

Efecto del Embalse de Hidrosogamoso Sobre los Reservorios de Petróleo del Cenoico en el
Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena

Jonathan Javier Caicedo Flórez y Ricardo Andrés Arias Márquez

Trabajo de Grado para Optar título de Geólogo

Director:

Mario García González

Doctor en Geología

Codirector:

Tania S. Palmera Henao

Magister en Geología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Este título está dedicado a los seres más especiales, mis padres, mi hermano, mi abuelo y cada una de las personas que hicieron posible la realización de este sueño.

Este nuevo logro académico se dedica a mis padres, a quien les debo la vida y quienes son mi motor para salir adelante, a mi hermano por siempre apoyarme y a todos y cada uno de los michis (Gata, Orión, Tita) que me apoyaron emocionalmente y permanecieron a mi lado en cada madrugada de traspaso académico.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento al profesor Mario García González por compartir la hipótesis que permitió desarrollar este trabajo de investigación y por su dirección hasta la culminación de nuestro proyecto que finaliza nuestra formación como geólogos que constituye una etapa muy importante en nuestra vida profesional.

También expresamos nuestro agradecimiento a la profesora Tania Palmera Henao, codirectora del proyecto por sus importantes aportes, y a los docentes de la Escuela de Geología por compartir sus conocimientos y a mis compañeros de geología por sus aportes durante nuestros estudios.

Finalmente, a la Escuela de Geología y la Universidad Industrial de Santander por su excelencia académica y de formación profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Planteamiento del Problema	11
2. Localización y Marco Geológico.....	12
2.1 Geología Estructural	14
2.2 Estratigrafía.....	14
3. Metodología	17
3.1 Fundamento Teórico	17
3.2 Modelo Conceptual.....	19
4. Discusión y Resultados	21
5. Conclusiones	27
6. Recomendaciones	29
Referencias Bibliográficas	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo de elevación digital (DEM), mostrando el Sinclinal de Nuevo Mundo, tomado y modificado a partir del mapa geológico del cuadrángulo H12 Bucaramanga	13
Figura 2. Corte geológico esquemático A-A´ basado en la sísmica de la parte norte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, destacando las unidades geológicas del Cenozoico.	16
Figura 3. Sección transversal del modelo conceptual con los materiales utilizados, la disposición geológica y condiciones límite necesarias para la ejecución y evaluación del modelo.	20
Figura 4. Ilustra el comportamiento y variaciones de la velocidad a lo largo de la zona permeable de las Formaciones La Lizama y La Paz y la zona de Falla; las flechas negras representan los vectores de velocidad.....	24
Figura 5. Zoom al área de infiltración en cercanías a la Falla La Salina, especificando valores de velocidad y sentido de los vectores.	24
Figura 6. Comportamiento de la presión hidrostática, referenciando tres modelos 1,2 y 3 analizando su variación.	25
Figura 7. Parámetros de carga total asociados a las condiciones límite de aguas arriba y aguas abajo.	26

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de los materiales usados en el modelo conceptual en SEEP/W.	22
Tabla 2. Velocidad en diferentes segmentos de la Formación la Paz a lo largo del SNM.	22

Resumen

Título: Efecto del embalse de Hidrosogamoso sobre los reservorios de petróleo del Cenozoico en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena*

Autor: Jonathan Javier Caicedo Florez** Ricardo Andres Arias Marquez**

Palabras Claves: Modelo Hidrogeológico, flujo de agua, Hidrosogamoso, Lizama 158, Sinclinal Nuevo Mundo.

Descripción

El presente artículo pretende estudiar la posible afectación del embalse de Hidrosogamoso en la reactivación de un filtrado de petróleo en las proximidades del pozo Lizama 158, como consecuencia del evento de sobrepresión registrado en 2018. El corte geológico del Sinclinal Nuevo Mundo permite conocer el contexto estructural y estratigráfico del área de estudio, donde se observa una posible ruta de migración de agua desde el embalse de Hidrosogamoso hacia el flanco occidental del Sinclinal Nuevo Mundo. Se construyen dos modelos para validar esta hipótesis; comenzando por un modelo conceptual que propone la infiltración de las aguas del embalse a través de las formaciones La Paz y Lizama desde el flanco oriental hasta el flanco occidental, donde se encuentra la falla de La Salina. El modelo numérico bidimensional del flujo de agua, descrito anteriormente, fue construido utilizando el software Geostudio SEEP/W, obteniendo los vectores de flujo, la presión hidrostática y la velocidad de infiltración. A partir de estos resultados, se calculó el tiempo de tránsito del agua, desde el lugar de infiltración, en el embalse de Hidrosogamoso, hasta la falla de La Salina, donde se produjo el evento de sobrepresión. Los resultados obtenidos confirman que el llenado de la presa de Hidrosogamoso incrementó el flujo de agua, afectando la capacidad de sellado de la Falla de La Salina, lo que resultó en la migración de un alto volumen de hidrocarburos de formaciones profundas del Cretácico que se encuentran sobrepresionadas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Mario García González. Doctor en Geología. Codirector: Tania S. Palmera Henao. Magister en Geología

Abstract

Title: Effect of the Hidrosogamoso reservoir on the Cenozoic oil reservoirs in the Nuevo Mundo Syncline, Middle Magdalena Basin, Colombia*

Author: Jonathan Javier Caicedo Florez** Ricardo Andres Arias Marquez**

Keywords: Hydrogeological model, water flow, Hidrosogamoso, Lizama 158, Nuevo Mundo Syncline

Description

This article seeks to study the possible effect of the Hidrosogamoso reservoir on the reactivation of an oil seep near the Lizama 158 well, as a result of the overpressure event registered in 2018. The geological section of the Nuevo Mundo Syncline allows us to know the structural and Stratigraphic framework of the study area, where a possible water migration route is observed from the Hidrosogamoso dam to the western flank of the Nuevo Mundo Syncline. Two models are built to validate this hypothesis; starting with a conceptual model that proposes the infiltration of the reservoir waters through the La Paz and Lizama formations from the eastern flank to the western flank, where the La Salina fault is found. The two-dimensional numerical model of the water flow, described above, was built using the Geostudio SEEP/W software, obtaining flow vectors, hydrostatic pressure and the infiltration velocity. From these results, the transit time of the water, was calculated from the infiltration site, in the Hidrosogamoso reservoir, to the La Salina fault, where the overpressure event occurred. The results obtained confirm that the filling of the Hidrosogamoso dam increased the water flow, affecting the sealing capacity of the La Salina Fault, which resulted in the migration of high volume of hydrocarbons from deep Cretaceous formations that are over-pressurized.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology. Director: Mario García González. Doctor in Geology. Co-director: Tania S. Palmera Henao. Magister in Geology

Introducción

El presente trabajo de investigación se realizó en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) una de las principales cuencas productoras de hidrocarburos en Colombia. El Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM) está ubicado dentro de esta cuenca; en su flanco Occidental se encuentra el campo Lizama, el cual presenta yacimientos de hidrocarburos en las Formaciones Colorado, Mugrosa, la Paz y Lizama. La geología estructural y estratigráfica del SNM es determinante para entender y proponer las vías de migración de agua desde el embalse de Hidrosogamoso en el flanco Oriental del SNM hacia el campo Lizama en el flanco Occidental, en donde el flujo de agua subterránea se da a través de los acuíferos y el sistema de Fallas que afectan el SNM. (Royero, J.M., Clavijo, J., 2001).

