

Análisis de resultados

La compilación de resultados de los rangos de *misfit* calculados en los modelos directos termocinemáticos se presenta de manera resumida en la Tabla 31. Esta tabla incluye datos como cantidad de modelos realizados, mejor corrida calculada y tiempo requerido para el cálculo de los modelos dentro del clúster computacional.

Tabla 31. Resultados de rangos misfit de las mejores corridas para las zonas de estudio.

Cuenca	Zona modelada	No. Modelos	Mejor corrida	Rango misfit de la mejor corrida modelada	Tiempo de cómputo
Valle Medio del Magdalena	Sinclinal del Armas	2001	R1003	0,032043 a 0,26822	527,265 s
Cordillera Oriental	Macanal - Santa María	4001	A0549	0,107744 a 0,55101	950,009 s
	Parte Axial - Macizo de Floresta	8000	J7730	0,04699 a 0,61366	430,0469 s
	Bogotá - Villavicencio	3800	D0333	1,00036 a 9,99783	360,0376 s
Llanos	Sinclinal de Nunchía	4032	Z2150	0,03204 a 0,26822	171,2512 s

Cuenca	Zona modelada	No. Modelos	Mejor corrida	Rango misfit de la mejor corrida modelada	Tiempo de cómputo
Caguán- Putumayo	Bloque Este	2000	C1334	0,00760 a 0,35005	704,6214 s
	Bloque Oeste	2000	K0169	0,14145 a 4,766451	242,3945 s

El mejor modelo para cada zona contiene los parámetros térmicos mostrados en la Tabla 32. Estos parámetros son claves para entender la evolución térmica y tectónica de estas regiones. Las diferencias observadas en estos parámetros reflejan la variabilidad geológica y térmica de las áreas modeladas.

Tabla 32. Parámetros resultantes de los mejores modelos considerados en las diferentes zonas de estudio.

Cuenca	Zona modelada	Parámetro	Valor modelado
Valle Medio del Magdalena	Sinclinal del Armas	Difusividad térmica	25 km ² /Ma
		Temperatura a la base del modelo	486 °C
		Producción de calor	7 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	6,5 °C/km
Cordillera Oriental	Macanal - Santa María	Difusividad térmica	25 km ² /Ma
		Temperatura a la base del modelo	972 °C
		Producción de calor	10 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	5,5 °C/km
	Parte Axial - Macizo de Floresta	Difusividad térmica	25 km ² /Ma
		Temperatura a la base del modelo	600 °C
		Producción de calor	3 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	6,5 °C/km
	Bogotá - Villavicencio	Difusividad térmica	25 km ² /Ma



Cuenca	Zona modelada	Parámetro	Valor modelado
Cordillera Oriental	Bogotá - Villavicencio	Temperatura a la base del modelo	600 °C
		Producción de calor	3 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	6,5 °C/km
Llanos	Sinclinal de Nunchía	Difusividad térmica	25 km ² /Ma
		Temperatura a la base del modelo	870 °C
		Producción de calor	6 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	5,5 °C/km
Caguán Putumayo	Bloque Este	Difusividad térmica	25 km ² /Ma
		Temperatura a la base del modelo	804 °C
		Producción de calor	10 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	5,5 °C/km
	Bloque Oeste	Difusividad térmica	25 km ² /Ma
		Temperatura a la base del modelo	885 °C
		Producción de calor	7 °C/Ma
		Tasa de variación atmosférica	5,5 °C/Ma

4.1 Edades predichas vs. edades medidas

Pecube predice edades con base en los caminos tiempo-temperatura calculados. Estas predicciones son comparadas con los datos medidos, demostrando la sensibilidad de los termocronómetros de baja temperatura a la evolución de la topografía superficial (Braun, 2003). Esta información es importante para comprender la evolución tectónica y geomorfológica de las áreas de estudio en las cuencas de Colombia.

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

En el Sinclinal de Armas, ubicado en la cuenca Valle Medio del Magdalena, las edades de AFT de las muestras medidas varían entre ~5 a 49 Ma.

Mientras que las edades predichas mediante modelamiento directo van de ~10 a 23 Ma. En la Figura 29, se observa una correspondencia entre algunas de las edades medidas con las predichas, con respecto a sus respectivas alturas. Aunque en algunos datos no existe esta correspondencia, el modelo puede seguirse calibrando.

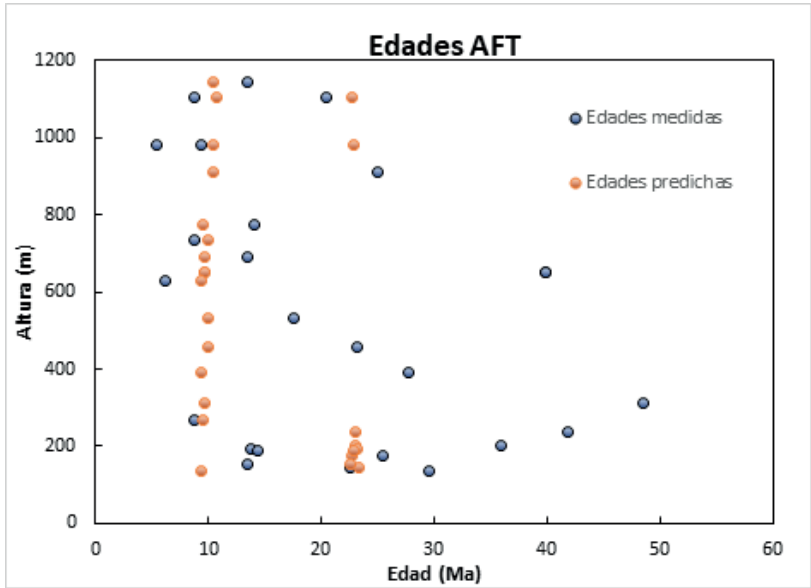


Figura 29. Comparación de edades medidas y predichas por el método AFT.

