DESARROLLO DE MODELO GEOMAGNÉTICO ADOPCIÓN EN COLOMBIA, PARA ANÁLISIS DE ANOMALÍAS Y DETECCIÓN DE FALLAS

GINA DE LOS ÁNGELES LOZANO MARROQUÍN

KAREN ALEXANDRA BELTRAN ZAMBRANO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

BOGOTA D.C.

2021

DESARROLLO DE MODELO GEOMAGNÉTICO ADOPCIÓN EN COLOMBIA, PARA ANÁLISIS DE ANOMALÍAS Y DETECCIÓN DE FALLAS

GINA DE LOS ÁNGELES LOZANO MARROQUÍN

CODIGO: 20152032051

KAREN ALEXANDRA BELTRAN ZAMBRANO

CODIGO: 20152032009

Proyecto de Grado para Optar al Título de Ingeniero(a) Topográfico(a)

Director:

ROBINSON QUINTANA PUENTES

Ing. Catastral y Geodesta

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE

PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

BOGOTA D.C.

2021

Agradecimientos

Dirigimos nuestro agradecimiento a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas alma mater, por permitirnos formarnos en ella. Agradecemos además al docente Robinson Quintana Puentes, director de nuestro proyecto, a su ayuda durante el proceso y desarrollo de este trabajo.

A todo el profesorado que durante años de nuestra formación han sido puntos claves para llegar a este punto de nuestra carrera.

A nuestras familias que han sido el apoyo clave y contundente para realizar nuestros sueños y llegar a este punto de nuestras vidas.

Dedicatorias

Dedico este esfuerzo a mi familia, mi padre, madre y hermanos, que han sido el pilar de mis metas y junto a ellos poder lograr este sueño, su paciencia y entendimiento han sido la clave durante el desarrollo de mi formación académica y profesional. A todas las personas que durante mi proceso de crecimiento y academia han jugado un papel importante para que hoy en día pueda estar tranquila de haber llegado a este punto de mi vida.

Karen Beltran

Quiero dedicar de manera especial este logro a mi madre por apoyarme incondicionalmente durante todo mi proceso de formación académica y darme la fuerza para seguir adelante sin ella nada de esto hubiera sido posible. Dedico también este proyecto a mi padre, mi hermano y a todas las personas que estuvieron junto a mí en todo momento y siempre fueron inspiración, apoyo y fortaleza.

Gina Lozano

Contenido

1. Capítulo I 13

1.1. Introducción 13

1.2. Planteamiento del problema de investigación 15

1.3. Justificación 17

1.4. Objetivos 18

1.4.1. Objetivo General 18

1.4.2. Objetivos Específicos 18

2. Capitulo II 19

2.1. Estado del arte 19

2.2. Marco teórico 22

3. Capítulo III 28

3.1. Metodología Preliminar 28

3.1.1. Análisis de regresión para el modelado de la intensidad total a través del tiempo 28

3.1.2. Medidas de localización: la media y la mediana de una muestra 28

Medidas de variabilidad 28

Unidades para la deviación estándar y la varianza 29

Medidas de dependencia lineal 29

Covarianza 29

Coeficiente de correlación lineal 30

3.1.2. Campo de referencia geomagnético internacional IGRF 13 Python. Formulación 30

4. Capitulo IV 33

4.1. Metodología 33

4.1.2. Adquisición de datos 33

4.1.3. Equipos, softwares y aplicaciones 33

4.1.4. Procesamiento de la información 34

Cálculo de la Intensidad utilizando el modelo IGRF 13 desarrollado en Python 34

Cálculo de la Intensidad utilizando Métodos de proyección estadística 46

Desarrollo de Mapas 57

5. Capítulo V 59

5.1. Resultados 59

5.1.2. Cálculo de la intensidad total (n T) mediante modelos de proyección estadístico 59

5.1.3. Cálculo de la intensidad total implementando el IGRF13 Python 63

5.1.4. Altitud vs intensidad total (n T) 68

5.1.5. Longitud vs Intensidad total (nT) 69

5.1.6. Latitud vs Intensidad total (nT) 69

5.1.7. Comparación entre valores de intensidad total (n T) 1971 y 1975 vs 2021 70

5.2. Conclusiones y Recomendaciones 73

6. ANEXOS 1

6.1. Anexo1 1

6.2. Anexo 2 2

6.3. Anexo 3 3

6.4. Anexo 4 4

6.5. Anexo 5 5

6.6. Anexo 6 6

6.7. Anexo 7 7

7. Bibliografía 1

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Carga del modelo IGRF 13 en Visual Studio Code. Fuente IGRF 13 Python... 43