La configuración estructural y estratigráfica de la cuenca del VMM ha sido estudiada por diversos autores en trabajos previos, tales como Julivert (1961) quien inicialmente planteo la configuración estructural en la cuenca del VMM; trabajos más recientes como los de (Caballero et al. 2010, Sarmiento 2015, Jiménez, et al. 2016 y Cetina, et al. 2019) discuten la relación entre el SNM y la Falla La Salina. Una de las estructuras más representativas y estudiadas es el Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM), a partir del cual se puede determinar la evolución geológica de la CVMM y a su vez la historia de levantamiento de las actuales cordilleras Central y Oriental, (Caballero, et al., 2010).

La hipótesis de incidencia del embalse de Hidrosogamoso en los yacimientos de hidrocarburos en los campos petrolíferos localizados en el SNM, fue presentada a ECOPEPETROL por el profesor Mario García González a raíz del evento de sobrepresión que ocurrió en el año

2018 entre los meses de marzo-abril en el pozo Lizama 158 y en el rezumadero localizado a 250 metros del pozo antes mencionado. El incidente de sobrepresión del pozo Lizama 158 tuvo una duración de 45 días en los cuales se registró un incremento de la presión de flujo en la cabeza de pozo de 50 psi a 600 psi (presión de flujo) así mismo, de manera simultánea se observó la reactivación de un rezumadero en donde se registró un flujo de 3,000 barriles diarios de crudo y 6,000 barriles diarios de agua, además de un importante flujo de gas que no fue cuantificado. Las causas del incidente del 2018 que ocurrió en el pozo Lizama 158, de acuerdo con una comunicación oral de la Vicepresidencia de Operaciones de Ecopetrol en 2019, se inician con labores del sellamiento defectuoso del pozo permitiendo la entrada de crudo del anular al interior del casing, sin embargo, no se ha explicado aun la causa del aumento de presión que presento el pozo Lizama 158 en donde se pasó de una presión de flujo menor a 100 psi a una presión pozo a 600 psi en la cabeza de este.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar y modelar el posible efecto del embalse de Hidrosogamoso sobre los rezumaderos de petróleo asociados a la Falla la Salina en el flanco Occidental del SNM. Este análisis aporta nuevas evidencias en el entendimiento del desastre generado en el pozo Lizama 158. Adicionalmente, se presenta una reinterpretación en la cartografía del área de influencia del pozo antes mencionado.

1. Planteamiento del Problema

A raíz del evento de sobrepresión que generó un rezumadero de crudo en las inmediaciones del pozo Lizama 158 registrado en el año 2018, surge una hipótesis que relaciona dicho evento con el embalse de Hidrosogamoso, el cual al llenarse incremento la columna de agua generando una presión hidrostática adicional sobre el flanco oriental del SNM. El embalse de Hidrosogamoso es responsable de la infiltración y posterior migración de agua en el subsuelo sobre y a lo largo de la Formación La Paz, presente en ambos flancos del SNM, este proceso hidrogeológico afectaría considerablemente el sello natural asociado a la Falla La Salina en el flanco occidental del SNM, causando la remoción de partículas de arcilla y limo que conlleva a la disminución de la capacidad de sello, donde eventualmente resultó en la reactivación de la migración de crudo desde Formaciones profundas que están sobre-presionadas hacia la superficie. Debido a lo anterior, se estudió la cartografía de la zona de interés que permitió relacionar la configuración del SNM con el fenómeno de aparición de rezumaderos en el sector del pozo Lizama 158, para ello se construyó un corte (Figura 1) perpendiculares al rumbo del SNM, dicho corte permitió establecer la presencia y continuidad de la Formación La Paz en los flancos del SNM. Por medio del corte geológico se planteó un modelo hidrogeológico que permite proponer un modelo hidrogeológico en dos dimensiones (2D).

El planteamiento teórico de la infiltración de agua se fundamenta en la ecuación de Darcy, encontrando el volumen del caudal total que atraviesa el medio poroso desde la presa Hidrosogamoso hasta el pozo Lizama 158. La velocidad de infiltración y presión hidrostática son

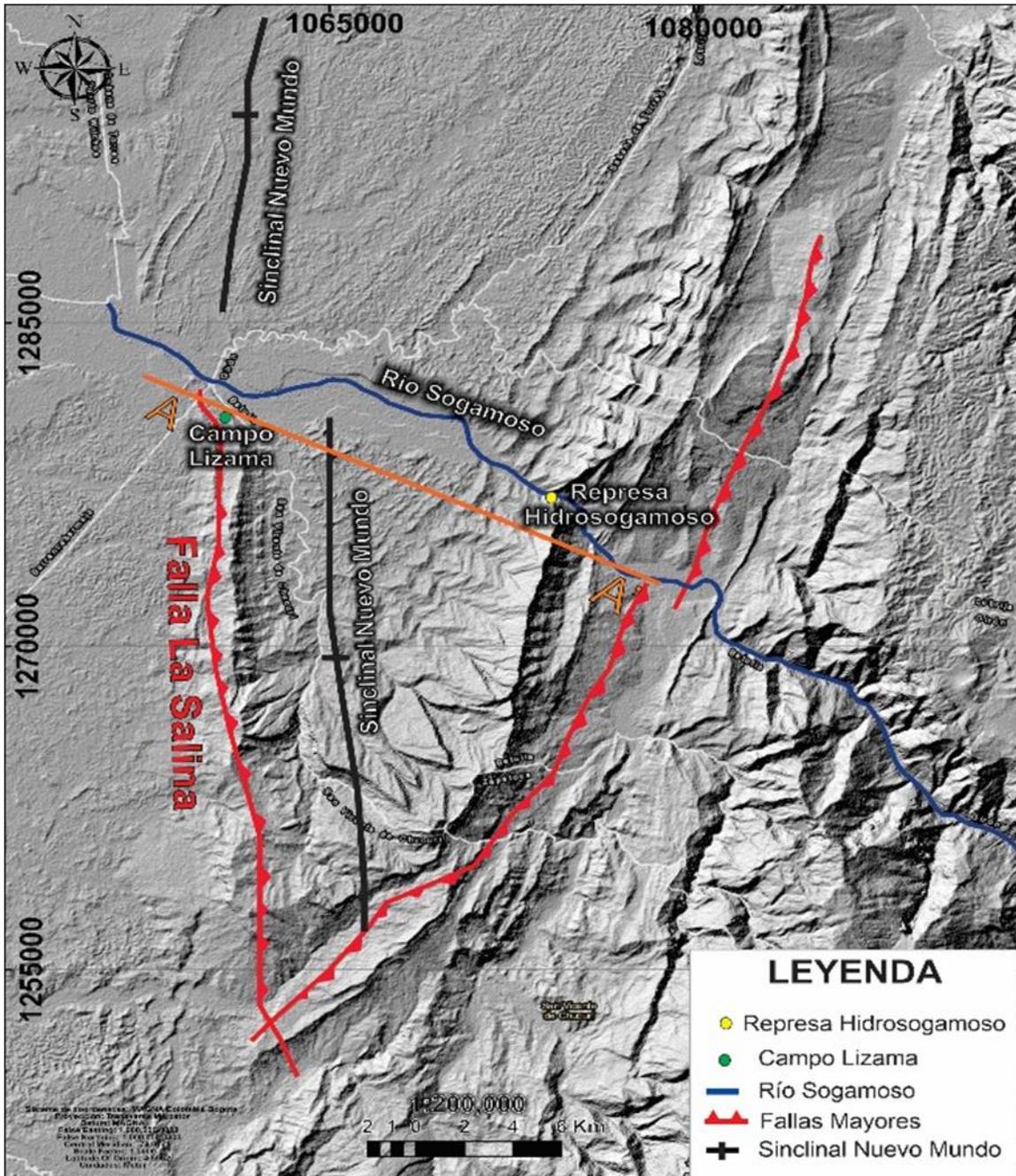
datos esenciales para calcular el modelo Hidrogeológico utilizando el Software GeoStudio Seep/W que genera los vectores de flujo, el caudal en puntos de interés, y la presión intersticial.