Para obtener una interpretación más precisa y completa de las edades termocronológicas, es esencial complementar los datos de AFT con información adicional proveniente de otros métodos termocronológicos. Métodos como ZFT (trazas de fisión en circón), ZHe (helio en circón) o AHe (helio en apatito) son necesarios para:

- Completar el espectro tiempo-temperatura, ya que proporciona un rango más amplio y detallado de las condiciones térmicas a las que ha sido sometida la cuenca.
- Mejorar la precisión del modelado termocronológico, al incorporar datos de múltiples fuentes.
- Proporcionar una visión holística, más completa y detallada de la

evolución térmica de la cuenca, facilitando una comprensión más profunda de los procesos geológicos.

4.1.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental

i. Área Macanal - Santa María

Para el bloque de Macanal - Santa María, la Figura 30a muestra la relación entre las edades medidas y predichas por el método de AFT a diferentes alturas. Se tiene una edad medida de ~13 Ma, mientras que la edad predicha es de ~7 Ma, en una altura de 2275 m. Esto indica que hay un margen de diferencia grande en estos datos. Por lo anterior, es recomendable obtener más edades por este método para calibrar mejor el modelo.

La Figura 30b, presenta la relación entre la edad medida y predicha por el método de helio en circonio a diferentes alturas. Las edades predichas de ZHe van de ~15 a 37 Ma y las edades medidas varían entre ~12 a 80 Ma. Se observa cierta dispersión de los datos, lo que indica variabilidad en la precisión de las predicciones.

La Figura 30c, muestra la relación entre la edad medida y predicha por el método de ZFT a diferentes alturas. Las edades medidas y predichas se encuentran en un rango de ~15 a 25 Ma. En general, el rango entre las edades medidas y predichas, no es grande, pero es importante calibrar el modelo con más datos.

La Figura 30d presenta la relación entre la edad medida y predicha por el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en moscovita a diferentes alturas. Las edades medidas son de ~65 Ma y las edades predichas son de ~62 Ma, en una altura que varía entre 1800 y 2000 m. Se observa un rango muy corto de diferencia entre los tipos de edades.

La Figura 31b, presenta la relación entre las edades medidas y predichas por el método de AFT a diferentes alturas. Las edades medidas varían entre ~ 0 a 15 Ma. Mientras que las edades predichas varían en un rango entre ~2 a 6 Ma. Como se observa en la figura, las edades predichas y medidas tienen una buena correspondencia. La altitud de las muestras varía entre 1000 y 3700 m.

La Figura 31c, presenta la relación entre las edades medidas y predichas por el método de ZFT a diferentes alturas. Las edades medidas varían entre ~5 a 19 Ma. Mientras que las edades predichas varían entre ~5 a 11 Ma. En la gráfica se muestra una buena correlación entre los dos tipos de datos. La altitud varía entre 1200 y 3700 m.

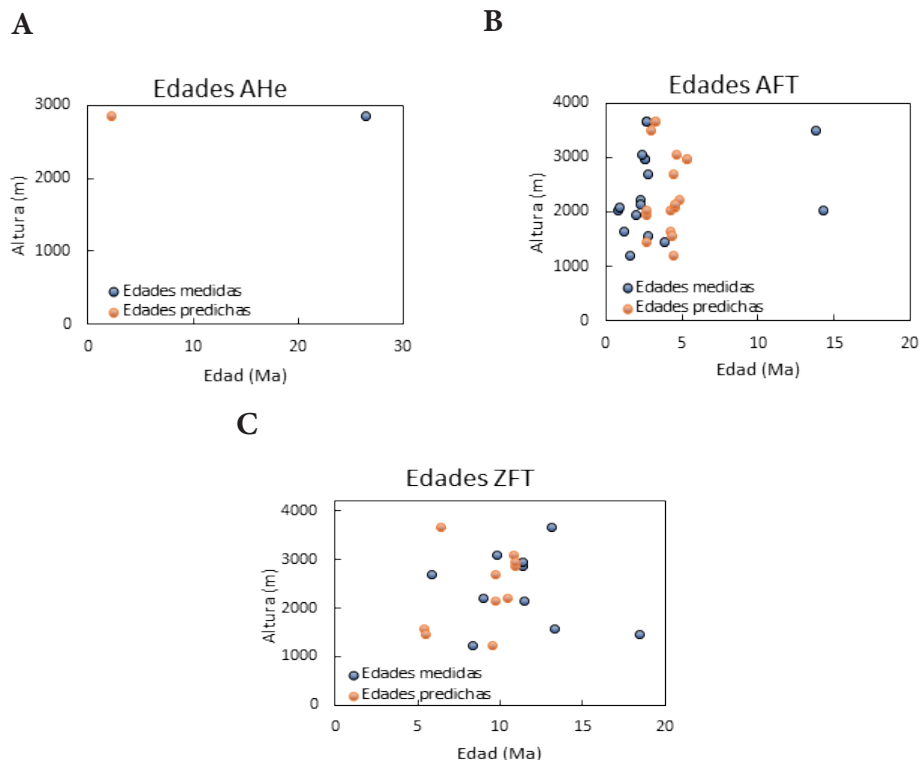


Figura 31. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en la zona Bogotá - Villavicencio.

iii. Área del Macizo de Floresta

La Figura 32a, compara las edades medidas y predichas por el método de AHe en función de la altura. Las edades medidas y predichas están relativamente dispersas, encontrándose en un rango de entre ~6 a 13 Ma. Las edades predichas no están muy lejanas a las medidas. La altitud varía entre 2400 y 3600 m.

