

Modelos del campo geomagnético en Colombia del año 1968 al año 1993

Leidy Daniela Guarnizo Muñoz & Wilson Manuel Avendaño Hernández
Marzo 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Ingeniería Topográfica
Bogotá

Modelos del campo geomagnético en Colombia del año 1968 al año 1993

Leidy Daniela Guarnizo Muñoz & Wilson Manuel Avendaño Hernández

Monografía presentada como requisito para optar por el título de Ingenieros Topográficos
Director: Ing. Msc. Robinson Quintana Puentes

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Ingeniería Topográfica
Bogotá

Dedicatoria

A mis padres Marysol y Fredy por su apoyo incondicional, motivación y los sabios consejos durante mi desarrollo académico. Por creer en mis habilidades y fortalecerlas desde mi infancia.

A mi hermana Paula por enseñarme el valor de la perseverancia en momentos difíciles.

A mi hermano Nicolás por enseñarme a ver el otro lado de las cosas y hacerme partícipe de escenarios que enriquezcan mis conocimientos.

Daniela Guarnizo

Le quiero dedicar este trabajo a mi abuela Guillermina quien me dio la lección más importante que en la vida pude recibir, la de dar pródigamente respeto y amor hacia los demás sin esperar nada a cambio. A mis padres y hermanos por enseñarme a no desistir ante las dificultades y siempre perseverar hasta lograr lo que se quiere.

Wilson Manuel Avendaño

Agradecimientos

Dirigimos nuestro agradecimiento al profesorado del proyecto curricular de Ingeniería Topográfica por ser un peldaño que permitió nuestro crecimiento académico y también personal. Agradecemos especialmente al docente Robinson Quintana por introducirnos y guiarnos en el área de la geofísica, también al profesor William Andrés Castro por brindarnos las bases en el área de la física necesarias para nuestra vida profesional.

Agradecemos al Instituto Geográfico Agustín Codazzi por facilitarnos la información necesaria para el desarrollo del presente trabajo.

Adicionalmente agradecemos a nuestros compañeros y amigos de la universidad por ser ese brazo de apoyo en muchas ocasiones para lograr la culminación de nuestro trabajo de grado.

Resumen

En este trabajo se pretende determinar la variable de intensidad total del campo geomagnético de la República de Colombia a partir de los datos obtenidos de antigua red geomagnética del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, que operó del año 1968 al año 1993 y se encontraba distribuida en los 32 departamentos. Estos valores se compararán con los generados por la herramienta de cálculo de componentes geomagnéticas virtual de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, puesto que esta genera valores de las componentes del campo geomagnético a nivel global a partir de la información que ha recolectado por diferentes medios.

Para establecer la comparación entre ambas fuentes de información, serán elaborados productos cartográficos, estudios de carácter estadístico y se proyectarán los valores de la intensidad total del campo en el tiempo.

Abstract

This project aims to determine the variable of total intensity of the geomagnetic field of the Republic of Colombia from data obtained from the old geomagnetic network of the Instituto Geográfico Agustín Codazzi, which operated from 1968 to 1993 and was distributed in the 32 departments. These values will be compared with those generated by the virtual tool for the calculation of the geomagnetic components of the National Oceanic and Atmospheric Administration, since it generates values of the components of the geomagnetic field at a global level from the information it has collected by different means.

In order to establish the comparison between both sources of information, cartographic products, statistical studies will be elaborated and the values of the total intensity of the field will be projected in time.

Tabla de Contenidos

| | |
|--------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1 | 1 |
| Introducción | 1 |
| Planteamiento del problema..... | 3 |
| Estado del arte..... | 4 |
| Justificación | 6 |
| Objetivos | 7 |
| Objetivo general:..... | 7 |
| Objetivos específicos | 7 |
| Marco teórico | 8 |
| Origen del campo magnético | 8 |
| Inversiones magnéticas | 9 |
| Geomagnetismo | 11 |
| Unidades | 12 |
| Variaciones del campo magnético terrestre | 13 |
| Cartas magnéticas | 15 |
| Instrumentos para medir el campo magnético | 16 |
| Usos del geomagnetismo | 17 |
| Marco geográfico | 19 |
| Metodología preliminar | 22 |
| Estadística descriptiva..... | 22 |

| | |
|------------------------------------------|----|
| Capítulo 2..... | 28 |
| Metodología | 28 |
| Cálculo de la intensidad total (F) | 28 |
| Generación de las cartas magnéticas..... | 33 |
| Capítulo 3..... | 37 |
| Resultados | 37 |
| Análisis de resultados | 50 |
| Conclusiones..... | 57 |
| Referencias..... | 60 |

Lista de tablas

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Intervalos de estudio | 28 |
| Tabla 2. Intensidad total de Colombia 1968 a 1971 | 46 |
| Tabla 3. Intensidad total de Colombia 1972 a 1975 | 47 |
| Tabla 4. Intensidad total en Colombia 1976 a 1981 | 48 |
| Tabla 5. Intensidad total en Colombia 1987 a 1993 | 49 |
| Tabla 6. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1968-1971 | 51 |
| Tabla 7. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1972-1975 | 51 |
| Tabla 8. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1976-1981 | 52 |
| Tabla 9. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1987-1993 | 52 |
| Tabla 10. Proyección de los valores de intensidad horizontal en Colombia | 55 |

Lista de figuras

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Esquema del dipolo magnético | 8 |
| Ilustración 2. Representación gráfica de las componentes geomagnéticas..... | 11 |
| Ilustración 3. Límites de Colombia..... | 19 |
| Ilustración 4. Altura en Google Earth | 29 |
| Ilustración 5. Geoportal de NOAA | 30 |
| Ilustración 6. Pestaña “Magnetic Field” | 31 |
| Ilustración 7. Variables para el cálculo de la intensidad total..... | 31 |
| Ilustración 8. Resultado del cálculo de la declinación magnética | 32 |
| Ilustración 9. Estaciones medidas durante uno de los intervalos..... | 33 |
| Ilustración 10. Modelo de triangulación para un intervalo | 34 |
| Ilustración 11. Líneas isodinámicas para un intervalo..... | 34 |
| Ilustración 12. Generación de modelo de interpolación IDW | 35 |
| Ilustración 13. Modelo final..... | 36 |
| Ilustración 14. Carta isodinámica de Colombia de 1968 a 1971, según datos IGAC..... | 38 |
| Ilustración 15. Carta isodinámica de Colombia de 1972 a 1975, según datos IGAC..... | 39 |
| Ilustración 16. Carta isodinámica de Colombia de 1976 a 1981, según datos IGAC..... | 40 |
| Ilustración 17. Carta isodinámica de Colombia de 1987 a 1993, según datos IGAC..... | 41 |
| Ilustración 18. Carta isodinámica de Colombia de 1968 a 1971, según datos IGAC..... | 42 |
| Ilustración 19. Carta isodinámica de Colombia de 1972 a 1975, según datos NOAA..... | 43 |
| Ilustración 20. Carta isodinámica de Colombia de 1976 a 1981, según datos NOAA..... | 44 |
| Ilustración 21. Carta isodinámica de Colombia de 1987 a 1993, según datos NOAA..... | 45 |
| Ilustración 22. Gráfica de la media de la intensidad total en Colombia | 54 |
| Ilustración 23. Proyección de los valores de intensidad total en Colombia..... | 56 |

Capítulo 1

Introducción

Al referirse a las características inherentes más trascendentales del planeta tierra, las cuales han hecho posible la vida como la conocemos hoy en día, inexorablemente hay que reconocer la importancia del campo magnético terrestre. El geomagnetismo, definido como ciencia, se encarga del estudio del origen, las propiedades y las variaciones del campo magnético terrestre (Instituto Geográfico Nacional).

No se conoce la fecha precisa del descubrimiento del magnetismo, sin embargo, es posible que los chinos lo descubrieran alrededor del año 2600 A.C y que los griegos conocieran la propiedad de atracción que generaba la magnetita sobre partículas de hierro hacia el año 600 A.C, no obstante se ignoraba el hecho de que la tierra funcionara como un imán (Howell, 1962).

Según información del enciclopedista Shon-Kua (1030-1093), durante esta época en China ya se conocían las propiedades direccionales del imán (Howell, 1962). Sin embargo, se cree que el primer uso de la brújula se da hacia el siglo XII en occidente, el descubrimiento de la declinación magnética y sus variaciones se conocen entre los siglos XV y XVI por navegantes españoles y portugueses (Udías & Mezcua, 1997).

En el año 1600 se publica la obra titulada “De magnetete” de W. Gilbert, la cual es considerada como el primer texto de geomagnetismo y en la que se concluye que la tierra funciona como un gran imán. A principios del siglo XIX, Gauss introduce el modelo del

esférico armónico para el análisis del campo magnético y en el año 1940, el libro de Chapman y Bartels es considerado como el inicio de la era moderna del geomagnetismo (Campbell, 2003).

Los estudios han permitido determinar que el planeta tierra funciona como un gran imán o dipolo magnético, aunque su utilidad es poco atañida al conocimiento de la comunidad en general, este funciona como un escudo que cumple una función crucial de manera análoga a la atmósfera con los rayos ultravioleta. En los cinturones de Van Allen la atmósfera interrumpe la trayectoria de las partículas cargadas que provienen de los vientos solares, las reorienta hacia los polos magnéticos y como consecuencia se producen las auroras boreales y australes, el porcentaje de partículas que no es aprehendido en la cúspide polar de la magnetósfera es reflejado en el campo exterior (Udías & Mezcuca, 1997).

El paleomagnetismo permitió conocer la existencia de la magnetósfera y conocer algunos de los hitos y eventos magnéticos por los que ha atravesado la tierra durante los periodos geológicos. Entre estos eventos se debe destacar el fenómeno de las inversiones magnéticas, el cual ha dejado registros en algunos minerales y hace reflexionar al ser humano sobre las variaciones considerables que puede sufrir el campo magnético (Prager, William, & Hutton, 2002).

Planteamiento del problema

La información geomagnética de Colombia no ha sido analizada a fondo, pues esta ha sido registrada en su mayoría análogamente, de manera que el procesamiento de la información es lento y son posibles las fallas humanas. No obstante, la información registrada en el territorio colombiano es de interés para la comunidad científica, ya que se encuentra sobre el ecuador magnético, en donde el comportamiento del campo posee algunas particularidades y sobre el cual es baja la densificación de la información geomagnética.

Actualmente en Colombia la única fuente de información geomagnética es el observatorio geomagnético de Fúquene. Sin embargo, en épocas anteriores existían otras fuentes de información como la antigua red geomagnética nacional, la cual se componía de 253 estaciones distribuidas a lo largo de todo el país. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) cuenta con una base de datos de la información recolectada en las estaciones de esta antigua red del año 1968 al año 1997.

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), basa su información en el modelo del campo geomagnético internacional de referencia, IGRF, por sus siglas en inglés. Este modelo es el insumo para el cálculo de las componentes geomagnéticas de declinación, inclinación e intensidad total en cualquier punto de la tierra a través de una herramienta disponible en su geoportal, de libre acceso y es fuente de información de este proyecto.

Estado del arte

Documentos indican que la primera medición relacionada al campo magnético en Colombia se asocia a los viajes de Alexander Von Humboldt, quien en 1801 determinó la declinación magnética de la ciudad de Bogotá, con un valor de 7 grados 36 segundos Este. Esta medición es precedida por las observaciones de la declinación efectuadas por los geólogos alemanes Guillermo Reiss y Alfonso Stubel, el astrónomo Julio Garavito Armero, el geofísico norteamericano Wall y el ingeniero Clemente Garavito Baraya en colaboración con el geofísico J. A. Kozlowsky durante años posteriores (Medina Aguirre, 2012).

En el año 1953 el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) inició el estudio del campo magnético terrestre a través de la apertura del Observatorio Geomagnético en la isla “El Santuario” de la laguna de Fúquene, al norte del departamento de Cundinamarca. En este sitio se ha monitoreado el campo geomagnético local hasta la fecha. El principal objetivo del observatorio correspondía a la orientación con respecto al norte de las mediciones geodésicas realizadas a lo largo del país, posteriormente este formó parte de la red mundial de observatorios geomagnéticos y suministró información a diferentes entidades internacionales (IGAC, 2019).

Del año 1942 al año 1968 existen registros de la generación de cartas geomagnéticas de Colombia, producto de observaciones realizadas en diferentes zonas del país por el IGAC con el apoyo de otras entidades nacionales e internacionales (IGAC, 2019).

Durante los últimos años se han realizado investigaciones relacionadas al campo geomagnético en Colombia asociados a diferentes enfoques como la determinación de la influencia del clima espacial y terrestre sobre las mediciones geomagnéticas, y el grado de susceptibilidad de riesgo por tormentas magnéticas en redes de alta tensión.

A través del cálculo y análisis del índice K, se cuantificó el nivel de perturbación provocada por el viento solar sobre un punto en la superficie terrestre (Bocanegra Pataquiva & Rivera Velandia, 2018).