2. Localización y Marco Geológico.

El área de estudio se ubica en el SNM, sector nororiente de la CVMM; desde la presa Hidrosogamoso hasta La Lizama, jurisdicción del municipio de Barrancabermeja. La cuenca del VMM se encuentra localizada geomorfológicamente a lo largo de la parte central del valle, cursado por el río Magdalena, entre las cordilleras Oriental y Central de los Andes colombianos, (Caballero, 2010) (Figura 1).

Figura 1.

Modelo de elevación digital (DEM), mostrando el Sinclinal de Nuevo Mundo, tomado y modificado a partir del mapa geológico del cuadrángulo H12 Bucaramanga



Fuente: (Ingeominas, Ward et al., 1977)

2.1 Geología Estructural

La estructura del SNM, está localizado sobre el margen oriental del sector norte de la CVMM; es una estructura de forma elongada con inmersión hacia el norte asociado al cabalgamiento de la Falla la Salina (Caballero 2010); la presencia de estos pliegues se relaciona con el cabalgamiento del sistema de Falla La Salina, el cual presenta una rampa a través de las rocas del Cretácico y un footwall flat en rocas del Cretácico superior, el cual se divide en dos rampas a través de rocas del Paleógeno (Gómez et al., 2005).

Con base en modelos de interpretación sísmica el Anticlinal de Lizama corresponde al bloque colgante de un pliegue por propagación de la Falla asociado con la rampa de cabalgamiento más occidental de La Salina, así el SNM corresponde al bloque colgante del movimiento de la rampa oriental del sistema de Falla La Salina que superpone un plano (“flat”), en el bloque colgante con una rampa en el bloque yacente y corresponde a la rampa más joven del sistema, ya que cruza estratos del Grupo Real y no es plegado por el subyacente Anticlinal de Lizama (Gómez et al., 2005). Según (Gómez et al., 2005), el flanco oriental del SNM hace parte del limbo frontal del Anticlinal de Los Cobardes, plegamiento que es contemporáneo con la depositación de la Formación Mugrosa y Colorado.

2.2 Estratigrafía

Sobre el flanco oriental y occidental del SNM afloran rocas del Cenozoico identificadas como Formación Lizama (Paleoceno) la cual está en contacto discordante con el Grupo Chorro; Formación La Paz y Formación Esmeraldas (Eoceno Medio a Eoceno tardío), supra-yaciendo las

anteriores Formaciones, se encuentra el Grupo Chuspas, conformado por Formaciones Mugrosa y Colorado (Oligoceno – Mioceno temprano) y Grupo Real (Mioceno medio a Plioceno) y Mesa (Plioceno), (Morales, 1958; Córdoba et al., 2001; Gómez et al., 2005).

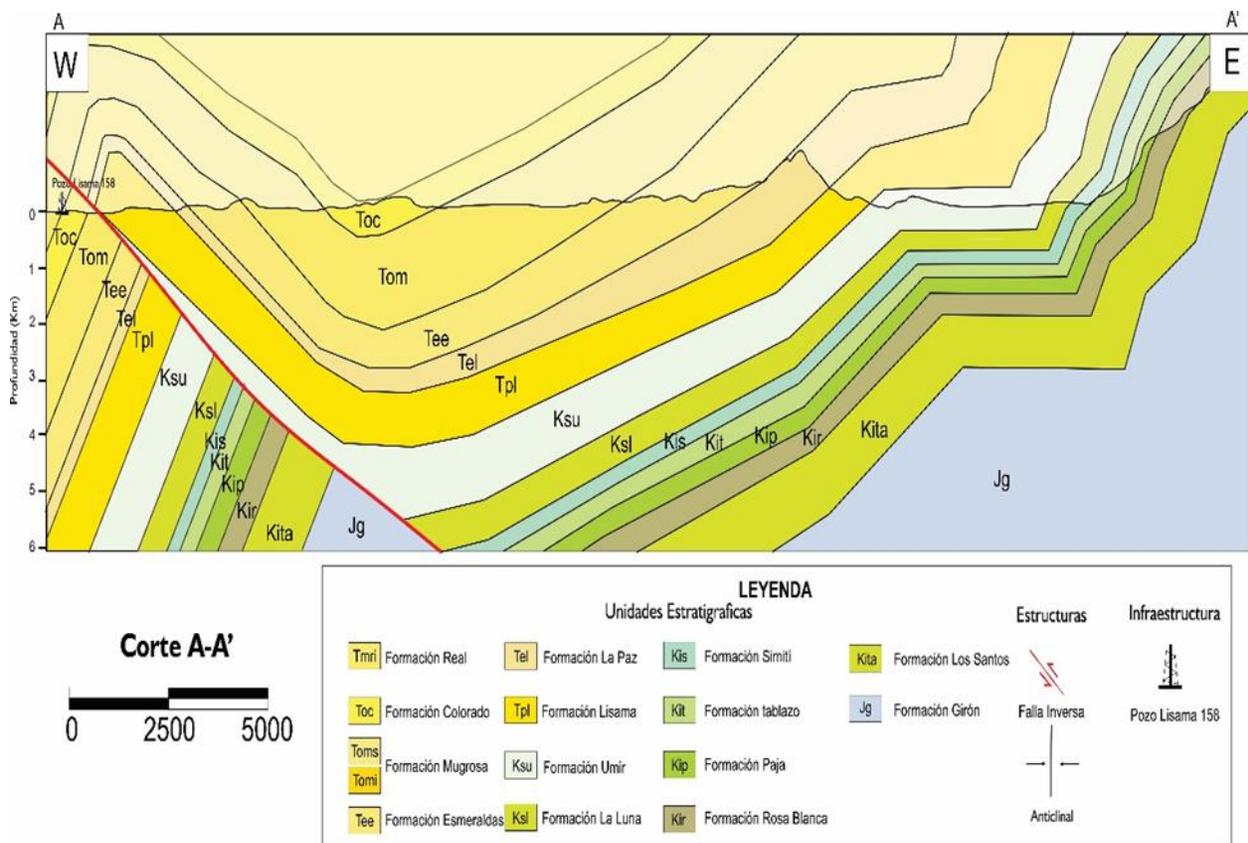
El orden sedimentario de las Formaciones que integran la cuenca del CVMM inicia al final de la primera parte del Mesozoico con ambientes continentales, cambiando a marinos en la segunda parte del mesozoico y finalizando con sedimentos continentales en el Cenozoico (Sarmiento y Rojas, 2001). El resultado de la acreción de la Cordillera Occidental forma un cambio en los ambientes de depósito al comienzo del Cenozoico ya que son las Formaciones de interés en el presente estudio, pasando de sedimentos marinos del Cretácico a secuencias transicionales con composiciones más clásticas del Paleógeno, en una cuenca de tipo foreland pre-Andina de gran dimensión (Cooper et al., 1995). La unidad sedimentaria que registra este cambio paleo-ambiental es la Formación Lizama, del Paleoceno, la cual se extendió hacia la cuenca Cesar Ranchería, antes de la separación de las cuencas por efecto de la Falla de Bucaramanga (Campbell, 1968 en Gómez et al., 2005). La Formación la Paz se deposita durante el Eoceno medio y está compuesta principalmente por capas muy potentes de areniscas que superponen en para-conformidad a la Formación Lizama en el flanco oriental del SNM. Posterior a la Formación la Paz ocurre la acumulación de la Formación Esmeraldas desde el Eoceno tardío al Oligoceno temprano, la Formación Mugrosa desde el Oligoceno tardío y la Formación Colorado en el Mioceno temprano-medio (Gómez et al., 2005). Respecto a los grupos Real y Mesa, el primero se deposita desde el Mioceno medio al Mioceno tardío y el segundo durante el Plioceno (Gómez et al., 2005).