La Figura 32b, muestra la relación entre las edades medidas y predichas por el método de AFT con respecto a la altura. Las edades medidas varían entre ~10 a 26 Ma. Las edades predichas están muy cercanas a las medidas, con respecto a su altitud, lo que indica un buen ajuste del modelo.

La Figura 32c de ZHe en función de la altura. Las edades medidas están en un rango que va de ~20 a 70 Ma. Mientras que las edades predichas están en un rango de ~27 a 40 Ma. En general, se observa una buena correlación entre los dos tipos de edades con respecto a su altitud, que varía entre 1600 a 3600 m.

La Figura 32d, compara las edades medidas y predichas por el método de ZFT respecto a la altura. Las edades medidas se encuentran en un rango más amplio, entre ~68 a 200 Ma. Mientras que las edades predichas muestran un rango menor que va de ~78 a 110 Ma. En general, hay una buena correspondencia de los dos tipos de edades con las alturas de las mismas.

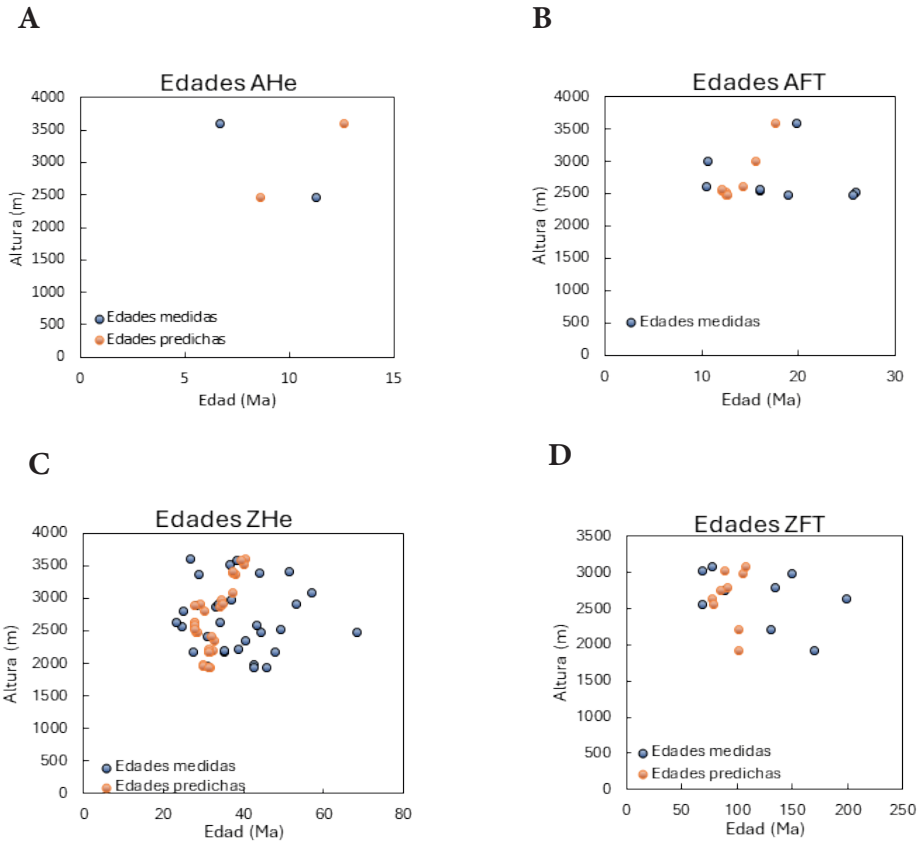


Figura 32. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en la zona Macizo de Floresta.

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

La Figura 33 (Edades AFT), muestra la relación entre las edades medidas y predichas mediante el método de AFT en función de la altura. Las edades medidas están distribuidas principalmente entre ~6 a 30 Ma. Mientras que las edades predichas están distribuidas en un rango de ~14 a 16 Ma. Se observa que existe una buena correspondencia entre las edades medidas y predichas para las diferentes alturas.

La Figura 33b (Edades ZHe), presenta las edades medidas y predichas por el método de ZHe en función de la altura. Las edades medidas se distribuyen en un rango que va de ~47 a 80 Ma y las edades predichas están en un rango de ~50 a 63 Ma. Hay una correspondencia buena entre las edades medidas y predichas en las diferentes alturas.

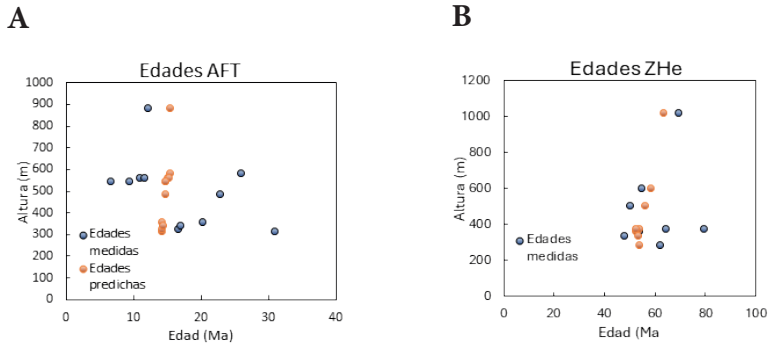


Figura 33. Comparación de edades medidas y predichas para diferentes métodos de datación a diferentes alturas en el Sinclinal de Nunchía.