La aplicación de la transformada Wavelet en datos geomagnéticos estableció indicadores que definen los comportamientos normales y anómalos de eventos como variaciones geomagnéticas y meteorológicas (Gil Yopez & Garzón Cárdenas, 2017).

La elaboración de cartas que representan la zonificación de la susceptibilidad de riesgo de tormentas geomagnéticas en el territorio nacional y su clasificación, es el resultado de la caracterización espacial de los modelos geomagnéticos, el análisis de la resistividad de los suelos, las descargas atmosféricas registradas durante el periodo observado y de la transmisión de energía eléctrica sobre el territorio (Noguera Callejas & Cuervo Morales, 2017).

Justificación

El presente trabajo tiene como finalidad comparar la información generada a partir de la calculadora virtual de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la información de la antigua red geomagnética del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

A través de la comparación de la información de ambas fuentes se pretende establecer el grado de influencia de los métodos de generación de datos en los valores de la intensidad total. NOAA se basa en el modelo del campo geomagnético internacional de referencia (IGRF) para determinar los valores de las componentes del campo en un punto sobre la superficie de la tierra en una época determinada (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020). Por otro lado, el IGAC toma la información directamente sobre los puntos analizados.

El valor adicional de este proyecto es ahondar en el campo del geomagnetismo que ha sido poco investigado en el país y al contar con productos cartográficos que representen dichos datos, además de darle la suficiente importancia en el campo del conocimiento científico, beneficiaría a diferentes sectores dedicados a actividades tales como mitigación de riesgos, exploración minera, investigación en el campo de la geofísica, salud, redes de comunicación, redes eléctricas, factores climatológicos, biología, etc (Enriquez, 1991).

Objetivos

Objetivo general:

Analizar y contrastar la información geomagnética de Colombia del año 1968 al año 1997 generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la generada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

Objetivos específicos

- Calcular la intensidad total a partir de las componentes de declinación, intensidad horizontal e inclinación; extraídas de la base de datos de la antigua red geomagnética nacional del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Generar los modelos cartográficos que representen el componente de la intensidad total de Colombia del año 1968 al año 1997. Un modelo será el resultado de la información de la antigua red geomagnética nacional y el otro, de la calculadora virtual de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).
- Realizar el análisis multitemporal a través de modelos cartográficos y cálculos estadísticos para establecer relaciones y discrepancias que se presenten entre ambas fuentes de información.

Marco teórico

Origen del campo magnético

No se ha especificado con certeza el origen del campo magnético de la tierra, sin embargo, se cree que existe un origen interno y otro externo. El origen interno, responsable de más del 90% del campo, consiste en un campo magnético al interior de la tierra que se comporta como una dinamo autoalimentada, pues la rotación y la distribución desigual de calor al interior de la tierra pueden ser conductoras de hierro fundido en el núcleo externo. El hierro fundido al interactuar con el campo magnético da origen a una corriente eléctrica, esta al estabilizarse produce una corriente magnética que alimenta al campo magnético terrestre (Tarbuck & Lutgens, 2005).

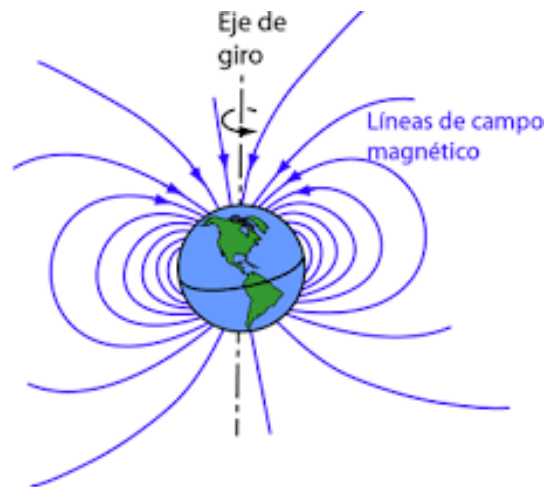


Ilustración 1. Esquema del dipolo magnético

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/MagEarth.html>

Según las investigaciones, la temperatura del campo interno supera el punto Curie del hierro, lo que indica que difícilmente se genere allí un campo magnético. Surge la hipótesis de la generación de las corrientes de convección en el manto y en el núcleo externo, en este último se considera la existencia de material líquido (hierro y níquel) por la dificultad que tienen las ondas S al atravesarlo. Las corrientes de convección serían las responsables del campo interno (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La ley de Gauss afirma que los polos magnéticos no tienen sumideros, ni fuentes como los campos eléctricos, lo que indica que el flujo magnético se cierra sobre sí mismo. De este modo, las corrientes magnéticas de la tierra salen por el polo norte geográfico y vuelven a ingresar por el polo sur geográfico, el campo resultante de este flujo es denominado como la magnetósfera (Udías & Mezcua, 1997).

El origen externo se atribuye al campo producido por las actividades solares y lunares, siendo las solares las más notables. Este campo se evidencia debido a sus particulares variaciones en el tiempo (Udías & Mezcua, 1997).

Inversiones magnéticas

La dipolaridad del planeta tierra no tiene una posición constante, de acuerdo con los testigos de sedimentos presentes en los valles de rift es posible comprobar que los polos magnéticos se han desplazado e invertido en numerosas ocasiones a lo largo de la historia de nuestro planeta, la última inversión magnética (Brunhes Matuyama) fue hace

aproximadamente 780000 años (Meteorología Argentina y nuestro cambio climático., 2013).

Lo anterior indica la posibilidad de que la polaridad normal actual esté próxima a cambiar, dicho proceso inicia por movimientos traslacionales de los polos magnéticos muy prolongados así como por la disminución de la intensidad de campo, hechos que se observan hoy en día debido a que en los últimos 2 siglos se ha observado una disminución de la intensidad del campo magnético en aproximadamente un 6,3% cada 100 años (Johnson, 2009).

El campo magnético de la tierra repercute en clima de manera considerable, sirve como capa de protección para la biósfera ya que nos protege de la radiación cósmica, así como de los vientos solares. Estos vientos son desviados a los polos donde se manifiestan en forma de auroras polares (Prager, William, & Hutton, 2002).

La polaridad normal tiene repercusión incluso en el biomagnetismo que posee ciertas especies para todos sus procesos vitales tales como la reproducción. Lo que nos plantea la necesidad de preguntarnos analizar y comprender los alcances de los procesos geomagnéticos, la tendencia de esta magnitud en el futuro y que tan perjudicial o peligroso puede ser un cambio considerable del campo magnético terrestre, ya que si bien, una inversión magnética no significaría el fin de la vida en la tierra, sí significa el fin de la vida como se conoce actualmente (Prager, William, & Hutton, 2002)

Geomagnetismo

El campo geomagnético es considerado un campo vectorial, es decir, tres componentes son necesarias para representarlo. Los elementos que componen el campo geomagnético son la declinación (D), la inclinación (I), la intensidad del campo magnético total (F), la componente horizontal (H), la componente vertical (Z), el norte geográfico (X) y el este geográfico (Y) (Cárdenas Contreras, 2014).

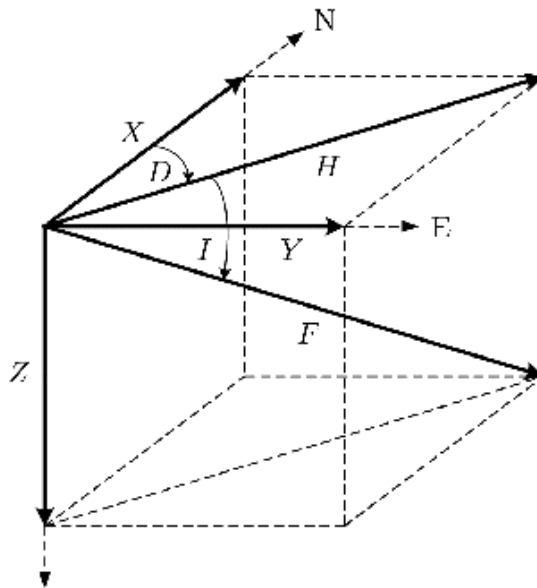


Ilustración 2. Representación gráfica de las componentes geomagnéticas

Fuente: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232009000100008

A través de las siguientes ecuaciones se relacionan las componentes anteriormente nombradas.

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Equación 1. Intensidad total

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Equación 2. Componente horizontal

$$D = \text{Tan}^{-1} \frac{Y}{X}$$

Equación 3. Declinación magnética

$$I = \text{Tan}^{-1} \frac{Z}{H}$$

Equación 4. Inclinación magnética

Unidades

Entiéndanse la declinación y la inclinación como valores angulares. La declinación hace referencia al ángulo comprendido entre el norte geográfico y el norte magnético, y la inclinación como el ángulo comprendido entre el plano horizontal y el vector del campo total F (Cárdenas Contreras, 2014).

Las demás componentes magnéticas, según el sistema internacional, se miden en nanoteslas (nT), con el prefijo “nano” que significa 10^{-9} . Tesla se da por el nombre de uno de los pioneros de la investigación de las ondas de radio. Una nanotesla es igual a un gamma, unidad que se puede encontrar en algunos textos (Campbell, 2003).

Variaciones del campo magnético terrestre

- **Variación secular:** Esta se origina por un giro más lento del interior de la tierra que en las capas superficiales, se caracteriza por ser una variación lenta que sólo se percibe al comparar valores medios anuales durante varios años. Su existencia fue descubierta por H. Gellibrand al observar la disminución de los valores de la declinación magnética en Londres según las observaciones realizadas en los años 1580, 1622 y 1634 (Udías & Mezcuca, 1997).
- **Variaciones periódicas:** Además de la variación secular, considerada como periódica, también se producen variaciones periódicas producidas por el campo externo. Estas se producen principalmente por las órbitas del sol y de la luna, y de la rotación de la tierra; con menor influencia se consideran las actividades de las manchas solares y de rotación del sol (Udías & Mezcuca, 1997).
- **Variaciones no periódicas:** Estas se producen debido al viento solar. Las tormentas magnéticas son las principales variaciones no periódicas, consisten en la suma de varias subtormentas y afectan el normal comportamiento del campo, especialmente en el ecuador y los polos magnéticos (Jankowski & Sucksdorff, 1996).

Las pulsaciones solares se observan en los magnetogramas¹ al inicio de las tormentas magnéticas, estas se visualizan como una alteración gráfica de la dinámica del campo. Se asocian al cambio repentino de la presión del viento solar contra el límite solar de la magnetósfera que se comprime y empuja hacia la tierra (Jankowski & Sucksdorff, 1996).

Fenómeno de la corriente de anillo

A unos pocos radios de la tierra, con dirección este-oeste, una corriente fluye alrededor de la tierra y se concentra sobre el ecuador magnético. Es sobre este donde la corriente es la responsable de la disminución del valor de la intensidad total observados sobre la superficie (Jankowski & Sucksdorff, 1996).

¹ Los magnetogramas son gráficas que representan la variación de las componentes del campo geomagnético en el tiempo.

Cartas magnéticas

Son representaciones gráficas de los valores de las componentes geomagnéticas.

Las líneas de igual valor de la declinación magnética son denominadas líneas isógonas, de manera análoga las líneas isoclinas representan la inclinación magnética y las isodinámicas representan la intensidad total (Howell, 1962).

Los modelos a escala mundial reciben el nombre de “Campo geomagnético Internacional de Referencia”, IGRF por sus siglas en inglés. Estos se representan por coeficientes de armónicos esféricos, es decir, que se basa en la suposición de que la tierra es un campo potencial, en donde el potencial sobre la superficie de la tierra es la suma de los potenciales al interior y exterior de la tierra. A estas representaciones también se asocia la variación secular, pues estas son las que permiten determinarla (Udías & Mezcua, 1997).

El campo geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)

Los modelos globales del campo geomagnético son desarrollados a partir de armónicos esféricos, cuyos coeficientes definen el campo de un dipolo con un centro separado del centro de la tierra. Los observatorios geomagnéticos y las observaciones de satélites artificiales son los insumos para determinar los coeficientes de los armónicos esféricos de un modelo (Udías & Mezcua, 1997).

Instrumentos para medir el campo magnético

Los instrumentos que se usan se clasifican en dos principales grupos. Los magnetómetros vectoriales miden la intensidad del campo en una dirección particular y los magnetómetros escalares miden la intensidad total del campo (García García, 2013).

A continuación se describen los instrumentos que son los utilizados convencionalmente en las estaciones de repetición².

Magnetómetro DI

El magnetómetro vectorial de declinación-inclinación consiste en un sensor denominado “fluxgate” sobre un telescopio de un teodolito no magnético y una unidad electrónica. El instrumento se alinea para tomar una lectura en ceros sobre el meridiano geográfico y a través del sensor determinar el ángulo del norte magnético. Para determinar la inclinación magnética, el telescopio se ubica en posición horizontal y a través del sensor se calcula el ángulo correspondiente a la inclinación magnética (Newitt, Barton, & Bitterly, 1996).