El SNM, por ser una amplia estructura expuesta en superficie, permite apreciar y sustentar los principales cambios tanto en la observación directa de sus componentes, estructuras y de las discontinuidades que marcan los episodios más importantes en la evolución y transformación de

la cuenca durante el resto del Paleógeno (Figura 2). La Formación La Paz se deposita durante el Eoceno medio/superior, a partir de la base indica los mayores cambios en los ámbitos de depósito, aspecto que se mantiene en episodios que guardan cierta ciclicidad a lo largo del resto del Paleógeno y del Neógeno. Se diferencian entonces unidades de sedimentación que serán presentadas separadas por las discordancias de mayor importancia durante la evolución Paleógena y Neógena de la Cuenca; destacando cada una de las Formaciones del Cenozoico ya que son las de mayor interés en la zona de estudio.

Figura 2.

Corte geológico esquemático A-A' basado en la sísmica de la parte norte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, destacando las unidades geológicas del Cenozoico.



3. Metodología

3.1 Fundamento Teórico

El flujo en medios porosos es importante en las ramas relacionadas como la geología y el petróleo. Una revisión de las diferentes ecuaciones en estudios de flujo de filtración indica que la tradicional ley lineal de Darcy es ampliamente usada para flujo a baja velocidad (Porges y Hammer, 2001) expresada como:

Si se cumple la ley de Darcy, tendremos que la cantidad de agua [Q] que fluye a través de una sección transversal [A], sometida a un gradiente hidráulico [i], es igual a:

$$Q = K * i * A \quad (1)$$

Siendo K el coeficiente de permeabilidad e i el gradiente hidráulico que está definido como la relación entre la cabeza hidráulica o pérdida [h] y la longitud [L] necesaria para que esta produzca h, así. Por tanto:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

El gradiente hidráulico [i] influye en la magnitud de la velocidad de descarga [v] y por ende el coeficiente de permeabilidad.

La velocidad de infiltración [Vi] es igual a la velocidad de descarga [Vd] que es el mismo k*i sobre la porosidad [n]. Por tanto:

$$V_i = \frac{V_d}{n} = \frac{K*i}{n} \quad (2)$$

Puede considerarse como la velocidad media de avance del agua en la dirección de flujo.

La presión hidrostática es considerada la presión normal, esto quiere decir que el fluido presente en los poros de la roca ha tenido un proceso normal de disipación. Se expresa de la siguiente manera:

$$p_h = \rho * g * h \quad (3)$$

Donde la presión hidrostática [Ph] es igual densidad promedio del fluido [ρ] por la aceleración de la gravedad [g] y por la altura vertical de la columna de agua [h].

Los datos para despejar la ley de Darcy fueron tomados de las areniscas Formación la Paz con un coeficiente de permeabilidad 5.787×10^{-7} m /S (Domenico,1972), con diferencias de altura de la presa Hidrosogamoso ($h_1 = 320$ msnm) y el pozo Lizama 158 (145 msnm), con la longitud de estos dos (15,806 m); el área de la sección transversal por donde fluye el agua es $223,800 \text{ m}^2$ y con una porosidad de 20% según Sarmiento (2015). Por tanto, el caudal del sistema es despejando la ecuación (1):

$$Q = 5.787 \times 10^{-7} \text{ m /S} * \frac{320 - 145}{15806} * 223,800 \text{ m}^2 = 1.4339 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Obteniendo una velocidad de infiltración, ecuación (2):

$$V_i = \frac{5.787 \times 10^{-7} \text{ m /S} * 0.0110717449}{0.20} = 3.203609 \times 10^{-8} \text{ m/s} = 1.011 \text{ m/año}$$

Con una presión hidrostática despejada de la ecuación (3):

$$\begin{aligned} p_h &= 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2,500 \text{ m} \\ &= 24,426 \text{ kPa} = 3,542.70 \text{ Psi} \end{aligned}$$

3.2 Modelo Conceptual

El desarrollo del modelo conceptual consistió en la elaboración en una revisión cartográfica del sector NW plancha 120 de Bucaramanga (Ward, et al., 1977) y el sector SE de la plancha 108 de Puerto Wilches (Gavidia, et al., 2012), sobre la zona oriental y occidental del flanco del SNM, identificado en las mismas Formaciones Cenozoicas y así generando un corte geológico regional el cual fue elaborado con una orientación W-E perpendicular al rumbo de las capas, desde el pozo Lizama 158 a la presa Hidrosogamoso. La construcción del corte se llevó a cabo por el método de Kink (Figura 2). Utilizando el software Geostudio Seep/W y el corte generado (Figura 3), se modeló y calculó el flujo de agua subterránea en la represa Hidrosogamoso, sobre las Formaciones Cenozoicas de medios porosos, registrando un modelo 2D en un estado estacionario y saturado.

