figura 4. Levantamiento topográfico con dron.



Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo la captura de 1752 fotografías, las cuales fueron procesadas software Pix4d Mapper obteniendo una nube de puntos por cada fotografía con una media de 73004 puntos por imagen.

### Análisis de la Piezometría.

Debido al encapsulamiento y cuarentena del COVID 19, no se pudo dar viabilidad a la instalación de piezómetros. Por lo cual el gradiente hidráulico del agua subterránea que alimenta o provisiona de agua al bofedal fue estimado mediante calicatas en el bofedal usándolas como pozos y así hacer el monitoreo, cumpliendo la función de los piezómetros.

Para ello se drenó toda el agua de los pozos, mediante un aforo al POZO 1 y al POZO 2, las dimensiones de los pozos eran considerables de 1.3x1.0 y 1.7x1.0 metros respectivamente, por lo que se decidió medir la variación de altura introduciendo una varilla juntamente con la wincha para improvisar un limnómetro, se realizó lecturas durante intervalos de una hora a lo largo de aproximadamente 14 horas. Se tomó el espesor del estrato efectivo como referencia para el ensayo, siendo este el más profundo y del que realizo los ensayos de permeabilidad, por poseer una ligera película de agua que escurre continuamente, los espesores de estos estratos son de 1.20 y 1.40 metros respectivamente. La finalidad de hacer este ensayo o prueba de campo fue estimar un caudal en el sitio, pero principalmente una diferencia de alturas entre las columnas de agua para aplicar el teorema de Bernoulli, y estimar el gradiente hidráulico.

### Análisis de la Dirección de Flujo del Bofedal.

Se utilizaron los pozos más próximos al área de estudio pertenecientes a los pobladores, para seguir el rastro del flujo del agua, desde el punto más alto de la topografía hasta el más bajo, donde se encuentra el POZO 2 aguas abajo del bofedal, se verifico la existencia de agua en los pozos, se utilizó las curvas de nivel, perfiles longitudinales, la pendiente y la posición entre pozos para estimar el flujo y área de agua subterránea.

### Análisis de los Parámetros Hidráulicos del Bofedal.

Todos los parámetros fueron calculados según bibliografía consultada, en especial tomando coeficientes

y valores empíricos velocidad en base a Groundwater. FREEZE, R. A., & CHERRY, J. A. (1979).

### Fase de Diseño de la captación de agua subterránea del bofedal.

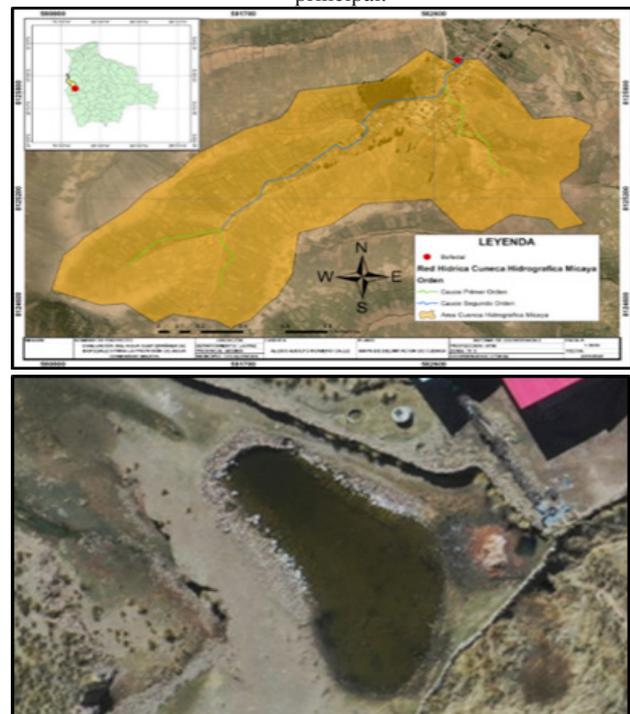
Para el diseño del sistema de captación, conducción se realizó según la Norma Bolivia NB689, NB688 el Manual de Diseño de Galerías Filtrantes OPS-OMS Lima (2002).

## RESULTADOS

Fase de Recopilación de información de base del lugar de estudio: hidrometeorológica, cuenca hidrográfica, información de pozos, datos de la población y otros.

Se obtuvo por procesos de iteración y análisis el perímetro de la cuenca hidrográfica su área y la red hídrica de la cuenca: área de la Cuenca hidrográfica: 1.86 [km<sup>2</sup>], perímetro de la Cuenca hidrográfica: 7.18 [km]. También se realizó un relevamiento presencial utilizando una wincha de 30 [m], midiendo un área de las dimensiones de 16x15 [m<sup>2</sup>] asemejando las medidas hechas por el software: área del Bofedal: 275.00 [m<sup>2</sup>], perímetro del Bofedal: 61.60 [m]

**Figura 5.** Delimitación de la cuenca hidrográfica y del bofedal principal.

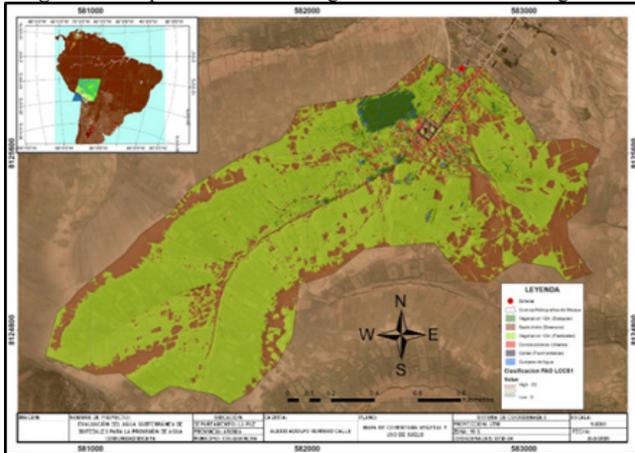


Fuente: Elaboración propia

### Cobertura Vegetal y Uso de Suelo.

En el mapa también se puede observar que la cuenca presenta un buen porcentaje de área de suelo árido, la salida de la cuenca presenta áreas urbanizadas, con algunas calles pavimentadas, y la presencia de un bosquecillo al lado oeste de la urbe. También se puede observar una gran cobertura de vegetación de un tamaño menor a los 2 metros de alto siendo esta la más predominante en la cobertura de la cuenca, la cual queda clasificada como pastizales. También se puede observar la presencia de cuerpos de agua que en su mayoría son señal de encharcamientos o áreas inundables (impermeables) donde el agua puede quedar estancada, también pudiendo indicar la presencia o formación de bofedales esporádicos.

Figura 6. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca hidrográfica.



Fuente: Elaboración propia

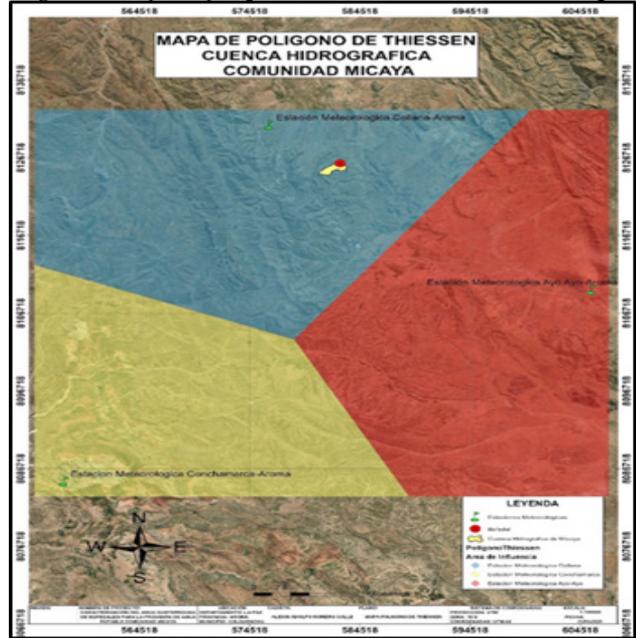
### Datos de Precipitación.

Los Polígonos de Thiessen evidencian que la estación que más influencia tiene en la cuenca hidrográfica es la Estación Meteorológica Collana y no así las Estaciones Meteorológicas de Conchamarca y Ayo-Ayo. Una vez determinada la influencia y los datos que posee la estación, adoptamos la Estación Meteorológica de Collana como la estación representativa de la cuenca hidrográfica.

Una vez seleccionada la estación representativa de la cuenca hidrográfica se realizó el relleno de datos faltantes de las Estaciones de Conchamarca y Ayo-Ayo utilizando el método de Completación por Correlación con Estaciones Vecinas, se escogió este método a

partir de la correlación de precipitaciones anuales de 40 años consecutivos partiendo del año 1976 al 2016 de las estaciones a rellenar con la representativa, que tuvo un valor de correlación menor al 0.8, siendo el método el más indicado para completar la información de precipitaciones anuales con esta correlación con las estaciones más próximas.