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

i. Bloque Este

La Figura 34 (Edades AFT), muestra la relación entre las edades medidas y predichas mediante el método de AFT en función de la altura. Las edades medidas están distribuidas principalmente entre ~6 a 14 Ma. Las edades predichas están distribuidas en un rango de ~8 a 10 Ma. Se observa una buena correspondencia entre las edades medidas y predichas para las diferentes alturas.

para los bloques Este y Oeste de la falla La Salina, descritos en la Tabla 34. En la Figura 33, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Este, el cual se exhuma con un valor de 0,43 km/Ma, iniciando su levantamiento en ~48 Ma. Asimismo, se observan en color amarillo las flechas de velocidad del bloque occidental, el cual se exhuma con un valor de 0,14 km/Ma, iniciando su levantamiento hace ~62 Ma. Lo anterior, relaciona el levantamiento de los dos bloques de la falla La Salina a diferentes velocidades. La falla La Salina es de tipo inverso, en donde el Bloque Este está por encima del Bloque Oeste, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla 33. Valores de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla La Salina.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Este	48 - 0	0,43
Bloque Oeste	62 - 0	0,14

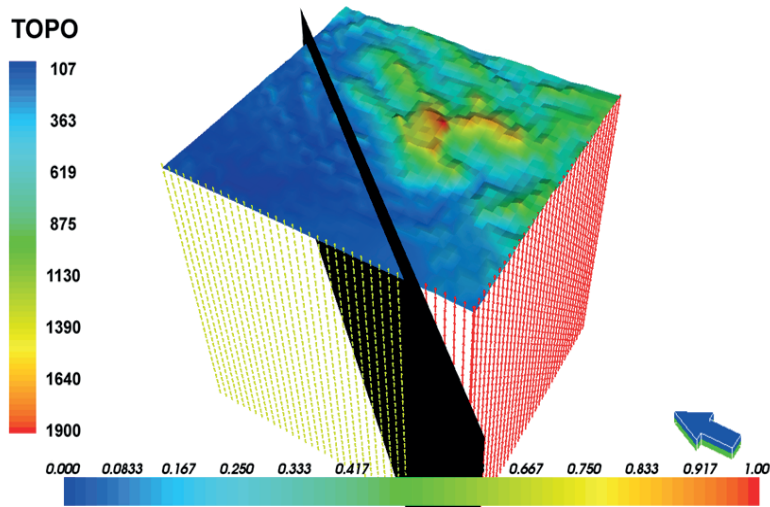


Figura 36. Modelo 3D de velocidades área Sinclinal de Armas.

4.2.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental

- Área Macanal - Santa María

Dentro del área de estudio se obtuvo un modelo con el mejor ajuste (*misfit*), en donde se visualiza un valor de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla de Tesalia, descritos en la tabla 34. En la Figura 37, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Oeste, el cual se exhuma con un valor de 0,39 km/Ma, iniciando su levantamiento en ~39 Ma. Asimismo, se observan en color aguamarina las flechas de velocidad del Bloque Este, el cual se exhuma con un valor de 0,16 km/Ma, iniciando su levantamiento hace ~52 Ma. Configurando así un levantamiento de los dos bloques a diferentes velocidades. La falla de Tesalia es de tipo inverso, en donde el Bloque Oeste está por encima del Bloque Este, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla 34. Valores de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla de Tesalia.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Oeste	39-0	0,39
Bloque Este	52 – 0	0,16

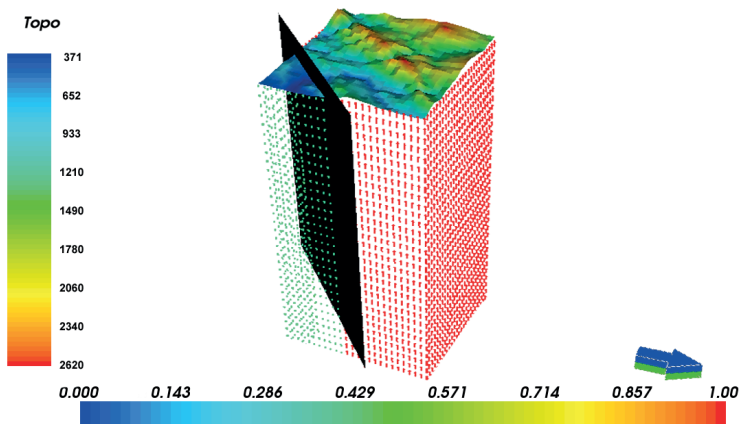


Figura 37. Modelo 3D de velocidades área Sinclinal de Santa María – Macanal.



