

Metodología

Con el fin de evaluar las diferentes áreas de estudio en las cuencas Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental, Llanos y Caguán-Putumayo, a través de modelos directos usando el código Pecube, se implementa la metodología representada en la Figura 16.

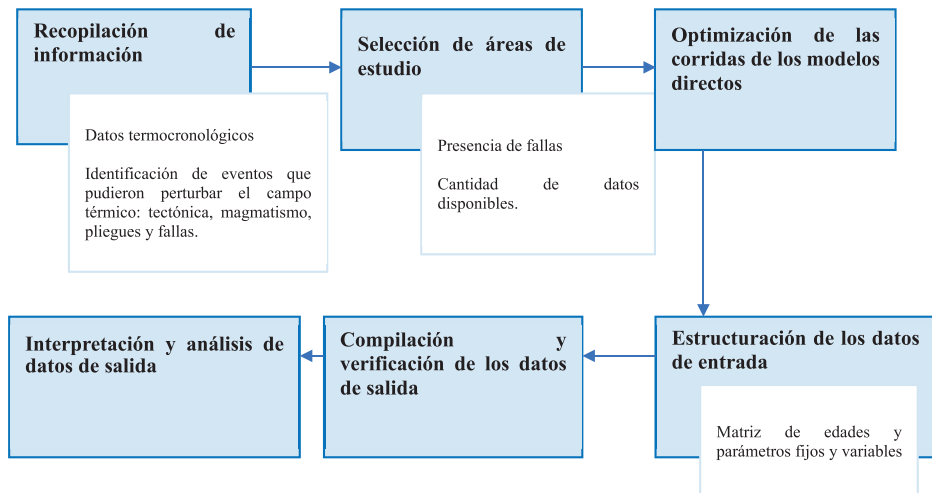


Figura 16. Diagrama metodológico de trabajo.

3.1 Recopilación de información

Esta primera fase tiene como objetivo organizar toda la información disponible en cuanto a geología de superficie, modelos digitales de

elevación (DEM) y datos de termocronología de baja temperatura, tales como: trazas de fisión en apatito (AFT), trazas de fisión en circón (ZFT), argón / argón en moscovita ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita), (U-Th)/He en apatito (AHe), y (U-Th)/He en circón (ZHe).

3.1.1 Geología de superficie

La recopilación de la cartografía geológica es importante, ya que la distribución espacial de las unidades geológicas da información relevante sobre el comportamiento mecánico de las estructuras en subsuelo (pliegues y fallas), y el reconocimiento de eventos tectónicos y magmáticos que perturban el campo termal de la zona de estudio. En el Capítulo 1, se describió detalladamente la historia geológica de cada una de las cuencas objeto de estudio.

Por otra parte, la geología de superficie es fundamental para hacer la correlación entre los datos reportados por los diferentes métodos geotermocronológicos y su distribución espacial y estratigráfica. Asimismo, es esencial para el reporte en mapas temáticos.

3.1.2 Datos de termocronología

La estructuración de las bases de datos termocronológicas a lo largo de las distintas zonas en cada cuenca objeto de estudio, se ejecutó en dos etapas. Primero, se llevó a cabo la recopilación bibliográfica contenida en artículos científicos, informes y demás estudios de carácter investigativo, relacionados con el modelamiento termocronológico. Luego, se generó un control de calidad de los datos obtenidos, donde se verificó que concordaran litológicamente con la descripción reportada, y que las coordenadas y las elevaciones fueran concordantes con los modelos digitales de elevación y la cartografía base. Finalmente, se eliminaron muestras con información incompleta y datos duplicados. Todos los datos termocronológicos fueron obtenidos para muestras superficiales.



3.1.2.1 Trazas de fisión en apatitos (AFT)

Este método termocronológico está relacionado con un rango de temperatura que va de 60 a 120 °C (temperatura de cierre) en el cual, la estructura cristalina del mineral sufre daños (trazas de fisión). En la cuenca Valle Medio del Magdalena se realizó la recopilación de 25 datos por AFT. Estas edades varían de $5,45 \pm 0,71$ Ma a $48,9 \pm 4,3$ Ma, y las longitudes de trazas varían de 9,6 a $14,23 \mu\text{m}$. En la cuenca Cordillera Oriental se reportan 26 datos por AFT. Estas edades varían de $0,8 \pm 0,3$ Ma a $25,9 \pm 2,2$ Ma, cuyas longitudes medias no han sido reportadas en su totalidad. En la cuenca Llanos, se encontraron 11 datos por AFT. Estas edades varían de $6,7 \pm 3,9$ Ma a $30,9 \pm 3,1$ Ma, y las longitudes de trazas varían de 10,89 a $15,17 \mu\text{m}$. Finalmente, en la cuenca Caguán-Putumayo, se obtuvieron 15 datos por AFT. Estas edades varían de $6,89 \pm 2,83$ Ma a $13,9 \pm 7,8$ Ma, y las longitudes de trazas están alrededor de 13 a $14 \mu\text{m}$. En el Capítulo 3.4 de este libro, se reportan los autores de estas dataciones.

3.1.2.2 Trazas de fisión en circones (ZFT)

Este método termocronológico está relacionado con un rango de temperatura que va de 240 a 300 °C (temperatura de cierre) en el cual, la estructura cristalina del mineral sufre daños (trazas de fisión). En las cuencas objeto de estudio se llevó a cabo la recopilación de los datos de longitudes de trazas y edades observadas. Para la única cuenca en la que se encontraron dataciones de este tipo fue para la cuenca Cordillera Oriental, en la que se obtuvieron 14 datos por ZFT. Estas edades varían de $5,9 \pm 0,4$ Ma hasta $136,5 \pm 13,4$. Ma. En el Capítulo 3.4 de este libro, se reportan los autores de estas dataciones.

3.1.2.3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita

Este método termocronológico está relacionado con un rango de temperatura que va de 350 a 425 °C (temperatura de cierre) dependiendo de varios factores como la composición química y el tamaño del grano.



En las cuencas objeto de estudio, solo se obtuvo información por este método para la cuenca Cordillera Oriental, donde se encontraron 2 edades con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita las cuales fueron, $65 \pm 1,9$ Ma y $65,2 \pm 1,4$ Ma. En el Capítulo 3.4 de este libro, se reportan los autores de estas dataciones.

3.1.2.4 (U-Th)/He en apatito (AHe)

Este método termocronológico está relacionado con un rango de temperatura que va de 60 a 70 °C (temperatura de cierre). Por debajo de esta temperatura, el helio (^4He), producido por la desintegración radiactiva de uranio (^{238}U y ^{235}U) y torio (^{232}Th) queda atrapado dentro de la estructura cristalina del apatito. En la cuenca Valle Medio del Magdalena no se presentan dataciones por este método. En la cuenca Cordillera Oriental se reportaron 3 datos por (U-Th)/He en apatito, con edades que varían de $6,7 \pm 0,5$ Ma a $26,4 \pm 1,6$ Ma. En la cuenca Llanos se presentan 8 datos por (U-Th)/He en apatito con edades que varían de $47,9 \pm 3,7$ Ma a $79 \pm 8,3$ Ma. Finalmente, en la cuenca Caguán-Putumayo se reportan 10 datos por (U-Th)/He en apatito con edades que varían de $3,5 \pm 1$ Ma a $12,8 \pm 0,5$ Ma. En el Capítulo 3.4 de este libro, se reportan los autores de estas dataciones.

3.1.2.5 (U-Th)/He en circón (ZHe)

Este método termocronológico está relacionado con una temperatura media de 170 a 200 °C (temperatura de cierre). Por debajo de esta temperatura, el helio (^4He), producido por la desintegración radiactiva de uranio (^{238}U y ^{235}U) y torio (^{232}Th) queda atrapado dentro de la estructura cristalina del circón. En las cuencas Valle Medio del Magdalena y Llanos, no se reportan dataciones por este método. En la cuenca Cordillera Oriental se reportan 38 datos por U-Th/He en circón con edades en el rango de $12,4 \pm 1,2$ Ma a $80,2 \pm 6,8$ Ma. Finalmente, en la cuenca Caguán-Putumayo se reportan 3 datos por (U-Th)/He en circón, con edades en el rango de 15 Ma a $109,07 \pm 43,4$ Ma. En el Capítulo 3.4 de este libro, se reportan los autores de estas dataciones.



3.1.3 Modelo digital de elevación

Los modelos digitales de elevación (DEM) son una herramienta clave para evaluar y analizar la topografía de una región. Esta tiene un impacto significativo tanto en la distribución de las isotermas en el subsuelo, como en la variación del gradiente térmico vertical. En áreas montañosas se suelen experimentar gradientes térmicos verticales más pronunciados debido a la influencia de la erosión, la exhumación y otros procesos geológicos asociados con la topografía elevada. Asimismo, esta puede influir en la naturaleza del suelo y el material superficial, lo que a su vez afecta la conductividad térmica del suelo. Por ejemplo, los suelos rocosos tienden a tener una conductividad térmica diferente a los suelos más sueltos o sedimentarios, lo que puede influir en la distribución de la temperatura en el subsuelo.

Los DEM para las zonas de estudio se obtuvieron a partir de los datos publicados libremente por la Agencia Espacial Japonesa (de manera gratuita) del programa espacial ALOS-PALSAR. Estos poseen distintas resoluciones 12, 30 y 90 m. La metodología para la utilización de este DEM, se enuncia a continuación:

Primero se creó el SHP que engloba el área de interés, luego se espacializaron las bases de datos para proceder a hacer un recorte del DEM, posteriormente, se realiza un remuestreo donde la resolución del DEM puede oscilar de 0,5 a 2 km, valor que depende del tamaño del área de estudio. Cabe resaltar que entre más grande sea el área de estudio y la resolución del DEM, mayor será el tiempo que tomará la ejecución del código termocinémático. Finalmente, el nuevo DEM se exporta en formato ASCCI, el cual contiene una matriz de datos de elevación del terreno con un encabezado del número de columnas, filas, longitud, latitud, resolución del DEM y el error.