Ilustración 2. ejecución del modelo IGRF13 para el cálculo de la intensidad Total..... 43

Ilustración 3. IGRF13 Python. Definición nombre del archivo de salida 44

Ilustración 4.IGRF13 Python. Definición del tipo de datos..... 44

Ilustración 5. IGRF13 Python. Definición de formato de las coordenadas 44

Ilustración 6. IGRF13 Python. Definición del sistema de proyección..... 45

Ilustración 7. IGRF13 Python. Digitación de coordenadas..... 45

Ilustración 8. IGRF13 Python. Digitación de altitud y año..... 45

Ilustración 9. IGRF13 Python. Archivo de salida 45

Ilustración 10.IGRF13 Python. Visualización de archivo de salida y valores calculados 46

Ilustración 11. Método de Proyección Lineal. Elaboración Propia 48

Ilustración 12. Método de proyección Geométrica. Elaboración propia 48

Ilustración 13. Contantes Elipsoidales 49

Ilustración 14. Transformación de Helmert, 7 parametros 51

Ilustración 15. Transformación de Helmert a geodesia. 51

Ilustración 16. Cálculo de la colatitud geocéntrica y el radio. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode..... 52

Ilustración 17. Calculo la colatitud geodésica y la altura vertical. Parte 1. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 53

Ilustración 18. Calculo la colatitud geodésica y la altura vertical. Parte 2. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 53

Ilustración 19. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 1. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 54

Ilustración 20. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 2. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 54

Ilustración 21. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 3. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 55

Ilustración 22. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 4. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 55

Ilustración 23. polinomios de Legendre. parte 1. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 56

Ilustración 24. polinomios de Legendre. Parte 2. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode 56

Ilustración 25. Cálculo de D, H, I y F. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode..... 56

Ilustración 26. Cálculo de la variación secular. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode. 57

Ilustración 27. Representación Gráfica del comportamiento de la intensidad total (n T) en la aplicación ArcMap del Software ArcGIS. Fuente: Elaboración Propia..... 58

Tabla de graficas

Grafica 1. Comportamiento de la intensidad - IGRF 2021. Fuente: Elaboración propia..... 60

Grafica 2. Comportamiento de la intensidad- Método estadístico. Fuente: Elaboración Propia. 61

Grafica 3. Comparación de Intensidades. Fuente: Elaboración Propia..... 62

Grafica 4. Diferencia entre métodos. Fuente: Elaboración propia..... 63

Grafica 5. Variación de la intensidad total (nT) Vs Altitud en metros Calculo en IGRF13 Python. Fuente: Elaboración Propia..... 69

Grafica 6. Variación de la intensidad total (nT) Vs Longitud en Grados decimales Calculo en IGRF13 Python. Fuente: Elaboración Propia 69

Grafica 7. Variación de la intensidad total (nT) Vs Latitud en Grados decimales Calculo en IGRF13 Python. Fuente: Elaboración Propia 70

Grafica 8. Variación de la intensidad total (n T) vs Años 1971 - 1975 y 2021. Fuente: Elaboración Propia 72

Tabla de tablas

Tabla 1. Estaciones seleccionadas para el cálculo de Intensidad total con el IGRF13 Python, IGAC (IDEAM - instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios ambientales, 2014) 34

Tabla 2. Ubicaciones de estaciones con mediciones gravimétricas 46

Tabla 3. Resultados obtenidos de la proyección de lo modelo estadísticos lineal y geométrico 59