Magnetómetro de protones

También conocido como magnetómetro de precesión protónica, se basa en el fenómeno de precesión y es utilizado para medir la intensidad total del campo magnético.

² Las estaciones de repetición son aquellas en donde se miden las componentes del campo magnético temporalmente.

Consiste en la creación de un campo magnético alrededor de un fluido rico en hidrógeno a través de la inducción de corriente eléctrica en un solenoide, de esta manera los protones se alinean entre ellos y la dirección del campo. Al interrumpir la corriente, los protones se realinean, esta vez con el campo magnético del ambiente, de esta manera la frecuencia de precesión es directamente proporcionalmente al campo magnético. El magnetómetro mide la frecuencia de resonancia de los protones en el campo magnético y lo traduce a la intensidad total del campo magnético (García García, 2013).

Variómetro

Determina las variaciones del campo magnético en las componentes H, D y Z. Consiste en un imán suspendido, el cual se ajusta en una posición conocida como la posición cero y se mueve según la componente que este esté midiendo. Sobre un espejo acoplado al imán se refleja una luz que registra los movimientos del imán sobre un papel o es captada a través de un fotómetro con una salida electrónica (Campbell, 2003).

Usos del geomagnetismo

El geomagnetismo tiene repercusión en los siguientes campos

“Riesgos: Clima espacial y efectos de las tormentas magnéticas: daños en los sistemas satelitales, interrupción en las comunicaciones, errores en los Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS), variación del arrastre orbital en los satélites, corrientes inducidas en las líneas eléctricas, corrosión de tuberías, monitoreo eléctrico y magnético de sismos y volcanes.

Medio ambiente: Cambio global, pasado y presente del clima global, variabilidad solar y cambio de temperaturas, seguimiento de contaminantes, dinámica costera, mapas de salinidad y recursos hídricos.

Exploración de minerales e hidrocarburos: cartografía y modelado del subsuelo, datación de rocas, mineralización y maduración de hidrocarburos.

Geología: reconstrucciones tectónicas, deriva continental, estructura de la corteza y propiedades de las rocas, estratigrafía y estudio del lecho oceánico.

Navegación: Correcciones para las brújulas magnéticas, direccionamiento en los levantamientos topográficos, orientación de satélites, sistemas de guía y detección, biomagnetismo y navegación animal.

Salud humana: Efectos de los campos magnéticos en humanos; exposición a la radiación para astronautas y vuelos de gran altura y efectos biológicos de la radiación electromagnética.” (IGAC, 2019).

Marco geográfico

Colombia es un país tropical ubicado al norte de Sudamérica, su frontera marítima limita con Haití, Venezuela, Ecuador, Costa Rica, Honduras, Jamaica, Panamá, República dominicana y Nicaragua. Sus fronteras terrestres limitan con Brasil, Ecuador, Perú, Panamá y Venezuela.



Ilustración 3. Límites de Colombia

Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_5mgyyBVsfE/UI3SQvzQH0I/AAAAAAAAAAc/nvLraXr6STw/s1600/mapamaritimo.jpg

[_5mgyyBVsfE/UI3SQvzQH0I/AAAAAAAAAAc/nvLraXr6STw/s1600/mapamaritimo.jpg](http://1.bp.blogspot.com/_5mgyyBVsfE/UI3SQvzQH0I/AAAAAAAAAAc/nvLraXr6STw/s1600/mapamaritimo.jpg)

El ecuador geográfico pasa por la parte sur de Colombia, esta posición es clave ya que en la línea del ecuador la inclinación magnética tiende a ser cero y los valores de intensidad del campo magnético son bajos, es decir los cinturones de Van Allen se encuentran mucho más cerca de la tierra debido a que la radiación solar golpea directamente esta parte de la magnetosfera por lo cual se debilita.

De manera general la topografía de su territorio se caracteriza principalmente por ser una región montañosa y la región plana compuesta por el Orinoco y el Amazonas. Las cordilleras de los Andes inician en Nariño formando el macizo de los pastos y se componen por tres cadenas montañosas, las cuales surgieron mediante el proceso de subducción entre la placa de nazca y la placa suramericana (Díaz Merlano & Silva Álvarez, 2018).

La cordillera occidental tiene una altura media de 200 msnm, tiene una longitud de 1095 km y se extiende sobre los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Chocó, Risaralda, Antioquia y Córdoba (Díaz Merlano & Silva Álvarez, 2018).

La cordillera central cubre departamentos como el Cauca, Huila, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia y Bolívar. Tiene una altura promedio de 3000 msnm y su longitud es de 900 km aproximadamente (Díaz Merlano & Silva Álvarez, 2018).

La cordillera oriental que cubre los departamentos del Cauca, Caquetá, Huila, Meta, Cundinamarca, Boyacá, Casanare, Santander, Arauca, Norte de Santander, Cesar y La Guajira. Posee una altura media superior a los 3.000 m.s.n.m, y una extensión de 1300 km aproximadamente (Díaz Merlano & Silva Álvarez, 2018).

Por su ubicación sobre el cinturón del fuego del pacifico, Colombia tiene un gran número de volcanes, y además se encuentra considerablemente cerca de la anomalía del atlántico sur (Prager, William, & Hutton, 2002).

Metodología preliminar

Estadística descriptiva

A través de métodos estadísticos se hará un análisis preciso relacionado a las diferencias y relaciones que se puedan presentar entre la información derivada de las observaciones del IGAC y la generada por NOAA.

Medidas de tendencia central

Media aritmética

Representa la suma de los números en la muestra, dividido entre la cantidad de números que hay (Navidi, 2006). Se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Ecuación 5. Media aritmética

Donde:

\bar{X} = Media

X_i = Dato

n= Número de datos

Mediana

Se define como la medida de tendencia central que divide una distribución en dos partes iguales (Gallardo de Prada & Moreno Garzon, 1999). Esta se define según el número de datos, pues si este es impar se determina con la siguiente ecuación:

$$\tilde{X} = \frac{n + 1}{2}$$

Equación 6. Mediana para datos impares

Para casos en donde el número de datos es par, la media se calcula por medio de la ecuación:

$$\tilde{X} = \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_{\frac{n}{2}+1}}{2}}{2}$$

Equación 7. Mediana para datos pares

Donde:

\tilde{X} : Media

n: Número de datos

$\frac{x_n}{2}$: Dato en la posición de n/2

$\frac{x_{\frac{n}{2}+1}}$: Dato en la posición (n/2)+1

Medidas de dispersión

Determinan cómo se agrupan o dispersan los datos alrededor de un promedio (Gallardo de Prada & Moreno Garzon, 1999).

Rango:

Identifica la distancia entre el mayor valor y el menor valor de la distribución. Se define como la diferencia entre estos.

$$R = X_{max} - X_{min}$$

Equación 8. Rango

Varianza:

Se define como la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones, respecto a su media (Gallardo de Prada & Moreno Garzon, 1999). Su fórmula para datos no agrupados es:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Equación 9. Varianza

Donde:

S²: Varianza

n: Número de datos

X_i: Dato

\bar{X} : Media

Desviación estándar

Es la cantidad que mide el grado de dispersión de una muestra. Si la dispersión es grande, los valores de la muestra tienden a alejarse de la media, pero una dispersión pequeña se identifica si los valores tienden a acercarse a la media (Navidi, 2006). Se determina a través de la ecuación, para datos no agrupados:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Equation 10. Desviación estándar

Donde:

S: Desviación estándar

n: Número de datos

X_i : Dato

\bar{X} : Media

Covarianza

Representa el grado de intensidad de relación entre dos variables. Se define como la media del producto de las desviaciones (Navidi, 2006). Su fórmula es:

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum XY}{n} - \bar{X} * \bar{Y}$$

Equation 11. Covarianza

Donde:

Cov(X, Y): Covarianza

X e Y: Variables

n: Número de datos

\bar{X} : Media de X

\bar{Y} : Media de Y

Coefficiente de correlación

Mide de la intensidad de una relación lineal entre dos variables (Navidi, 2006). El resultado toma valores desde -1 hasta 1 cuando hay relación entre las variables, un valor cercano a -1 indica relación que tiende a ser inversa, cercano a 1 indica relación directa (Gallardo de Prada & Moreno Garzon, 1999). La correlación entre las variables X e Y está dada por:

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(X, Y)}{S_x S_y}$$

Equation 12. Coeficiente de correlación

Donde:

ρ_{xy} : Coeficiente de correlación

Cov(X, Y): Covarianza

S_x : Desviación estándar de X

S_y : Desviación estándar de Y

Regresión lineal

La regresión lineal es un modelo para pronosticar el comportamiento de patrones que presenten una relación de linealidad entre la demanda y el tiempo, con tendencia creciente o decreciente (Salazar López, 2019).

El método de ajuste de mínimos cuadrados consiste en hacer mínima la media aritmética de los errores cuadrados o de los residuos e_i , donde estos se consideran como la diferencia de los valores de las medias condicionadas y los teóricos (García, y otros, 2005).

A través del ajuste, la ecuación de la recta de regresión de Y sobre X es:

$$Y = \bar{Y} + \frac{S_{xy}}{S^2_{xy}}(X - \bar{X})$$

Equation 13. Regresión lineal

Donde:

Y: Variable independiente

\bar{Y} : Media de Y

S_{xy} : Desviación estándar

S: Varianza

X: Variable dependiente

\bar{X} : Media de X

Capítulo 2

Metodología

Cálculo de la intensidad total (F)

1. Se extrajo la información de la base de datos de geomagnetismo del IGAC. Esta contaba con los campos de ID de estación, fecha, coordenadas geográficas, declinación, inclinación, intensidad horizontal y hora de cada observación.

En esta base de datos se corrigen errores de digitación y se calcula la intensidad total a través de los valores de declinación, inclinación e intensidad horizontal y las fórmulas que relacionan las componentes geomagnéticas descritas en el capítulo anterior.

2. Se determinaron intervalos de acuerdo a la distribución de las mediciones sobre el territorio, de manera que se abarcara la mayor área posible en cada uno.

A continuación se especifican los rangos.

Tabla 1. Intervalos de estudio

| Intervalos anuales |
|--------------------|
| 1968-1971 |
| 1972-1975 |
| 1976-1981 |
| 1987-1993 |

3. La información de NOAA se genera con estaciones seleccionadas en cada intervalo en los 32 departamentos.

Para el cálculo de la intensidad total en el geoportal de NOAA, es necesario conocer el dato de la altura sobre el nivel del mar en el punto que vaya a ser observado. Esta se calcula a través de la aplicación Google Earth.

En Google Earth se ingresan los datos de longitud y latitud. En la barra al inferior de la ventana aparecerá el valor correspondiente a la altura en la unidad de metros sobre el nivel del mar.

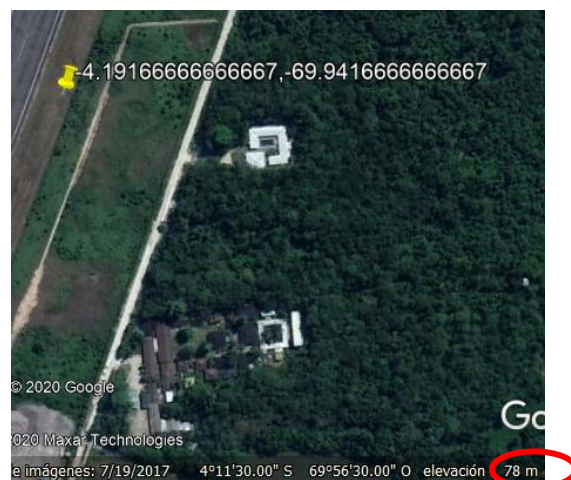


Ilustración 4. Altura en Google Earth

Fuente: Google Earth

Cabe aclarar que en la página oficial de Google no se hace ninguna afirmación acerca de la precisión de las coordenadas que manejan, de manera más concreta; los datos de altitud. Sin embargo, realizando comparaciones con información propia tomada en campo, se ha logrado evidenciar que las diferencias entre la información extraída de campo localmente y la de Google Earth llegan incluso a ser menores de 5 metros, dependiendo de la zona. Esto sumado a que en la calculadora de NOAA una diferencia de 40 metros solo llega a modificar valores decimales, y para que haya una diferencia que altere las unidades, el margen de error debe sobrepasar los 40 metros de altitud. Por lo que se puede decir que los datos de altura obtenidos de Google Earth son confiables para este trabajo.

