

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA Y EMBALSE DEL PARQUE NATURAL LA NITRERA, CONCORDIA (ANTIOQUIA)^a

HYDROGEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE BASIN AND DAM OF LA NITRERA NATURAL PARK, CONCORDIA (ANTIOQUIA)

DIANA MORALES^b, FABIO VELEZ^c, BENITO GUERRERO^d

Recibido 02-04-2018, aceptado 03-12-2018, versión final 30-10-2018.

Artículo Investigación

RESUMEN: El Parque Natural la Nitrera, creado como una reserva natural clasificada como bosque húmedo de montaña baja y con una topografía altamente quebrada, está situado al suroeste antioqueño en la zona rural del municipio de Concordia, Antioquia. Este parque posee un embalse que es la única fuente que proporciona el servicio de agua para los habitantes del municipio en la zona urbana, en los meses de diciembre a marzo presenta desabastecimiento y caída de las paredes de contención por la temporada seca y para los meses de mayo a agosto temporada de lluvias presenta problemas de movimientos gravitacionales sobre el cauce. Debido a la recurrencia cíclica de esta problemática que desencadena en la restricción del servicio del agua, se planteó un estudio geomorfológico sobre la cuenca y el embalse para evaluar como las estructuras presentes y su dinámica repercuten. En la evaluación se identificaron unidades tales como filos con altas pendientes y topes planos. En conjunto con la evaluación con estas unidades se hizo una caracterización del suelo con la cual se contrastó la relación entre el suelo residual y las altas pendientes.

PALABRAS CLAVE: Unidades superficiales; geomorfología; hidrogeología; suelo.

ABSTRACT: La Nitrera Natural Park, created as a natural reserve in a classified as humid mountain forest with a highly broken topography, is located in the southwest of Antioquia in the rural area of Concordia municipality. This park has a dam being the only tap water provider for the urban inhabitants. During the December-March lapse, a water shortage occurs, the water level descends and therefore the earthed walls suffer partial falling outs; between May and August, the rainy season carries problems on of gravitational movements. Due to the cyclical recurrence of this problem that triggered the restriction of the water service, a geomorphological study was proposed on the basin and the reservoir to evaluate how the present structures and their dynamics have repercussions. In the evaluation we found

^aMorales, D.; Vélez, F. & Guerrero, B. (2018). Caracterización hidrogeológica y geomorfológica de la cuenca y embalse del Parque Natural la Nitrera, Concordia (Antioquia). *Rev. Fac. Cienc.*, 8(1), 73–99. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v8n1.71399>

^bIngeniera de petróleo, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. demoralesq@unal.edu.co

^cProfesor asociado–Coordinador grupo GeoLimna, Universidad de Antioquia. fabio.velez@udea.edu.co

^dIngeniero de petróleo, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. bgguerrero@gmail.com

units of high slope and great length. In conjunction with the evaluation with these units, a soil characterization was made with which the relationship between the residual soil and the high slopes was contrasted.

KEYWORDS: Surface units; geomorphology; hydrogeology; soil.

1. INTRODUCCIÓN

La interacción mutua de los tres dominios atmósfera, litósfera e hidrósfera, generan constantes cambios o procesos geológicos, responsables del origen y evolución del relieve (Phillips, 2016). Los procesos geológicos se relacionan con la interacción entre el medio físico y el ser humano, en relación con esta interacción, la geología desde su perspectiva dinámica estudia procesos que por sí mismos no son peligrosos, o lo son en la medida que el hombre no se exponga a ellos o no los induzca a través de sus actividades, como la erosión, los deslizamientos, flujos y avalanchas (Rincón & Vegas, 2000).

En las ciencias de la tierra ha sido reconocida la dependencia de la geomorfología entre la interacción de la geología, el clima y el movimiento del agua sobre la tierra. Las características físicas de una cuenca forman un conjunto que influyen profundamente en el comportamiento hidrológico de dicha zona tanto a nivel de las perturbaciones como de las respuestas de la cuenca tomada como un sistema. Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad en los estudios hidrológicos (Universidad de los Andes Venezuela, 2013).

Mediante una caracterización hidrogeológica, se definen unidades de importancia en el área de la cuenca, considerando la geología, la hidrografía y usando métodos de SIG. A partir de la caracterización hidrogeológica, se estudia y analiza el desempeño de la cuenca, lo que conduce a la estimación y a la caracterización de los parámetros morfométricos de una cuenca (Piñeiro, 2015).

Tanto la geomorfología como la hidrogeología pueden ser utilizadas como herramientas para la interpretación de la prospección, captación y protección de recursos hídricos (Flores *et al.*, 2015). Así mismo, es necesario estudiar y analizar los procesos geomorfológicos y la disposición de estructuras geológicas superficiales que afectan la calidad de vida y la disposición de recursos de la población asentada en cualquier región (Gonzalez & Soto, 2010). Esta investigación busca entender de forma detallada las relaciones entre hidrosfera, litosfera (rocas, depósitos y estructuras) y los productos e impactos de la meteorización, erosión, y comportamiento del suelo, transcurridos desde entonces, en aras del desarrollo de la gestión del embalse la Nitrera, de tal forma que se puedan elaborar planes de prevención para la protección del cuerpo de agua, tan importante para la población del municipio.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La subregión Suroeste de Antioquia, compuesta por 23 municipios entre ellos el municipio de Concordia, posee el 10.4% del área total del departamento, lo que ubica a esta subregión como la tercera más pequeña pese a ser la que más municipios registra (Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, 2015). Concordia (ver Figura 1) está localizado entre las coordenadas 1118800–1138000 E y 1161000–117300 N (*Magna Oeste Colombia*) (Gobernación de Antioquia, 2015). El municipio posee una extensión de 234 km², y una altura promedio 2.000 m.s.n.m. (Alcaldía de Concordia, 2015). La zona de estudio está localizada sobre la vertiente oriental de la cordillera occidental y se caracteriza por un relieve quebrado con laderas de hasta 30° de inclinación con gran longitud, con drenajes de alta pendiente y caudales promedios bajos (Cárdenas & Restrepo, 2006).

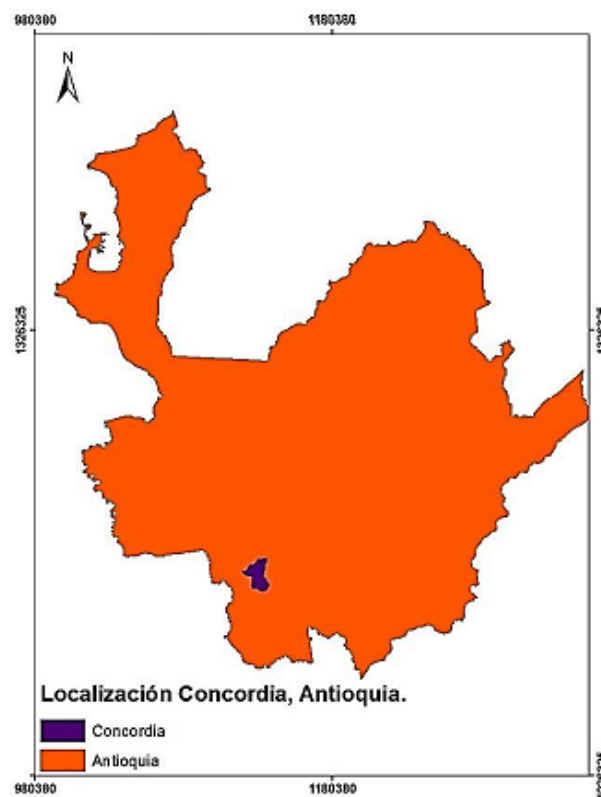


Figura 1: Localización de Concordia. Fuente: Elaboración propia a partir de Gobernación de Antioquia.

Para garantizar el abastecimiento de agua en la cabecera del municipio de Concordia fue adaptada la conducción por gravedad de las aguas de la quebrada Santa Mónica y cuenta con los siguientes parámetros:

- Un sistema con una presa de regulación, sobre el antiguo lecho de la quebrada Santa Mónica.
- Vertedero de excesos, construido en concreto, en un extremo de la presa.
- Torre de captación, ubicada aguas arriba del terraplén.

