

**RECARGA DE SISTEMAS LENTICOS EN ZONAS DE PARAMO CASO DE
ESTUDIO: ORIGEN DE LA RECARGA DEL SISTEMA LAGUNA NEGRA,
LOCALIZADA EN EL PARAMO DE OCETA A PARTIR DE LA ELABORACION DE
UN MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL**

SEBASTIAN FERNANDO ALVARADO AMEZQUITA

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2022

**RECARGA DE SISTEMAS LENTICOS EN ZONAS DE PARAMO CASO DE
ESTUDIO: ORIGEN DE LA RECARGA DEL SISTEMA LAGUNA NEGRA,
LOCALIZADA EN EL PARAMO DE OCETA A PARTIR DE LA ELABORACION DE
UN MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL**

SEBASTIAN FERNANDO ALVARADO AMEZQUITA

Trabajo de Maestría

DIRECTOR DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

DIEGO FELIPE GOMEZ GUTIERREZ

Geólogo Ph.D

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2022

Nota de aceptación:

El trabajo de maestría “RECARGA DE SISTEMAS LENTICOS EN ZONAS DE PARAMO CASO DE ESTUDIO: ORIGEN DE LA RECARGA DEL SISTEMA LAGUNA NEGRA, LOCALIZADA EN EL PARAMO DE OCETA A PARTIR DE LA ELABORACION DE MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL” presentado por el estudiante Sebastian Fernando Alvarado Amezquita, para optar por el título de Magister en Hidrogeología Ambiental de la Universidad Antonio Nariño, cumple con todos los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Firma del director del Trabajo de Maestría.

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 22 de mayo de 2022

Promover la educación por el respeto y aprovechamiento sostenible del agua, es fundamental para la supervivencia colectiva, el desarrollo y la lucha contra la pobreza. Todos debemos contribuir a crear una cultura del agua basada en la comprensión del ciclo hidrológico, riesgos y efectos del cambio climático y la práctica de formas y tecnologías para usarla de manera equitativa y cuidadosa.

Ernesto Guhl Nanneti

La presente Tesis está dedicada a Dios, ya que gracias a su misericordia tuve la oportunidad de emprender este camino y culminarlo de forma exitosa.

A mis padres María Rosalba Y Jeremías, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

Esta tesis está impregnada del amor que siento hacia mi tía Sonia, gracias por su amor confianza, sus consejos, su apoyo y por siempre creer en mi en este camino de crecimiento profesional.

Gracias al profesor y amigo Diego Felipe Gómez Gutiérrez por sus enseñanzas, su paciencia y compartir ese vasto e inmenso conocimiento en materia de geología e hidrogeología, porque con ello un buscamos conocimiento, preservación y aprovechamiento del agua subterránea.

En especial a Paula, gracias por regresar a mi vida y siempre creer en mí, sus palabras fueron fortaleza en cada momento difícil. Este triunfo también es tuyo.

RESUMEN

El sistema léntico laguna negra se localiza en el departamento de Boyacá en jurisdicción de los municipios de Mongua y Monguí. Debido al incremento de las actividades de turismo sostenible en la región y a ello sumado que del sistema lentic laguna negra se abastecen los municipios en mención y las veredas aledañas al sector, se hace indispensable tener un conocimiento de la dinámica hidrogeológica de los sistemas de paramo y específicamente del fenómeno de recarga en las lagunas de tipo glaciar en zonas de paramo, para así tener un conocimiento previo de los procesos hídricos que intervienen y así establecer una mejor planeación en la conservación del recurso hídrico.

Dada la importancia de los ecosistemas estratégicos de paramos en Colombia y su especial interés en temas de conservación hídrica y ambiental, se plantea el problema a desarrollar con el caso de estudio específico para así poder tener un conocimiento de cómo es el comportamiento hídrico de recarga de la laguna negra y su estrecha relación con la dinámica hidrológica e hidrogeológica en zonas de paramo.

El sistema lentic laguna negra por ser una laguna glaciar localizada en zonas de alta montaña (paramo) son sistemas que posiblemente tengan aportes considerables tanto de precipitación como de escorrentía superficial y flujo de aguas subterráneas que lo recargan. Asimismo, al encontrarse en zonas de paramo este tipo de ecosistemas son generadores de agua por procesos puntuales que allí se dan. Es por ello, que para una planificación de los recursos y una preservación de este tipo de sistemas se hace necesario conocer técnicamente los aportes hídricos que tenga, caracterizarlos y cuantificarlos, para así determinar la disponibilidad en cuanto a su oferta hídrica y que esta investigación técnica sirva de base

para la toma de decisiones tanto ambientales como gubernamentales encaminados a su conservación y aprovechamiento.

El desarrollo del presente trabajo de maestría se sustentó con la implementación de un modelo hidrogeológico conceptual, en el cual se realizó la caracterización geológica del área y la posterior cartografía de las unidades geológicas en una base integrando información geológica, estratigráfica y estructural mediante el software ArcGIS. Dicha información fue complementada con la aplicación de tres puntos del método geofísico (sondeo eléctrico vertical-SEV) en el área, para así establecer la distribución de las capas en el subsuelo y sus posibles espesores a partir de las correlaciones lito geofísicas, los valores de resistividad obtenidos y datos geológicos analizados.

Por lo tanto, se determinó la existencia de litologías correspondientes al cretácico inferior asociados a la formación Une (Kiu) y Formación Fomeque (Kif) y depósitos cuaternarios correspondientes a depósitos de laguna (Ql) y depósitos coluvio glaciares (Qcg), la cuales se encuentran dispuestas en una estructura de tipo anticlinal erodada la cual define la geometría del área y la disposición de las capas.

El modelo hidrológico se realizó a partir de los datos hidrometeorológicos asociados a series de datos multitemporales para la estación más cercana del área de estudio, y mediante la obtención de parámetros de precipitación total mensual y temperatura mensual se realizó el balance hídrico de la zona mediante la metodología de Thornwaite en la cual se calculó la evapotranspiración potencial y se determinaron parámetros correspondientes a déficit, reservas y excedentes respectivamente.

Los parámetros hidráulicos de los materiales geológicos fueron obtenidos a través de la relación de diversos autores de parámetros correspondientes a porosidad, porosidad efectiva

y conductividad eléctrica para las litologías geológicas descritas en el modelo geológico. Para establecer el comportamiento hidráulico de los flujos al integrarse al modelo se realizó la red de flujo para el área juntos con sus líneas de flujo estableciendo las posibles direcciones del flujo teniendo en cuenta la topografía del área, gradiente hidráulico y las líneas equipotenciales obtenidas.

Para la construcción del modelo hidrogeoquímico se realizaron análisis hidroquímicos para cuatro muestras en la cuales se realizaron análisis de aniones y cationes mayoritarios a posibles fuentes que intervienen en la recarga del sistema lentic laguna negra y se determinaron mediante la interpretación de diagramas hidroquímicos parámetros relacionados con facies hidroquímicas y procesos de intercambio catiónico mediante el software Diagrammes. Como complemento al modelo hidrogeoquímico se realizó el análisis de isotopos estables de (Oxigeno 18 y Deuterio) a cuatro muestras para determinar las relaciones isotópicas de las posibles fuentes frente a una línea isotópica mundial y local para establecer el comportamiento y tendencia isotópica, y determinar posibles orígenes de las fuentes según sus relaciones isotópicas.

Por último, se realizaron modelos de mezcla a partir de la relación de la ecuación de balance de masa para dos periodos diferenciables como posibles escenarios (época de lluvia- época de estiaje) y determinar con las posibles fuentes y la relación de agua lluvia diagramas de procedencia, para así establecer el porcentaje de relación entre cada fuente para la generación de las aguas del sistema lentic laguna negra.

Finalmente, a los insumos obtenidos anteriormente se articula la información para así crear el modelo hidrogeológico conceptual (MCH) que permite conocer la dinámica

hidrogeológica del área, posibles interacciones de agua con el medio y la disposición hidrogeológica de las unidades caracterizadas.

Palabras Clave: Geología, Hídrica, Hidrogeológica, Hidrogeoquímica, Hidroquímica, Isotopos, Paramo, Preservación, Precipitación, Recarga, Red de flujo.

ABSTRACT

The lentic system laguna negra is located in the Boyacá department in jurisdiction of Mongua and Mongui municipalities. Due to the increment of sustainable tourism activities in the region and in addition to the fact that the laguna negra lentic system is provided the municipalities mentioned above and towns surrounding the sector, it is in essential to have knowledge about the hydrogeologic dynamic of the paramo system and specifically the recharge phenomenon in the glacial lagoons in the paramo zones, in order to have a previous knowledge of the hydric processes involved and in this way establish better planning in the conservation of hydric resources.

Considering the importance of strategic ecosystems of paramos in Colombia and their special interest in hydric and environmental conservation subjects, the problem to be developed with the specific case study is presented in order to have a knowledge about the hydric recharge behavior of the laguna Negra and its close correlation with the hydrological and hydrogeological dynamics in paramo areas.

The laguna negra lentic system being a glacial lagoon located in high mountain zones (paramo), it is a system that may have considerable contributions from both in precipitation and in surface runoff and groundwater flow that recharge it. Likewise, since they are located in paramo areas, these ecosystems are water generators due to specific processes that happens over there.

Therefore, for resource planning and prevention of this systems type it is necessary to know technically the hydric contributions, characterize and quantify them in order determinate the availability in terms of hydric supply and that this technical research serves

as a grounding to take environmental and governmental decisions related to its conservation and use.

The development of this master thesis was supported by the implementation of a conceptual hydrogeological model, in which the geological characterization of the area was performed and the subsequent mapping of geological units in a base integrating geological, stratigraphic and structural information using ArcGis software. This information was supplemented by the application of three spots of the geophysical method (vertical electrical sounding) in the area, to establish the distribution of the geological strata and their possible thickness based on the lithophysical correlations, resistivity values and the geological data analyzed.

Therefore, it was determined the existence of lithologies of the lower cretaceous associated to the Une formation (Kiu), Fomeque formation (Kif) and quaternary deposits related to lagoon deposits (Ql) and glacial outburst deposits (Qcg), which are arranged in an eroded anticline type structure that defines the geometry area and the layers disposition.

The hydrological model was made from hydro meteorological data associated with multi-temporal data series for the nearest station in the study area, and through obtaining the total monthly precipitation parameters and monthly temperature, the hydric balance in the area was carried out using the Thornwaite methodology in which potential evapotranspiration was calculated and parameters corresponding to deficit, reserves and surplus, respectively were determined.

The hydraulic parameters of the geological materials were obtained through the relationship of several authors corresponding to porosity, effective porosity, and electric conductivity for the geological lithologies described in the geological model. To establish

the hydraulic flows behavior integrated into the model, a flow network was created for the area together with its flow lines, establishing the possible flow directions taking into account the topography of the area, hydraulic gradient and the equipotential lines obtained.

For the construction of the hydrogeochemical model a hydrochemical analysis was carried out for four samples in which anion and majority cation analyses were performed on possible sources involved in the recharge of the laguna negra lentic system and parameters related to hydrochemical facies and cation exchange processes were determined through the interpretation of hydrochemical diagrams using Diagrammes software. As a complement to the hydrogeochemical model, the analysis of stable isotopes (Oxygen 18 and Deuterium) of four samples was performed to determine the isotopic ratios of the possible sources against a global and local isotopic line to establish the isotopic behavior and trend, and to determine possible origins of the sources according to their isotopic ratios. Eventually mixing models were created based on the relationship of the mass balance equation for two differentiable periods as possible scenarios (rainy season-drainage season) and to determine with the possible sources and the relationship of rainwater origin diagrams, in order to establish the percentage of relationship between each source for the generation of water from the laguna negra lentic system.

Finally, the information obtained from the above-mentioned inputs is used to create the conceptual hydrogeological model (HCM) that allows us to know the hydrogeological dynamics of the area, possible water interactions with the environment and the hydrogeological disposition of the characterized units.

Key Words: Dynamic, Geological, Hydrogeological, Hydrochemical, Hydric, Isotope, Paramo, Precipitation, Recharge, Flow network.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA.....	18
2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	20
3 OBJETIVOS.....	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4 MARCO TEÓRICO	22
5 MODELO GEOLOGICO.....	30
5.1 GEOLOGÍA REGIONAL	30
5.2 GEOLOGÍA LOCAL.....	32
5.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS COLUVIALES (QC).....	32
5.4 FORMACIÓN UNE (KIU).....	33
5.5 FORMACIÓN FOMEQUE (KIF).....	33
5.6 FORMACIÓN ARENISCAS DE LAS JUNTAS (KIAJ).....	34
6 MODELO HIDROLOGICO	35
6.1 CICLO DEL AGUA.....	35

6.2	CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA EN ZONAS DE ALTA MONTAÑA (ASOCIADAS A PARAMOS).....	37
6.3	BALANCE HÍDRICO.....	39
7	MODELO HIDRAULICO	42
8	MODELO HIDROGEOQUIMICO.....	44
8.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA	44
	Parámetros Químicos.....	44
8.2	PARÁMETROS FÍSICOS	45
	Color.....	45
	Olor.....	45
	Turbidez.....	46
	Temperatura.....	46
	Densidad.....	46
	Sólidos	47
	Conductividad.....	47
	Radiactividad.....	47
8.3	CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA.....	48
	Isotopos estables.....	49
	Isotopos estables oxigeno.....	49
	Isotopo estable deuterio.....	50
9	MARCO METODOLÓGICO	51

9.1	MATERIALES Y MÉTODOS	51
9.2	OBTENCIÓN DE DATOS.....	51
	Fase 1: Revisión bibliográfica	53
	Fase 2: Fase de campo	55
9.3	MATERIALES Y EQUIPOS	58
9.4	MODELO GEOLÓGICO.....	60
	Petrografía:	62
	Geoeléctrica:.....	62
	Equipo Geoamp 202	64
9.5	MODELO HIDROLÓGICO	66
9.6	MODELO HIDRÁULICO	67
9.7	MODELO HIDROQUIMICO	68
10	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	74
10.1	MODELO GEOLOGICO.....	74
	10.1.1 Perfiles Geológicos	82
10.2	GEOELECTRICA.....	84
10.3	SEV 1	86
10.4	SEV 2.....	90
10.5	SEV 3.....	93
10.6	MODELO HIDROLOGICO	95
	Balance Hídrico	97
10.7	MODELO HIDRAULICO	102

Parámetros hidráulicos conceptuales.....	103
10.8 MODELO HIDROGEOQUIMICO.....	113
Diagramas Hidroquímicos.....	113
Diagrama de Piper Hill.....	116
Diagrama de Schoeller Berkaloff.....	119
Diagrama de Stiff.....	121
Isotopos Ambientales.....	122
Isotopos Estables.....	122
Análisis y resultados físicos (pH y conductividad eléctrica).....	129
pH.....	129
Conductividad Eléctrica.....	131
Modelo de mezcla de isotopos estables.....	132
Época de lluvia.....	133
Suelo Orgánico- Agua lluvia.....	134
Época de Estiaje.....	136
Limitaciones de los modelos de mezcla.....	138
11 SINTESIS DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	139
12 CONCLUSIONES.....	150
13 RECOMENDACIONES.....	154
14 BIBLIOGRAFIA.....	156
15 ANEXOS.....	163

LISTA DE ANEXOS

A. ANEXO 1 164

B. ANEXO 2 165

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Área de Estudio.....	20
Figura 2. Distribución de Paramos en Colombia.....	25
Figura 3. Tipos de Laguna de Alta Montaña (Ecosistemas de Paramo).....	28
Figura 4. Geología Regional, Plancha Geológica 172.....	31
Figura 5. Ciclo Hidrológico del Agua Esquemático.....	37
Figura 6. Ciclo Hidrológico del Agua en Zonas de Paramo.....	38
Figura 7. Flujograma General para el Desarrollo del Proyecto	52
Figura 8. Localización de Puntos de Control y de Muestreo de Agua.	57
Figura 9. Equipos Utilizados en Campo.	58
Figura 10. Flujograma Modelo Geológico para el Desarrollo del Proyecto.....	61
Figura 11. Esquema Metodológico Geoelectrico Tipo Schullumberger	63
Figura 12. Equipos Utilizados en Campo	64
Figura 13. Aplicación del Método en Campo.....	65
Figura 14. Flujograma Modelo Hidrológico para el Desarrollo del Proyecto	67
Figura 15. Flujograma Modelo Hidráulico para el Desarrollo del Proyecto	68
Figura 16. Fotos Metodológicas para Ensayos Físicoquímicos.....	70
Figura 17 Fotos Metodológicas para Muestras Isotópicas.	72

Figura 18. Flujograma Modelo Hidrogeoquímico para el Desarrollo del Proyecto.	73
Figura 19. Preparación de la Muestra Petrográfica Microscópica.....	77
Figura 20 Microfotografía 1 Identificación de Minerales Característicos.....	77
Figura 21. Microfotografía 2- Microfracturas Abiertas Sin Relleno	78
Figura 22. Punto de Control Geológico 1	79
Figura 23. Punto de Control Geológico 2	79
Figura 24. Punto de Control Geológico 3	80
Figura 25. Punto de Control Geológico 4	80
Figura 26. Punto de Control Geológico 5	80
Figura 27. Punto de Control Geológico 6.....	81
Figura 28. Mapa Geológico Local Área de Estudio.	82
Figura 29. Perfil geológico A-A'	83
Figura 30. Perfil geológico B-B'	83
Figura 31. Perfil geológico C-C'	84
Figura 32. Localización de Sevs.	86
Figura 33. Curva de Resistividad Aparente Sev 1	88
Figura 34. Valores de Resistividad Asociados al Sev 1	88
Figura 35. Curva de Resistividad Aparente Sev 2	91
Figura 36. Valores de Resistividad Asociados al Sev 2	91

Figura 37. Curva de Resistividad Aparente Sev 3	94
Figura 38. Valores de Resistividad Asociados al Sev 3	94
Figura 39 Balance Hídrico Estación Mongua.....	101
Figura 40 Red de Flujo.	110
Figura 41 Diagrama de Recarga por Precipitación, Direcciones de Flujo y Descarga.	112
Figura 42 Diagrama de Piper Hill.....	117
Figura 43 Diagrama de Schoeller Berkaloff.....	120
Figura 44 Diagrama de Stiff	121
Figura 45 Interpretación de datos isotópicos frente a la línea isotópica para Colombia	126
Figura 46. Valores de pH de las Muestras Colectadas en el Páramo de Oceta	130
Figura 47. Valores de conductividad eléctrica de las muestras colectadas en el páramo.	131
Figura 48 Diagrama de mezcla en época de estiaje	137
Figura 49 Mapa Hidrogeológico.....	145
Figura 50 Perfil Hidrogeológico A-A'	147
Figura 51 Perfil Hidrogeológico A-A'	147
Figura 52 Perfil Hidrogeológico A-A'	148
Figura 53 Modelo Hidrogeológico Conceptual	149

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características Técnicas del Equipo	64
Tabla 2. Puntos de Control.....	79
Tabla 3. Características Principales de los Sevs Implementados	84
Tabla 4. Correlación Litogeofísica Sev1	89
Tabla 5. Correlación Litogeofísica Sev2	92
Tabla 6 Correlación Litogeofísica Sev3	95
Tabla 7. Datos de Estación Hidrometeorológica Utilizada para el Cálculo de Balance Hídrico	98
Tabla 8. Datos de Precipitación y Temperatura Utilizados para el Cálculo de Balance Hídrico	98
Tabla 9. Cálculo de Evapotranspiración Potencial y Parámetros de Cálculo para el Balance Hídrico	100
Tabla 10 Cálculo de Parámetros Intrínsecos del Balance Hídrico.....	101
Tabla 11. Valores de Porosidad para los Materiales Geológicos Descritos	104
Tabla 12. Valores de Porosidad Eficaz para los Materiales Geológicos	105
Tabla 13 Valores de Conductividad Hidráulica para los Materiales Geológicos	107
Tabla 14 Caracterización de los Reservorios Muestreados para el Análisis Isotópico.	114

Tabla 15 Valores de Aniones, Cationes y Parametros Fisicoquimicos Obtenidos	114
Tabla 16. Principales Caracteristicas de Muestreo Isotópico	123
Tabla 17. Resultados Obtenidos del Analisis Isotópico.....	125
Tabla 18 Caracterización Hidrogeológica de las Unidades Presentes en el Area de Estudio	146

1 INTRODUCCIÓN

En Colombia la preservación de ecosistemas estratégicos como los páramos se ha convertido en un eje fundamental para la planificación del recurso hídrico que genera en este, así como la generación de conciencia ambiental sobre el cuidado y la importancia de esto dentro del desarrollo urbano y rural en el marco de abastecimiento de recursos. Gracias a esto el gobierno nacional ha impulsado e implementado políticas ambientales relacionadas con el cuidado de esto frente a actividades antrópicas, agroindustriales y de expansión urbana que puedan tener un impacto significativo dentro de la oferta ecosistémica que se genere en estos ecosistemas de alta montaña. Entre los impactos más relevantes que afectan los páramos se encuentran el uso de fertilizantes industriales en cultivos, y afectación a la flora propia de este tipo de ecosistemas (frailejones) así como la expansión urbanística asociada a viviendas, trazado de vías y proyectos ingenieriles de gran escala. El déficit en el abastecimiento de agua para centros poblados y rurales se convierte en una problemática pública que mediante un conocimiento técnico de las relaciones y procesos que desarrollan en los páramos podría ser un punto de partida para una mejor planeación y un aprovechamiento de los recursos naturales.

La importancia de los páramos específicamente para el territorio colombiano se centra en que el 70% del agua que utiliza la nación proviene de dichos ecosistemas (Ministerio de medio Ambiente, 2022) y que allí es donde la mayoría de los sistemas loticos (ríos, quebradas, drenajes) tienen su nacimiento, como resultado de la baja evapotranspiración que existe en los páramos hay un gran excedente de agua, alimentando los ríos que descienden

hacia otros cuerpos de agua. Junto a una alta producción de agua (Buytaert et al., 2002) y la capacidad de regulación de agua del páramo.

En el caso específico de Colombia la mayor parte de la extensión geográfica de los páramos se encuentra localizada en el departamento de Boyacá con el 18.3% destacándose la mayor extensión de paramos húmedos (García Pinzón, 2022), por ende, estudiar de forma técnica estos singulares ecosistemas en temas relacionados con hidrogeología permitirá tener un mejor concepto de cómo es la dinámica de precipitación, procesos de recarga y descarga tanto de sistemas lenticos como loticos. El páramo de Oceta se encuentra al nororiente del departamento de Boyacá a 22 kilómetros de la ciudad de Sogamoso y se encuentra localizado en inmediaciones de los municipios de Mongua y Monguí Boyacá (Sistema de información turística de Boyacá, 2021), en las últimas décadas estos dos municipios se han visto afectados debido a problemas en el abastecimiento del recurso tanto para las cabeceras urbanas como para gran parte de sectores rurales que se benefician de este importante recurso (el Diario, 2020) y ello sumado al auge del turismo en esta región debido al paramo de Oceta se convierten en grandes factores que llevan a una investigación avanzada en materia de recursos hídricos para así poder tener una planificación sobre este ecosistema y establecer lineamiento que permitan tener un mayor aprovechamiento del recurso.

Dentro del páramo de Oceta se encuentra un sistema lenticos llamado laguna negra, esta se caracteriza por ser una laguna de tipo glaciar de morfología oval oblonga, la cual se caracteriza por ser un reservorio de las aguas presentes en el sistema de paramo, así como de captar la precipitación que se presenta en dicho lugar.

El propósito de la presente investigación es a través de herramientas asociadas a las geociencias (Hidrogeología) realizar un modelo hidrogeológico conceptual que permita

determinar la dinámica hídrica que soporta el origen de la recarga del sistema lentic laguna negra donde se pueda validar el aporte de los reservorios de agua superficial, subsuperficial y subterránea para así dar respuesta de cómo es el génesis de esta y a futuro poder establecer lineamientos que permitan tener una eficiente planificación y conservación del recurso.

2 PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

Los páramos en Colombia ocupan el 1.3% del territorio continental colombiano y a nivel mundial tiene el 49% de la totalidad de este tipo tan particular de ecosistema, localizados en la cordillera de los andes, particularmente para el caso de Colombia por su localización en la zona de trópico y las características orográficas tan particulares se convierten en ecosistemas de importancia prioritaria en temas de conservación hídrica y ambiental (Garavito Rincon, 2015), gracias a que los páramos proveen de agua al 70 % de la población (Ministerio de medio Ambiente, 2022). El gobierno y entidades de protección ambiental han decidido intensificar su protección para una correcta gestión del recurso hídrico, pese a estos esfuerzos de entidades gubernamentales y académicas existe mucho desconocimiento de las características hidrogeológicas de las áreas de paramo en Colombia y por ende una falta de sentido de pertenencia y protección hacia tan frágiles ecosistemas.

Un conocimiento técnico en materia de hidrogeología en áreas de paramo permitirá generar más conciencia en conservación de estos ecosistemas, tener un conocimiento previo de los procesos hídricos que intervienen y así establecer una mejor planeación en la conservación del recurso hídrico. Los sistemas lenticos presentes en los páramos a futuro podrían considerarse como fuentes abastecedoras de agua para poblaciones con problemas de calidad de agua potable, tal es el caso de las zonas urbanas y rurales de los municipios de Monguí y Mongua Boyacá donde se presentan problemas en la calidad de aguas las cuales no están cumpliendo con los estándares de saneamiento básico (el Diario, 2020), por ende un seguimiento y monitoreo a estos sistemas lenticos permitirá conocer la generación,

disposición de estas aguas para así a futuro tener fuentes alternativas de abastecimiento de agua potable para las poblaciones aledañas.

Debido al incremento de las actividades de turismo sostenible en la región y en el departamento de Boyacá, la adquisición de un pensamiento científico en hidrogeología determinara un cambio en la visión socioambiental del turista frente al funcionamiento del páramo y los procesos que allí se desarrollan.

Debido a las problemáticas anteriormente descritas se hace necesario buscar fuentes de abastecimiento del recurso hídrico que permitan cumplir con las necesidades de las poblaciones aledañas, por ello el sistema lentic laguna negra juega un papel fundamental en el desarrollo del presente estudio debido a que esta laguna de tipo glaciar podría convertirse a futuro en un sistema de abastecimiento controlado para las poblaciones aledañas y en si convertirse en un modelo de aprovechamiento del recurso en situaciones donde se impacte el abastecimiento del recurso.

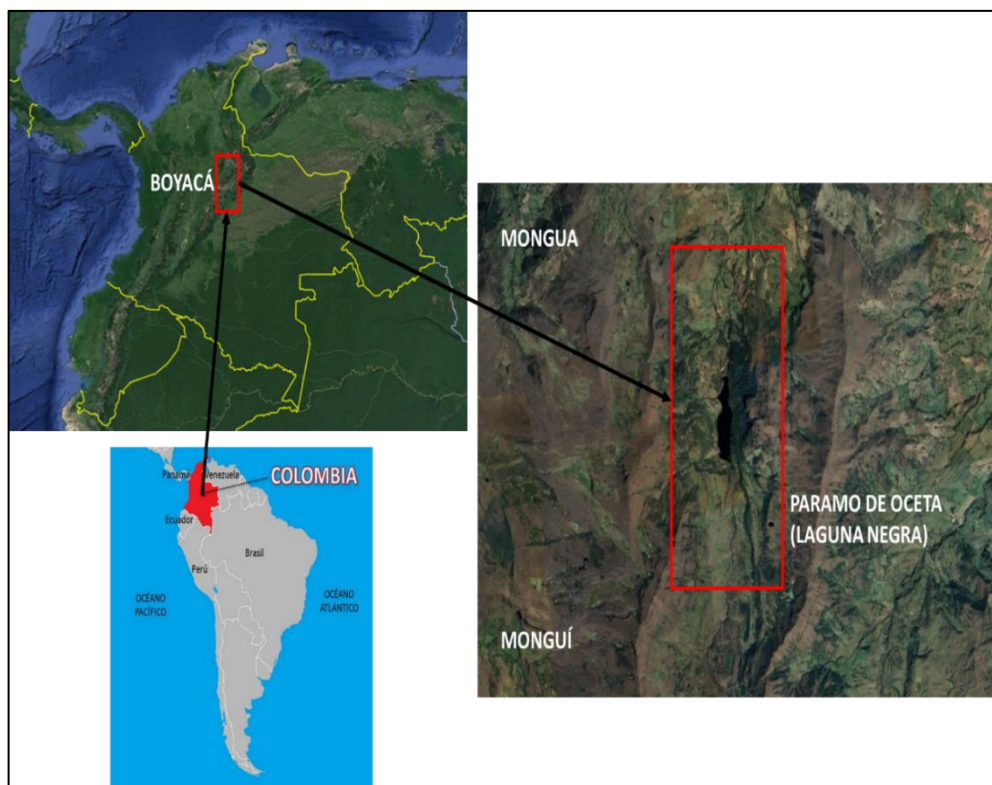
El proyecto académico de investigación desarrollado corresponde a la implementación de un modelo hidrogeológico conceptual en el sector conocido como laguna negra que se encuentra enmarcado dentro del sistema de paramo (paramo de Oceta), jurisdicción del municipio de Mongua, departamento de Boyacá.

El presente trabajo pretende dar un aporte al conocimiento geocientífico con relación al comportamiento hidrogeológico del sistema lentic (laguna negra) localizada en un sistema de paramo, dada la importancia que representa en estos lugares la confluencia de aportes provenientes de reservorios de origen atmosférico, superficial, subsuperficial y subterráneo.

2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

Geográficamente el área de influencia del proyecto de investigación se ubica en el centro oriente del departamento de Boyacá en las coordenadas geográficas $5^{\circ}42'40.45''N$ y $72^{\circ}47'20.32''W$ con una altitud promedio de 3500 metros sobre el nivel del mar, localizada a 241 kilómetros de la Ciudad Capital de Bogotá y 18 kilómetros del municipio de Mongua Boyacá (Figura 1). Orográficamente se encuentra localizada sobre la cordillera oriental colombiana la cual presenta una vergencia de dirección preferencial suroeste-noreste y sobre un valle glaciar amplio, afectado por deformaciones continuas (pliegues) y discontinuas (fracturas) evidenciando actividad tectónica.

Figura 1.
Localización del Área de Estudio



Nota. Fuente, <https://www.saberespractico.com/geografia/limites-de-Colombia>

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el origen de la recarga del sistema laguna negra localizada en el páramo de Oceta a partir de un modelo hidrogeológico conceptual.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un modelo geológico detallado que permita conocer la configuración estratigráfica del área de estudio, así como la disposición geológica de las rocas y estructuras asociadas.
- Elaborar un modelo hidrológico que determine la infiltración o recarga al acuífero asociado al área de estudio.
- Sintetizar a partir de información secundaria las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos presentes en el área de estudio.
- Elaborar la caracterización hidrogeoquímica, con el fin de determinar los tipos de agua presentes en los reservorios o tipos de fuentes asociados al sistema lentic (Laguna Negra) y a partir de este determinar los tipos de aguas presentes en los diferentes reservorios asociados al sistema lentic (Laguna Negra).
- Aplicación de isótopos ambientales de δD y $\delta^{18}O$ con la finalidad de comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico (Laguna Negra) determinando características relacionadas al origen del agua, zonas de recarga, direcciones de flujo, conexiones y posibles patrones de mezcla entre las diversas fuentes de agua.

4 MARCO TEÓRICO

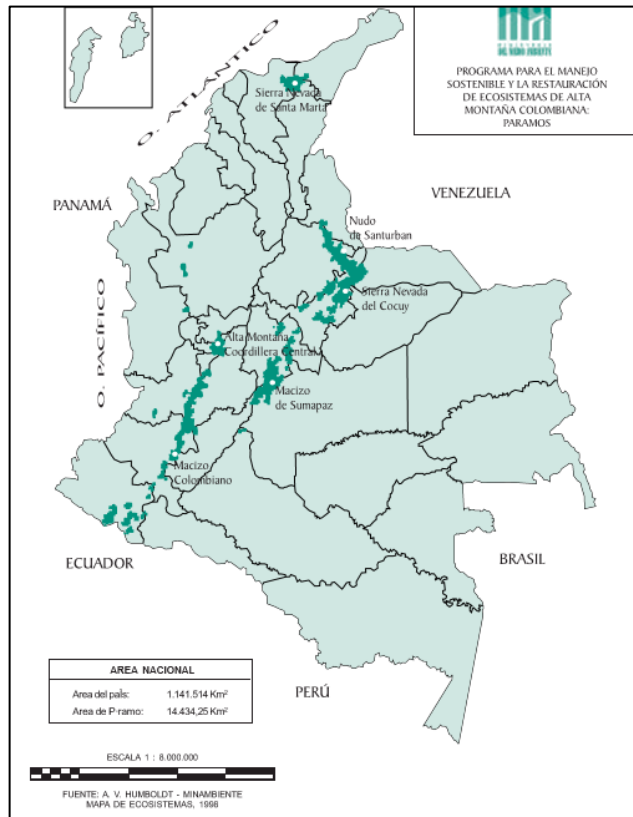
Los páramos se originan en las zonas con mayor altitud de las cumbres andinas suramericanas y comienzan donde terminan las lengüetas del bosque alto andino (Ojeda et al., 2001). Este tipo de ecosistemas se pueden identificar como de alta montaña de trópico húmedo dominado por una vegetación especial asociada a matorrales y arbustos con altitudes clasificadas entre los 3.000 y 5.000 msnm(Ovacen, 2015). Un ejemplo fehaciente de este tipo de ecosistemas estratégicos es su ocurrencia y localización sobre la cordillera de los Andes, formando así un corredor interrumpido que cruzan las grandes cadenas montañosas de Sur América.

No obstante, la diversidad de este tipo de ecosistemas de alta montaña está estrechamente ligada a las distintas características y asociaciones relacionadas con el tipo de vegetación, parámetros climáticos y de suelo, las variables de latitud, altitud, humedad. De igual manera juega un papel fundamental la conservación, el grado de ocupación y el uso del ecosistema. Estos ecosistemas se consideran estratégicos ya que ambientalmente regulan los ciclos del agua asociados a la distribución hídrica al permitir la transformación de la neblina en recurso hídrico (precipitación horizontal), generando así el nacimiento de ríos y lagos. En ese sentido los sistemas fluviales de los países andinos septentrionales nacen en el páramo(Hofstede et al., 2014), desde un ámbito social los páramos son un eje fundamental en el abastecimiento de agua potable, y son primordiales para el desarrollo hidroeléctrico de una nación y los sistemas de riego, tal importancia se da en gran medida al potencial hidrológico y de regulación del recurso que posee el páramo (Hofstede et al., 2014).

Actualmente los páramos están protegidos por políticas ambientales gubernamentales y catalogados como ecosistemas estratégicos debido a la errónea implementación de actividades económicas asociadas a agricultura, ganadería extensiva, plantaciones forestales, un inadecuado manejo del agua y el continuo desarrollo urbanístico, este tipo de actividades mencionadas generan escenarios de riesgos para la conservación de dichos ecosistemas y sus servicios ecosistémicos. Sumado a esto el impacto de los fenómenos asociados al cambio climático (aumento súbito de la temperatura global y variabilidad en la ocurrencia de las precipitaciones) se consideran un agravante para el aumento de esta particular condición. Debido a la incidencia del cambio climático en diversas zonas altitudinales está determinado con certeza que el impacto de este fenómeno se acentúa más en los sistemas de alta montaña que en otros ecosistemas tropicales (Hofstede et al., 2014). Es por ello que los páramos son considerados ecosistemas frágiles y especialmente vulnerables a los impactos negativos que trae consigo el cambio climático, especialmente cuando se presentan aumentos incontrolados en la temperatura, la cual permite que el flujo base de las diversas fuentes hídricas que allí se presentan fluctúen negativamente y se presente una variabilidad de caudales en cuerpos de agua que tienen su origen en los páramos. Los impactos del cambio climático en los páramos afectan de forma directa la calidad de vida de las poblaciones y la disponibilidad a corto y largo plazo del recurso hídrico de las poblaciones humanas que dependen de este ecosistema, no obstante las poblaciones que geográficamente distan de este tipo de ecosistemas debido a su distancia geográfica fuera de estos espacios, se benefician de forma indirecta de sus funciones ecosistémicas en temas esenciales como el abastecimiento de agua dulce (Hofstede et al., 2014).

Por ello los principales esfuerzos giran en torno a cómo se distribuirá este tipo de ecosistemas en el futuro y como se dará la interacción entre los procesos de cambio climático, procesos socioeconómicos y como el páramo seguirá cumpliendo con sus funciones ecosistémicas (Hofstede et al., 2014) a nivel hidrológico e hidrogeológico.

La distribución geográfica de los páramos en el territorio colombiano presenta una concentración marcada sobre la cordillera oriental y en relictos como la sierra nevada de Santa marta; seguido a esto en segundo lugar se encuentra la cordillera central con algunas ocurrencias de forma atípica y aislada sobre la cordillera occidental (Ojeda et al., 2001) como se muestra en la figura 2. Estimaciones científicas realizadas por el Instituto Alexander von Humboldt para el caso específico de Colombia han permitido determinar que aproximadamente el 2,6% de la superficie total del territorio corresponde a ecosistemas de paramo. No obstante, en el mapa general de Ecosistemas de Colombia (1998) el 1.3% del territorio colombiano con una extensión superficial de 1´379.000 Ha se relaciona a sistemas paramunos. Por otro lado, los resultados obtenidos por Geoingeniería-MMA (1999), correlacionan la extensión de los páramos en Colombia a 1´443.425 Ha. Equivalente al 1.3% aproximadamente (Aguirre et al., 2002).

Figura 2.*Distribución de Paramos en Colombia*

Nota. Fuente, Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de alta montaña colombiana.

A lo largo de la historia colombiana los páramos han sido objeto de debate en cuanto a su protección ambiental respecto a actividades económicas y extractivas que mitigan su oferta ecosistema especialmente en la oferta y demanda hídrica, esto se encuentra ligado a la búsqueda de una proporción equitativa entre la conservación de estos ecosistemas estratégicos y el bienestar de las poblaciones, gracias a esto las autoridades gubernamentales colombianas plantearon la llamada ley de paramos (proyecto de ley 233) que busca legislar a favor de la protección y conservación de los 36 páramos colombianos y como realizar un

uso racional de los recursos. El proyecto legislativo corresponde a la articulación jurídica de 33 artículos que propone salvaguardar a los ecosistemas paramunos de proyectos de gran impacto que correspondan una afectación de estos ecosistemas estratégicos, y defina lineamientos para la delimitación de estos particulares sistemas de alta montaña, construcción de un plan de manejo ambiental para el cuidado y conservación y por último la implementación de este con fines de mitigar y preservar (Periódico el tiempo, 2018).