- **Área Bogotá - Villavicencio**

Dentro del área de estudio, el *software* obtuvo un modelo con el mejor ajuste (*misfit*), en donde se visualiza un valor de velocidad de exhumación para el Bloque Oeste de la falla Las Mercedes, descritos en la tabla 35. En la Figura 38, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Oeste, el cual se exhuma con un valor de 1,25 km/Ma, iniciando su levantamiento en ~45 Ma. La Falla Las Mercedes es de tipo inverso, en donde el Bloque Oeste está por encima del Bloque Este, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla 35. Valores de velocidad de exhumación para el Bloque Oeste de la falla Las Mercedes.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Oeste	45 – 0	1,25

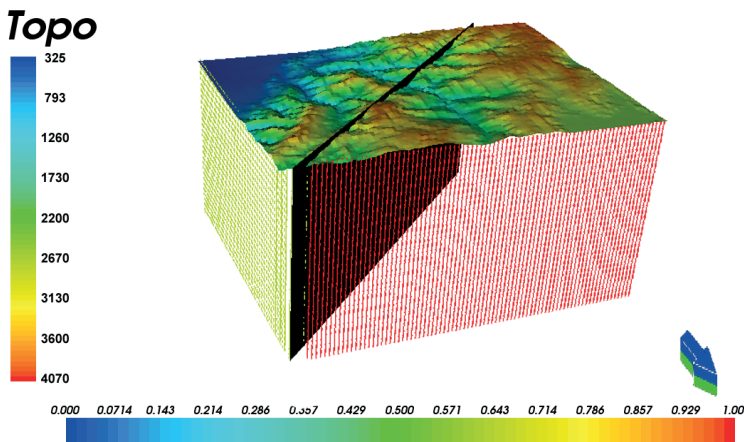


Figura 38. Modelo 3D de velocidades área Bogotá – Villavicencio.

- **Área del Macizo de Floresta**

Dentro del área de estudio, el *software* obtuvo un modelo con el mejor ajuste (*misfit*), en donde se visualiza un valor de velocidad de exhumación

para los bloques Este y Oeste de la falla de Boyacá, descritos en la tabla 36. Este sector coincidiría espacialmente con el páramo de La Rusia, correspondiente al bloque colgante de la falla de Boyacá. En la Figura 39, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Este, el cual se exhuma con un valor de 0,21 km/Ma, iniciando su levantamiento en ~19 Ma. Asimismo, se observan en color amarillo las flechas de velocidad del Bloque Oeste, el cual se exhuma con un valor de 0,14 km/Ma, iniciando su levantamiento hace ~48 Ma. Configurando así un levantamiento de los dos bloques a diferentes velocidades. La falla de Boyacá es de tipo inverso, en donde el Bloque Oeste está por encima del Bloque Este, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla 36. Valores de velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla de Boyacá.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Oeste	48 - 0	0,14
Bloque Este	19 - 0	0,21

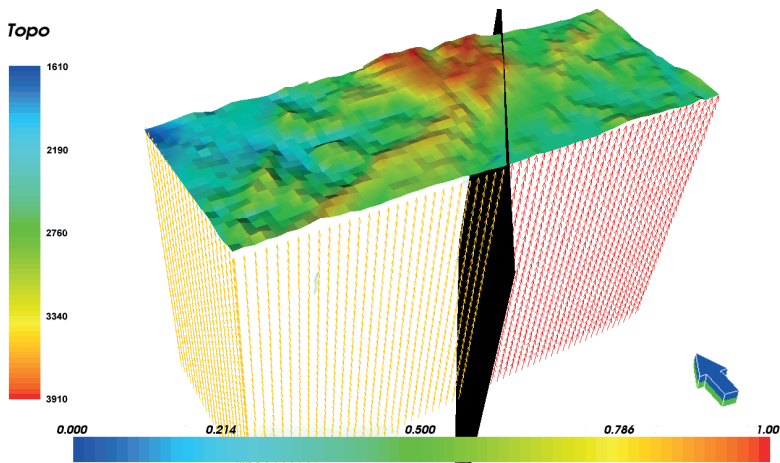


Figura 39. Modelo 3D de velocidades área sector axial Macizo de Floresta.

4.2.3 Piedemonte llanero (límite con la cuenca Llanos)

Dentro del área de estudio, el *software* obtuvo un modelo con el mejor ajuste (*misfit*), en el cual se visualiza un valor de la velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla Yopal, descritos en la Tabla 37. En la Figura 40, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Este, el cual se exhuma con un valor de 0,14 km/Ma, iniciando su levantamiento en ~43 Ma. Asimismo, se observan en color aguamarina las flechas de velocidad del Bloque Oeste, el cual se exhuma con un valor de 0,66 km/Ma, iniciando su levantamiento hace ~43 Ma. Configurando así un levantamiento de los dos bloques a diferentes velocidades. La falla de Yopal es de tipo inverso, en donde el Bloque Oeste está por encima del Bloque Este, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla 37. Valores de la velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla Yopal.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Este	43 - 0	0,14
Bloque Oeste	43 - 0	0,66

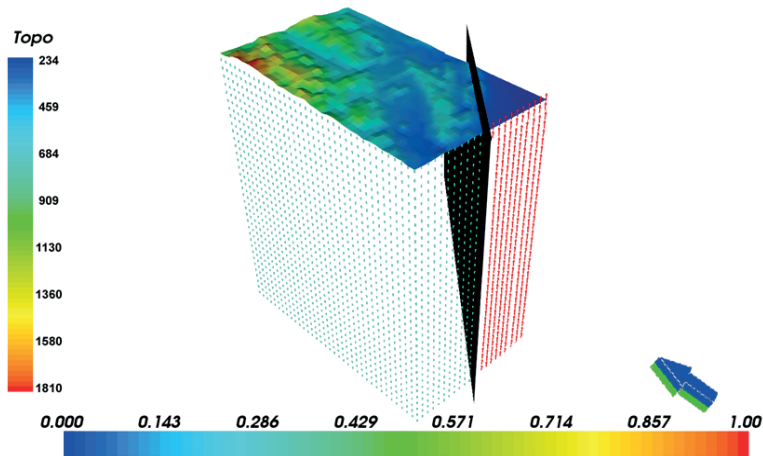


Figura 40. Modelo 3D de velocidades área Sinclinal de Nunchía.