Figura 7. Mapa de polígono de Thiessen de la cuenca hidrográfica



Fuente: Elaboración propia

### Población del Proyecto.

$$P_f = P_0 \cdot \left(1 + \frac{i \cdot t}{100}\right)$$

$P_0$ : Población inicial en habitantes

$i$ : Índice de crecimiento poblacional anual en porcentaje

$t$ : Número de años de estudio o período de diseño

Obteniendo una población de diseño de 226 habitantes para el año 2040.

### Descripción situacional o línea base del consumo de agua en Micaya.

El consumo domiciliario de la comunidad está sujeto a la disponibilidad del recurso y a sus hábitos de vida, se identificaron hogares que contaban con pozos, piletas domiciliarias y tanques de almacenamiento, se pudo observar a través de las encuestas que los pobladores

que más cercanía tienen al río suelen tener pozos que los provee de agua todo el año, estos tienen un consumo más elevado del agua que la mayoría de la población porque la disponibilidad de esta es más accesible, llegando a consumir el mínimo establecido en la Norma Boliviana NB 689 en zona altiplánica de 30 – 35 litros diarios este volumen de consumo es utilizado con mayor prioridad en cultivos y ganadería.

Los hogares con pileta domiciliaria tienen una accesibilidad total al agua según las encuestas estos hogares poseen el mayor consumo ya que no tienen que acarrear el agua como en el caso de los pozos, el agua es utilizada en agricultura y ganadería. La mayor parte de la población solo consta de la pileta pública o pozo comunal, que debido a su accesibilidad la gente suele acarrearse lo estrictamente necesario de acuerdo a sus necesidades, por lo cual la mayoría solo consume un volumen de 20 – 25 litros por día siendo este valor inferior al mínimo valor de la Norma Boliviana NB 689, también existen otros hogares que entre más alejados del río y que el sistema de pileta pública no llega se presenta un volumen de consumo de 10 – 20 litros por día.

Figura 8. Mapa consumo de agua de micaya



Fuente: Elaboración propia

## Dotación de agua.

### Dotación media y futura.

Dotación media diaria del proyecto: La comunidad Micaya presenta un valor de dotación media diaria menor a los 30 l/hab.día por lo cual se adoptó la medida de proporcionar el mayor caudal posible a la comunidad para fines de cálculo se adopta el menor caudal medio diario.

Adoptando un periodo de diseño  $D_0=30$  l/hab

Dotación futura: La dotación futura se puede estimar con un incremento anual entre el 0,50% y el 2% de la dotación media diaria. Para el cálculo se adoptó un periodo de diseño  $t=20$  años y una variación anual del 1%.

Dotación futura del proyecto:

$$D_f = D_0 \cdot \left(1 + \frac{d}{100}\right)^t$$

$D_0$ : Dotación inicial en [l/hab-día]

$d$ : Variación anual de la dotación en porcentaje

$t$ : Número de años de estudio en años

Obteniendo una dotación futura de 36.6 [l/hab-día] para el año 2040.

### Caudales de diseño.

Con los resultados obtenidos del cálculo de población futura y dotación futura se puede proceder a obtener los caudales de diseño:

Caudal medio diario:

$$Q_m = \frac{P_f \cdot D_f}{86400}$$

$P_f$ : Población futura en habitantes

$D_f$ : Dotación futura en [l/hab-día]

Obteniendo como resultado un caudal medio diario de 0.096 [l/s].

Caudal máximo diario: Para el cálculo del caudal máximo diario se adoptó el coeficiente  $K_1=1.20$  por ser el valor mínimo por adoptar ya que este incrementa o mayor el valor del caudal referente a la cantidad de agua que se necesita al día.

$$Q_{maxd} = Q_m \cdot K_1$$

$Q_m$ : Caudal medio diario en [l/s]

$K_1$ : Coeficiente de caudal máximo diario (1,20 - 1,50)

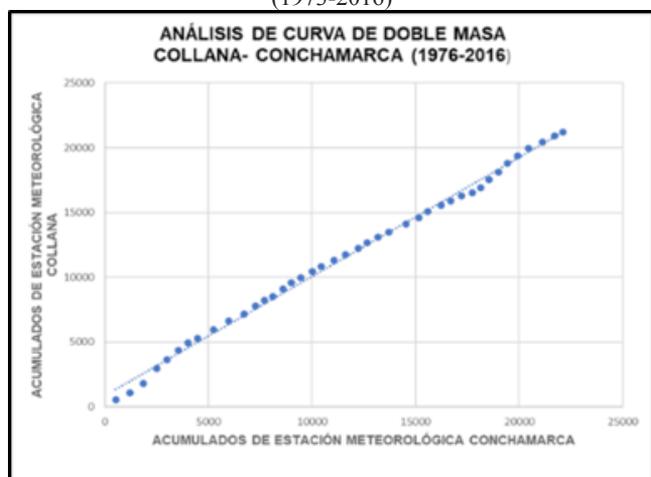
Obteniendo como resultado un caudal máximo diario de 0.115 [l/s].

## Fase de Estudio hidrológico para obtener la oferta de agua superficial.

### Análisis de Consistencia Curva de Doble Masa.

Este análisis validó la consistencia de los datos recopilados de las estaciones, por consecuencia valida también los cálculos realizados con estos datos, generalmente se realiza un análisis de consistencia de la información hidrometeorológica para detectar errores de medición o inconsistencia en la medición de algún dato.

Figura 9. Puntuaciones estandarizadas Collana (1973-2016)



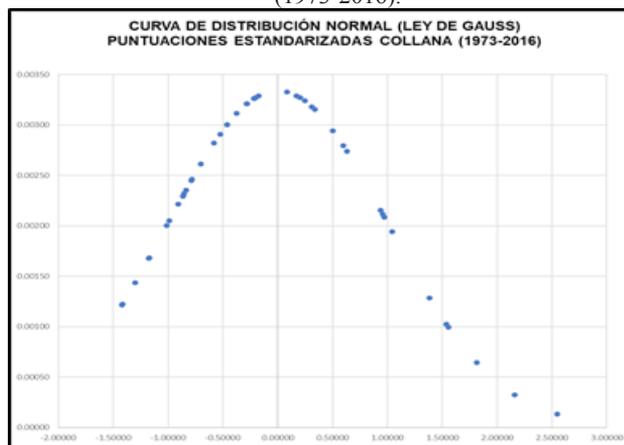
Fuente: Elaboración propia

### Análisis Probabilístico de Precipitaciones

La curva de distribución normal se realizó a partir de la puntuación estandarizada de la precipitación anual total de cada año de la serie histórica 1973-2016 de la Estación Meteorológica de Collana, estas puntuaciones estándar se obtuvieron restando la media aritmética al valor bruto del año estudiado, dividiendo este valor entre la desviación estándar de la serie de datos.

Una vez calculados los valores brutos representativos de cada probabilidad Tabla 5, se compararon estos con los valores de las precipitaciones anuales totales de la serie histórica, pudiendo clasificar el año como seco si la precipitación de ese año es inferior a 453 mm, como año húmedo si la precipitación supera el valor de 706 mm o finalmente como un año medio si la precipitación se encuentra entre 453 y 706 mm.

Figura 10. Puntuaciones estandarizadas Collana (1973-2016).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Parámetros estadísticos de las precipitaciones históricas (1973-2016) y valor de precipitación probables para año seco, medio y húmedo.

<b>MEDIA ARITMÉTICA</b>	=	553.89
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR</b>	=	119.46
AÑO SECO = 80% de no ser excedido		
F(x) =		0.20
Z =		-0.84
<b>X =</b>		<b>453.35</b>
AÑO HÚMEDO = 90% de ser excedido		
F(x) =		0.98
Z =		1.28
<b>X =</b>		<b>706.99</b>
AÑO MEDIO = 50% de ser excedido		
F(x) =		0.50
Z =		0.00
<b>X =</b>		<b>553.89</b>

Fuente: Elaboración propia

### Cálculo y Análisis de la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

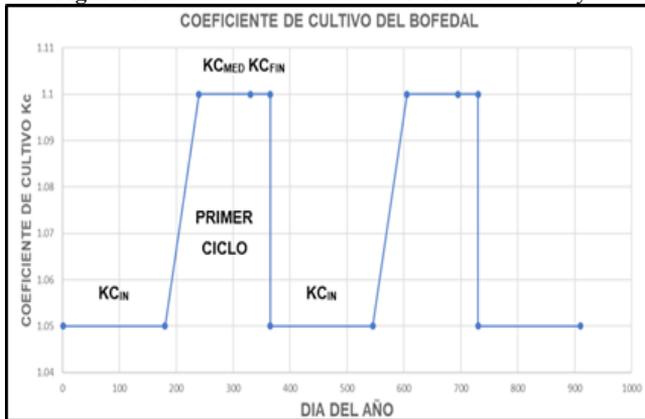
Se pudo observar que el requerimiento de agua del suelo por las condiciones climáticas por mes es muy alto, dadas las condiciones de radiación en el altiplano y el gradiente térmico muy elevado.