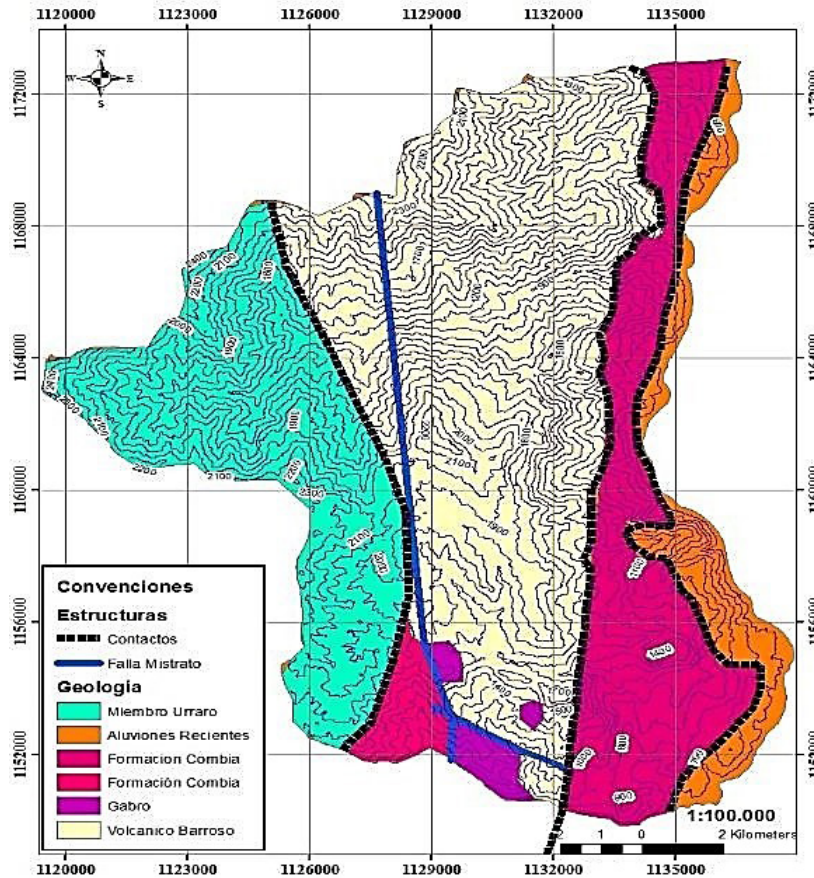


Figura 3: Mapa Geología Concordia. Fuente: Elaboración propia.

(Gobernación de Antioquia, 2015). Para una contextualización más precisa del área de estudio en la Figura 4 está la delimitación del embalse dentro del Parque Natural y se da la ubicación de las quebradas afluentes sobre las curvas de nivel correspondiente para determinar el marco de las corrientes y su desembocadura.

3. METODOLOGÍA

La metodología escogida para el desarrollo de esta investigación es una combinación de diferentes técnicas que permitieron reunir la suficiente información sobre el Parque Natural la Nitrera, sin alterar su estado natural. Por falta de documentación sobre la zona y la dificultad para encontrar zonas libres de vegetación y por el carácter ecológico del Parque Natural la Nitrera se usaron imágenes de cobertura y trabajo de campo con fotografías, muestras y toma de parcelas en las zonas descubiertas de vegetación de la zona para evaluar.

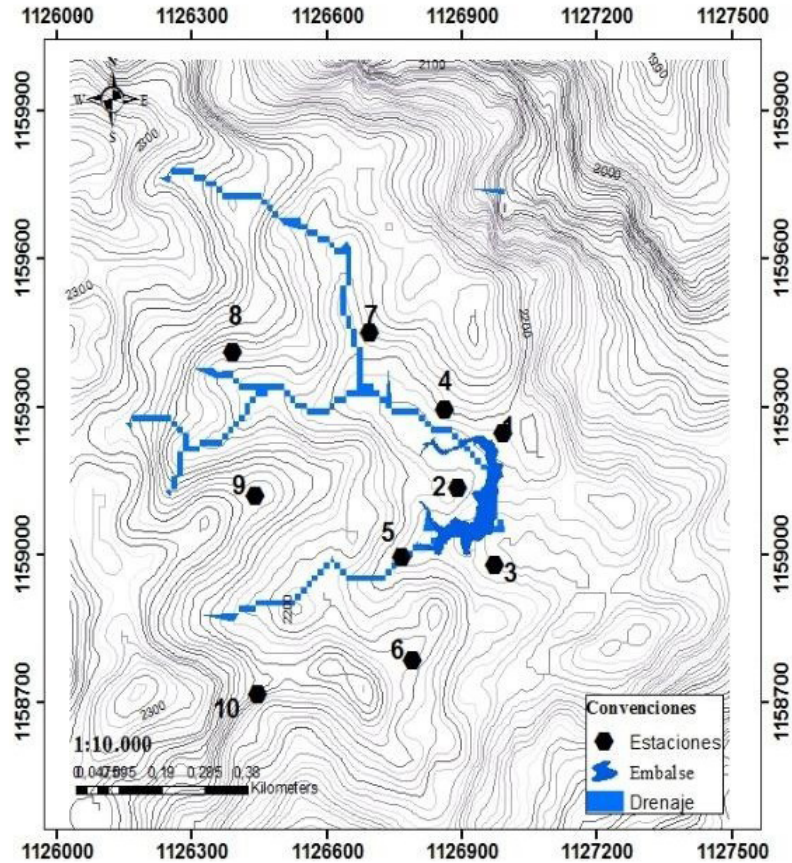


Figura 4: Área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Revisión estructural y geológica

Fue necesario hacer una revisión bibliográfica, en la cual se consultaron publicaciones, libros, artículos, datos, informes de la alcaldía y Corantioquia. Se buscó información en las bases de datos que permitieron conceptualizar y definir el problema con información académica. Para tener un consolidado de la información a nivel geográfico se consultaron mapas y el DEM disponible de ALOS con resolución espacial de 12.5 m, para ubicar espacialmente las estructuras de interés.

Las etapas básicas para el desarrollo de este ítem fueron la recopilación de información secundaria relacionada, la definición del marco geológico y estructural de la región, la delimitación y caracterización de las unidades, para posteriormente elaborar un mapa base a partir de la cartografía básica, y el modelo digital de elevación. Para la geomorfología, se identificaron las unidades del relieve de primer y segundo orden por medio del análisis de modelos de elevación digital (Patiño *et al.*, 2011), siguiendo las pautas propuestas de “Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia” (Carvajal, 2012).

Para tener una visión más clara del proceso antes mencionado se muestra un esquema complementario en la

Figura 5.

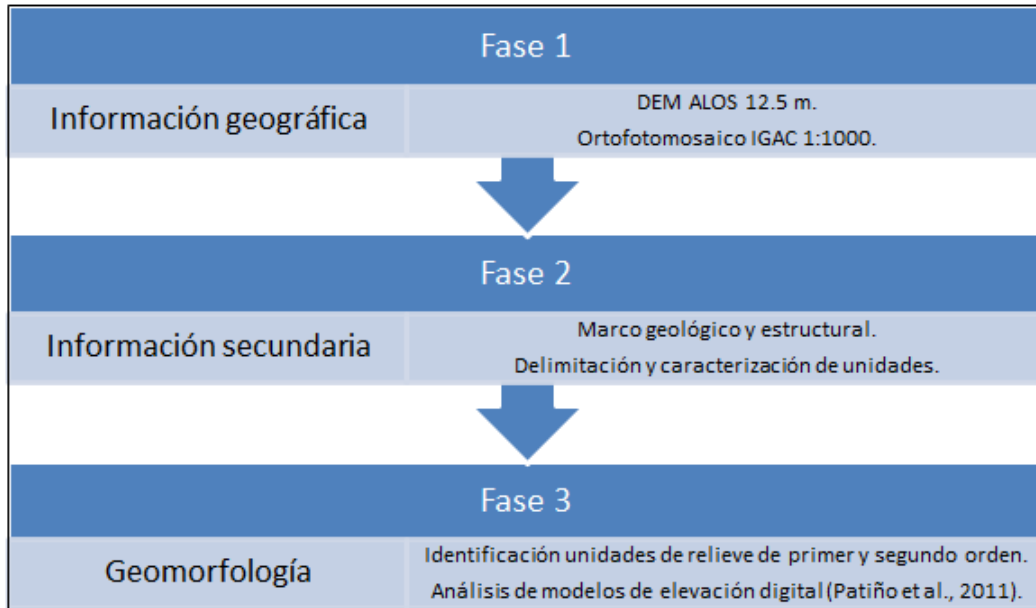


Figura 5: Fases de revisión estructural y geológica. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Parámetros geomorfológicos y morfométricos de la cuenca

Con la intención de caracterizar la cuenca hídrica se determinaron algunos índices geomorfológicos. Dentro de los índices geomorfológicos escogidos están, el área, la longitud de la cuenca y su perímetro, pendiente promedio de la cuenca, curva hipsométrica, histograma de frecuencias altimétricas, altura y elevación promedio, densidad de drenaje, perfil y pendiente promedio del cauce principal, además de índices de forma de la cuenca y tiempo de concentración (Villarreal, 2013). Para la evaluación de los índices geomorfológicos, ante la ausencia de información disponible, se hizo una comparación y correlación de trabajo de campo con ayuda de SIG. A continuación se hace una breve descripción de los parámetros principales para este estudio.

1. Longitud y ancho:

La longitud, L , de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo y otro punto aguas arriba (Hernani & Ramírez, 2002).