Tabla 3. Diferencias para valores de intensidad según métodos empelados 61

Tabla 4. Resultados obtenidos de Intensidad total (n T) implementando la programación del IGRF13 desarrollada en Python. (IDEAM - instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios ambientales, 2014) y IGRF 13 Python 63

Tabla 5. Comparación entre valores de intensidad total (n T) 1971 y 1975 vs 2021 70

Tabla de ecuaciones

Ecuación 1 24

Ecuación 2 28

Ecuación 3 28

Ecuación 4 29

Ecuación 5 29

Ecuación 6 30

Ecuación 7 30

Ecuación 8 30

Ecuación 9 30

Ecuación 10 31

Ecuación 11 32

Ecuación 12 32

Ecuación 13 32

Ecuación 14 32

Ecuación 15 47

Ecuación 16 47

Ecuación 17 48

Ecuación 18 48

Ecuación 19 50

Ecuación 20 50

RESUMEN

El campo geomagnético terrestre es básico para la vida en nuestro planeta. Lejos de ser estático, este campo varía con el tiempo tanto en fuerza como dirección. Entre África y Sudamérica se ha formado una extensa región de menor intensidad magnética, que se conoce actualmente como la anomalía del Atlántico sur. Dada la ubicación de Colombia esta hacer parte de la anomalía es importante determinar el comportamiento de la intensidad del campo geomagnético.

El presente estudio expone la metodología del uso de los métodos de proyección lineal y geométrico y el modelo del campo de referencia geomagnético internacional (IGRF) desarrollado en Python e introducido por la asociación internacional de geomagnetismo y aeronomía (IAGA). Con el fin de determinar y analizar las variaciones la intensidad total en nanoteslas en diferentes puntos situados sobre la superficie del territorio colombiano. Además, de actualizar la información correspondiente a datos de geomagnetismo existentes en el país.

Durante el procesamiento y análisis respectivo de la información suministrada se determinó la no fiabilidad de los métodos estadísticos de proyección respecto al modelo IGRF 13 desarrollado en Python. Por otro lado, con la información recolectada se presentan a través de mapas y tablas los resultados obtenidos de los cálculos y análisis de la intensidad total.

ABSTRAC

The Earth's geomagnetic field is basic to life on our planet. Far from being static, this field varies with time in both strength and direction. Between Africa and South America an extensive region of lower magnetic intensity has formed, which is currently known as the South Atlantic anomaly. Given Colombia's location, it is important to determine the behavior of the geomagnetic field intensity.

The present study exposes the methodology of the use of the linear and geometric projection methods and the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model developed in Python and introduced by the International Association of Geomagnetism and Aeronautics (IAGA). In order to determine and analyze the variations of the total intensity in nanotesla in different points located on the surface of the Colombian territory. In addition, to update the information corresponding to existing geomagnetism data in the country.

During the processing and analysis of the information provided, it was determined that the statistical projection methods were not reliable with respect to the IGRF 13 model developed in Python. On the other hand, with the information collected, the results obtained from the calculations and analysis of the total intensity are presented through maps and tables.

1. Capítulo I

1.1. Introducción

El geomagnetismo es la ciencia que estudia las variaciones del campo magnético terrestre, en donde se observa en un punto de la tierra con orígenes externos e internos. El campo magnético terrestre es una magnitud de carácter vectorial, por lo que para estudiar sus componentes se toma como referencia en un punto de la superficie de la Tierra un sistema cartesiano de coordenadas XYZ de ejes en dirección N-S, E-O y vertical.

Actualmente en el mundo se habla de una "abolladura" en el campo magnético sobre la tierra en zonas de Suramérica y el sur del océano Atlántico, que implicaría riesgos en los satélites. Se sugiere que es un punto débil en evolución del campo magnético una anomalía del atlántico sur que está siendo monitoreada por la NASA. Este campo magnético actúa como escudo contra el viento solar –corriente de partículas cargadas y radiación– que fluye desde el Sol. La protección de este campo también se extiende para incluir satélites que orbitan cerca de la Tierra. Pero la Anomalía del Atlántico Sur está permitiendo que las partículas solares se acerquen más que antes. La radiación solar podría tener un efecto negativo a medida que los satélites atraviesen esta área, destruyendo sus computadoras e interfiriendo con la recopilación de datos, según la NASA.