3.1.3.1 Cuenca Valle Medio del Magdalena, sector Sinclinal de Armas

El DEM usado para el modelamiento termocinémático en la cuenca Valle Medio del Magdalena, sector Sinclinal de Armas, se pueden visualizar en

la Figura 17 y, sus características principales, se encuentran plasmadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del modelo digital de elevación para la cuenca Valle Medio del Magdalena en el sector Sinclinal de Armas.

Característica		Sector Sinclinal de Armas
Número de columnas		35
Número de filas		38
Coordenadas esquina inferior izquierda	Longitud	-73,99
	Latitud	6,19

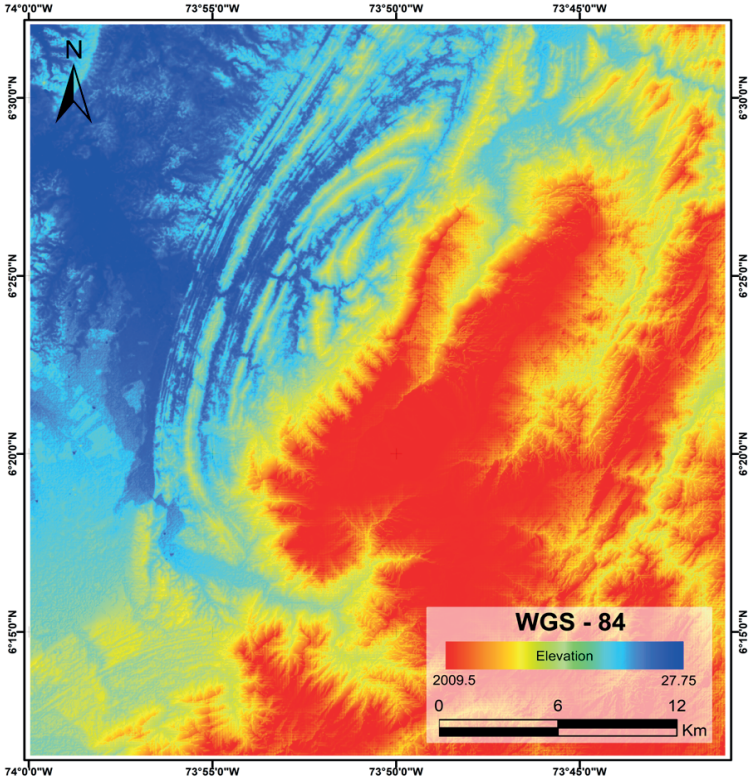


Figura 17. Modelo digital de elevación (DEM) para la cuenca Valle Medio del Magdalena, sector Sinclinal de Armas.



3.1.3.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental

Para el modelamiento termocinemático en la cuenca Cordillera Oriental, se usaron tres (3) modelos digitales de elevación. En el caso del sector Macanal - Santa María, el DEM se puede visualizar en la Figura 18 y, sus características principales, se encuentran plasmadas en la Tabla 7. Asimismo, para el caso de la zona de estudio del sector Axial (alrededores del Macizo de Floresta), en la Figura 19 se presenta el DEM y en la Tabla 8, las propiedades del área modelada. Finalmente, para la tercera zona de estudio comprendida entre Bogotá - Villavicencio, en la Figura 20, se visualiza el DEM y, en la Tabla 9, las características principales de esta.

Tabla 7. Características del modelo digital de elevación para el sector Macanal - Santa María.

Característica		Sector Macanal - Santa María
Número de columnas		26
Número de filas		26
Coordenadas esquina inferior izquierda	Longitud	-73,397499
	Latitud	4,764333326

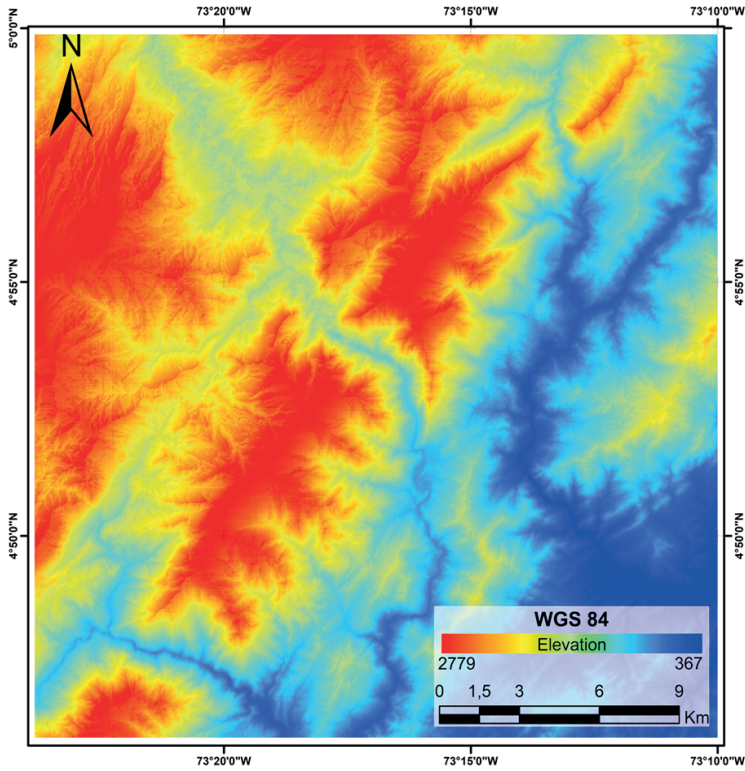


Figura 18. Modelo digital de elevación (DEM) para el sector de Macanal - Santa María.

Tabla 8. Características del modelo digital de elevación para el Eje Axial (Macizo de Floresta) de la Cordillera Oriental.

Característica		Sector axial Floresta
Número de columnas		59
Número de filas		22
Coordenadas esquina inferior izquierda	Longitud	-73,34304
	Latitud	5,796301



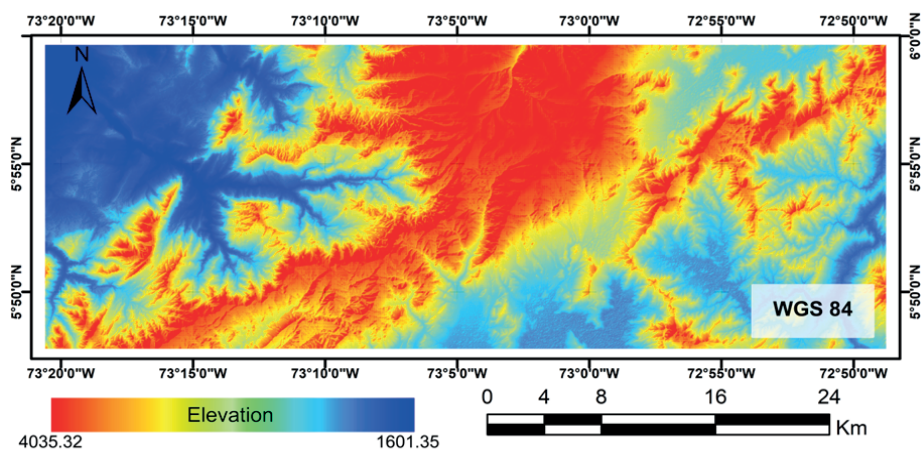


Figura 19. Modelo digital de elevación (DEM) para el eje Axial (Macizo de Floresta) de la Cordillera Oriental.

Tabla 9. Características del modelo digital de elevación para el sector Bogotá - Villavicencio.

Característica		Sector Bogotá - Villavicencio
Número de columnas		89
Número de filas		65
Coordenadas esquina inferior izquierda	Longitud	-74,28861
	Latitud	4,0569444

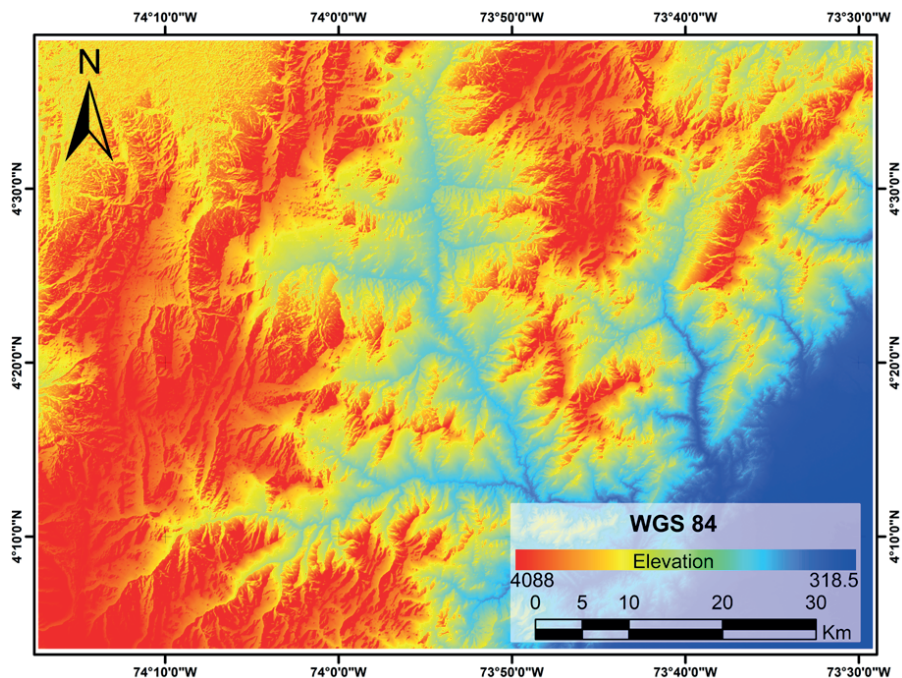


Figura 20. Modelo digital de elevación (DEM) para el sector de Bogotá - Villavicencio.