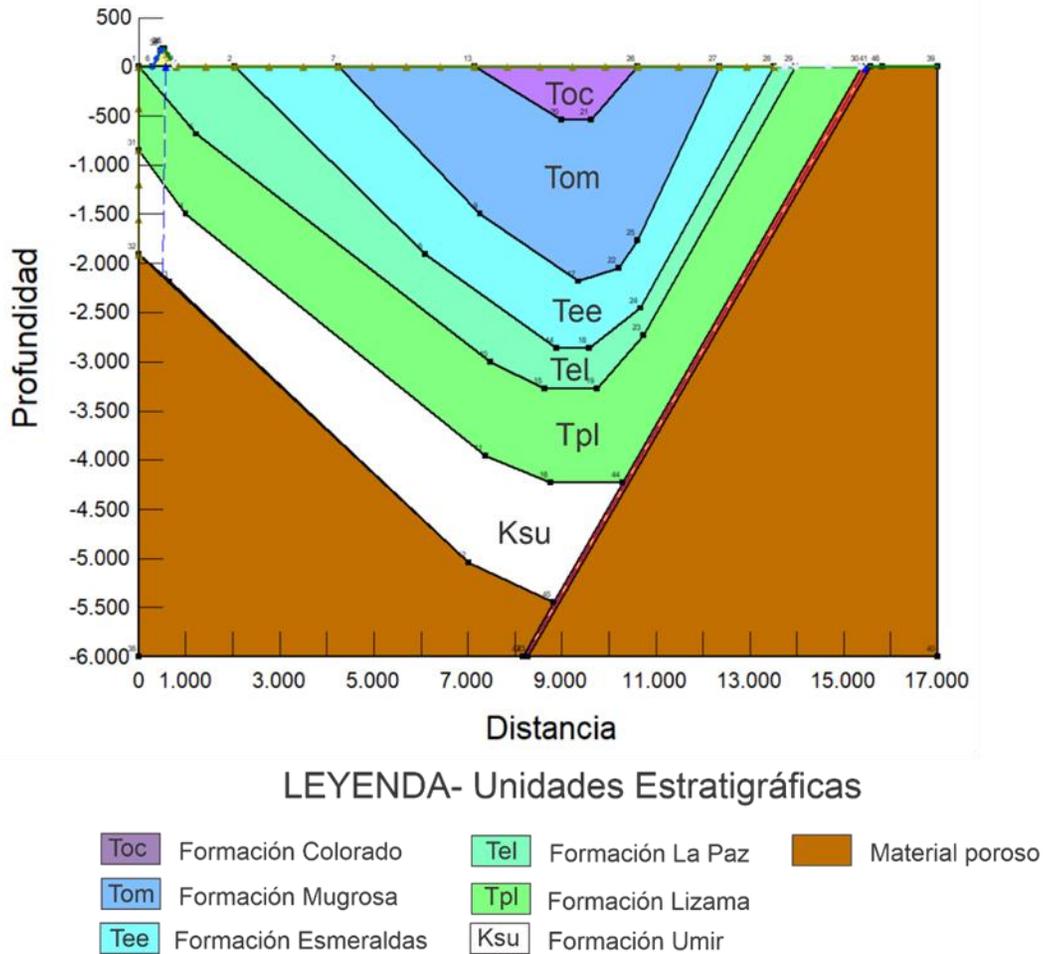
El modelo teórico para la infiltración del agua en medios porosos se determina con la ecuación diferencial de Laplace (Saleb, 2018) la cual se genera mediante la combinación de la ley de Darcy y una ecuación de continuidad. Para un suelo isotrópico homogéneo y a un flujo constante La ecuación de Laplace es:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

El resultado grafico de dicha ecuación es la denominada red de flujo, la cual genera un esquema de líneas de flujo que se intersecan en ángulos rectos con las líneas de potenciales igual. Para el cálculo del caudal y rutas de flujo se ha usado el software Geostudio SEEP/W, el cual se determina mediante el uso del método de los elementos finitos para resolver las ecuaciones parciales diferenciales de Laplace, a través de la división del modelo en secciones o elementos más simples y pequeños que se conectan entre sí por medio de nodos situados en la frontera del elemento (Saleb, 2018).

Figura 3.

Sección transversal del modelo conceptual con los materiales utilizados, la disposición geológica y condiciones limite necesarias para la ejecución y evaluación del modelo.



Todas las ecuaciones relacionadas con el análisis de elementos finitos se crean en los nodos de los elementos. Los elementos mutuos en un solo nodo tienen los mismos coeficientes y características pertenecientes a la ecuación en el nodo que se utilizan para calcular los parámetros desconocidos en el mismo (Saleb, 2018). La forma general de la ecuación de elementos finitos para el análisis de infiltración en estado estacionario es:

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (5)$$

La elaboración del modelo 2D se realizó de la siguiente manera. En primer lugar, se definió el tipo de análisis como estado estacionario, una vez definido, se estableció la hoja de trabajo, las escalas, los ejes y las cuadrículas (Jassama y Abdulrazzaq, 2020). Se dibujó la sección transversal de la presa Hidrosogamoso y la geología aquí presente. A continuación, se definió las funciones de conductividad hidráulica y contenido de agua volumétrica para diferentes materiales empleados, para así asignar las propiedades de los materiales definidos para las diferentes zonas del área de estudio. Así, se definieron las condiciones de contorno o límite, que tuvo como fin seleccionar la malla de la presa con la combinación de elementos cuadrados, rectangulares y triangulares. Para ello se definieron cuatro tipos diferentes de materiales: uno con características de saturado e insaturado correspondiente a la presa ya mencionada. Uno que corresponde a La Falla La Salina con dos materiales (poroso y arcilloso) saturados para las Formaciones sedimentarias del Cenozoico. Las Formaciones La Lizama, La Paz y Colorado se les asignó un material poroso, mientras que para las Formaciones Umir, Esmeraldas y Mugrosa. En el modelo 2D, el flujo del agua va del occidente (W) hacia el oriente (E), las condiciones de contorno se definieron para aguas arriba 180 m y aguas abajo 20 m. Algunos parámetros incluidos en el modelo de análisis en Geo-Studio Seep/W se muestran en la Tabla 1.

4. Discusión y Resultados

Los resultados de las velocidades de infiltración (Tabla 2) para la formación La Paz a lo largo del Sinclinal de Nuevo Mundo permiten determinar el tiempo de tránsito teniendo en cuenta la longitud indicada en el modelo 2D. El resultado obtenido indica que la velocidad de tránsito desde el sitio de presa de Hidrosogamoso hasta la falla La Salina es de 310 días.

$$V = \frac{d}{t} \quad (6)$$

$$t = d/v$$

La ecuación 6 ilustra los cálculos usados para determinar la sumatoria del tiempo de tránsito en los diferentes segmentos de la formación La Paz a lo largo del Sinclinal de Nuevo Mundo.

Tabla 1.

Propiedades de los materiales usados en el modelo conceptual en SEEP/W.

Material	Saturado/Insaturado	Coeficiente de Permeabilidad(m/s)	
Presa	Saturado/Insaturado		5×10^{-7}
Arena	Saturado	0.06	
Arcilla	Saturado		3×10^{-6}
Falla	Saturado	1	

Tabla 2.

Velocidad en diferentes segmentos de la Formación la Paz a lo largo del SNM.

Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Tiempo tránsito (días)
200	0.0009147	5.2925
547.46	0.0006494	9.49
1778.1	0.0003733	54.75

Las flechas negras representan (Figura 4 y 5) la magnitud y dirección de los vectores de velocidad, los valores máximos y mínimos de velocidad en el modelo son 0.02878 m/s y $1,642 \times 10^{-46}$ m/s. La degradación de colores indica las zonas con diferente valor de velocidad dentro del modelo, se observa que en la zona aledaña a la presa la velocidad tiene un valor cercano a 0,0009 y va disminuyendo su valor a medida que hace el recorrido por el sinclinal, sin embargo, en cercanías a la zona de Falla aumenta nuevamente sus valores hasta llegar a un valor de 0,0009 (Figura 5), así mismo estos valores tienden a disminuir en cercanías al límite de la Falla que colinda

a la derecha con la siguiente unidad que presenta características impermeables. La presión hidrostática tiene una estrecha relación y se condiciona por la variación de altura de las condiciones límite y de la profundidad a la cual se haga la mediación, para efectos del modelo conceptual dicha variación es de altura es de 175 m.