Para el caso específico del departamento de Boyacá la extensión superficial de paramos húmedos corresponde al 18.3% del total del territorio nacional, esto lo cataloga como el departamento con mayor distribución y representatividad de este tipo de ecosistemas tan particulares, seguido a este se encuentra el Departamento de Cundinamarca con un 13.3%, Cauca con 8.1%, Tolima 7.9% y Nariño 7.5% respectivamente.

En cuanto a entes ambientales que ejerzan actividades de protección de los recursos naturales en los páramos se encuentra que la corporación autónoma regional de Boyacá (CORPOBOYACA) agrupa la mayor cantidad de extensión de paramos con un 17.9%, en orden de distribución le siguen CORMACARENA con un 10.1%, CORPORINOQUIA 9.0%, CRC 8.1%, CORTOLIMA 7.8%, CORPONARIÑO 7.5% y la CAS 6.8% (Aguirre et al., 2002).

La importancia de los páramos específicamente para el territorio colombiano se centra en que el 70% del agua que utiliza la nación proviene de dichos ecosistemas (Ministerio de medio Ambiente, 2022) y que allí es donde la mayoría de los sistemas loticos (ríos, quebradas, drenajes) tienen su nacimiento, como resultado de la baja evapotranspiración que existe en los páramos se presenta un superávit de recurso hídrico, aportando flujo a los ríos que hidrológicamente discurren y se conectan con otros cuerpos de agua. El resultado de ello

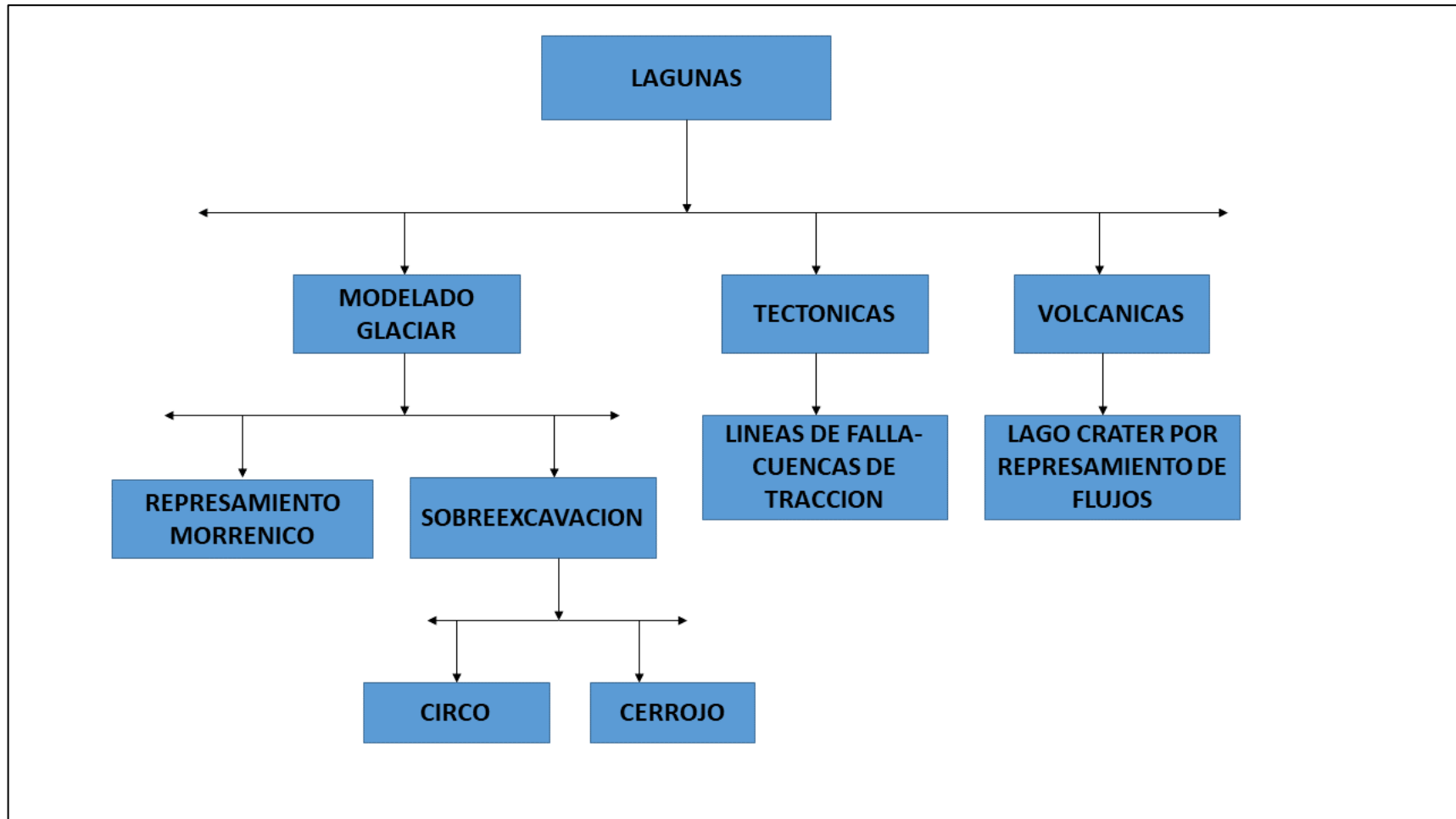
son las características hídricas tan particulares que poseen los páramos en relación con producción de agua, regulación de los recursos y el aporte de flujo base a lo largo del año hidrológico. (de Bièvre et al., 2002).

Las lagunas de alta montaña (sistemas lenticos de paramo) se dan como resultado de los procesos geológicos del medio ocurridos en la última glaciación modelados glaciares heredados de la última glaciación, este proceso se dio en los últimos 25000 años a medida que los glaciares fueron recediendo. Las superficies del terreno o bien dicho las geoformas de tipo glaciar que se han dado tienen su génesis estrechamente relacionada con los glaciares y su ocurrencia en este tipo de ambientes y el aporte de un fuerte componente geológico asociado a una actividad tectónica y volcánica que da como resultado las características tan particulares de la cordillera de los andes y de la mayor parte de las lagunas de alta montaña (glaciaricas). (Flórez & Ríos, 1998) (Figura 3).

La importancia de estos sistemas lenticos se fundamenta en el papel que cumplen dentro del sistema hidrológico e hidrogeológico, desde el punto de vista hidrológico estos cumplen el papel de reguladores de las cuencas hidrográficas altas y su alta capacidad para amortiguar aumentos subidos de caudales y fenómenos de carga y transporte de material. Es por ello que con su capacidad hidrológica y su reserva de recurso hídrico este tipo de lagunas de alta montaña permiten tener una reserva de recursos considerable así ser susceptible a fenómenos de sedimentación descontrolada producto de la actividad antrópica asociada a actividades agropecuarias la cual incide de forma negativa en una disponibilidad del recurso (Flórez & Ríos, 1998).

Figura 3.

Tipos de Laguna de Alta Montaña (Ecosistemas de Paramo).



Nota. Fuente, Cuadernos de Geografía, Vol. VII, No. 1-2,1998.

El área objeto del desarrollo del presente estudio corresponde al paramo de Oceta, esta comprende una extensión territorial de 4.300 Ha que comparten los municipios de Mongua, Monguí y Sogamoso. En el páramo de Oceta nacen más de siete ríos entre las que se destaca el Rio Sasa que alimenta al Rio Chicamocha y el Rio Cravo Sur, Así mismo se encuentra su principal sistema lentic (Laguna de alta montaña) llamado Laguna negra que es el eje principal para el desarrollo del presente estudio, ya que para dar solución a la problemática investigativa de cómo se recargan los sistemas lenticos en zonas de paramo se desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual el cual integra 4 modelos: Modelo Geológico, Modelo Hidrológico, Modelo Hidráulico y Modelo Geoquímico y con los resultados obtenidos poder determinar que mecanismo permite la recarga del sistema lentic laguna negra.

5 MODELO GEOLOGICO

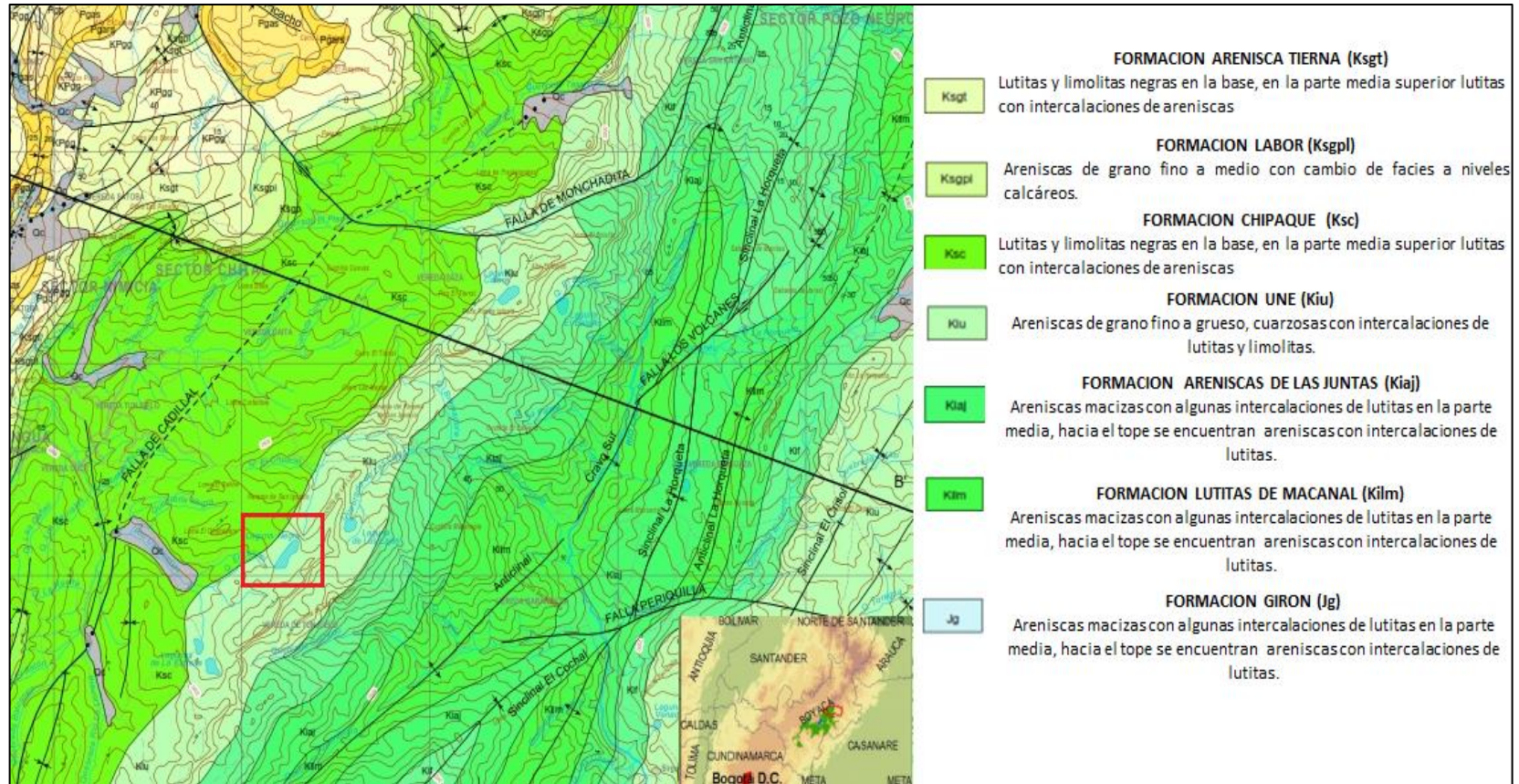
5.1 GEOLOGÍA REGIONAL

A nivel regional la geología está dispuesta por la plancha geológica escala 1:100.000; plancha 172 Paz del Rio la cual se dispone en el departamento de Boyacá en la zona media de la cordillera oriental, litológicamente el área se conforma en su mayoría por rocas sedimentarias asociadas a un ambiente de depositacion marino- continental con edades que oscilan entre periodos geológicos comprendidos entre el devónico al holoceno, no obstante se presenta una pequeña variabilidad litológica correspondientes a rocas ígneas de tipo intrusivas compuestas por una sucesión que va desde cuarzo-sienitas hasta granodioritas con edades asociadas desde el cámbrico hasta el jurásico respectivamente. la composición de las rocas metamórficas corresponde a un protolito sedimentario resultados de fenómenos de metamorfismo de tipo regional con principal incidencia hacia finales del periodo proterozoico. De igual forma se presentan fenómenos de metamorfismo de contacto con una estrecha relación a procesos de intrusión y deformación ocurridos durante el periodo de tiempo comprendido entre el ordovícico hasta el devonico (Ulloa et al., 2003).

A continuación, en la figura 4 se relacionan y describen mediante el mapa geológico regional las unidades geológicas dispuestas de forma regional para el área de estudio paramo de Oceta- sector laguna negra en inmediaciones de los municipios de Mongua y Monguí departamento de Boyacá:

Figura 4.

Geología Regional, Plancha Geológica 172



Nota. Fuente, Servicio Geológico colombiano (SGC-2003).

5.2 GEOLOGÍA LOCAL

Las principales características geomorfológicas y los rasgos fisiográficos del área de influencia del presente proyecto investigativo se asocian a eventos tectónicos correspondientes a levantamientos orogénicos de los andes colombianos ocurridos hace 3,5 millones de años durante finales del periodo terciario (Dulcey López & Mancipe Jiménez, 2013). La estructura geológica definitiva del área se dio hace 1,8 millones de años durante el pleistoceno en el cual se presentaron eventos geomorfológicos de suma importancia la cual dio el rasgo característico del área (Municipio de Siachoque, 2005). Desde el punto de vista tectónico-estructural a nivel regional los principales rasgos están configurados por la acción tectónica la cual incidio en el modelamiento de esta zona, donde se presentan importantes fallas geológicas.

5.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS COLUVIALES (QC)

Estos se encuentran asociados a depósitos de talud y depósitos de derrubios; litológicamente compuestos por diferentes materiales geológicos de variabilidad heterogénea y mal sorteamiento, donde es característicos encontrar bloques angulares.

La disposición de estos materiales se presenta en el área de estudio hacia el costado noroeste formando geoformas típicas glaciáricas (morrenas) compuestas principalmente por areniscas, conglomerados, y bloques angulares, embebidos en una matriz areno arcillosa, con poco grado de selección (Ulloa et al., 2003).

5.4 FORMACIÓN UNE (KIU)

Estratigráficamente se presentan como una alternancia de cuarzo arenitas con tamaños de grano de fino a medio dispuestas sobre un cemento de tipo silíceo con un buen grado de selección y presencia de tonalidades que van desde los tonos grises claros a blancos, las cuales forman capas delgadas a muy gruesas respectivamente. Infrayaciendo se encuentran lodolitas dispuestas en capas delgadas con un patrón de estratificación plano paralelo, tonalidades grises a oscuras y espesores que oscilan entre 60 cms y superiores a 10 m (Ulloa et al., 2003).

5.5 FORMACIÓN FOMEQUE (KIF)

Nombre designado por el autor Hubach en el año de 1931 para nombrar una sucesión litológica de esquistos piritosos, caliza cristalina, arenisca calosa y areniscas cuarcíticas las cuales presentaban su sección tipo en el río Une y específicamente la región de Ubaque-Choachí-Fomeque (Ulloa et al., 2003).

Dispuesta principalmente por lodolitas negras con un patrón de estratificación ondulada en la cual se presentan intercalaciones en capas delgadas de calizas y cuarzo arenitas con variaciones de tamaño que van desde granos finos a gruesos respectivamente (Ulloa et al., 2003).

5.6 FORMACIÓN ARENISCAS DE LAS JUNTAS (KIAJ)

Propuesta por Ulloa & Rodríguez en 1979, la cual describe la secuencia formada por dos miembros arenosos con una intercalación de un miembro lutítico. Esta sección tipo se localiza en vía carretera Guateque-Santa María de Bata, entre las lomas El Volador y El Dátil. En esta zona se identifican tres miembros: arenisca de El Volador, Lutitas Intermedias y Areniscas de Almeida, siendo este último correlacionado con las formaciones de Areniscas de Cáqueza de Hubach (1945) y Alto de Cáqueza de Renzoni (1968) (Ulloa et al., 2003).

Está constituida por una sucesión de capas de arenitas finas a medias, de cuarzo, grises claros a blancas, cemento silíceo, a veces calcáreo, en capas delgadas a muy gruesas, micáceas, altamente piritosas, con juegos en pequeña escala, de láminas inclinadas paralelas, con intercalaciones de lodolitas grises oscuras a negras, en capas delgadas y onduladas, cuyos espesores varían entre pocos centímetros hasta más de 30 m (Ulloa et al., 2003).

6 MODELO HIDROLOGICO

El entendimiento de los factores más relevantes que inciden en el ciclo hidrológico y el cálculo del balance hídrico como eje fundamental para conocer la interacción de los procesos e interrelaciones superficiales y subsuperficiales corresponden las bases de estudio y comprensión de la hidrología, con aras de conocer la evolución del comportamiento a través del tiempo (Cabrera, 2013) .

Dentro del ciclo hidrológico y sus principales componentes destaca de sobre manera la recarga pues esta incide en la cantidad o volumen de recursos renovables, no obstante, en cuanto al desarrollo sostenible de recursos hídricos subterráneos la recarga no se constituye como un único factor de incidencia sino también juega un papel importante la captura inducida por bombeos de aguas subterráneas (Fragala & Obregon Neira, 2011).

El desarrollo de este modelo permite establecer a nivel hidrológico si existen déficit o superávit del recurso, que cantidad se convierte en escorrentía superficial y que cantidad se infiltra para recargar las aguas subterráneas, previamente este concepto parte de cómo es el funcionamiento del ciclo hidrológico en zonas de alta montaña asociadas a paramos (Dulcey López & Mancipe Jiménez, 2013).

6.1 CICLO DEL AGUA

La comprensión de ciclo hidrológico se concibe como un modelo esquemático que describe el comportamiento teórico e idealizado del agua en la tierra y los fenómenos de movimientos que se dan entre biosfera, atmosfera, litosfera e hidrosfera lo cual permiten establecer el sistema climático (Scribd, 2018). Dentro del ciclo hidrológico el

comportamiento del agua en la atmosfera se da entre diferentes tipos de reservorios o depósitos gracias a procesos intrínsecos en los cuales destacan la condensación, precipitación, evaporación, infiltración, transpiración, sublimación, fusión, transpiración y el flujo de agua subterránea (Ordoñez Galvez, 2011).

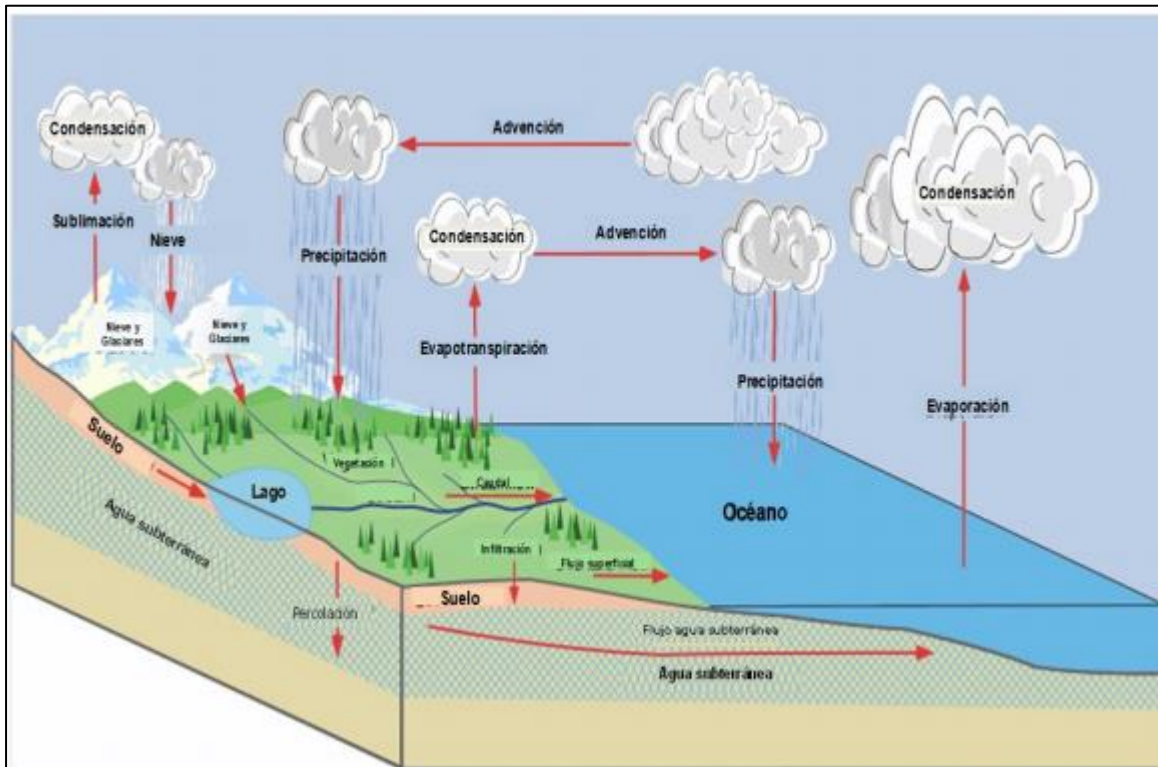
El mayor suministro de agua de los océanos se da como resultado de la evaporación. De esta el 91% retorna a las cuencas oceánicas por fenómenos de precipitación, el restante de este correspondiente a un 9% respectivamente se sitúa en las zonas continentales donde las condiciones climatológicas dan como resultado la precipitación (Ordoñez Galvez, 2011). Debido a esto se genera un desequilibrio entre la velocidad de evaporación versus la precipitación, la incidencia sobre la tierra y su relación directa del flujo de agua hacia los océanos (Ordoñez Galvez, 2011). El transito constante entre diferentes escenarios de la atmosfera trae consigo la generación de un ciclo el cual tiene su origen en los procesos relacionados con condensación, sedimentación, precipitación, evaporación, sublimación, flujo subterráneo y escorrentia (Ordoñez Galvez, 2011).

Los ecosistemas de alta montaña resultan de la interacción del agua atmosférica, superficial y subterránea de diversos sistemas hídricos la cual determina el comportamiento hídrico en el ecosistema y la relación del ciclo hidrológico del agua con ecosistemas estratégicos asociados a humedales, glaciares y sistemas de alta montaña (García Herrán, 2018).

A continuación, se presenta la figura 5 donde de manera visual se presenta el ciclo del agua.

Figura 5.

Ciclo Hidrológico del Agua Esquemático.



Nota. Fuente, disponible en www.eoearth.org/article/Hydrologic_cycle, adaptado por Ordoñez, 2011

6.2 CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA EN ZONAS DE ALTA MONTAÑA (ASOCIADAS A PARAMOS)

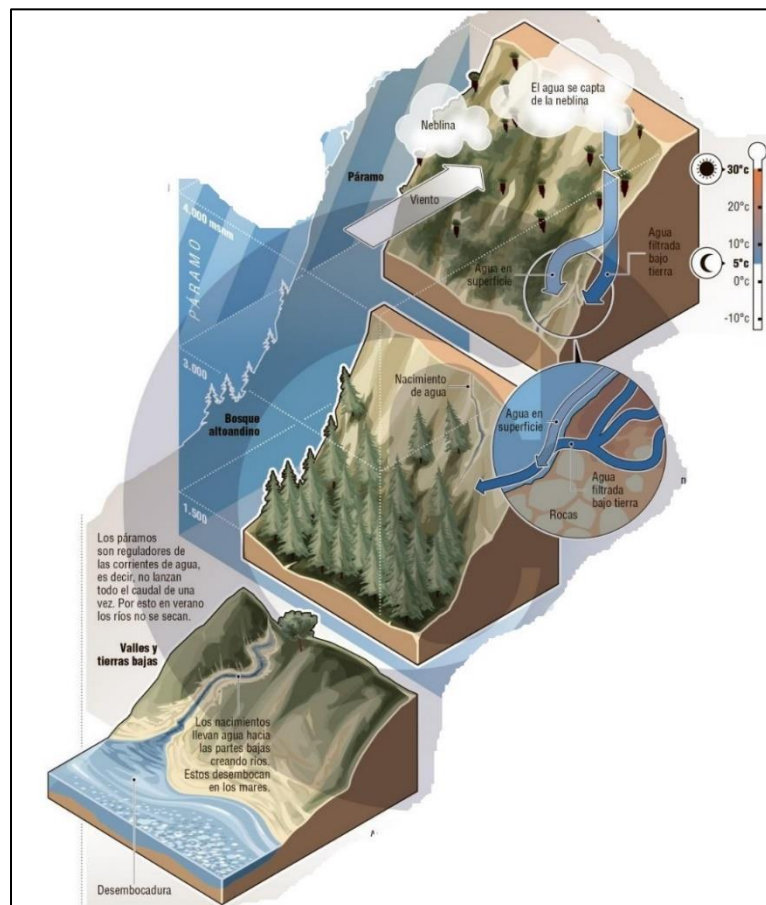
El comportamiento hidrológico de los ecosistemas de alta montaña asociados a paramos tienen una estrecha relación con las características climáticas que se dan en estas zonas altitudinales asociados a regímenes moderados a altos de precipitaciones y una tasa alta de humedad relativa en el aire y una baja evapotranspiración (figura 6). otros factores

influyentes corresponden a las características edáficas, que sustentan la alta capacidad de regulación hídrica del páramo (García Herrán, 2018).

Otros factores que se integran al funcionamiento y desarrollo de los procesos hidrológicos en los páramos están asociados a: bajas tasas de radiación solar, poca variación de la temperatura pero altos regímenes de variabilidad a lo largo del día, niebla y pocas pérdidas por fenómenos intercepción respecto a otro tipo de ecosistemas (García Herrán, 2018).

Figura 6.

Ciclo Hidrológico del Agua en Zonas de Paramo.



Nota. Fuente, Corantioquia-2015.

Como resultado a los factores descritos es que los apramos como ecosistemas estratégicos de alta montaña posean regímenes elevados de regulación hídrica y disponibilidad de

almacenamiento de recursos para establecer así un régimen base para los cuerpos hídricos asociados a drenajes que nacen allí y sustentan épocas de estiaje, su papel en la absorción de sedimentos, nutrientes, su capacidad de purificar el agua lo incide en control de la erosión (García Herrán, 2018).

Diversos autores consideran que los fenómenos asociados a retención de agua en el suelo no tienen mayor influencia en el desarrollo del ciclo hidrológico del agua en zonas de paramo ya que una alta retención está asociada a aproximadamente -1500kPa la cual es un indicativo de la presencia de microporos en el suelo y la presencia de un gran reservorio de agua (Buytaert et al., 2002).

6.3 BALANCE HÍDRICO

La oferta hídrica del recurso agua está asociado a un exceso o déficit, y a su corresponde al principal componente del balance de agua superficial el cual se calcula para diversos territorios en un lapso determinado. En el cálculo del balance hídrico en temas hidrológicos se tiene en cuenta el principio de conservación de las masas basados en la ecuación de continuidad, el cual permite estudiar la cantidad de agua que entra y sale de un espacio en particular en una unidad de tiempo, sus principales aplicaciones se encuentran en la evaluación de recursos hídricos en un área determinada y los impactos antrópicos que puedan tener los mismos en el desarrollo (Aquabook.agua.gov.ar, 2015).

La metodología de aplicación del balance hídrico en hidrología es la principal herramienta para establecer el régimen de oferta hídrica de tipo superficial en un lapso establecido (Ocampo López, 2013).

A lo largo del tiempo se han establecido diversas metodologías para el cálculo del balance hídrico, propuestas por un sin número de autores, pero sin duda la más aplicada al contexto hidrológico corresponde a la establecida por Thornthwaite ya que geográficamente se ajusta a cualquier territorio y destaca su simplicidad en las ecuaciones, la presente metodología se propuso en el año 1948 y un ajuste final hacia el año 1955 (Universidad de Sevilla, 2018). Thornwaite integra en su modelo el conocimiento y la variabilidad de las precipitaciones medias mensuales y la evapotranspiración, dichas aproximaciones permitieron establecer en un balance hídrico la falta de recurso o exceso del mismo lo cual es sumamente útil en un estudio climatológico y planificaciones hidráulicas (Universidad de Sevilla, 2018).

Los principales componentes de un balance hídrico (BHC) se definen a continuación:

Precipitación: Corresponde al resultado del vapor de agua que encuentra en la atmósfera y mediante un proceso de condensación cae a la superficie terrestre, de igual forma la precipitación se puede originar por la saturación de vapor de agua que tiene lugar en la atmósfera y gracias a su interacción se condensa y precipita hacia la superficie terrestre (Sutori, 2018).

Evapotranspiración potencial o de referencia (ETP): Término asignado por el autor Thornwaite en sus ecuaciones de balance hídrico para establecer la proporción entre la máxima cantidad de agua que se evapora en un determinado clima asociado y una cobertura vegetal o suelo específico, dentro del término se asocian también las abstracciones hidrológicas que presentan las plantas en una región determinada (Instituto de Hidrología & Ministerio de Medio Ambiente, 2015).

Déficit: Son todas aquellas pérdidas calculadas dentro de un balance hídrico asociadas a la percolación, escorrentia, transpiración, evaporación entre otras. (Área de Edafología y Química Agrícola (Facultad de ciencias), 2005).

Excedente: Asociados principalmente a los factores los cuales dentro de un balance hídrico generan exceso de recurso con cierto grado de disponibilidad, dentro de los excedentes se destacan las lluvias, nieve y precipitaciones ocultas entre otras.(Área de Edafología y Química Agrícola (Facultad de ciencias), 2005).

7 MODELO HIDRAULICO

La hidráulica subterránea es de especial interés en la hidrogeología y a la hora de construir modelos aproximados a la realidad que permitan establecer diferenciaciones litológicas dependiendo de las características hidráulicas intrínsecas que tengan las rocas en el subsuelo. Dichas diferenciaciones permite determinar el comportamiento de un fluido en una litología específica, características de movilidad y transporte, almacenamiento y en general del potencial hidráulico que posea, el modelo hidráulico es de suma importancia en el modelo hidrogeológico conceptual ya que este permitirá definir de forma preliminar vastas posibles áreas donde se generen procesos de recarga y descarga hidrogeológica, así como definir acuíferos y demás estructuras hidrogeológicas de interés a la hora de clasificar y cuantificar el recurso.

Por ello se clasifican los factores más importantes que convergen en la construcción de un modelo hidráulico, especificando su definición y que aportes conlleva a la construcción:

Potencial de elevación o potencial gravitacional (Z): hace referencia a la energía que tiene una masa de agua con relación a una elevación determinada por encima del nivel del mar. (Rebollo, 2016a)

Potencial de presión (HP/Y): es la energía que se necesita para someter en un punto de presión determinado atmosférico del agua. (Rebollo, 2016a) .

Potencial de velocidad (HV): hace alusión a la energía necesitada para llevar el agua sobre un punto de presión determinado desde la presión atmosférica (Rebollo, 2016b).

Gradiente hidráulico (I): Corresponde al cambio de potencial hidráulico en el sentido del flujo del agua representado por la pérdida de energía por unidad de longitud transitada. (Rebollo, 2016b).

Ley de Darcy: Caudal que se filtra por un medio permeable saturado directamente proporcional a la sección transversal del flujo (Rebollo, 2016b).

Porosidad: Correlación entre los espacios del material y la totalidad del volumen (Rebollo, 2016a).

Permeabilidad: Comportamiento de el agua para circular en un material, conocido también como conductividad hidráulica.(Rebollo, 2016a).

Transmisividad: Representa la capacidad o viabilidad para que circule el agua por el espesor total de un material. Equivalente al producto de la permeabilidad del medio por el espesor saturado (Rebollo, 2016a).

Coefficiente de almacenamiento: Expresa el volumen de agua que puede ser liberado de un prisma vertical de material poroso de sección unidad y altura igual a la del medio saturado (Rebollo, 2016a).

8 MODELO HIDROGEOQUIMICO

8.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

Parámetros Químicos

De forma natural las aguas expuestas en diferentes medios como el subsuelo, suelo y aire entre otras sufren fenómenos de intercambios o disolución (Guevara et al., 2015). Caso similar ocurre con la fauna en especial la de tipo acuática en la cual se dan casos de interrelacionamiento y procesos biológicos en los cuales se dan intercambios de sustancias, debido a estos intercambios en niveles macro hasta micro se destaca la composición química heterogénea de las aguas dulces en altas relaciones, claramente relacionado con factores como las características intrínsecas de los suelos, concentraciones de gases disueltos entre otras. De forma general dentro de las composiciones de las aguas dulces es característico encontrar compuestos mayoritarios asociados a nitratos, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos y en menor proporción o de forma minoritaria se encuentran los silicatos, metales, elementos traza y fosfatos (Guevara et al., 2015). Dentro de las características fisicoquímicas del agua lluvia es característico encontrar los cationes como: (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones: (HCO_3^- , Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-}) así como también CO_2 , O_2 , O , N , Ar , etc (Recio Díaz & Vargas Ospina, 2019)

Sin duda algún el aumento de la actividad antrópica desarrollada por el hombre en sus procesos sociales, industriales y de relacionamiento han traído consigo un aumento marcado en la composición química natural de las aguas. Esta alteración de las propiedades fisicoquímicas del agua en su estado natural corresponde a vertidos de aguas residuales,

transito de agua por diferentes medios los cuales estén contaminados con altas concentraciones de insumos agroquímicos o contaminados (Recio Díaz & Vargas Ospina, 2019).

Los parámetros de control se pueden agrupar de la siguiente manera:

Químicos: Asociados a compuestos derivados como los fosfatos, amoniacos, nitritos productos oleo químicos, hidrocarburos, detergentes, metales y pesticidas entre otros (Recio Díaz & Vargas Ospina, 2019) .

Gases disueltos: Oxígeno, Nitrógeno, Dióxido de carbono, Metano, Ácido sulfhídrico (Recio Díaz & Vargas Ospina, 2019) .

8.2 PARÁMETROS FÍSICOS

Color

El color como rasgo característico tiene su origen en componentes asociados a un origen vegetal, como el plancton, turba y la interacción de metales (Ramírez et al., 2016). A nivel acuático el color se fundamenta como un aspecto muy importante en la transparencia de las aguas, procesos fotosintéticos, condicionamiento de la evolución de las especies y el desarrollo de las funciones faunísticas que allí se dan (Ramírez et al., 2016).

Olor

Raramente asociado a presencia de sustancias anómalas en las características fisicoquímicas del compuesto, por el contrario, es un claro indicativo de una elevada actividad biológica. Es por ello que el olor no se asocia a una medida tangible sino más bien

a un tipo de apreciación condicionada por la persona que realiza la apreciación (Análisisdeaguasblog, 2018).

Turbidez

El grado de turbidez se mide como referencia a la cantidad de material particulado o coloidal que se encuentra en suspensión en una mezcla, en la cual en una apreciación es directamente proporcional que una mayor cantidad de material particulado se traduzca en un cambio significativo de su calidad (Análisisdeaguasblog, 2018). Los agentes que pueden influir en el grado de turbidez de un compuesto o mezcla está relacionado con microorganismos, sustancias inorgánicas y materiales orgánicos (Upct.es, 2014).

Temperatura

En general la temperatura del agua es relacionada con los efectos sobre la solubilidad de oxígeno, velocidad de metabolismo y reacciones químicas y bioquímicas (Análisisdeaguasblog, 2018).

Densidad

Unidad de medida imprescindible en algunas aguas con características de alto grado de salinidad para la transformación de unidades volumétricas a máscas, generalmente se expresa en Mg/L aunque también es posible encontrar relaciones en partes por millón (Upct.es, 2014).

Sólidos

Generalmente el termino solidos se designa para relacionar elementos y compuestos completamente diferente a gases y agua en sí, gracias a ello se pueden diferenciar dos grupos de sólidos, los primeros corresponden a disueltos y los segundos a solidos en suspensión toda vez que entre ellos es característicos diferenciar solidos volátiles y no volátiles (Análisisdeaguasblog, 2018). Asociado al termino de solidos se encuentra relacionado el concepto de solidos totales disueltos (TDS) como un índice de medida de cuantificación de sustancias disueltas en una sustancia e indicador del grado de calidad química de una sustancia o compuesto específico (Upct.es, 2014).

Conductividad

Definido como la capacidad de una sustancia o compuesto para permitir el paso de la corriente eléctrica, la anidación y movilidad de iones presentes en el agua (Análisisdeaguasblog, 2018). Debido a la variabilidad de concentración iónica que se presenta en el medio, la unidad de medida y sus valores no se relacionan de forma sencilla con el número de iones totales dispuestos en la solución(Upct.es, 2014).

Radiactividad

El grado de radiactividad que se presenta en un compuesto se mide principalmente por la ocurrencia y concentración de radioelementos naturales como actinio, uranio y torio, así como por la actividad antrópica de tipo contaminante de influencia directa como ensayos nucleares generación de energía atómica, usos industriales entre otros. Este tipo de radioelementos se caracterizan por tener bajos índices de solubilidad en agua, es por ello que

de forma general los niveles de radiactividad en las aguas naturales es bajo, siendo así una relación que las concentraciones radiactivas es mucho más baja en las aguas subterráneas que en las aguas naturales (Análisisdeaguasblog, 2018).

8.3 CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

En el medio ambiente la mayor parte de los elementos naturales son formados por uno o varios isótopos los cuales se caracterizan porque su separación se da solamente por procedimientos asistidos como espectrometría de masas, destilación fraccionada, electrolisis entre otras. La distribución que se presenta en la tabla periódica respecto a la masa de los elementos se constituye como la media de todas las masas de los isótopos presentes de forma natural.(Planas, 2013).

Los isótopos son átomos cuyos núcleos atómicos tienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones. No todos los átomos de un mismo elemento son idénticos y cada una de estas variedades corresponde a un isótopo diferente. (Planas, 2013).

Es característico que cada átomo difiera en su relación de neutrones, esta relación se plasma en las diferentes asociaciones de neutrones y protones las cuales repercuten en las fuerzas de cohesión que se dan dentro de los núcleos de los isótopos, debido a esto existen asociaciones de protones y neutrones con mayor afinidad dentro de los isótopos (Planas, 2013).