3.1.3.2 Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos): sector Sinclinal de Nunchía

El DEM usado para el modelamiento termocinemático para esta zona, sector del Sinclinal de Nunchía, se puede visualizar en la Figura 21 y, sus características principales, se encuentran plasmadas en la Tabla 11.

Tabla 10. Características del modelo digital de elevación para el sector del Sinclinal de Nunchía.

Característica		Sector Sinclinal Nunchía
Número de columnas		22
Número de filas		36
Coordenadas esquina inferior izquierda	Longitud	-72,29304
	Latitud	5,5358877

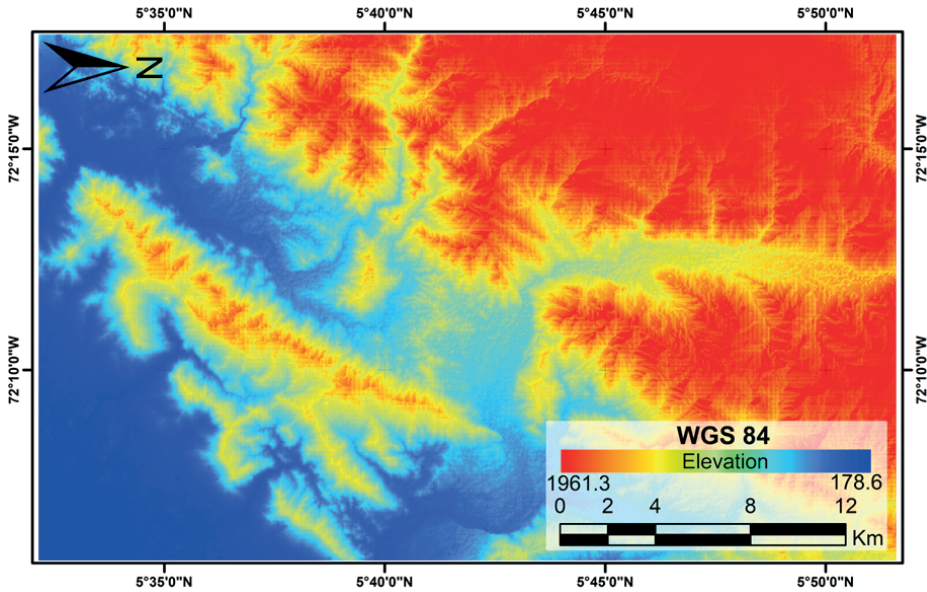


Figura 21. Modelo digital de elevación (DEM) para el sector Sinclinal de Nunchía.

3.1.3.3 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo)

Los modelos digitales de elevación usados para el modelamiento termocinemático en la cuenca Caguán-Putumayo, bloques Este y Oeste, se pueden visualizar en la Figura 22 y Figura 23, respectivamente, y sus características principales se encuentran plasmadas en la Tabla 11.

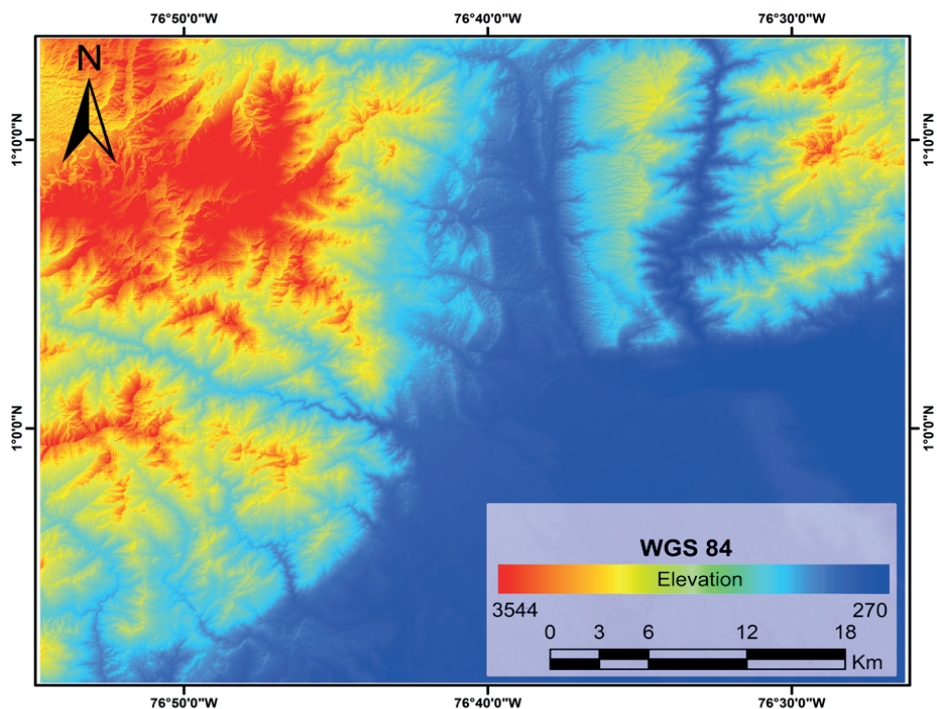


Figura 22. Modelo digital de elevación (DEM) para la cuenca Caguán-Putumayo en el Bloque Este modelado.

Tabla 11. Características de los modelos digitales de elevación para la cuenca Caguán-Putumayo de los dos bloques (Este-Oeste) modelados.

Característica		Bloque Este	Bloque Oeste
Número de columnas		56	53
Número de filas		67	41
Coordenadas esquina inferior izquierda	Longitud	-76,0602	-76,9122
	Latitud	1,29727	0,85627



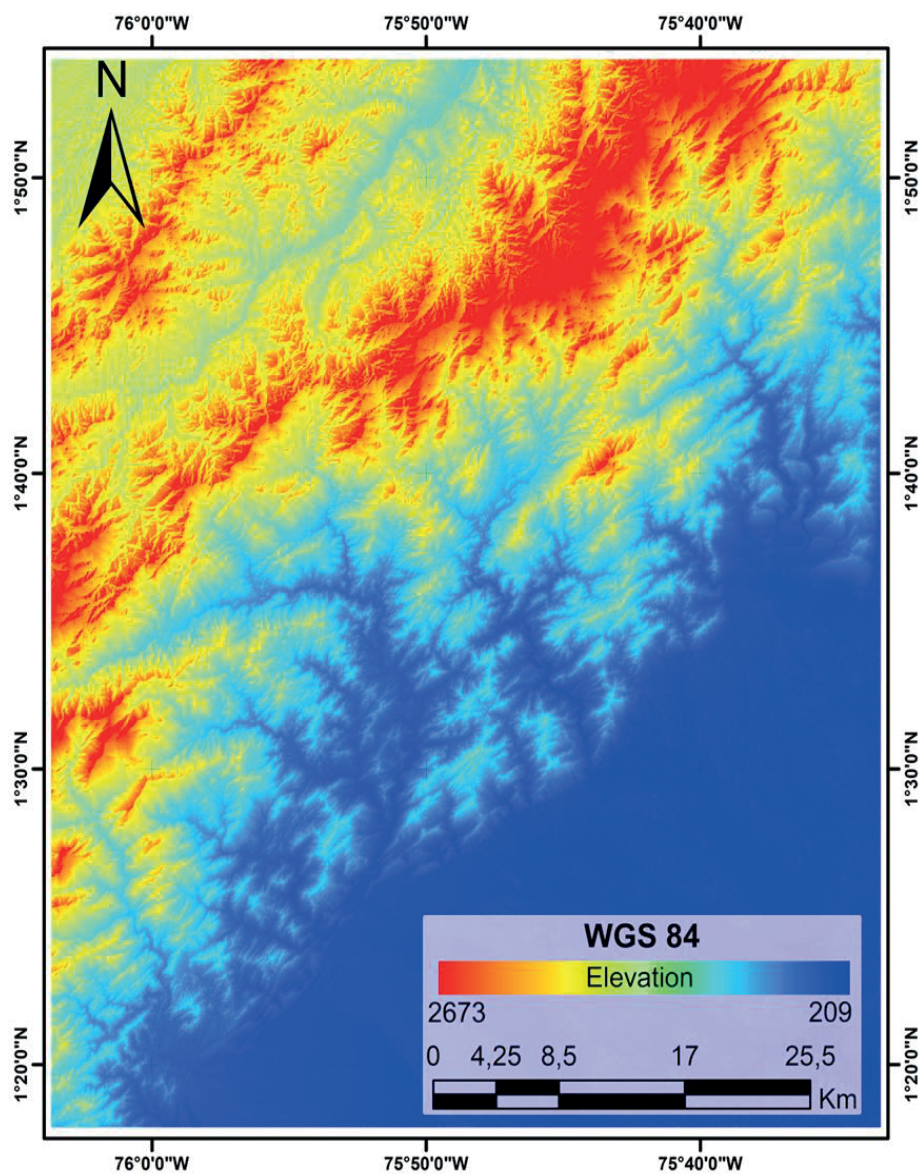


Figura 23. Modelo digital de elevación (DEM) para la cuenca Caguán-Putumayo en el Bloque Oeste modelado.

3.2 Selección de áreas de estudio

Las áreas de estudio se seleccionaron con base en dos criterios fundamentales. Por un lado, la cantidad de información termocronológica disponible publicada, edades (U-Th)/He en apatitos y circones, edades por trazas de fisión en apatitos y circones y edades Ar-Ar en biotita, moscovita, hornblenda o feldespato. Por otro lado, la presencia de lineamientos (fallas) que cortan de manera continua o casi continua la zona de estudio en bloques bien diferenciados. Con base en lo anterior, a continuación, se presentan las zonas seleccionadas para la realización de modelos termocinemáticos mediante el código Pecube.

3.2.1 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Valle Medio del Magdalena)

En la cuenca Valle Medio del Magdalena se ha seleccionado el área que comprende el Sinclinal de Armas para realizar los modelos termocinemáticos directos. Esta estructura regional es importante en la cuenca, pues presenta la mejor y más completa exposición de las rocas del basamento y de las unidades sedimentarias del Cretácico al Neógeno. En esta zona se encuentra la falla La Salina, que marca el límite entre las estructuras de la Cordillera Oriental con las estructuras que convergen al oeste y los depósitos de la región del piedemonte. Sumado a esto, el sector cuenta con un número representativo de datos de termocronología.