4. En el geoportal de NOAA disponible en la dirección web <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>.

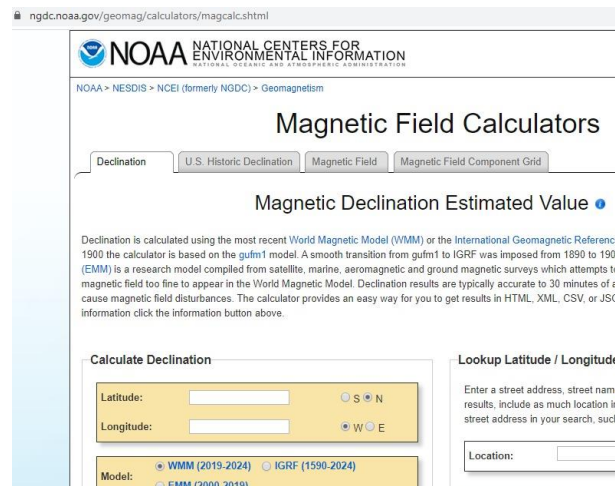


Ilustración 5. Geoportal de NOAA

Fuente: Geoportal NOAA

En la pestaña “Magnetic Field” se calcula la intensidad total del campo magnético.

Magnetic Field Calculators

Declination | U.S. Historic Declination | **Magnetic Field** | Magnetic Field Component Grid

Magnetic Field Estimated Values

Magnetic field is calculated using the most recent World Magnetic Model (WMM) or the International Geomagnetic Refer 1900 the calculator is based on the *gufm1* model. A smooth transition from *gufm1* to IGRF was imposed from 1890 to 19 (EMM) is a research model compiled from satellite, marine, aeromagnetic and ground magnetic surveys which attempts magnetic field too fine to appear in the World Magnetic Model. The calculator provides an easy way for you to get results programmatically (API). For more information click the information button above.

Calculate Magnetic Field

Latitude: S N
Longitude: W E
Elevation: GPS Mean sea level
 Kilometers

Model: WMM (2019-2024) IGRF (1590-2024)
 EMM (2000-2019)

Start Date: Year Month Day

Lookup Latitude / Longitude

Enter a street address, street name results, include as much location street address in your search, su

Location:

Ilustración 6. Pestaña “Magnetic Field”

Fuente: Geoportal NOAA

Se deben ingresar los valores correspondientes a coordenadas geográficas, altura, fecha y se selecciona un formato para generar el resultado.

Calculate Magnetic Field

Latitude: S N
Longitude: W E
Elevation: GPS Mean sea level
 Meters

Model: WMM (2019-2024) IGRF (1590-2024)
 EMM (2000-2019)

Start Date: Year Month Day
End Date: Year Month Day
Step size:

Result format: HTML XML CSV JSON

Ilustración 7. Variables para el cálculo de la intensidad total

Fuente: Geoportal NOAA

En el cuadro generado por el formato “HTML”, la columna “Total Field” indica el valor de la intensidad total y su variación promedio al año.

| Magnetic Field | | | | | | | |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------|
| Model Used: | IGRF2020 | | | | | | |
| Latitude: | 4.191666667° N | | | | | | |
| Longitude: | 69.941666667° W | | | | | | |
| Elevation: | 78.0 m Mean Sea Level | | | | | | |
| Date | Declination (+ E - W) | Inclination (+ D - U) | Horizontal Intensity | North Comp (+ N - S) | East Comp (+ E - W) | Vertical Comp (+ D - U) | Total Field |
| 1969-09-14 | -2.6667° | 31.5018° | 29,295.4 nT | 29,263.6 nT | -1,363.0 nT | 17,953.4 nT | 34,359.0 nT |
| Change/year | -0.1398°/yr | -0.0804°/yr | -65.6 nT/yr | -68.9 nT/yr | -68.3 nT/yr | -96.8 nT/yr | -106.5 nT/yr |

Ilustración 8. Resultado del cálculo de la declinación magnética

Fuente: Geoportal NOAA

Generación de las cartas magnéticas

1. Se procedió a ingresar la información de la base de datos al software ArcGIS para cada intervalo.



Ilustración 9. Estaciones medidas durante uno de los intervalos

Fuente: Elaboración propia

2. Se procesó la información de intensidad total a través de la creación de un modelo de triangulación.

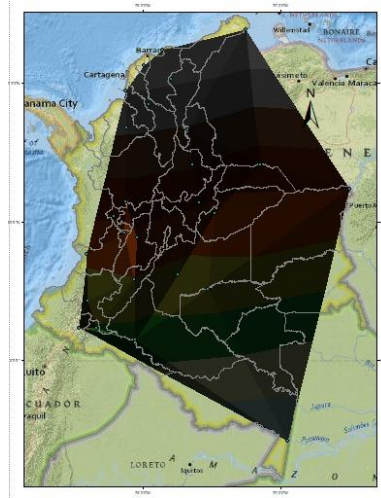


Ilustración 10. Modelo de triangulación para un intervalo
Fuente: Elaboración propia

3. Del modelo de triangulación “Triangular Irregular Networks” (TIN), se generan las isolinéas para representar las isodinámicas o líneas con igual valor de la intensidad total.

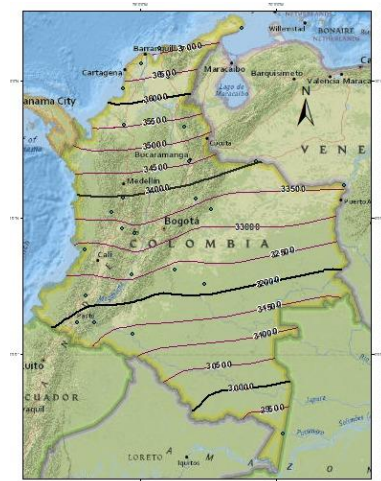


Ilustración 11. Líneas isodinámicas para un intervalo
Fuente: Elaboración propia

4. Se genera un modelo que representa la distribución de la intensidad magnética a través del método de interpolación y extrapolación “Inverse Distance Weighted” (IDW).

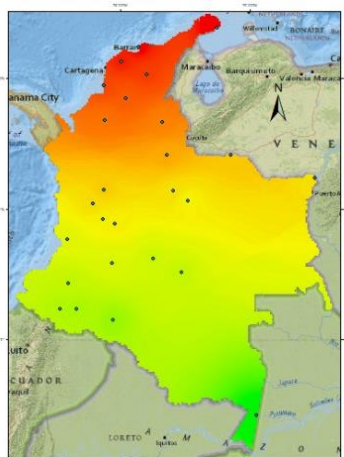


Ilustración 12. Generación de modelo de interpolación IDW

Fuente: Elaboración propia

5. Al activar la capa de isolíneas se obtiene el modelo resultante de la intensidad total para cada el intervalo.

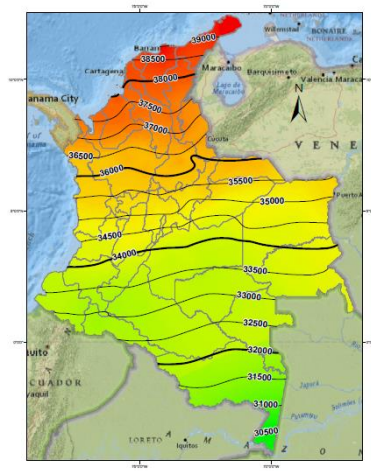


Ilustración 13. Modelo final

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se aplican los cálculos estadísticos de medidas de tendencia central (media y mediana), medidas de dispersión (rango, varianza, desviación estándar, covarianza y coeficiente de variación) y regresión lineal. Estos se aplican con las fórmulas que se encuentran en la metodología preliminar y se consideran en el análisis de resultados.

Capítulo 3

Resultados

Se obtuvieron ocho productos cartográficos referentes a las cartas isodinámicas que representan la intensidad total. Cuatro cartas corresponden a la información extraída de la base de datos del IGAC y los restantes a la información generada por NOAA.

A continuación se muestran los modelos resultantes del IGAC.