### Cálculo de Evapotranspiración del Cultivo (ET<sub>c</sub>).

Se pudo observar que durante la primera mitad del año cuando la vegetación del bofedal está en su etapa inicial (germinación), su demanda hídrica de 5%

más que la del suelo y el atmosférico, y durante su desarrollo (crecimiento) y vida media llega hasta un 10% mantiene esta demanda hasta su maduración, para realizar un intercambio de humedad a través de la evapotranspiración. Como se observa en la Figura 11.

Figura 11. Coeficiente de cultivo del bofedal de Micaya.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se puede observar el requerimiento o demanda total hídrica que tiene el suelo, la atmosfera y el cultivo, en condiciones óptimas. Aunque puede a primera vista suponerse que el cultivo solo demanda agua, esto no es verdad dado que los bofedales tienden a retener el agua no solo por sus características geológicas sino también por impulsar la vegetación que protege al suelo de la alta radiación y la erosión (vientos), impulsando la retención de la humedad, actuando como una represa o esponja verde.

Tabla 6. Cálculo de la evapotranspiración de cultivo.

VARIABLE	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	
ETc [mm/mes]	2008	107.515	133.352	153.396	166.275	173.530	
	2009	126.647	141.140	147.645	173.465	175.995	
	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	176.463	166.764	179.206	176.225	154.361	150.525	128.570
	176.003	166.764	173.036	173.894	156.793	146.496	133.123

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del Balance Hídrico de la Cuenca y del Bofedal Se realizó el cálculo del balance hídrico de dos años secos consecutivos (2008-2009), estos años fueron seleccionados por el análisis probabilístico, por ser una situación de extrema sequía y por estar precedidos por un año medio.

Tabla 7. Cálculo balance hídrico de dos años secos consecutivos (2008-2009) de la cuenca y bofedal de estudio.

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Variables						
Precipitación	P	149.70	53.20	67.70	7.30	1.50
Evapotranspiración potencial	ETo	107.515	133.352	153.396	166.275	173.530
Volumen de reserva de agua	VRA	42.18	-80.15	-85.70	-158.98	-172.03
Reserva de agua	R	100.00	19.85	0.00	0.00	0.00
Variación de la reserva	VR	100.00	-80.15	-19.85	0.00	0.00
Evapotranspiración real	ETr	107.52	133.35	87.55	7.30	1.50
AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Variables						
Precipitación	P	52.60	88.20	64.10	12.50	1.20
Evapotranspiración potencial	ETo	126.647	141.140	147.645	173.465	175.995
Volumen de reserva de agua	VRA	-74.05	-52.94	-83.54	-160.97	-174.80
Reserva de agua	R	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Variación de la reserva	VR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Evapotranspiración real	ETr	52.60	88.20	64.10	12.50	1.20

2008							
JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
4.80	0.00	2.00	3.20	27.90	12.80	83.80	
176.463	166.764	179.206	176.225	154.361	150.525	128.570	
-171.66	-166.76	-177.21	-173.02	-126.46	-137.73	-44.77	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4.80	0.00	2.00	3.20	27.90	12.80	83.80	
2009							
JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
0.00	4.00	0.00	6.60	8.90	29.90	130.60	
176.003	166.764	173.036	173.894	156.793	146.496	133.123	
-176.00	-162.76	-173.04	-167.29	-147.89	-116.60	-2.52	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.00	4.00	0.00	6.60	8.90	29.90	130.60	

Fuente: Elaboración propia

Este cálculo y análisis solo toma en cuenta el agua superficial que cae en la cuenca, brindando así un panorama del bofedal si este solo dependiera de la precipitación superficial, lo cual es una posibilidad descartada por los datos del balance hídrico que se realizó.

Se puede observar que la evapotranspiración es mucho mayor a la precipitación total mensual que cae en la cuenca y más específicamente en el área del bofedal. Este balance es válido tanto para la cuenca como para el bofedal, siendo la evapotranspiración mayorada por el coeficiente de cultivo para el bofedal en un 10%.

**Volumen de Reserva de Agua (VRA).**

El VRA es la diferencia simple entre la evapotranspiración y la precipitación total mensual que cae en la cuenca.

$$VRA = P - ET_C$$

P: Precipitación total mensual [mm]

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo [mm d-1],

En la Tabla 7 observamos 2 años secos que tienen un balance negativo, no logra abastecer la necesidad hídrica de la superficie de la cuenca, ni la necesidad hídrica del bofedal en todo el año (2009), se hizo el estudio en años secos para observar las peores condiciones medias de la oferta de agua.

### Reserva de Agua (R).

En la Tabla 7 se puede observar que en un año seco los meses que logran tener un volumen de reserva de agua positivo y por consecuencia una reserva de agua positiva son los meses de diciembre y enero, en el caso de año medio se aumenta el mes de febrero.

La reserva de agua nos ayuda a identificar los meses húmedos en los cuales la cuenca y el bofedal si son satisfechas en sus necesidades hídricas y muestran un volumen de reserva positivo, a este volumen de reserva positivo siendo el último positivo antes de entrar a un volumen de reserva negativo, se le asigna como el 100% de reserva que existe al comenzar el año hidrológico de la cuenca, una vez llegados a un balance de volumen negativo la reserva lógicamente llegara al 0%.

### Variación de la Reserva de Agua (VR).

Se observa que la reserva de agua en la Tabla 7 tiene una variación decreciente mes tras mes hasta llegar a agotar el agua disponible que dejó la precipitación del mes de diciembre y enero, manteniendo en cero durante el año 2009 por los escasos de precipitaciones durante el año 2008 considerado seco.

### Evapotranspiración Real (ET<sub>r</sub>).

En la Tabla 7 se observa la evapotranspiración real, que es el agua física que realmente se evapora y transpira en la cuenca y el bofedal, este valor no excede de ninguna forma a la de la precipitación, se puede observar que este valor puede llegar a ser el valor de la evapotranspiración potencial, en meses húmedos.

### Cálculo y Análisis de Recarga, Excedente y Déficit

Se calculó también como se puede observar en la Tabla 8 el déficit, el excedente que podría existir y la recarga de agua subterránea por infiltración.

Tabla 8. Cálculo de recarga, excedente y déficit.

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR
Diferencia negativa de agua	Déficit	0.00	0.00	-65.85	-158.98
Escorrentía	Excedencias	57.82	0	0	0
Infiltración	Recarga	28.91	14.45	7.23	3.61

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR
Diferencia negativa de agua	Déficit	-74.05	-52.94	-83.54	-160.97
Escorrentía	Excedencias	0	0	0	0
Infiltración	Recarga	0.00	0.00	0.00	0.00

2008							
MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
-172.03	-171.66	-166.76	-177.21	-173.02	-126.46	-137.73	-44.77
0	0	0	0	0	0	0	0
1.81	0.90	0.45	0.23	0.11	0.06	0.03	0.00

2009							
MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
-174.80	-176.00	-162.76	-173.04	-167.29	-147.89	-116.60	-2.52
0	0	0	0	0	0	0	0
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

### Diferencia Negativa de Agua (Déficit)

En la Tabla 8 se calculó el déficit de agua, restando la evapotranspiración potencial (ET<sub>c</sub>) entre la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), si no existe un valor negativo se puede decir que no existe déficit y que la precipitación satisface los requerimientos de humedad tanto del suelo como del cultivo, en cambio cuando se obtiene un valor negativo, este valor se refiere a la cantidad de precipitación o agua que requiere el suelo y el cultivo para estar en condiciones óptimas de humedad.

### Escorrentía (Excedentes)

Es la precipitación que ya sobrepasa la demanda de agua del suelo y el cultivo de estos excedentes, un porcentaje se infiltra y otro escurre.

En la Tabla 8 se calcularon las excedencias que puede haber en los meses en el que el volumen de la reserva de agua sea positivo en caso contrario no existirá excedente. Durante este periodo de tiempo 2008-2009 no existió excedente por tratarse de años secos.