La degradación de colores en la FIGURA 6 indica los diferentes valores que toma la presión a lo largo del modelo planteado que van desde 0 hasta 65000 Kpa. Se toman como referencia 3 puntos de interés para analizar la variación de la presión a lo largo del modelo, el punto 1 dentro de la zona de Falla con 1543 Kpa (223 psi) a una profundidad de 150 m, punto 2 dentro de la Formación La Paz con 1761 Kpa para 150 m de profundidad y punto 3 en la base de la Formación la Paz con una presión de 25066 Kpa o 3636 psi una profundidad de 2339m (Figura 6). La carga total (Total head) (Figura 7) muestra las líneas equipotenciales y los vectores de flujo que indican el movimiento y dirección de la infiltración de agua desde la parte superior de la represa Hidrosogamoso hasta la Falla La Salina.

Figura 4.

Ilustra el comportamiento y variaciones de la velocidad a lo largo de la zona permeable de las Formaciones La Lizama y La Paz y la zona de Falla; las flechas negras representan los vectores de velocidad

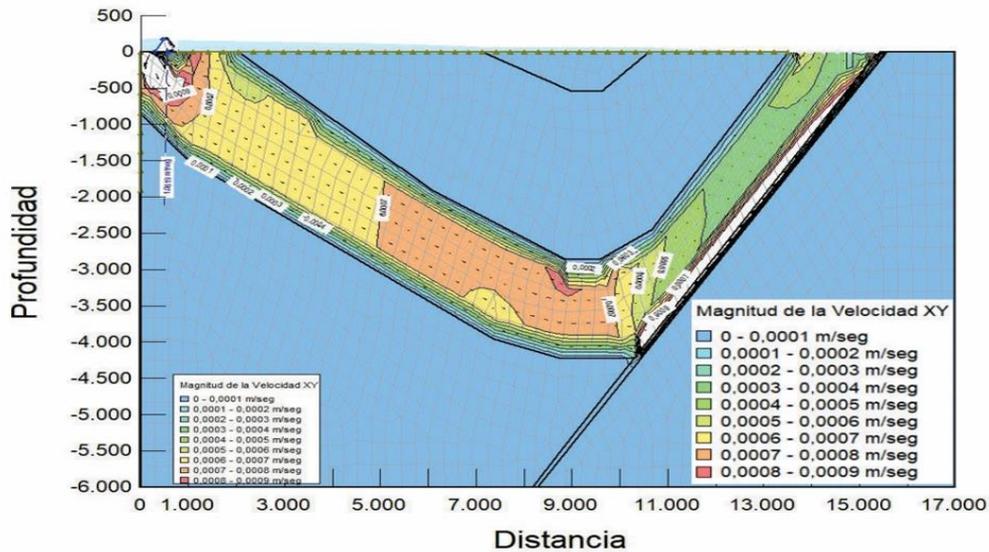
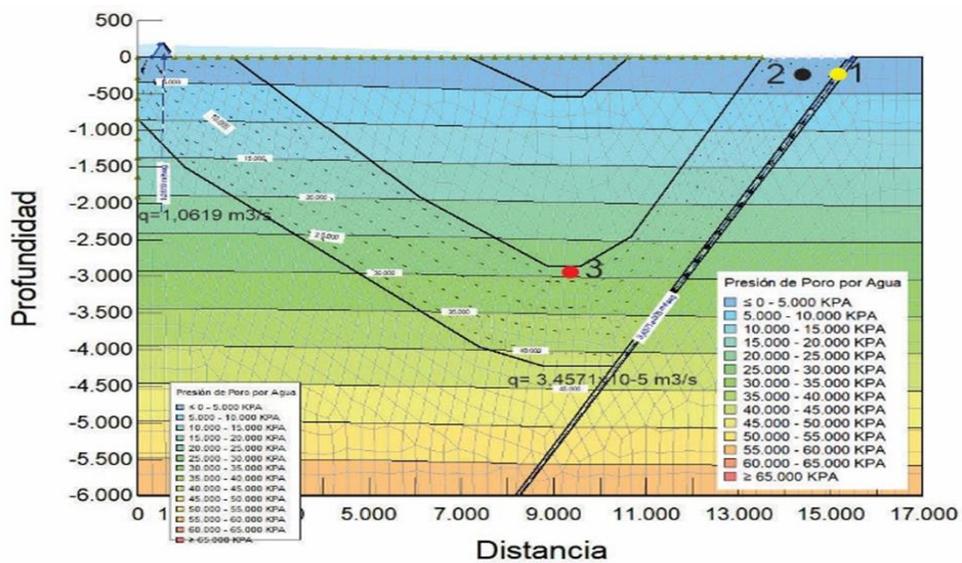


Figura 5.

Zoom al área de infiltración en cercanías a la Falla La Salina, especificando valores de velocidad y sentido de los vectores.



La variación de colores asociados al parámetro de Carga Total (Figura 7) en los resultados ilustra la tensión que se produce por la interacción de la presión del agua en la zona de aguas arriba. El color rojo en los resultados de la modelización muestra la parte del terreno que experimenta la mayor tensión debido a la influencia del agua aguas arriba, para ello el modelo indica una tensión de 180 metros mientras que el azul oscuro indica la zona del terreno que experimenta la menor tensión con un valor de 20 metros.

Figura 6.

Comportamiento de la presión hidrostática, referenciando tres modelos 1,2 y 3 analizando su variación.