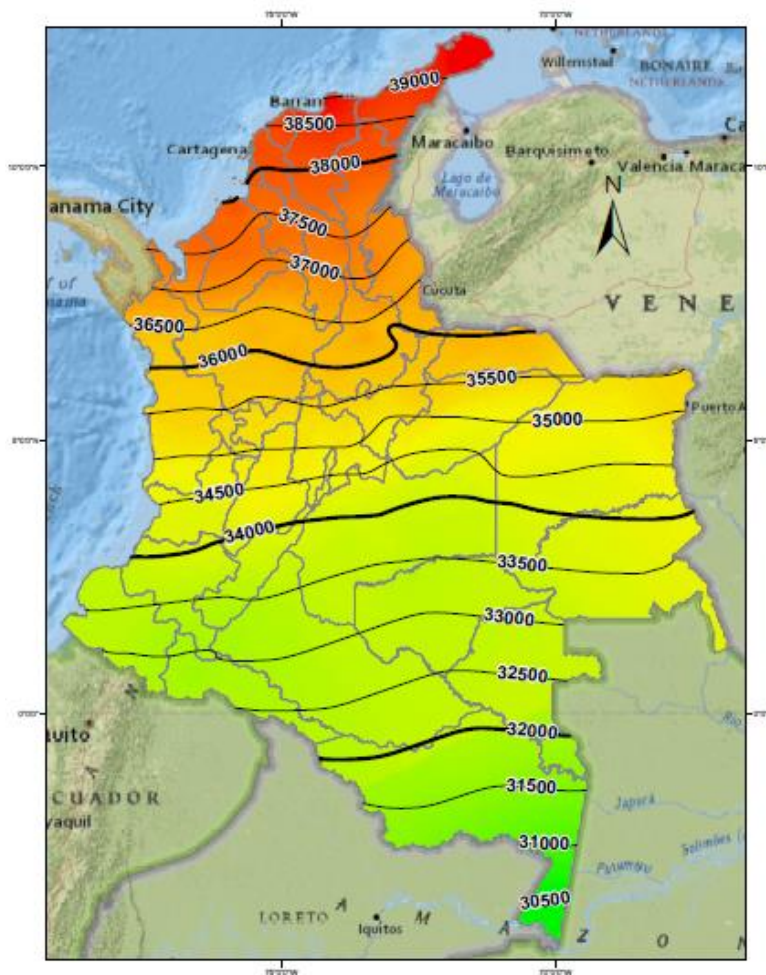


Ilustración 14. Carta isodinámica de Colombia de 1968 a 1971, según datos IGAC

Fuente: Elaboración propia

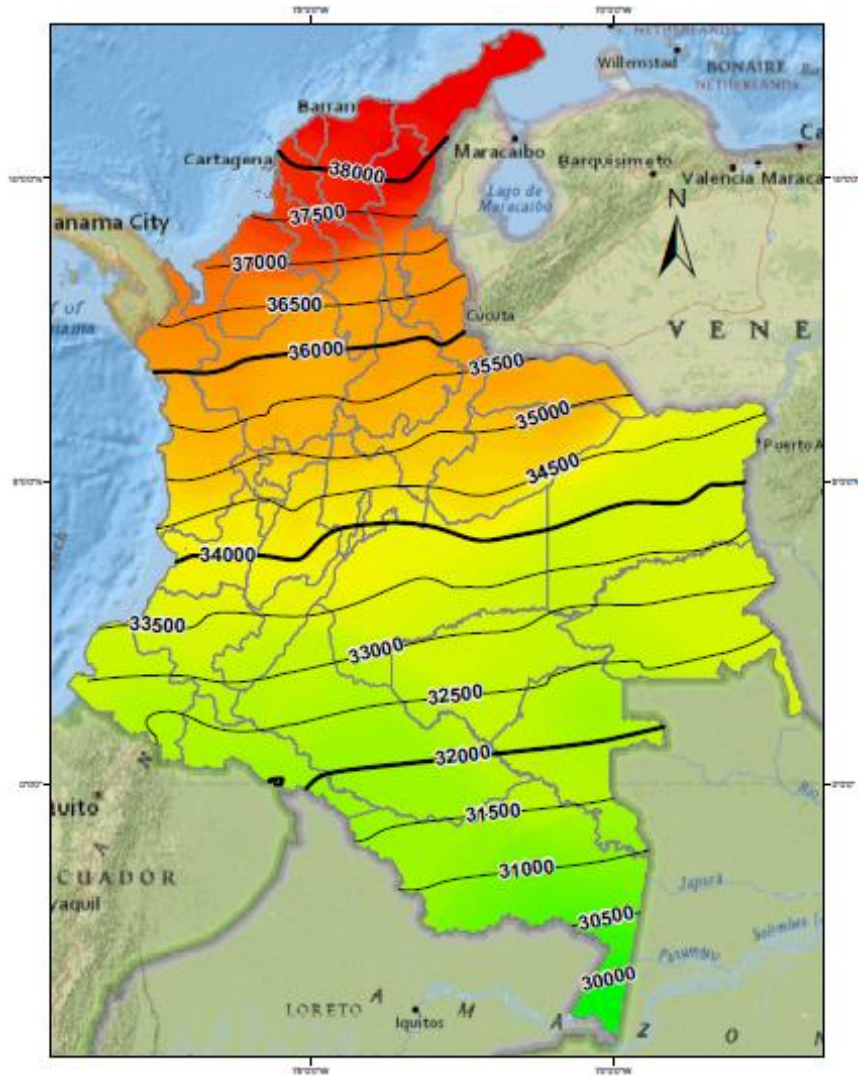


Ilustración 15. Carta isodinámica de Colombia de 1972 a 1975, según datos IGAC

Fuente: Elaboración propia

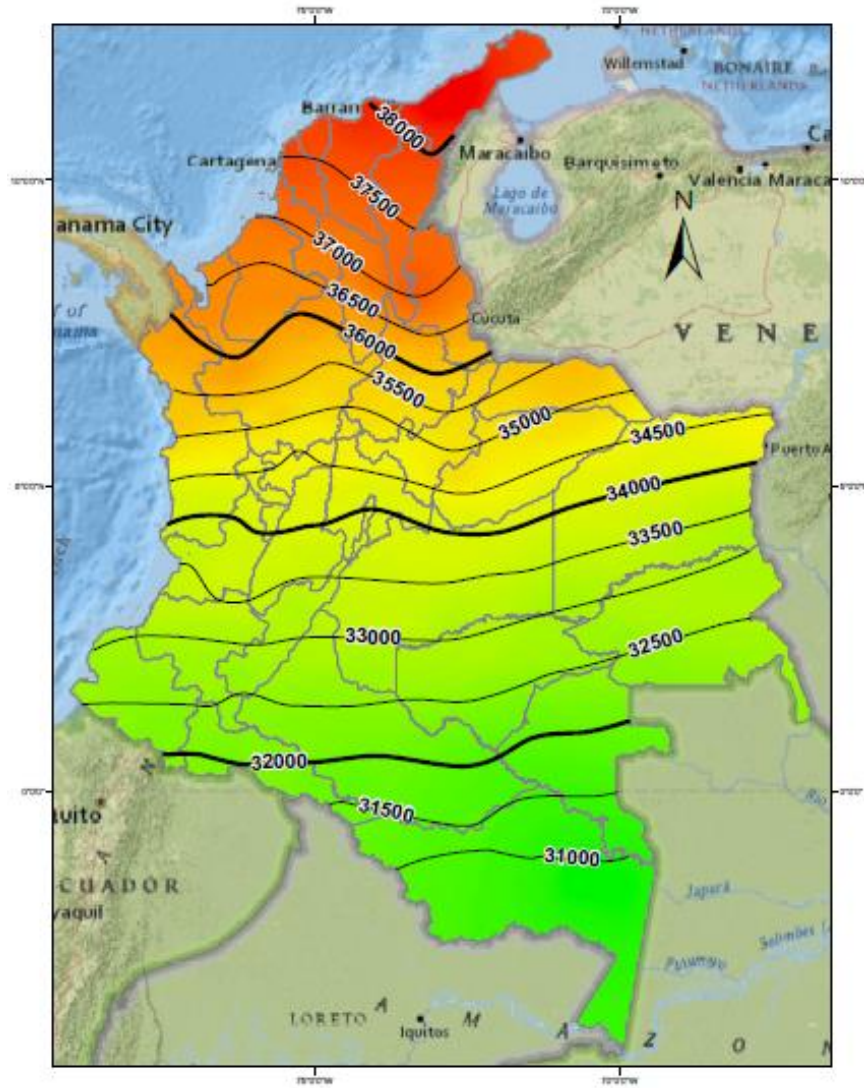


Ilustración 16. Carta isodinámica de Colombia de 1976 a 1981, según datos IGAC

Fuente: Elaboración propia

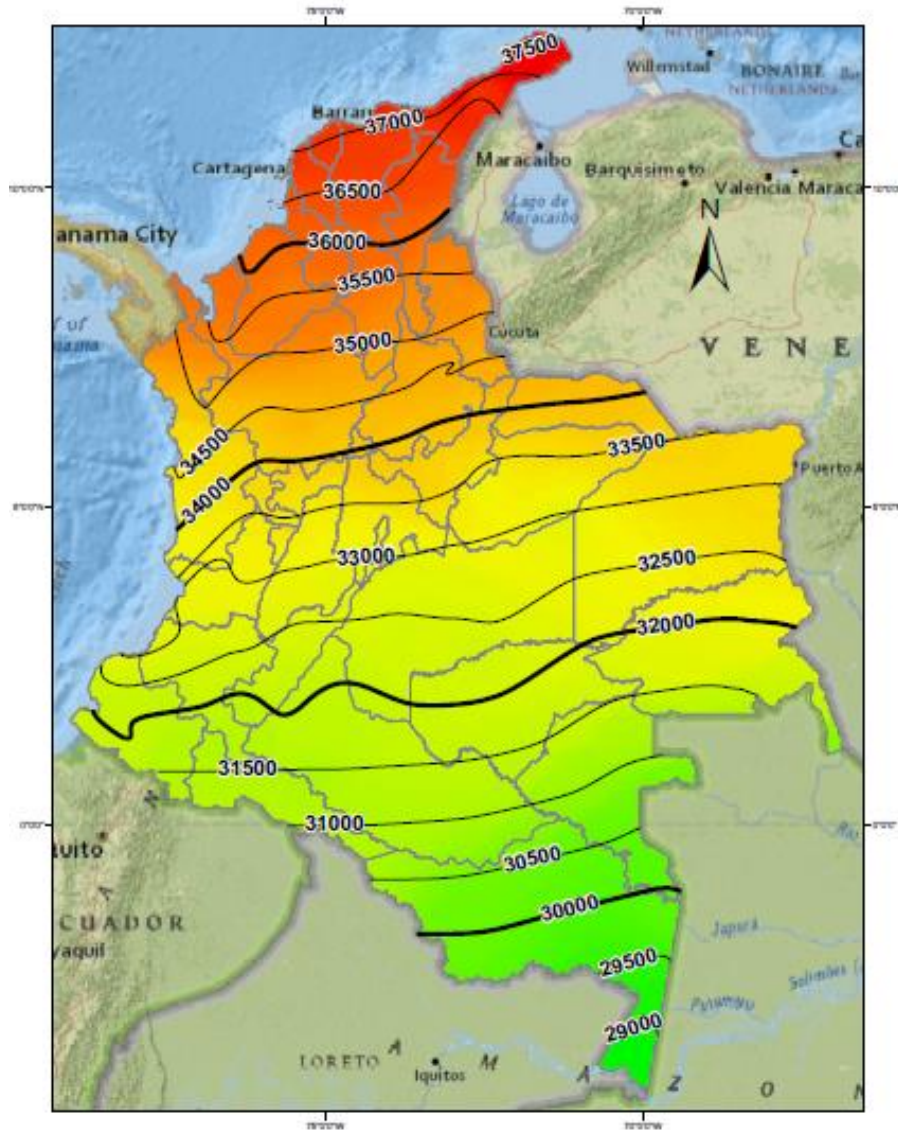


Ilustración 17. Carta isodinámica de Colombia de 1987 a 1993, según datos IGAC

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran los modelos resultantes de la información generada por NOAA.