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

- **Bloque Este**

Dentro del área de estudio, el *software* obtuvo un modelo con el mejor ajuste (*misfit*), en donde se visualiza un valor en la velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla del borde amazónico, descritos en la Tabla 38. En la Figura 41, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Este, el cual se exhuma con un valor de 0,27 km/Ma, iniciando su levantamiento en ~60 Ma. Asimismo, se observan en color rosado las flechas de velocidad del Bloque Oeste, el cual se exhuma con un valor de 1 km/Ma, iniciando su levantamiento hace ~30 Ma. Configurando así un levantamiento de los dos bloques a diferentes velocidades. La falla del borde amazónico es de tipo inverso, en donde el Bloque Oeste está por encima del Bloque Este, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla 38. Valor en la velocidad de exhumación para los bloques Este y Oeste de la falla del borde amazónico.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Este	60 - 0	0,27
Bloque Oeste	30 - 0	1



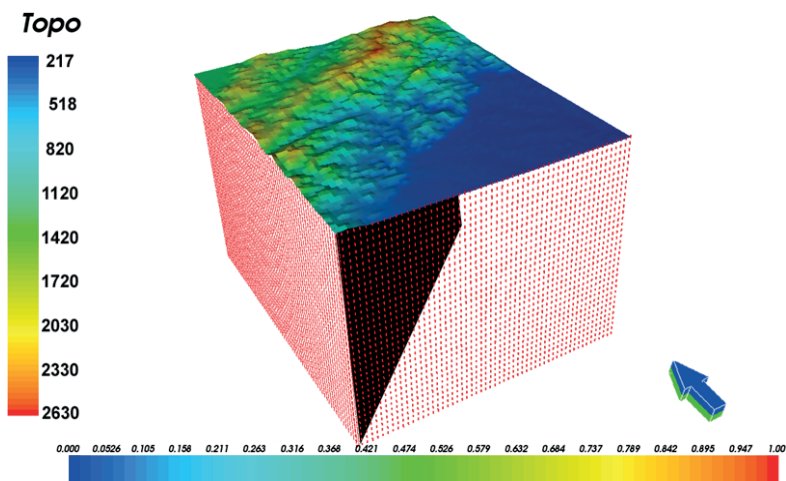


Figura 41. Modelo 3D de velocidades área Bloque Este.

- **Bloque Oeste**

Dentro del área de estudio, el *software* obtuvo un modelo con el mejor ajuste (*misfit*), en donde se visualiza un valor para la velocidad de exhumación del Bloque Este de la falla Resinas, descritos en la Tabla 39. En la Figura 42, se observan en color rojo las flechas de velocidad del Bloque Este, el cual se exhuma con un valor de 0,27 km/Ma, iniciando su levantamiento hace ~30 Ma. La falla Resinas es de tipo inverso, en donde el Bloque Oeste está por encima del Bloque Este, concluyendo un levantamiento uniforme en toda el área de estudio.

Tabla39. Valores para la velocidad de exhumación del Bloque Este de la falla Resinas.

Fases de exhumación de la falla	Tiempo de exhumación (Ma)	Tasa de exhumación para cada tiempo (km/Ma)
Bloque Este	30 - 0	0,27

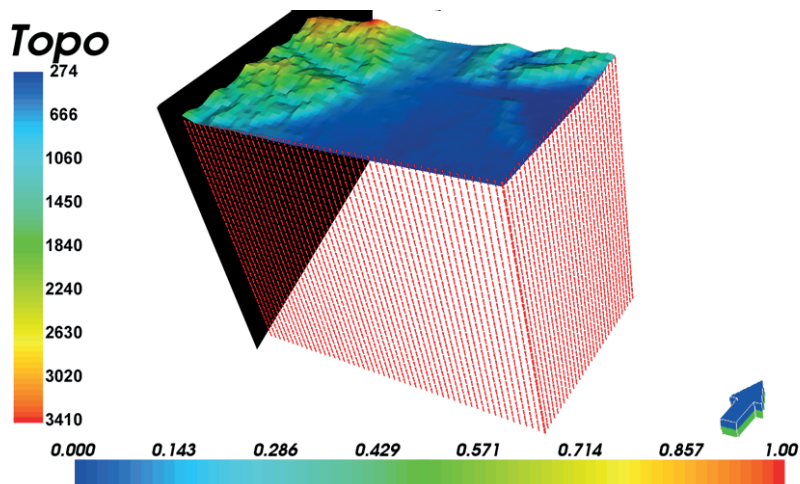


Figura 42. Modelo 3D de velocidades área Bloque Oeste.

4.3 Modelos de temperatura

A continuación, se presentan los modelos tridimensionales de las áreas de estudio con sus respectivos valores isotermales.

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

En la Figura 43, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Sánchez et al. (2012), en donde se referencian las longitudes de trazas. De los modelos de temperatura se obtiene un valor de 486 °C en la base del modelo.