**Infiltración (Recarga)**

En la Tabla 8 se calculó la recarga de agua que puede ocurrir en el subsuelo debido a la precipitación en un año seco, mediante la estimación de la mitad de la suma del excedente del mes actual, más la cantidad infiltrada el mes anterior partiendo del dato más alto o de mayor volumen de la reserva de agua. Este valor ira decreciendo hasta llegar a una instancia de no tener más recarga a menos que vuelva a ocurrir excedente.

**Coefficiente de Escorrentía Balance Hídrico**

Se calculó el coeficiente de escorrentía basado en el balance hídrico, realizando el cociente entre la sumatoria de los excedentes y la sumatoria de las precipitaciones totales.

$$C = \frac{\sum \text{excedentes}}{\sum \text{precipitaciones totales}}$$

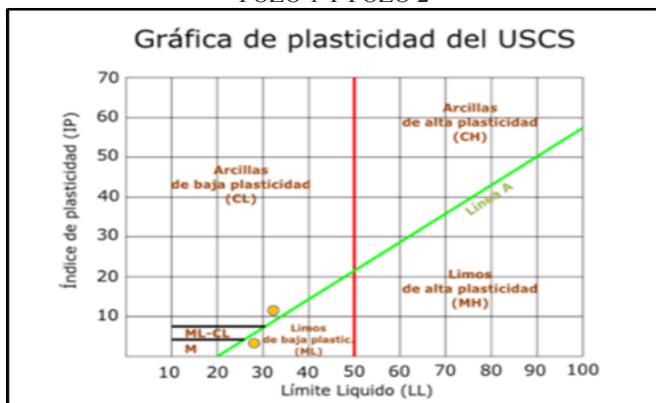
$$C = \frac{57.82}{413.9} = 0.14$$

**Fase de Estudio de suelos, caracterización con ensayos geotécnicos y geofísicos.**

**Clasificación del Suelo del Estrato Efectivo.**

En la Figura 12 se observa la carta de plasticidad obtenida a través de los ensayos, con una aproximación buena entre los resultados, con el que se clasifico el estrato efectivo de las calicatas.

**Figura 12.** Carta de plasticidad de la MUESTRA 5 POZO 1 Y POZO 2



**Fuente:** Elaboración propia

Se clasificó la MUESTRA 5 POZO 1 como un limo de baja plasticidad con arcilla ligera y arena, según el SUCS es un limo inorgánico de baja compresibilidad. La clasificación de la MUESTRA 5 POZO 2 fue proporcionada por LABOMAT como una arcilla ligera o arcilla inorgánica de baja compresibilidad.

**Tabla 9.** Clasificación del suelo del estrato efectivo

CALICATA	MUESTRA ALTERADA	CLASIFICACIÓN SEGÚN SUCS
POZO 1	MUESTRA 5	CL
POZO 2	MUESTRA 5	CL

**Fuente:** Elaboración propia

**Permeabilidad o Conductividad Hidráulica**

**Permeámetro de carga variable**

Una vez saturada la muestra y sale un flujo constante se comenzó el ensayo partiendo de una columna de agua conocida, y tomando una lectura del descenso de la columna de agua cada 2 minutos. Se tomó la variación de altura del flujo de agua hasta que se puede identificar una estabilidad en el flujo, realizando un total de 42 lecturas o medidas en 84 minutos, con estos datos se calculó el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica con la siguiente ecuación.

$$K = \frac{a \cdot H}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln \left( \frac{h_0}{h_1} \right) \cdot \frac{\gamma_w}{\mu}$$

- K: Conductividad hidráulica
- a : Área de; tubo alimentador
- H: Altura de la probeta de suelo
- A: Área de la probeta de suelo
- t<sub>1</sub>-t<sub>0</sub>: Tiempo de duración del ensayo
- h<sub>0</sub>: Altura inicial del ensayo
- h<sub>1</sub>: Altura final del ensayo
- γ<sub>w</sub>: Peso específico del fluido
- μ: Viscosidad cinemática del fluido

Se calculó la conductividad hidráulica del suelo limoso de baja compresibilidad con presencia de arena. Como se observa en la Tabla 10 el resultado concuerda con lo que se consultó en la bibliografía “Geología y Geotecnia Permeabilidad de los suelos.”, p 16, por ANGELONE S, GARIBAY M.T, CAUHAPÉ CASAUX M, Rosario, 2006.

**Tabla 10.** Valor de la conductividad hidráulica de MUESTRA 5

CALICATA	MUESTRA INALTERADA	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD O CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA K20 (cm/s)
POZO 1	BLOQUE 2	6.421E-05

Fuente: Elaboración propia

**Permeámetro de carga constante (ASTM D2434-68).**

La muestra BLOQUE 2 POZO 2 que fue entregada a LABOMAT para realizar el ensayo de carga constante sobre esta muestra y observar si una columna de agua constante tenía alguna influencia sobre coeficiente de permeabilidad.

Los resultados brindados por LABOMAT Tabla 11 fueron consistentes con los laboratorios y la clasificación de suelos realizados, ambas pruebas se encuentran en el rango de permeabilidad de acuerdo con el tipo de suelo.

**Tabla 11.** Ensayo de permeámetro de carga contante proporcionado por Labomat.

No. de ensayo	1	2	3	4
Altura de agua (cm)	140.0	140.0	140.0	140.0
Altura de la muestra (cm)	11.5	11.5	11.5	11.5
Area de la muestra (cm <sup>2</sup> )	87.7	87.7	87.7	87.7
Caudal del agua (cm <sup>3</sup> )	14	15	14	15
Tiempo (seg)	3600	3600	3600	3600
Temperatura (°C)	11.4	12.0	11.9	12.2
Permeabilidad kt (cm/seg)	3.64045E-06	3.90049E-06	3.64045E-06	3.90049E-06
Factor de corrección	1.251	1.230	1.233	1.223
Permeabilidad Kt	4.55421E-06	4.7976E-06	4.48868E-06	4.77029E-06
PERMEABILIDAD K20 (cm/seg)	<b>4.66 x 10<sup>-6</sup></b>			

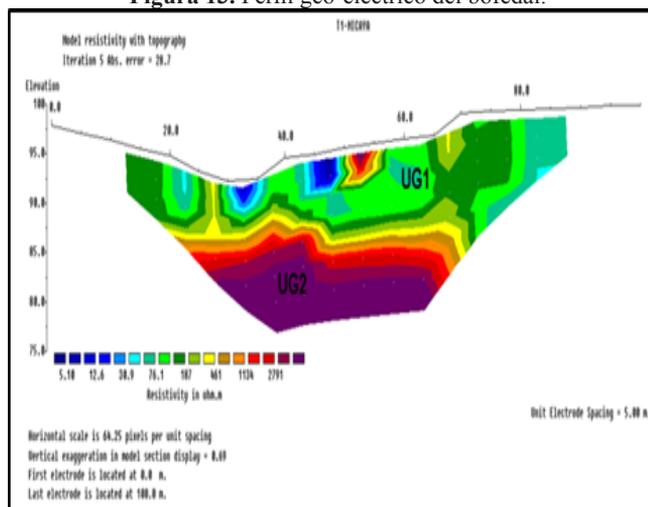
Fuente: Informe LABOMAT

**Determinación del Agua Subterránea.**

**Perfil Geo-eléctrico y Estratigráfico.**

Se identificó dos unidades geo-eléctricas.

**Figura 13.** Perfil geo-eléctrico del bofedal.



Fuente: Informe geofísico de LABOMAT.

**Unidad geo-eléctrica UG1:**

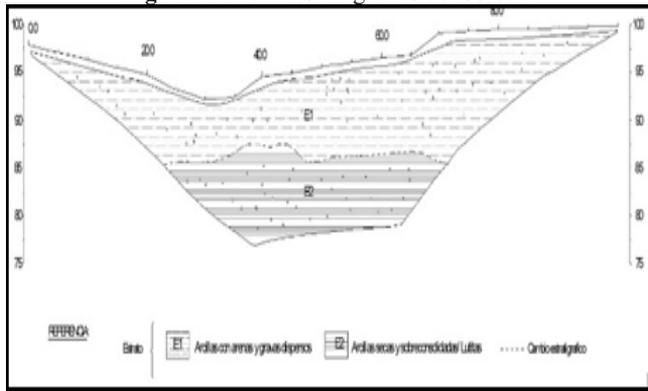
En la sección geofísica, se puede observar que el encape superficial está conformada por mezclas de arcillas, limos, arenas y gravas cuyo espesor no es homogénea, es decir varía desde 6 a 12 metros de espesor, en este tramo las resistividades son del rango 5 ohm.m a 461ohm.m. En cuanto a la presencia de agua se correlación como aguas grávida, en otras palabras, son aguas de escorrentía superficial que ha saturado la secuencia estratigráfica y es más su transmisibilidad se estima por el alto porcentaje de arcilla como impermeable.