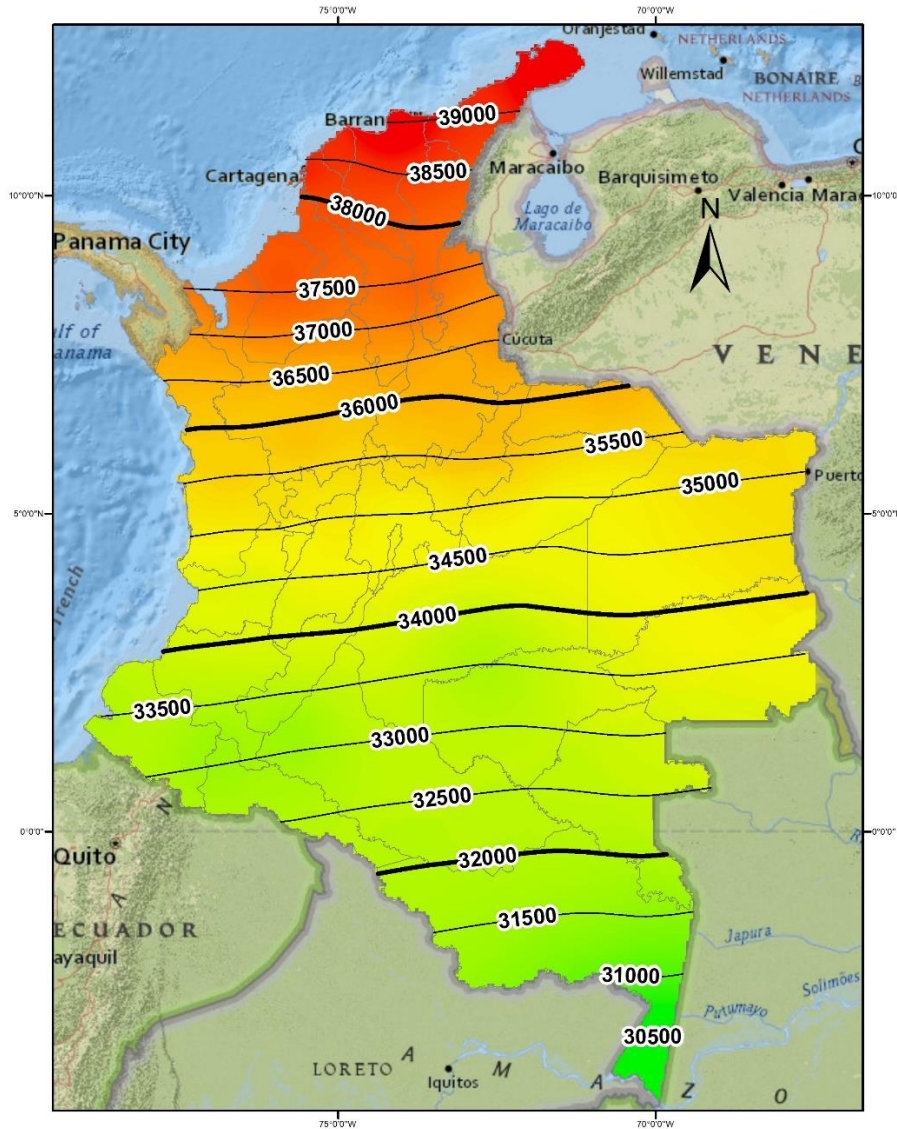


Ilustración 18. Carta isodinámica de Colombia de 1968 a 1971, según datos IGAC

Fuente: Elaboración propia

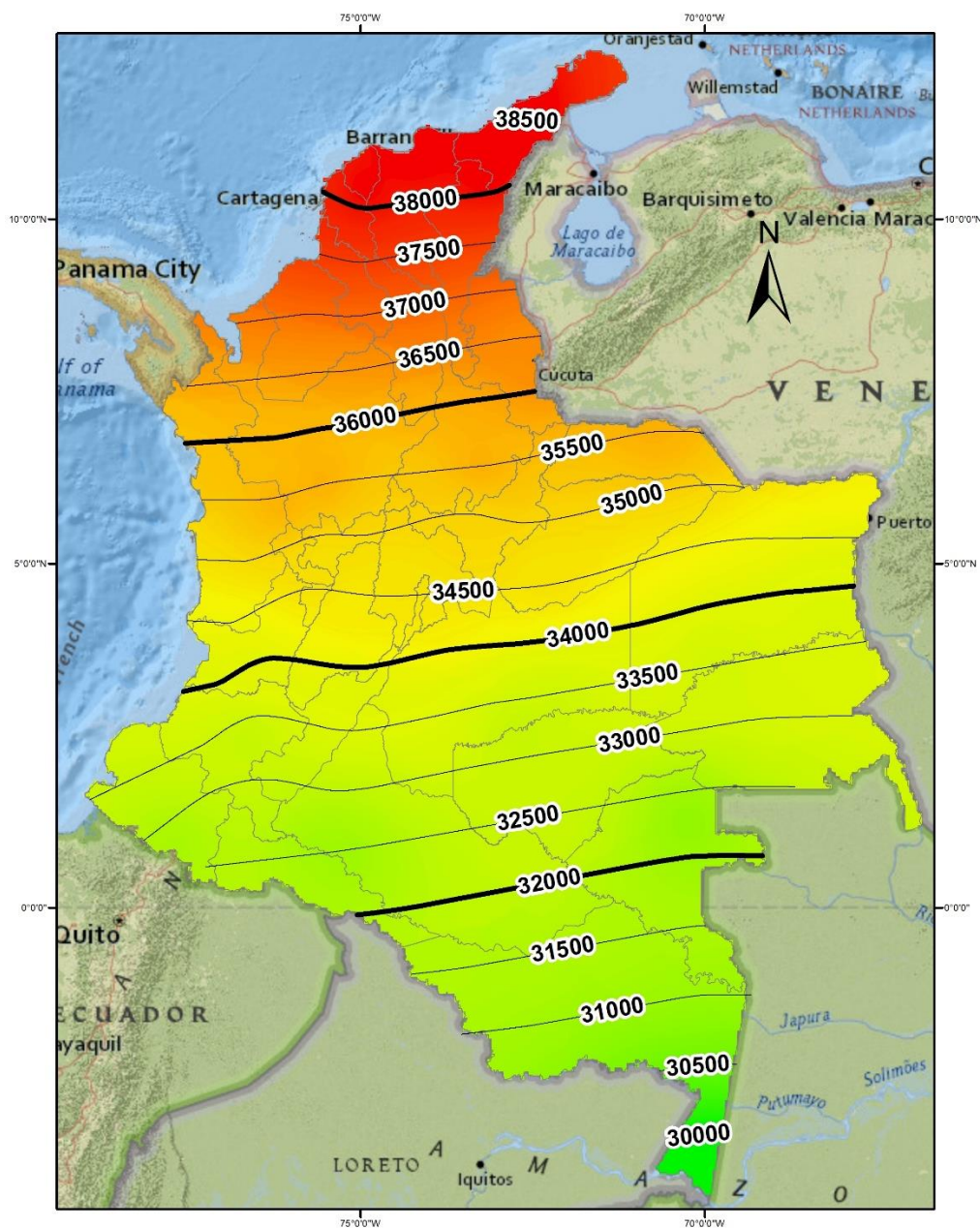


Ilustración 19. Carta isodinámica de Colombia de 1972 a 1975, según datos NOAA

Fuente: Elaboración propia

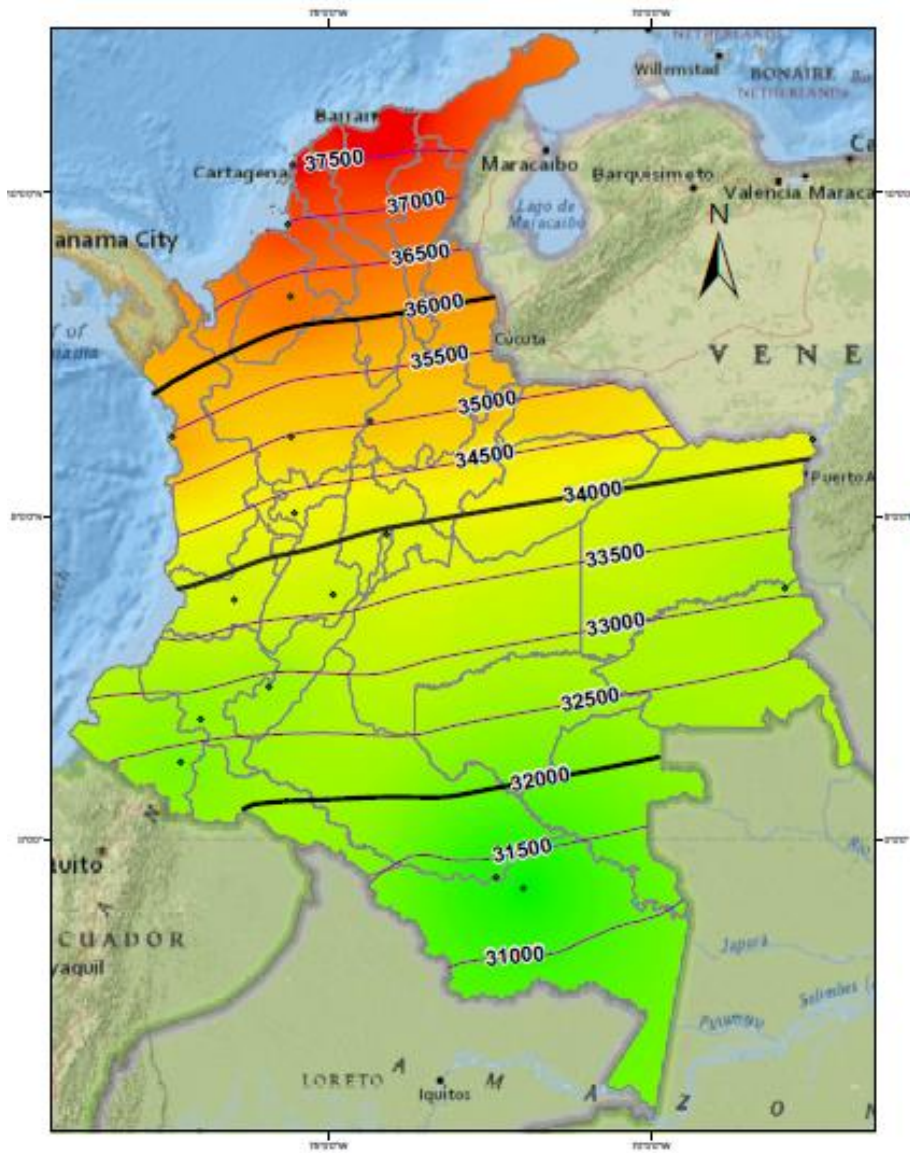


Ilustración 20. Carta isodinámica de Colombia de 1976 a 1981, según datos NOAA

Fuente: Elaboración propia

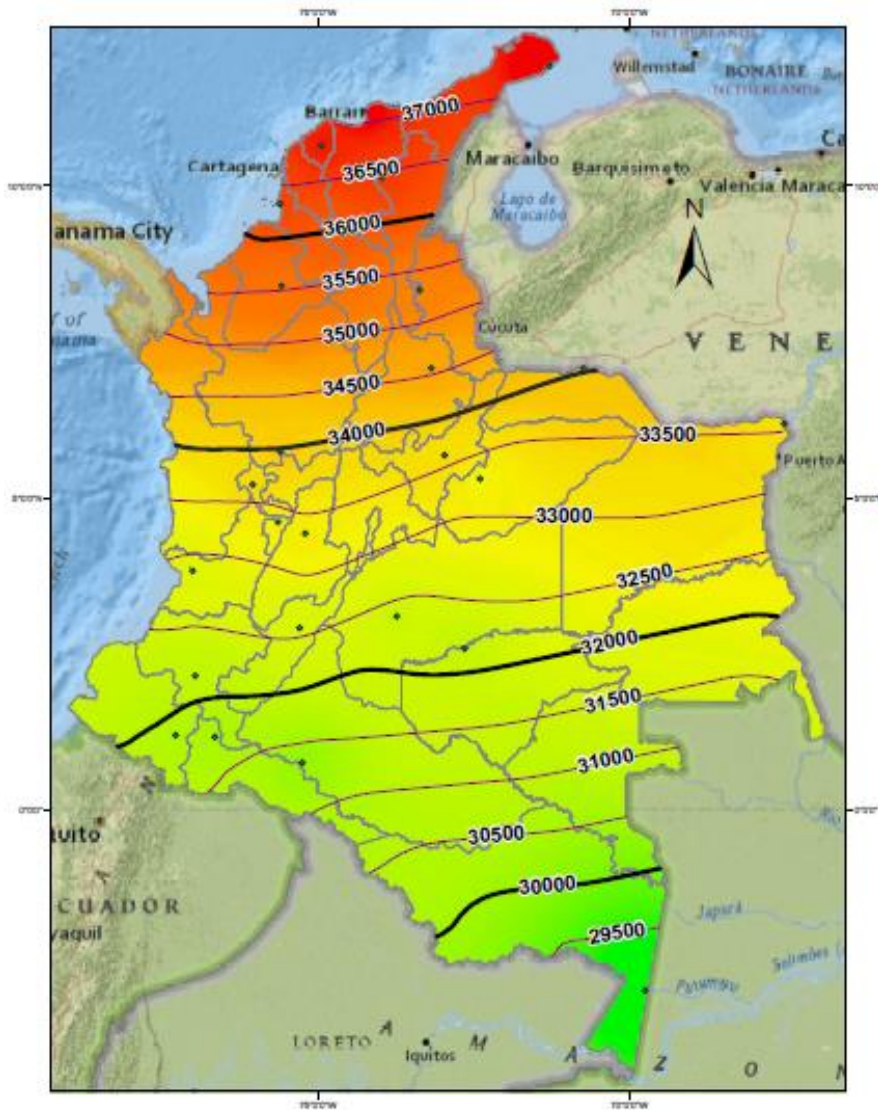


Ilustración 21. Carta isodinámica de Colombia de 1987 a 1993, según datos NOAA

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes cuadros se resume la información correspondiente a la intensidad total (F) de las estaciones seleccionadas para realizar la comparación de datos de las fuentes de información en cuestión.

Tabla 2. Intensidad total de Colombia 1968 a 1971

| Estación | Departamento | Municipio | Coordenadas | | Altura (m) | Intensidad total (nT) | |
|----------|----------------|-----------------------|-------------|----------|------------|-----------------------|-----------|
| | | | Latitud | Longitud | | IGAC | NOAA |
| 59 | Amazonas | Leticia | -4.192 | -69.942 | 78 | 30156.217 | 30005.000 |
| 3 | Antioquia | Medellín | 6.213 | -75.591 | 1497 | 35681.733 | 35789.700 |
| 254 | Boyacá | San Mateo | 6.401 | -72.566 | 2093 | 35775.479 | 35853.400 |
| 47_B | Arauca | Arauca | 7.069 | -70.753 | 131 | 36046.005 | 36060.300 |
| 5 | Bolívar | Cartagena | 10.433 | -75.538 | 565 | 38226.071 | 38384.400 |
| 259 | Caldas | Viterbo | 5.070 | -75.867 | 936 | 35261.487 | 35226.200 |
| 275 | Caquetá | Morelia | 1.475 | -75.765 | 273 | 33125.651 | 33104.000 |
| 51 | Casanare | Orocue | 4.794 | -71.351 | 134 | 34455.859 | 34638.700 |
| 209 | Cesar | La gloria | 8.628 | -73.811 | 31 | 37514.867 | 37499.000 |
| 37 | Chocó | Quibdó | 5.688 | -76.665 | 27 | 35525.924 | 35544.900 |
| 97 | Córdoba | Montería | 8.756 | -75.873 | 16 | 37674.633 | 37706.900 |
| 1 | Cundinamarca | Bogotá | 4.712 | -74.087 | 2559 | 34825.778 | 34843.400 |
| 61 | Guajira | Puerto López | 11.923 | -71.274 | 2 | 39229.048 | 39299.900 |
| 55 | Guaviare | San José del Guaviare | 2.564 | -72.641 | 186 | 33329.741 | 33449.600 |
| 23_A | Magdalena | Santa Marta | 11.244 | -74.189 | 17 | 39063.662 | 39072.400 |
| 263 | Meta | San Pedro de Arimena | 5.122 | -70.644 | 130 | 34855.735 | 34920.000 |
| 28_(B) | Nariño | Tumaco | 1.824 | -78.746 | 0 | 33446.767 | 33508.400 |
| 8 | Nte. Santander | Cúcuta | 7.908 | -72.503 | 296 | 36478.601 | 36592.500 |
| 246 | Putumayo | Sibundoy | 1.192 | -76.910 | 2104 | 33021.039 | 33070.700 |
| 274 | Quindío | Armenia | 4.604 | -75.636 | 1773 | 34951.197 | 34844.500 |
| 65_A | San Andrés | San Andrés | 12.583 | -81.717 | 4 | 40007.287 | 40147.900 |
| 13_A | Santander | Bucaramanga | 7.093 | -73.136 | 873 | 35952.575 | 36117.200 |
| 353 | Sucre | Berrugas | 9.708 | -75.604 | 13 | 37771.284 | 37766.600 |
| 289 | Tolima | Herveo Padua | 5.140 | -75.119 | 2001 | 35105.857 | 35106.700 |
| 272 | V. del Cauca | Cerrito | 3.693 | -76.315 | 990 | 34261.646 | 34362.000 |
| 56_A | Vaupés | Mitú | 2.578 | -72.713 | 194 | 33393.752 | 33461.800 |
| 50 | Vichada | Puerto Carreño | 6.182 | -67.507 | 194 | 35514.614 | 35264.300 |