Isotopos estables

Este tipo de isotopos se emplea en muchas prácticas ingenieriles de gestión del agua, suelo para dataciones y fines ambientales, los isotopos estables se caracterizan por ser una forma no radiactiva sin ningún tipo de emisión radiactiva. La distribución de los elementos en la tabla periódica se destaca ya que de los 82 elementos allí descritos 80 se asocian a isotopos estables. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2016).

La correcta aplicación de la técnica de isotopos estables con fines de dataciones se da en la cuantificación de las concentraciones y proporciones, para así determinar un posible origen, historia evolutiva del agua analizada y sus principales aportantes. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2016).

Otro uso común de los isotopos estables en materia de hidrogeología corresponde a trazadores que se liberan en un sistema que se quiera analizar para así establecer tiempos de tránsitos y posibles conexiones entre sistemas hidrogeológicos (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2016).

Isotopos estables oxigeno

El oxígeno-18 (^{18}O) es el segundo isótopo más abundante de oxígeno después del oxígeno-16 (^{16}O). son isótopos estables que existen naturalmente en el medio ambiente. La abundancia de este isótopo en la naturaleza es del 0,2 % (Wikipedia Enciclopedia Libre, 2021c).

Isotopo estable deuterio

Constituido como uno de los principales isotopos estables en hidrogeología para dataciones y demás estudios de carácter hídrico, este corresponde a una variación del isotopo del oxigeno el cual se encuentra de forma abundante en la naturaleza. A nivel atómico el núcleo del deuterio esta conformado por un protón y un neutrón (Massam et al., 1965). Este isotopo también recibe el nombre de hidrogeno pesado y se describe por la abreviatura D, una de sus principales diferenciaciones entre isotopos es que a medida que se vuelve mas ligero el elemento químico al que pertenecen aumenta el doble la masas atómica de su elemento principal, para este caso el hidrogeno (Massam et al., 1965).

9 MARCO METODOLÓGICO

9.1 MATERIALES Y MÉTODOS

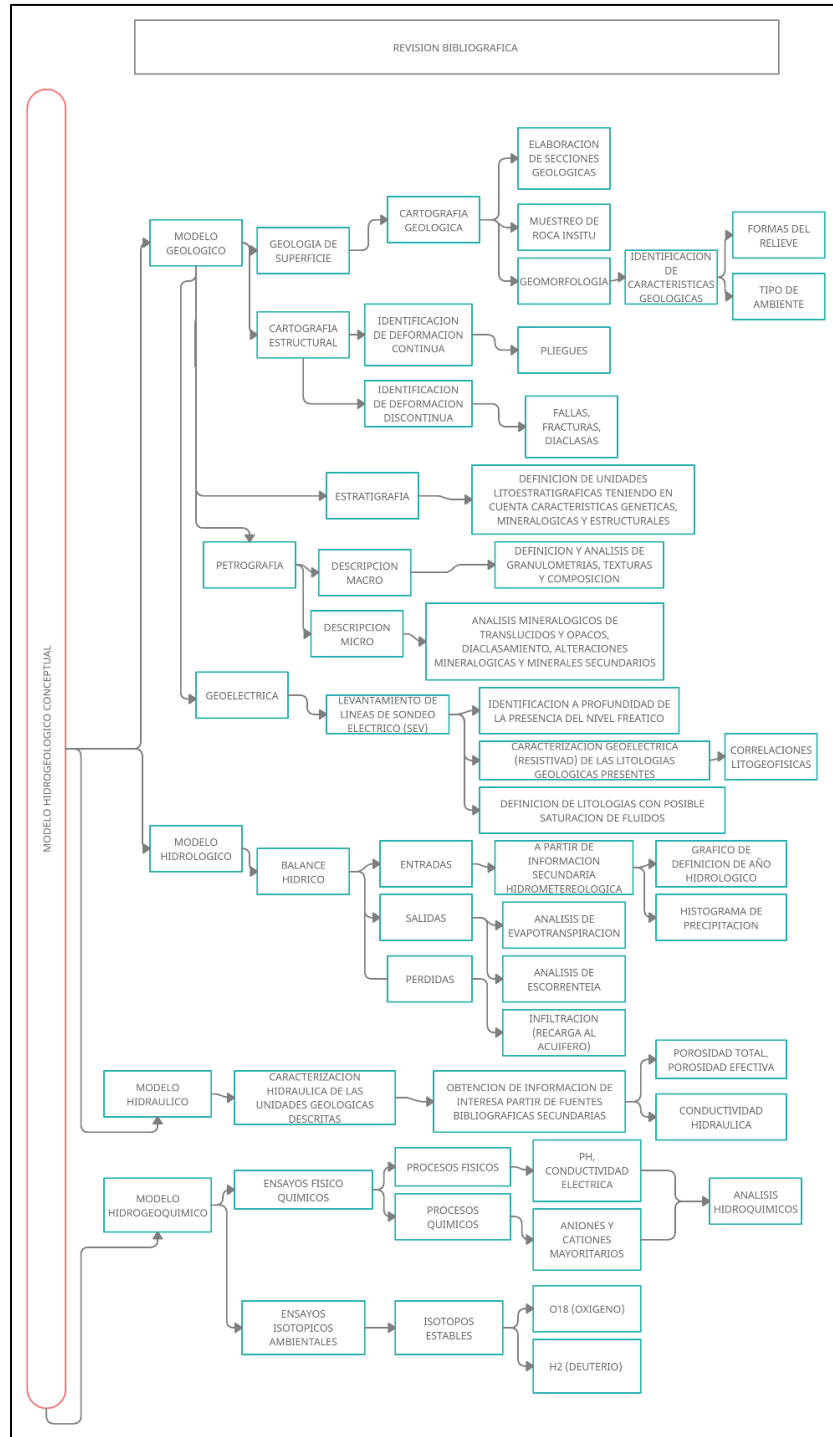
Para alcanzar los objetivos propuestos fueron utilizados métodos basados en fases secuenciales que permitirán una sistemática y un análisis coherente de la información colectada, los métodos y la sistemática del trabajo se sintetizan en la configuración de un flujograma general para describir la metodología, así como 4 submodelos de insumo que tratan temáticas específicas que representan la síntesis del proyecto (figura 7).

Los 4 submodelos que conforman el modelo hidrogeológico conceptual son: modelo geológico, modelo hidrológico, modelo hidráulico y modelo hidroquímico, dichos insumos representan la información esencial para el desarrollo del proyecto, a continuación, se describe mediante un flujograma general la metodología del proyecto a realizar.

9.2 OBTENCIÓN DE DATOS

Anterior a cualquier actividad a desarrollar, en esta etapa se definen los objetivos, se establecen los alcances y metas, discerniendo adicionalmente las potenciales limitaciones de los resultados a modelizar, esta etapa es crucial y definirá a grandes rasgos las actividades que se deberán realizar para la consecución de los objetivos planteados.

Figura 7.
Flujograma General para el Desarrollo del Proyecto



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Fase 1: Revisión bibliográfica

En esta investigación fueron aplicados el método descriptivo de investigación científica basado en revisión, análisis de información geológica, hidrológica, hidráulica e hidroquímica, así como en técnicas analíticas utilizadas.

Se tomó como base, la recopilación de información asociada al estado del arte de las diferentes metodologías insumo del modelo hidrogeológico conceptual, ya que esta corresponde a un primer escenario dentro del método científico para abordar el tema investigativo (Barbosa Chacón et al., 2013), este primer abordaje desde un punto de vista investigativo permite determinar como se ha tratado el tema, el estado actual del área al momento de la investigación y sus tendencias. Para ello para el desarrollo de esta etapa se recomienda establecer periodos de tiempo acordes con los objetivos planteados (Rojas Rojas, 2007)

En cuanto a las metodologías de tratamiento de información base se desarrollan dos etapas: heurística o de recolección de fuentes de información y hermenéutica o de análisis. La primera etapa describe el proceso de búsqueda de la información y la relación con sus fuentes bibliográficas según la clase de información encontrada, es considerada como un primer acercamiento a un escenario investigativo de información previa en el área seleccionada (Barbosa Chacón et al., 2013)

La etapa hermenéutica o de análisis se basa principalmente en las síntesis e interpretaciones de las relaciones que coexisten entre un hecho y el contexto que lo precede.

Para un desarrollo efectivo de esta primera etapa (heurística), se recomienda la planificación y desarrollo de protocolos de búsqueda y revisión de fuentes de información,

como estrategia que favorece un desarrollo coherente y contextualizado (Barbosa Chacón et al., 2013)

Acotado a la investigación desarrollada la etapa heurística contemplo los siguientes apartados:

1. Bibliografía temática, anuarios; abstracts, monografías, ensayos, artículos, trabajos especiales (revisión de cartografía geológica existente, estudios anteriores relacionados a la temática a investigar, búsqueda de artículos científicos del área a estudiar, y demás información relevante para alimentar el estado del arte)

Este proceso comprende etapas de búsqueda de información a fin de que se tenga un punto de partida del área o una línea base establecida sobre los temas a abordar, de igual manera busca obtener un conocimiento preexistente con respecto al tema que centra la investigación y al evento de un estudio en particular (Fernández Pérez, 2015).

La etapa hermenéutica se estructura en actividades como lecturas y análisis de las mismas con el fin de establecer objetivos relacionados con los propósitos de investigación,(Barbosa Chacón et al., 2013)

Esta fase se centró en lecturas de investigación en temas específicos y relacionados con el objeto de estudio en el área de interés relacionados con modelos geológicos, hidrogeológicos y características hidrogeológicas en zonas de paramo, para así ampliar un marco de conocimiento y referencia de las técnicas utilizadas, metodologías de investigación y acotarlos al desarrollo del proyecto de investigación.

Fase 2: Fase de campo

En el desarrollo de la planificación de las actividades a realizar en campaña de campo, se aplicaron metodologías de trabajo y de obtención de información base, en total se realizaron dos salidas de campo las cuales contaron con el acompañamiento y dirección del docente Diego Felipe Gómez Gutiérrez para el direccionamiento de actividades, acompañamiento académico y trazar una ruta clara de las actividades concernientes para el desarrollo del trabajo de investigación.

Las campañas de campo ejecutadas tuvieron en general como alcance:

- **Actualización de la cartografía geológica:** a través de la toma de puntos de control en campo, muestro de roca insitu, levantamiento de perfiles de meteorización, así como la medición de datos estructurales en afloramientos representativos para así configurar mediante procesos cartográficos la configuración estructural de las capas encontradas en campo y elaborar una cartografía geológica de carácter local acotado al área de trabajo.
- **Caracterización Geomorfológica:** a partir de observaciones puntuales y de la influencia de los procesos geológicos en el área de estudio se delimitaron las principales unidades geomorfológicas y su posible influencia con los procesos hidrológicos e hidrogeológicos dentro del modelo hidrogeológico conceptual.
- **Caracterización de los afloramientos rocosos:** descripción de las unidades litoestratigráficas en función a sus condiciones genéticas, mineralógicas y estructurales. De estas descripciones se infieren finalmente las unidades o grupos litológicos.

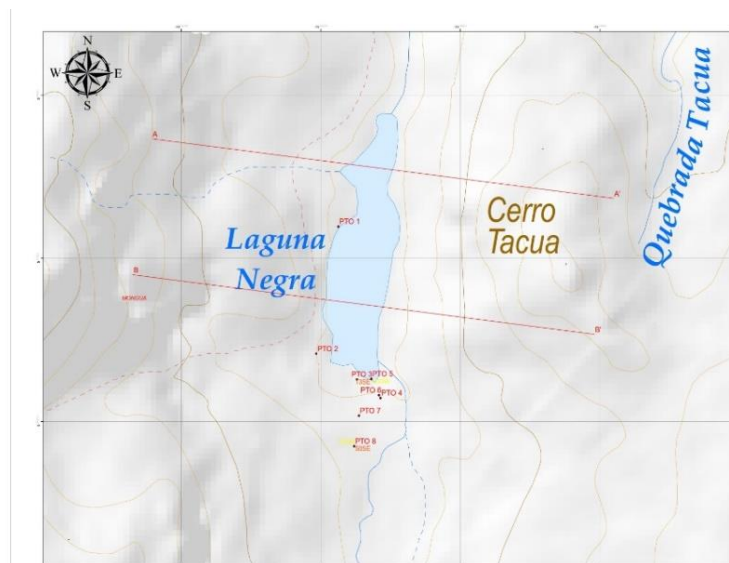
- **Elaboración de secciones geológicas-hidrogeológicas:** Se realizaron secciones representativas del área para conocer la dinámica estructural, delimitar fronteras del modelo y establecer posibles características de tipo geológico y geográfico que tengan incidencia dentro de la configuración espacial del terreno. Estas secciones serán referencia para conocer la orientación de las estructuras geológicas presentes y en base a la caracterización geológica que tengan las litologías presentes tener un posible conocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas.
- **Muestreos de roca para análisis petrográficos (sección delgada):** de la litología representativa del área de interés se obtuvo una muestra de mano representativa a la cual se elaboró una sección delgada para su posterior análisis mineralógico de tipo óptico, esta caracterización tiene por objetivo establecer minerales presentes, estructuras mineralógicas porcentajes de incidencia y así tener un conocimiento de la porosidad de la litología estudiada.
- **Toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos:** Se tomaron 4 puntos de muestreo tanto de aguas correspondientes al sistema lentic laguna negra, drenajes tributarios, suelos orgánicos y flujos subsuperficiales con el fin de realizar ensayos fisicoquímicos y conocer la composición química de las aguas presentes en el sistema paramo. (figura 8).
- **Toma de muestras de agua para análisis isotópicos:** Se realizó un muestreo de 4 puntos de agua superficial correspondientes al sistema lentic laguna negra, drenajes tributarios, suelos orgánicos y flujos subsuperficiales con el fin de determinar relaciones de abundancia isotópica y a través de los datos obtenidos y con su posterior interpretación poder realizar comparaciones de los datos obtenidos y mediante el

ploteo de los datos frente a un modelo de línea meteórica local y mundial y poder establecer posibles procedencias de las mismas y sus principales relaciones y características isotópicas. (figura 8)

- **Elaboración de sondeos eléctricos verticales (SEVS):** con la finalidad de conocer la configuración geológica-geofísica del subsuelo, determinar la profundidad del nivel freático y establecer espesores de los depósitos glaciares, coluviales se realizaron 4 sondeos eléctricos verticales distribuidos de la siguiente manera: Sobre los depósitos de ladera que se encuentran en los flancos de la estructura geológica principal, Sobre los depósitos glaciarios, En inmediaciones de la laguna glacial ,Sobre la morrena que se forma sobre la parte distal de la laguna

Figura 8.

Localización de Puntos de Control y de Muestreo de Agua (Superficial y Subsuperficial).



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

9.3 MATERIALES Y EQUIPOS

En las visitas de campo fueron utilizados los siguientes equipamientos:

Figura 9.

Equipos Utilizados en Campo.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Para el presente desarrollo de las actividades de campo y la obtención de la información primaria se contó con equipos:

- **Brújula Brunton F-5006 LM** : instrumento para realizar mediciones de inclinación y buzamiento de las capas geológicas en campo, su funcionamiento se basa en el magnetismo natural de la tierra. La brújula se compone por una aguja imantada con

la dirección de las líneas de magnetismo, para el presente estudio se utilizó la referencia F-5006LM de la marca Brunton.(Wikipedia Enciclopedia Libre, 2021a)

- **Martillo Geológico:** Su principal uso se da para disgregar fragmentos de rocas y generar planos para la toma de datos estructurales y determinar a nivel macro rasgos mineralógicos. Para casos específicos se utiliza como factor de escala referencia para el análisis de afloramientos (Wikipedia Enciclopedia Libre, 2021b) .
- **Gps Garmin 64X:** Instrumento de geoposicionamiento el cual se apoya para la medición de sus datos de satélites que se encuentran en la órbita de la tierra aproximadamente a 20.000 Km de altura y mediante un método de triangulación de estos determinar con precisión su posicionamiento geográfico(Institución Educativa Colegio San Luis Gonzaga, 2020).
- **Equipo De Resistividad Eléctrica Geoamp 202:** Equipo geofísico para búsqueda de aguas subterráneas el cual basa su funcionamiento en el principio de la geoelectrica el cual mide el potencial que presentan las rocas al paso de una corriente eléctrica, este equipo se compone de una unidad central que utiliza baterías internas de 12 voltios y un transformador para la conversión de 300 voltios a un voltaje de corriente continua, para la inyección de corriente al medio se cuentan con 2 carretes designados como A y B con longitudes de 300 metros cada uno, y para la adquisición de los datos 2 carretes de 100 metros cada uno designados como M Y N. internamente el equipo funciona mediante un amperímetro y voltímetro que miden la corriente del terreno y el potencial de voltaje. (Cáceres & Vera, 2015)

- **Cámara Digital:** cámara digital Sony de 21 megapíxeles con enfoque semiautomático y velocidad de obturación de f 1,2.

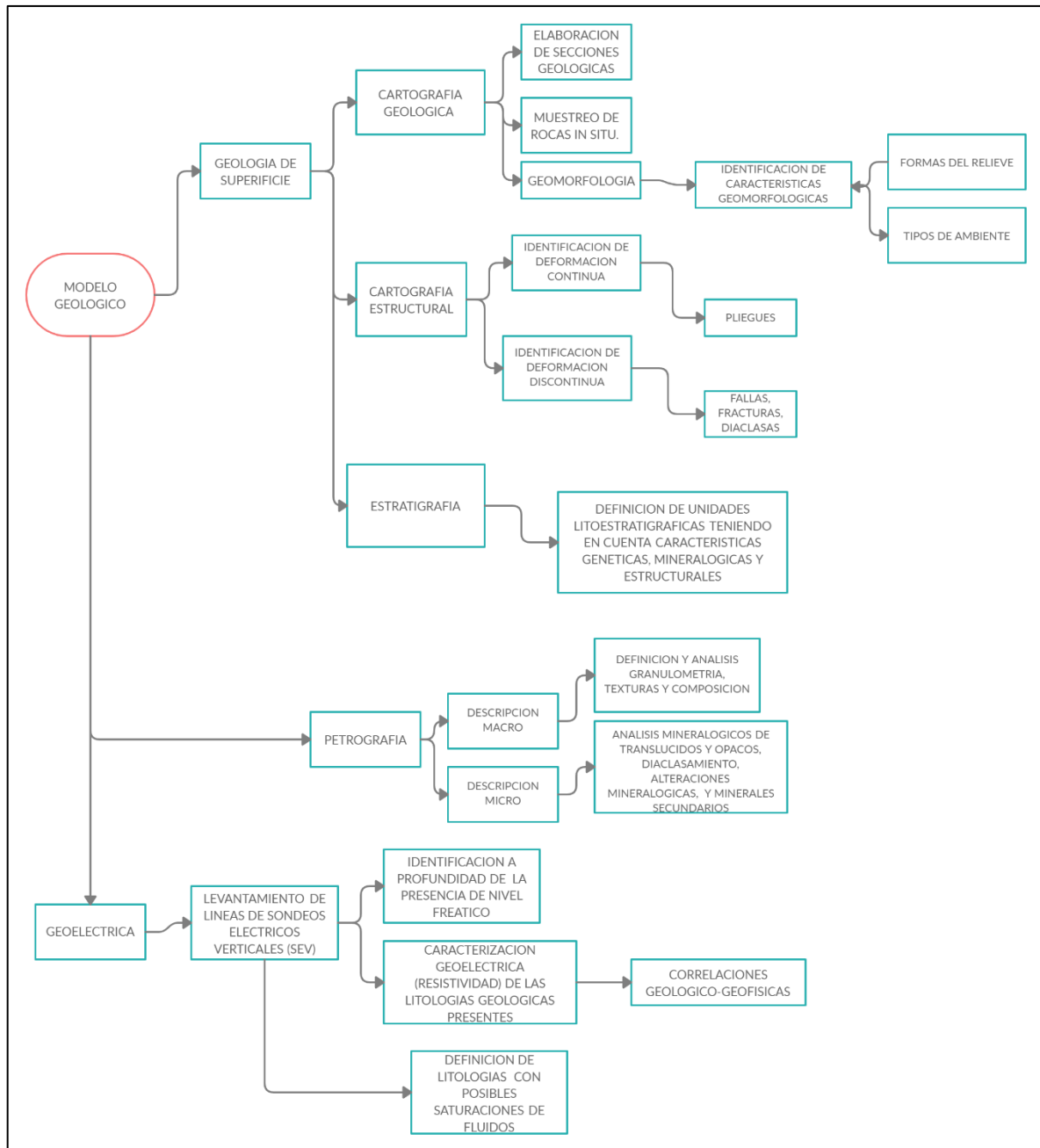
9.4 MODELO GEOLÓGICO

Comprende el desarrollo del modelo geológico – geofísico el cual se basa en la aplicación de tres técnicas metodológicas como lo son caracterización geológica de superficie (Fase 2: fase de campo), petrografía y geo eléctrica (Geofísica), estos permitirán conocer las características geológicas superficiales, subterráneas y una descripción petrográfica de las litologías presentes en el área de estudio. (figura 10)

El desarrollo del modelo geológico es la columna vertebral del modelo principal debido a que una buena caracterización geológica del área permite determinar los factores estructurales, estratigráficos y demás que tienen influencia en el modelo, así como caracterizar las rocas desde el punto de vista macro y micro y su posible potencial hidrogeológico dentro del desarrollo del modelo.

Figura 10.

Flujograma Modelo Geológico para el Desarrollo del Proyecto.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

A continuación, se describen los análisis de laboratorio utilizados como insumo para la elaboración del modelo geológico – geofísico:

Petrografía:

un completo análisis desde el punto de vista macro y micro de las rocas y minerales que se presentan en el área serán de vital importancia con fines de caracterizaciones hidrogeológicas, características hidráulicas y composiciones mineralógicas

Geoeléctrica:

Dentro del desarrollo de un estudio hidrogeológico o de evaluación de recursos hídricos subterráneos es importante la aplicación de un método geofísico con el fin de caracterizar el subsuelo a nivel geológico- estratigráfico y con ello establecer correlaciones hidrogeológicas para caracterizar acuíferos basados en la estimaciones de los parámetros de resistividad de las rocas y una previa configuración espacial de las capas que allí se encuentran, es por ello que la implementación de un método geofísico determinan con exactitud un sitio óptimo para realizar una perforación con fines exploratorios

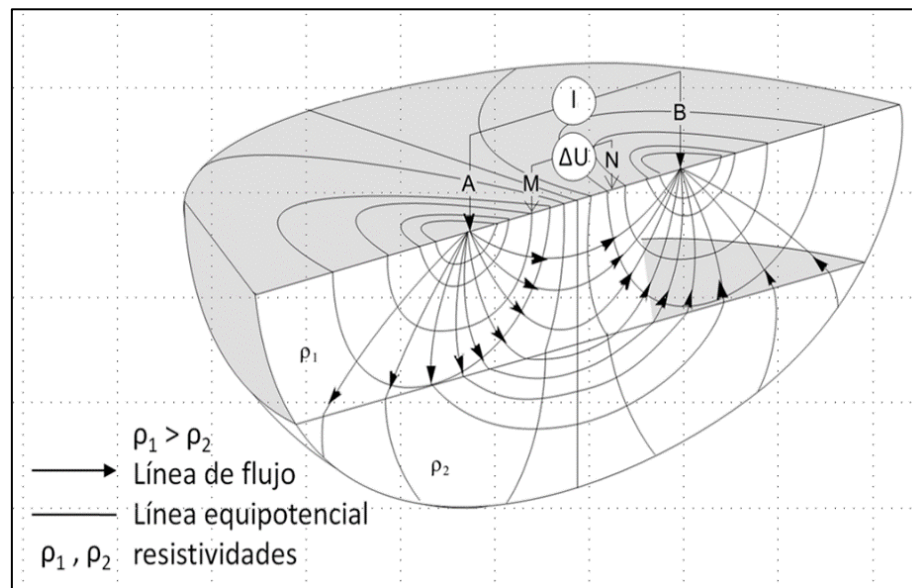
El principio geofísico del sondeo eléctrico vertical se basa en la estimación de cambios verticales de las propiedades geoelectricas de las rocas en el subsuelo. Su aplicación en campo consiste en la inyección de corriente continua al terreno desde una fuente artificial mediante un par de electrodos denominados AB, y mediante dos pares de electrodos denominados MN se mide el potencial eléctrico (Orellana, 1982).

Para el caso presente de aplicación se utilizó el arreglo geométrico tipo Schulumberger en el cual a diferentes mediadas de AB y Mn fijos y viceversa se realizan distintas mediciones

frente a un punto fijo el cual será el punto de observación y análisis (Forner, 2012). La representación de los datos se realiza mediante el ploteo de los datos correspondientes a resistividades aparentes obtenidas en campo en una base semilogarítmica donde en el eje x se muestra R_a (Wm) y en el eje y la distancia de apertura $AB/2$, los datos obtenidos son comparados mediante curvas con juegos de curvas teóricas para así buscar un mejor ajuste un rango de error considerablemente bajo. El arreglo geométrico del modelo se basa en los movimiento y posiciones de los electrodos A-B, M-N, de modo que se presente una diferencia de potencial, hasta realizar empalmes cuando se presente una caída severa de potencial (figura 11). El método de cálculo es tal que da siempre resultados de ρ consistentes (Sanchez San Roman, 2016)

Figura 11.

Esquema Metodológico Geoeléctrico Tipo Schulumberger



Nota. Fuente, <http://www.geotem.com.mx/electrico1.php>

Equipo Geoamp 202

El equipo utilizado para la aplicación del método geoelectrico se denomina Geoamp 202 de fabricación colombiana (figura 12), el cual utiliza el principio geofísico de geoelectrica aplicado al subsuelo, donde se analizarán los valores obtenidos en campo de las resistividades eléctricas de las rocas y suelos asociados. Las características técnicas más importantes del equipo se describen en la tabla 1 a continuación:

Tabla 1.

Características Técnicas del Equipo.

Características técnicas del equipo	
Nombre del equipo	Geo-Amp 202
Longitud de AB	600 metros
Longitud de MN	200 metros
Fuente de alimentación	12 voltios DC
Voltaje de salida	200 voltios
Corriente de salida Max	2.5 Amperios

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 12.

Equipo Utilizado en campo



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 13.

Aplicación del Método en Campo



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

9.5 MODELO HIDROLÓGICO

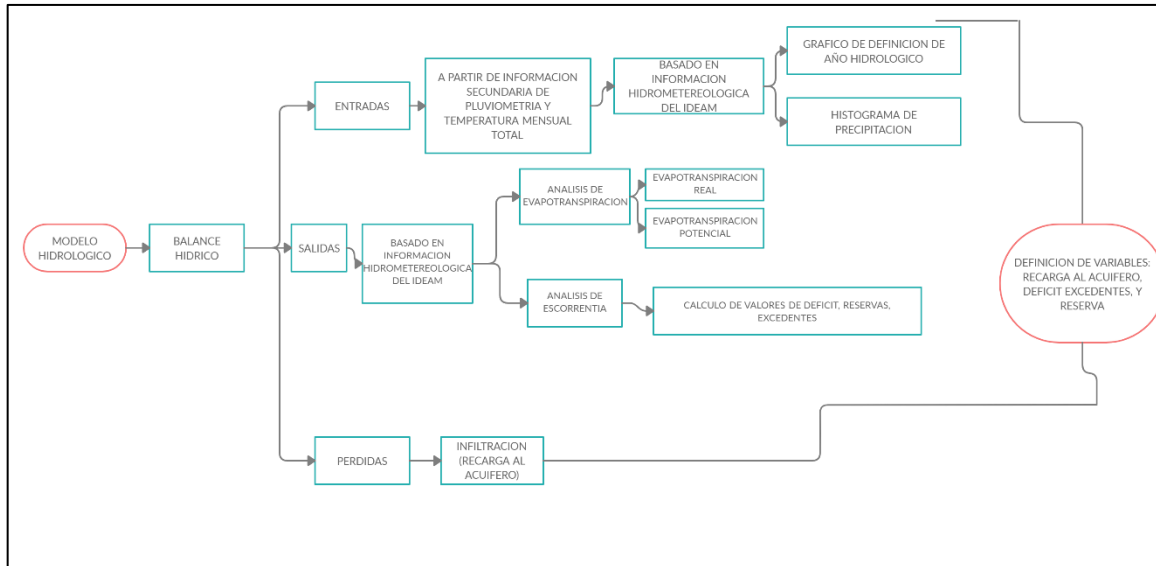
El modelo comprendió principalmente el desarrollo de un balance hídrico el cual permite conocer el régimen hidrológico del área a nivel de entradas y salidas del sistema hidrológico y a partir de ello poder establecer variables y parámetros hidrológicos que tengan incidencia dentro de la confección del modelo hidrogeológico y análisis de resultados.

Para la elaboración del balance hídrico, se utilizó fuentes de información asociadas a información hidrometeorológica se utilizan como apoyo graficas asociadas a hietogramas, diagramas de lluvia e histograma de precipitación, a partir de información secundaria obtenida de estaciones pluviométricas a diferentes periodos multitemporales de recolección de datos para así tener un control periódico y sistemático de la información a analizar. La finalidad de este modelo es poder determinar las variables de recarga que tienen interacción con el posible acuífero o con las unidades hidrogeológicas presentes en el área y así establecer valores de déficit, superávit y reserva de agua.

A continuación, en la figura 14 se presenta el flujograma que resume la metodología utilizada en el desarrollo del modelo hidrológico asociado al trabajo de investigación.

Figura 14.

Flujograma Modelo Hidrológico para el Desarrollo del Proyecto



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

9.6 MODELO HIDRÁULICO

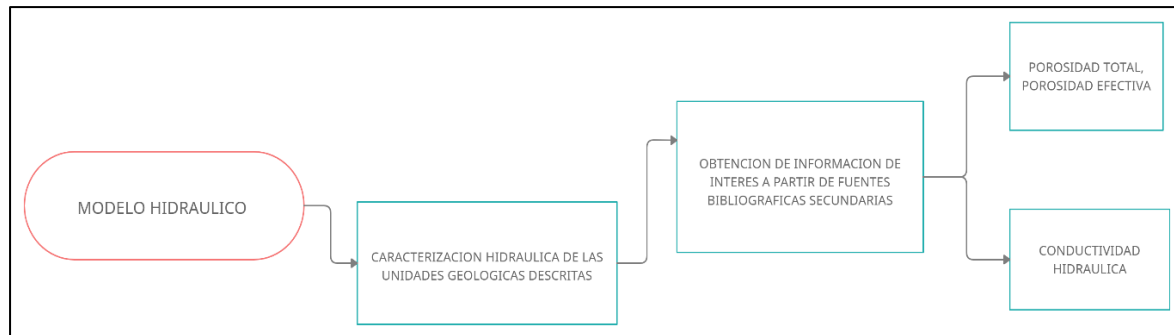
La caracterización hidráulica de las formaciones geológicas de interés, representa un indicador del comportamiento de las aguas subterráneas en el subsuelo respecto a la movilidad de estas, los indicadores hidráulicos están asociados a parámetros como (porosidad, permeabilidad, conductividad hidráulica, capacidad específica entre otras) para así poder estimar junto con la caracterización hidrogeológica un aproximado a la interacción del agua con las litologías presentes y caracterizarlas de forma homogénea. (figura 15)

Los parámetros hidráulicos para cada una de las unidades geológicas descritas se recopilarán de información publicada, bibliografía teórica asociada el tema para los tipos de roca asociada según la disponibilidad de la información. En caso de obtenerse información

de primera mano la búsqueda bibliográfica de información será la principal fuente de obtención de datos que alimentaran el modelo.

Figura 15.

Flujograma Hidráulico para el Desarrollo del Proyecto



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

9.7 MODELO HIDROQUIMICO

Se realizó un trabajo de muestreo tomando muestras representativas de los tipos de aguas presentes en el área de estudio, se tomaron muestras de agua representativas de la laguna negra, de los flujos subsuperficiales asociados a depósitos, aguas contenidas en los suelos orgánicos saturados presentes en el sistema paramo, así mismo de drenajes principales y tributarios que alimentan la laguna.

El protocolo de muestreo consistió en la selección de los puntos de interés hidroquímico, se realizó la identificación y codificación de las muestras mediante un rotulo donde se georreferencio la localización del muestreo, descripción del punto fecha y principales particularidades posterior toma de muestras en envases de plástico. Para cada sitio de muestreo se tomaron un par de muestras una para análisis de aniones y cationes mayoritarios y la segunda para Ph y conductividad eléctrica.

Los envases utilizados (figura 16) corresponden a botellas de plástico de polietileno las cuales para permitir una correcta preservación fueron llenadas con una solución de ácido nítrico al 10% con capacidad de un litro 300 ml respectivamente las cuales cuentan con su tapa y contratapa hermética para evitar así pérdidas por infiltración o evaporación, dichas muestras fueron tomadas y almacenadas en cadena de frío para conservar las características físico químicas ideales del sitio donde se tomó la muestra y así poder retardar la acción microbiana y los procesos de hidrólisis de diferentes sustancias químicas y reducir la volatilidad de los constituyentes y posteriormente entregadas al laboratorio para el procesamiento de las mismas, los parámetros muestreados y analizados corresponden a los siguientes:

- Parámetros fisicoquímicos básicos (aniones y cationes mayoritarios): Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4 , NO_3 y sílice, así como pH y conductividad eléctrica.

Para el análisis isotópico en el área de estudio se realizó una campaña de muestreo de las principales fuentes hídricas que se integran al modelo y presentan mayor incidencia en el proceso de recarga del sistema y pueden proveer concentraciones isotópicas considerables que permitan ser una herramienta de verificación para establecer relaciones de procedencia de las aguas.

Figura 16.

Fotos Metodológicas para Ensayos Físicoquímicos



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Así para el presente caso de estudio se realizaron muestreos isotópicos de las aguas de la laguna negra, drenaje intermitente, suelo orgánico propio del páramo y una cascada.

La metodología para el proceso de toma de muestras, así como la cadena de custodia se basó en el documento “Protocolo de monitoreo de agua del (IDEAM-INVEMAR,2017) y la (IAEA/ GNIP,2014), así como las recomendaciones que se describen en el documento de Clark & Fritz (1997), donde se especifica el protocolo detallado de las prácticas en campo.

El protocolo de muestreo de aguas para análisis isotópicos fue basado en la Guía recomendada por el Organismo Internacional de **Energía Atómica- Global Network of Global Network of Isotopes del 2014**. El protocolo para los muestreos isotópicos de aguas, se realiza con envases de vidrio o polietileno con características de alta densidad(PE - AD), con especificaciones de 30 o 50 ml para el muestreo de 2H (deuterio) y 18O (oxígeno).

El muestreo fue realizado el día 26 de febrero de 2022 (figura 17), tomando la presente fecha como un representativo para el periodo de lluvias o época húmeda, a continuación, se describen las principales etapas metodológicas asociadas al muestreo:

- Para la toma y envase de las muestras se utilizaron recipientes de polietileno de alta densidad (PE-AD) para el muestreo isotópico de aguas de capacidad de 30 ml para el muestreo de 2H (deuterio) y 18O (oxígeno), cada muestra contaba con su tapa y contratapa para evitar pérdidas por filtración y evaporación.
- Como parte protocolo de muestreo se realizó la correcta identificación de cada muestra con una etiqueta adjunta al envase de muestreo para cada objetivo establecido en el que se reportaron datos de georreferenciación de la muestra, punto específico de muestreo, fecha y tipo de muestra (agua superficial o de precipitación), posterior a ello y con la debida preparación y embalaje de las muestras fueron enviadas al

laboratorio ambiental de la Universidad de Waterloo en Canadá, bajo la cadena de custodia de la persona encargada y responsable del muestreo.

Figura 17

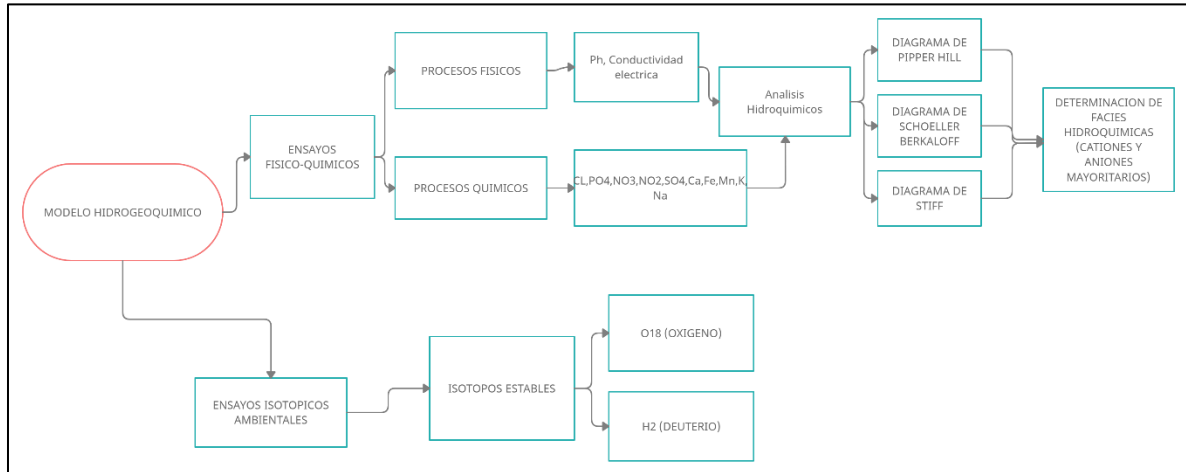
Fotos Metodológicas para Muestras Isotópicas.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 18.

Flujograma Modelo Hidrogeoquímico para el Desarrollo del Proyecto.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

10 ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

10.1 MODELO GEOLOGICO

Geológicamente el área de estudio está constituida de base a tope, por rocas sedimentarias de edad Cretácica inferior correspondiente a la formación fomeque (Kif) compuesta principalmente por lodolitas negras en capas delgadas con patrones de estratificación ondulada no paralela y cuarzo arenitas de grano fino con tonalidades grises a negras la cual se encuentra suprayacida por la Formación Une (Kiu) la cual litológicamente corresponde a una alternancia de cuarzo arenitas de grano fino a medio y lodolitas grises a oscuras en capas delgadas cuyos espesores varían entre 0,60 m y más de 10 metros en algunos sectores puntuales Así mismo se disponen de forma local depósitos Cuaternarios descritos como depósitos de laguna (Ql) compuestos por arcillas y lodos respectivamente localizados al costado oeste de la laguna negra, y depósitos coluvioglaciares (Qcg) compuestos con conglomerados clasto soportado en matriz areno lodosa de composición heterogénea y tamaño variable con ocurrencias de bloques angulares, los depósitos cuaternarios descritos y caracterizados se encuentran suprayaciendo las formaciones geológicas anteriormente descritas.