**Unidad geo-eléctrica UG2:**

Por debajo del anterior el estrato predomina materiales cuya resistividad es superior a 461 ohm.m, bajo estas resistividades existe dos probabilidades de que el material subyacente este en contacto con Formación Topohoco u Unicia, no obstante, por las resistividades se correlaciona como materiales compuestas por arcillas sobre consolidada o lutitas cuya condición hidrogeológica es acuitardo, es decir materiales altamente impermeables en donde se espera que haya almacenamiento de agua, pero con bajos parámetros de transmisibilidad.

En el perfil estratigráfico Figura 14 se puede observar Arcillas con arenas y gravas dispersos (E1) correspondiente a la unidad UG1 y arcillas secas y sobre consolidadas / Lutitas (E2) correspondiente a la unidad UG2.

Figura 14. Perfil estratigráfico del bofedal



Fuente: Informe geofísico de LABOMAT.

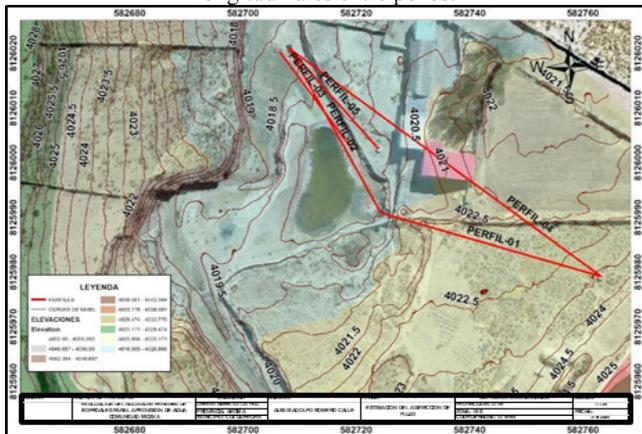
Los flujos subterráneos se manifiestan a partir de 1 metro de profundidad y se prolonga hasta 12 metros, por debajo del límite, la circulación de agua se considera es del tipo acuitardo debido a la impermeabilidad de los estratos, en consecuencia, el tipo del acuífero es de carácter libre que para efectos de explotación con caudal continua es mínimo, sin embargo, tiene un potencial de almacenamiento estacionario.

**Fase de Caracterización de las aguas subterráneas.**

**Topografía del Área del Proyecto.**

El procesamiento y corrección de las fotografías y nube de punto dio como resultado un modelo de elevación digital (DEM) con el cual se representó el terreno en el software ArcGIS, obteniendo el modelo 3D del área de estudio del proyecto, las curvas de nivel, perfiles longitudinales, Figura 15.

Figura 15. Curvas de nivel del área del proyecto y perfiles longitudinales entre pozos.



Fuente: Elaboración propia

**Análisis de la Piezometría.**

Se calculó el gradiente hidráulico con las mediciones que se tomaron durante las primeras 4 horas corresponden al aforo, luego se fue midiendo el nivel del agua pasadas 10 horas más, después de 14 horas el nivel del agua llegó a cubrir todo el estrato del ensayo, se pensaba que no habría más variación o diferencia entre la de alturas entre los estratos efectivos de los pozos pero 2 semanas después el POZO 1 llegó a estar lleno hasta el borde de la superficie del suelo y el POZO 2 aumentó el nivel de agua, se consideró a estas medidas como niveles estáticos del agua y se calculó el gradiente hidráulico. Como se puede observar en la Tabla 12.

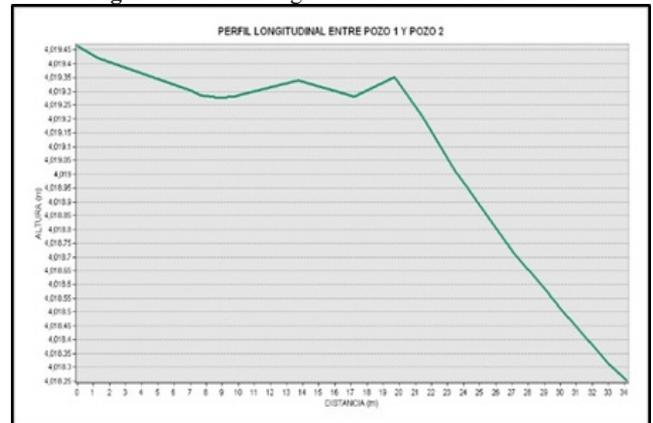
Tabla 12. Cálculo del gradiente hidráulico

TIEMPO	A.S.N.M POZO 1 (m)	A.S.N.M POZO 2 (m)	PROFUNDIDAD POZO 1 (m)	PROFUNDIDAD POZO 2 (m)	DISTANCIA ENTRE POZOS (m)
4 hrs	4019.45	4018.25	2	2.4	34.14
14 hrs					
2 semanas					
NIVEL ESTÁTICO DEL AGUA POZO 1 (m)	NIVEL ESTÁTICO DEL AGUA POZO 2 (m)	PARCIAL	GRADIENTE HIDRAÚLICO (l)		
0.35	0.16	0.041	0.044		
1.2	0.63	0.030			
1.96	1.86	0.044			

Fuente: Elaboración propia

Los valores de altura y distancia entre el POZO 1 y POZO 2 fueron calculados en ArcGis para elaborar el perfil longitudinal, basado en un modelo de elevación digital de 0.15 cm por píxel de resolución obtenido a través de fotogrametría.

Figura 16. Perfil longitudinal POZO 1 Y POZO 2

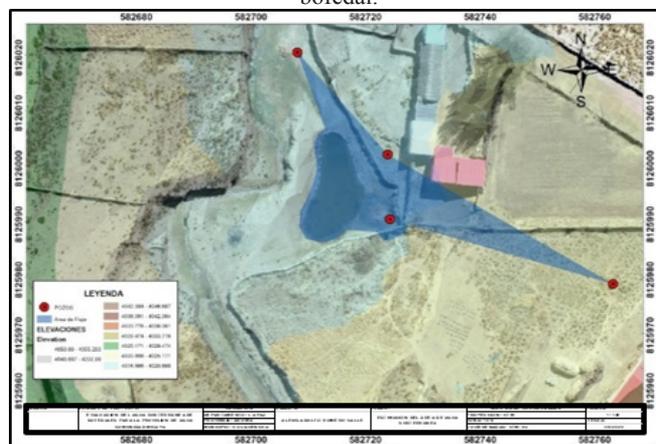


Fuente: Elaboración propia

### Análisis de la Dirección de Flujo del Bofedal

La Figura 17 muestra la ubicación de los pozos y representa un área estimada de la dirección de flujo, no se logró realizar una zonificación de isólinas, por la falta de información y condiciones a causa de la situación coyuntural mundial. Esta área estimada se asumirá como el área donde se encuentra un flujo de agua subterránea y bajo el criterio de que en los pozos siguen la pendiente del terreno y la existencia de agua en los en todos los puntos utilizados. El valor del área será utilizado para estimar la posible cantidad de agua subterránea bajo criterios conservadores.

Figura 17. Estimación del área de flujo de agua que alimenta el bofedal.



Fuente: Elaboración propia

### Cálculo y Análisis de los Parámetros Hidráulicos del Bofedal.

#### Cálculo de la Velocidad Real del Flujo.

Para obtener la velocidad de flujo de agua real, se partió de la Ley de Darcy obteniendo una velocidad de Darcy o velocidad de drenaje, multiplicando el gradiente hidráulico con la conductividad hidráulica obtenidos, este parámetro es afectado por el comportamiento del agua en el medio poroso, corrigiendo la velocidad con un valor de porosidad efectiva que depende del tipo de suelo que a sido clasificado como un limo con arena se adoptó una porosidad efectiva del 28% obteniendo la velocidad lineal promedio, por último se calculó la velocidad real del flujo multiplicando la velocidad lineal promedio por un coeficiente de tortuosidad, siendo un coeficiente empírico que oscila entre los 0.98–1.18.

$$V_D = i.K$$

$V_D$ : Velocidad de Darcy [m/día]  
 $K$ : Conductividad Hidráulica [m/día]  
 $i$ : Gradiente Hidráulico adimensional

$$\bar{V}_R = \frac{V_D}{n_e}$$

$\bar{V}_R$ : Velocidad lineal promedio [m/día]  
 $n_e$ : Porosidad eficaz adimensional  
 $V_D$ : Velocidad de Darcy [m/día]

$$V_R = \bar{V}_R \cdot \varepsilon$$

$V_R$ : Velocidad real del flujo [m/día]  
 $\bar{V}_R$ : Velocidad lineal promedio [m/día]  
 $\varepsilon$ : Coeficiente de tortuosidad adimensional

#### Cálculo del Caudal Unitario.

El caudal unitario fue calculado aplicando la Ley de Darcy utilizando los resultados de ensayos de laboratorio, campo y toda la información obtenida bibliográficamente.

$$Q = K \cdot i \cdot A = V_R \cdot A$$

$V_R$ : Velocidad real del flujo [m/día]  
 $A$ : Área de la sección (estrato efectivo) [m<sup>2</sup>]  
 $K$ : Conductividad Hidráulica [m/día]  
 $i$ : Gradiente Hidráulico adimensional

El valor obtenido en la Tabla 13 representa el volumen de agua que pasa por un área unitaria en el intervalo de tiempo de un día, este valor fue sometido a correcciones tomando en cuenta el medio en el que se encuentra.