Tabla 3. Intensidad total de Colombia 1972 a 1975

| Estación | Departamento | Municipio | Coordenadas | | Altura (m) | Intensidad total (nT) | |
|----------|----------------|-----------------------|-------------|----------|------------|-----------------------|---------|
| | | | Latitud | Longitud | | IGAC | NOAA |
| 59 | Amazonas | Leticia | -4.192 | -69.942 | 78 | 29516.161 | 29547.7 |
| 3 | Antioquia | Medellín | 6.213 | -75.591 | 1501 | 35338.757 | 35533.2 |
| 101 | Boyacá | Tunja | 5.538 | -73.340 | 2710 | 34786.166 | 34827.1 |
| 47_B | Arauca | Arauca | 7.069 | -70.753 | 130 | 35449.584 | 35570.6 |
| 356 | Atlántico | Manati | 10.464 | -74.946 | 26 | 38119.634 | 38214.6 |
| 5 | Bolívar | Cartagena | 10.433 | -75.538 | 1 | 37985.153 | 38019.7 |
| 64 | Caldas | Manizales | 5.044 | -75.511 | 1927 | 33990.244 | 34670.8 |
| 133 | Caquetá | Base aérea | 0.747 | -75.242 | 193 | 32455.921 | 32455.5 |
| 330 | Casanare | Mani | 4.811 | -72.273 | 175 | 34604.303 | 34585.4 |
| 31 | Cauca | Popayán | 2.434 | -76.618 | 1746 | 33311.375 | 33234.9 |
| 358 | Cesar | Patiyal | 10.699 | -73.201 | 366 | 38245.447 | 38232.3 |
| 260 | Chocó | Carmen de Atrato | 5.881 | -76.146 | 1612 | 35287.796 | 35480.3 |
| 348 | Cundinamarca | La mesa | 4.618 | -74.481 | 1040 | 34444.592 | 34555.1 |
| 391 | Guainía | Barrancomina | 3.486 | -69.809 | 132 | 33399.831 | 33481 |
| 26 | Guajira | Riohacha | 11.533 | -72.902 | 14 | 38481.195 | 38528.1 |
| 55 | Guaviare | San José del Guaviare | 2.564 | -72.641 | 186 | 33091.512 | 33215.6 |
| 317 | Huila | Baraya | 3.108 | -75.096 | 530 | 33793.110 | 33834.8 |
| 24_A | Magdalena | Santa Marta | 11.129 | -74.281 | 4 | 38286.738 | 38405.6 |
| 307 | Meta | Puerto Guaviare | 2.896 | -72.133 | 176 | 33351.572 | 33356.3 |
| 91 | Nariño | Ipiales | 0.860 | -77.662 | 2956 | 32555.591 | 32664.3 |
| 8 | Nte. Santander | Cúcuta | 7.908 | -72.503 | 296 | 36128.733 | 36221.8 |
| 363 | Putumayo | Solita | 0.840 | -75.614 | 205 | 32444.908 | 32524.5 |
| 95 | Quindío | El Socorro | 6.482 | -73.254 | 1309 | 35461.921 | 35548.8 |
| 99 | Tolima | Ibagué | 4.422 | -75.131 | 909 | 34418.479 | 34448.3 |
| 10 | V. del Cauca | Cali | 3.497 | -76.527 | 999 | 33949.597 | 33903.7 |
| 12_A | Vaupés | Mitú | 1.239 | -70.226 | 172 | 32293.618 | 32238.7 |
| 396 | Vichada | - | 4.008 | -68.221 | 94 | 32999.802 | 33614.9 |

Tabla 4. Intensidad total en Colombia 1976 a 1981

| Estación | Departamento | Municipio | Coordenadas | | Altura (m) | Intensidad total (nT) | |
|----------|--------------|---------------------|-------------|----------|------------|-----------------------|-----------|
| | | | Latitud | Longitud | | IGAC | NOAA |
| 427 | Amazonas | Isla María Cristina | -0.762 | -71.968 | 95 | 31203.761 | 31233.300 |
| 4 | Antioquia | Medellín | 6.223 | -75.565 | 1579 | 35099.386 | 34958.000 |
| 5 | Bolívar | Cartagena | 10.433 | -75.538 | 1 | 37499.856 | 37520.500 |
| 64 | Caldas | Manizales | 5.044 | -75.511 | 1926 | 34361.384 | 34274.500 |
| 128 | Caquetá | Araracuara | -0.597 | -72.391 | 255 | 31578.651 | 31357.700 |
| 463 | Cauca | Bolívar | 1.853 | -76.969 | 2015 | 33024.104 | 32763.800 |
| 89 | Chocó | Bahía Solano | 6.225 | -77.406 | 14 | 35316.560 | 35451.300 |
| 41 | Córdoba | Planeta Rica | 8.395 | -75.574 | 82 | 36243.497 | 36271.000 |
| 1 | Cundinamarca | Bogotá | 4.712 | -74.087 | 2558 | 33988.520 | 33939.300 |
| 392 | Guainía | Puerto Inírida | 3.881 | -67.918 | 95 | 33053.367 | 33057.700 |
| 84 | Huila | La plata | 2.356 | -75.909 | 1256 | 32980.399 | 32854.300 |
| 23_B | Magdalena | Santa Marta | 11.197 | -74.264 | 4 | 37889.335 | 37896.100 |
| 29 | Nariño | Pasto | 1.190 | -77.276 | 2591 | 32126.592 | 32335.100 |
| 46 | Santander | Puerto Olaya | 6.467 | -74.339 | 117 | 35032.025 | 35035.700 |
| 198 | Sucre | Tolu | 9.507 | -75.619 | 5 | 37014.433 | 36952.300 |
| 474 | Tolima | Prado | 3.779 | -74.915 | 332 | 33630.410 | 33664.900 |
| 469 | V. del Cauca | Vijes | 3.703 | -76.446 | 990 | 33791.704 | 33740.200 |
| 49_A | Vichada | Puerto Carreño | 6.185 | -67.489 | 55 | 34484.042 | 34142.000 |

Tabla 5. Intensidad total en Colombia 1987 a 1993

| Estación | Departamento | Municipio | Coordenadas | | Altura (m) | Intensidad total (nT) | |
|----------|----------------|-----------------------|-------------|----------|------------|-----------------------|-----------|
| | | | Latitud | Longitud | | IGAC | NOAA |
| 114 | Amazonas | Tarapacá | -2.906 | -69.741 | 84 | 28931.788 | 28987.200 |
| 287_A | Antioquia | La Pintada | 5.738 | -75.603 | 593 | 34034.874 | 33976.500 |
| 17 | Boyacá | Sogamoso | 5.676 | -72.958 | 2502 | 33610.668 | 33612.600 |
| 48_A | Arauca | Arauca | 7.068 | -70.730 | 128 | 34203.337 | 34012.500 |
| 193_A | Atlántico | Sabanalarga | 10.640 | -74.941 | 85 | 36844.991 | 36841.200 |
| 199_A | Bolívar | Magangué | 9.240 | -74.755 | 17 | 36080.672 | 35978.900 |
| 133 | Caquetá | base aérea | 0.747 | -75.242 | 198 | 31406.538 | 31324.600 |
| 507 | Casanare | el Yopal | 5.300 | -72.387 | 294 | 33127.143 | 33227.500 |
| 82 | Cauca | El Bordo | 2.140 | -76.962 | 930 | 32156.679 | 32154.000 |
| 103 | Cesar | El Copey | 10.134 | -73.962 | 151 | 36622.658 | 36438.600 |
| 41 | Córdoba | Planeta Rica | 8.395 | -75.574 | 82 | 35398.739 | 35547.400 |
| 61 | Guajira | puerto López | 11.923 | -71.274 | 2 | 37142.740 | 37219.000 |
| 56_B | Guaviare | san José del Guaviare | 2.574 | -72.640 | 185 | 32232.316 | 32217.600 |
| 16 | Huila | Neiva | 2.910 | -75.287 | 446 | 32580.608 | 32607.000 |
| 23_B | Magdalena | Santamarta | 11.197 | -74.264 | 4 | 37121.115 | 37117.100 |
| 304_A | Meta | Vistahermosa | 3.096 | -73.728 | 278 | 32274.770 | 32346.400 |
| 29 | Nariño | Pasto | 1.190 | -77.276 | 2591 | 31634.964 | 31851.300 |
| 77_A | Nte. Santander | Ocaña | 8.328 | -73.360 | 1151 | 35377.100 | 35310.100 |
| 120_A | Putumayo | Mocoa | 1.161 | -76.646 | 601 | 31569.989 | 31649.100 |
| 274 | Quindío | Armenia | 4.604 | -75.636 | 1773 | 33430.036 | 33299.100 |
| 496 | Risaralda | pueblo rico | 5.204 | -76.038 | 1687 | 33613.461 | 33661.400 |
| 14_A | Santander | Girón | 7.075 | -73.172 | 712 | 34555.748 | 34576.500 |
| 353 | Sucre | Berrugas | 9.708 | -75.604 | 13 | 36410.175 | 36332.500 |
| 100 | Tolima | Ibagué | 4.422 | -75.194 | 1089 | 33501.516 | 33396.100 |
| 34_A | V. del Cauca | Buenaventura | 3.824 | -77.002 | 16 | 32649.125 | 32837.100 |
| 50 | Vichada | Puertocarreño | 6.182 | -67.507 | 51 | 33864.420 | 33560.700 |

Análisis de resultados

Cartas isodinámicas

Inicialmente es evidente la distribución de valores de intensidad total donde los valores de mayor magnitud se encuentran en la zona norte del país y los menores hacia el sur, lo que evidencia el comportamiento del campo sobre el ecuador magnético en donde se presentan la menor intensidad.

De manera general en la visualización de las cartas isodinámicas, se puede apreciar un decremento del valor de la intensidad total a medida que transcurren los años, ya que se puede apreciar cómo las líneas isodinámicas se desplazan hacia el norte y nuevos valores de menor magnitud se presentan en la zona sur.

Respecto a la comparación de las cartas generadas con la información de IGAC Vs. NOAA, no se perciben discrepancias relevantes entre ellas al observar la distribución de las isolíneas y la intensidad que representan en ninguno de los intervalos observados.

Análisis estadístico

Las siguientes tablas muestran los valores de la aplicación de medidas de tendencia central y distribución para los datos de IGAC y NOAA.

Tabla 6. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1968-1971

| | IGAC | NOAA |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| \bar{X} | 35579.722 | 35616.311 |
| \tilde{X} | 35514.614 | 35264.300 |
| Max | 40007.287 | 40147.900 |
| Min | 30156.217 | 30005.000 |
| R | 9851.069 | 10142.900 |
| S² | 4900251.083 | 5020900.112 |
| S | 2213.651075 | 2240.736511 |
| COV_{xy} | 4772307.994 | |
| ρ_{xy} | 0.962 | |

Tabla 7. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1972-1975

| | IGAC | NOAA |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| \bar{X} | 34599.694 | 34700.504 |
| \tilde{X} | 34418.479 | 34555.100 |
| Max | 38481.195 | 38528.100 |
| Min | 29516.161 | 29547.700 |
| R | 8965.034 | 8980.400 |
| S² | 4855074.028 | 4852617.150 |
| S | 2203.423252 | 2202.865668 |
| COV_{xy} | 4659841.221 | |
| ρ_{xy} | 0.960 | |

Tabla 8. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1976-1981

| | IGAC | NOAA |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| \bar{X} | 34351.001 | 34302.650 |
| \tilde{X} | 34174.952 | 34040.650 |
| Max | 37889.335 | 37896.100 |
| Min | 31203.761 | 31233.300 |
| R | 6685.573 | 6662.800 |
| S² | 3759414.388 | 3841823.572 |
| S | 1938.920934 | 1960.057033 |
| COV_{xy} | 3580895.221 | |
| ρ_{xy} | 0.942 | |

Tabla 9. Estadísticas de intensidad total en Colombia 1987-1993

| | IGAC | NOAA |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| \bar{X} | 33860.622 | 33849.308 |
| \tilde{X} | 33612.064 | 33586.650 |
| Max | 37142.740 | 37219.000 |
| Min | 28931.788 | 28987.200 |
| R | 8210.952 | 8231.800 |
| S² | 4293283.596 | 4170374.418 |
| S | 2072.024034 | 2042.149460 |
| COV_{xy} | 4062206.010 | |
| ρ_{xy} | 0.960 | |

Dentro de las medidas de dispersión el rango más pequeño se encuentra entre los años 1976 a 1981, lo que indica que en ese periodo Colombia tuvo valores de intensidades geomagnéticas poco extremas y que tendían mucho más a asemejarse al valor promedio con respecto a los otros intervalos, esto también se evidencia en la desviación estándar de los datos ya que también es el valor más pequeño en comparación con los demás periodos.

Durante el primer periodo de estudio 1968 a 1971 se encuentra la desviación estándar de mayor valor, lo que lo convierte en el rango de tiempo donde hubo una mayor dispersión de los datos geomagnéticos con respecto a su media, así mismo es donde se encuentra el valor de rango más grande en comparación con los demás periodos.

La figura 21, en donde el eje de las ordenadas corresponde el valor de la intensidad total en nanoteslas (nT) y las abscisas indican los años, representa los valores promedio de la intensidad total en Colombia durante los años observados para NOAA e IGAC. Como se evidenció en el análisis de las cartas isodinámicas, de manera análoga se puede apreciar que en ambos casos existe una tendencia en donde disminuye la intensidad total con el tiempo. Lo anterior corrobora la teoría de la pérdida de fuerza en la dinamo autoalimentada que describe el campo magnético interno.

Para establecer la relación estadística entre los dos grupos de datos, se obtuvo la covarianza y el coeficiente de correlación, en donde la variable X corresponde a la intensidad total del IGAC e Y corresponde a la intensidad total de NOAA. Ya que los valores que toma el coeficiente de correlación en los cuatro intervalos tiende a uno, es posible inferir que existe un alto nivel de relación entre ambas variables.