Desde el punto de vista estructural se evidencian estructuras asociadas a deformación plástica, las rocas Cretácicas, producto de la acción de esfuerzos de tipo compresivo, los cuales originan un pliegue de tipo anticlinal con rumbo suroeste-noreste, el cual se encuentra actualmente erodado como resultado de la acción de los procesos erosivos asociados a la dinámica glacial, y el tiempo geológico, obteniendo como resultado la modelación del

terreno en forma de un valle en U tipo glacial, geomorfología que posibilita el desarrollo actual de un sistema lagunar.

Las litologías expuestas en los flancos de la estructura anticlinal corresponden a la formación Une (Kiu), donde dada las características litológicas resistentes a la erosión, presentan una potencia de los estratos aproximada de 30 a 40 metros respectivamente y por identificación fotogeológica se determinó estructural aproximado de vergencia de las capas hacia el este y oeste respectivamente.

Estratigráficamente la secuencia del área de estudio se dispone con la ocurrencia local de depósitos de laguna caracterizados como una intercalación de sedimentos arcillosos y lodoso, una característica común sobre los flancos del valle glacial es la presencia de depósitos coluvio glaciares caracterizado como conglomerados clasto soportado en matriz arenosa.

La anterior información fue complementada a nivel del subsuelo mediante la aplicación de métodos geofísicos, representados en tres sondeos eléctricos verticales mediante el equipo Geoamp 202 con una apertura de 250 metros cada uno mediante el arreglo geométrico tipo Schullumberger simétrico localizados sobre los depósitos de laguna y correspondientes depósitos coluvioglaciares en la cual se logró una profundidad de investigación con el procesamiento de los datos y un error promedio de los análisis de 7.36 % y 9.76% obteniendo curvas patrón tipo H-K.

A partir del procesamiento se determinaron rangos de profundidad de investigación que oscilaron entre 53.7 metros a 69.6 metros respectivamente, donde se identifican capas con profundidades variables interpretadas como suelos orgánicos saturados, suelos areno-lodosos asociados al depósito coluvio glacial, y lodolitas orgánicas correspondientes a la formación fomeque.

A continuación, se describe a nivel petrográfico (Micro) una muestra obtenida de la formación Fomeque (Kif) en la cual se realizó la identificación y caracterización de minerales presentes analizadas sobre una sección delgada.

A nivel microscópico el análisis se realizó bajo un aumento de 40X mediante luz polarizada Dx, y una escala de referencia para las muestras de 500 μm obteniendo los siguientes resultados:

Mediante la caracterización se identificó una textura general tipo plumosa con la presencia de materia orgánica la cual presenta tonalidades negras al paso de la luz polarizada (nicoses cruzados), para el caso del presente análisis de la sección petrográfica se evidencia un alto contenido de materia orgánica.

Asimismo, e igual forma se determinó la presencia de arcillas identificadas por las tonalidades café y café parduzco, mediante el análisis de colores de birrefringencia en nicoses cruzados y la observación de una variación máxima de los colores en un giro de 45° entre la posición de extinción y el color de interferencia se identificó la presencia de cuarzo tamaño limo, por ultimo las tonalidades rojizas corresponden a óxidos de hierro asociados a hematita y goetita la cual se encuentra oxidando la arcilla presente.

Figura 19.

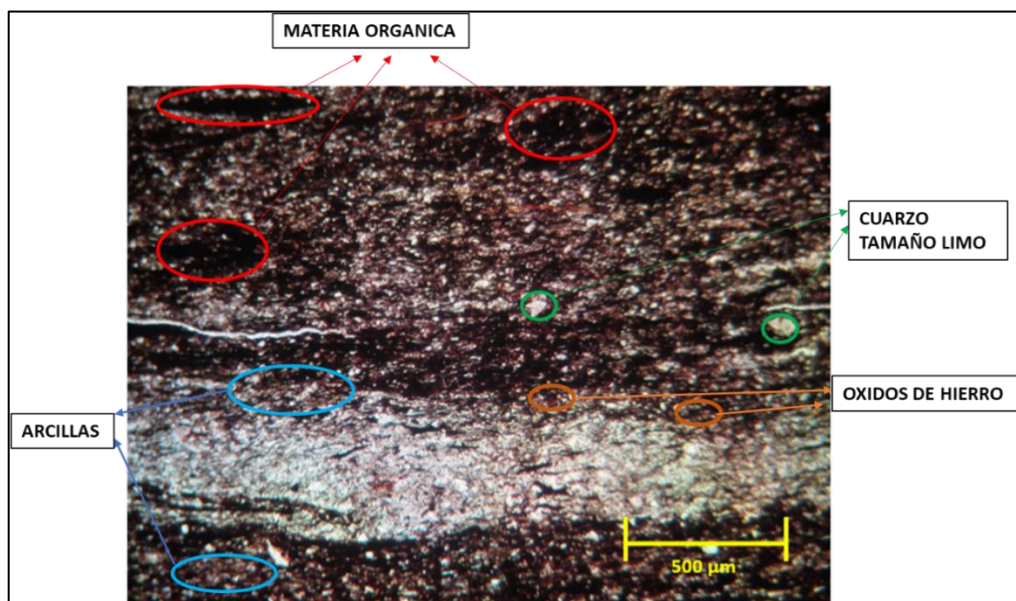
Preparación de la Muestra Petrográfica Microscópica



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 20

Microfotografía 1 Identificación de Minerales Característicos

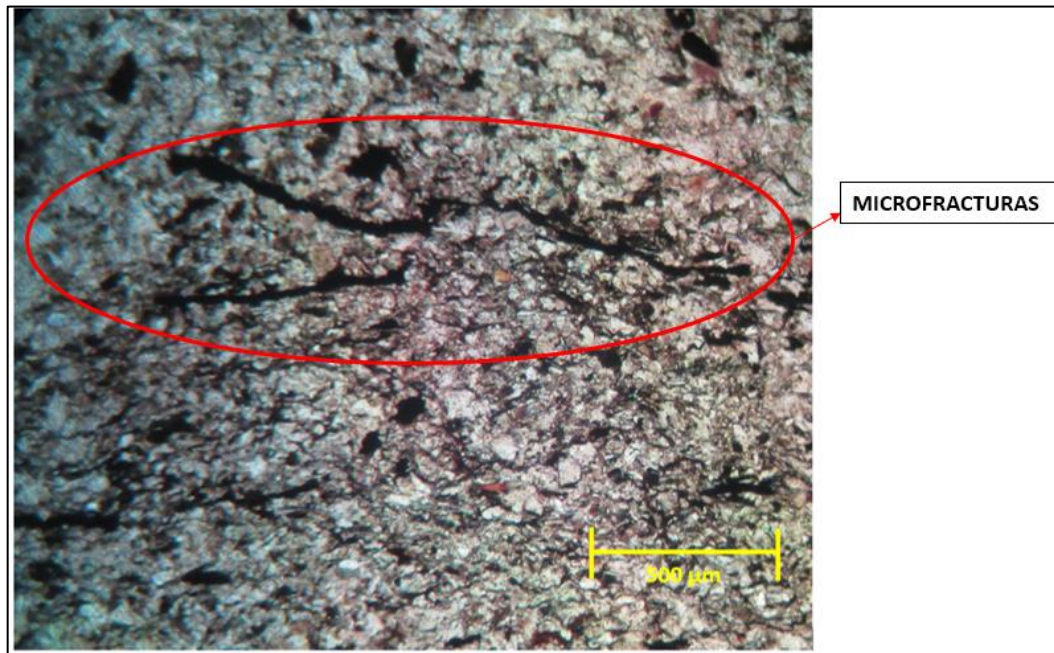


Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

De igual forma fue posible identificar microfracturas de tipo abierta sin relleno las cuales no se encuentran interconectadas entre si las cuales se describen mediante la siguiente figura:

Figura 21.

Microfotografía 2- Microfracturas Abiertas Sin Relleno



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

La anterior información petrográfica permite sustentar que el sistema lentico laguna negra se encuentra sobre un material de tipo impermeable la cual permite realizar la asociación mediante la caracterización litológica que dicha unidad geológica correspondiente a la formación Fomeque (Kif) la cual presenta un comportamiento hidrogeológico descrito como un acuitardo en roca.



Las características geológico-estructurales descritas anteriormente contribuyeron a la generación de una cuenca hidrográfica sobre el eje del anticlinal la cual contribuye al flujo




de agua y como área de captación donde confluyen aguas provenientes de un río, quebradas y flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos.

A continuación, en la tabla 2 se describen los puntos de control geológico tomados en campo.

Tabla 2.

Puntos de control.

Punto	Coordenadas	Descripción	Figura
1	5°42'28'' N 72°47'26'' W 3570 M.S.N.M	Intercalación de lutitas carbonosas dispuestas en contacto discordante con areniscas de color pardo N 53 W-50 SW	Figura 22. <i>Punto de Control Geológico 1.</i> 
2	5°42'27'' N 72°47'28'' W 3600 M.S.N.M	Disposición de un estrato de lutitas carbonosas de coloraciones negruzcas con alto grado de meteorización N8W-35SW	Figura 23. <i>Punto de Control Geológico 2.</i> 

3	5°42'27'' N 72°47'25'' W 3570 M.S.N.M	Estrato de lutitas carbonosas con intercalaciones de areniscas grisáceas con contenido de cuarzo N76W- 8NE	<p>Figura 24. <i>Punto de Control Geológico 3.</i></p> 
4	5°42'27'' N 72°47'21'' W 3550 M.S.N.M	Estrato de arenisca grisácea de aproximadamente 1.90 metros de espesor.	<p>Figura 25. <i>Punto de Control Geológico 4.</i></p> 
5	5°42'36.66'' 72°47'27.57''W 3643 M.S.N.M	Estrato de 6 metros de altura correspondiente a areniscas de grano fino a grueso con	<p>Figura 26. <i>Punto de Control Geológico 5.</i></p> 

contenido de
cuarzo, infra
yaciendo se
encuentra un
estrato
correspondiente a
intercalaciones de
lutitas carbonosas
y limolitas.
N55W-62SW

6 5°42'32.31"N
72°47'19.04"W
3612 M.S.N.M

Figura 27.

Punto de Control Geológico 6.

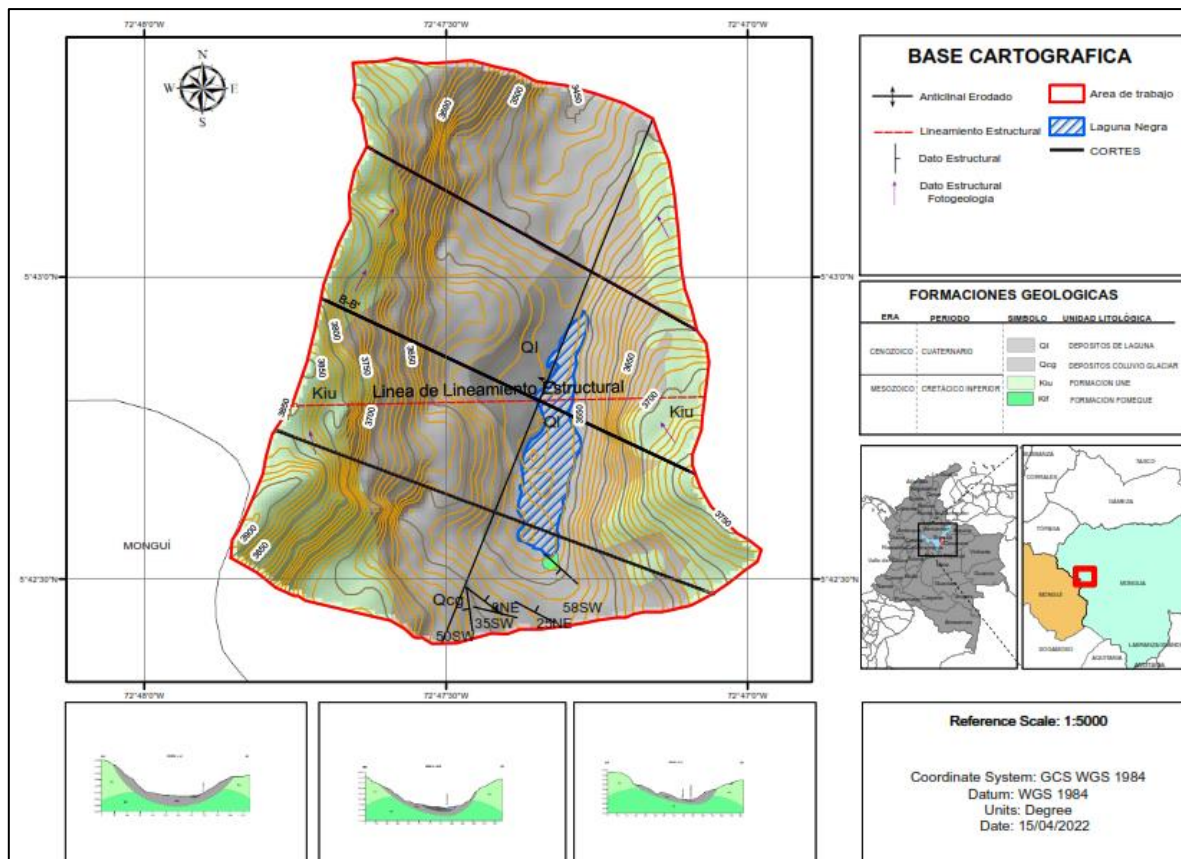


Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Los resultados obtenidos corresponden a la elaboración de un mapa geológico regional a escala 1:3000 (ver figura 28).

Figura 28.

Mapa Geológico Local Área de Estudio.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

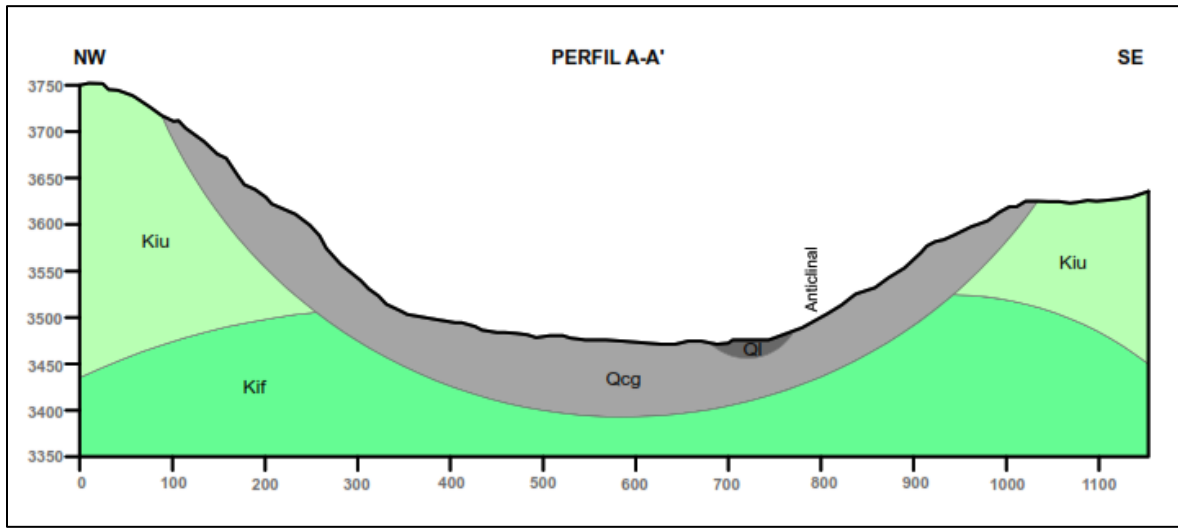
10.1.1 Perfiles Geológicos

Para conocer la disposición estructural del área se realizaron 3 cortes geológicos perpendiculares a la estructura dominante para así conocer la disposición estructural de las capas a profundidad. Determinando así, que los Depósitos Cuaternarios circundantes al área de la laguna negra presenta una potencia a profundidad considerable y una extensión que se

extiende suprayaciendo las formaciones geológicas que se encuentran en los flancos de la estructura anticlinal.

Figura 29.

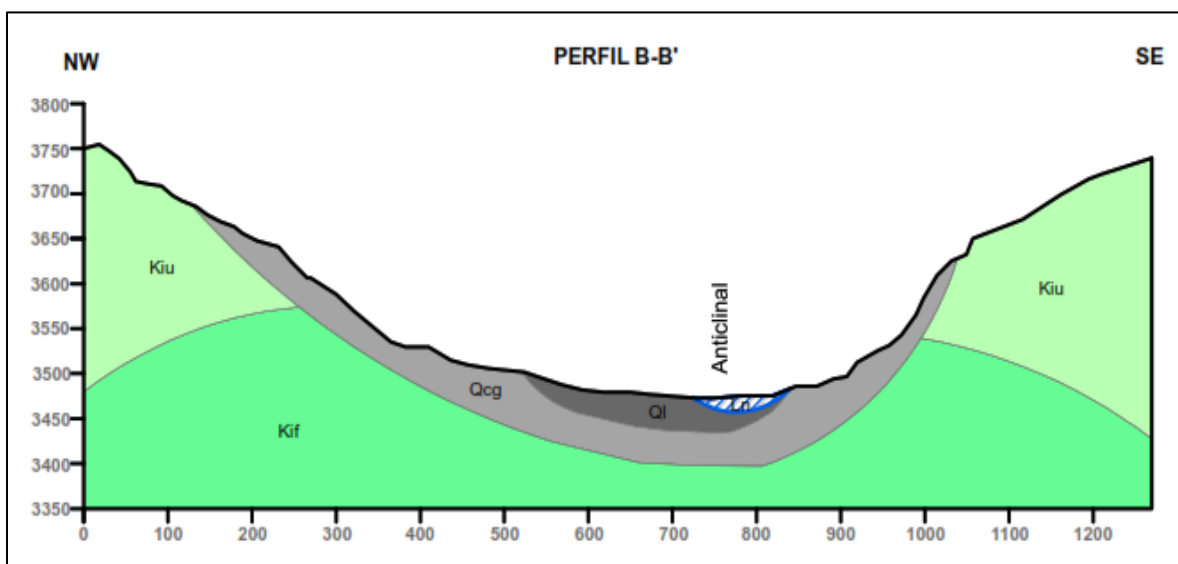
Perfil geológico A-A'



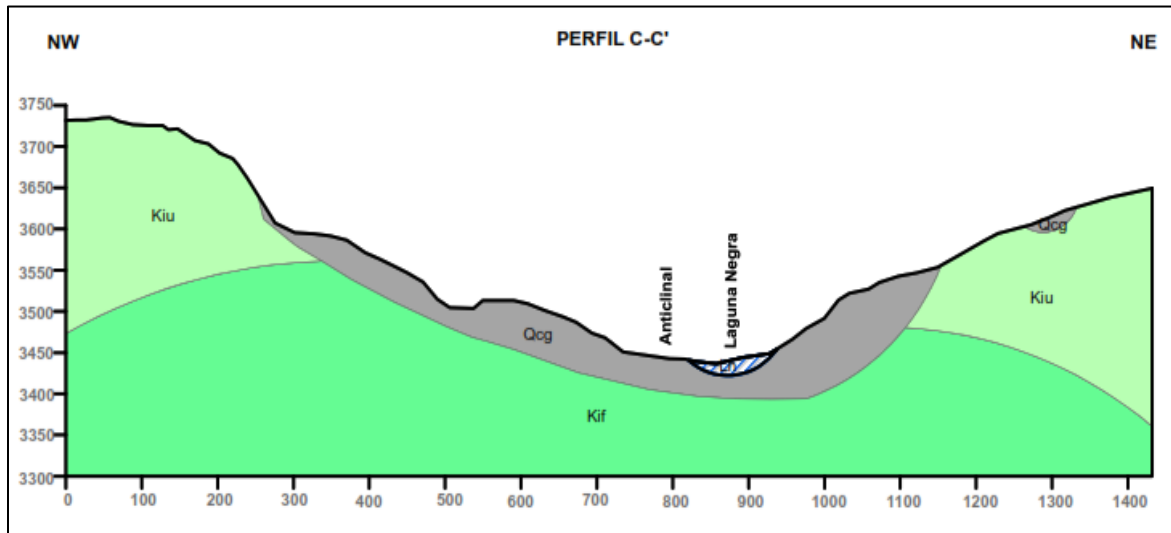
Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 30.

Perfil Geológico B-B'



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 31.*Perfil Geológico C-C'*

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

10.2 GEOELECTRICA

Para la aplicación del método se implementaron 3 sondeos eléctricos verticales (Sevs) con las siguientes coordenadas geográficas descritos en la tabla 3:

Tabla 3.

Características Principales de los Sevs Implementados.

Sev	Coordenadas	Descripción	Apertura AB
1	N 5.70728 W 72.78967 3630 M.S.N.M	Sondeo eléctrico vertical con 250 metros de apertura máxima AB, arreglo tipo Schulumberger simétrico.	250 metros

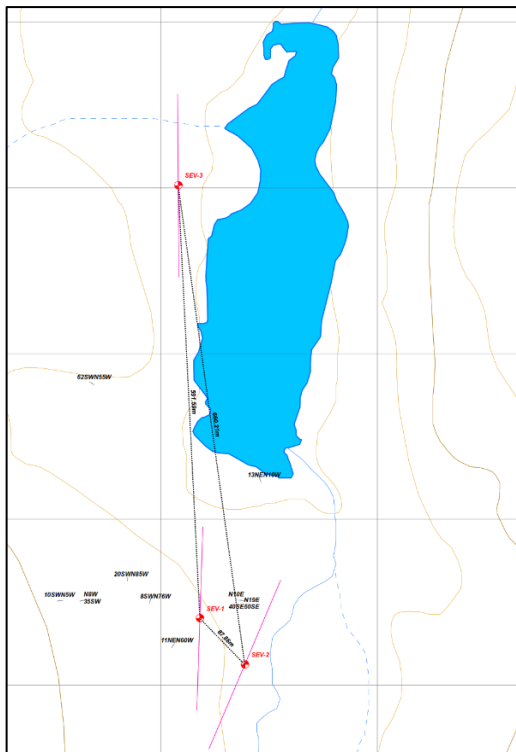
2	N	5°42'24.15'' 72°47'20.83''	W	Sondeo eléctrico vertical con 250 metros de apertura máxima AB, arreglo tipo Schulumber simétrico.	250 metros
		3654 M.S.N.M			
3	N	5°42'24.15'' 72°47'20.83''	W	Sondeo eléctrico vertical con 250 metros de apertura máxima AB, arreglo tipo Schulumber simétrico.	250 metros
		3541 M.S.N.M			

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

La representación de los Sevs dentro del área de estudio está representada por la figura 32:

Figura 32.

Localización de Sevs.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

10.3 SEV 1

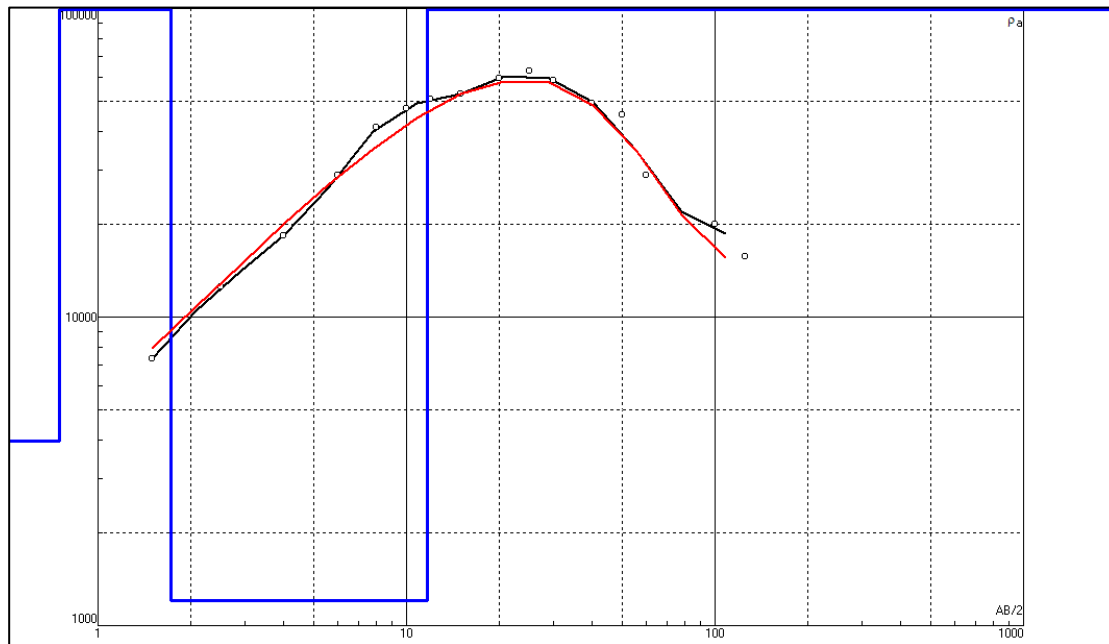
Curva tipo H-K con un porcentaje de error asociado del 7.6% (figura 33). La profundidad de investigación correspondió a 75 metros con una interpretación de 4 capas asociadas a materiales geológicos diferenciables.

La primera capa presenta un espesor de 0,75 metros con un rango de resistividad de 3970 Ohm.m asociado a un suelo orgánico con saturación. Seguido a este se encuentra una capa

de 0,977 metros de espesor a una profundidad de 1.73 metros la cual obtuvo un valor de resistividad de 1000000 Ohm.m asociado a un suelo areno-lodos (limoso) sin saturación el cual se genera y tiene estrecha relación con el depósito coluvio glaciar, infrayaciendo a esta se encuentra una capa de 9.97 metros de espesor a una profundidad de 11.7 metros la cual presenta un valor de resistividad de 1025 Ohm.m y se caracteriza por la presencia de materiales geológicos de tipo homogéneo con bloques de areniscas en una matriz lodosa asociados al depósito coluvio glaciar, debido a la profundidad de la capa, el valor asociado de resistividad y las características de interpretación descritas se determina que en esta capa se encuentra la saturación de agua asociada al nivel freático.

Por último, se identificó una capa de 63.3 metros de espesor, con una profundidad de los 11.7 metros hasta los 75 metros la cual presento un valor de resistividad de 165000 Ohm.m con una interpretación de lodolitas orgánicas asociadas a la formación Fomeque. (figura 34).

En la tabla 4 se describe la correlación lito geofísica.

Figura 33.*Curva de Resistividad Aparente Sev 1*

Nota. Fuente, Ipi2win.

Figura 34.*Valores de Resistividad Asociados al Sev 1*

N	ρ	h	d	Alt
1	3970	0.75	0.75	-0.75
2	1.6E+6	0.977	1.73	-1.727
3	1205	9.97	11.7	-11.7
4	1.6E+5	63.3	75	-74.95
5	6.0E+5			

Nota. Fuente, Ipi2win.

Tabla 4.*Correlación Litogeofísica Sev 1*

SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ESPEJOR (metros)	RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN
1	0 – 0.75	0,75	3970	suelo orgánico saturado
	0.75 – 1.73	0,977	1000000	Suelo areno-lodoso (limoso) sin saturación, suelo formado a partir del depósito coluvio glaciar
	1.73– 11.7	9.97	1025	Deposito coluvio glaciar, bloques de areniscas en una matriz lodosa
	11.7– 75	63.3	165000	Lodolitas orgánicas (formación fomeque)

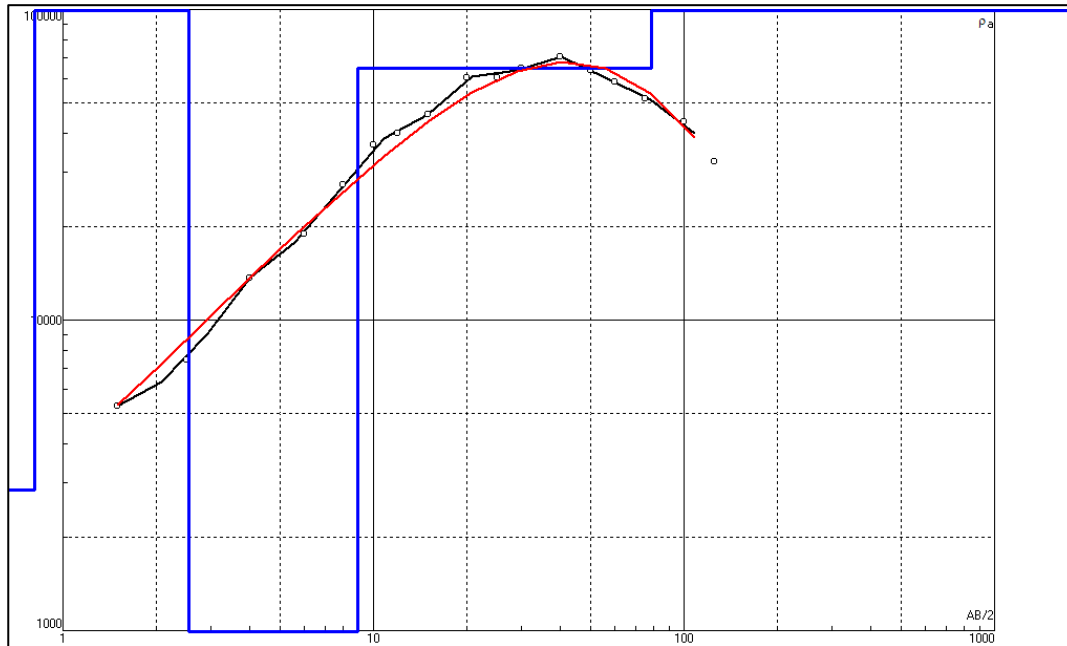
Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

10.4 SEV 2

Curva tipo H-K (figura 35) Con un porcentaje de error asociado del 7.35% en la cual mediante la interpretación se identificaron 4 capas diferenciables correspondientes a materiales geológicos presentes en el subsuelo donde mediante la implementación del método geofísico y el arreglo geométrico tipo Schlumberger se logró una profundidad de investigación de 78.5 metros (figura 36).

La descripción lito geofísica corresponde a su primera capa un espesor de 0.81 metros con una resistividad de 2828 Ohm.m con una interpretación de suelo orgánico saturado, seguido a esta se presenta una capa de 1,73 metros de espesor en un rango de profundidad de 0.81 a 2.54 metros la cual se asoció a un suelo areno lodoso (limoso) sin saturación el cual posiblemente tiene una relación diagenética con el depósito coluvio glaciar, la tercera capa presenta un espesor de 9.97 metros y una resistividad de 993 Ohm.m la cual se asoció litológicamente al depósito coluvio glaciar compuesto por bloques de arenisca en una matriz lodosa, así mismo se determina que por el rango de resistividad y las litologías presentes que en esta capa se presenta el nivel freático, por último se presenta una capa de 69.6 metros de espesor en un rango de profundidad de los 8.93 a los 78.5 metros de profundidad la cual su valor de resistividad de 64561 2828 Ohm.m se asocia a lodolitas orgánicas correspondientes a la formación Fomeque.

En la tabla 5 se describe la correlación litogeofísica.

Figura 35.*Curva de Resistividad Aparente Sev 2**Nota. Fuente, Ipi2win***Figura 36.***Valores de Resistividad Asociados al Sev 2*

Error = 7.35%				
N	p	h	d	Alt
1	2828	0.81	0.81	-0.809
2	1.8E+6	1.73	2.54	-2.54
3	993	6.39	8.93	-8.927
4	64561	69.6	78.5	-78.5
5	8.6E+5			

Nota. fuente, Ipi2win

Tabla 5.*Correlación Litogeofísica Sev 2*

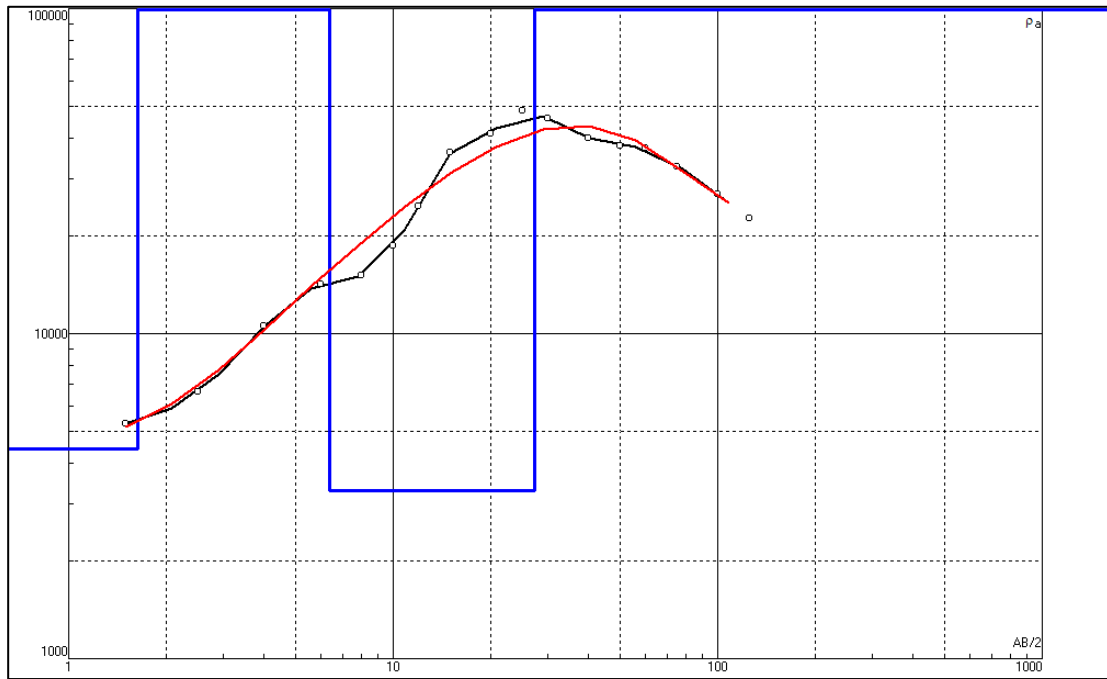
SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ESPESOR (metros)	RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN
2	0 – 0.81	0,81	2828	suelo orgánico saturado
	0.81 – 2.54	1.73	1800000	Suelo areno-lodoso (limoso) sin saturación, suelo formado a partir del depósito coluvio glaciar
	2.54– 8.93	9.97	993	Deposito coluvio glaciar, bloques de areniscas en una matriz lodosa
	8.93– 78.5	69.6	64561	Lodolitas orgánicas (formación fomeque)

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

10.5 SEV 3

Curva tipo H-K (figura 37) con un porcentaje de error asociado del 9.76% en la cual se logró una profundidad de investigación de 80.9 metros con la definición del modelo de capas de 4 unidades diferenciables las cuales se agrupan de la siguiente forma.

La primera capa corresponde litológicamente a un suelo orgánico saturado el cual posee un valor de resistividad de 4414 Ohm.m con un espesor de 1.63 metros, en la profundidad de los 1.61 a los 6.36 metros se encuentra una capa de 4.53 metros de espesor la cual presenta un valor de resistividad de 640000 Ohm.m asociado a un depósito areno lodoso asociado al depósito coluvio glaciar compuesto por una litología heterométrica, en el rango de profundidad de los 6.36 a 27.2 metros se determinó una capa de 20.9 metros de espesor asociada al depósito coluvio glaciar con composición de bloques de areniscas en una matriz lodosa, por último se encuentra una capa de 53.7 metros de espesor en un rango de profundidad entre 27.2 y 80.9 metros la cual posee una resistividad de 420000 Ohm.m la cual se asoció a lodolitas orgánicas correlacionables geológicamente con la formación Fomeque.

Figura 37.*Curva de Resistividad Aparente Sev 3**Nota. fuente, Ipi2win***Figura 38.***Valores de Resistividad Asociados al Sev 3*

N	ρ	h	d	Alt
1	4414	1.63	1.63	-1.629
2	1.7E+5	2.91	4.53	-4.535
3	6.4E+5	1.82	6.36	-6.357
4	3279	20.9	27.2	-27.22
5	4.2E+5	53.7	80.9	-80.93
6	8.6E+5			

Nota. Fuente, Ipi2win

Tabla 6*Correlación Litogeofísica Sev 3*

SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ESPESOR (metros)	RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN
3	0 – 1.61	1.63	4414	suelo orgánico saturado
	1.61 – 6.36	4.53	640000	Suelo areno-lodoso (limoso) sin saturación, suelo formado a partir del depósito coluvio glaciario
	6.36– 27.2	20.9	3279	Deposito coluvio glaciario, bloques de areniscas en una matriz lodosa
	27.2– 80.9	53.7	420000	Lodolitas orgánicas (formación fomeque)

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

10.6 MODELO HIDROLOGICO

Debido a las marcadas variaciones en los regímenes de precipitación del territorio colombiano, la precipitación presenta dos regímenes asociados a un comportamiento bimodal con una época de lluvias seguida de una época de estiaje respectivamente (Ruíz & Cadena, 2014). Una adecuada caracterización de los regímenes de lluvias en un territorio es de importancia para ajustar pronósticos climatológicos y aplicaciones en temas meteorológicos e hidrológicos (Terra, 1994). El régimen pluviométrico Determina el comportamiento de las

lluvias a lo largo de un año, promediando el monto de las precipitaciones obtenidas a lo largo de un número de meses que configuren la serie de tiempo en el espacio completamente definida. El fenómeno se caracteriza por presentar precipitaciones acuosas en forma de gotas líquida cuyo diámetro comprende datos entre 0.5 y 7 mm que caen por gravedad a una velocidad determinada. Para efectos del estudio el volumen de precipitación se mide en milímetros que a su vez equivalen a litros de agua por metro cuadrado.

Para un correcto conocimiento de la dinámica hidrológica del área y la variabilidad espacial de las precipitaciones sobre una serie de tiempo se realizaron graficas de precipitación y temperatura para así representar los cambios mes a mes de estos y establecer en el caso de las precipitaciones variaciones pluviométricas, definición de meses con pocas precipitaciones y definición de año hidrológico. Para el caso de las temperaturas establecer las relaciones entre el mes analizado y la temperatura obtenida para así ser un insumo de partida para la elaboración del balance hídrico.

Con el objetivo de integrar la información hidrometeorológica obtenida y establecer una relación directa entre la precipitación que cae a la superficie del suelo y los procesos de relación directa con el ciclo hidrológico (evapotranspiración real, evapotranspiración potencial) se determinó el balance hídrico de la zona tomando como marco técnico que el balance hídrico constituye una herramienta básica para estimar la disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas y sus componentes permiten evaluar los elementos relevantes que rigen el sistema hídrico de la cuenca (Gómez Reyes, 2013). Para establecer las relaciones entre la precipitación mes a mes, la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial se empleó la metodología de balance hídrico establecida por Thorthwaite (1948) la cual se basó

en función de la variable evapotranspiración, factor de corrección astronómica del día en función del mes y la temperatura media mensual, la metodología descrita por Thortwaite es la más acogida en temas hidrológicos para estimaciones de balances hidrológicos, estudios meteorológicos y análisis espaciales de cuencas hidrográficas.