3.2.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental

Alrededor de la Cordillera Oriental se han seleccionado tres áreas favorables para la realización de modelos termocinemáticos directos. La primera es la zona axial de la misma, en cercanías a las localidades de Tunja al sur y de Sativa Norte al Norte, debido a sus características geológicas actuales e historia evolutiva. La segunda zona está localizada en la parte norte del Anticlinal de Montecristo y parte del flanco occidental del Sinclinal de Nazareth, la cual comprende las localidades de Macanal - Santa María, Chivor, San Luis de Gaceno y Campo



hermoso (piedemonte oriental, sector central). Finalmente, la tercera área está ubicada en la zona de la vía nacional que comunica a Bogotá con Villavicencio (piedemonte oriental, sector sur).

Con respecto a la primera zona, es decir, la parte axial de la Cordillera Oriental, esta se encuentra relativamente menos deformada que sus piedemontes y se define en su mayoría por una geomorfología de mesetas, presenta pliegues y fallas inversas de poco salto, las cuales afectan la cobertera sedimentaria del Cretácico y Cenozoico principalmente. El sistema de fallas Boyacá – Soapaga, es una de las estructuras más importantes que abarca esta zona. Este sistema ha experimentado una larga evolución temporal que comenzó con una fase extensional a finales del Paleozoico y principios del *rift* Mesozoico, hasta llegar al acortamiento andino del Cenozoico, que resultó en la inversión del *rift* (Kammer y Sánchez, 2006). Esto explica la diversidad de interpretaciones estructurales y modelos cinemáticos propuestos para este sistema de fallas.

Adicionalmente, el área axial cuenta con cuerpos intrusivos de edades Jurásicas y Devónicas, principalmente, localizados en cercanías y sobre el Macizo de Floresta. Este macizo se encuentra exhumado y aflorando en superficie, lo cual despierta el interés de diferentes grupos multidisciplinarios, entre ellos, geotermocronólogos. Lo anterior explica el porqué de la abundante información termocronológica que se encuentra en el área.

Cerca de la segunda zona de estudio, área Macanal-Santa María, se encuentra el sistema de fallas de Tesalia (para más información ver Capítulo 1). Además, en esta zona se tienen datos termocronológicos que alimentan el modelo termocinemático.

Finalmente, la tercera área (Bogotá - Villavicencio) es un ejemplo fascinante de la complejidad geológica, donde la acumulación de rocas Mesozoicas y Cenozoicas, refleja una historia de intensa actividad tectónica. Estas secuencias rocosas, que pueden alcanzar espesores de

hasta 5000 m, son el resultado de procesos geológicos que incluyen la depositación de sedimentos y la posterior deformación por plegamiento. Los pliegues simétricos y asimétricos evidencian variaciones en las fuerzas tectónicas y las condiciones de presión y temperatura a lo largo del tiempo geológico, lo que contribuye a la diversidad de estructuras y la preservación de sus características originales. Esta región es geológicamente compleja, caracterizada por la presencia de fallas inversas que impactan los sedimentos del periodo Cretácico. Entre las fallas más significativas se encuentran la de Bogotá, Ubaque, Las Mercedes, La Frutica, Gutiérrez y Río Cáqueza, las cuales emergen al suroeste de la zona estudiada, formando un sistema de cabalgamientos con una orientación predominante de N30°E a N80°E. A pesar de que las vergencias asociadas varían, estas estructuras son cruciales para entender la dinámica tectónica de la región. Además, estructuras secundarias como las del río Sáname y quebrada Honda, también juegan un papel importante, afectando a la Formación Lutitas de Macanal (Patiño et al., 2011).

3.2.3 Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos)

Teniendo en cuenta la cantidad de datos de termocronología disponibles en la cuenca Llanos, se selecciona como una de las zonas de estudio el sector que abarca el Sinclinal de Nunchía. La anterior es una estructura de rumbo SO-NE y de gran extensión; su núcleo está constituido por la Formación Caja (Tc). Este pliegue corresponde a una estructura asimétrica afectada en su eje por la falla Yopal, la cual parece ser la responsable del alineamiento de gran cantidad de ríos y quebradas a lo largo de su recorrido, principalmente el río Tocaría (para más información ver Capítulo 1). El área se encuentra afectada principalmente por los sistemas de fallas Guaicaramo y Borde Llanero, donde es posible identificar la presencia de secuencias sedimentarias terciarias de considerable espesor, afectadas por un intenso tectonismo.



3.2.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límites con la cuenca Caguán-Putumayo)

Esta zona cuenta con edades termocronológicas, cuya distribución espacial se concentra principalmente en dos áreas: el sector suroccidental y el sector centro-este. La zona suroccidental se encuentra conformada por dos bloques estructurales (Sibundoy y Caquetá) levantados y separados entre sí por el sistema de fallas Conejo. Estos bloques están compuestos por rocas volcánicas y plutónicas de edad Jurásica (Formación Saldaña) superpuestas por rocas sedimentarias del Cretácico-Paleoceno (Zapata et al., 2017; Rodríguez et al., 2018). El sector centro-este, está compuesto principalmente por el Complejo Garzón, el cual se encuentra atravesado por una serie de fallas de tipo inverso o de cabalgamiento que divide la zona en diversos bloques. Para el presente estudio, el sector suroccidental será tratado como Bloque Oeste (BO), mientras que la zona centro-este se denomina Bloque Este (BE).

3.3 Optimización de las corridas de los modelos directos

Durante el inicio de las corridas en el *software* Pecube se llevan a cabo diferentes consideraciones sobre la manera en la cual se debe correr cada modelo directo, mostrando que este método requiere una gran cantidad de tiempo y produce una cantidad mínima de modelos en dicho periodo. Por lo anterior, se plantean *scripts* en Python y Bash, los cuales inician con una matriz realizada en el *software* Excel (ver Figura 24). Dentro de esta matriz se definen los parámetros variables y estables de las entradas de fallas y topografía pertenecientes a Pecube. También, se resuelven una cantidad infinita de variaciones de los parámetros. En términos prácticos, se plantea **n** cantidad de modelos para cada variable de las matrices de entradas. Logrando así correr de 2000 a 8000 modelos por área de estudio y obteniendo una visión más amplia de los mejores parámetros para el modelo dentro del universo de modelos corridos.

Los modelos se realizaron bajo la siguiente configuración de cómputo: 12 computadores de la marca HP con sistema operativo Windows 11, de los cuales, 10 de estos equipos cuentan con procesadores Intel i5 de octava generación y 2 con procesadores AMD RYZEN 5 y con 8 procesadores lógicos, RAM de 8 a 16 Gb y 6 consolas de Cygwin por computadora. Cabe resaltar que esta configuración fue diseñada por los coinvestigadores adscritos al presente proyecto en el Laboratorio de Geotermocronología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Seccional Sogamoso, llegando así a un modelo con el menor *misfit*, que responde a los mejores parámetros fijos y variables de la cuenca analizada.

El algoritmo diseñado en Bash tiene el propósito de ejecutar Pecube de una manera más eficiente, es decir, optimizando tiempos. Para lo anterior, se estableció la ruta de entrada de la matriz de Excel, el número de corridas por modelo, la ruta de salida para grabar los valores de *misfit* y el tiempo total de cada corrida, como se muestra en la Figura 25.

Aquí hay una explicación paso a paso del *script*:

- Crea una carpeta llamada ALL_RUN si aún no existe.
- Crea un archivo misfits.csv si aún no existe.
- Escribe encabezados en el archivo misfits.csv.
- Define el rango de filas a procesar en el archivo CSV corridas1.csv.
- Itera sobre cada línea del archivo CSV corridas1.csv.
- Dentro del bucle, crea un directorio para cada corrida.
- Modifica algunos archivos de configuración basados en los valores de la fila actual del archivo CSV.
- Ejecuta el programa Pecube y redirige la salida a un archivo de registro específico para cada corrida.
- Extrae las líneas relevantes del archivo de registro para obtener los valores de misfit y tiempo total.
- Escribe estos valores en el archivo CSV misfits.csv.
- Copia los archivos de configuración modificados a la carpeta de la corrida.
- Mueve la carpeta de la corrida a la carpeta ALL_RUN.