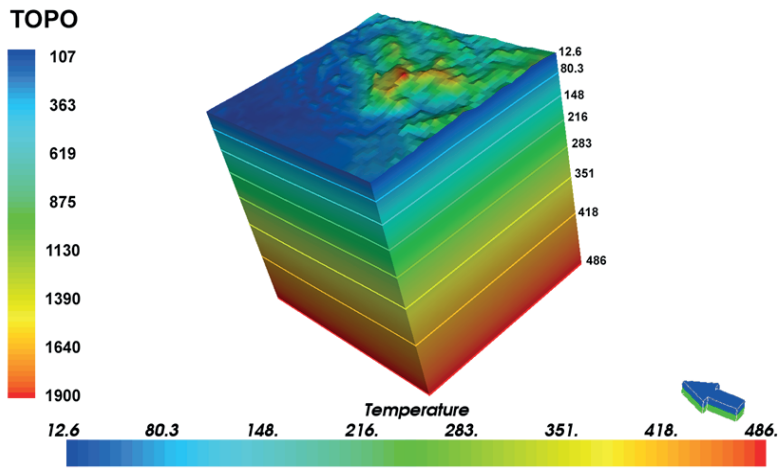


Figura 43. Modelo de temperatura 3D área Sinclinal de Armas.

4.3.2 Eje axial de la Cordillera Oriental y piedemonte oriental

- Área Macanal - Santa María

En la Figura 44, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Cheilletz et al. (1979); Parra et al. (2009a) y Odoh et al. (2019), en donde no se referencian las longitudes de trazas. En los modelos de temperatura se obtiene un valor de 972 °C en la base del modelo.

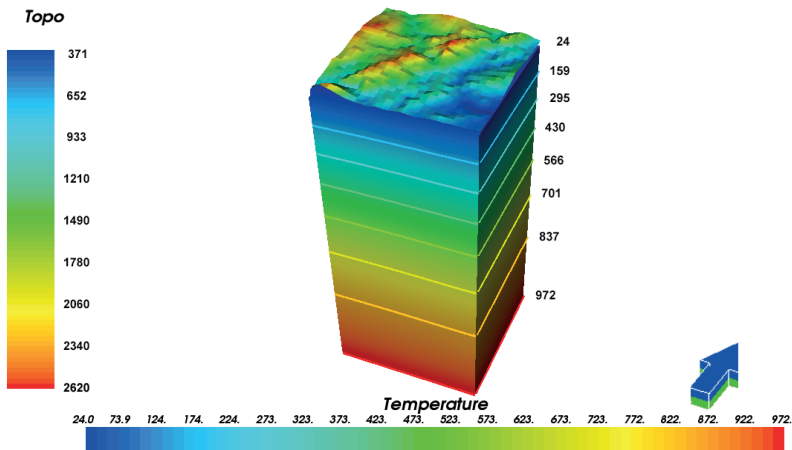


Figura 44. Modelo de temperatura 3D área Macanal - Santa María.

- **Área Bogotá - Villavicencio**

En la Figura 45, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Mora et al. (2008) y Parra et al. (2009b), en donde no se referencian las longitudes de trazas. En los modelos de temperatura se obtiene un valor de 600 °C en la base del modelo.

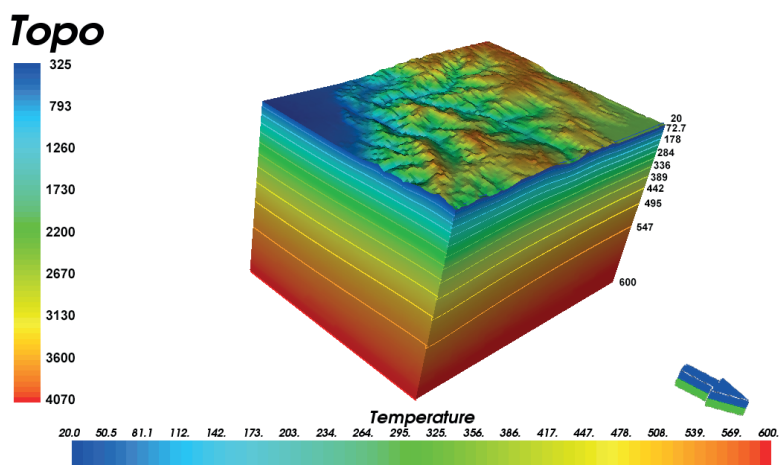


Figura 45. Modelo de temperatura 3D área Bogotá - Villavicencio.

- **Área del Macizo de Floresta**

En la Figura 46, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Parra et al. (2009b), Mora et al. (2010a), Ramírez-Arias et al. (2012), Saylor et al. (2012) y Reyes-Harker et al. (2015), en donde se referencian las longitudes de trazas. En los modelos de temperatura se obtiene un valor de 1000 °C en la base del modelo.



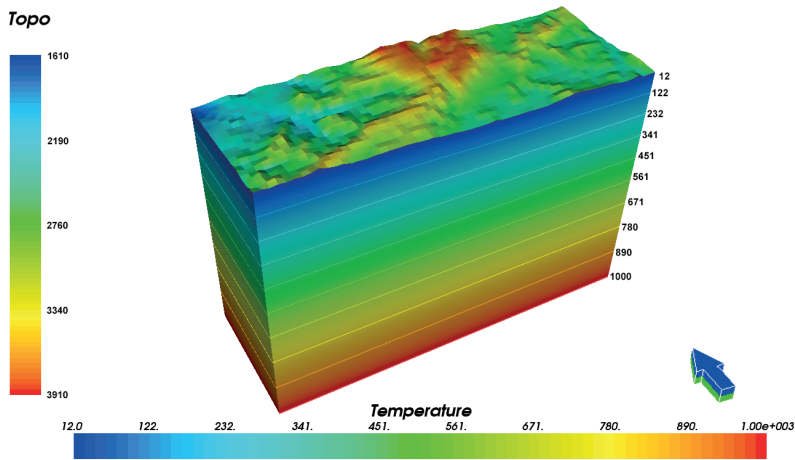


Figura 46. Modelo de temperatura 3D área Macizo de Floresta.