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) y se designa como W . De tal forma que:

$$W = \frac{A}{L} \quad (1)$$

2. Área de la cuenca:

Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Rojo, 2014).

El área es un parámetro geomorfológico muy importante y su importancia radica en las siguientes razones (Sanguinetti *et al.*, 2015):

- Es un valor que se utilizará para muchos cálculos en varios modelos hidrológicos.
- Para una misma región hidrológica o regiones similares se puede decir que a mayor área mayor caudal medio.
- Bajo las mismas condiciones hidrológicas, cuencas con áreas mayores producen hidrógrafas con variaciones en el tiempo más suaves y más llanas. Sin embargo, en cuencas grandes, se pueden dar hidrógrafas con picos cuando la precipitación fue intensa en las cercanías, aguas arriba, de la estación de aforo.
- Bajo las mismas condiciones hidrológicas, cuencas con áreas El área de las cuencas se relaciona en forma inversa con la relación entre caudales extremos: mínimos/máximos..

3. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius:

Se define como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Donde K es el radio del círculo equivalente en área a la cuenca. Por la forma como fue definido: $K \geq 1$. Obviamente para el caso $K=1$, se tiene una cuenca circular (Universidad de los Andes Venezuela, 2013).

4. Factores de forma de Horton:

Las observaciones de un buen número de cuencas reales en todo el mundo permiten establecer la siguiente relación entre el área de la cuenca A y el área de un cuadrado de longitud L, siendo L la longitud del cauce principal:

$$\frac{A}{L^2} = \frac{A^{-0.136}}{2} \quad (3)$$

Despejando el valor de L se tiene:

$$L = 1.41 \times A^{0.568} \quad (4)$$

3.3. Propiedades físicas y químicas del suelo

El suelo ha sido caracterizado en tres ítems en especial, propiedades físicas, químicas y biológicas, como las más representativas dentro de un estudio ambiental (McCauley *et al.*, 2005). Con el fin de desarrollar el levantamiento de suelo y la identificación, se procedió a utilizar la metodología general propuesta por la USDA que está dividida en cuatro principales tópicos (McCauley *et al.*, 2005):

1. Describir las características de un suelo del área cercana a las cuencas y puntos referenciados del Parque.
2. Clasificar las zonas del suelo de acuerdo con al sistema estándar de clasificación Deere y Patton.
3. Plotear los límites de los suelos en el mapa.
4. Hacer predicciones acerca del comportamiento de los suelos.

En este ítem se tuvo como punto de partida el análisis en laboratorio de las diferentes propiedades físicas y químicas. Por encontrarse la zona de estudio en una región tropical altamente meteorizada se hizo uso de la metodología de Deere & Patton (1971), que define tres zonas que a su vez poseen horizontes. En la Figura 4 están localizados los puntos referenciados que son las estaciones escogidas para el muestreo dentro del parque. El tipo de muestreo realizado en este punto fue de forma aleatoria simple, por la dificultad del terreno.

Las propiedades medidas sobre las muestras de suelo fueron: pH, porcentaje de materia orgánica (colorimetría), granulometría, límites líquido y plástico, y compresión en muestra confinada. Fueron escogidas por el interés específico de lo que concierne a la calidad del suelo respecto a la saturación máxima por agua y en la estabilidad de este para la gestión del embalse. Para la evaluación de las propiedades se tuvo en cuenta el marco normativo para Colombia propuesto por INVIAS e ICONTEC (ICONTEC, 2006). El uso de la norma NTC 1504 (ICONTEC, 2006), fue tomada como primer marco, pero para ciertas clasificaciones se recurrió a la norma ASTM D2487, que está comprendida como un equivalente para la clasificación del suelo.

3.4. Toposecuencia

El Parque Natural la Nitrera tiene un carácter ecológico que impide excavaciones o remociones de terreno en gran magnitud, además de una vegetación espesa en gran parte del terreno. Analizando esta situación se recurrió a la integración de varias técnicas para la evaluación de la zona. Por medio del uso de imágenes dron, y de Google earth se hizo una demarcación de los contactos superficiales, además de estas se recopiló un ortofotomosaico del IGAC, el cual al ser del año 2012 dio la pauta para ver si se había visto algún cambio de magnitud considerable. Para la recolección de muestras se hizo una selección aleatoria simple en los puntos que se mostraron en la Figura 7. La toma de parcelas se hizo sobre zonas antes modificadas por los pobladores, zonas tales que dejara expuesto el suelo, con poca vegetación demarcando 1 m por lado.

Tabla 1: Normas aplicadas en pruebas de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Norma	Descripción	Referencia
Límite plástico	INVIAS 126	Contenido más bajo de agua	(I.N.V.E–126, 2007)
Límite líquido	INVIAS 125	Contenido de agua expresado en porcentaje	(I.N.V.E–125, 2013)
Granulometría	INVIAS 123	Determinación del tamaño cuantitativo del grano	(I.N.V.E–123, 2013)
Colorimetría	INVIAS 121	Método de la determinación del contenido orgánico	(I.N.V.E–121, 2007)
Humedad	INVIAS 122	Evaluación del contenido de agua	(I.N.V.E–122, 2007)
Compresión inconfiada	INVIAS 152-13	Fuerza sobre suelo cohesivo	(I.N.V.E–152, 2008)
Determinación del PH	NTC 5264	Determinación de acidez activa	(ICONTEC, 2008)
Sistema de clasificación suelo	NTC 1504	Clasificación mineral y orgánica de suelo	(ICONTEC, 2006)

Tabla 2: Descripción de horizontes del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Zona	Horizonte	Descripción
Zona I	1A	Suelo superficial, raíces y m.o. Zona de lavado y eluviación
Suelo residual (regolito)	1B	Enriquecido en arcillas y acumulaciones de Fe, Al y Si. Ausencia de estructuras heredadas
	1C	Material tamaño limo a arena, menos de 10% de núcleos de roca
Zona II	2A	Transición de suelo residual (saprolito) a roca parcialmente meteorizada
Roca meteorizada	2B	Roca blanda a dura
Zona III	3	Roca fresca

Por encontrarse la zona de estudio en una región tropical altamente meteorizada, se hizo uso de la metodología de Deere & Patton (1971), que define tres zonas que a su vez poseen horizontes (Tabla 2).

4. RESULTADOS

Se presenta a continuación los resultados de la identificación de estructuras a nivel geológico, las características geomorfológicas y morfométricas de la zona, por último, se presentan los resultados de las características elegidas para la evaluación de las propiedades del suelo presente en la cuenca del embalse.

4.1. Geología regional

Sobre el embalse y los senderos del parque no se evidencian rasgos de fallas, por tanto, se recurrió al uso de fotografías aéreas y un ortofomosaico alcanzando unos lineamientos que reflejan planos de estratificación y leves trazas de la falla Mistrató. Se encuentran unas secuencias sedimentarias que fueron de interés porque son de las pocas zonas escarpadas y por ende se tomaron buzamientos que presenta la estratificación con rumbo N20W - N45W y buzamientos entre 75W–80 W como 60E–70E; para las formaciones afectadas por la traza se encuentran en dirección S-E (ANH & Universidad EAFIT, 2007).

4.2. Geomorfología e hidrología

La identificación de las unidades geomorfológicas partió del conocimiento de estructuras encontradas en la identificación geológica, se determinaron índices geomorfológicos e hidrológicos que muestren sus dimensiones y relacionen las características geológicas (Marini & Piccolo, 2005).

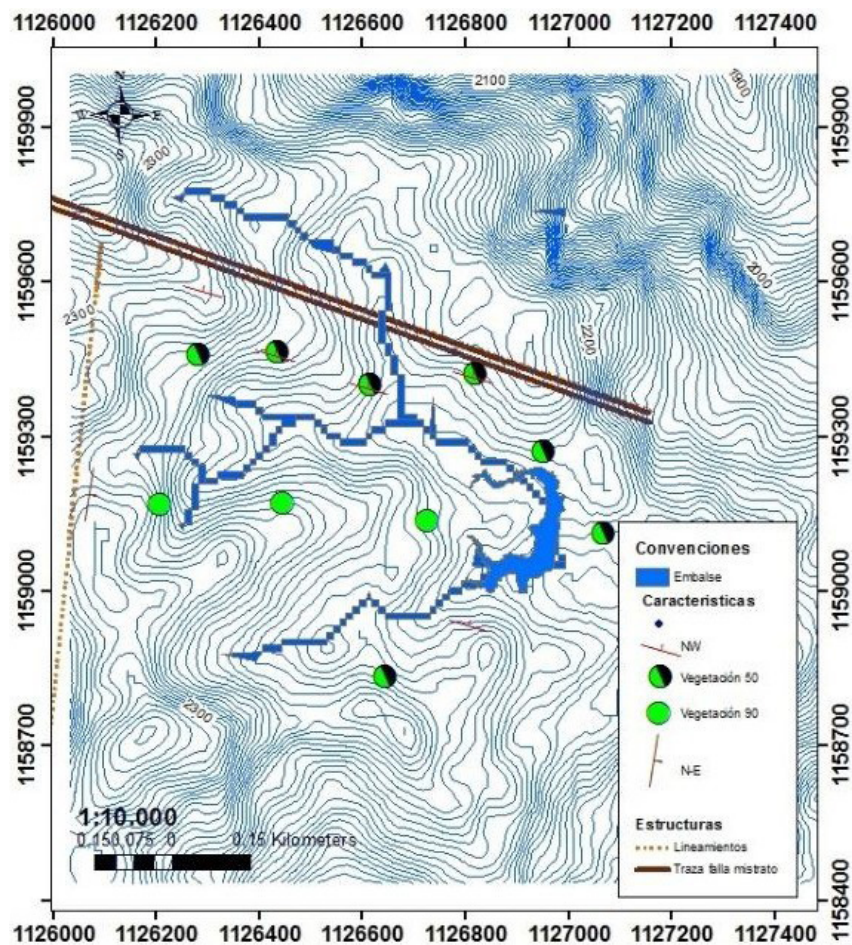


Figura 6: Carta hidrogeomorfológica. Fuente: Elaboración propia a partir de archivos vector de los municipios del suroeste (Corantioquia, 2012).