A continuación, se relaciona el algoritmo creado para la optimización del *software* Pecube, para que el lector pueda replicar la metodología aplicada en esta investigación:

```

1 #!/bin/bash
2 #Hacer corridas en pecube desde una matriz principal
3
4 #crear carpeta para almacenar las carpetas de las corridas
5 mkdir -p ../ALL_RUN*
6
7 #crear csv para almacenar los Misfit
8 >> ../misfits.csv
9 >> misfits.csv
10
11 # Rango a procesar
12 Fila_inicio=2150
13 Fila_final=2154
14
15 # Verificar si el archivo ../misfits.csv ya existe y no está vacío
16 if [ -s ../misfits.csv ] && grep -q 'corrida: Misfit; Total_time' ../misfits.csv; then
17     echo "El archivo ../misfits.csv ya contiene los encabezados."
18 else
19     # Agregar encabezados del csv sin sobrescribir si no existen
20     echo 'corrida: Misfit; Total_time' >> ../misfits.csv
21     echo "Se han agregado los encabezados al archivo ../misfits.csv."
22 fi
23
24 # Verificar si el archivo misfits.csv ya existe y no está vacío
25 if [ -s misfits.csv ] && grep -q 'corrida: Misfit; Total_time' misfits.csv; then
26     echo "El archivo misfits.csv ya contiene los encabezados."
27 else
28     # Agregar encabezados del csv sin sobrescribir si no existen
29     echo 'corrida: Misfit; Total_time' >> misfits.csv
30     echo "Se han agregado los encabezados al archivo misfits.csv."
31 fi
32
33 # Verificar si AnyDesk ya está en ejecución
34 if pgrep -x "AnyDesk" > /dev/null; then
35     echo "AnyDesk ya está en ejecución."
36 else
37     # Si AnyDesk no está en ejecución, abrirlo
38     "C:/Program Files (x86)/AnyDesk/AnyDesk.exe" &
39 fi
40
41 #contador de fila
42 contador=1
43
44 while IFS=' ' read -r a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z aa ab ac ad ae af ag ah ai aj ak al am an ao ap aq ar as at au av aw id; do
45
46     #verificador si la línea que se desea procesar está en el Rango
47     if [ $contador -ge $Fila_inicio ] && [ $contador -le $Fila_final ]; then
48
49         # Crear directorio
50         mkdir -p ../$id
51
52         # indicar en pantalla la corrida
53         echo "Corrida: $id"
54
55         # Modificar topo_parameters.txt
56         sed -i "$a/./$id/" ./input/topo_parameters.txt # nombre de la corrida
57         sed -i "$0s/./$a/" ./input/topo_parameters.txt # escala erosional en el tiempo
58         sed -i "$8s/./$b. $c. $d. $e/" ./input/topo_parameters.txt # variación topográfica
59         sed -i "$2s/./$f/$g,$h,$i,$j,$k,$l/" ./input/topo_parameters.txt # parámetros termales y espesores
60
61         # Cuántas fallas se involucran en la corrida
62         sed -i "$2s/./$n/" ./input/fault_parameters.txt
63
64         if [ "$n" -ge 1 ]; then # si hay 1 falla activa
65
66             sed -i "$19s/./$n/" ./input/fault_parameters.txt
67
68             if [ "$n" -eq 1 ]; then
69                 # Modificar fault_parameters.txt
70                 sed -i "$22s/./$o $ $p/" ./input/fault_parameters.txt
71                 sed -i "$23s/./" /" ./input/fault_parameters.txt
72                 sed -i "$24s/./" /" ./input/fault_parameters.txt
73                 sed -i "$25s/./" /" ./input/fault_parameters.txt
74
75             elif [ "$n" -eq 2 ]; then
76                 # Modificar fault_parameters.txt

```



```

77     sed -i "22s/./\$u \$p \$s/" ./input/fault_parameters.txt
78     sed -i "23s/./\$p 0 \$t/" ./input/fault_parameters.txt
79     sed -i "24s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
80     sed -i "25s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
81
82     elif [ "$Sn" -eq 3 ]; then
83         # Modificar fault_parameters.txt
84         sed -i "22s/./\$o \$p \$s/" ./input/fault_parameters.txt
85         sed -i "23s/./\$p \$q \$t/" ./input/fault_parameters.txt
86         sed -i "24s/./\$q 0 \$u/" ./input/fault_parameters.txt
87         sed -i "25s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
88
89         elif [ "$Sn" -eq 4 ]; then
90             # Modificar fault_parameters.txt
91             sed -i "22s/./\$o \$p \$s/" ./input/fault_parameters.txt
92             sed -i "23s/./\$p \$q \$t/" ./input/fault_parameters.txt
93             sed -i "24s/./\$q \$z \$u/" ./input/fault_parameters.txt
94             sed -i "25s/./\$z 0 \$v/" ./input/fault_parameters.txt
95
96         fi
97     fi
98
99     if [ "$Sm" -ge 2 ]; then # si hay 2 falla activa
100
101         sed -i "37s/./\$w/" ./input/fault_parameters.txt
102
103         if [ "$Sw" -eq 1 ]; then
104             # Modificar fault_parameters.txt
105             sed -i "40s/./\$x 0 \$ab/" ./input/fault_parameters.txt
106             sed -i "41s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
107             sed -i "42s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
108             sed -i "43s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
109
110             elif [ "$Sw" -eq 2 ]; then
111                 # Modificar fault_parameters.txt
112                 sed -i "40s/./\$x \$y \$ab/" ./input/fault_parameters.txt
113                 sed -i "41s/./\$y 0 \$ac/" ./input/fault_parameters.txt
114                 sed -i "42s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
115
116                 sed -i "43s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
117
118             elif [ "$Sw" -eq 3 ]; then
119                 # Modificar fault_parameters.txt
120                 sed -i "40s/./\$x \$y \$ab/" ./input/fault_parameters.txt
121                 sed -i "41s/./\$y \$z \$ac/" ./input/fault_parameters.txt
122                 sed -i "42s/./\$z 0 \$ad/" ./input/fault_parameters.txt
123                 sed -i "43s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
124
125             elif [ "$Sw" -eq 4 ]; then
126                 # Modificar fault_parameters.txt
127                 sed -i "40s/./\$x \$y \$ab/" ./input/fault_parameters.txt
128                 sed -i "41s/./\$y \$z \$ac/" ./input/fault_parameters.txt
129                 sed -i "42s/./\$z \$aa \$ad/" ./input/fault_parameters.txt
130                 sed -i "43s/./\$aa 0 \$ae/" ./input/fault_parameters.txt
131
132             fi
133         fi
134
135         if [ "$Sm" -ge 3 ]; then # si hay 3 falla activa
136
137             sed -i "55s/./\$af/" ./input/fault_parameters.txt
138
139             if [ "$Saf" -eq 1 ]; then
140                 # Modificar fault_parameters.txt
141                 sed -i "58s/./\$ag 0 \$ak/" ./input/fault_parameters.txt
142                 sed -i "59s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
143                 sed -i "60s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
144                 sed -i "61s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
145
146             elif [ "$Saf" -eq 2 ]; then
147                 # Modificar fault_parameters.txt
148                 sed -i "58s/./\$ag \$ah \$ak/" ./input/fault_parameters.txt
149                 sed -i "59s/./\$ah 0 \$al/" ./input/fault_parameters.txt
150                 sed -i "60s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
151                 sed -i "61s/./ /" ./input/fault_parameters.txt
152
153             elif [ "$Saf" -eq 3 ]; then

```

```

153 # Modificar fault_parameters.txt
154 sed -i "58s/./$/ $ah $ak/" ./input/fault_parameters.txt
155 sed -i "59s/./$/ $ah $ai $al/" ./input/fault_parameters.txt
156 sed -i "60s/./$/ $ai 0 $am/" ./input/fault_parameters.txt
157 sed -i "61s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
158
159 elif [ "$saf" -eq 4 ]; then
160 # Modificar fault_parameters.txt
161 sed -i "58s/./$/ $ah $ak/" ./input/fault_parameters.txt
162 sed -i "59s/./$/ $ah $ai $al/" ./input/fault_parameters.txt
163 sed -i "60s/./$/ $ai $aj $am/" ./input/fault_parameters.txt
164 sed -i "61s/./$/ $aj 0 $an/" ./input/fault_parameters.txt
165
166 fi
167
168 fi
169
170 if [ "$sm" -ge 4 ]; then # si hay 4 falla activa
171
172     sed -i "73s/./$/ $ao/" ./input/fault_parameters.txt
173
174     if [ "$sao" -eq 1 ]; then
175 # Modificar fault_parameters.txt
176 sed -i "76s/./$/ $ap 0 $at/" ./input/fault_parameters.txt
177 sed -i "77s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
178 sed -i "78s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
179 sed -i "79s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
180
181     elif [ "$sao" -eq 2 ]; then
182 # Modificar fault_parameters.txt
183 sed -i "76s/./$/ $ap $at/" ./input/fault_parameters.txt
184 sed -i "77s/./$/ $ap 0 $au/" ./input/fault_parameters.txt
185 sed -i "78s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
186 sed -i "79s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
187
188     elif [ "$sao" -eq 3 ]; then
189 # Modificar fault_parameters.txt
190 sed -i "76s/./$/ $ap $at/" ./input/fault_parameters.txt
191 sed -i "77s/./$/ $ap $ar $au/" ./input/fault_parameters.txt
192 sed -i "78s/./$/ $ar 0 $av/" ./input/fault_parameters.txt
193 sed -i "79s/./$/ /" ./input/fault_parameters.txt
194
195     elif [ "$sao" -eq 4 ]; then
196 # Modificar fault_parameters.txt
197 sed -i "76s/./$/ $ap $at/" ./input/fault_parameters.txt
198 sed -i "77s/./$/ $ap $ar $au/" ./input/fault_parameters.txt
199 sed -i "78s/./$/ $ar $as $av/" ./input/fault_parameters.txt
200 sed -i "79s/./$/ $as 0 $aw/" ./input/fault_parameters.txt
201
202     fi
203
204 fi
205
206 # Archivo de registro específico para cada corrida
207 log_file="./$id/WHMisfit_$id.txt"
208
209 # Ejecutar Pecube y redirigir salida a archivo temporal y consola
210 ./bin/Pecube.exe >&1 | tee >(grep -E "Misfit|Total times" > "$log_file")
211
212 # Utilizar grep para extraer líneas específicas
213 misfit_line=$(grep "Misfit" "$log_file" | awk '{print $NF}')
214 total_times_line=$(grep "Total times" "$log_file" | awk '{print $NF}')
215
216 # Escribir en el archivo CSV
217 echo "$id:$misfit_line:$total_times_line" >> ./misfits.csv
218 echo "$id:$misfit_line:$total_times_line" >> misfits.csv
219
220 # Copiar archivos modificados a la carpeta de la corrida
221 cp ./input/fault_parameters.txt "$id"
222 cp ./input/tpc_parameters.txt "$id"
223
224 # mover la carpeta de la corrida a la carpeta madre de corridas ALL_RUN
225 mv "$id" "../ALL_RUN"
226
227 # Verificar AnyDesk cada 10 corridas
228 if (( contador % 10 == 0 )); then
229 # Verificar si AnyDesk ya está en ejecución
230 if dorep -x "AnyDesk" > /dev/null; then
231     echo "AnyDesk ya está en ejecución."
232 else
233     # Si AnyDesk no está en ejecución, abrirlo
234     "C:/Program Files (x86)/AnyDesk/AnyDesk.exe" &
235 fi
236 fi
237
238 # Incremento del contador
239 ((contador++))
240 done < ./PlantillaFelipe.csv

```

Figura 25. Modelo programado en Bash.