Balance Hídrico

Metodología empleada para el cálculo de abstracciones hidrológicas dentro de un sistema correspondientes a déficit, excedentes y un término introducido para expresar la relación de precipitación que cae en cierta zona en función de la cobertura vegetal y la temperatura media mensual existente conocida como evapotranspiración potencial. La implementación de dicho método se realizó en Estados Unidos inicialmente para estudiar pequeñas cuencas hidrográficas, su autor asegura que para situaciones climáticas extremas y entornos como zonas áridas la metodología tiene cierto margen de error. (Marín Valencia, 2010).

A continuación, se presenta la ecuación establecida por Thornwaite para el cálculo de la evapotranspiración potencial:

$$ETP = 16Nm \left(\frac{10Tm}{I} \right)^a$$

Donde:

ETP: es la evapotranspiración potencial.

Nm: factor de corrección por la duración del día.

I: Índice de calor anual

$$I = \sum \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.792 * 10^{-2} * I + 0.49239$$

Para el caso presente se tomaron los datos hidrometeorológicos para una secuencia espacial de 20 años correspondientes precipitaciones medias mensuales multianuales y temperaturas medias multianuales descrita para la estación descrita en la tabla 7 a continuación:

Tabla 7.

Datos de la Estación Hidrometeorológica Utilizada para el Cálculo de Balance Hídrico

CODIGO	NOMBRE	CATEGORIA	CORRIENTE	LATITUD	LONGITUD
24030560	Mongua	Pluviométrica	Canal Principal	5,75838889	-72,7945

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Tabla 8.

Datos de Precipitación y Temperatura Utilizados para el Cálculo de Balance Hídrico

MES	VALOR DE PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL	VALOR DE TEMPERATURA
-----	--	-------------------------

	MULTIANUAL	MEDIA MENSUAL
	(mm/año)	MULTIANUAL (°C)
Enero	21	11,1
Febrero	24	10,8
Marzo	60	10,9
Abril	76	10,9
Mayo	93	10,8
Junio	86	10,2
Julio	111	9,7
Agosto	94	9,8
Septiembre	79	10,1
Octubre	79	10,6

Noviembre	73	11
Diciembre	32	11

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Tabla 9.

Cálculo de Evapotranspiración Potencial y Parámetros del Cálculo para el Balance Hídrico

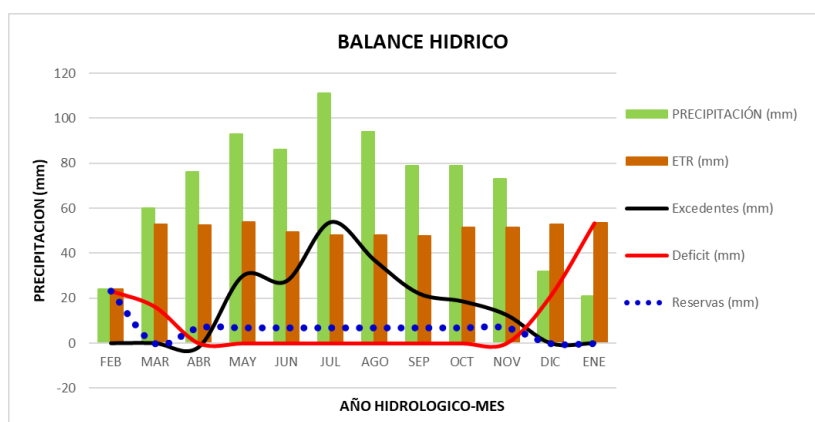
MES	TEM PROMEDIO	NM	I INDICE DE CALOR ANUAL $\sum \left[\left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \right]$	ETP: $16Nm \left[\left(\frac{10Tm}{I} \right)^a \right]$
Enero	11,1	1,02	3,34486353	53,47142646
Febrero	10,8	0,93	3,208950214	47,32017745
Marzo	10,9	1,03	3,254041829	52,9370338
Abril	10,9	1,02	3,254041829	52,42308202
Mayo	10,8	1,06	3,208950214	53,93482591
Junio	10,2	1,03	2,942930958	49,24565385
Julio	9,7	1,06	2,727293134	47,98058205
Agosto	9,8	1,05	2,769973996	48,06176292
Septiembre	10,1	1,01	2,899358867	47,77409535
Octubre	10,6	1,03	3,11941024	51,35234818
Noviembre	11	0,99	3,299346583	51,38977265
Diciembre	11	1,02	3,299346583	52,9470422

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Tabla 10*Cálculo de Parámetros Intrínsecos del Balance Hídrico*

MES	ETP	ETR	DEFICIT	RESERVAS	EXCEDENTES
Enero	47,32017745	24	47,32017745	47,32017745	0
Febrero	52,9370338	52,9370338	100,2572113	0	0
Marzo	52,42308202	52,42308202	0	7	-161,6802933
Abril	53,93482591	53,93482591	0	7	-62,93482591
Mayo	49,24565385	49,24565385	0	7	-58,24565385
Junio	47,98058205	47,98058205	0	7	-56,98058205
Julio	48,06176292	48,06176292	0	7	-57,06176292
Agosto	47,77409535	47,77409535	0	7	-56,77409535
Septiembre	51,35234818	51,35234818	0	7	-60,35234818
Octubre	51,38977265	51,38977265	0	7	-60,38977265
Noviembre	52,9470422	52,9470422	52,9470422	0	0
Diciembre	53,47142646	53,47142646	106,4184687	0	0

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 39*Balance Hídrico Estación Mongua*

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

De acuerdo con la información obtenida para el cálculo del balance hídrico se establece que la infiltración para el área es de alrededor del 9.57% de la precipitación total anual, esto se traduce en una excelente zona de recarga potencial a los acuíferos, cabe destacar que mediante la metodología pudo establecerse la definición de año hidrológico de marzo a diciembre según el régimen de lluvias, estableciendo para el presente caso un régimen bimodal de la precipitación.

De acuerdo con los análisis obtenidos se determina que los excedentes son variables a lo largo del año hidrológico siendo julio el mes con mayores excedentes correspondientes A 57,0617 mm, el déficit a lo largo del año hidrológico se mantiene constante con un valor de 0 de marzo a octubre siendo noviembre, diciembre, enero, febrero los meses con mayor déficit con valores correspondientes a 52,947, 106,418, 47,320 y 100,257 mm respectivamente.

10.7 MODELO HIDRAULICO

Con el fin de poder establecer el comportamiento hidráulico de los materiales geológicos presentes en el área de estudio, y poder tener una premisa del comportamiento del agua subterránea o subsuperficial a través de un medio geológico se realizó la caracterización hidráulica a partir de información secundaria obtenida de autores quienes realizaron caracterizaciones generales de parámetros hidráulicos de forma general para los materiales geológicos similares a los encontrados en el área de estudio. Para el presente caso los parámetros hidráulicos caracterizados correspondieron a parámetros conceptuales relacionados con porosidad, porosidad efectiva y conductividad eléctrica. Los parámetros

hidráulicos mencionados anteriormente se expresaron notación científica respectivamente para cada unidad geológica caracterizada y descrita en el modelo geológico citado puntualmente para cinco autores respectivamente, los cuales permitirán tener una aproximación al comportamiento hidráulico y las condiciones para la movilidad de un fluido a través de un medio y su potencial para almacenar agua.

Mediante la generación de la red de flujo basada en las características topográficas y fisiográficas del terreno, se determinaron las líneas de flujo del área las cuales permitieron establecer el comportamiento del flujo y la tendencia del movimiento de este bajo las condiciones del gradiente hidráulico y determinar así posibles escenarios de aportes, recarga y descarga.

Parámetros hidráulicos conceptuales

Porosidad

Expresa la relación entre volumen de huecos o intersticios intergranulares de una roca o medio y su volumen total, de otra forma expresa la cantidad de agua que un medio hidrogeológico puede almacenar, no obstante, no permite estimar la cantidad de agua que puede salir de un medio específico, su unidad de medida es de tipo adimensional por tanto las relaciones que se pueden dar para expresar la porosidad solo se realiza en porcentajes de estimación (CONSORCIO RÍO GARAGOYA, 2018).

A continuación, se presenta la tabla 11, resumen con diferentes valores de porosidad para los materiales geológicos asociados al marco geológico descrito en el área de estudio:

Tabla 11.*Valores de porosidad para los materiales geológicos descritos*

Porosidad	Depósitos	Deposito Coluvio	Formación	Formación Fomequ
Total m %	de Laguna (Qc)	Glaciar ()	Une (Kiu)	(Kif)
	Arcillas y	Conglomerado	Cuarzo	Lodolitas
	Lodos	(Clastosoportado)	Areniscas	
URREL,,	30-35	20-30	38-42	30-35
K. 1969				
JOHNSO	40-60	25-40	3--25	35-50
N (1967)				
DAVIS				
(1969),				
SCHOELLE				
R (1962)				
FREEZE	40-70	25-40	5--30	35-50
Y CHERRY				
1979				
SANDER	40-60	21-50	5--35	35-50
S 1998				
GUTIER	30-35	20-25	38-42	30-35
REZ G,2004				

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

De acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas y los autores citados se elaboró una tabla resumen con los valores porcentuales y rangos de porosidad para cada tipo de material geológico descrito, categorizando así los valores con más altos rangos en intervalos de 30 a 70 % según diversos autores los cuales se relacionarían a depósitos de laguna compuestos

principalmente por arcillas y lodos, posterior a ello se encuentran las lodolitas las cuales poseen de igual forma un alto rango de porosidad con valores que oscilan entre el 30 y 50 %, con valores de porosidad entre 5 a 42% se identifican cuarzo areniscas y por ultimo materiales geológicos con tamaños de gravas asociados a conglomerados para los diversos autores citados se relacionan rangos de porosidad entre 20 y 50%.

Porosidad efectiva

Corresponde a la fracción volumétrica del material el cual está ocupado por los poros que se encuentran interconectados de modo que permiten así el flujo de agua, la porosidad efectiva está directamente relacionada con la velocidad de flujo del agua a través de un medio y en consecuencia el tiempo de tránsito de las partículas disueltas en ella, por consiguiente, la porosidad efectiva normalmente es menor que la porosidad total (upcommons.upc.edu, 2016).

Mediante la tabla 12 que se relaciona a continuación se identifican rangos de valores porosidad eficaz asociado a los materiales geológicos de interés adaptados del marco geológico local del área de estudio:

Tabla 12.

Valores de Porosidad Eficaz para los Materiales Geológicos Descritos

Porosidad	Depósitos	Deposito Coluvio	Formación	Formación
Efectiva me %	de Laguna	Glaciar ()	Une (Kiu)	Fomeque (Kif)
	(Qc)			
	Arcillas y	Conglomerado	Cuarzo	Lodolitas
	Lodos	(Clastosoportado)	Areniscas	

JOHNSON	0-10	15-35	0-20	2--20
(1967) DAVIS				
(1969),				
SCHOELLER				
(1962)				
CUSTODIO	0-5	13-26	0.5-10	3--19
Y LLAMAS				
1983				
SANDERS	1--8	12--27	0.5-10	3--19
1998				

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la anterior tabla podemos concluir que los mayores valores de porosidad efectiva se relacionan a los conglomerados con rangos que oscilan entre 12 y 35% respectivamente lo cual indica que posee una mayor cantidad de poros interconectados que permiten así un mayor paso de agua a través de un medio determinado, las lodolitas poseen así valores de porosidad efectiva entre 2 y 20% respectivamente catalogados como materiales geológicos con porosidad efectiva moderada, y por último se encuentran las cuarzo areniscas con valores entre 0 y 20% y las arcillas y lodos con valores entre 0 y 10% lo cual permiten catalogarlas como materiales geológicos de tipo impermeables con pocos o nulos espacios intersticiales conectados que permiten el paso de un fluido a través de esta.

Conductividad hidráulica

Conocido como permeabilidad representa el caudal de agua que atraviesa un medio hidrogeológico o sección de unidad en la cual el gradiente hidráulico define las características del medio y la velocidad con que transita, la conductividad hidráulica en términos hidrogeológicos representa la facilidad que tiene una roca para permitir el paso del agua (Villarroya, 2009). La conductividad hidráulica viene determinada en primer lugar por los tamaños de los poros, siendo así que las litologías con poros de mayores dimensiones tendrán mejores características de conductividad hidráulica al estar mejor conectados entre sí. De acuerdo con las diferentes fuentes bibliográficas relacionadas a los tipos litológicos representativos de cada una de las unidades geológicas se obtuvieron los siguientes resultados representados en la tabla 13:

Tabla 13

Valores de Conductividad Hidráulica para los Materiales Geológicos Descritos

Conductividad Hidráulica K (cm/seg) de los materiales geológicos	Depositos de Laguna (Qc) Arcillas y Lodos	Deposito Coluvio Glaciar () Conglomerado (Clastosoportado)	Formacion Une (Kiu) Cuarzo Areniscas	Formacion Fomeque (Kif) Lodolitas
HARR 1962	< 1X10-6	> 1	5 X 10-2 a 5 X 10-3	5 X 10-4 a 5 X 10-5
KRUSEMAN 1970	1.157 X10-8 a 1.157 X10-9	1.157 X10-3 a 1.157	1.157 X10-4 a 1.157 X10-2	1.157 X10-4
CUSTODIO Y LLAMAS 1996	1.157 X10-7 a 1.157 X10-8	0.231 a 1.157 X10-3	1.157 X10-4 a 1.157 X10-6	1.157 X10-4 a 1.157 X10-6

CODUTO	1X10-10 a	1 a 100	1X10-3 a	1X10-8 a
1999	1X10-6		1X10-2	1X10-2
VELEZ 0.,	1157 X 10-6	1.157	1.157 X10-4	1.157 X 10-6
MV 2004				a 0.000578
CONAGUA	1.157 X10-6	1.157X10-1 a	1.157 X10-6 a	—
2007	a 1.157 X10-11	0.231	1.157 X10-3	
SINGHAL &	1.157X 10-	1.157 X10-3 A	1.157 X10-7 a	1.157X10-10
GUPTA 2010	10 A 1.157X10-	1.157 X10-6	1.157X 10-10	A 1.157X10-12

15

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

De acuerdo a los resultados presentados se determina que los materiales geológicos asociados a conglomerados presentan los mayores valores de conductividad hidráulica con rangos entre 1.157×10^{-6} a 100 siendo esta la unidad con mayor potencial hidráulico, así mismo se presentan las cuarzo areniscas con valores de conductividad entre 1.157×10^{-2} a 1.157×10^{-10} catalogadas como unidades con un potencial hidráulico medio donde el caudal que circula a través del medio es más corto y restringido por los tamaños de los poros, seguido a ello encontramos dos litologías que corresponden a unidades con poco o nulo potencial hidráulico asociados a lodolitas y arcillas y lodos respectivamente las cuales se caracterizan por sus bajos valores de conductividad hidráulica asociados a valores entre 1.157×10^{-4} y 1.157×10^{-12} y 1.157×10^{-8} a 1.157×10^{-15} respectivamente, lo cual indica que estas litologías geológicas no permiten la circulación de un fluido de forma óptima por el medio siendo estas condiciones principales para categorizarlas como unidades con baja conductividad hidráulica.

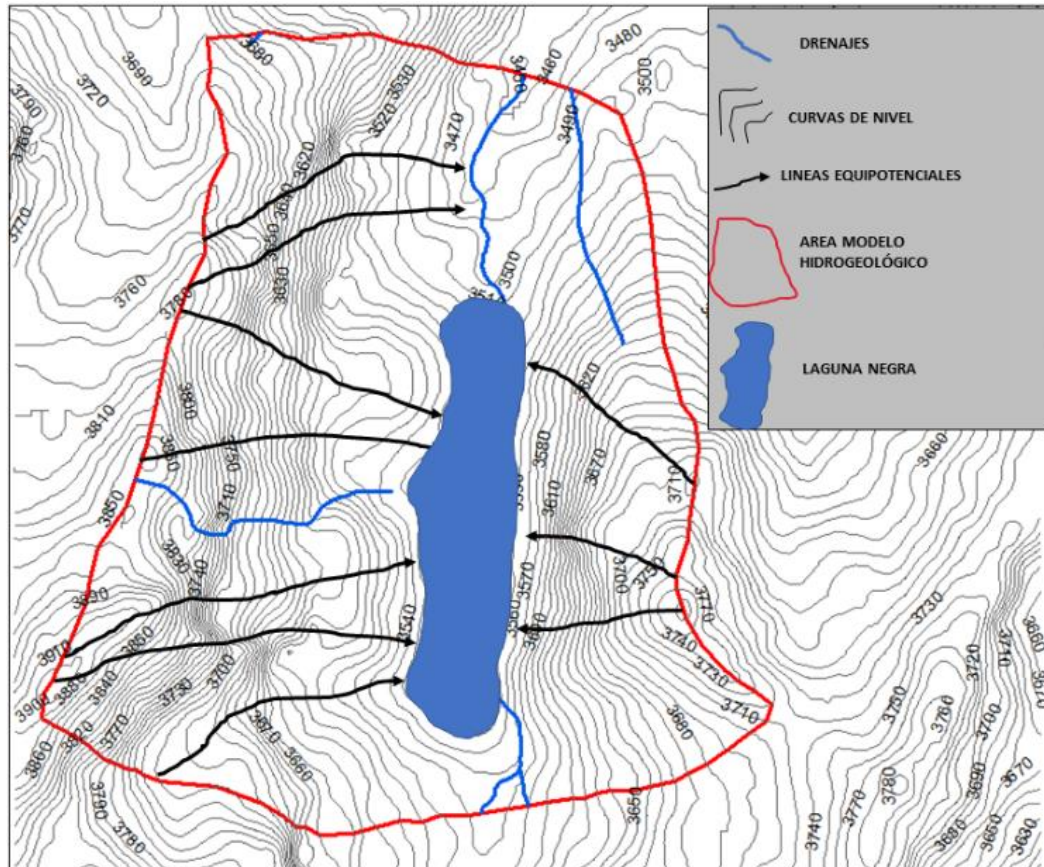
Red De flujo

O llamadas también líneas de flujo describen de forma esquemática e idealizada el comportamiento del agua en un escenario bajo las condiciones de incidencia del gradiente hidráulico, topografía, geología, en las cuales bajo una base cartográfica se describen mediante líneas las posibles direcciones del agua en el tránsito desde sus zonas de recarga a descarga, teniendo como premisa que el agua desde el punto de vista hidráulico tendera a seguir el camino más corto entre un punto y otro.

Dicho así la red de flujo permite esquematizar mediante la creación de líneas equipotenciales que relacionan altitudes o elevaciones la direcciones del flujo del agua en un medio (Sánchez San Román, 2016), del concepto de líneas de flujo derivan dos conceptos fundamentales asociados a líneas equipotenciales como lo son el potencial hidráulico descrito como superficies que unen puntos de igual valor de potencial, por lo tanto sugieren la presencia de una tabla de agua o superficie piezométrica y la representación esquemática de los tránsitos de agua a través de un medio anisotrópico(Rebollo, 2016b).

Previo a la construcción de la red de flujo se establecieron las fronteras hidrogeológicas del modelo las cuales se definen como los límites de incidencia sobre los cuales se puede establecer el comportamiento de flujo y las interacciones que esté presente con el medio.

Figura 40
Red de Flujo.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Para el presente caso los límites este y oeste del modelo constituyen las divisorias de aguas tomadas a partir de la topografía del área y delimitadas como los puntos con mayores datos altitudinales prolongándose de forma perpendicular a las líneas equipotenciales (curvas de nivel), para el presente caso se utilizaron como fronteras del modelo este y oeste las divisorias de aguas debido a que estas constituyen puntos de elevación que permiten con ayuda del gradiente hidráulico establecer las posibles direcciones del flujo, para los límites norte y sur del modelo se trazaron líneas las cuales cortaron de forma perpendicular las curvas de nivel

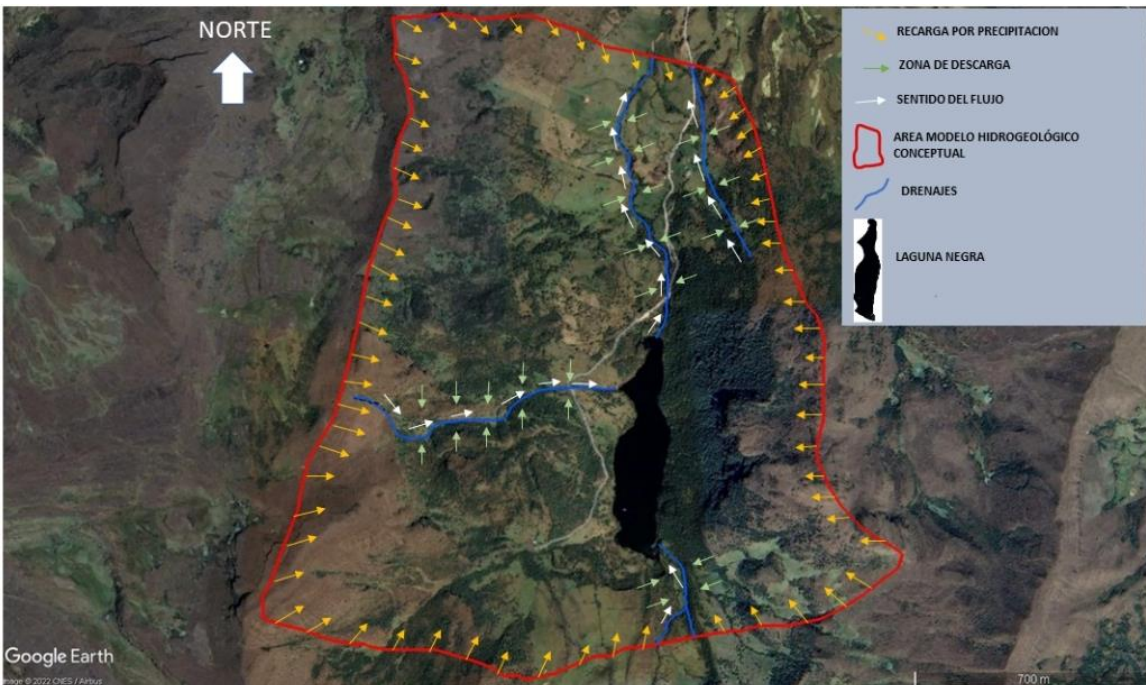
y drenajes menores presentes en el área. Para el desarrollo de las fronteras se tuvo en cuenta la geología basada en las litologías presentes del modelo y las principales características estructurales, estableciendo, así como fronteras este y oeste del modelo los flancos del anticlinal erodado presente en el área

Para el caso específico de estudio se realizó la definición de las fronteras hidrogeológicas del modelo basados en la base topográfica a partir del Dem (modelo digital de elevación) Alos Palsar con generación de curvas de nivel cada 10 metros, identificando así divisorias de aguas con elevaciones topográficas marcadas y siguiendo el patrón de las curvas de nivel para conformar así las fronteras Este y Oeste del modelo, para las fronteras Norte y Sur la delimitación se hizo perpendicular a las curvas de nivel cortando drenajes secundarios de forma perpendicular y siguiendo el patrón de conformación de las curvas de nivel teniendo en cuenta el gradiente hidráulico y la espaciación de las curvas de nivel junto a su valor de elevación.

A partir del presente análisis sobre los insumos obtenidos se determinan las líneas de flujo que describen el comportamiento idealizado de una gota de agua dentro de los límites de las fronteras hidrogeológicas establecidas previamente, presentándose líneas de flujo al costado Oeste con una tendencia noreste y sureste y para el caso del límite Este del modelo las líneas de flujo confluyen en una dirección noroeste-suroeste respectivamente. Dichas líneas de flujo definen el comportamiento de los flujos los cuales tienen una dirección de confluencia hacia el sistema lentic (laguna negra), se determina que mediante el análisis de las líneas equipotenciales y las direcciones de flujo establecidas la mayor parte del flujo debido a la disposición geológica y estructural del área de estudio confluye hasta integrarse al sistema lentic y drenajes intermitentes encontrados dentro de los límites del modelo.

Figura 41

Diagrama de Recarga por Precipitación, Direcciones de Flujo y Descarga.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

El anterior diagrama permite tener una aproximación al comportamiento hidrológico e hidráulico de la zona describiendo así el comportamiento del agua que ingresa al modelo en forma de recarga por precipitación la cual debido a la influencia topográfica y estructural se descarga hacia los drenajes presentes los cuales debido al sentido del flujo y las condiciones topográficas integran los flujos hacia el sistema lentic laguna negra, en la cual sobre el límite norte de la fronteras hidrogeológicas descritas presenta un drenaje de desagüe el cual se ve influenciado por las aguas contenidas en la laguna y la precipitación por precipitación y el respectivo proceso de descarga sobre los drenajes.

10.8 MODELO HIDROGEOQUIMICO

La hidrogeoquímica se basa en la interpretación de la distribución de los elementos químicos en el agua subterránea. Tiene como propósito ayudar en la comprensión de las condiciones hidrogeológicas tanto de formación como de evolución del agua subterránea (Rojas Pérez, 2018)


Diagramas Hidroquímicos

La representación de los datos asociados a muestreos hidroquímicos realizados son fundamentales para realizar interpretaciones acertadas en temas de aguas superficiales y subterráneas, esta representación mediante diagramas permite tener una visualización simple del comportamiento a nivel iónico que presenta las aguas, establecer relaciones de intercambio, describir fenómenos de enriquecimiento que sufren las aguas al atravesar diversos medios geológicos y determinar premisas sobre la naturalidad de las aguas (regionales, locales) y su relación hidrogeológica (Ecured, 2017).

Para el desarrollo del presente capítulo se realizó una campaña de campo en la cual se tomaron muestras de agua de las potenciales fuentes que alimentan al sistema lentic: Laguna Negra, un drenaje intermitente sobre el depósito coluvio glaciar, suelo orgánico en inmediaciones al sector sur de la laguna y una cascada en el sector sur o afluente que recarga la laguna, a continuación se presenta la tabla 15 con los resultados fisicoquímicos obtenidos para cada muestra donde se presentan los resultados de los aniones y cationes mayoritarios en mg/L y los parámetros físico químicos correspondientes a conductividad eléctrica y PH en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y unidades de PH respectivamente:

Tabla 14

Caracterización de los reservorios muestreados para el análisis isotópico.

Muestra	Reservorio	Foto
Laguna (P1)	superficial	
Drenaje (P2)	superficial	
Suelo orgánico (P3)	superficial	
Agua Lluvia (P4)	superficial	

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Tabla 15

Valores de aniones, cationes y parámetros fisicoquímicos obtenidos mediante ensayos de laboratorio

Muestra	Aniones Mayoritarios (mg/l)				Cationes Mayoritarios (mg/l)				Conductividad Eléctrica (μ S/cm)	PH (unidad de PH)
	Cl	NO3	SO4	HCO3	Na	K	Mg	Ca		
Laguna (P1)	<	<	1	47,	<	<	1,	11	87,9	6,86
	0,70	0,30	3,7	7	4,00	4,00	23	,5		
Drenaje (P2)	<	<	5	71,	4,	<	3,	31	210	7,58
	0,70	0,30	1,4	3	38	4,00	90	,1		
Suelo orgánico (P3)	1,	<	9	37,	<	<	1,	11	74,2	6,65
	3	0,30	,42	2	4,00	4,00	12	,0		
Agua Lluvia (P4)	<	<	5	41,	<	<	<1	9,	76,5	7,81
	0,70	0,30	,99	1	4,00	4,00	,00	76		

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Aunque existe una diversidad de diagramas desarrollados e implementados para realizar análisis hidrogeoquímicos, para el caso particular del presente estudio se plotearon los datos obtenidos mediante muestreos y análisis de laboratorio con los diagramas de Piper Hill debido a que este permite visualizar los porcentajes de concentración de los cationes y aniones mayoritarios y así mismo poder establecer procesos de intercambio catiónico, de igual forma este diagrama es ideal para representar los componentes iónicos en forma simultánea y agrupar los resultados mediante un triángulo que interpreta la facies

hidroquímicas de las aguas, el diagrama Schoeller Berkloff fue utilizado debido a que permite diferenciar de acuerdo a la presencia de aniones y cationes mayoritarios presentes en la muestra su posible génesis y fenómenos de enriquecimiento e intercambio iónico, por último el diagrama de Stiff permite realizar un análisis espacial del comportamiento hidrogeoquímico de varias muestras en función de sus aniones y cationes característicos y predecir el comportamiento iónico a lo largo de un acuífero o una estructura de muestreo definida (Aguaysig.com, 2016). Los anteriores diagramas fueron realizados mediante el software Diagrammes en el cual se realiza la representación, análisis e interpretación de los datos obtenidos.

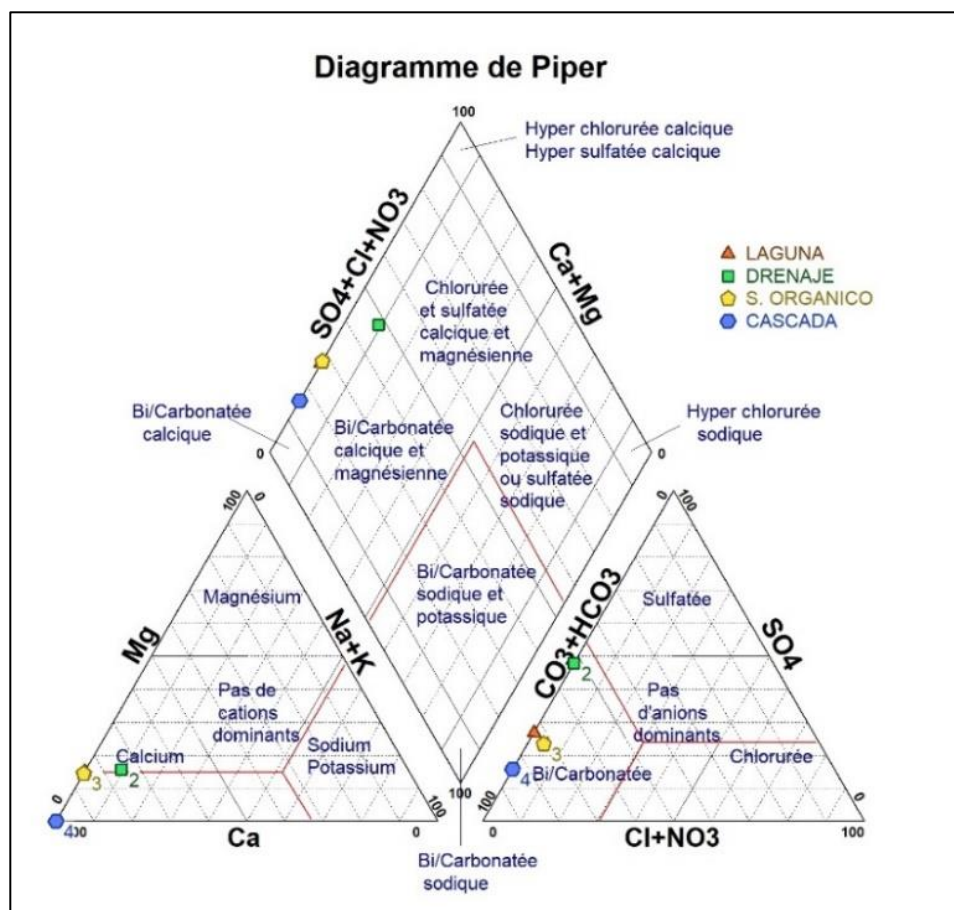
Diagrama de Piper Hill

Diagrama de tipo trilineal en la cual se representan tres triángulos equiláteros para expresar en cada uno la relación de aniones, cationes y por último un triángulo que agrupa la facie final producto de la integración de los porcentajes obtenidos de aniones y cationes. Para la interpretación de los datos se utilizan relaciones de equivalencia en miliequivalentes-litro para designar las concentraciones y para su entendimiento se expresan en porcentajes sobre el diagrama respectivo. Su utilidad en temas de recursos hídricos superficiales y subterráneos se da en determinar procesos de mezcla, disoluciones, precipitaciones y tener un aproximación a la evolución hidrogeoquímica del agua (Bustamante Ibañez Elizabeth Arely, 2017).

Mediante la representación de los datos en el software se obtuvieron las siguientes graficas analíticas e interpretativas presentadas en la figura 39:

Figura 42

Diagrama de Piper Hill



Nota, Fuente. Diagrammes, 2022

De acuerdo con el grafico presentado para clasificación de aniones se identifica una clara dominancia en la clasificación del anión bicarbonato, seguido a este el catión con dominancia corresponde al tipo cálcico y magnésico respectivamente. Bajo la clasificación del cuadro presentado se presenta un rombo que clasifica dependiendo el porcentaje presentado para aniones y cationes y determina la facie hidro química en la cual se ajustan las muestras

analizadas, determinando que las muestras tomadas en el páramo de Oceta sector alguna negra presentan una facie bicarbonatadas cálcicas o magnésicas.

Se puede determinar que el agua a medida se precipita e interactúa con la superficie del suelo viene cargado con dióxido de carbono CO₂ presente en la atmosfera, así mismo se establecen ciertas relaciones hidroquímicas dependiendo la muestra tomada y la concentración de aniones y cationes mayoritarios descritos a continuación:

Para el caso de la cascada se determinan mayores niveles de gas carbónico, este tipo de agua es reciente y se caracteriza porque no ha tenido mucho contacto con los materiales geológicos ya sean suelos o rocas, esto se evidencia con la carencia del aporte de aniones solubles (Sulfatos, Cloruros, Nitratos) por el contacto con los minerales. Los intercambios aniónicos para el caso de los sulfatos se producen por la oxidación de los sulfuros, el cloruro se presenta por la disolución de las sales en las rocas, la alta abundancia del catión calcio es debido a la alta presencia de ácido carbónico, los bajos contenidos de sodio y potasio respectivamente describen que este tipo de agua es de precipitación directa de tiempo reciente y con tiempos de tránsito muy bajos.

Los suelos orgánicos se determinan como unidades de suelo en estado intermedio con una marcada transición a la madurez con tiempos de tránsito mucho mayores, este tipo de suelos se caracteriza por almacenar agua a través del tiempo y para el presente caso actúan como un regulador hídrico y poseen mayores tiempos de permanencia lo cual determina un impacto directo sobre la recarga del sistema lentic laguna negra en los escenarios en los cuales se presente una marcada disminución del régimen de lluvias y no exista un aporte considerable de los drenajes superficiales.

Para el caso del drenaje intermitente se determina un contenido de sulfatos al 50% y se identifican valores anómalos de cloruro (valores por debajo del límite de detección) y por los valores hidroquímicos obtenidos se determina que parte de esa agua viene de los depósitos coluvio glaciares y posiblemente se están presentando procesos de recarga de las litologías geológicas que se encuentran debajo del depósito coluvio glaciar, geológicamente se describe como el agua que procede de la formación geológica Une (Kiu) la cual recarga el acuífero coluvio glaciar de aguas provenientes de la formación rocosa para el caso de este análisis se evidencia una alta interacción de los sulfatos y se relaciona a una posible interacción con agua subterránea.

Diagrama de Schoeller Berkaloff

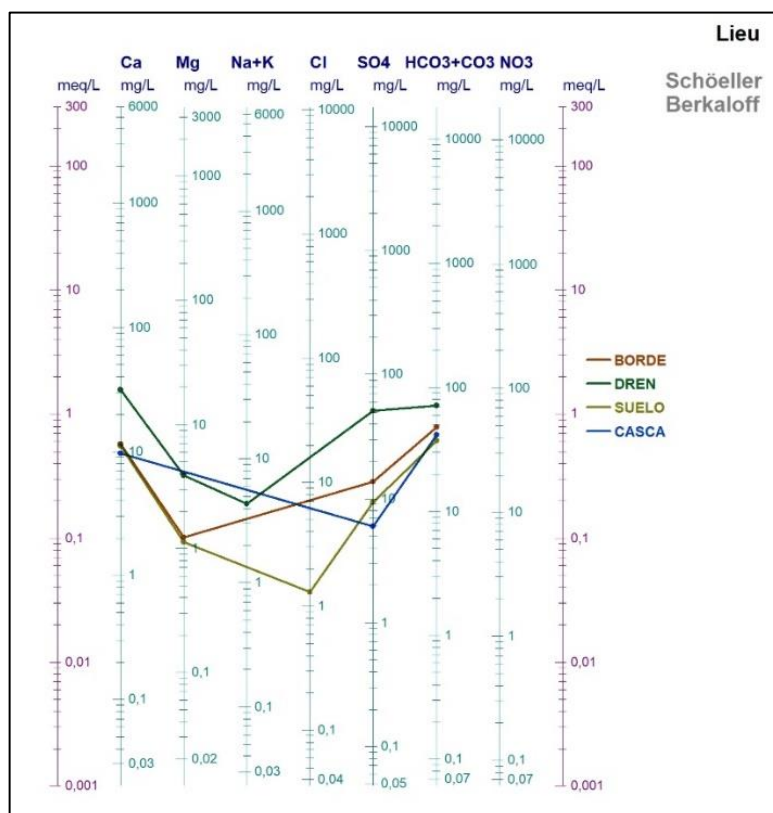
Schoeller (1962) desarrollo diagramas semilogarítmicos para representar los principales análisis de iones en (meq/L) para demostrar diferentes tipos de agua de tipo hidro químico en el mismo esquema. El número de análisis que se pueden ilustrar a la vez es limitado debido a las líneas. En los diagramas de Schoeller o de columnas verticales se representa el valor en miliequivalentes por litro (meq/L) de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, utilizando una escala logarítmica y uniendo puntos mediante una secuencia de líneas (Ecured, 2017).

El gráfico (figura 43) tiene la ventaja de que a diferencia de los gráficos trilineales se muestran las concentraciones reales de los parámetros, permite representar varias muestras en un mismo diagrama para su comparación, es apropiado para estudiar evoluciones temporales de aguas en un mismo punto y variaciones composicionales en muestras de diferentes localidades. Es útil para representar en un mismo diagrama aguas de baja y alta

salinidad y observar así mismo la relación entre iones asociada con la inclinación de las líneas (Ecured, 2017).