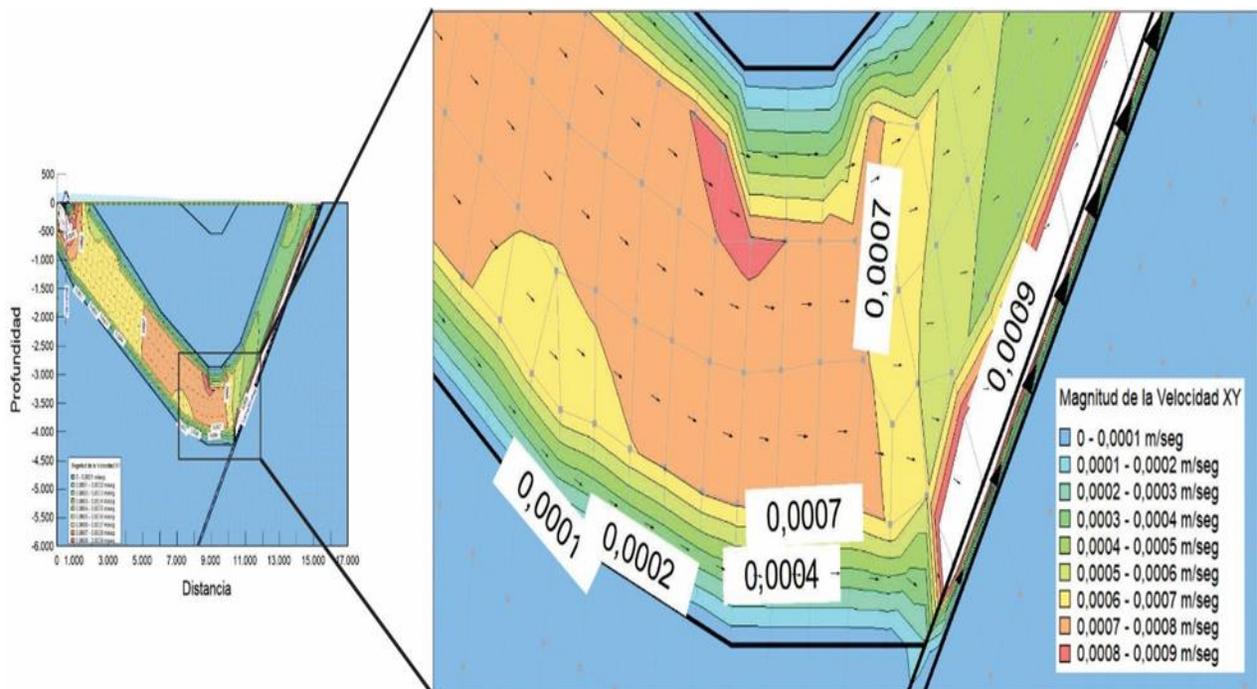
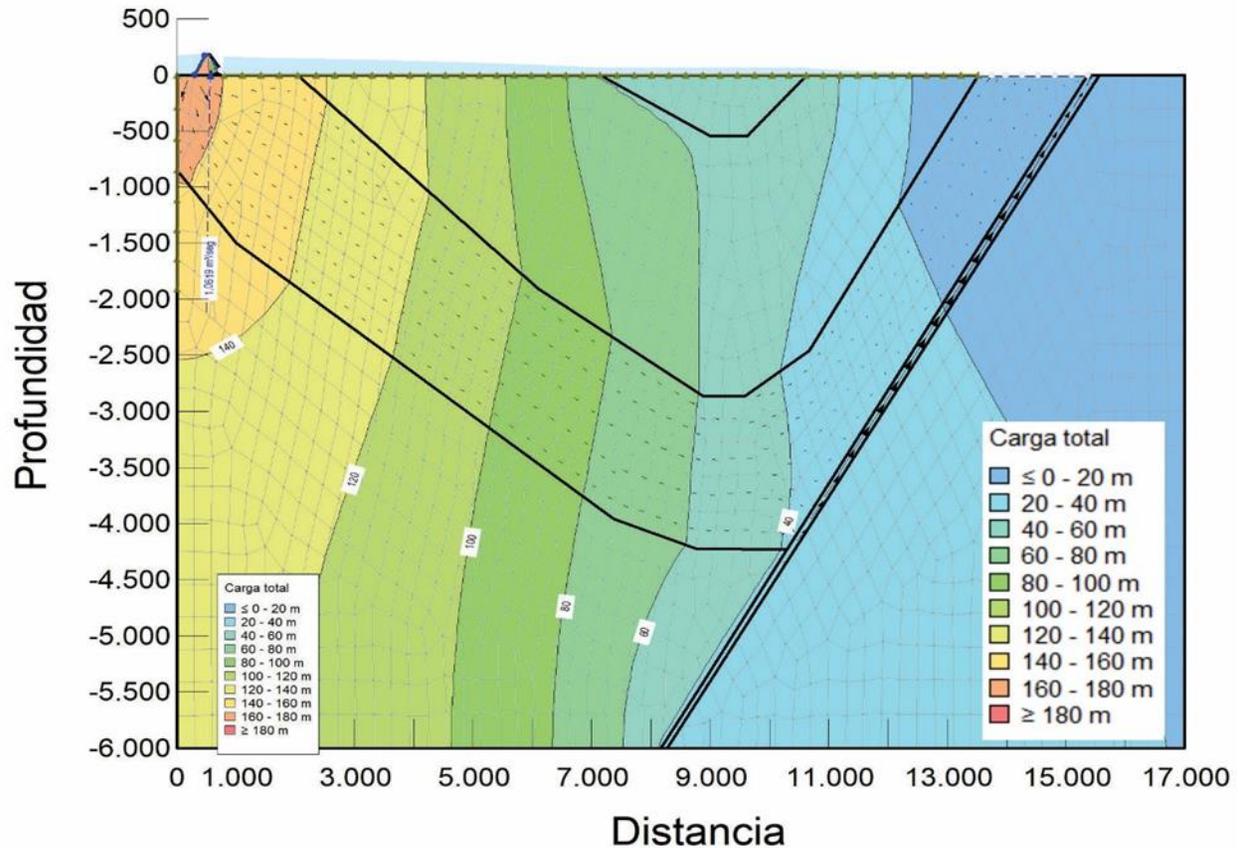


Figura 7.

Parámetros de carga total asociados a las condiciones límite de aguas arriba y aguas abajo.



Hay que mencionar que la Falla La Salina no cumple con esta ley de presión hidrostática debido a que se encuentra sobre presurizada con respecto a la presión hidrostática en los demás puntos del modelo numérico 2D; el mayor flujo de agua ocasionó que se debilitara la capacidad sellante provocando los fenómenos de rezumaderos.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el modelo numérico 2D indican un tiempo de tránsito desde la presa Hidrosogamoso hasta la Falla La Salina en inmediaciones al pozo Lizama 158 es de 310 días, indicando que el efecto de llenado de la presa Hidrosogamoso si tuvo influencia directa en la reactivación del rezumaderos en el área de estudio por el incremento de la presión hidrostática con el llenado de la represa antes mencionada. Sin embargo, este valor tiene un margen de error de unos pocos años con respecto al tiempo de duración desde que se llenó la presa Hidrosogamoso en diciembre 2014 hasta el evento registrado en 2018 en el pozo Lizama 158, aproximadamente 1200 días.

Los resultados preliminares del modelo numérico indican que el corto tiempo de tránsito del agua entre los flancos se explica por la presencia de zonas de alta permeabilidad que estarían asociadas a la Falla la Salina y a la Falla de rumbo del Rio Sogamoso. Esta situación explica porque el efecto del llenado de la presa se manifestó en un corto periodo de tiempo que puede fluctuar entre 1 a 4 años.

Los vectores generados en el modelo ilustran el cambio en la velocidad y dirección de infiltración de agua a medida que se acerca a la zona de Falla La Salina, esto sugiere un control estructural por parte de la Falla que se evidencia por la variación de velocidad de 0.0007 m/s a 0,0009 m/s en la zona más cercana de la misma, lo cual se relaciona con la hipótesis planteada. Es necesario mencionar que la velocidad aumenta en de la zona de Falla, según el modelo construido para explicar la expulsión de grandes volúmenes de petróleo agua y gas durante el evento que

alcanzo a registrar 3,000 barriles diarios de crudo, 6,000 barriles diarios de agua y una catida de gas no medida, pero de gran volumen.

Los valores máximos y mínimos de velocidad de infiltración son 0.02878 m/s y $1,642 \times 10^{-46}$ m/s.

El modelo indica una presión hidrostática de 223 psi en la Falla La Salina a una profundidad de 150 metros, esta presión es inferior a la presión de flujo de petróleo registrada en la cabeza del pozo Lizama 158, que aumento de 100 a 600 psi durante marzo a abril del 2018. Indicando que los hidrocarburos fluyeron a presiones muy superiores a la presión hidrostática, lo cual ocasionó un flujo de grandes volúmenes de crudo agua y gas el cual fue disminuyendo paulatinamente en la medida que la capacidad sellante de la falla fue restablecida por la acumulación de partículas de asfalto.