En la Figura 6 se presenta la carta hidrogeomorfológica donde se muestran la ubicación de los lineamientos, la traza de la falla Mistrató con su dirección, los drenajes permanentes e intermitentes, así como la breve identificación de la dirección de los cauces y la disposición de vegetación. Es de destacar que se muestran las zonas por vegetación en verde completo, las zonas con más de un 90% de vegetación y las de mitad negro con del 60-50% de vegetación. También se demarcan los lineamientos más notorios en el parque y la traza de la falla Mistrató.

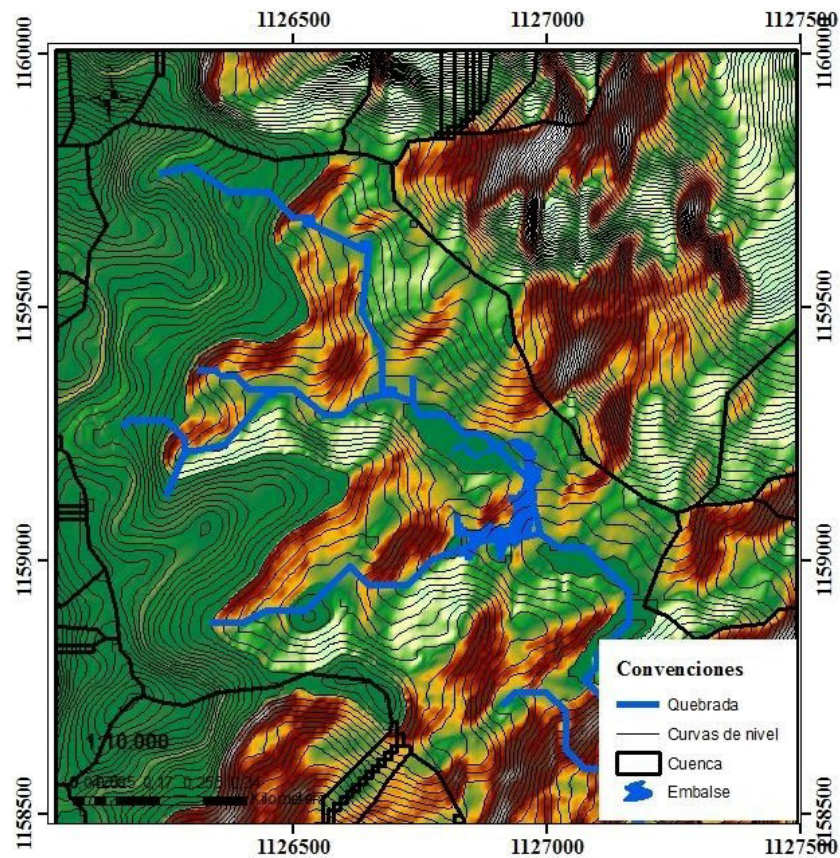


Figura 7: Delimitación de la cuenca. Fuente: Elaboración propia a partir de archivos vector de los municipios del suroeste (Corantioquia, 2012).

A partir del reconocimiento geológico y geomorfológico se procedió a elaborar un mapa de la cuenca demarcando el perímetro de la cuenca básica, con los respectivos drenajes sobre un sombreado para reconocer las zonas de mayor pendiente. En la Figura 7 se muestran la ubicación de los lineamientos de la cuenca, los drenajes permanentes e intermitentes, así como la ubicación de las curvas de nivel y las zonas de mayor pendiente.

4.2.1. Características hidrogeológicas, estructurales y geomorfológicas

Las caracterizaciones de las unidades geomorfológicas del parque llevaron al análisis regional para tener una pauta por ser un espacio tan pequeño a nivel cartográfico. La Unidad Geomorfológica las Ánimas, descrita por Herrera & Toro (2000), comprende la zona centro occidental del municipio de Concordia, incluyendo la cuenca tributaria al embalse la Nitrera. Aunque en la unidad las Ánimas se encuentran laderas con longitudes extensas que conllevan a filos largos que varían de agudos a planos, en la cuenca del embalse la Nitrera; se observaron pendientes moderadas con filos cortos en la cuenca de la quebrada Santa Mónica, mientras que en la cuenca de la quebrada la Nitrera las pendientes son más pronunciadas y rectas debido a la presencia de la traza de la falla Mistrató que obliga a un cambio de dirección brusco pasando de Oeste-Este a Sureste. En el Parque Natural se encuentran tres tipos de unidades geomorfológicas (Figura 8). Se debe hacer énfasis en que la inclinación de la pendiente de cada quebrada del embalse es de diferente tipo, por tanto el tipo de filo también cambia (Másmela, 2010). En la Figura 9 se puede observar los filos que se mencionan anteriormente.



Figura 8: Unidades geomorfológicas. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Índices geomorfológicos

Los índices geomorfológicos fueron seleccionados como punto de partida para hacer una descripción física de la cuenca, por tanto los parámetros morfométricos fueron la base, para así tener referencia de la magnitud de la zona de trabajo. Además de lo antes mencionado se asociaron parámetros de altimetría y la pendiente del cauce. En la Tabla 3 se reportan los parámetros calculados, con sus respectivas unidades y la magnitud

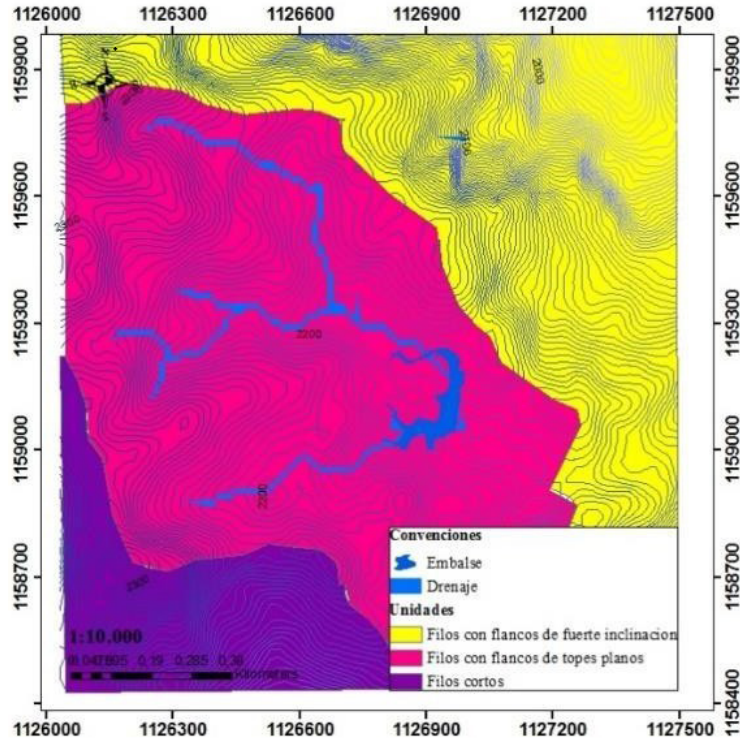


Figura 9: Mapa unidades geomorfológicas. Fuente: Elaboración propia.

correspondiente.

Dentro de los parámetros calculados el de mayor interés es el análisis de la pendiente media del cauce que está en una categoría moderada, pero al presentarse depósitos sobre la cuenca que son almacenadores temporales de agua generan sobrepeso que pueden dar paso a procesos de remoción en masa, como se verá más adelante en la evaluación del suelo se tienen zonas sedimentarias con vetas de arcilla hinchable además que según los resultados de compresión inconfiada muestran que para eventos donde el suelo supere su capacidad de saturación sumada a la pendiente podría generar movimientos sobre los cauces de las quebradas. En la Figura 10 se evidencia que las pendientes entre bajas y moderadas predominan en la quebrada Santa Mónica, pero en quebrada La Nitrera las pendientes altas se encuentran en mayor proporción.