Tabla 13. Cálculo del caudal unitario

GRADIENTE HIDRAÚLICO (I)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD O CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA K20 (m/día)	VELOCIDAD DE DARCY (m/día)
0.044	0.056	0.0025
VELOCIDAD REAL (m/día)	CAUDAL UNITARIO (m <sup>3</sup> /día/m <sup>2</sup> )	
0.0098	0.010	

Fuente: Elaboración propia

### Cálculo del Tiempo de Recorrido.

Se pudo determinar el tiempo de recorrido de una partícula de agua entre el POZO 1 y el POZO 2 conociendo la distancia y la velocidad real del flujo mediante la expresión.

$$T_R = \frac{d}{V_R}$$

$V_R$ : Velocidad real del flujo [m/día]

$d$ : Distancia entre puntos [m]

$T_R$ : Tiempo de recorrido [día]

El tiempo de recorrido entre el POZO 1 Y EL POZO 2 es aproximadamente de 10 años.

### Cálculo del Volumen de Agua del Área estimada de Flujo.

Se estimó el volumen de agua que se tiene circulando por toda el área estimada de flujo, haciéndose la suposición de que toda la sección está saturada y que toda el área mantiene el mismo espesor. La sección se definió como el perímetro del área estimada de flujo, multiplicándola por una altura de estrato de 3 [m], la longitud de 69.13 [m] se tomó del POZO 2 al POZO 3. Obteniendo un Tiempo de recorrido de aproximadamente 20 años.

$$\text{Vol} = Q \cdot A \cdot T_R$$

$\text{Vol}$ : Volumen de agua del área [m<sup>3</sup>]

$Q$ : Caudal unitario [m<sup>3</sup>/día.m<sup>2</sup>]

$A$ : Área de la sección (estrato efectivo) [m<sup>2</sup>]

$T_R$ : Tiempo de recorrido [días]

Se estimó el volumen de agua del área estimada de flujo, para generalizar la idea de cuánta agua puede haber en el área delimitada por la ubicación de los pozos. Obteniendo un volumen de 34.5 [m<sup>3</sup>].

### Cálculo del Caudal Efectivo de Todo el Acuífero del Bofedal.

En la Tabla 14 se puede observar el cálculo del coeficiente de transmisividad del acuífero, el espesor efectivo fue asumido como 10 [m] de acuerdo con el perfil estratigráfico obtenido por la tomografía eléctrica, obteniendo así un caudal por metro lineal de acuífero.

Tabla 14. Cálculo del caudal del acuífero del bofedal

ESPESOR DEL ACUIFERO (m)	VELOCIDAD REAL (m/día)	COEFICIENTE DE TRANSMISIVIDAD (m <sup>2</sup> /día)
10	0.01	0.10
LONGITUD DEL ACUIFERO (m)	CAUDAL EFECTIVO DE TODO EL ACUIFERO (m <sup>3</sup> /día)	CAUDAL EFECTIVO DE TODO EL ACUIFERO (l/s)
100	10	0.116

Fuente: Elaboración propia

### Fase de Diseño de la captación de agua subterránea del bofedal.

#### Cálculo de la Longitud de la Galería Filtrante.

El caudal máximo diario sería abastecido por una longitud de 331.2 [m] de galería filtrante, pero por cuestión de proteger el ecosistema del bofedal, se adoptó una longitud de galería de 100 [m] para captar el 30%.

$$L = \frac{Q_{\text{maxdiario}}}{Q_{\text{acuifero}}} = \frac{Q_{\text{maxdiario}}}{T}$$

$L$ : Longitud de la galería filtrante [m]

$Q_{\text{maxdiario}}$ : Caudal máximo demandado por un día [l/s]

$Q_{\text{acuifero}}$ : Caudal que ofrece el acuífero [l/s]

$T$ : Transmisividad [m<sup>2</sup>/día] → [l/s]

#### Cálculo del Área Abierta y Cantidad de Orificios.

Se procedió al cálculo del área abierta para definir el número de perforaciones por metro lineal de dren, cumpliendo las especificaciones en la NB689, se adoptó una velocidad máxima de entrada entre 0.05 [m/s] y 0.1 [m/s] y un coeficiente de contracción de entrada por orificio de 0.55.

$$A_{\text{abierta}} = \frac{Q_{\text{maxdiario}}}{V_e \cdot C_c}$$

$A_{\text{abierta}}$ : Área total del conjunto de orificios [m<sup>2</sup>]

$Q_{\text{maxdiario}}$ : Caudal máximo demandado por un día [l/s] → [m<sup>3</sup>/s]

$V_e$ : Velocidad de entrada [m/s]

$C_c$ : Coeficiente de contracción 0.55

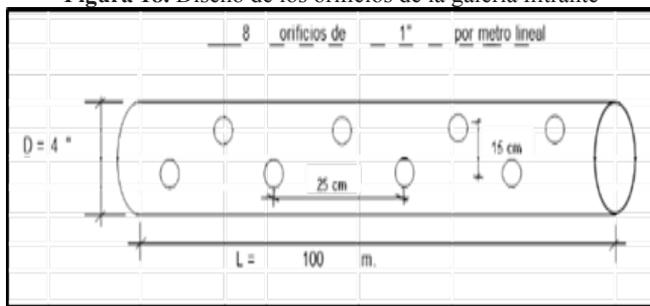
Se calculó el número de orificios por metro lineal de dren con el tamaño mínimo de orificio que recomiendo la NB689 que es de 1 [in].

$$N = \frac{A_{abierta}}{A_{orificio}}$$

$A_{abierta}$ : Área total del conjunto de orificios [m<sup>2</sup>]  
 $A_{orificio}$ : Área de un orificio [m<sup>2</sup>]  
 N: Número de orificios adimensional

Para garantizar la entrada de agua se determinó realizar 8 orificios de 1[plg], los orificios estarán dispuestos a los tres bolillos con una separación de 15 cm y 25 cm. Como se puede observar en la Figura 18.

Figura 18. Diseño de los orificios de la galería filtrante



Fuente: Elaboración propia

### Diseño del Forro Filtrante.

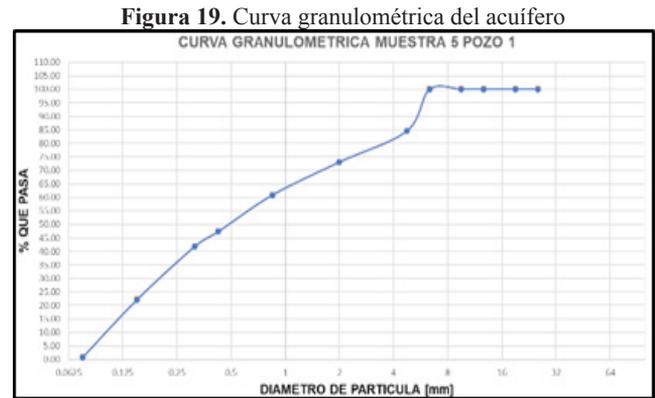
Se determinó el diámetro de las capas del forro filtrante según la Tabla 15 proporcionada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, en su Manual de Diseño de Galerías Filtrantes y la curva granulométrica de la MUESTRA 5 POZO1, el forro filtrante cumplió con las relaciones de Terzaghi y el U.S. Bureau of Reclamation, como se observa en la Figura 19.

Tabla 15. Diámetros de forro filtrante

CAPA	Diámetro (mm)		Altura (cm)
	Mínimo	Máximo	
1	0,5 – 2,0	1,5 – 4,0	5
2	2,0 – 2,5	4,0 – 15,0	5
3	5,0 – 20,0	10,0 – 40,0	10

Fuente: Manual de Diseño de Galerías Filtrantes  
 OPS-OMS Lima 2002.

Primera capa: Garantiza que la permeabilidad del filtro sea por lo menos 20 veces mayor que la del acuífero, lo cual permite un libre escurrimiento a través del filtro.