Figura 43

Diagrama de Schoeller Berkaloff



Nota, Fuente. Diagrammes, 2022

Se establece a partir del análisis de las gráficas que la totalidad de las muestras poseen marcado niveles altos de bicarbonatos HCO₃, pero para el caso del suelo orgánico en especial este presenta una anomalía negativa de concentraciones de cloruro, sodio y potasio respectivamente esto permite establecer que no existe presencia de terrígenos o arcillas, al ser suelos orgánicos estos se forman netamente por materia orgánica, el posible dato anómalo de cloruro se puede asociar directamente a la ausencia de sales disueltas .

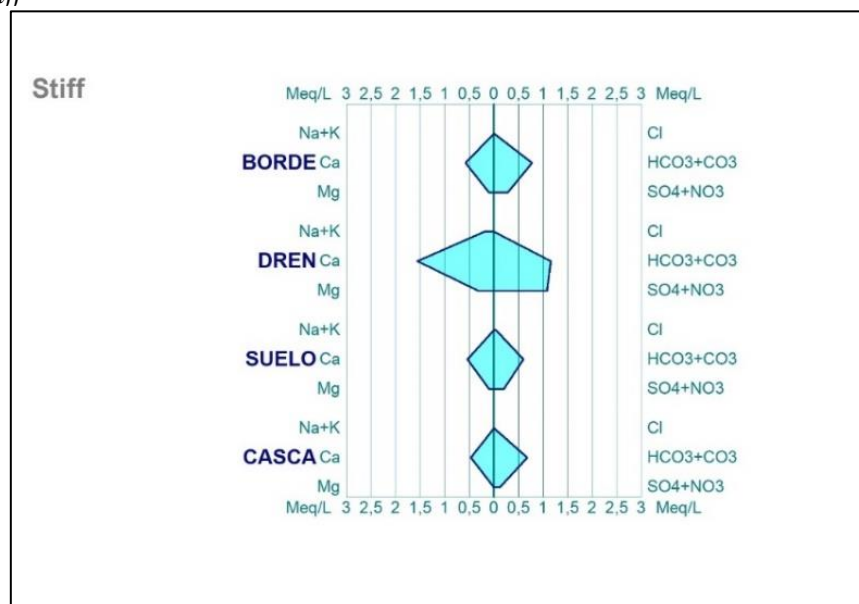
Diagrama de Stiff

Constituidos como diagramas de tipo horizontal permiten visualizar mediante la representación iónica a un costado la concentración de aniones y al otro costado respectivamente la abundancia de cationes por muestra definida, el ploteo de los datos se muestra mediante rombos que presentan la marcada tendencia hacia un ion o catión dependiendo la naturaleza de la muestra.

Los ejes de representación de los datos se encuentran en una misma escala y en unidades de miliequivalentes por litro y de acuerdo a la abundancia de iones o cationes el rombo que relaciona los contenidos iónicos tendrá una tendencia marcada, es de indicar que el tamaño del rombo de representación en el diagrama de Stiff indica una aproximación al contenido total de iones y contenido salino. (Aguaysig.com, 2016). En la figura 44 se presenta el diagrama de Stiff para el estudio en mención.

Figura 44

Diagrama de Stiff



Nota, Fuente. Diagrammes, 2022

Isotopos Ambientales

Su ocurrencia en el medio ambiente se da por procesos naturales y el desarrollo de procesos de tipo antrópico de impacto significativo. Estos isotopos se pueden clasificar en estables o inestables los cuales desde el punto de vista de la ingeniera hidrológica y fines hidrogeológicos se utilizan para determinar orígenes de aguas, determinar zonas de recarga, descarga y temas relacionados con contaminación de acuíferos y suelos. (Vélez O & Rhenals G, 2016)

Isotopos Estables

Las técnicas isotópicas que se han venido aplicando en la evaluación de recursos hídricos durante más de cincuenta años, constituyen en la actualidad una valiosa e imprescindible herramienta de investigación y evaluación. El concepto de trazador en hidrología, entendido como aquella sustancia que, incorporada a la masa de agua, permite investigar el comportamiento de ésta en el medio que la contiene, encuentra aplicación directa en el caso de los isótopos del oxígeno (O - 18) y del hidrógeno (H - 2), pues ellos forman parte de la molécula del agua y por tal motivo pueden considerarse como trazadores ideales.

La composición de los isótopos estables que integran la molécula de agua (O - 18 y H - 2), proporcionan información que permite identificar las áreas de precipitación o infiltración, determinar tiempos de tránsito, diferenciar tipos de agua y en general investigar el origen del agua subterránea.

La concentración de isótopos estables δD y $\delta^{18}O$ está controlada principalmente por la lluvia, no obstante existen otros factores que determina el hallazgo y concentración de estos isotopos estables en el medio como los son las condiciones altitudinales, efecto de

continentalidad, el régimen de precipitación y la definición de año hidrológico., factores de vital importancia para la estimación de las zonas de recarga en un área determinada y determinar cuando un agua determinada procede de áreas altitudinalmente diferentes a donde se analiza la muestra (aguas ligeras) y también para estimar la influencia de la precipitación para determinación de zonas de recarga a nivel local. El estándar internacional para la medida de las relaciones H2 / H1 y O18 / O16 es un agua de mar que se denomina SMOW (Viena - Estándar Mean Ocean Water). Después de las últimas calibraciones del estándar, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) recomienda usar como estándar la llamada VSMOW. Cabe resaltar que la desviación isotópica de O - 18 y H - 2 del estándar respecto a él mismo es igual a cero. Esta nueva recalibración no afecta en absoluto a las medidas previas, siendo más una recomendación formal (Doménico & Schwartz, 1990)

A continuación, se presenta la tabla 16 con las principales características de los muestreos isotópicos realizados:

Tabla 16.

Principales características del muestreo isotópico

TIPO DE ANALISIS	FUENTE DE LAS MUESTREAS	DE AGUAS MUESTREADAS	LUGAR DE MUESTREO	MUESTRAS	COORDENADAS	ELEVACION (MSNM)	TOTAL, MUESTRAS
ISOTOP OS ESTABLES (H2 Y O18)	AGUAS SUPERFICIALES (CUERPO LENTICO)	Laguna Negra	ISO-LN-P1-E-1	N 05.71219	W 072.78945	3493	1
	AGUAS SUPERFICIALES (DRENAJE)	Drenaje	ISO-LN-P2-E-1	N 05.71052	W 072.78974	3514	1

AGUAS	Suelo	ISO-LN-	N	W	3521	1
SUPERFICIAL		P3-E-1	05.70914	072.78922		
ES (SUELO						
ORGANICO)						
AGUAS	Drenaje	ISO-LN-	N	W	3516	1
SUPERFICIAL		P4-E-1	05.70887	072.78899		
ES (AGUA						
LLUVIA)						

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

La mejor interpretación de los análisis isotópicos es la que se hace con base en la llamada línea meteórica isotópica, obtenida con los resultados de los análisis de todas las muestras, ya que en ella se integran las variaciones de la concentración isotópica (y contrastes), en unidades de desviación delta (δ), que están relacionados con la temperatura a la cual se presentó el cambio de estado de vapor a líquido (cuando ocurrió la precipitación), y que depende de la altura sobre el nivel del mar. Dichos contrastes se aprovechan para investigar e identificar el origen del agua subterránea, mezclas e interconexiones. El principal objetivo de realizar una caracterización isotópica del cuerpo lentic (Laguna Negra) y de los cuerpos loticos (drenajes y cascada) es poder integrar la información geológica, hidráulica, y físico química para poder así establecer posibles proveniencias de las aguas analizadas, tiempos de tránsito, características hidroquímicas y validar la dinámica hidrogeológica sobre la cual se pueden evaluar posibles escenarios de recarga, mezcla y descarga de aguas.

Tabla 17.*Resultados Obtenidos de los Análisis Isotópicos*

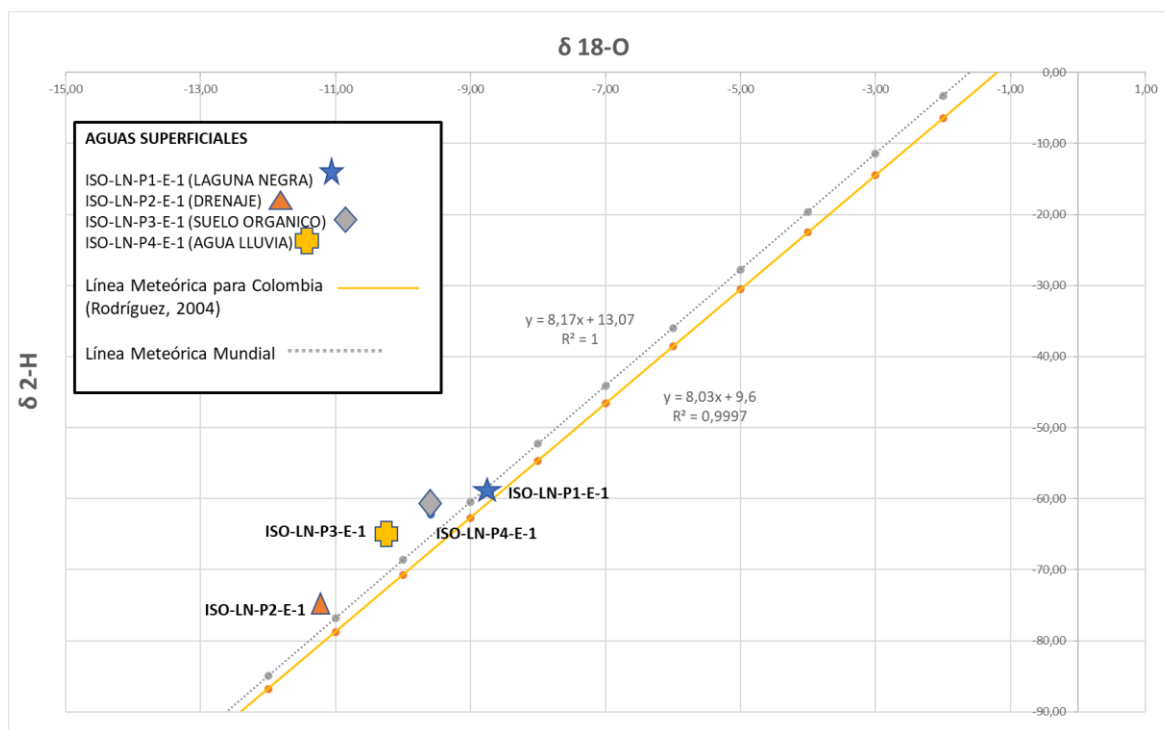
#	Sample	Date	Lab#	$\delta^{18}O$	Result	Repeat	δ^2H	Result	Repeat	pH	EC	
				H2O	VSMOW \pm		H2O	VSMOW \pm 0.8‰			uS/cm	
					0.2‰							
1	ISO-LN-P1- E-1	26/03/2022	475255	X	-		X	-59,33		250ml	5,5	86
					8,71							
2	ISO-LN-P2- E-1	26/03/2022	475256	X	-		X	-75,75		250ml	6	232
					11,24							
3	ISO-LN-P3- E-1	26/03/2022	475257	X	-		X	-62,21		250ml	5,5	53
					9,59							
4	ISO-LN-P4- E-1	26/03/2022	475258	X	-	-	X	-64,97	-65,10	250ml	5,5	95
					10,24	10,23						

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

En la figura 45 se presenta la línea meteórica mundial y para Colombia, elaborada con los resultados isotópicos obtenidos mediante el muestreo realizado en campo, específicamente para los isótopos de O - 18 y H - 2 (expresados en unidades de desviación δ):

Figura 45

Interpretación de datos isotópicos frente a la línea isotópica para Colombia



Nota. de color naranja y la línea isotópica mundial de color gris (Modificado de Rodríguez, 2004)
Fuente. Elaboración Propia, 2022

A continuación, se describen las principales características isotópicas y su significado hidrogeológico para cada uno de los tipos de agua estudiados:

Aguas Superficiales (Laguna Negra): corresponde a la muestra ISO-LN-P1-E-1, específicamente esta muestra presenta una relación isotópica coherente con las líneas meteóricas local y mundial y al mismo tiempo correlacionable entre las dos (relaciones isotópicas equivalentes), debido a la relación isotópica de la muestra se determina que la

mayor parte del agua que se descarga en ella corresponde a aguas lluvia con tránsitos cortos lo cual estabiliza la relación isotópica y permite que esta tenga un comportamiento y tendencia similar a las líneas meteóricas local y mundial respectivamente. De igual forma se puede determinar que el sistema lentic lago negro corresponde a un sistema de descarga de flujos tributarios de zonas más altas.

Aguas Superficiales (Drenaje): asociado a la muestra ISO-LN-P2-E-1, el drenaje presenta un comportamiento de agua liviana proveniente de zonas más altas de la cual fue tomada la muestra, desde el punto de vista isotópico estas aguas se están volviendo más livianas de lo normal apreciado por el valor del mismo graficado y el cual se encuentra fuera de la recta, debido a ello se puede determinar que el agua del drenaje proviene de una cota altitudinal mucho mayor y permite a su vez establecer una diferencia de relaciones isotópicas y altitudinales frente al drenaje y la Laguna Negra, sumado a esto debido a los resultados obtenidos de los análisis físico químicos realizados y a los cationes y aniones mayoritarios muestreados y caracterizadas se determina un enriquecimiento de las aguas al atravesar diferentes medios geológicos, por tanto se determina que dichas aguas presentan una conexión con las aguas subterráneas provenientes de la formación geológica Une (Kiu) y los depósitos coluvio glaciares.

Aguas Superficiales (Suelo Orgánico): categorizada con el código ISO-LN-P3-E-1, presenta de igual forma un comportamiento como aguas livianas las cuales han tenido un flujo desde zonas altitudinalmente más altas, con tránsitos más cortos y flujos más rápidos, por tanto se determina que los suelos orgánicos presentes en este sistema de paramo se convierten en reguladores hídricos de tiempos de tránsito cortos donde las aguas almacenadas

allí no tienen largos tiempos de permanencia y por el contrario se integran al modelo como una descarga constante al sistema lentico laguna negra.

Aguas de precipitación (Agua Lluvia): Se tomo una muestra representativa del agua lluvia con la finalidad de obtener la relación isotópica representativa al momento del estudio para la elaboración de los modelos de mezcla, así mismo corroborar las características de esta aguas en relación a las líneas meteóricas mundial y para Colombia donde se evidencia que esta agua es relativamente más liviana que aguas de esta misma altura dentro de la línea isotópica de referencia lo que permite inferir que para los objetivos de la presente investigación se puede utilizar este datos puntual, pero se recomienda elaborar la línea isotópica para el área de estudio a partir de datos tomados para mínimo un año hidrológico.

Se puede determinar y establecer que el sistema lentico Laguna Negra depende en gran parte del agua lluvia, y es así como esta posee una mayor huella isotópica, debido a este análisis y los procesos asociados es que el dato obtenido para el análisis de isotopo de O - 18 y H - 2 se encuentra con un comportamiento correlacionable y coherente con las líneas meteóricas local y mundial respectivamente, este aporte significativo de las aguas lluvias en todas las muestras analizadas es la que permite que estas tengan un comportamiento de tipo liviano y ese comportamiento isotópico característico. Así mismo estableciendo una relación de las posibles recargas del sistema lentico laguna negra en función de la variación altitudinal de una mayor altura a una menor altura se determina los posibles escenarios de aporte a la laguna y que las muestras de mayor altura corresponden a las tomadas en la cascada, seguidas por el agua del suelo orgánico, y posteriormente el drenaje.

Análisis y resultados físicos (pH y conductividad eléctrica)

La caracterización física en aguas no sólo es útil para conocer la calidad del agua, sino que también permite conocer la naturaleza de los compuestos derivados de las formaciones geológicas que atraviesa y las propiedades químicas de éstas, las cuales las convierte en aportantes de compuestos directa o indirectamente a través de reacciones químicas,

Para el caso de las aguas subterráneas las relaciones de conductividad eléctrica y pH presentan una relación directamente proporcional lo cual se traduce en una mayor capacidad de disolución debido a que están más tiempo anidadas dentro de las formaciones geológicas.

pH

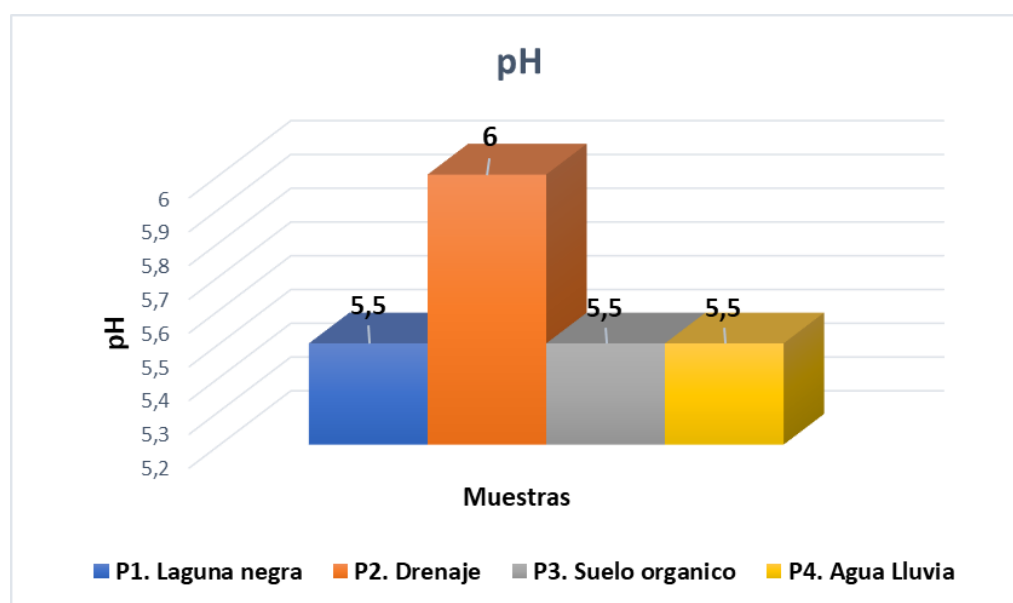
El pH permite determinar la concentración de iones de hidrógeno y el comportamiento de éstos en función de ciertas características físicas y químicas del agua, estas características determinan las condiciones ácidas o básicas de un líquido. El nivel de pH es un indicador de comportamiento de la reacción de elementos presentes en el agua.

La norma colombiana destaca que aguas con buenas condiciones se consideran en un rango de pH entre 6 a 9. “Generalmente las aguas subterráneas tienen pH menores que las aguas superficiales con variedad en el pH, debido a que éste es muy influenciado por la temperatura del agua” (**Romero, 2009**), este último factor es muy variable en las formaciones teniendo aguas con temperaturas más altas que en otras, condicionadas por las interconexiones dentro del sistema acuífero.

Cuando el agua de precipitación cae disuelve el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmosfera y al convertirse en escorrentía esta se infiltra y percola en la zona no saturada presentándose en el subsuelo la presencia del ion (HCO_3^-).

Figura 46.

Valores de pH de las Muestras Colectadas en el Páramo de Oceta



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

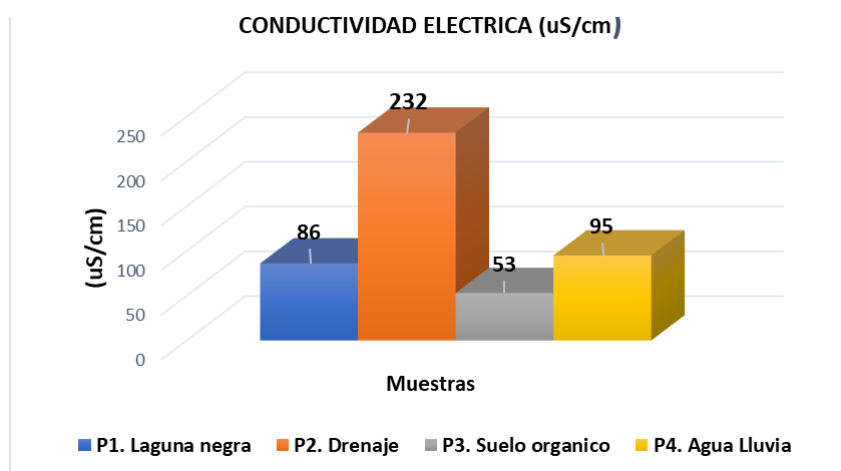
Para el presente caso de estudio se evidencia que las muestras correspondientes a la Laguna Negra, suelo orgánico y la cascada presentan un valor de pH de 5.5 con una clara tendencia a un comportamiento de tipo ácido, mientras que la muestra correspondiente al drenaje presenta un valor de pH de 6 el cual se acerca más a un comportamiento de pH de tipo neutro.

Conductividad Eléctrica

La conductividad es la propiedad que determina la capacidad de conducir electricidad en función de su concentración iónica, en este contexto, la conductividad del agua responde al tipo de suelo o formación rocosa que la atraviesa, del grado de disolución de las rocas y la presencia de gases.

En general las muestras presentan valores de conductividad (uS/cm) bajos con rangos que oscilan entre (53,86,95 y 232 respectivamente) asociados respectivamente a aguas potables, donde las muestras correspondientes a la laguna negra, suelo orgánico y cascada presenta un comportamiento con una tendencia homogénea y el único valor en referencia con un alto contenido corresponden al drenaje el cual puede presentar ese aumento de conductividad debido al tránsito de los flujos desde zonas más altas hacia la zona de descarga en la laguna negra, así mismo tiempo que puede atravesar diversos medios geológicos los cuales generan procesos de enriquecimiento y pueden generar un aumento del valor de la conductividad eléctrica en el agua.

Figura 47. Valores de conductividad eléctrica de las muestras colectadas en el páramo de Oceta.



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Modelo de mezcla de isotopos estables

Con el objetivo de conocer bajo diferentes escenarios probables, el origen (fuente) de las aguas presentes en el sistema lentic laguna negra se elaboraron modelos de mezcla teniendo como base los valores de concentración isotópica O - 18 y H-2, teniendo como premisa encontrar las posibles fuentes del agua presente en el sistema laguna negra.

Un modelo de mezcla, en donde están involucrados caudales y concentraciones, se expresa matemáticamente a partir de las dos siguientes ecuaciones: la Ecuación 1 de balance hídrico (suma de caudales), y la Ecuación 2 de balance de masas.

$$Q_t = Q_1 + Q_2, \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Q_t C_t = Q_1 C_1 + Q_2 C_2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Se puede calcular la contribución de dos caudales desconocidos (Q_1 y Q_2), a un caudal total (Q_t), conocido, con base en las dos ecuaciones anteriores, ya que se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas. Se resuelve para la primera incógnita y luego se calcula para la segunda, obteniéndose:

$\%Q_t$ = porcentaje del agua en el punto a analizar.

$\%Q_1$ = porcentaje del agua en la fuente 1.

$\%Q_2$ = porcentaje del agua en la fuente 2.

C_t = Concentración isotópica en el punto de análisis.

C_1 = Concentración isotópica fuente 1.

C_2 = Concentración isotópica fuente 2.

Para el presente caso se evaluaron dos escenarios para determinar el modelo de mezcla y relación de este con las aguas de la laguna negra, el primer escenario corresponde a época de lluvia y el segundo escenario corresponde a época de estiaje para así poder evaluar los diferentes aportes de diferentes fuentes con la concentración isotópica total del sistema lentico laguna negra

Época de lluvia

Drenaje- Agua lluvia

%Qt = porcentaje de agua en el punto a analizar

%Q1 = porcentaje de la fuente (Drenaje)

%Q2 = porcentaje de la fuente (Agua lluvia)

$$Q2 \frac{Qt \frac{lit}{seg} (Ct - C1)}{(C2 - C1)}$$

$$Q2 \frac{Qt \frac{lit}{seg} (-8,71 - (-11,24))}{(-10,24 - (-11,24))}$$

$$Q2 \frac{Qt \frac{lit}{seg} (-2,53)}{(-1)}$$

$$Q2 = Qt \frac{lit}{seg} X 2,53$$

Ct = Concentración isotópica en el punto de análisis.

C1 = Concentración isotópica (Drenaje)

C2 = Concentración isotópica (Agua lluvia)

Para el presente caso de análisis no es posible determinar el porcentaje de aporte de las fuentes seleccionadas para época de lluvia (Drenaje-Agua Lluvia) debido a que al realizar las ecuaciones con las concentraciones isotópicas de oxígeno 18 para las dos fuentes seleccionadas esta supera el 100% de relación para cada fuente, a partir de ello se determina que el sistema lentic laguna negra isotópicamente presenta una relación de oxígeno 18 mayor que las fuentes seleccionadas, no es posible para el presente caso que en un sistema cerrado utópico un producto originado de dos fuentes que sea isotópicamente más pesado. Debido a los valores de concentración isotópicas Se está presentando un fenómeno de evaporación diferencial en el agua del sistema lentic laguna negra, debido a que las aguas de la laguna permanecen mucho tiempo estáticas y la rata de velocidad del agua que recarga la laguna no es la misma al agua que sale del mismo sistema (laguna negra), lo que provoca que se genere un fenómeno de evaporación diferencial el cual vuelve anómalamente más pesada las aguas de la laguna evaporando y liberando a la atmosfera isotopos de oxígeno 16 y dejando isotopos de oxígeno 18.

Suelo Orgánico- Agua lluvia

%Qt = porcentaje de agua en el punto a analizar

%Q1 = porcentaje de la fuente (Suelo Orgánico)

%Q2 = porcentaje de la fuente (Agua lluvia)

C_t = Concentración isotópica en el punto de análisis.

C_1 = Concentración isotópica (Suelo Orgánico)

C_2 = Concentración isotópica (Agua lluvia)

$$Q_2 = \frac{Q_t \frac{\text{lit}}{\text{seg}} (C_t - C_1)}{(C_2 - C_1)}$$

$$Q_2 = \frac{Q_t \frac{\text{lit}}{\text{seg}} (-8,71 - (-9,59))}{(-10,24 - (-9,59))}$$

$$Q_2 = \frac{Q_t \frac{\text{lit}}{\text{seg}} (-0,88)}{(-0,65)}$$

$$Q_2 = Q_t \frac{\text{lit}}{\text{seg}} \times 1,35$$

Para el presente caso de análisis no es posible determinar el porcentaje de aporte de las fuentes seleccionadas para época de lluvia (Suelo Orgánico-Agua Lluvia) debido a que al realizar las ecuaciones con las concentraciones isotópicas de oxígeno 18 para las dos fuentes seleccionadas esta supera el 100% de relación para cada fuente, a partir de ello se determina que el sistema lentic laguna negra isotópicamente presenta una relación de oxígeno 18 mayor que las fuentes seleccionadas, no es posible para el presente caso que en un sistema cerrado utópico un producto originado de dos fuentes que sea isotópicamente más pesado. Debido a los valores de concentración isotópicas Se está presentando un fenómeno de evaporación diferencial en el agua del sistema lentic laguna negra, debido a que las aguas de la laguna permanecen mucho tiempo estáticas y la rata de velocidad del agua que recarga

la laguna no es la misma al agua que sale del mismo sistema (laguna negra), lo que provoca que se genere un fenómeno de evaporación diferencial el cual vuelve anómalamente más pesada las aguas de la laguna evaporando y liberando a la atmosfera isotopos de oxígeno 16 y dejando isotopos de oxígeno 18.

Época de Estiaje

Drenaje-Suelo Orgánico

%Qt = porcentaje de agua en el punto a analizar

%Q1 = porcentaje de la fuente (Suelo Orgánico)

%Q2 = porcentaje de la fuente (Drenaje)

$$Q2 = \frac{Qt \frac{\text{lit}}{\text{seg}} (Ct - C1)}{(C2 - C1)}$$

$$Q2 = \frac{Qt \frac{\text{lit}}{\text{seg}} (-8,71 - (-9,59))}{(-9,59 - (-11,24))}$$

$$Q2 = \frac{Qt \frac{\text{lit}}{\text{seg}} (-0,88)}{(-1,65)}$$

$$Q2 = Qt \frac{\text{lit}}{\text{seg}} \times 0,53$$

Ct = Concentración isotópica en el punto de análisis.

C1 = Concentración isotópica (Suelo Orgánico)

C2 = Concentración isotópica (Drenaje)

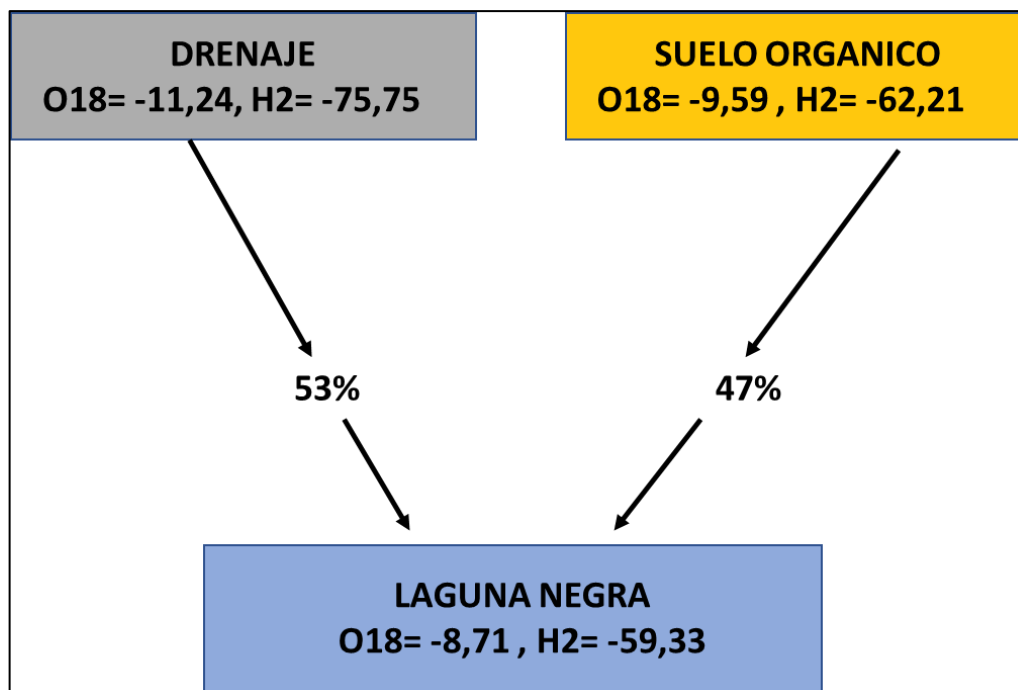
$$Q2 = Qt \text{ lit/seg} \times 0,53$$

Q2= 53% de la fuente (Drenaje)

Q1= 47% de la fuente (Suelo Orgánico)

Figura 48

Diagrama de mezcla en época de estiaje



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

El modelo de mezcla desarrollado en época de estiaje para el sistema lentic laguna negra, indican que el 53% del agua proviene del drenaje presente en el área y el 47 % corresponde al agua que se encuentra en los suelos orgánicos circundantes al área de la laguna, sin embargo mediante el modelo de mezcla se establece el potencial de aporte de agua que contiene los suelos orgánicos en época de estiaje, el cual es capaz de aportar hasta un 47 % de la composición total del sistema lentic laguna negra. Los anteriores resultados se sustentan en la capacidad de los suelos para retener agua la cual se puede catalogar como una unidad hidrogeológica y a ello sumado a que a la altura sobre el nivel del mar de los páramos

en este tipo de suelos orgánicos la materia orgánica no se degrada a la misma velocidad que en otras alturas debido a la poca actividad bacteriana y las temperaturas bajas propias del páramo lo cual favorece la retención de agua y la posterior descarga al sistema laguna negra.

Limitaciones de los modelos de mezcla

La confiabilidad de los modelos de mezcla y su rango de error depende en buena medida de la precisión de que la concentración de los parámetros analizados (en este caso los isótopos estables), no varíen con el tiempo. De otra parte, las concentraciones de las fuentes de agua superficial (ríos, quebradas, etc.), varían ampliamente (en un rango de 20 a 30 unidades delta) dependiendo de varios factores.

- a) Altura de precipitación.
- b) Grado de mezcla entre los diferentes cauces de agua superficial

Por esta razón, los valores de concentración varían ampliamente y los promedios de las diferentes fuentes de aporte pueden coincidir los unos con los otros por lo cual su aplicación a modelos de evaluaciones cuantitativas debe hacerse con algún grado de reserva

11 SINTESIS DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El área de estudio se ubica en el sector centro oriente del departamento de Boyacá, sobre la cordillera oriental en los municipios de Mongua y Monguí departamento de Boyacá, caracterizado por tener una altura promedio sobre el nivel del mar de 3500 metros e incluida sobre un amplio valle glaciar el cual es producto de las deformaciones continuas y discontinuas asociados a plegamientos y fallamientos en el área.

Basados en el planteamiento del problema a resolver y apoyados en las observaciones directas de campo y la dinámica hidrológica e hidrogeológica del área de estudio se hace necesario conocer como interactúan las aguas superficiales y subterráneas en el medio, específicamente en el proceso de recarga del sistema lentic laguna negra y como la geología, hidrología, hidráulica e hidrogeoquímica tienen un papel fundamental para sustentar los procesos de recarga y descarga y la dinámica hidrogeológica del área, por ello a través de un modelo hidrogeológico conceptual (MHC) se contextualiza la información obtenida a través del proceso de desarrollo del presente trabajo y se determinan las características principales que tienen incidencia para la resolución del problema planteado .

Desde el punto de vista geológico el área está configurada como una secuencia de rocas sedimentarias correspondientes al periodo Cretácico inferior las cuales se encuentran estrechamente ligadas por la acción del clima a partir del levantamiento de los andes colombianos especialmente desde finales del terciario, litoestratigráficamente en el área se disponen las siguientes formaciones geológicas: formación une (Kiu) la cual corresponde a una alternancia de cuarzo arenitas de grano fino a medio y lodolitas grises a oscuras en capas delgadas con una variabilidad pronunciada en sus espesores, la formación fomeque (Kif)

compuesta principalmente por lodolitas negras en capas delgadas con patrones de estratificación ondulada no paralela y cuarzo arenitas de grano fino con tonalidades grises a negras. Así mismo se disponen de forma local depósitos cuaternarios descritos como depósitos de laguna (Ql) compuestos por arcillas y lodos respectivamente localizados al costado oeste de la laguna negra, y depósitos coluvioglaciares (Qcg) compuestos con conglomerados clasto soportado en matriz areno lodosa de composición heterogénea y tamaño variable con ocurrencias de bloques angulares, los depósitos cuaternarios descritos y caracterizados se encuentran supra yaciendo las formaciones geológicas anteriormente descritas.

La anterior información fue sustentada mediante la aplicación de un método geofísico correspondiente a un sondeo eléctrico vertical (SEV) de 3 puntos la cual permitió determinar una profundidad de investigación de aproximadamente 80 metros en los 3 puntos muestreados determinando estratigráficamente junto a las observaciones geológicas tomadas en campo que la secuencia del área de estudio se dispone con la ocurrencia local de depósitos de laguna caracterizados litológicamente como una intercalación de arcillas y lodos con un mal sorteamiento y características granulométricas de tipo heterométrica, seguido a ello se encontraron con una extensión considerable depósitos coluvio glaciares caracterizado como un conglomerado clasto soportado en matriz areno lodosa, suprayaciendo se identificaron litologías asociadas a la formación Une (Kiu) correspondientes al cretácico inferior y seguido a ello la formación fomeque (Kif) respectivamente. Mediante la identificación y caracterización geológica en campo se identificó que las formaciones geológicas Une y Fomeque se encuentran cubiertas por los depósitos de laguna y los depósitos coluvio glacial,

no obstante, en algunos sectores puntuales sobre la ocurrencia de los depósitos se encuentran pequeños afloramientos correspondientes a la formación Fomeque.

La configuración Estructural del área establece un alto deformamiento plástico de las rocas producto de la acción de los esfuerzos compresivos y extensivos, este determinó que sobre el área de estudio se encuentra una estructura de tipo anticlinal erodada, la cual permite que en los costados del área sector Este-Oeste, se generen flancos y su charnela se encuentre erodada, esto sumado a la actividad tectónica y los esfuerzos que allí se desarrollan permitieron la generación de un valle glacial sobre el cual se formó una laguna de tipo glacial llamada laguna negra. Las litologías expuestas en los flancos de la estructura geológica corresponden a la formación Une (Kiu) caracterizada como cuarzo arenitas de grano fino a medio con intercalaciones locales y esporádicas de lodolitas oscuras, es característico observar que los afloramientos presentes en los flancos de la estructura presentan un potencia de los estratos aproximada de 30 a 40 metros respectivamente y por identificación fotogeológica se determinó estructural aproximado de vergencia de las capas hacia el este y oeste respectivamente.

Hidrológicamente el área presenta un comportamiento de tipo Bimodal con la definición del año hidrológico en la época de marzo a diciembre, el proceso de precipitación se encuentra en el orden de los 60 mm hasta los 111 mm en el área, el cual fue establecido a través de la lectura de los datos de estación hidrometereológica Mongua, y a partir de ello se construyó el balance hídrico del área basados en la metodología de Thornwaite estableciendo valores de evapotranspiración real, evapotranspiración potencial, déficit, reservas y excedentes el cual determino a través de los datos calculados que el régimen de precipitación es alto y la evapotranspiración real posee un comportamiento con tendencia a la uniformidad

a lo largo del año hidrológico, unos excedentes variables a lo largo de año siendo así julio el mes con mayor valor de precipitación se presenta la mayor cantidad de excedentes convertidos en escorrentía superficial, por otro lado mediante el balance hídrico se determina que los déficit y reservas son muy uniformes a lo largo de año obteniendo valores respectivos de 0 para el déficit y 7 mm para las reservas. Mediante el cálculo del balance hídrico se establece que la infiltración para el área es el 9.57% la cual se cataloga como una potencial zona de recarga, debido a que del 10% de la precipitación el 9.57% logra infiltrarse.

A través del análisis de la topografía del área, curvas de nivel, condiciones geológicas se establecieron que las líneas de flujo como posibles caminos que recorre el agua y discurren debido al gradiente hidráulico y los buzamientos hacia el sistema lentic laguna negra, así mismo debido a las condiciones hidráulicas de los materiales geológicos descritos se determinó un buen comportamiento de las rocas para permitir el flujo a través de un medio.