Para evaluar la forma de la cuenca se recurrió a índices adimensionales como el de Horton que relaciona el área y la longitud de la cuenca. Para este caso el resultado de 0.45 indica que la cuenca está en un punto intermedio, por ende no es alargada pero tampoco es circular a pesar de estar embalsada, según la definición de Horton es una cuenca en forma de cuadrado con salida en un vértice. El índice de gravelius es mayor a 1 y valores más altos indican cuencas más alargadas e hidrogramas más achatados; el resultado en este caso es de 1.18 lo que indica que la forma de la cuenca es un 18% más alargada hacia un lado, tomando una circunferencia como referencia. Para una densidad de drenaje 0.31 es una cuenca resistente a la erosión, con

Tabla 3: Resultados índices geomorfológicos. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro		Unidad	Magnitud
Temperatura promedio		°C	17
Área embalse		m ²	13952
Precipitación media		(mm/año)	2223
Evapotranspiración		(mm/año)	1.15
Longitud de la cuenca		m	4465
Longitud cauce principal		m	1618
Elevación media (msnm)		m	2200
Elevación máxima (msnm)		m	2250
Pendiente media del cauce		%	20
Área cuenca		m ²	1158305
Perímetro		m	2014
Factor Horton		Adimensional	0.45
Índice de Gravelius		Adimensional	1.18
Relación de longitudes		Adimensional	1.21
Densidad de drenaje		Km/km ²	0.31
Tiempo de concentración	USDA	min	20
	Bransby-Williams	hr	0.20
	Kirpich	min	18

pendientes en escalón y muy permeable refiriéndose al nivel de infiltración y escorrentía, pero su capacidad de drenaje es regular; esto se debe que al tener pendientes moderadas y una alta presencia de vegetación la respuesta de la cuenca ante una precipitación alta va a ser más lenta en lo referente al drenaje. En la Figura 11 se muestra el orden de los cauces encontrados; entre más alto es el orden de la cuenca indica un drenaje más eficiente para el desalojo del agua (Hinds *et al.*, 2013); esto corresponde con lo encontrado para la densidad del drenaje, puesto que al poseer una red de drenaje limitada, la evacuación, en caso de una alta precipitación, es muy pobre.

4.3. Suelo

Con el programa ArcGIS se localizaron los puntos escogidos, a continuación se reportan los resultados obtenidos para cada una de las propiedades evaluadas. La evaluación de estas propiedades se hizo con el fin de conocer las características del suelo sobre el embalse y sus afluentes.

4.3.1. Análisis granulométrico

Las muestras fueron recolectadas y analizadas para el periodo del segundo semestre de 2015 hasta primer semestre de 2017, periodo en el que se encontró la sequía extrema de principios de 2016. La distribución espacial del grano se hizo a partir del tamaño medio de grano (D50) (I.N.V.E-123, 2013), a partir de las curvas de distribución granulométrica, para el grado de selección se tomó el índice de selección basado en

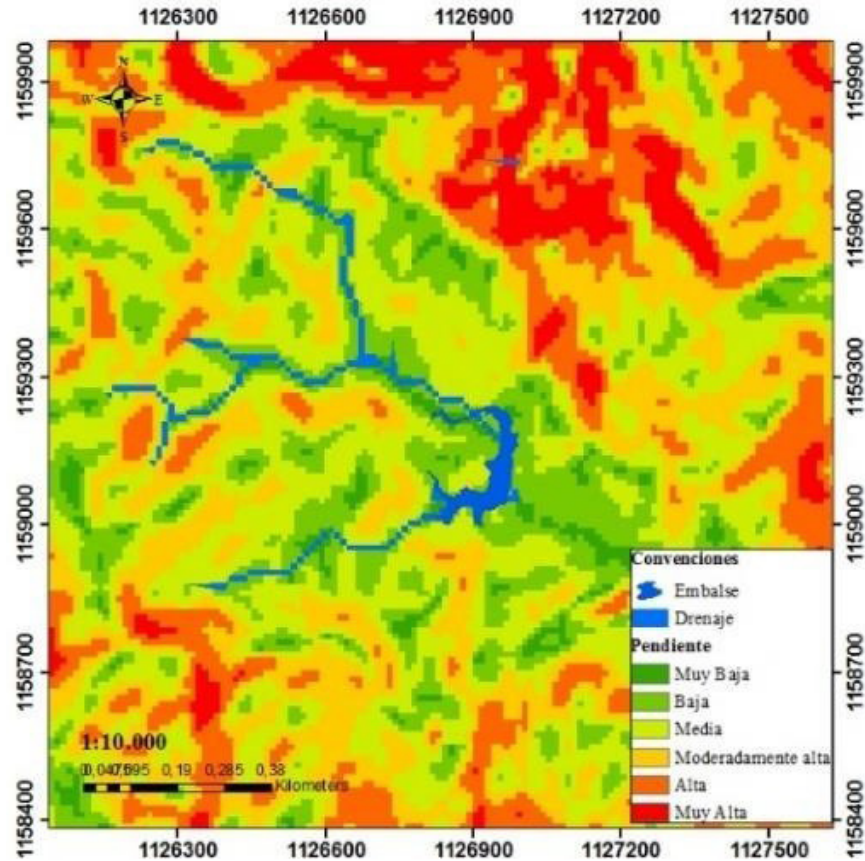


Figura 10: Tipo de pendiente. Fuente: Elaboración propia.

los percentiles respaldado en la asimetría de las partículas.

La distribución de las partículas por tamaño de grano muestra que como tamaño predominante el de arena media y en la zona cercana al embalse predominan estas mismas con algo de intrusión de finos con poca consolidación, hacia la zona N-W del Parque Natural se encuentran tamaños de gravas asociados a los depósitos coluviales observados en el trabajo de campo. La presencia de arena gruesa es bastante amplia para el percentil 50 y esto es algo que no se esperaba, puesto que algunas muestras fueron pocas la presencia general. La poca presencia de limos y arcillas para el percentil 50 corrobora la presencia de estos como bandeamientos intercalados y no como dominadores como se pensó desde el trabajo de campo. Para el caso de esta investigación el índice de clasificación presenta moderadamente bien clasificado lo que indica un grado de homogeneidad aceptable entre las partículas. Para las zonas cercanas del embalse y de las cuencas por las zonas laterales están moderadamente bien clasificadas, lo que puede ser asociado a que la gran mayoría de las partículas de esta zona pertenecen al tamaño de grano de arena media. Para la parte central del Parque Natural hasta la zona del embalse haciendo un recorrido oeste-este se puede evidenciar que hay una mala clasificación, lo que es muestra de la heterogeneidad de las muestras recolectadas en la zona con alta presencia de

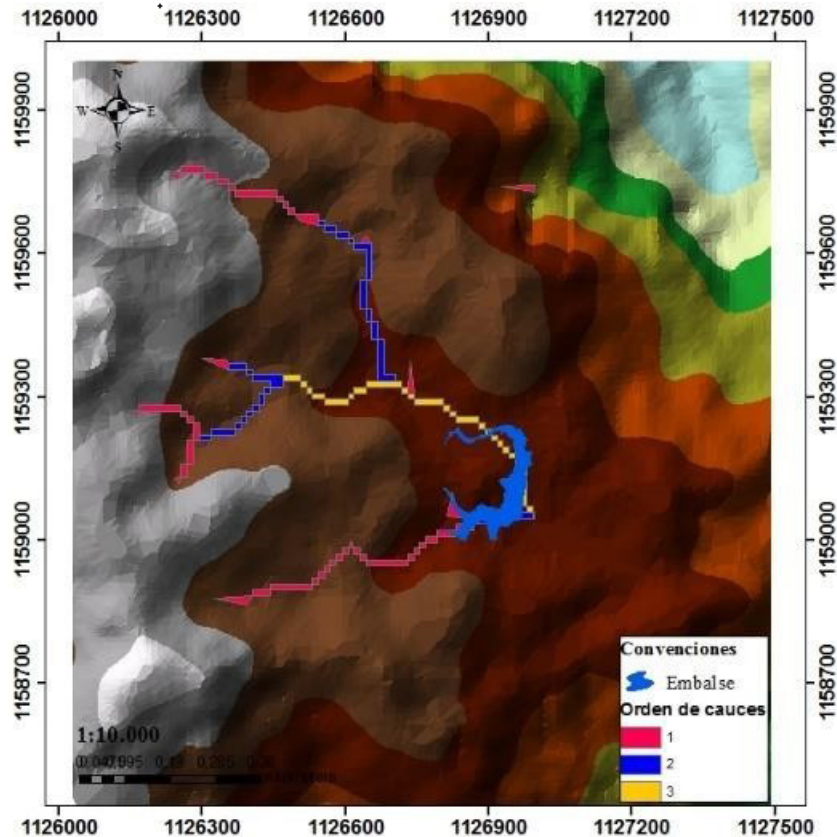


Figura 11: Orden de los cauces. Fuente: Elaboración propia a partir de archivos vector de los Municipios del Suroeste (Corantioquia, 2012).

gravas y arenas muy gruesas.