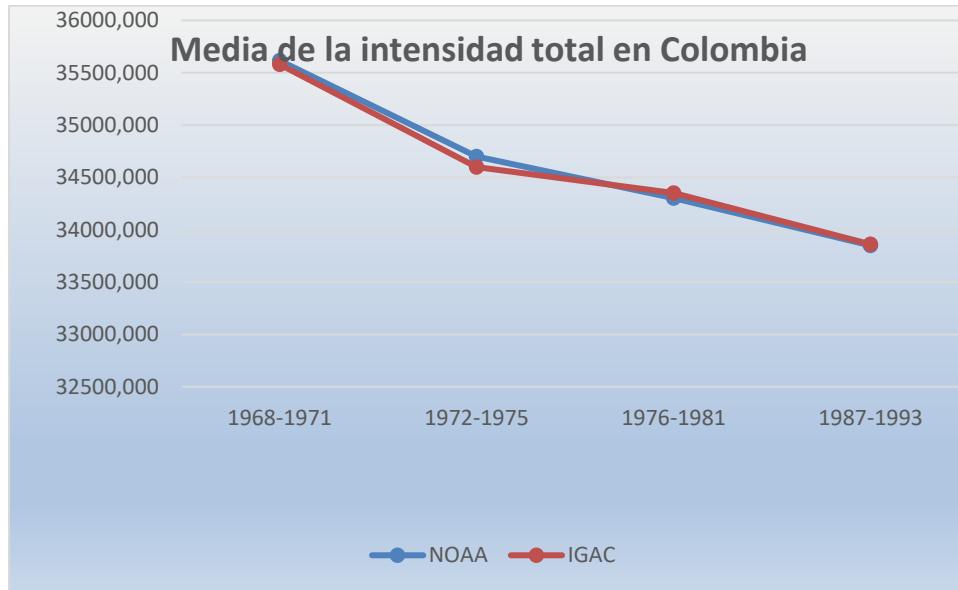


Ilustración 22. Gráfica de la media de la intensidad total en Colombia

Regresión lineal

Los siguientes datos corresponden a los datos promedio de la intensidad total hasta el año 1990, los cuales se encuentran dentro de los intervalos de estudio y fueron elegidos de manera intencional para proyectar los valores cada cinco años. A partir del año 1995 corresponden a la proyección de la intensidad total.

Tabla 10. Proyección de los valores de intensidad horizontal en Colombia

| AÑO | INTENSIDAD TOTAL F (NT) | |
|------|-------------------------|-----------|
| | IGAC | NOAA |
| 1970 | 35523.383 | 35336.481 |
| 1975 | 34599.694 | 34700.504 |
| 1980 | 34229.588 | 34131.689 |
| 1985 | 33860.622 | 33849.308 |
| 1990 | 33213.724 | 33246.911 |
| 1995 | 32677.885 | 32743.878 |
| 2000 | 32142.046 | 32240.844 |
| 2005 | 31606.207 | 31737.811 |
| 2010 | 31070.368 | 31234.777 |
| 2015 | 30534.529 | 30731.743 |
| 2020 | 29998.690 | 30228.710 |
| 2025 | 29462.851 | 29725.676 |
| 2030 | 28927.012 | 29222.642 |
| 2035 | 28391.173 | 28719.609 |
| 2040 | 27855.334 | 28216.575 |
| 2045 | 27319.495 | 27713.542 |
| 2050 | 26783.656 | 27210.508 |
| 2055 | 26247.817 | 26707.474 |
| 2060 | 25711.978 | 26204.441 |
| 2065 | 25176.138 | 25701.407 |
| 2070 | 24640.299 | 25198.374 |

Dada la tendencia de disminución lineal que se observa en la figura 22, el método de regresión lineal permite proyectar los valores de la intensidad total a los periodos en los que se consideren críticos. En este caso, la proyección se realizó hasta el año 2020 debido a que es en este periodo donde de acuerdo con la regresión se alcanza el valor de (25.000 nT) dicho valor es un referente ya que es el límite de la anomalía del atlántico sur.

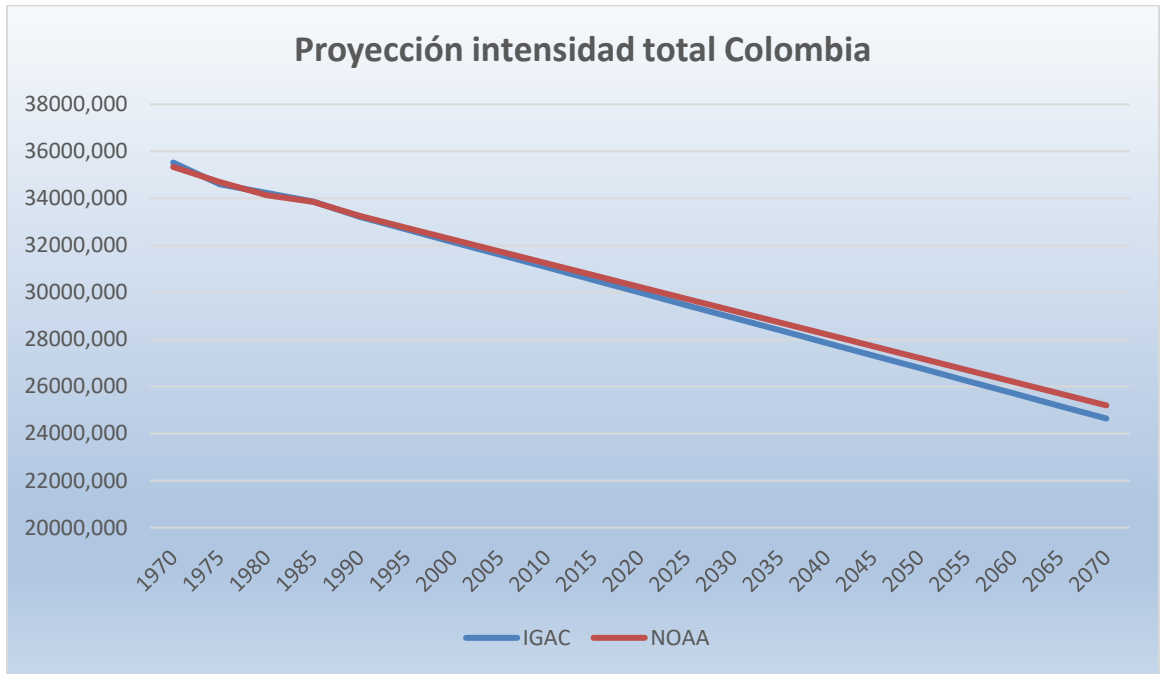


Ilustración 23. Proyección de los valores de intensidad total en Colombia

Conclusiones

En las cartas magnéticas y en los valores promedio tanto de los datos del IGAC como los de NOAA es posible observar una tendencia a disminuir con el paso del tiempo, su comportamiento se asemeja a uno lineal, en donde sería posible concluir una disminución de la intensidad total del campo directamente proporcional al tiempo.

Según diversas teorías derivadas del paleomagnetismo, el comportamiento que se observó se puede relacionar a una posible inversión magnética en los próximos años. No es posible estimar la fecha, ya que hoy por hoy no se cuenta con suficiente información científica para realizar una predicción. El campo magnético es altamente impredecible debido a su dependencia de variables que se caracterizan por su comportamiento aleatorio, razón que explica la variabilidad de tiempo entre las inversiones magnéticas del pasado.

Actualmente la magnetósfera no sólo experimenta una disminución considerable de la fuerza del campo magnético, sino que la velocidad a la que se trasladan los polos perturba las líneas de campo. Debido a que los valores de la intensidad magnética sean los mínimos en el ecuador magnético, se espera que los primeros efectos adversos producto del debilitamiento de la magnetósfera se perciban en las zonas ecuatoriales. No obstante, las zonas polares no se eximen de verse afectadas por la deformación de la magnetósfera, pues el campo también varía por las traslaciones copiosas que realizan los polos magnéticos.

La proyección realizada de los datos promedio de la intensidad total indica que en el año 2070, aproximadamente, Colombia alcanzará el límite crítico de la depresión geomagnética del atlántico sur con un valor cercano a las 25.000nT. Por tanto, se estima que para esa fecha se presenten problemas asociados a distorsiones en las señales satelitales, vulneraría la calidad de vida humana por la exposición a una radiación solar severa, fallas en las redes de alta tensión, entre otros.

Los valores que más se asemejan entre ambas fuentes de información son las cercanas a las zonas costeras, hacia el centro del país los contrastes son mayores. Se debe a las zonas de interés de NOAA, pues sus mediciones pretenden cubrir los océanos, de esta manera, se ignoran las variaciones en mediciones observadas en tierra y las perturbaciones asociadas a las formaciones geológicas, pues muchas estaciones se ubican en suelos ricos en hierro, además de las perturbaciones asociadas a la actividad solar. Las observaciones realizadas por el IGAC carecen de control de calidad, pues debido a la lejanía de la mayoría de las estaciones al observatorio geomagnético de Fúquene, no es recomendable considerar las variaciones del observatorio como las variaciones de todo el territorio.

Además de lo anterior, el fenómeno de la corriente de anillo que se presenta sobre el ecuador magnético genera perturbaciones, pues se inducen campos eléctricos en la ionósfera y la magnetósfera. De esta manera, no es posible establecer un valor de la intensidad total sin un grado de incertidumbre considerable.

El agua salada del mar es considerado como un buen conductor eléctrico y el movimiento de las mareas se refleja en las variaciones leves que se presentan en las mediciones del campo magnético terrestre sobre este. Por ello, aunque es posible evaluar un comportamiento general del campo magnético a través de estas mediciones, no debe ser considerado como una opción en trabajos que requieran de mucha precisión como en la prospección geofísica, determinación de la variación secular, entre otros; máxime si se considera la precisión de equipos utilizados in situ o la presencia de observatorios geomagnéticos.

Este trabajo representa el comportamiento en una zona sobre el ecuador magnético, en donde existen dos fronteras marítimas y el funcionamiento de la interpolación puede significar valores aproximados a las mediciones terrestres. Adicionalmente, las mediciones sobre el ecuador magnético terrestre pueden ser más estables en comparación a zonas polares en donde se presentan los fenómenos de las auroras consideradas como subtormentas magnéticas, por consiguiente, las observaciones requieren de mayor rigurosidad.

Referencias

- Bocanegra Pataquiva, D., & Rivera Velandia, E. (2018). *Repositorio Institucional Universidad Distrital - RIUD*. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13783/1/RiveraVelandiaEdwinStiven2018.pdf>
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to geomagnetic fields*. New York: Cambridge University Press.
- Cárdenas Contreras, A. (2014). *Fundamentos teóricos y su aplicación en los métodos de potencial geomagnético y gravimétrico*. Bogotá D.C.: Editorial UD.
- Díaz Merlano, J., & Silva Álvarez, L. (2018). *Región Andina de Colombia*. Banco de Occidente.
- Enriquez, J. C. (1991). *Geofísica internacional*.
- Gallardo de Prada, Y., & Moreno Garzon, A. (1999). *Serie aprender a investigar*. Bogotá D.C: ICFES.
- García García, S. (Febrero de 2013). *Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17038/pfc_sergio_garcia_garcia_2013.pdf?sequence=1

- García, J. E., Bachero Nebot, J., Blasco Blasco, O., Coll Serrano, V., Díaz García, R., Ivars Escortell, A., . . . Ruiz Ponce, F. (2005). *Estadística descriptiva y nociones de Probabilidad*. Madrid: Thomson.
- Gil Yopez, D., & Garzón Cárdenas, B. (2017). *Repositorio Institucional Universidad Distrital (RIUD)*. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7267>
- Howell, B. F. (1962). *Introducción a la geofísica*. Barcelona: Omega S. A.
- IGAC. (Noviembre de 2019). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/geomagnetismo>
- Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Instituto Geográfico Nacional*. Obtenido de <http://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/GMT-Teoria-Geomagnetismo.pdf>
- Jankowski, J., & Sucksdorff, C. (1996). *Guide for magnetic measurements and observatory practice*. Varsovia: International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Johnson. (2009). En Johnson, *The geology of Australia*. New York: Castlereagh.
- Medina Aguirre, F. (Abril de 2012). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4317234>
- Meteorología Argentina y nuestro cambio climático*. (24 de Junio de 2013). Obtenido de <http://metargentina.blogspot.com/2013/06/el-campo-magnetico-de-la.html>

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). *National centers for environmental information*. Obtenido de Magnetic field calculator:
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Newitt, Barton, & Bitterly. (1996). *Guide for magnetic repeat stations surveys*. Boulder: International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Noguera Callejas, L., & Cuervo Morales, D. (2017). *Repositorio Institucional de la Universidad Distrital (RIUD)*. Obtenido de
<http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6561>
- Prager, E., William, S., & Hutton, K. (2002). *La furia de nuestra madre tierra*. México: McGraw-Hill.
- Salazar López, B. (1 de Julio de 2019). *Ingeniería Industrial online*. Obtenido de
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/pronostico-de-la-demanda/regresion-lineal/>
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson educación S. A. .
- Udías, A., & Mezcuca, J. (1997). *Fundamentos de geofísica*. Madrid: Alianza.