Fuente: Elaboración propia

$$C_1 = \frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{15} \text{ del acuífero}} \geq 5$$

$C_1$ : Diámetro de partículas para la primera capa del filtro [mm]  
 $D_{15}$ : Diámetro para el cual el 15% de las partículas son del menor tamaño [mm]

Cumpliendo la relación se adoptó el diámetro de 0.85 [mm] una Arena Gruesa que corresponde a una Malla N° 20.

Segunda capa: Asegura que las partículas del material del acuífero serán retenidas por el filtro y se evitará su taponamiento.

$$C_2 = \frac{D_{15} \text{ de la grava del forro filtrante}}{D_{85} \text{ del material granular del acuífero}} \geq 5$$

$C_2$ : Diámetro de partículas para la segunda capa del filtro [mm]  
 $D_{15}$ : Diámetro para el cual el 15% de las partículas son del menor tamaño [mm]  
 $D_{85}$ : Diámetro para el cual el 85% de las partículas son del menor tamaño [mm]

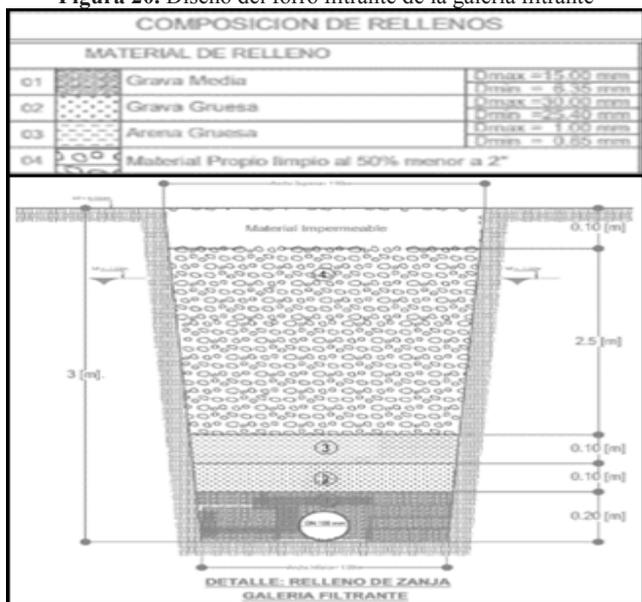
Cumpliendo la relación se adoptó el diámetro de 25.4 [mm] una Grava Gruesa que corresponde a una Malla de 1 [in].

Tercera capa: Impide que el material del filtro ingrese en la galería.

$$C_3 = \frac{D_{85} \text{ de la grava del forro filtrante}}{D_{orificio} \text{ diámetro del orificio}} \geq 2$$

$C_3$ : Diámetro de partículas para la tercera capa del filtro [mm]  
 $D_{orificio}$ : Diámetro de los orificios de la galería [mm]  
 $D_{85}$ : Diámetro para el cual el 85% de las partículas son del menor tamaño [mm]

Figura 20. Diseño del forro filtrante de la galería filtrante



Fuente: Elaboración propia.

Cumpliendo la relación se adoptó el diámetro de 6.35 [mm] una Grava Media que corresponde a una Malla de ¼ [in].

Se terminó de diseñar el sistema de agua para la provisión cumpliendo las normas nacionales NB 689 y NB 688 en términos hidráulicos de bombeo, conducción y almacenaje. Para su entrega a la comunidad beneficiada que apoyo en todo momento con mano de obra y gentileza.

En la Figura 20 se esquematiza la galería junto con el forro filtrante.

## DISCUSIÓN

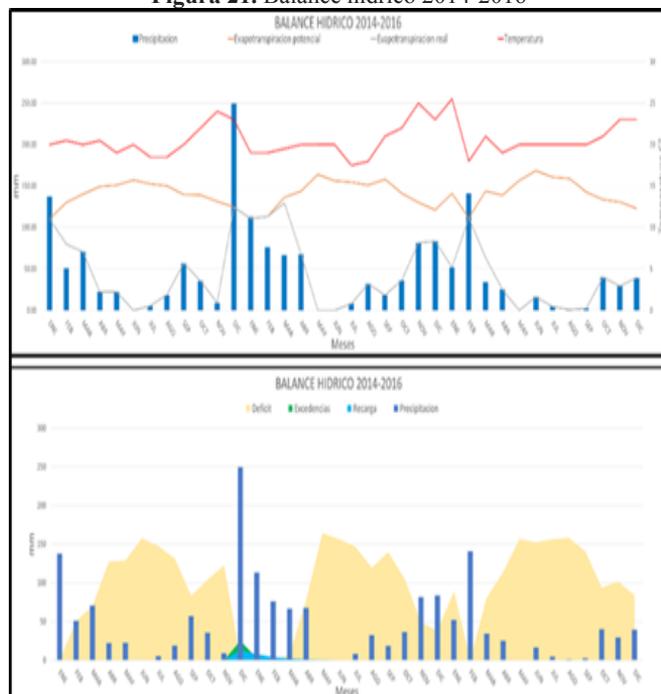
### Análisis de la Oferta de Agua Superficial.

La oferta de agua superficial según los datos calculados, dan un panorama del porque se propone el aprovechamiento del agua subterránea de bofedales, siendo esta la fuente de agua principal de los pobladores, el agua superficial es muy escasa pudiendo aprovecharse solamente el 14% de toda la precipitación que cae en la cuenca, el 86% de toda el agua se evapora por la gran cantidad demandada por las condiciones atmosféricas, el suelo, la vegetación o la infiltración al subsuelo. El Balance hídrico de 43 años del río Micaya Figura 21, donde se observa que se tienen dos periodos a lo largo

del año, un periodo seco y otro húmedo, el periodo seco (estiaje) comprende desde marzo hasta el mes de noviembre y el periodo húmedo comprende del mes de diciembre hasta febrero normalmente. Durante el periodo seco se presenta un déficit de agua en la cuenca, y se presentan excedencias cuando las precipitaciones logran superar las necesidades hídricas del suelo y las condiciones atmosféricas (evapotranspiración potencial) en el periodo húmedo.

La evapotranspiración es una variable muy determinante al momento de analizar el comportamiento hídrico de la cuenca, el periodo seco muestra los mayores niveles de evapotranspiración, y la época húmeda los menores, cabe destacar que el método de la FAO hace referencia a un cultivo hipotético de referencia de vegetación baja (pasto) bajo condiciones de humedad óptima. Esta condición generalmente no se da en zonas altiplánicas lo que genera una demanda hídrica más grande, la evapotranspiración en la cuenca varía en época húmeda desde 100 [mm], hasta valores de 200 [mm] en época seca, debido a la elevada radiación y al cambio climático se puede suponer la situación se ira agravando.

Figura 21. Balance hídrico 2014-2016



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la Oferta del Agua Subterránea del Bofedal Una vez realizado los ensayos, cálculos y análisis se

puede describir un comportamiento estimado de las aguas subterráneas que alimentan al bofedal, el área por donde pasa el flujo de agua tiene una reserva de agua de 34,495 [m<sup>3</sup>] de agua, y que esta reserva va fluyendo por un estrato limo-arenoso con presencia de arcilla, de un color rojizo a una velocidad de 0.010 [m<sup>3</sup>/día], el espesor de este estrato fue adoptado como la altura la sección saturada. Según el balance hidrológico realizado, el bofedal y el suelo del área estudiada demandan un volumen de 594 [m<sup>3</sup>/año] y 1.65 [m<sup>3</sup>/día] bajo condiciones óptimas de humedad. La cobertura natural del ecosistema de los bofedales ayuda a producir una baja evapotranspiración y una alta humedad que se traducen en una saturación permanente de los suelos, entonces facilita la existencia del agua en su interior y un escurrimiento que se puede llegar a aprovechar para la provisión de agua.

Por lo cual para aprovechar el agua sin afectar al bofedal se propone preservar el nivel de estático en época de estiaje y se podrá aprovechar en época de lluvias a través de una galería filtrante a un sistema de almacenamiento para el uso sostenible en el tiempo deberá monitorearse las precipitaciones en la cuenca, y el ciclo de vida del bofedal que actuara como una infraestructura natural, que puede impulsar su preservación, sustentabilidad y futura expansión valorando sus beneficios hídricos para la comunidad.

Figura 22. Fotografía POZO 1 (izquierda) y POZO 2 (derecha)



Fuente: Elaboración propia

Se realizó el cálculo del coeficiente de transmisividad del porcentaje de acuífero recomendado a utilizar, del 30% de todo el estrato efectivo disponible, obteniendo así un caudal de oferta de agua de 3 [m<sup>3</sup>/día].