Dentro del tamizaje de las muestras se vieron partículas desde tamaño grava hasta finos, y más del 50% fue retenido por el tamiz 200 y se presentó una cantidad de finos menor de 5%, en todas las estaciones y para estaciones como la 9 se retuvo 40% en tamiz 4 (tamaño grava). Estas características son fundamentales no solo para entender la distribución del tamaño de partícula sino para poder hacer una mejor interpretación de la clasificación del suelo. Para hacer esta clasificación se calcularon tanto los coeficientes de uniformidad (cu) coeficiente de curvatura (cc) (ASTM, 2006) obteniendo valores menores de 1 para cc y valores de cu mayores a uno para el 80% de las estaciones. Por tanto se encontró tres tipos de grupos de suelo según la clasificación UCSC en mayor proporción arenas bien graduadas con grava y baja cantidad de finos (SW, Well graded Sand), esto para la zona N-W, para la parte central en medio de las 2 quebradas se tiene un suelo de tipo de arenas mal graduadas con gravas y finos (SP, Poorly graded Sand), y para la parte más cercana al embalse se encuentra en el grupo de Arenas arcillosas, mezcla mal graduada de arenas o arcillas (SM, Silty Sand).

4.3.2. Límites líquido y plástico

Si se ve en retrospectiva es claro que para la clasificación USCS (ASTM, 2006) se tiene que el suelo tiene altas características de arena, sin embargo, se decidió hacer la evaluación por lo encontrado en campo, como más adelante se verá en la Tabla 4 el compilado de los 5 rangos de resultados que se presentaron dentro de las muestras analizadas, los resultados para el límite líquido no son bajos, hay incluso resultados por encima del 70 %, razón por la cual se reportó esta prueba y será tema en la discusión de este trabajo de investigación.

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico.

Tabla 4: Resultados límites líquido y plástico. Fuente: Elaboración propia.

Rango	Límite líquido:	Límite plástico	Índice de plasticidad	Contenido de humedad
1	49-51 %	45-47 %	4-5 %	30-35 %
2	51-53 %	42-43 %	9-10 %	15-20 %
3	53-54 %	40-41 %	10-11 %	25-30 %
4	61-63 %	45-45 %	16-17 %	20-25 %
5	72-74 %	62-65 %	8-9 %	35-40 %

El reporte de estos datos de límites se muestra la disposición de estos valores dentro de la zona de estudio, es importante hacer énfasis que a pesar de resultados anteriores son de suelo arenoso, se encuentra que el menor valor de límite líquido es de 49 %, que si es un valor significativo para el análisis con la clasificación de Atterberg. A partir de los resultados obtenidos y considerando el índice de plasticidad (I.N.V.E-123, 2013), para el límite líquido tener porcentajes por encima del 50 % en todas las zonas indica la presencia de contenido de arcilla entre el grano predominante arena o limo, por otro lado el índice de plasticidad da una pista muy importante para la clasificación del suelo, teniendo todos un IP debajo de 10 nos indica presencia de algunas trazas o poca arcilla, lo que indica una baja plasticidad, mientras que para la zona con índice mayor a 10 % presenta una plasticidad media y es el suelo considerado franco arcilloso.

4.3.3. Colorimetría

Por encontrarse una gran cantidad de hojarasca y capa vegetal (30-40 cm) sobre la zona se decidió aplicar la prueba de colorimetría para tener el parámetro de componentes orgánicos posiblemente perjudiciales que intervendrían en la escorrentía y en la calidad del suelo cercano al embalse. En la Tabla 5 se reportan los datos obtenidos en la prueba, en la metodología se da en detalle el procedimiento de la norma INVIAS 212.

Los resultados están dados de una escala de 1-5 en la Tabla de colorimétrica teniendo a 5 como el de mayor

contenido orgánico perjudicial, a partir de esto se encontró que dentro del total de las muestras se enmarcaron 5 zonas bien definidas. Para el rango 1c se encontró que el contenido de materia orgánica es estándar (3), lo que quiere decir que la zona no se encuentra alterada y que cumple con el mínimo de condiciones para un suelo sin contenidos perjudiciales. El rango 2c presenta baja cantidad de contenido orgánico lo que indica que las muestras de esta zona están poco alteradas por la capa vegetal que hay sobre esta. Los rangos 3c y 4c contienen un alto contenido de fragmentos orgánicos posiblemente perjudiciales que deben ser evaluados bajo otros parámetros para verificar lo concluido bajo esta prueba.

Tabla 5: Colorimetría Parque Natural la Nitrera. Fuente: Elaboración propia.

Rangos	Color	Descripción
1c	3	Zona con cantidad baja de materia orgánica.
2c	2	Zona con cantidad baja de materia orgánica, muestra clara sobre el cauce de la nitrera.
3c	4	Zona con cantidad alta de materia orgánica.
4c	5	Zona con cantidad alta de materia orgánica suelo contaminado.

4.3.4. Compresión inconfiada

La prueba se desarrolló bajo la norma INVIAS 152 (I.N.V.E-152, 2008). La muestra fue adquirida sin confinamiento lateral, dados los problemas de estabilidad que tienen las paredes cercanas tanto en cauce de las cuencas como del embalse en las temporadas de sequía. Como lo define la norma utilizada los resultados arrojados por la prensa deber ser representados en una gráfica que muestre tanto la deformación como la carga, como hubo un análisis de cinco muestras sobre las cinco estaciones más cercanas al embalse se tomó un promedio para cada una de las 16 lecturas dadas por la prensa y así obtener el resultado Figura 12.

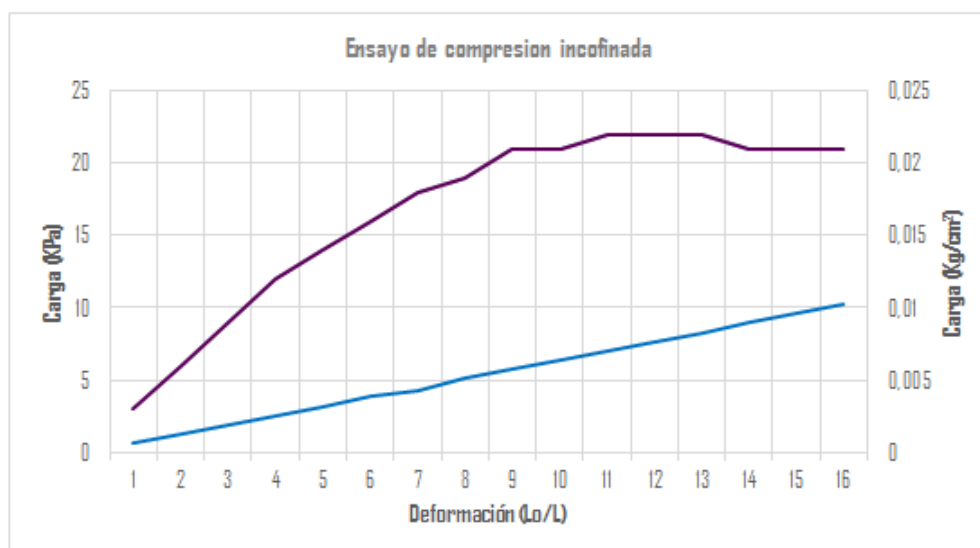


Figura 12: Ensayo compresión inconfiada. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la aplicación de la prueba de compresión inconfiada muestra que el pico de carga es de 21 kPa y este resultado entra dentro del intervalo de consistencia de suelo muy blanda. Estos parámetros dan una pauta del comportamiento del suelo cuando se ve expuesto a un esfuerzo, teniendo una razón de cambio longitudinal del 7%, para cuando hay un esfuerzo de 0.010 kg/cm².

4.4. Toposecuencia o catena

Como se hizo mención, la formación Barroso y el miembro Urrao de la formación Penderisco son las unidades formadoras del suelo que se encuentra en el Parque Natural la Nitrrera; con el uso de bibliografía regional y con trabajo de campo buscando perfiles se determinó las características del suelo de la zona. Para llevar a cabo los perfiles de se utilizó la clasificación de Deere & Patton (1971) para regiones tropicales. En la Tabla 6 se hace la descripción por zonas para cada perfil.