Siendo así que desde que la precipitación se integra al modelo y cae a la superficie del terreno esta se convierte en escorrentía superficial y a su vez otro porcentaje se infiltra y se convierte en flujos subterráneos, los cuales, debido a las características geológicas, estructurales y geomorfológicas sumado a las características hidráulicas de los materiales geológicos, líneas de flujo y gradiente hidráulico discurren en direcciones de vergencia hacia el sistema lentic laguna negra. Debido a las condiciones geológicas y la presencia de flancos correspondientes al anticlinal erodado la precipitación se integra al modelo como recarga potencial de zonas topográficas más altas hasta su descarga a zonas de menor altitud y pendiente, los flujos que recargan el sistema lentic laguna negra están asociados a posibles flujos subterráneos, drenajes y el agua contenida en los suelos orgánicos. Para el caso específico de la cascada los cuales debido a análisis hidroquímicos permitieron establecer

que presentan una dominancia del anión bicarbonato, cálcico y magnésico respectivamente lo cual permite establecer que las muestras presentan una facie bicarbonatada cálcica o magnésica, esto sustentado a partir de que el agua que se precipita e interactúa con la superficie del suelo se encuentra cargada con dióxido de carbono presente en la atmósfera, relacionándolas así con aguas recientes sin mucho contacto con los materiales geológicos se evidencia con la carencia del aporte de aniones solubles (Sulfatos, Cloruros, Nitratos) por el contacto con los minerales. Los intercambios aniónicos para el caso de los sulfatos se producen por la oxidación de los sulfuros, el cloruro se presenta por la disolución de las sales en las rocas, la alta abundancia del catión calcio es debido a la alta presencia de ácido carbónico, los bajos contenidos de sodio y potasio respectivamente describen que este tipo de agua es de precipitación directa de tiempo reciente y con tiempos de tránsito muy bajos.

Los suelos orgánicos se caracterizan como unidades de estado intermedio donde las aguas contenidas allí presentan un tiempo de tránsito mayor y actúan como reguladores hídricos, de igual forma mediante los muestreos hidroquímicos se determinó una clara dominancia del anión bicarbonato, cálcico y magnésico respectivamente lo cual permite establecer que las muestras presentan una facie bicarbonatada cálcica o magnésica.

Para el caso del drenaje intermitente se determina un contenido de sulfatos al 50% y se identifican valores anómalos de cloruro (valores por debajo del límite de detección) y por los valores hidroquímicos obtenidos que parte de esa agua viene de los depósitos coluvio glaciares y posiblemente se están presentando procesos de recarga de las litologías geológicas que se encuentran debajo del depósito coluvio glaciar, geológicamente se describe como el agua que procede de la formación geológica Une (Kiu) la cual recarga el acuífero coluvio glaciar de aguas provenientes de la formación rocosa para el caso de este análisis se evidencia

una alta interacción de los sulfatos y se relaciona a una posible interacción con agua subterránea.

Mediante la aplicación de isótopos estables tanto al agua del sistema lentico laguna negra como en las posibles fuentes de recarga se determinaron mediante relaciones isotópicas de concentraciones la relación entre las aguas de la laguna negra y sus posibles fuentes mediante dos escenarios como los son épocas de lluvias y épocas de estiaje respectivamente tomando como referencia para el periodo de lluvia las relaciones entre el agua lluvia, los drenajes y el suelo orgánico obteniendo así mediante un modelo de mezcla que para el caso de lluvia un escenario de proveniencia no es válido debido a que la diferencia isotópica entre las fuentes y el escenario a analizar determina que se presenta un fenómeno de evaporación diferencial en el agua del sistema lentico laguna negra, debido a que las aguas de la laguna permanecen mucho tiempo estáticas y la rata de velocidad del agua que recarga la laguna no es la misma al agua que sale del mismo sistema (laguna negra), lo que provoca que se genere un fenómeno de evaporación diferencial el cual vuelve anómalamente más pesada las aguas de la laguna evaporando y liberando a la atmosfera isótopos de oxígeno 16 y dejando isótopos de oxígeno 18.

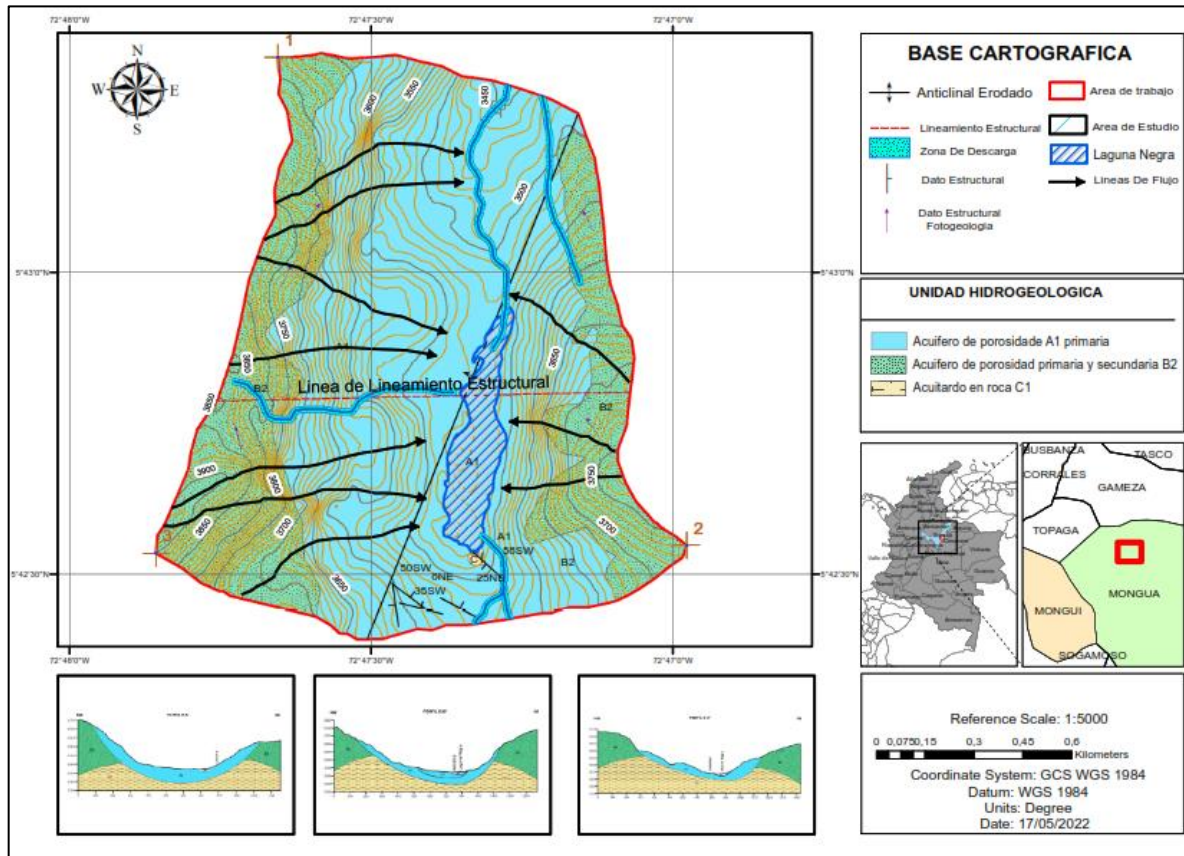
Para la época de estiaje el modelo de mezcla correspondió a la relación entre suelo orgánico drenaje, determinando así que en época de estiaje el 53 % de la recarga de la laguna corresponde a los drenajes allí presentes y el 47% al agua contenida en los suelos orgánicos circundantes.

A partir de la información geológica, hidráulica e hidrogeoquímica obtenida se configuro la caracterización hidrogeológica de las unidades en el área de estudio paramo de Oceta-sector laguna negra obteniendo así el siguiente mapa:

Mapa Hidrogeológico

Figura 49

Mapa Hidrogeológico



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Basados en la caracterización geológica de las unidades descritas se realizó la correlación hidrogeológica basados en las condiciones hidráulicas y litológicas de las unidades (AIH, LEYENDA INTERNACIONAL DE LOS MAPAS HIDROGEOLOGICOS-1995), obteniendo así las siguientes unidades hidrogeológicas:

Tabla 18*Caracterización Hidrogeológica de las Unidades Presentes en el Área de Estudio*

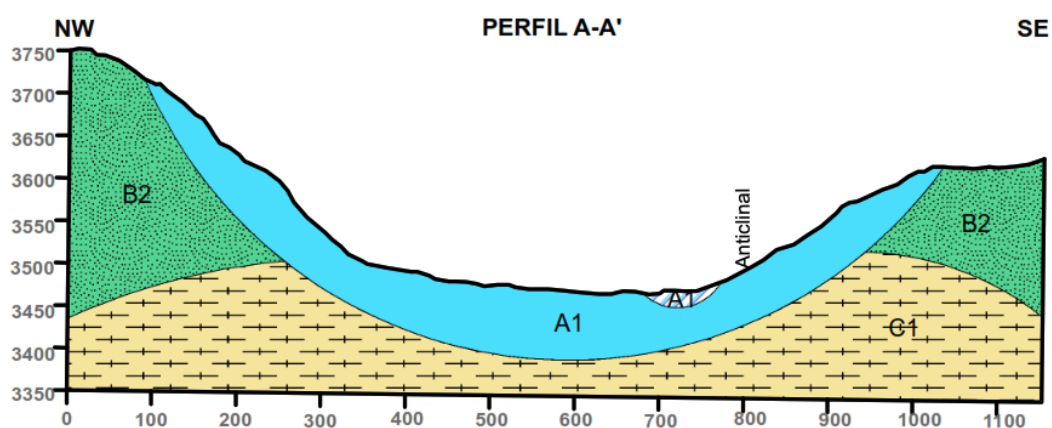
Formacion Geológica	Litología	Unidad Hidrogeológica	Símbolo
Formacion Fomeque	compuesta principalmente por lodolitas negras en capas delgadas con patrones de estratificación ondulada no paralela y cuarzo arenitas de grano fino con tonalidades grises a negras	Acuitardo en roca	C1
Formación Une	Alternancia de cuarzo arenitas de grano fino a medio y lodolitas grises a oscuras en capas delgadas	Acuífero de porosidad primaria y secundaria	B2
Deposito Glacial	Coluvio- compuestos con conglomerados clasto soportado en matriz areno lodosa de composición heterogénea y tamaño variable con ocurrencias de bloques angulares	Acuífero de porosidad primaria	A1
Depositos de Laguna	compuestos por arcillas y lodos respectivamente	Acuitardo en deposito	C1

Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Así mismo se realizaron 3 cortes hidrogeológicos basados en las características geológicas, estratigráficas y estructurales dispuestos de la siguiente forma:

Figura 50

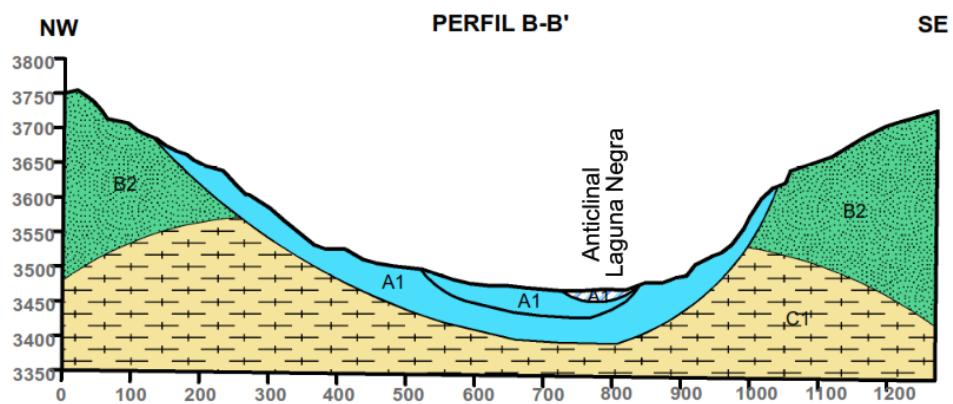
Perfil Hidrogeológico A-A'



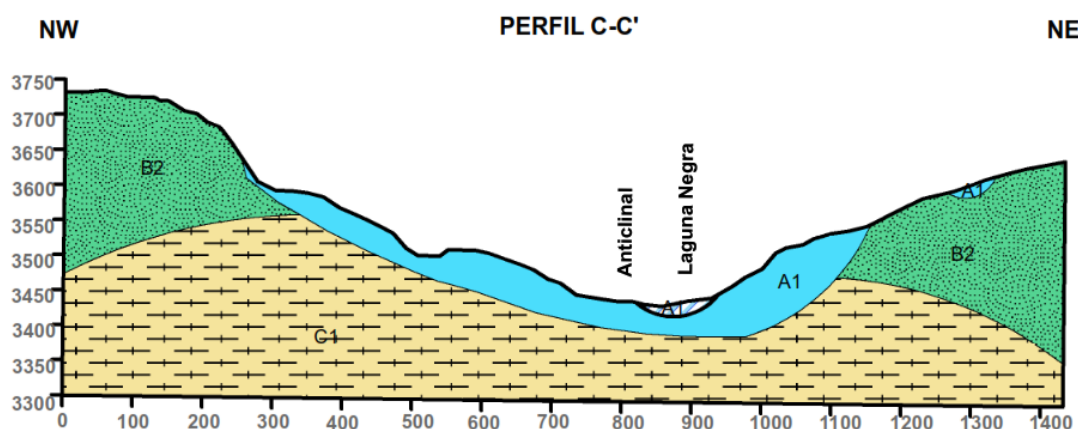
Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 51

Perfil Hidrogeológico B-B'



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Figura 52*Perfil hidrogeológico C-C'*

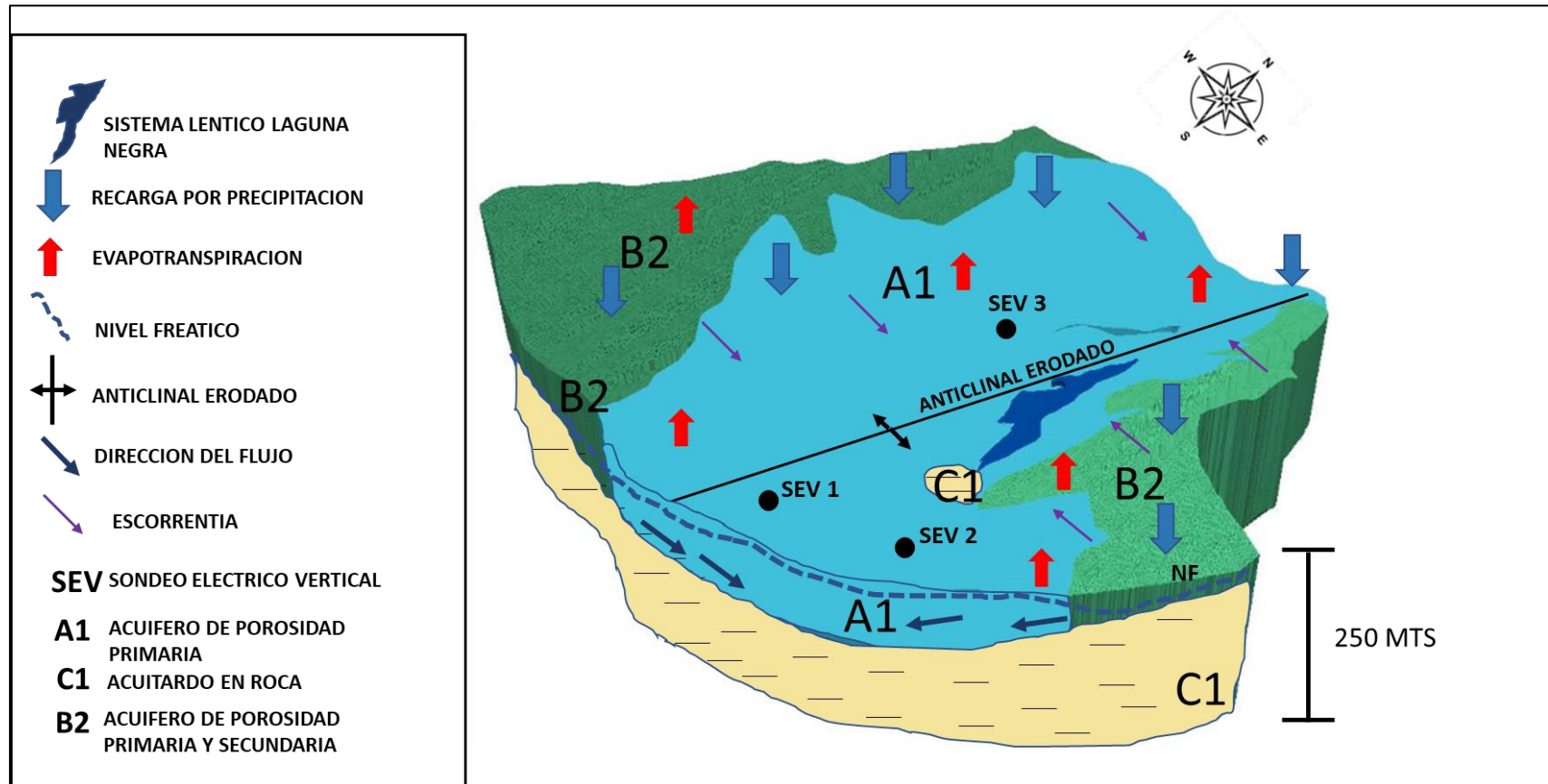
Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

Los perfiles anteriormente descritos permiten visualizar la configuración hidrogeológica del área de estudio relacionando las unidades hidrogeológicas y su potencial para el almacenamiento de agua, determinándose así la influencia de los depósitos tipo A1 y B2 en la posible recarga del sistema lentic laguna negra.

El modelo hidrogeológico presentado a continuación relaciono como las principales zonas de recarga la zonas de montaña donde afloran rocas permeables correspondientes a la formación Une, así como la planicie asociado al valle glacial donde se encuentran los depósitos coluvio glaciares y los depósitos de laguna respectivamente, este modelo señala que las zonas de tránsito están asociadas drenajes y canales que descienden por las laderas y discurren hasta los suelos orgánicos y hacia el efluente principal correspondiente al sistema lentic laguna negra.

Figura 53

Modelo Hidrogeológico Conceptual



Nota, Fuente. Elaboración Propia, 2022

12 CONCLUSIONES

A partir de la información tomada en campo se configuro el modelo geológico del área de estudio el cual se presenta como una secuencia de rocas sedimentarias pertenecientes al periodo geológico comprendido entre el cretácico inferior hasta el cuaternario. litológicamente los depósitos de laguna (Ql) se encuentran compuestos por arcillas y lodos respectivamente localizados al costado oeste de la laguna negra, y depósitos coluvioglaciares (Qcg) compuestos con conglomerados clasto soportado en matriz areno lodosa de composición heterogénea y tamaño variable con ocurrencias de bloques angulares. Las formaciones cretácicas se encuentran litológicamente descritas como una alternancia de cuarzo arenitas de grano fino a medio intercaladas con lodolitas grises a oscuras e infrayaciendo se presentan lodolitas negras en capas delgadas.

La estructura geológica dominante corresponde a un anticlinal enrodado de orientación suroeste-noreste. Dichos factores dan como resultado la modelación del terreno en forma de un valle en U, que propicia geomorfológicamente la configuración de una laguna en el valle glaciar.

Mediante información secundaria asociada a registros hidrometereológicos se realizó la definición de año hidrológico y el balance hídrico respectivo. Teniendo en consideración que el régimen de precipitación para el área es de tipo bimodal el año hidrológico calculo se define para los meses de marzo a diciembre. De acuerdo con la información obtenida para el

cálculo del balance hídrico se estableció que la infiltración para el área es el 9.57% la cual se cataloga como una potencial zona de recarga, debido a que del 10% de la precipitación el 9.57% logra infiltrarse.

Las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos descritos a partir de información secundaria permitieron establecer valores de porosidad total, porosidad efectiva y conductividad hidráulica para las formaciones geológicas caracterizadas. Los valores más altos se relacionan a depósitos de laguna con intervalos del 30 al 70%, las lodolitas poseen valores con rangos entre el 30 y 50%, las cuarzo areniscas presentan una porosidad entre el 5 al 42% y los depósitos coluvioglaciares se relacionan a valores entre el 20 y 50% de porosidad. los mayores valores de porosidad efectiva se relacionan a los conglomerados con rangos que oscilan entre 12 y 35% respectivamente lo cual indica que posee una mayor cantidad de poros interconectados que permiten así un mayor paso de agua a través de un medio determinado, las lodolitas poseen así valores de porosidad efectiva entre 2 y 20% respectivamente catalogados como materiales geológicos con porosidad efectiva moderada, y por último se encuentran las cuarzo areniscas con valores entre 0 y 20% y las arcillas y lodos con valores entre 0 y 10% lo cual permiten catalogarlas como materiales geológicos de tipo impermeables con pocos o nulos espacios intersticiales conectados que permiten el paso de un fluido a través de esta.

En relación a la conductividad hidráulica se determinó que los mayores rangos corresponden a conglomerados con valores entre 1.157×10^{-6} a 100 (cm/seg) siendo esta la unidad con mayor potencial hidráulico. De igual manera las cuarzo areniscas presnetan

valores entre 1.157×10^{-2} a 1.157×10^{-10} (cm/seg) definidas como unidades con potencial hidráulico medio y las lodolitas, arcillas y lodos se asocian los valores más bajos con valores entre 1.157×10^{-4} y 1.157×10^{-12} y 1.157×10^{-8} a 1.157×10^{-15} (cm/seg).

Durante el desarrollo del muestreo hidroquímico y su posterior análisis de resultados se determinó que las aguas correspondientes al sistema lentico laguna negra pertenecen a aguas lluvias donde prevalecen los tránsitos cortos y este a su vez es producto de los flujos tributarios de las zonas más altas. Finalmente se proponen diferentes fuentes de aportes hídricos superficiales asociados a drenajes y suelos orgánicos los cuales presentaron una incidencia dentro de la recarga hídrica, donde se evidencian fenómenos de enriquecimiento de las aguas producto del paso por diferentes medios geológicos y tiempos cortos de permanencia propios de una recarga constante para el caso de los suelos orgánicos.

La aplicación de la técnica de isotopos estables oxígeno- deuterio (O^{18} Y H^2) permitió establecer un modelo de mezcla para dos escenarios influyentes en la recarga (época de lluvias y estiaje) en la cual se determinó que para la época de lluvias no es posible estimar escenarios de proveniencia entre las posibles fuentes y el dato isotópico obtenido de la lluvia ya que las relaciones isotópicas superan el 100% de relación para cada fuente, y el objetivo a analizar presenta una mayor relación de oxígeno 18. Por lo tanto, se concluyó que para la época de lluvias se presenta un fenómeno de evaporación diferencial el cual convierte las aguas del sistema lentico laguna negra anómalamente más pesadas consiguiendo evaporar y liberar isotopos de oxígeno 16. Por otro lado, durante el periodo de estiaje el escenario de proveniencia dominante corresponde a la relación entre el drenaje y el suelo orgánico

obteniendo un porcentaje de proveniencia del 53% para el drenaje y el 47% para el suelo orgánico.

A partir de los escenarios de proveniencia realizados se determinó la importancia de los suelos orgánicos dentro de la recarga del sistema lentico laguna negra en época de estiaje y su importancia de ser catalogada como una unidad hidrogeológica de alta influencia en zonas de paramo.

13 RECOMENDACIONES

Se recomienda sensibilizar los parámetros hidráulicos tanto en roca como en los sedimentos cuaternarios a partir de ensayos en campo correspondientes a ensayos insitu (lugeon-lefranc- piezómetros) los cuales permitan definir parámetros hidráulicos puntuales, ya que para el presente estudio se utilizaron datos teóricos de características hidráulicas correspondiente a los materiales geológicos descritos.

Para futuras investigaciones en el desarrollo del modelo hidrológico se deberá tener en cuenta factores hidrológicos característicos en sistemas paramos asociados a precipitación horizontal, retención raticular de las raíces de los frailejones y las abstracciones hidrológicas en los suelos orgánicos ya que estos pueden representar condicionamientos de gran impacto en el funcionamiento del ciclo hidrológico en zonas de paramo y en el cálculo del balance hídrico.

Para un completo conocimiento del comportamiento hidrogeoquímico del área de estudio se recomienda implementar una campaña de muestreo y análisis isotópico tanto de las fuentes estudiadas como del sistema objetivo a lo largo de la definición del año hidrológico y así tener un completo conocimiento de la variabilidad isotópica durante un periodo de tiempo establecido.

Realizar la modelación numérica a partir del modelo hidrogeológico conceptual, en el cual se evalúen escenarios que representen riesgos y escases para diferentes fuentes de agua que represente una recarga para el sistema lentic laguna negra.

Debido al interés hidrogeológico que representan los suelos orgánicos dentro de la configuración del sistema paramo y su aporte a la recarga del sistema lentico laguna negra para el área de estudio se deberán generar estrategias de conservación de dichas unidades que permitan desarrollar un turismo sostenible en el área en donde se mitiguen los impactos sobre dicha unidad de suelo.

Realizar la socialización de los resultados del modelo hidrogeológico conceptual para así establecer una sinergia entre los resultados obtenidos en el presente estudio y la formulación de planes de ordenamiento territorial.

Para futuros estudios investigativos sobre sistemas de paramos se deberá no solo tener en cuenta factores de tipo biótico para su delimitación y caracterización, si no también tener en cuenta las características geológicas del área y la configuración estratigráfica del subsuelo donde se sitúan este tipo de ecosistemas estratégicos.

El presente estudio de investigación en sistemas de paramo sea la base para realizar estudios de preservación, conservación y desarrollo sostenible en sistemas de paramo en Colombia, teniendo como punto de partida un conocimiento minucioso del componente geológico, hidrogeológico e isotópico.

14 BIBLIOGRAFIA

- Aguaysig.com. (2016). *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos*. <https://Www.Aguaysig.Com/Los-Diagramas-Mas-Usados-Para-La-Interpretacion-de-Analisis-Hidroquimicos/>. <https://www.aguaysig.com/los-diagramas-mas-usados-para-la-interpretacion-de-analisis-hidroquimicos/>
- Aguirre, N., Andrade, G., Marina Arévalo, L., Ayala, A., Beltrán, G., Bogotá, A., Hersilia Bonilla, M., Bonilla, M., Bravo, H., Burbano, I., Caballero, S., José Calderón, M., Cañón, G., Carvajal, L., Castaño, S., Correa, A., Costa, C., Cruz, A., Cubillos, C., ... Garzón José Roberto Arango, W. M. (2002). *Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña colombiana república de Colombia*.
- Analisisdeaguasblog. (2018, November 4). *Análisis fisicoquímico del agua*. <https://Analisisdeaguasblog.Blogspot.Com/2018/11/Color-Es-El-Resultado-de-La-Presencia.Html?ShowComment=1542766075473>.
- Aquabook.agua.gov.ar. (2015). *¿Qué es el balance hídrico?* Aquabook.Agua.Gov.Ar.
- Área de Edafología y Química Agrícola (Facultad de ciencias). (2005, April 13). *ECA Lección 5 Propiedades físicas. Dinámica del agua. Balance hídrico*. Www.Eweb.Unex.Es.
- Barbosa Chacón, J. W., Barbosa Herrera, J. C., & Rodríguez Villabona, M. (2013). *Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas*.

- Bustamante Ibañez Elizabeth Arely. (2017). *Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero Soconusco, Chiapas*. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.
- Buytaert, W., Célleri, R., de Bièvre, B., & Cisneros, F. (2002). *Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad*.
- Cabrera, J. (2013). Modelos Hidrológicos. In *Universidad Nacional De Ingeniería- Facultad De Ingeniería Civil 1-2*.
- Cáceres, J., & Vera, E. (2015). *Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra*.
- Consortio Río Garagoa. (2018). *Actualización POMCA Río Garagoa, plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica*.
- de Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2002). *Hidrología del páramo Importancia, propiedades y vulnerabilidad Conocer para conservar 10-12*.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology Second Edition*.
- Dulcey López, R. J., & Mancipe Jiménez, M. D. pilar. (2013). *Sistema Municipal de Áreas Protegidas Municipio De El Cocuy SIMAP-El Cocuy*.
- Ecured. (2017). *Hidroquímica*.
<https://Www.Ecured.Cu/Index.Php?Title=Hidroquímica&oldid=3519625>.
http://www.ecured.cu/index.php/Hidrogeolog%C3%ADa#M.C3.A9todos_hidroqu.C3.ADmicos
- el Diario. (2020, November 30). *El escandaloso panorama del agua potable en Boyacá*.

- Fernández Pérez, I. O. (2015). *¿Qué es “estado del arte”?*
[Http://Www.Geocities.Ws/Inesotilia28873/Fase1/Queesestadodelarte.Html](http://Www.Geocities.Ws/Inesotilia28873/Fase1/Queesestadodelarte.Html).
www.geocities.ws/inesotilia28873/fase1/Queesestadodelarte.html2/4
- Florez, A., & Rios, K. (1998). Las lagunas de la alta montaña. *Cuadernos De Geografía vol vii n° 1-2*, 26-27.
- Forner, M. G. (2012). *Medida de la resistividad eléctrica en el suelo*.
[Http://Www.Tdx.Cat/Bitstream/10803/6316/5/05capitulo2.PDF](http://Www.Tdx.Cat/Bitstream/10803/6316/5/05capitulo2.PDF).
- Fragala, F. A., & Obregon Neira, N. (2011). Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá. *SciELO*, 15(1), 145–169.
- Garavito Rincon, L. N. (2015). Los páramos en Colombia un ecosistema en riesgo. *Universidad Santo Tomas, Colombia*.
- García Herrán, M. (2018). Protocolo de monitoreo hidrológico en páramos. *Instituto De investigación De Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt*.
- García Pinzón, M. R. (2022). *Una experiencia de sostenibilidad de las comunidades en el páramo de Boyacá*.
- Gómez Reyes, E. (2013). Valoración de los componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del valle de México. *Instituto Nacional De Estadística Y Geografía*, 4.
- Guevara, V., Carrera, D. V., Paulina, V.; Lizbeth, G.; Tamayo Bacacela, C., Estefania, D., & Loya, G. (2015). Análisis Multivariado de las aguas de la subcuenca del rio ambi en época de estiaje y su relación con la calidad desde el punto de vista agrícola. *Universidad De Las Fuerzas Armadas-Espe*.
<https://www.researchgate.net/publication/279532309>

- Hofstede, R., Calles, R., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). Los Paramos andinos ¿Qué Sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema paramo. *UICN, Quito, Ecuador*.
www.uicn.org/sur 9-31
- Institución Educativa Colegio San Luis Gonzaga. (2020, Octubre 25). *El sistema de posicionamiento global, DPS – Institución Educativa Colegio San Luis Gonzaga*.
<https://Colzaga.Edu.Co/Web/El-Sistema-de-Posicionamiento-Global-Dps/>.
- Instituto de Hidrología, M. y E. A., & Ministerio de Medio Ambiente. (2015). *Evapotranspiración potencial o de referencia (Eto)*.
- Marín Valencia, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Massam, T., Muller, T., Righini, B., Schneegans, M., & Zichichi, A. (1965). Experimental observation of antideuteron production. *Il Nuovo Cimento*, 39(1), 10–14.
<https://doi.org/10.1007/BF02814251>
- Ministerio de medio Ambiente. (2022, May 21). *Páramos*.
<https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos/>
- Municipio de Siachoque. (2005). Componente geológico. In *Esquema De Ordenamiento Territorial*.
- Ocampo López, O. (2013). Balance hidrológico. In *Universidad Nacional De Colombia*.
- Ojeda, D., Barbosa, C., Pinto, J., Cardona, M. C., Cuellar, M., Cruz, S., de la Torre, L. S., Castañeda, J., Barrera, C. R., González, Y., & Alarcón Juan Carlos. (2001). El medio

ambiente en Colombia capítulo 7 Ecosistemas. In *El Medio Ambiente en Colombia* (2 edición) 288-289.

Ordoñez Galvez, J. J. (2011). *Ciclo Hidrológico*.

Orellana, Ernesto. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo.

Organismo Internacional de energía atómica. (2016). *Isótopos estables*.

[https://www.iaea.org/es/temas/isotopos-](https://www.iaea.org/es/temas/isotopos-estables#:~:text=Los%20is%C3%B3topos%20estables%20son%20formas,Nutrici%C3%B3n%20y%20la%20ciencia%20forense)

[Estables#:~:Text=Los%20is%C3%B3topos%20estables%20son%20formas,Nutrici%C3%B3n%20y%20la%20ciencia%20forense](https://www.iaea.org/es/temas/isotopos-estables#:~:text=Los%20is%C3%B3topos%20estables%20son%20formas,Nutrici%C3%B3n%20y%20la%20ciencia%20forense).

Ovacen. (2015). *Páramo; Clima, flora, fauna y características*.

Periódico el tiempo. (2018, June 29). *Sin los pobladores es imposible proteger los páramos*.

Periódico El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/que-es>

Planas, O. (2013, January 2). *¿Qué es un isótopo- definición, tipos y ejemplos?*

[https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-](https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/isotopo#:~:text=Is%C3%B3topos%20de%20origen%20natural,Pued)

[Nuclear/Atomo/Isotopo#:~:Text=Is%C3%B3topos%20de%20origen%20natural,Pued](https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/isotopo#:~:text=Is%C3%B3topos%20de%20origen%20natural,Pued)
[en%20encontrar%20de%20forma%20natural](https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/isotopo#:~:text=Is%C3%B3topos%20de%20origen%20natural,Pued).

Ramírez, G., Farfán, A. L., & Ramos Rincón, J. M. (2016). Análisis de aguas: muestreo, determinación de parámetros físicos y químicos: (olor, color, conductividad, temperatura, sólidos, PH, alcalinidad, acidez, dureza total, dureza cálcica y magnésica, cloruros). *Universidad Distrital Francisco José De Caldas*.

Rebollo, L. F. (2016a). *Hidrogeología- Tema 2-Propiedades hidráulicas elementales de los medios sólidos*. https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T2-Propiedades%20hidr%C3%A9ulicas%20elementales.pdf.

- Rebollo, L. F. (2016b). Hidrogeología- Tema 4-Movimiento del agua en el subsuelo. In https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T4-Movimiento%20del%20agua%20en%20el%20subsuelo.pdf.
- Recio Díaz, I. J., & Vargas Ospina, L. (2019). *Estudio preliminar de la técnica de Fitorremediación en vertimientos relacionados con aguas residuales industriales*.
- Rojas Pérez, J. C. (2018). *Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del valle medio de magdalena en el área de Villa De Leiva-El pescado, Colombia: Análisis Cuantitativo de la calidad del agua*.
- Rojas Rojas, S. P. (2007). El estado del arte como estrategia de formación en la investigación. In *Studiositas. Bogotá (COLOMBIA)* (Vol. 2, Issue 3).
- Ruíz, G. D. ;, & Cadena, J. F. ; (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de un análisis de componentes principales (ACP)*.
- Sánchez San Román, F. J. (2016). Prospección geofísica: sondeos eléctricos verticales. In *Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España*. <http://web.usal.es/javisan/hidro-1->
- Scribd. (2018). *Ciclo Hidrológico*. www.scribd.com.
- Sistema de información turística de Boyacá. (2021). *Mongua sendero laguna negra*. <https://situr.boyaca.gov.co/attractivo-turistico/sendero-laguna-negra/>
- Sutori. (2018). *La precipitación*. www.sutori.com.
- Terra, R. , & P. G. J. (1994). Regionalización del Uruguay según el ciclo anual de precipitaciones mediante “Cluster Analysis.” In *Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.

Ulloa, C., Rodríguez, E., & Rodríguez, G. inés. (2003, September). Memoria explicativa plancha 172 paz del rio escala 1:100000. *Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear. ingeominas. www.ingeominas.gov.co*

Universidad de Sevilla. (2018). *Balance hídrico prácticas.*

upcommons.upc.edu. (2016). *Capítulo 2. Conceptos básicos 2.1 Conceptos hidrogeológicos.*

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3407/41239-](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3407/41239-5.pdf?sequence=5&isAllowed=y)

[5.pdf?sequence=5&isAllowed=y.](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3407/41239-5.pdf?sequence=5&isAllowed=y)

Upct.es. (2014). *Análisis de aguas introducción.*

[https://www.upct.es/~minaees/Analisis_aguas.pdf.](https://www.upct.es/~minaees/Analisis_aguas.pdf)

Vélez O, M. V., & Rhenals G, R. (2016). *Determinación de la recarga con isotopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe De Antioquia.*

Villarroya, F. (2009). *Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego.*

Wikipedia Enciclopedia Libre. (2021a). *Brújula Brunton - Wikipedia, la enciclopedia libre.*

[https://es.wikipedia.org/wiki/Brújula_Brunton.](https://es.wikipedia.org/wiki/Brújula_Brunton)

Wikipedia Enciclopedia Libre. (2021b). *Martillo de geólogo - Wikipedia, la enciclopedia libre.*

[https://es.wikipedia.org/wiki/Martillo_de_geólogo.](https://es.wikipedia.org/wiki/Martillo_de_geólogo)

Wikipedia Enciclopedia Libre. (2021c, June 19). *Oxígeno-18.*

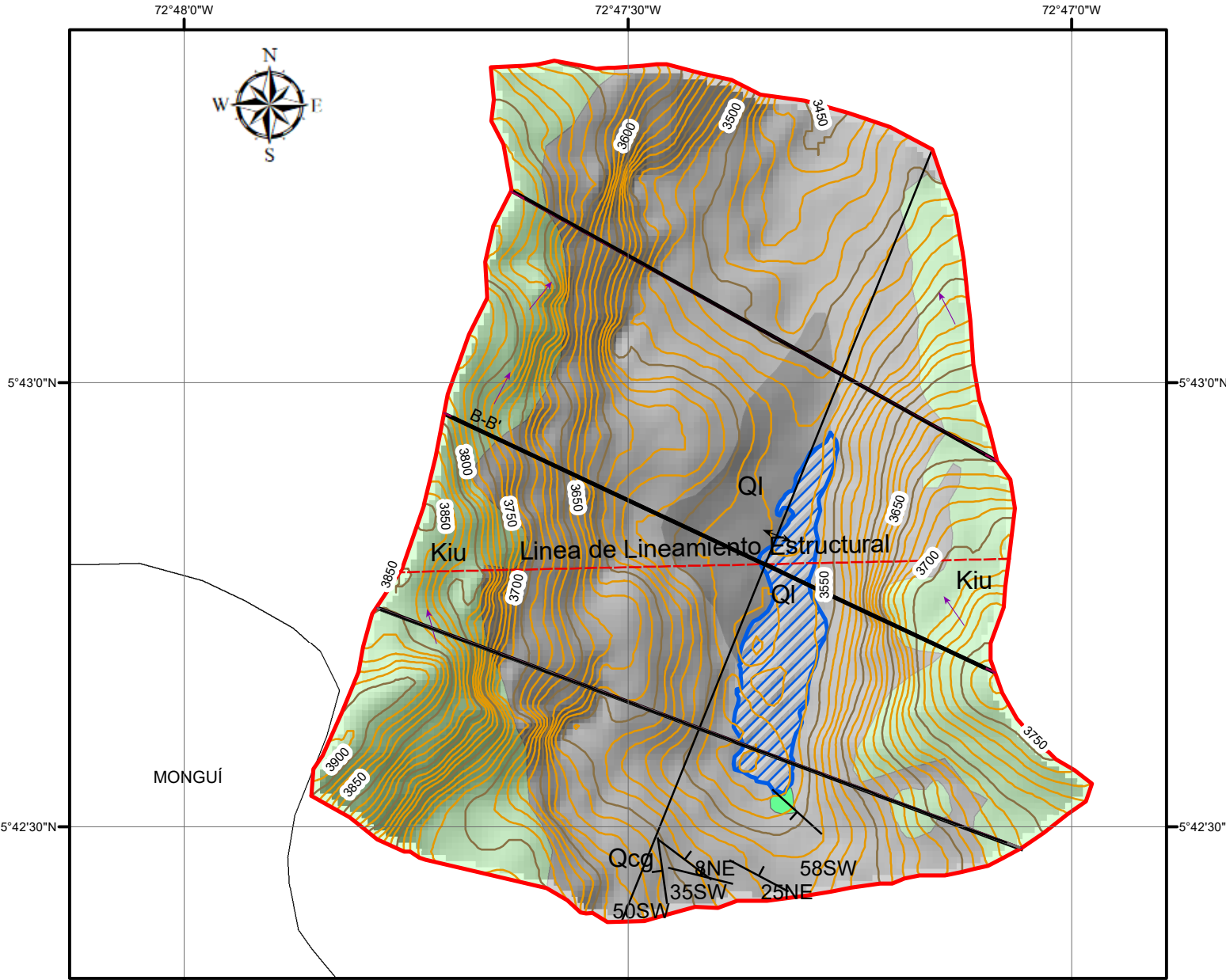
[https://es.wikipedia.org/wiki/Oxígeno-](https://es.wikipedia.org/wiki/Oxígeno-18#:~:text=El%20oxígeno%20(18O,Es%20del%2020%25)

[18#:~:Text=El%20oxígeno%20\(18O,Es%20del%2020%25](https://es.wikipedia.org/wiki/Oxígeno-18#:~:text=El%20oxígeno%20(18O,Es%20del%2020%25)

.