6. Recomendaciones

Se sugiere mejorar el modelo numérico con el propósito de determinar las condiciones de variación en la altura para obtener valores de presión hidrostática cercanos a los 600 psi medidos durante el evento de 2018 en el pozo Lizama 158.

Analizar el comportamiento de la anisotropía de los materiales usados con el propósito de generar un modelo más preciso.

Mejorar la geometría con respecto al corte geológico y así obtener valores más precisos.

Elaborar diferentes modelos numéricos que se aproximen de manera más acertada a las condiciones geológicas reales presentes en el área de estudio.

Referencias Bibliográficas

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martínez, J. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH - Edited and compiled by: ANH and B&M Exploration Ltda. Bogotá.
- Bayona, G, Cardona. A, Jaramillo. C, Mora. A, Montes. C, Caballero. V, Mahecha. H, Lamus-Ochoa. F, Montenegro. O, Jimenez. G, Mesa. A, Valencia. A (2013), Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean-South American collision in early Palaeogene time, in Thick- Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion, edited by M. Nemcok, A. R. Mora, and J. W. Cosgrove, Geol. Soc. London, Spec. Publ., 377, doi:10.1144/ SP377.5.
- Caballero V. 2010. (2019). Evolución Tectono - Sedimentaria Del Sinclinal De Nuevo Mundo, Cuenca Sedimentaria Valle Medio Del Magdalena Colombia, Durante El Oligoceno - Mioceno. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Cetina, L.M., Velandia, F., y Patiño-Sanabria, H.A. (2019). Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yariquíes - Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 31- 56. doi: 10.18273/revbol.v41n3-2019002.
- Clavijo, J., & Royero, J. M. (2001). Mapa geológico generalizado Departamento de Santander. Ingeominas, Memoria explicativa, Escala, 1(400.000), 26-42.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic

- history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, no. 10, p. 1421-1443.
- Córdoba, F., López, C., Rolón, L., Buchelli, F., Sotelo, C. (2001). Proyecto evaluación regional del Valle Medio del Magdalena y Cordillera, Ecopetrol, informe interno: Bogotá
- Córdoba, F., Rolón, L., Buchelli, F., Suarez, M. (1996). Provincia petrolífera del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL). p. 603- 605. Santafé de Bogotá
- Domenico, P. (1972). Conceptos y modelos en hidrología de aguas subterráneas.
- Etayo-Serna, F. y F. Laverde. (1985). Proyecto Cretácico. Publicaciones Especiales del INGEOMINAS, 16: 1-450. Bogotá
- Fetter, C. W. (2001). - Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, 4^a ed., 598 pp.
- Fitts, C. R. (2012). - Groundwater Science. Elsevier, 2^a ed., 692 pp.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979). - Groundwater. Prentice-Hall, 604 pp.
- Gavidia, O., Porras, J., Pacheco, S., Perez., Mesa, L., Neita, C (2012) cartografía geológica la Plancha 108 Puerto Wilches, Escala 1:100000
- Gómez R, Morales J (2008). Modelo geostadístico basado en objetos de las formaciones Mugrosa y Colorado, Campo Lisama (VMM) Universidad Industrial de Santander.
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., & Cardozo, N. (2005). Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. Geological Society of America Bulletin, 117(9-10), 1272-1292.
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., & Kelley, S. (2005). Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and

- implications for exhumation of the Northern Andes. Geological Society of America Bulletin, 117(5-6), 547-569.
- Gomez, E., T. Jordan, R. Almandiger, K. Hegarty, S. Kelly, and M. Heizler (2003), Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia, Geol. Soc. Am. Bull., 115: 131-147, doi: 10.1130/00167606(2003)115<0131:COAOTL> 2.0.CO;2.
- Jassama, M. G., & Abdulrazzaq, S. S. (2020). Analysis of seepage through Al-wand dam by using Seep/W model. Anbar Journal of Engineering Sciences, 8(2).
- Jimenez, G., López, O., Jaimes, L., & Mier Umaña, R. (2016). Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena. Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 40(155), 312. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.293>
- Jordan, Teresa & Allmendinger, Richard & Hegarty, Kerry & Kelley, Shari & Heizler, Matthew. (2003). Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Geological Society of America Bulletin - GEOL SOC AMER BULL. 115. 131-147. 10.1130/0016-7606(2003)115<0131:COAOTL>2.0.CO;2.
- Julivert, M., 1961a. Las estructuras del Valle Medio del Magdalena y su significación. Bol. de Geol. Univ. Ind. Sant. (Bucaramanga) 6: 33-52.
- Manosalva, H. (2018). Comunicación oral, Vicepresidencia Operaciones de Ecopetrol 2018
- Mojica, J. y Franco, R. (1990): Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. - Geología. Colombiana 17, pp.41-64, 14.

- Morales, L. G. (1958). General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. In L. G. Weeks ed. A symposium conducted by A.A.P.G.: Habitat of Oil, p. 641-695.
- Orejuela Parra, P. A. (2010). Caracterización de la Gravedad API en el Campo Lisama (Cuenca Valle Medio Del Magdalena) a partir de la Pirolisis Rock-Eval Vi. 143.
- Osorio, D., (2016). Estratigrafía y deformación del Grupo Girón en el anticlinorio de los Yarigués (“Anticlinal de Los Cobardes”) sectores Zapatoca y Río Lebrija. Tesis de pregrado para aspirar al título de geólogo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Parra, M., A. Mora, C. López, L. E. Rojas, and B. K. Horton (2012), Detecting early shortening and deformation advance in thrust-belt hinterlands: Example from the Colombian Andes, *Geology*, 40: 175-178, doi:10.1130/G32519.1.
- Porges, R. E., & Hammer, M. J. (2001). The compendium of hydrogeology. National Ground Water Association.
- Rolón, L., F. (2004). Structural Geometry of the Jura-Cretaceous Rift of the Middle Magdalena Valley Basin-Colombia. Department of Geology and Geography, Morgantown, WV.
- Royero, J., y Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado Departamento de Santander. Escala 1:300.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Saavedra, N. et al, (2006). Modelamiento para Optimizar el Factor de Recobro en Campos Maduros de las Cuencas del Valle Medio del Magdalena y Catatumbo, ECOPETROL – ICP.
- Saleh, L. A. (2018, November). Studying the seepage phenomena under a concrete dam using SEEP/W and Artificial Neural Network models. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 433, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.

- Sarmiento, G., Puentes, J., & Sierra, C. (2015). Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del. *Geología Norandina*, 12, 51–82.
- Sarmiento, L.F. (2011). Eastern Cordillera Basin. In: F. Cedié; F. Colmenares (eds.). *Petroleum Geology of Colombia Volume 7*. ANH-Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Sarmiento-Rojas, L. F. 2001. *Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes* [Ph.D thesis]: Vrije University, 295 p.
- Sarmiento-Rojas, L.F., Van Wess, J., and Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383-411. doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.003.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., y Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-132.
- Ward, W., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., y Gómez, E. (1977). Mapa geológico del cuadrángulo H-12 Bucaramanga escala 1:100.000. INGEOMINAS.