En específico, este trabajo se encaminará al desarrollo de un modelo matemático y geomagnético adaptado para el país, donde se involucre el reconocer posibles anomalías y errores en el campo magnético. Si bien el campo geomagnético varía con el tiempo, las variables y componentes de cambio no son consideradas uniformes.

Pues se deben considerar las variaciones seculares, estas pueden ir desde 10 nT/año a 150 nT/año; además de las variaciones periódicas y las tormentas magnéticas.

Se toma como base el campo de referencia geomagnético internacional de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía, la versión más reciente de una descripción matemática estándar del campo magnético principal de la Tierra que se utiliza ampliamente en los estudios de interior profundo de la Tierra, su corteza y su ionosfera y magnetosfera.

De este modo se trabajó el presente proyecto con el fin de desarrollar un modelo geomagnético que usa las bases ya definidas internacionalmente en el modelo IGRF. Por medio del lenguaje de programación Python se definieron los cálculos de altura vertical sobre el elipsoide en dirección del radio geocéntrico, permitiendo convertir las coordenadas geocéntricas a coordenadas geodésicas para el país. Estos logaritmos tienen en cuenta coeficientes necesarios para el desarrollo del modelo geomagnético, tales como la expansión armónica esférica determinada en una cuadrícula por N puntos.

Este modelo es la base de estudios geológicos o geofísicos para la prospección de recursos naturales, excavaciones petrolíferas, localización de yacimientos asociados estructural o estratigráficamente con formaciones magnéticas, para la corrección de los rumbos magnéticos en los aparatos topográficos, localización de obras, en corrección de rumbos en la navegación marítima y aérea.

1.2. Planteamiento del problema de investigación

Gracias a la constelación de satélites SWARM de la agencia espacial europea, los científicos han podido comprobar que un área que abarca desde África hasta Sudamérica, el CTM se está debilitando gradualmente. Este fenómeno se le conoce actualmente como "anomalía del atlántico sur". Entre 1970 y 2020, la intensidad mínima en esta zona descendió de alrededor de 24 000 a 22 000 nanoteslas (nT). (España, 2020)

Diversos estudios realizados han podido determinar que, en los últimos doscientos años, el campo magnético terrestre (CTM) ha perdido, de media global, alrededor del 9% de su fuerza. El debilitamiento del campo es un signo de que la tierra se acerca a una inminente inversión de los polos Norte y Sur, que se intercambiaran. Este fenómeno se ha producido muchas veces a lo largo de la historia del planeta y tiene lugar cada 250 000 años aproximadamente. (España, 2020)

Debido a esto es importante analizar el comportamiento del campo magnético ya que este es una compleja fuerza dinámica que nos protege de la radiación cósmica y las partículas cargadas de energía procedentes del sol. Quedar expuestos a la radiación cósmica implica la perdida de la capa de ozono, cambios climáticos a gran escala, glaciación y quedar expuestos a la radiación ultravioleta. (España, 2020)

En Colombia no hay información actualizada para datos de intensidad del campo magnético, anterior mente solo se encontraba información del año 1968 al 1997 de una antigua red de estaciones establecidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). La última carta magnética se realizó en el año 1990 y actualmente la única fuente de información reciente sobre el comportamiento del geomagnetismo en el territorio se encuentra en el observatorio geomagnético de Fúquene.

Como consecuencia, para el presenta año no se han realizado estudios para determinar que tanto se ha debilitado el campo magnético sobre el territorio dado que no existen mapas o datos base que representen las variaciones de intensidad total del campo del periodo 2021. Tampoco se han realizado investigaciones que evalúen otros métodos además de la programación disponible del IGRF 13 en Python para realizar el cálculo de esta variable.

Es indispensable actualizar la información existente sobre el sistema geomagnético en Colombia, un modelo actual que pueda ser usado futuramente como base para estudios más detallados, con fines específicos o aplicativos.