3.4 Estructuración de los datos de entrada

Para la ejecución de Pecube se estructuraron los datos de entrada y conjuntamente se crearon archivos de texto para las fallas y la topografía (Apartado 3.4.1 y 3.4.2). Estos archivos contienen información para cada una de las áreas de estudio concerniente a los parámetros tectónicos, flexurales, dinámicos, mecánicos y de superficie.

El documento de fallas considera las siguientes variables: coordenadas del lineamiento (sistema WGS84), número de fallas activas en el bloque evaluado para un determinado tiempo, profundidad del lineamiento (km), tasas de exhumación y número de periodos en los que la o las fallas, se estaban desplazando.

El documento de topografía considera las siguientes variables: densidad del manto (kg/m^3), densidad de la corteza (kg/m^3), isostasia, espesor cortical (km), espesor litosférico elástico efectivo (km), difusividad térmica (km^2/Ma), módulo de Young (Pa), relación de Poisson, producción de calor ($^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$), tasa de variación atmosférica ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$), temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) y la temperatura en la base del modelo ($^{\circ}\text{C}$). En todos los modelos directos desarrollados en este estudio, se mantuvo constante la topografía, asumiendo que estaba en equilibrio. No fueron consideradas las fluctuaciones de creación o erosión del relieve.

Dos categorías fueron usadas para separar estos parámetros. En primer lugar, los parámetros variables, aquellos que experimentaron variaciones relevantes o participaron en la conformación final del paisaje; y, en segundo lugar, los parámetros fijos, que, se supone, no tuvieron variación significativa y se pueden despreciar en el modelado.

Se llevó a cabo una evaluación individual para cada área de estudio según sus características específicas. La parametrización definida para cada bloque, está resumida en las siguientes secciones.

3.4.1 Matriz de edades

Se crearon matrices para describir cada zona de estudio (Tabla 12), teniendo en cuenta las siguientes variables: i) nombre de la muestra, ii) ubicación geográfica (longitud, latitud y elevación en sistema de coordenadas WGS84), iii) edades termocronológicas (Ma con su error) para los siguientes sistemas termocronométricos: (U-Th)/He en apatito y circón, trazas de fisión en apatito y circón, Ar-Ar en moscovita, biotita, hornblenda y feldespato, iv) se reportaron 17 longitudes de trazas de fisión en apatito, normalizadas en función de la media, para las muestras con menor longitud que el número requerido se utilizó un algoritmo implementado en el *software* R. Este algoritmo genera 17 longitudes sintéticas aleatorias basadas en la longitud media proporcionada por el autor y el rango de error de la medición.

Tabla 12. Estructura del encabezado para las matrices de edades para cada una de las zonas de estudio.

Nombre campo	Descripción del campo
Nombre	Nombre de la muestra
X	Longitud
Y	Latitud
Z	Altitud
AHe	Edad mediante el método de U-Th/He en apatitos
errorAHe	Error calculado de la edad por el método U-Th/He en apatitos
AFT	Edad mediante el método por trazas de fisión en apatitos
errorAFT	Error calculado de la edad por el método por trazas de fisión en apatitos
ZHe	Edad mediante el método de U-Th/He en circones
errorZHe	Error calculado de la edad por el método U-Th/He en circones
ZFT	Edad mediante el método por trazas de fisión en circones
errorZFT	Error calculado de la edad por el método por trazas de fisión en circones
ArArKsp	Edad mediante el método Ar/Ar en feldespatos
errorArArK	Error calculado de la edad por el método Ar/Ar en feldespatos



Nombre campo	Descripción del campo
BioArAr	Edad mediante el método Ar/Ar en biotitas
errorBioAr	Error calculado de la edad por el método Ar/Ar en biotitas
MuscArAr	Edad mediante el método Ar/Ar en moscovitas
errorMusco	Error calculado de la edad por el método Ar/Ar en moscovitas
HbnArAr	Edad mediante el método Ar/Ar en hornblendas
errorHbnAr	Error calculado de la edad por el método Ar/Ar en hornblendas
FTL1 a FTL17	Longitud de trazas de fisión normalizadas

3.4.2 Establecimiento de parámetros fijos y variables

3.4.2.1 Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental (límites con la cuenca Valle Medio del Magdalena)

Esta zona cuenta con una totalidad de 25 muestras con dataciones termocronológicas (Tabla 13), obtenidas de Sánchez et al. (2012). Las muestras se fecharon por el método de trazas de fisión en apatito (AFT).

Tabla 13. Características de la matriz de edades para la cuenca Valle Medio del Magdalena.

Sinclinal de Armas	
Número de muestras evaluadas	25
Ubicación geográfica	-74,113, 6,124; -73,652, 6,665
Información termocronológica disponible	25 edades AFT
Longitudes de trazas de fisión	Reportadas por los autores y calculadas de manera aleatoria a partir de la longitud media y el error reportado.

Los archivos de entrada (fallas y topografía) se presentan en la Tabla 14. Además, en la tabla 15 se presentan los parámetros de fases, tiempo y tasas de exhumación que dieron origen al mejor modelo, para el sector Sinclinal de Armas de la cuenca Valle Medio del Magdalena.

Tabla 14. Parámetros fijos establecidos para el sector Sinclinal de Armas, de la cuenca Valle Medio del Magdalena.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	
Densidad de la corteza	Pc	2700	kg/m ³	
Densidad del manto	Pm	3200	kg/m ³	
Módulo de Young	E	1.d11	Pa	
Relación de Poisson	V	0,25	NA	
Espesor elástico efectivo	Te	20	km	
Espesor del modelo	L	35	km	
Difusividad térmica	K	25	km ² /Ma	
Temperatura superficial	T0	20	°C	
Tasa de variación atmosférica	B=dT/dZ	6,5	°C/km	
Tiempo inicial de variación topográfica	Ti	200	Ma	
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-74,113	6,124	-73,652	6,665

Tabla 15. Parámetros variables establecidos para el sector Sinclinal de Armas, de la cuenca Valle Medio del Magdalena.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	400 - 1000	°C
Producción de calor	H	6 - 10	°C/Ma
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-2	NA
Número de fases de exhumación falla 1b	I	1-2	NA

3.4.2.2 Eje Axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental

Esta zona se dividió en tres áreas objeto de estudio. La primera zona está localizada en los alrededores de los municipios de Macanal y Santa María.



Esta área posee un total de 12 muestras con dataciones termocronológicas (Tabla 16), tomadas de Cheilletz et al. (1997), Parra et al. (2009a) y Odoh et al. (2019). De manera específica, se reportan 1 edad por AFT de $13,8 \pm 2,6$ Ma, cuyas longitudes medias no han sido reportadas; 7 edades por U-Th/He en circón en el rango de $12,4 \pm 1,2$ Ma a $80,2 \pm 6,8$ Ma; 2 edades por ZFT de $15,7 \pm 1,5$ Ma y $24,9 \pm 1,4$ Ma y 2 edades por moscovita argón-argón de $65 \pm 1,9$ Ma y $65,2 \pm 1,4$ Ma. La segunda zona de estudio localizada en la zona axial Macizo de Floresta, cuenta con una totalidad de 38 muestras con dataciones termocronológicas (Tabla 16), tomadas de Parra et al. (2009b), Mora et al. (2010a), Ramírez-Arias et al. (2012), Saylor et al. (2012) y Reyes-Harker et al. (2015), de las cuales, 16 corresponden a nuevos datos (ver Anexos) producto del trabajo interno del Laboratorio de Termocronología de la UPTC. La ubicación de los nuevos datos termocronológicos son mostradas en la Figura 26. En particular, se reportan 2 edades (U-Th)/He en apatito de $6,7 \pm 0,5$ Ma y $11,3 \pm 0,7$ Ma; 31 edades (U-Th)/He en circón en el rango de $23,1 \pm 1,6$ Ma a $68,2 \pm 5,5$ Ma y 8 edades de trazas de fisión en apatito (AFT) que van de $10,5 \pm 1,7$ a $25,9 \pm 2,2$ Ma, cuyas longitudes medias han sido reportadas en su mayoría. La tercera zona está localizada en el área de Bogotá-Villavicencio, esta cuenta con un total de 30 muestras (Tabla 16), que corresponde a 1 edad (U-Th)/He en apatito (AHe) de $26,4 \pm 1,6$ Ma, 17 edades por AFT entre $0,8 \pm 0,3$ a $14,3 \pm 3,8$ y 12 edades por ZFT entre $5,9 \pm 0,4$ Ma a $136,5 \pm 13,4$ Ma (Mora et al., 2009; 2010a; Parra et al., 2009a; b).

Tabla 16. Características de las matrices de edades para la cuenca Cordillera Oriental.

Zona Macanal – Santa María	
Número de muestras evaluadas	12
Ubicación geográfica	Latitud, longitud y elevación fueron extraídas de los mapas presentados por los autores.

Zona Macanal – Santa María	
Información termocronológica disponible	1 edades AFT
	7 edades ZHe
	2 edades ZFT
	2 edades Musc ArAr
Longitudes de trazas de fisión	Sin información sobre la longitud de las trazas.
Zona axial Macizo de Floresta	
Número de muestras evaluadas	38
Ubicación geográfica	Latitud, longitud y elevación fueron reportadas por los autores
Información termocronológica disponible	2 edades AHe
	31 edades ZHe
	8 edades AFT
Longitudes de trazas de fisión	Generadas de manera aleatoria a partir de la media y el error reportado.
Zona Bogotá - Villavicencio	
Número de muestras evaluadas	30
Ubicación geográfica	Latitud, longitud y elevación fueron extraídas de los mapas presentados por los autores.
	1 edades U-Th/He en apatito (AHe)
Información termocronológica disponible	17 edades AFT
	12 edades ZFT
Longitudes de trazas de fisión	Sin información sobre la longitud de las trazas.