4.3.3 Piedemonte llanero (límite con la cuenca Llanos)

En la Figura 47, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Mora et al. (2010a), Horton et al. (2010a, b) y Ramírez-Arias et al. (2012), en donde se referencia la mayoría de las longitudes de trazas. En los modelos de temperatura se obtiene un valor de 870 °C en la base del modelo.

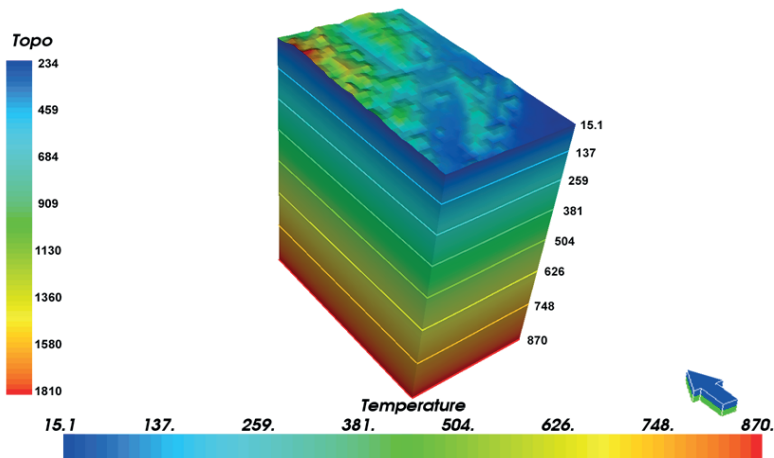


Figura 47. Modelo de temperatura 3D área Sinclinal de Nunchía.

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

- Bloque Este

En la Figura 48, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Villagómez y Spikings (2013) y Pérez-Consuegra et al. (2021), en donde no se referencian las longitudes de trazas. Además de las muestras datadas en el marco del presente proyecto por AFT, donde sí se reportan longitudes de trazas. En los modelos de temperatura se obtiene un valor de 800 °C en la base del modelo.

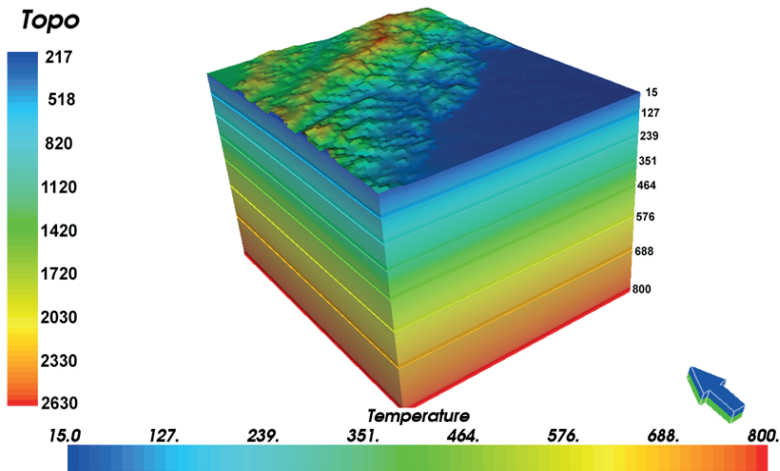


Figura 48. Modelo de temperatura 3D área Bloque Este.

- Bloque Oeste

En la Figura 49, se modeló la zona con los valores de las edades reportadas por Villagómez y Spikings (2013) y Pérez-Consuegra et al. (2021), en donde no se referencian las longitudes de trazas. En los modelos de temperatura se obtiene un valor de 885 °C en la base del modelo.

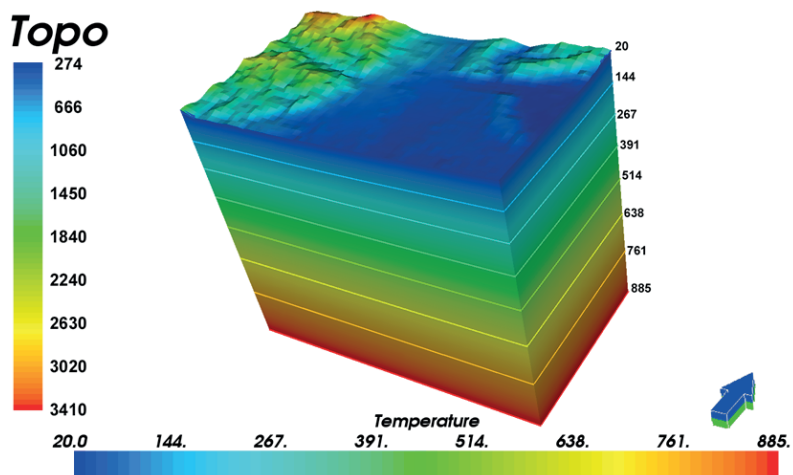


Figura 49. Modelo de temperatura 3D área Bloque Oeste.