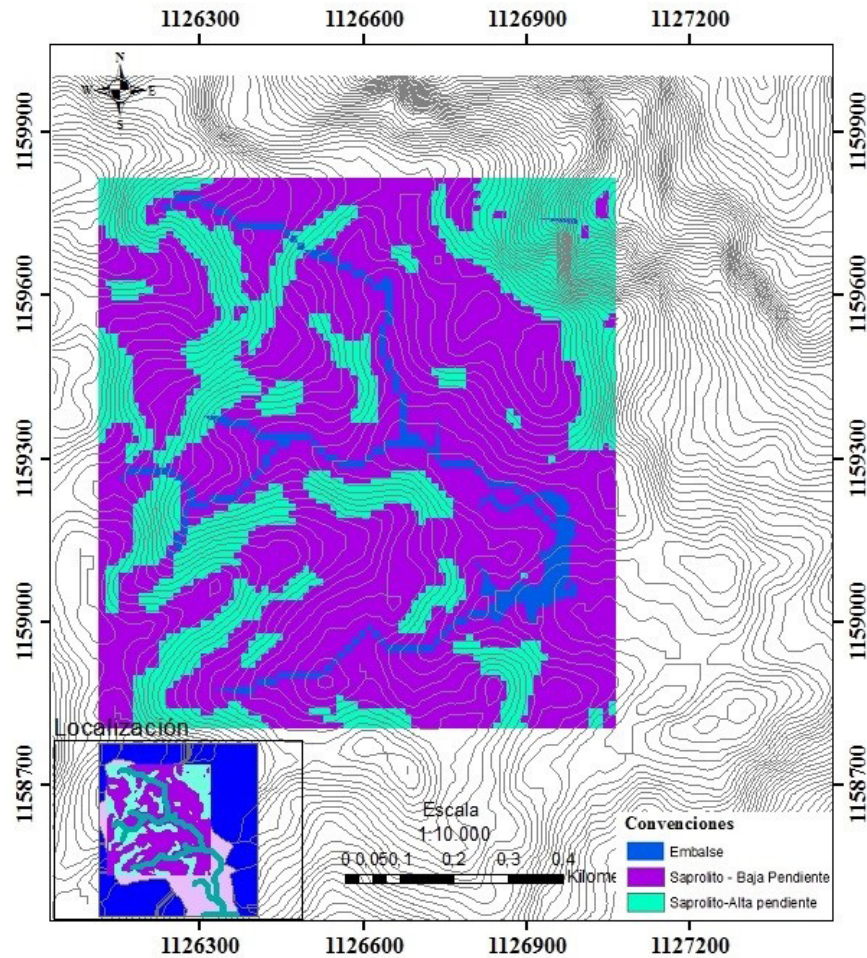


Figura 13: Suelo residual y tipo de pendiente. Fuente: Elaboración propia.

Para las zonas IA de todos los perfiles no superan los 30 cm de espesor, en cuanto a los demás horizontes

de la zona I se tienen dimensiones que no superan los 50 cm y posteriormente se encuentra la roca madre, que en gran parte del Parque Natural es difícil de ver, pero en los sitios identificados se encuentra altamente fracturada. Debido a la cantidad de vegetación y de que muchos de estos perfiles estaban en zonas con baja visibilidad las fotografías no son claras y por tanto basándose en los datos de campo se hace la caracterización. La parte de mayor importancia para este estudio era encontrar el saprolito o suelo residual y así relacionarlo con las magnitudes de erosión mencionadas en el primer capítulo. Relacionar estas variables daría una pauta mayor en lo referente a la gestión del embalse y su problemática de desabastecimiento. Como se ha venido desarrollando a lo largo de este trabajo también se mencionó que entre los índices geomorfológicos el de mayor interés era la pendiente sobre el territorio.

Tabla 6: Descripción perfiles de toposecuencia. Fuente: Elaboración propia.

Perfil	S1	S2	S3	S4	
Zona I	1A	De poco espesor debido a las altas pendientes. Café oscuro.	Materia orgánica de poco espesor, café.	Materia orgánica de color negro a pardo oscuro.	Materia orgánica de color negro a pardo oscuro.
	1B	Presencia de gravaucas grisáceas en matriz amarilla-naranja.	Residual de color rojo alta presencia de arcillas y poco compactado.	Compuesto por material fino color amarillo pardo.	Material amarillo verdoso, presencia de bandas de arcillas.
	1C	Material de color amarillo rojizo, areno-limoso.	Material limo arenoso color rojizo-naranja.	Saprolito con material limo-arcilloso, color amarillo rojizo.	Matriz de color amarillo claro, finogranular.
Zona II: Roca meteorizada	Matriz limo-arenosa color verde-pardo. Fracturada.	Con propiedades aún de la roca madre, material de transición.	Bloques de color gris, matriz arcillo-arenosa. Presencia de bloques a mayor profundidad.	Nivel de transición con propiedades de roca madre y en la parte superior de saprolito.	
Zona III: Roca fresca	Bastante fracturadas detríticas finogranulares y químicas en menor proporción.	Fracturada en alto grado de color rojizo-amarillento.	Alto grado de fracturamiento, con color gris verdoso y textura afanítica.	Altamente fracturada, color amarillo verdoso textura afanítica.	

En la Figura 13 se presenta un mapa que relaciona suelo residual con pendientes mayores a 25%. La colocación azul muestra las zonas donde las pendientes además de altas son zonas que presentan mayor suelo residual, viendo esta dinámica se podría asociar estas variables a los movimientos en masa que se han presentado y en las zonas más cercanas al cause los problemas por erosión. En este mismo mapa se muestra

una localización que muestra la ubicación exacta de este análisis sobre la cuenca. Es de notar que en las zonas más altas del parque se podrían presentar movimientos que obstaculicen la llegada de agua a la zona embalsada.

5. DISCUSIÓN

La determinación del direccionamiento en los lineamientos del Parque Natural la Nitrera muestran una fuerte tendencia a la dirección N-W, se ven modificados por estructuras regionales como la falla Mistrato. La consecuencia puntual de los movimientos regionales conlleva a que el cambio de dirección modifique la ubicación de los bloques y la pendiente que en este momento determinan el marco de los cauces que proveen al embalse. Los índices elegidos para determinar la forma de la cuenca son bastante usados pero sus clasificaciones no son exactas por hacer énfasis en la proximidad de las cuencas a la forma de una circunferencia, por lo tanto surge la opción de integrar otras metodologías como se hizo en esta investigación o encontrar otra clasificación. La elección de los parámetros para evaluar la cuenca fue determinada desde varios aspectos; como primera medida de la información complementaria que se disponía y segundo, del interés particular por la gestión del embalse. Con base en el análisis hidrológico, es evidente que la cuenca está en su época de maduración, esto relacionado con su tipo de drenaje relacionado con los controles tectónicos o litológicos.

El análisis de las propiedades del suelo aporta un conocimiento más detallado sobre la zona y sobre su comportamiento futuro. Dentro del total de las muestras recolectadas siempre se halló presente tamaño medio de arena, también arcilla en todas las zonas aunque en menor proporción. En el trabajo de campo por medio de una revisión visual se encontró que la depositación de sedimentos en el embalse no se hace de manera homogénea sobre toda la superficie. Los primeros depósitos y más visibles se hacen en la entrada del embalse, esto debido a que se genera un cambio muy brusco en la velocidad del flujo por el cambio de vegetación. En esta investigación se recurrió a una serie de pruebas que dieran pautas para entender esta problemática, encontrando que se tiene comportamiento de plasticidad media en un suelo que es considerado franco arcilloso y baja para el resto, evidenciando como la presencia de arcillas determina en comportamiento plástico. Con este análisis, surge la incógnita de que otra pauta se debería evaluar en un suelo con estas características y bajo qué circunstancias su plasticidad llegaría al límite, la compresión inconfina es tomada como referencia mostrando que bajo cargas mayores a 21kPa se puede ver una caída. Estos análisis son considerados en base a la gestión del embalse y bajo qué parámetros se deberían trabajar para el mantenimiento del embalse.

La consecución de la toposecuencia se convierte en un proceso complejo cuando se encuentra una zona con tanta vegetación, pero a la vez es de suma importancia evaluar cómo se presenta la depositación de los horizontes y en lo posible hacer una cuantificación de sus espesores. La toposecuencia de la zona muestra, que las características que se presentan en los perfiles son similares para los distintos horizontes. La capa de materia orgánica es en promedio de 30 cm, es una de las características que llama la atención, surge la idea

de cómo debe ser tratado y hasta que punto este sobrepeso o su degradación afecta la gestión del embalse. Otra de las características que marcan pauta es que la roca madre está altamente fracturada, por la litología encontrada además de caracterizarla que evaluaciones se deberían realizar, son preguntas que surgen y que dan paso a nuevas temáticas de investigación sobre el embalse.

6. CONCLUSIÓN

El Parque Natural la Nitrera se encuentra ubicado sobre el Miembro Urrao de la formación Penderisco con depósitos poco consolidados, cuenta con una matriz de roca altamente fracturada sedimentaria con algunos lentes de depósitos marinos. La traza de la falla Mistrató marca la foliación y la dirección de las estructuras de las quebradas. Las unidades geomorfológicas que se identifican son de 3 tipos de filos, de topes planos, cortos y de fuerte inclinación, que son los encargados de definir el valle de drenaje. Las fuertes pendientes del cauce (>25%), indican que esta zona está sometida a amenazas de origen natural, aumentando la susceptibilidad de determinados materiales a generar procesos erosivos y de remoción en masa.