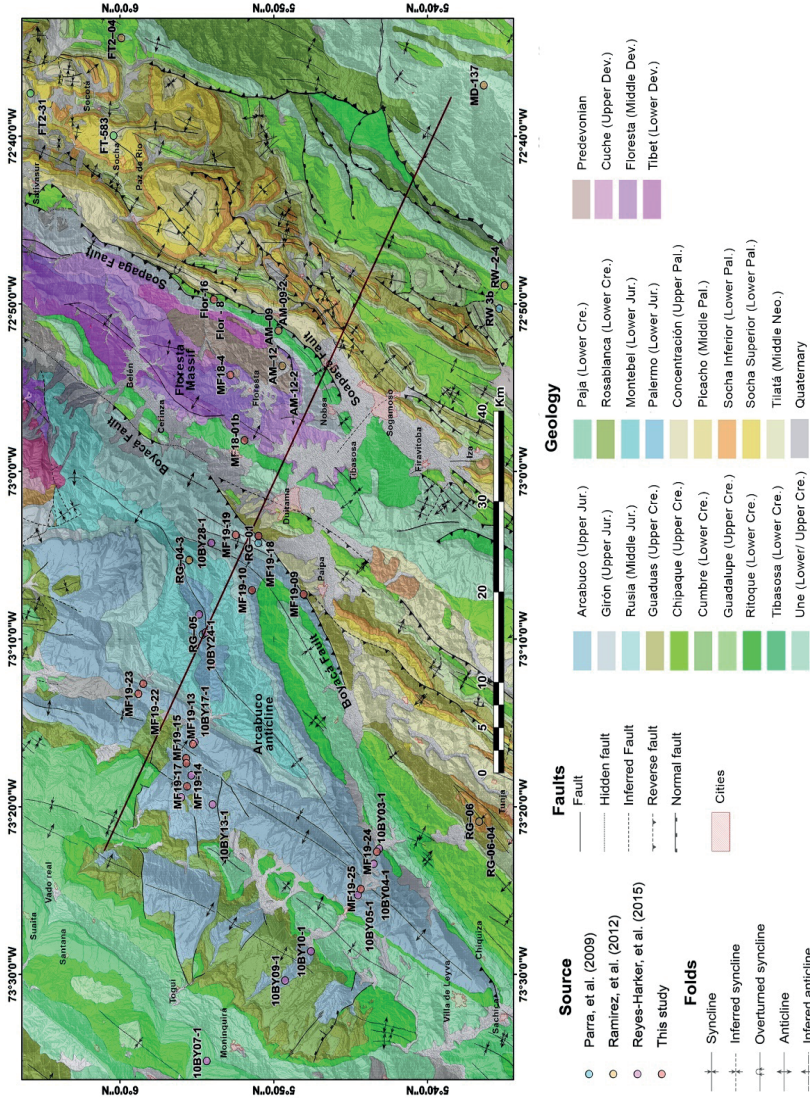


Figura 26. Edades termocronológicas disponibles a lo largo del Eje Axial de la Cordillera Oriental.
Fuente: Tomado de Sandoval-Espinel et al. (2025).

Los archivos de entrada (topografía y falla) se presentan en las tabla 17 a 22, donde se muestra la parametrización utilizada durante la realización de los modelos. Se observan los parámetros de fases, tiempo y tasas de exhumación que dieron origen al mejor modelo para los sectores Macanal - Santa María, parte axial del Macizo de Floresta y la zona Bogotá – Villavicencio. Los datos termocronológicos para esta última zona se tomaron de Mora et al. (2008) y Parra et al. (2009b).

Tabla 17. Parámetros establecidos para el sector Macanal - Santa María de la cuenca Cordillera Oriental.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	
Densidad de la corteza	Pc	2750	kg/m ³	
Densidad del manto	Pm	3200	kg/m ³	
Módulo de Young	E	1.d11	Pa	
Relación de Poisson	V	0,25	NA	
Espesor elástico efectivo	Te	20	km	
Espesor del modelo	L	53	km	
Difusividad térmica	K	25	km ² /Ma	
Temperatura superficial	T0	24	°C	
Tasa de variación atmosférica	B=dT/dZ	5,5	°C/km	
Tiempo inicial de variación topográfica	Ti	99	Ma	
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-73,307	4,715	-73,103	4,931

Tabla 18. Parámetros variables establecidos para el sector Macanal – Santa María, de la cuenca Cordillera Oriental.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	600 - 1000	°C
Producción de calor	H	4 - 10	°C/Ma

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-2	NA
Número de fases de exhumación falla 1b	I	1-3	NA

Tabla 19. Parámetros fijos establecidos para el sector axial (Macizo de Floresta) de la cuenca Cordillera Oriental.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	
Densidad de la corteza	Pc	2750	kg/m ³	
Densidad del manto	Mm	3200	kg/m ³	
Módulo de Young	E	1.d11	Pa	
Relación de Poisson	V	0,25	NA	
Espesor elástico efectivo	Tc	20	km	
Espesor del modelo	L	35	km	
Difusividad térmica	K	25	km ² /Ma	
Temperatura superficial	T0	15	°C	
Tasa de variación atmosférica	B=dT/dZ	5,5	°C/km	
Tiempo inicial de variación topográfica	Ti	120	Ma	
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-72,907	6,054	-73,175	5,674

Tabla 20. Parámetros variables para el sector axial (Macizo de Floresta) de la cuenca Cordillera Oriental.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	700 - 1000	°C
Producción de calor	H	6 - 10	°C/Ma

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-2	NA
Número de fases de exhumación falla 1b	I	1-2	NA

Tabla 21. Parámetros fijos establecidos para el sector Bogotá - Villavicencio, de la cuenca Cordillera Oriental.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	
Densidad de la corteza	Pc	2750	kg/m ³	
Densidad del manto	Pm	3200	kg/m ³	
Módulo de Young	E	1.d11	Pa	
Relación de Poisson	V	0,25	NA	
Espesor elástico efectivo	Te	20	km	
Espesor del modelo	L	50	km	
Difusividad térmica	K	25	km ² /Ma	
Temperatura superficial	T0	20	°C	
Tasa de variación atmosférica	B=dT/dZ	6,5	°C/km	
Tiempo inicial de variación topográfica	Ti	130	Ma	
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-73,512	4,663	-74,165	4,030

Tabla 22. Parámetros variables establecidos para el sector Bogotá - Villavicencio, de la cuenca Cordillera Oriental.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	500 - 1000	°C
Producción de calor	H	3 - 10	°C/Ma
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-1	NA



3.4.2.3 Piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos)

En esta zona se eligió el sector del Sinclinal de Nunchía, el cual cuenta con un total de 19 dataciones termocronológicas de baja temperatura (Tabla 23) para la realización de los modelos directos. Específicamente, 11 datos recolectados de Mora et al. (2010a), Ramírez-Arias et al. (2012) y Horton et al. (2010a; b), y 8 nuevos datos proporcionados por los proyectos internos desarrollados por parte del Laboratorio de Geotermocronología (ver Figura 27). Los cuales se encuentran distribuidas de la siguiente manera: 11 datos por trazas de fisión en apatito (AFT) dentro del intervalo de edades de $6,7 \pm 3,9$ a $30,9 \pm 3,1$ Ma, con mediciones de longitudes de trazas en la mayoría de las muestras y 8 datos por (U-Th)/He en circón (ZHe) con edades que varían de $47,9 \pm 3,7$ a $79 \pm 8,3$ Ma (Anexo 2).

Tabla 23. Características de las matrices de edades para la zona piedemonte oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Llanos).

Sinclinal de Nunchía	
Número de muestras evaluadas	19
Ubicación geográfica	De los mapas y anexos presentados por los diferentes autores se extrajo latitud, longitud y elevación.
Información termocronológica disponible	11 edades AFT 8 edades ZHe
Longitudes de trazas de fisión	Reportadas por los autores y calculadas de manera aleatoria a partir de la media y el error reportado.

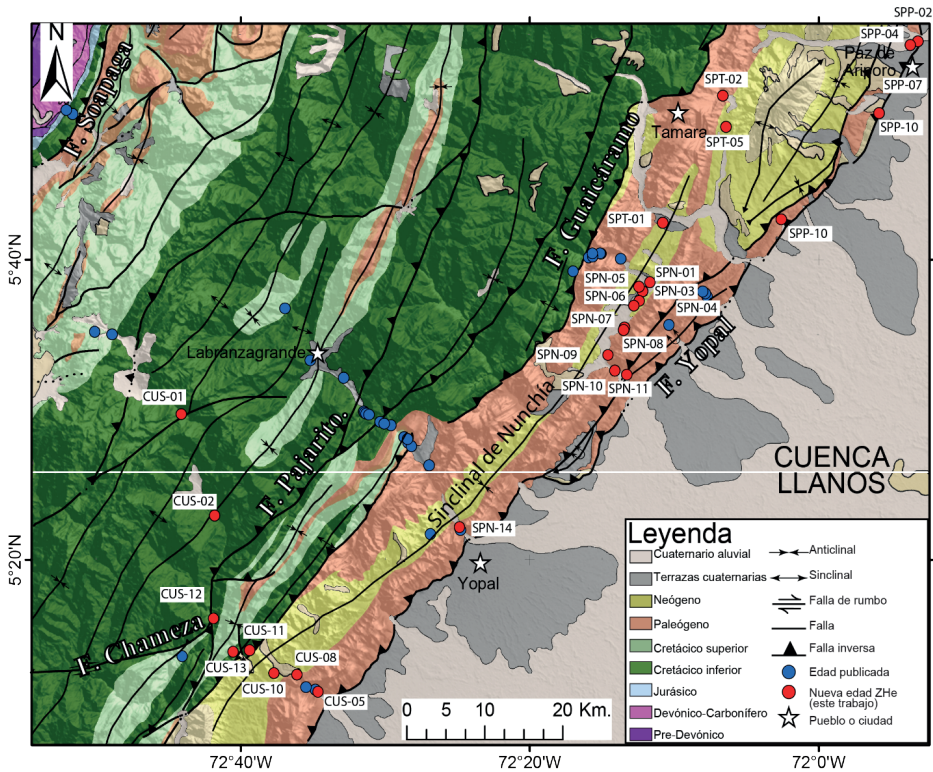


Figura 27. Edades termocronológicas disponibles a lo largo del piedemonte oriental y límites con la cuenca Llanos.