15 ANEXOS

A. ANEXO 1

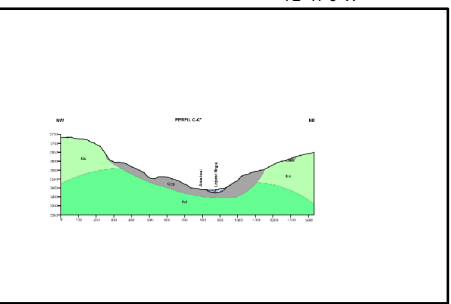
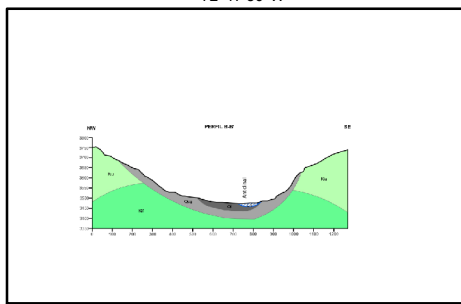
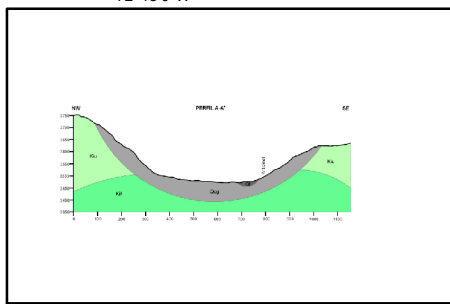
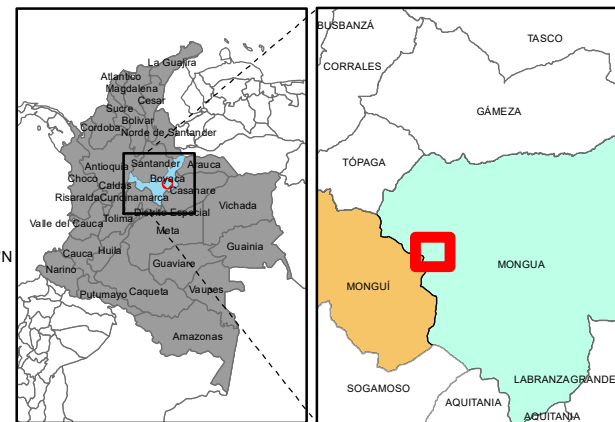


BASE CARTOGRAFICA

- Anticinal Erodado
- Lineamiento Estructural
- Dato Estructural
- Dato Estructural Fotogeologia
- Area de trabajo
- Laguna Negra
- CORTES

FORMACIONES GEOLOGICAS

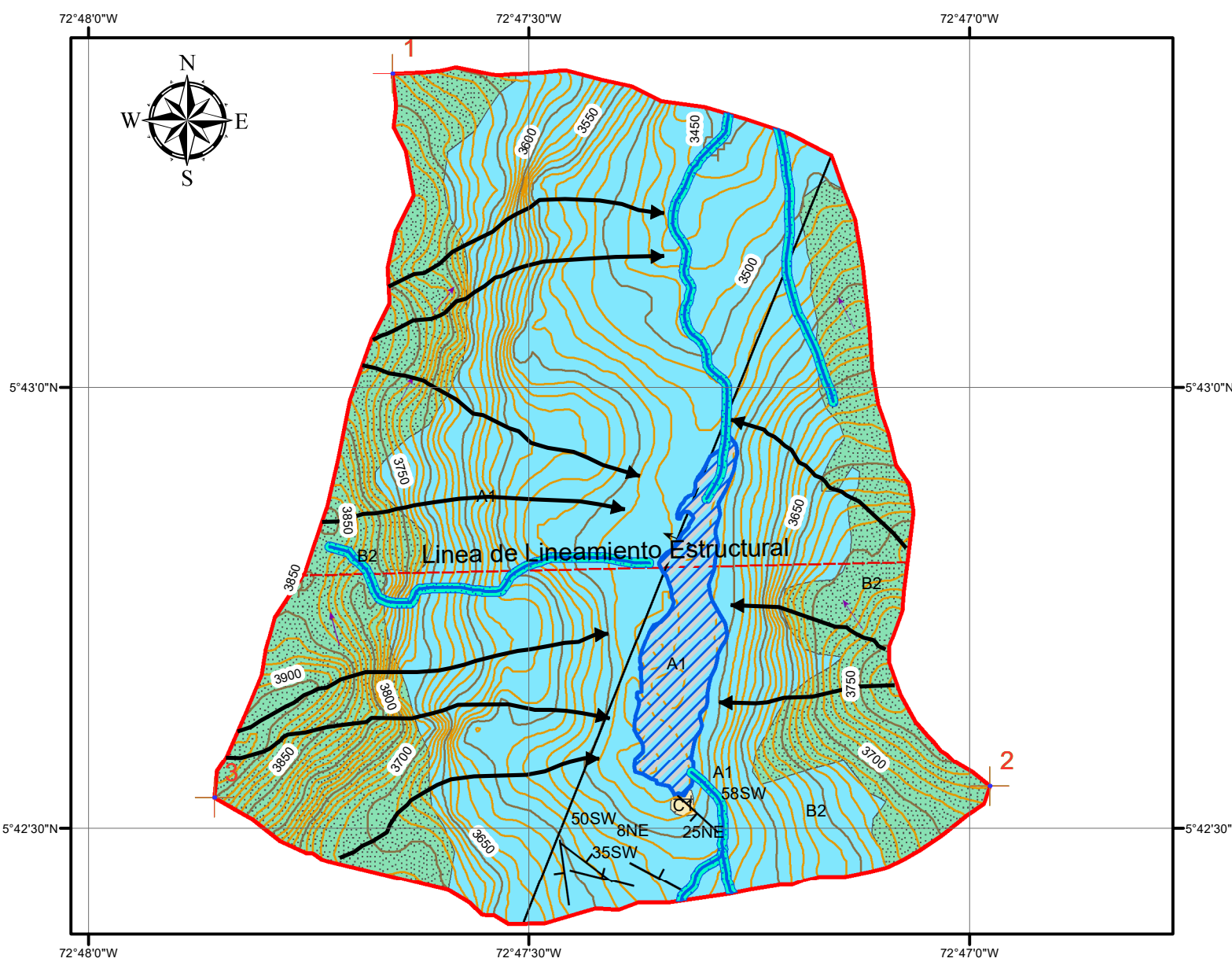
ERA	PERIODO	SIMBOLO	UNIDAD LITOLÓGICA
CENOZOICO	CUATERNARIO		DEPOSITOS DE LAGUNA
			DEPOSITOS COLUVIO GLACIAR
MESOZOICO	CRETÁCICO INFERIOR		FORMACION UNE
			FORMACION FOMEQUE



Reference Scale: 1:5000

Coordinate System: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Units: Degree
 Date: 15/04/2022

B. ANEXO 2

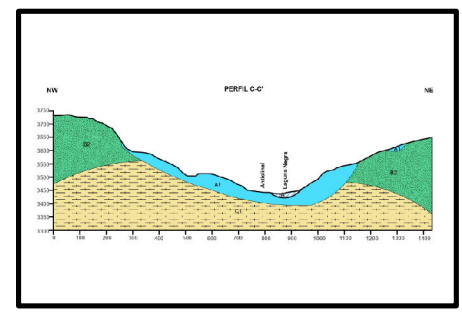
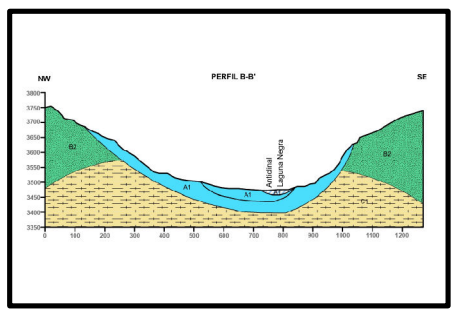
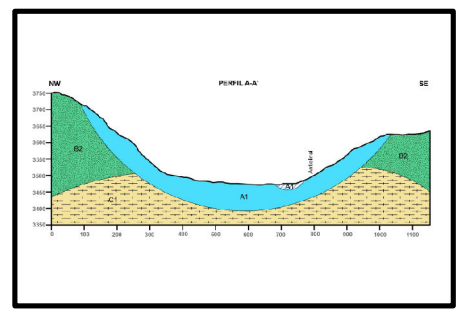
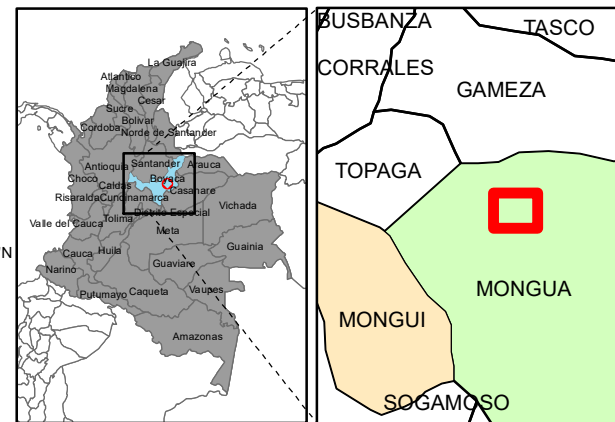


BASE CARTOGRAFICA

	Anticlinally Erodado		Area de trabajo
	Lineamiento Estructural		Area de Estudio
	Zona De Descarga		Laguna Negra
	Dato Estructural		Lineas De Flujo
	Dato Estructural Fotogeologia		

UNIDAD HIDROGEOLOGICA

	Acuifero de porosidade A1 primaria
	Acuifero de porosidad primaria y secundaria B2
	Acuitardo en roca C1



Reference Scale: 1:5000

0 0,0750,15 0,3 0,45 0,6 Kilometers

Coordinate System: GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Units: Degree
Date: 17/05/2022

RECARGA DE SISTEMAS LENTICOS EN ZONAS DE PARAMO CASO DE ESTUDIO: ORIGEN DE LA RECARGA DEL SISTEMA LAGUNA NEGRA, LOCALIZADA EN EL PARAMO DE OCETA A PARTIR DE LA ELABORACION DE UN MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

Autor: Sebastian Fernando Alvarado Amezquita

Orientador: Diego Felipe Gomez Gutierrez Geologo, Ph.D

Abstract:

The development of this master thesis was supported by the implementation of a conceptual hydrogeological model, in which the geological characterization of the area was performed and the subsequent mapping of geological units in a base integrating geological, stratigraphic, and structural information using ArcGis software. The hydrological model was made from hydro meteorological data associated with multi-temporal data series for the nearest station in the study area, and through obtaining the total monthly precipitation parameters and monthly temperature, the hydric balance in the area was carried out using the Thornwaite methodology in which potential evapotranspiration was calculated and parameters corresponding to deficit, reserves, and surplus, respectively were determined. The hydraulic parameters of the geological materials were obtained through the relationship of several authors corresponding to porosity, effective porosity, and electric conductivity for the geological lithologies described in the geological model. To establish the hydraulic flows behavior integrated into the model, a flow network was created for the area together with its flow lines, establishing the possible flow directions taking into account the topography of the area, hydraulic gradient and the equipotential lines obtained. As a complement to the hydrogeochemical model, the analysis of stable isotopes (Oxygen 18 and Deuterium) of four samples was performed to determine the isotopic ratios of the possible sources against a global and local isotopic line to establish the isotopic behavior and trend, and to determine possible origins of the sources according to their isotopic ratios.

Key words: Dynamic, Geological, Hydrogeological, Hydrochemical, Hydric, Isotope, Paramo, Precipitation, Recharge, Flow network.

1. Introducción

En Colombia la preservación de ecosistemas estratégicos como los páramos se ha convertido en un eje fundamental para la planificación del recurso hídrico que genera en este, así como la generación de conciencia ambiental sobre el cuidado y la importancia de esto dentro del desarrollo urbano y rural en el marco

de abastecimiento de recursos. La importancia de los páramos específicamente para el territorio colombiano se centra en que el 70% del agua que utiliza la nación proviene de dichos ecosistemas (1) y que allí es donde la mayoría de los sistemas loticos (ríos, quebradas, drenajes) tienen su nacimiento, En el departamento de Boyacá se encuentra la mayor extensión geográfica de paramos con el 18.3% del total nacional donde se

destaca la mayor extensión de paramos (2), Por ende, estudiar de forma técnica estos singulares ecosistemas en temas relacionados con hidrogeología permitirá tener un mejor concepto de cómo es la dinámica de precipitación, procesos de recarga y descarga tanto de sistemas lentos como loticos. El área de estudio se encuentra localizada en el páramo de Oceta al nororiente del departamento de Boyacá a 22 kilómetros de la ciudad de Sogamoso y se encuentra en jurisdicción de los municipios de Mongua y Monguí Boyacá, Dentro del páramo de Oceta se encuentra un sistema lentico llamado laguna negra, esta se caracteriza por ser una laguna de tipo glaciar de morfología oval oblonga, la cual se caracteriza por ser un reservorio de las aguas presentes en el sistema de paramo, así como de captar la precipitación que se presenta en dicho lugar.

El propósito de la presente investigación es a través de herramientas asociadas a las geociencias (Hidrogeología) realizar un modelo hidrogeológico conceptual que permita determinar la dinámica hídrica que soporta el origen de la recarga del sistema lentico laguna negra donde se pueda validar el aporte de los reservorios de agua superficial, subsuperficial y subterránea para así dar respuesta de cómo es el génesis de esta y a futuro poder establecer lineamientos que permitan tener una eficiente planificación y conservación del recurso.

2. Materiales y métodos

Para alcanzar los objetivos propuestos fueron utilizados métodos basados en fases secuenciales que permitirán de forma sistemática un análisis coherente de la información colectada, los métodos y la sistemática del trabajo se sintetizan en la configuración de un flujograma general para describir la metodología, así como 4 submodelos de insumo que tratan temáticas específicas que representan la síntesis del proyecto.

Los 4 submodelos que conforman el modelo hidrogeológico conceptual son: modelo geológico, modelo hidrológico, modelo hidráulico y modelo

hidroquímico, dichos insumos representan la información esencial para el desarrollo del proyecto.

Para el desarrollo del presente proyecto fue aplicado el método descriptivo de investigación científica basado en revisión, análisis de información geológica, hidrológica, hidráulica e hidroquímica, así como en técnicas analíticas utilizadas. Se tomó como base, la recopilación de información asociada al estado del arte de las diferentes metodologías insumo del modelo hidrogeológico conceptual, ya que esta corresponde a un primer escenario dentro del método científico para abordar el tema investigativo (3) este primer abordaje desde un punto de vista investigativo permite determinar como se ha tratado el tema, el estado actual del área al momento de la investigación y sus tendencias. Para ello para el desarrollo de esta etapa se recomienda establecer periodos de tiempo acordes con los objetivos planteados (4).

En cuanto a las metodologías de tratamiento de información base se desarrollan dos etapas: heurística o de recolección de fuentes de información y hermenéutica o de análisis. La primera etapa describe el proceso de búsqueda de la información y la relación con sus fuentes bibliográficas según la clase de información encontrada, es considerada como un primer acercamiento a un escenario investigativo de información previa en el área seleccionada (5).

Como complemento a las etapas anteriormente mencionadas y como parte de la obtención de la información se realizó una fase de campo en donde se aplicaron metodologías de trabajo para la obtención de la información base, en la cual se realizó una actualización de la cartografía geológica, caracterización geomorfológica, caracterización de afloramientos rocosos, elaboración de secciones geológicas-hidrogeológicas, muestreos de rocas para análisis petrográficos (sección delgada), elaboración de sondeos eléctricos verticales, toma de muestras para

análisis fisicoquímicos y por ultimo un muestreo sistemático para análisis de isotopos estables

3. Análisis de resultados y discusiones

3.1 Modelo Geológico

Geológicamente el área de estudio está constituida de base a tope, por rocas sedimentarias de edad Cretácica inferior correspondiente a la formación Fomeque (Kif) compuesta principalmente por lodolitas negras en capas delgadas con patrones de estratificación ondulada no paralela y cuarzo arenitas de grano fino con tonalidades grises a negras la cual se encuentra suprayacida por la Formación Une (Kiu) la cual litológicamente corresponde a una alternancia de cuarzo arenitas de grano fino a medio y lodolitas grises a oscuras en capas delgadas cuyos espesores varían entre 0,60 m y más de 10 metros en algunos sectores puntuales. Así mismo se disponen de forma local depósitos Cuaternarios descritos como depósitos de laguna (Ql) compuestos por arcillas y lodos respectivamente localizados al costado oeste de la laguna negra, y depósitos coluvioglaciares (Qcg) compuestos con conglomerados clasto soportado en matriz arena lodosa de composición heterogénea y tamaño variable con ocurrencias de bloques angulares, los depósitos cuaternarios descritos y caracterizados se encuentran suprayaciendo las formaciones geológicas anteriormente descritas.

Desde el punto de vista estructural se evidencian estructuras asociadas a deformación plástica, las rocas Cretácicas, producto de la acción de esfuerzos de tipo compresivo, los cuales originan un pliegue de tipo anticlinal con rumbo suroeste-noreste, el cual se encuentra actualmente erodado como resultado de la acción de los procesos erosivos asociados a la dinámica glacial, y el tiempo geológico, obteniendo como resultado la modelación del terreno en forma de un

valle en U tipo glacial, geomorfología que posibilita el desarrollo actual de un sistema lagunar.

Estratigráficamente la secuencia del área de estudio se dispone con la ocurrencia local de depósitos de laguna caracterizados como una intercalación de sedimentos arcillosos y lodoso, una característica común sobre los flancos del valle glacial es la presencia de depósitos coluvio glaciares caracterizado como conglomerados clasto soportado en matriz arenosa.

Complemento a la información obtenida se realizó una caracterización petrográfica (micro) correspondiente a la formación Fomeque (Kif) bajo un aumento de 40X mediante luz polarizada Dx, y una escala de referencia para las muestras de 500 μm en el cual se identificó una textura general tipo plumosa con la presencia de materia orgánica la cual presenta tonalidades negras al paso de la luz polarizada (nicoses cruzados), para el caso del presente análisis de la sección petrográfica se evidencia un alto contenido de materia orgánica, de igual forma se determinó la presencia de arcillas identificadas por las tonalidades café y café parduzco.

La anterior información fue complementada a nivel del subsuelo mediante la aplicación de métodos geofísicos, representados en tres sondeos eléctricos verticales mediante el equipo Geoamp 202 con una apertura de 250 metros cada uno mediante el arreglo geométrico tipo Schulumberger simétrico localizados sobre los depósitos de laguna y correspondientes depósitos coluvioglaciares en la cual se logró una profundidad de investigación con el procesamiento de los datos y un error promedio de los análisis de 7.36 % y 9.76% obteniendo curvas patrón tipo H-K.

3.2 Modelo Hidrológico

Mediante la información hidrometeorológica obtenida de fuentes secundarias asociadas a la estación hidrometeorológica Mongua se realizó el cálculo del balance hídrico mediante la metodología de Thornthwaite la cual se basó en función de la variable evapotranspiración, factor de corrección astronómica del día en función del mes y la temperatura media mensual, la metodología descrita por Thornthwaite es la más acogida en temas hidrológicos para estimaciones de balances hidrológicos, estudios meteorológicos y análisis espaciales de cuencas hidrográficas. (6).

De acuerdo con la información obtenida para el cálculo del balance hídrico se establece que la infiltración para el área es de alrededor del 9.57% de la precipitación total anual, esto se traduce en una excelente zona de recarga potencial a los acuíferos, cabe destacar que mediante la metodología pudo establecerse la definición de año hidrológico de marzo a diciembre según el régimen de lluvias, estableciendo para el presente caso un régimen bimodal de la precipitación.

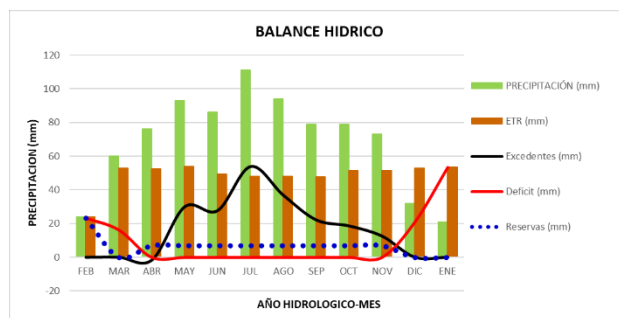


Fig1: Cálculo de variables del balance hídrico. Fuente: Elaboración propia Autor, 2022

De acuerdo con los análisis obtenidos se determina que los excedentes son variables a lo largo del año hidrológico siendo julio el mes con mayores excedentes correspondientes a 57,0617 mm, el déficit a lo largo del año hidrológico se mantiene constante con un valor de 0 de marzo a octubre siendo noviembre, diciembre,

enero, febrero los meses con mayor déficit con valores correspondientes a 52,947, 106,418, 47,320 y 100,257 mm respectivamente.

3.3 Modelo Hidráulico

Con el fin de poder establecer el comportamiento hidráulico de los materiales geológicos presentes en el área de estudio, y poder tener una premisa del comportamiento del agua subterránea o subsuperficial a través de un medio geológico se realizó la caracterización hidráulica a partir de información secundaria obtenida de autores quienes realizaron caracterizaciones generales de parámetros hidráulicos de forma general para los materiales geológicos similares a los encontrados en el área de estudio. Para el presente caso los parámetros hidráulicos caracterizados correspondieron a parámetros conceptuales relacionados con porosidad, porosidad efectiva y conductividad eléctrica. Los parámetros hidráulicos mencionados anteriormente se expresaron en notación científica respectivamente para cada unidad geológica caracterizada y descrita en el modelo geológico citado puntualmente para cinco autores respectivamente, los cuales permitirán tener una aproximación al comportamiento hidráulico y las condiciones para la movilidad de un fluido a través de un medio y su potencial para almacenar agua.

Para el caso de la variable porosidad, de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas y los autores citados categorizando así los valores con más altos rangos en intervalos de 30 a 70 % según diversos autores los cuales se relacionarían a depósitos de laguna compuestos principalmente por arcillas y lodos, posterior a ello se encuentran las lodolitas las cuales poseen de igual forma un alto rango de porosidad con valores que oscilan entre el 30 y 50 %, con valores de porosidad entre 5 a 42% se identifican cuarcos areniscas y por último materiales geológicos con tamaños de gravas asociados a conglomerados para los diversos autores citados se relacionan rangos de porosidad

entre 20 y 50%. La porosidad efectiva determino que los mayores valores de porosidad efectiva se relacionan a los conglomerados con rangos que oscilan entre 12 y 35% respectivamente lo cual indica que posee una mayor cantidad de poros interconectados que permiten así un mayor paso de agua a través de un medio determinado, las lodolitas poseen así valores de porosidad efectiva entre 2 y 20% respectivamente catalogados como materiales geológicos con porosidad efectiva moderada, y por último se encuentran las cuarzo areniscas con valores entre 0 y 20% y las arcillas y lodos con valores entre 0 y 10% lo cual permiten catalogarlas como materiales geológicos de tipo impermeables con pocos o nulos espacios intersticiales conectados que permiten el paso de un fluido a través de esta. De acuerdo a los resultados presentados se determina que los materiales geológicos asociados a conglomerados presentan los mayores valores de conductividad hidráulica con rangos entre 1.157×10^{-6} a 100 siendo esta la unidad con mayor potencial hidráulico, así mismo se presentan las cuarzo areniscas con valores de conductividad entre 1.157×10^{-2} a 1.157×10^{-10} catalogadas como unidades con un potencial hidráulico medio donde el caudal que circula a través del medio es más corto y restringido por los tamaños de los poros, seguido a ello encontramos dos litologías que corresponden a unidades con poco o nulo potencial hidráulico asociados a lodolitas y arcillas y lodos respectivamente las cuales se caracterizan por sus bajos valores de conductividad hidráulica asociados a valores entre 1.157×10^{-4} y 1.157×10^{-12} y 1.157×10^{-8} a 1.157×10^{-15} respectivamente, lo cual indica que estas litologías geológicas no permiten la circulación de un fluido de forma óptima por el medio siendo estas condiciones principales para categorizarlas como unidades con baja conductividad hidráulica.

Para la definición del posible comportamiento hidráulico en el área basados en la caracterización geológica se realizó la construcción de la red de flujo y las líneas equipotenciales junto con sus líneas de flujo las cuales predicen de forma ideal el comportamiento

del flujo basados en las características topográficas y el gradiente hidráulico para el presente caso se estableció una dirección noroeste-suroeste respectivamente para el movimiento de los flujos.

3.3 Modelo Hidrogeoquímico

Se realizó una campaña de campo en la cual se tomaron muestras de agua de las potenciales fuentes que alimentan al sistema lentic: Laguna Negra, un drenaje intermitente sobre el depósito coluvio glaciar, suelo orgánico en inmediaciones al sector sur de la laguna y una cascada en el sector sur o afluente que recarga la laguna, con los datos obtenidos de los muestreos fisicoquímicos respecto a aniones y cationes mayoritarios se realizó el ploteo de los datos mediante diagramas hidroquímicos para realizar la evaluación de los datos y determinar procesos de intercambio iónico, determinar facies y comportamiento hidroquímico de las muestras, los diagramas utilizados para el presente estudio correspondieron a Piper Hill, Schoeller Berkloff y Stiff.

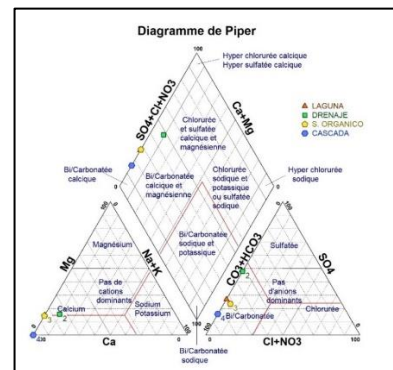


Fig2: Diagrama de Piper Hill. Fuente: Diagrammes

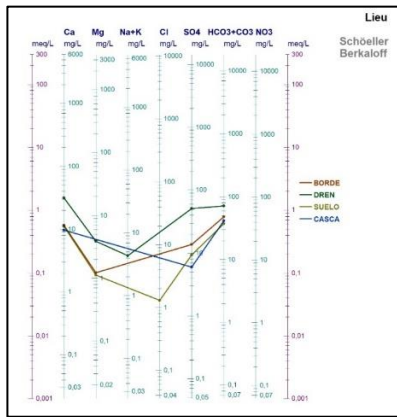


Fig 3: Diagrama de Schoeller Berkaloff. Fuente: Diagrammes

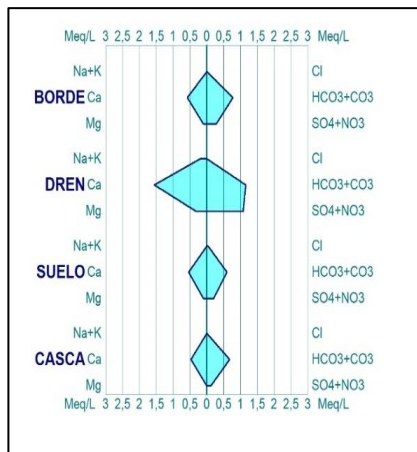


Fig 4: Diagrama de Stiff. Fuente: Diagrammes

De acuerdo con los gráficos presentados para clasificación de aniones se identifica una clara dominancia en la clasificación del anión bicarbonato, seguido a este el catión con dominancia corresponde al tipo cálcico y magnésico respectivamente, la facie hidroquímica en la cual se ajustan las muestras analizadas, determinando que las muestras tomadas en el páramo de Oceta sector alguna negra presentan una facie bicarbonatadas cálcicas o magnésicas, con claras relaciones de intercambios aniónicos y procesos de disolución donde es característico los tiempos cortos de transito y una marcada tendencia de las muestras con comportamientos bicarbonatados cálcicos lo cual

corroborar el comportamiento de aguas lluvias con pocos tránsitos.

Como complemento al desarrollo del componente Hidrogeoquímico se realizó una campaña de muestreo isotópicos para el análisis de isotopos estables en el cual se analizaron variables correspondientes a (δD y $\delta^{18}O$) en 3 fuentes principales y un dato isotópico tomado al agua Lluvia como valor de referencia para análisis isotópicos. Así mismo se realizó la interpretación y análisis de los datos isotópicos mediante el ploteo de los datos obtenidos en la línea meteórica isotópica para así determinar la variabilidad isotópica de las muestras respecto a una línea de tendencia mundial y local ajustada para Colombia.

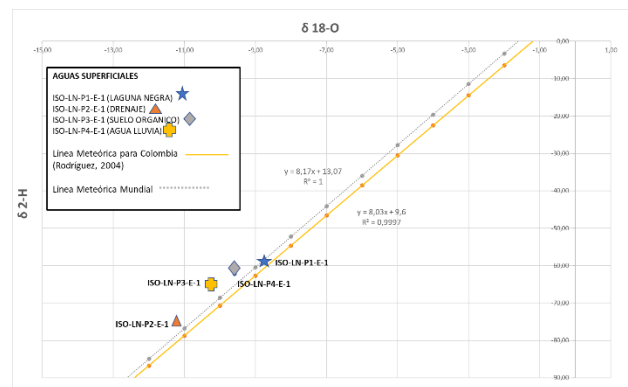


Fig 5: línea meteórica Fuente: Fuente: Elaboración propia Autor, 2022

Mediante los análisis isotópicos se determinó que este tipo de aguas corresponden a aguas lluvias con pocos tránsitos con una clara estabilización isotópica que determina un comportamiento con tendencia similar a las líneas meteóricas salvo las muestras correspondientes al drenaje intermitente, suelo orgánico que presnetan un comportamiento anómalamente mas liviano que las demás determinando así que estas aguas proceden de cotas altitudinales mayores y sufren procesos de enriquecimiento, para el caso del agua lluvia la muestra se toma como referencia para el ajuste de los datos isotópicos.

Con la información isotópica de cada muestra se realizó un modelo de mezcla de isótopos para dos escenarios fundamentales correspondientes a un periodo de lluvia y un periodo de estiaje, determinando así que para el periodo de lluvia al realizar las ecuaciones con las concentraciones isotópicas de oxígeno 18 para las dos fuentes seleccionadas esta supera el 100% de relación para cada fuente, a partir de ello se determina que el sistema lentic laguna negra isotópicamente presenta una relación de oxígeno 18 mayor que las fuentes seleccionadas, no es posible para el presente caso que en un sistema cerrado utópico un producto originado de dos fuentes que sea isotópicamente más pesado. Debido a los valores de concentración isotópicas se está presentando un fenómeno de evaporación diferencial en el agua del sistema lentic laguna negra, debido a que las aguas de la laguna permanecen mucho tiempo estáticas y la rata de velocidad del agua que recarga la laguna no es la misma al agua que sale del mismo sistema (laguna negra), lo que provoca que se genere un fenómeno de evaporación diferencial el cual vuelve anómalamente más pesada las aguas de la laguna evaporando y liberando a la atmosfera isótopos de oxígeno 16. Por otro lado, para el periodo de estiaje fue posible estimar un escenario de proveniencia entre el suelo orgánico y el drenaje obtenido así el siguiente diagrama:

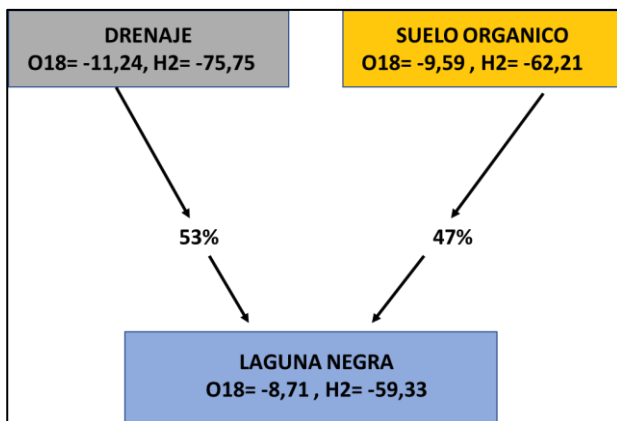


Fig 6: Diagrama de mezcla en época de estiaje: Fuente: Elaboración propia Autor, 2022

El modelo de mezcla desarrollado en época de estiaje para el sistema lentic laguna negra, indican que el 53% del agua proviene del drenaje presente en el área y el 47 % corresponde al agua que se encuentra en los suelos orgánicos circundantes al área de la laguna, sin embargo mediante el modelo de mezcla se establece el potencial de aporte de agua que contiene los suelos orgánicos en época de estiaje, el cual es capaz de aportar hasta un 47 % de la composición total del sistema lentic laguna negra. Los anteriores resultados se sustentan en la capacidad de los suelos para retener agua la cual se puede catalogar como una unidad hidrogeológica y a ello sumado a que a la altura sobre el nivel del mar de los páramos en este tipo de suelos orgánicos la materia orgánica no se degrada a la misma velocidad que en otras alturas debido a la poca actividad bacteriana y las temperaturas bajas propias del páramo lo cual favorece la retención de agua y la posterior descarga al sistema laguna negra.

4. Conclusiones

La estructura geológica dominante corresponde a un anticlinal enroscado de orientación suroeste-noreste. Dichos factores dan como resultado la modelación del terreno en forma de un valle en U, que propicia geomorfológicamente la configuración de una laguna en el valle glacial.

Mediante información secundaria asociada a registros hidrometeorológicos se realizó la definición de año hidrológico y el balance hídrico respectivo. Teniendo en consideración que el régimen de precipitación para el área es de tipo bimodal el año hidrológico calculo se define para los meses de marzo a diciembre. De acuerdo con la información obtenida para el cálculo del balance hídrico se estableció que la infiltración para el área es el 9.57% la cual se cataloga como una potencial zona de recarga, debido a que del 10% de la precipitación el 9.57% logra infiltrarse.

Durante el desarrollo del muestreo hidroquímico y su posterior análisis de resultados se determinó que las aguas correspondientes al sistema lentic laguna negra pertenecen a aguas lluvias donde prevalecen los tránsitos cortos y este a su vez es producto de los flujos tributarios de las zonas más altas. Finalmente se proponen diferentes fuentes de aportes hídricos superficiales asociados a drenajes y suelos orgánicos los cuales presentaron una incidencia dentro de la recarga hídrica, donde se evidencian fenómenos de enriquecimiento de las aguas producto del paso por diferentes medios geológicos y tiempos cortos de permanencia propios de una recarga constante para el caso de los suelos orgánicos..

g

iv

La aplicación de la técnica de isotopos estables oxígeno- deuterio (O18 Y H2) permitió establecer un modelo de mezcla para dos escenarios influyentes en la recarga (época de lluvias y estiaje) en la cual se determinó que para la época de lluvias no es posible estimar escenarios de proveniencia entre las posibles fuentes y el dato isotópico obtenido de la lluvia ya que las relaciones isotópicas superan el 100% de relación para cada fuente, y el objetivo a analizar presenta una mayor relación de oxígeno 18. Por lo tanto, se concluyo que para la época de lluvias se presenta un fenómeno de evaporación diferencial el cual convierte las aguas del sistema lentic laguna negra anómalamente más pesadas consiguiendo evaporar y liberar isotopos de oxígeno 16. Por otro lado, durante el periodo de estiaje el escenario de proveniencia dominante corresponde a la relación entre el drenaje y el suelo orgánico obteniendo un porcentaje de proveniencia del 53% para el drenaje y el 47% para el suelo orgánico.

A partir de los escenarios de proveniencia realizados se determinó la importancia de los suelos orgánicos dentro de la recarga del sistema lentic laguna negra en época de estiaje y su importancia de ser catalogada como una unidad hidrogeológica de alta influencia en zonas de paramo.

Referencias

1. Ministerio de medio Ambiente. (2022, May 21). Páramos. <https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/paramos/>.
2. García Pinzón, M. R. (2022). Una experiencia de sostenibilidad de las comunidades en el páramo de Boyacá.
3. Barbosa Chacón, J. W., Barbosa Herrera, J. C., & Rodríguez Villabona, M. (2013). Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas.
4. Rojas Rojas, S. P. (2007). El estado del arte como estrategia de formación en la investigación. In *Studiositas*. Bogotá (COLOMBIA) (Vol. 2, Issue 3).
5. Rojas Rojas, S. P. (2007). El estado del arte como estrategia de formación en la investigación. In *Studiositas*. Bogotá (COLOMBIA) (Vol. 2, Issue 3).
6. Marín Valencia, V. (2010). Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca. Pontificia Universidad Javeriana.