Tabla 16. Cálculo del 30% de caudal del acuífero del bofedal

ESPESOR UTILIZADO DEL ACUIFERO (m)	VELOCIDAD REAL (m/día)	COEFICIENTE DE TRANSMISIVIDAD (m <sup>2</sup> /día)
3	0.01	0.03
LONGITUD UTILIZADA DEL ACUIFERO (m)	CAUDAL EFECTIVO DE TODO EL ACUIFERO (m <sup>3</sup> /día)	CAUDAL EFECTIVO DE TODO EL ACUIFERO (l/s)
100	3	0.0347

Fuente: Elaboración propia.

El estudio impulsa temas actuales de adoptar y estudiar un enfoque de interacción entre la infraestructura gris y verde, siguiendo un enfoque actual, práctico y ecológico para el sostenimiento de servicios ecosistémicos de agua dulce.

Desde un punto de vista práctico, nuestra integración de la infraestructura natural en las redes urbanas de suministro de agua es un paso para mejorar de manera sostenible el suministro de agua dulce a las ciudades. Los resultados indican que la infraestructura natural, como los bosques protegidos y los humedales, ya desempeña un papel importante en el sostenimiento de los flujos de agua dulce hacia ciudades, así como mejorar el rendimiento de la infraestructura construida existente. (Min Gon Chung, 2021).

## CONCLUSIONES

Se concluye que el estudio hidrológico marca una seria demanda hídrica en la cuenca y la comunidad de estudio, esta demanda es abastecida en su totalidad por el agua superficial solo en época de lluvia dejando así con necesidades de líquido vital a la comunidad en tiempo de estiaje.

El acuífero en el cual se encuentra uno de los bofedales de Micaya es del tipo acuitardo con características geológicas de tipo aluvial, que sirven como grandes retenedores de humedad, pero de poca transmisividad. Todos los parámetros hidráulicos y flujo de agua subterránea de los bofedales de Micaya indican que se puede utilizar para el provisionamiento de agua a través de una galería filtrante, de forma sustentable, mediante un sistema de control y monitoreo, tomando en cuenta el ciclo de vida del bofedal.

Los bofedales de Micaya son aptos para provisionar agua sustentable en toda época del año por su capacidad

de retener agua durante largos periodos de tiempo, esta va fluyendo (escurrimiento) en todo momento, al ser un gran almacén o represamiento natural, aunque en época secas sostenidas por largos periodos de tiempo el ecosistema del bofedal pueda ponerse en riesgo por un probable estrés hídrico, actualmente el consumo de la población es de 20 litros por habitante 4 [m<sup>3</sup>/día], con la implementación del proyecto se contribuirá en 3 [m<sup>3</sup>/día], llegando a dotar 30 litros por habitante, la demanda hídrica de la población es de 10 [m<sup>3</sup>/día] hasta el año 2040, y se cumplirá con el 70% de la demanda con uso racional y sustentable del bofedal con una monitoreo mensual en la comunidad.

Aumentando la calidad de vida de la comunidad, aportando a la reducción de la tasa de migración preservando la comunidad, y por consecuencia contribuyendo a la seguridad alimenticia del país.

### RECOMENDACIONES

Se recomienda tener un control del consumo de agua de la comunidad, monitorear que el agua del sistema siempre llegue en un nivel estático, tener conciencia del ciclo de vida del bofedal para definir los meses en que más se puede aprovechar el agua de este. También realizar un estudio geológico del área de la cuenca ya que esta se encuentra la final de la cuenca del Lago Titicaca una cuenca mucho más extensa, en busca fuentes de agua subterránea ya que existen bofedales en partes elevadas que no se encuentra en las zonas delimitadas como coluvio fluviales. Y realizar un estudio físico-químico del agua del bofedal de estudio, a pesar de que se encontró información de la calidad de agua, esta data de cinco años atrás del Instituto de Investigaciones Químicas Proyecto IDH: Manejo de la Caracterización del Recurso Suelo Agrícola y Agua para el Consumo Humano/Riego del Municipio de Colquencha que categorizo el agua como potable en época de lluvia presentando un alto nivel de nitritos en época seca, además de categorizar el uso del agua del bofedal apta para consumo humano, riego o agropecuario.

### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés con la presente investigación.

### AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a Dios, a nuestras Familias, al Instituto de Gas Natural- UMSA, a la Dirección Nacional de Investigación Ciencia y Tecnología de la Escuela Militar de Ingeniería, al Laboratorio de Ingeniería Civil a la Unidad de Investigación Ciencia y Tecnología, a la Carrera de Ingeniería Civil de la Escuela Militar de Ingeniería de la Unidad Académica La Paz.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, M. F. (2014). La economía del cambio climático en Bolivia: Validación de Modelos Climáticos. Monografía N°184. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington DC, EEUU.
- [2] ANGELONE, S., GARIBAY, M. T., & CAHUAPÉ CASAUX, M. (2006). Geología y Geotecnia Permeabilidad de los suelos. Universidad Nacional de Rosario, Rosario.
- [3] DELGADILLO, O., & PÉREZ, L. (2016). Medición de la infiltración del agua en el suelo. Cochabamba, Bolivia.
- [4] FREEZE, R. A., & CHERRY, J. A. (1979). Groundwater (Primera ed.). Nueva Jersey, EE. UU. Prentice-Hall. Inc.
- [5] GOMEZ PORTAL, S. (2016). "Hidrogeología en Bofedales alto Andinos con Fines de Aprovechamiento Hídrico en la Comunidad Rosaspata Vinchos – Ayacucho 2015". Tesis de Licenciatura. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA, Ayacucho, Perú.
- [6] IBÁÑES ASENSIO, S., MORENO RAMÓN, H., & GISBERT BLANQUER, J. M. (2011). Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c). Monografía. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [7] Infraestructura de Datos Espaciales del Estado Plurinacional de Bolivia (IDE-EPB). (1-31 de Abril-Junio de 2022). (IDE-EPB). Obtenido de GeoBolivia: <http://geo.gob.bo/portal/#catalog>

- [8] ITURRASPE, R. (2010). Las turberas de Tierra del Fuego y el cambio. Científico Tecnológico, Fundación Humedales / Wetlands International, Buenos Aires.
- [9] LORINI, H. (2014). Estrategia de Adaptación al Cambio Climático para Humedales Altoandinos. Científico Tecnológico, Cooperación Suiza en Bolivia, La Paz.
- [10] MÉNDEZ CÁNOVAS, P. J. (2016). Abatimiento de nivel piezométrico en acuíferos confinados con pozos de bombeo. Comparación entre la solución analítica y numérica mediante Modflow. Tesis de Pregrado. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.
- [11] MIN GON CHUNG, K. A. (2021). Natural Infrastructure in Sustaining Global Urban Freshwater Ecosystem Services. Nature Sustainability.
- [12] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA, M. (Julio 2018). Simposio Nacional de Aguas Subterráneas. Trabajo Presentado en el Primer Simposio Nacional Sobre Aguas Subterráneas y Aplicación de Tecnologías Alternativas en el Hotel Presidente. La Paz.
- [13] MOLINA SOLANO, D. E., & ZABALA LAOS, J. (2017). Diagnósticos Generales para las 50 Ciudades más Pobladas de Bolivia para la Implementación en la Gestión de Recursos Hídricos Subterráneos (preliminar). Simposio Nacional Sobre Aguas Subterráneas. La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
- [14] ROGRIGUEZ FERIA, D. (2015). Estudio de Técnica Electromagnéticas de Prospección del Subsuelo. Tesis Pregrado. Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.
- [15] SOLIZ FLORES, H. L. (2011). Hidrogeología del bofedal del Nevado Illimani. Tesis Msc. Universidad Mayor Real Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia.
- [16] SOLIZ FLORES, H. L. (2011). Proyecto Illimani “Fortaleciendo la Capacidad y Desarrollando Estrategias de Adaptación a los Fenómenos Climáticos en Comunidades de Montaña de la Cordillera Real de los Andes Centrales de Bolivia”. Científico Tecnológico, IDRC-CRDI, La Paz.
- [17] TORRES GAYTAN, D. E. (2013). Estudio Geofísico aplicado a la exploración minera en El Milagro de Guadalupe, Municipio de Guadalcázar, Estado de San Luis Potosí. Tesis Msc. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, México.
- [18] UNATSABAR/CEPIS, C. P. (2002). Manual de Diseño de Galerías Filtrantes. Manual. Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización Panamericana de la Salud, Lima, Perú.



**Alexis Adolfo Romero Calle.**

Nació en Potosí - Bolivia, es Ingeniero Civil titulado de la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica La Paz.



**Andrea Verónica Vera Chavez,**

Nació en La Paz – Bolivia, Ingeniera Civil titulada de la Universidad Mayor de San Andrés, Docente Investigador de la Escuela Militar de Ingeniería.