Las condiciones geomorfológicas del Parque Natural La Nitrera ponen en peligro la permanencia y la vida útil del embalse a futuro, deben ser evaluadas constantemente en especial las estructuras afectadas por la traza de falla Mistrató. Por otro lado, la evaluación de la morfometría evidencia que la cuenca y el embalse que son los encargados de proveer el recurso hídrico al municipio, son de dimensiones muy pequeñas y que es de suma importancia evaluar los cauces intermitentes y gestionar la posibilidad de volverlos permanentes. En la caracterización del suelo si se evidencian problemas que a corto plazo podrían generar más dificultades de abastecimiento que las que ya se presentan en los periodos de sequía, no solo por efectos de déficit en el recurso sino por la características que se evidenciaron: un suelo muy blando cuando es expuesto a la carga, la variabilidad entre plasticidad y la regular clasificación del tamaño de grano, todas ellas van a generar movimientos en las paredes del embalse y la acumulación de estos cambian la velocidad del cauce, generando problemas de acumulación de depósitos y disminuyendo la capacidad de almacenamiento.

7. RECOMENDACIONES

Debido a los procesos superficiales que se evidenciaron en el trabajo de campo y a las pruebas básicas que se realizaron para conocer la dureza y estabilidad del suelo, se considera adecuado un análisis más a fondo de estos parámetros con la intención de proteger el embalse y los senderos del Parque.

Se debe analizar si es necesario propiciar de forma controlada la caída de bloques o de estructuras en las zonas de mayor pendiente, que a futuro puedan generar amenaza alta para los visitantes del Parque Natural la Nitrera o que perjudiquen los cauces que proveen el embalse.

En las zonas que presentan cicatrices de antiguos deslizamientos es necesario identificar un protocolo que

sin alterar el principio fundamental del parque como reserva ecológica, sea protegido para evitar nuevos deslizamientos que ya se han vivenciado en la zona.

Para el tratamiento de los procesos gravitacionales y de masas, que no requieren soluciones costosas se puede considerar el uso de plantas tipo arbusto que no generen mucho sobrepeso sobre los muros, pero que sus raíces sean lo suficientemente largas para amarrar el terreno.

Se deben hacer análisis a mayor profundidad del suelo que rodea el cauce Santa Mónica que presenta una alta presencia de materia orgánica posiblemente perjudicial, ya que por efectos de escorrentía estos resultados podrían resultar alarmantes para el suministro de agua a la población del municipio.

Referencias

- Acuatioquia. (1996). *Diseño de la presa de regulación. Informe final de diseño acueducto de Concordia*. Integral Ingenieros consultores.
- Alcaldía de Concordia. (2015). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Alcaldía de Concordia Sistema de documentación e información Municipal. Recuperado de http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/C/concordia_-_antioquia_-_eot_-_2001/concordia_-_antioquia_-_eot_-_2001.asp
- ANH & Universidad EAFIT. (2007). *Evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica de la cuenca Atrato y cuenca San Juan*. Medellín: Agencia Nacional de Hidrocarburos. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/GEOLOGIA,%20GEOFISICA%20Y%20GEOQUIMICA%20CHOCO%2008.pdf>
- ASTM D2487-11 (2006). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-11>
- Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia. (2015). *Perfil socioeconómico de la subregión de Occidente*. Antioquia, Colombia: Cámara de Comercio de Medellín. Recuperado de http://www.camaramedellin.com.co/site/Portals/0/Documentos/2017/Publicaciones regionales/15-3Perfil Occidente_Oct14.pdf.
- Cárdenas, J. I. & Restrepo, C. (2006). Patrimonio geológico y patrimonio minero de la cuenca carbonífera del suroeste antioqueño, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (18), 91–102.
- Carvajal, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá, Colombia: Servicio geológico colombiano. Recuperado de

<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Propuesta%20de%20estandarizaci%C3%B3n.PDF>

Corantioquia. (2012). Actua, Plan de Acción 2012-2015. Administración Integral del Patrimonio Ambiental. Recuperado de http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/SiteAssets/Lists/AdministrarContenidos/AllItems/Plan_De_Accion_Corantioquia_2012-2015.pdf

Deere, D. & Patton, F. (1971). *Slope stability in residual soils*. In Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineers.

FAO. (2007). *Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible*. Recuperado de http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/cp/introduction.pdf

Flores, D. G.; Suvires, G. M. & Dalmasso, A. (2015). El análisis geomorfológico como base para el estudio de la vegetación nativa: Sierra Chica de Zonda, Precordillera Oriental de Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(2), 427–444. <https://doi.org/10.18172/cig.2710>

Gobernación de Antioquia. (2015). *Anuario Estadístico de Antioquia 2014*. Antioquia, Colombia: Gobernación de Antioquia. Recuperado de <http://antioquia.gov.co/planeacion/anuario2014/anuario-estadistico-de-antioquia-2014.html>

Gonzalez, F. & Soto, V. (2010). *Estudio áreas de riesgo geomorfológico de la zona urbana y de expansión de la comuna de san antonio, V región*. Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100669>

Hernani, A. & Ramírez, J. J. (2002). Aspectos morfométricos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: represa La Fe, El Retiro, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 26, 511–518.

Herrera, J. & Toro, M. I. (2000). *Lineamientos de la dimension fisica para el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Concordia, Antioquia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Hinds, A.; Legler, B.; Cravens, G.; Cunningham, B.; Distefano, R.; Draper, T. & Rimer, R. (2013). *Watershed inventory and assessment*. Missouri: Universidad de Missouri.

I.N.V.E–121. (2007). *Determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición. I.N.V. E – 121 – 07*. Instituto Nacional de Vías. Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-121-07.pdf

- I.N.V.E-122. (2007). *Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. I.N.V. E - 122 - 07*. Instituto Nacional de Vías. Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-122-07.pdf
- I.N.V.E-123. (2013). *Análisis granulométrico de suelos por tamizado. I.N.V. E - 123 - 07*. Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V.E-125. (2013). *Determinación del límite líquido de los suelos. I.N.V. E - 125 - 07*. Instituto Nacional de Vías. Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/
- I.N.V.E-126. (2007). *Límite plástico e índice de plasticidad de suelos. I.N.V. E - 126 - 07*. Instituto Nacional de Vías. Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/
- I.N.V.E-152. (2008). *Compresión confinada en muestras de suelos I.N.V. E - 152 - 07*. Instituto Nacional de Vías. Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-152-07.pdf
- ICONTEC. (2006). *Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (sistema de clasificación unificada de suelos)*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Recuperado de http://www.icontec.org/Paginas/e_normas.aspx
- ICONTEC. (2008). *Calidad de suelo. Determinación del ph*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Recuperado de http://www.icontec.org/Paginas/e_normas.aspx
- Marini, M. F. & Piccolo, M. C. (2005). Hidrogeomorfología de la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 59-71.
- Másmela, P. (2010). *El paisaje como elemento de la ordenación territorial. Un análisis de paisaje desde su enfoque visual en el borde centro oriental de Medellín, Colombia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín).
- McCauley, A.; Jones, C. & Jacobsen, J. (2005). Basic soil properties. *Soil and Water Management Module*, 1(1), 1-12.
- Patiño, A. G.; Rivera, A. D. J. R.; Acosta, J. H. C.; López, A. A.; Rivillas, J. A. A. & Gallego, J. J. (2011). Estudio geológico-geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (29), 39-54.
- Phillips, J. D. (2016). Landforms as extended composite phenotypes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(1), 16-26.

- Piñeiro, D. A. (2015). *Procesos hidrogeológicos en la cuenca de la quebrada de Tarapacá: análisis de las relaciones sedimentológicas con el abanico aluvial*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Rincón, P. J. & Vegas, R. (2000). Aplicación de índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente en el antepaís Bético. *Geogaceta*, 27, 139–141.
- Rojo, J. (2014). Estudio Topohidráulico e hidrológico sobre el río Altar. Universidad de Sonora. Recuperado de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8417/Capitulo3.pdf>
- Sánchez, J. (2015). *Medir áreas y longitudes*. Salamanca, España: Departamento de Geología. Recuperado de http://hidrologia.usal.es/Complementos/Medir_Areas.pdf
- Universidad de los Andes Venezuela. (2013). Geomorfología de cuencas. Recuperado de <http://ula.ve/ingenieria/oguerre/Geomorfologia.pdf>
- Villaruel, M. (2013). *Determinación de parámetros y características hidrogeomorfológicas de una cuenca*. Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales CLAS. Recuperado de https://www.itc.nl/ilwis/documentation/_pdf/hidromorfologia_sp.pdf