Los archivos de entrada (topografía y falla) se presentan en la tabla 24 y 25, se observan los parámetros de fases, tiempo y tasas de exhumación que dieron origen al mejor modelo para el sector del Sinclinal de Nunchía de la cuenca Llanos.

Tabla 24. Parámetros fijos establecidos para el sector Sinclinal de Nunchía, de la cuenca Llanos.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad de la corteza	Pc	2700	kg/m ³
Densidad del manto	Pm	3200	kg/m ³

Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro		Símbolo	Valor	Unidad
Módulo de Young		E	1.11	Pa
Relación de Poisson		V	0,25	NA
Espesor elástico efectivo		Te	20	km
Espesor del modelo		L	35	km
Difusividad térmica		K	25	km ² /Ma
Temperatura superficial		T0	25	°C
Tasa de variación atmosférica		B=dT/dZ	5,5	°C/km
Tiempo inicial de variación topográfica		Ti	60	Ma
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-71,904	5,875	-72,311	5,410

Tabla 25. Parámetros variables establecidos para el Sinclinal de Nunchía, de la cuenca Llanos.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	500 - 1000	°C
Producción de calor	H	6 - 10	°C/Ma
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-2	NA
Número de fases de exhumación falla 1b	I	1-2	NA

3.4.2.4 Piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo)

Esta zona cuenta con una totalidad de 44 muestras con dataciones termocronológicas (Tabla 26), conformadas de la siguiente manera: 29 muestras provenientes de literatura de: Villagómez y Spikings (2013) y Pérez-Consuegra et al. (2021), y 15 muestras datadas en el marco del presente proyecto por AFT (ver Figura 28), que varían de $6,89 \pm 2,83$ a $13,9 \pm 7,8$ Ma, cuyas longitudes medias varían alrededor entre 13 a 14 μm (Anexo 1).

Tabla 26. Características de las matrices de edades para la zona piedemonte sur oriental de la Cordillera Oriental (límite con la cuenca Caguán-Putumayo).

Bloque Este (BE)	
Número de muestras evaluadas	31
Ubicación geográfica	Latitud, longitud y elevación fueron reportadas por los autores.
Información termocronológica disponible	32 edades AFT
Longitudes de trazas de fisión	Generadas de manera aleatoria a partir de la media y el error reportado.
Bloque Oeste (BO)	
Número de muestras evaluadas	13
Ubicación geográfica	De los mapas presentados por los diferentes autores sacaron latitud, longitud y elevación.
Información termocronológica disponible	3 edades AFT 7 edades AHe 3 edades ZHe
Longitudes de trazas de fisión	Sin información sobre la longitud de las trazas.



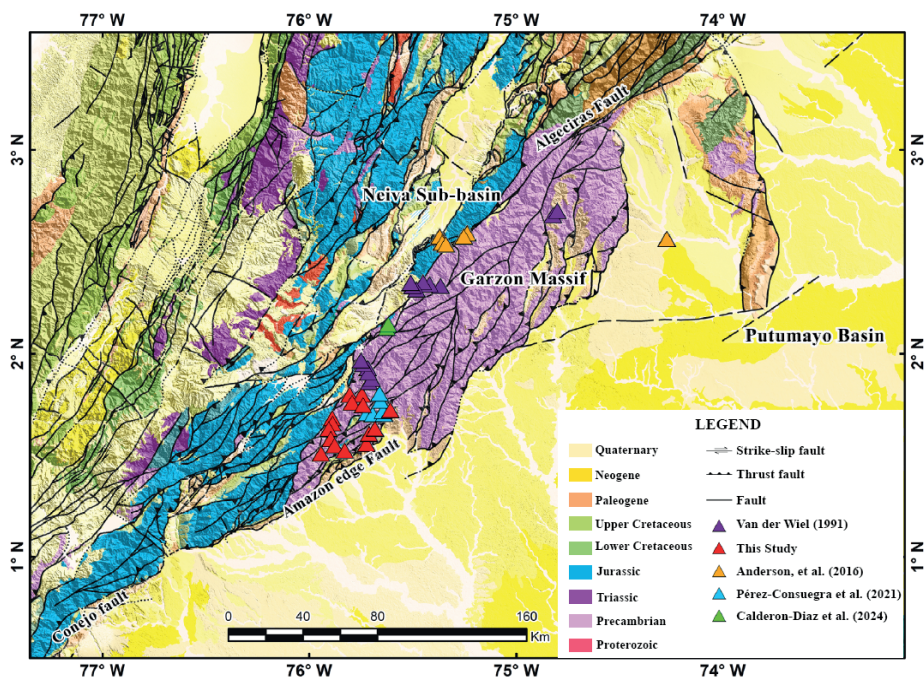


Figura 28. Edades termocronológicas disponibles a lo largo del Macizo de Garzón, cuenca Putumayo y sur de la Cordillera Oriental. Fuente: Tomado de Sandoval-Espinel et al. (2025).

Los archivos de entrada (topografía y falla), base para la ejecución de los modelos termocinmáticos directos para los bloques Este y Oeste de la cuenca Caguán-Putumayo, se presentan en las tabla 27a 30, en donde se muestra la parametrización utilizada durante la realización de dichos modelos y los datos obtenidos para la mejor corrida y, por ende, el mejor modelo.

Tabla 27. Parámetros fijos establecidos para el Bloque Este de la cuenca Caguán-Putumayo.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad de la corteza	Pc	2750	kg/m ³
Densidad del manto	Pm	3200	kg/m ³

Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro		Símbolo	Valor	Unidad
Módulo de Young		E	70	Pa
Relación de Poisson		V	0,25	NA
Espesor elástico efectivo		Te	20	km
Espesor del modelo		L	41	km
Difusividad térmica		K	25	km ² /Ma
Temperatura superficial		T ₀	25	°C
Tasa de variación atmosférica		B=dT/dZ	5,5	°C/km
Tiempo inicial de variación topográfica		Ti	60	Ma
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-76,978	0,803	-75,032	0,814

Tabla 28. Parámetros variables establecidos para el Bloque Este de la cuenca Caguán-Putumayo.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	800 - 1050	°C
Producción de calor	H	6 - 10	°C/Ma
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-4	NA

Tabla 29. Parámetros fijos establecidos para el Bloque Oeste de la cuenca Caguán-Putumayo.

Parámetros fijos y propiedades de los materiales			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad de la corteza	Pc	2750	kg/m ³
Densidad del manto	Pm	3200	kg/m ³
Módulo de Young	E	70	Pa
Relación de Poisson	V	0,25	NA
Espesor elástico efectivo	Te	20	km



Parámetros fijos y propiedades de los materiales				
Parámetro		Símbolo	Valor	Unidad
Espesor del modelo		L	41	km
Difusividad térmica		K	25	km ² /Ma
Temperatura superficial		T0	25	°C
Tasa de variación atmosférica		B=dT/dZ	5,5	°C/km
Tiempo inicial de variación topográfica		Ti	120	Ma
Fallas				
No	Punto inicial		Punto final	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
1	-77,229	0,808	-76,906	0,680

Tabla 30. Parámetros variables establecidos para el Bloque Oeste de la cuenca Caguán-Putumayo.

Parámetros variables			
Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Temperatura en la base del modelo	Ts	400 - 1000	°C
Producción de calor	H	6 - 10	°C/Ma
Número de fases de exhumación falla 1a	I	1-2	NA
Número de fases de exhumación falla 1b	I	1-2	NA

3.5 Compilación y verificación de los datos de salida

Después de realizar las corridas de los modelos en el *software* Pecube, se genera una carpeta que contiene *scripts* con los datos detallados de cada una de las ejecuciones. De esta carpeta, se identifica el mejor modelo predicho con el menor *misfit* y los mejores parámetros térmicos de la cuenca para este caso.

Con estos datos de salida de tipo numérico, se procede a la visualización haciendo uso del *software* MayaVi, de uso libre, que permite una visualización tridimensional interactiva de los datos. Estos incluyen distribuciones de temperatura y deformación a lo largo del tiempo, que

pueden ser complejos y voluminosos. Herramientas de visualización como MayaVi, permiten explorar estos datos en 3D, facilitando su análisis e interpretación. También proporcionan perspectivas valiosas para el estudio de la evolución geológica de una región. La visualización en 3D permite identificar características geológicas y patrones térmicos que no serían evidentes en gráficos 2D tradicionales.

MayaVi permite graficar las isotermas de las áreas de estudio. Estas isotermas se obtienen a partir de los datos calculados del mejor modelo directo generado en Pecube, utilizando el comando `bin/VTK`. Este comando toma el archivo VTK de la corrida y calcula los valores de las isotermas. En el modelado directo, los valores de temperatura en la base del modelo son variables; por lo tanto, el *software* determina la temperatura óptima del modelo en función de los datos de entrada.

Para los datos de edades, se encuentra el directorio “*Comparison*”, donde cada método de datación presenta las edades predichas y observadas organizadas en columnas. Estas edades se grafican en función de la altura o topografía, lo que nos permite analizar visualmente las discrepancias y concordancias entre los datos observados y los predichos.

3.6 Interpretación y análisis de datos de salida

Una vez identificado el modelo directo óptimo mediante el *software* Pecube para cada una de las zonas modeladas, se llevó a cabo un análisis comparativo detallado. Este análisis se centra en comparar las edades predichas por el modelo con las edades medidas, con respecto a la elevación. También se generó un modelo de velocidad y un modelo de temperatura, para el mejor modelo de cada cuenca, con su respectivo análisis.