Para realizar el presente trabajo se planteó la siguiente pregunta problema de investigación:

¿Cuál ha sido el comportamiento de la intensidad del campo geomagnético sobre el territorio colombiano para el intervalo de tiempo 1971 - 2021?

1.3. Justificación

El presente trabajo busca a través de la implementación de métodos de proyección estadísticos determinar las variaciones de la intensidad total del campo magnético del territorio colombiano en conjunto con el modelo del campo de referencia geomagnético internacional de treceava generación (IGRF 13).

Se adaptó el comportamiento del sistema geomagnético internacional para el país con el fin de suministrar una base de datos actualizada. Los insumos generados serán base para estudio geomagnético y estos recursos podrán ser implementados en los diferentes aplicativos y usos en que este pueda ser requerido.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar la variación de la intensidad del campo geomagnético para Colombia e implementar el modelo del IGRF 13 por medio de los modelos de proyección lineal y geométrico.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Comprender la estructura y funcionamiento del modelo IGRF 13.
2. Calcular la intensidad total en nanoteslas para el periodo 2021 de puntos determinados sobre la superficie del territorio colombiano aplicando el modelo IGRF 13 en Python desarrollado por la asociación internacional de geomagnetismo y aeronomía (IAGA).
3. Calcular la intensidad total en nanoteslas para el periodo 2021 a través de los modelos de proyección lineal y geométrico para determinadas estaciones.
4. Determinar la variación de los métodos de proyección lineal y geométrico respecto al modelo IGRF 13 de Python.
5. Generación de mapas base de intensidad total en nanoteslas para Colombia
6. Análisis del comportamiento de la intensidad total respecto a la latitud, longitud y altitud.

2. Capitulo II

2.1. Estado del arte

Investigaciones nivel Internacional

Los estudios existentes del campo geomagnético de la Tierra son dirigidos por la asociación internacional de Geomagnetismo, cuyos investigadores dedicados suelen ser una minoría dentro del ámbito general de la geofísica, aunque, las asambleas de la asociación acostumbran a ser multitudinarias y con gran participación. (MIQUEL, 2010)

El salto más importante en los últimos años ocurre con la aparición de soluciones numéricas para las ecuaciones magneto-hidrodinámicas, que describen la convección térmica y la generación del campo magnético en un fluido rotando en una capa esférica con un núcleo interno sólido y conductor. Estas simulaciones numéricas están proporcionando resultados razonables acerca de la morfología y la intensidad del campo en la frontera manto-núcleo. (J.M.Torta, 2003)

Desde los años ochenta el estudio de la magnetosfera terrestre se ha revolucionado gracias al gran creciente de flota de satélites artificiales equipados con multitud de instrumentos que se encuentran en la órbita. Todas las misiones son coordinadas a través del ISTP (International Solar Terrestrial Physics Science Initiative).

Gracias al uso creciente de observaciones multipunto de alta calidad se están estudiando de forma muy activa los procesos dinámicos de fenómenos en gran escala en los constituyentes del plasma magnetosferico, sus interrelaciones y sus evoluciones temporales, durante diferentes condiciones de actividad solar. Por otra parte, la dinámica de la magnetosfera en tres dimensiones mediante modelos MHD, los resultados de aquellas simulaciones muestran como la magnetosfera terrestre actúa como una lente que focaliza las fluctuaciones del viento solar en una región al otro lado de la tierra donde se origina la mayor parte de la actividad magnética. Asimismo, las series de datos temporales de la magnetosfera se analizan como sistemas dinámicos no lineales.

El análisis global y regional del campo geomagnético y variación secular tienen como principal objetivo generar cada cinco años, el modelo de campo geomagnético internacional de referencia IGRF.

También dé cabida a los que se dedican al análisis regional y mantienen un catálogo sobre los servicios magnéticos globales, regionales, modelos y cartas. Los modelos que aparecen con los años tienen más precisión, no solo por poder disponer de datos de satélite con cobertura global, si no por el acceso a todos los datos de muchos de los observatorios con premura, permitiendo la selección de periodos de mayor calma magnética. Una iniciativa actual impulsada por Goddard Space Flight Center, para modelar campos no solo a las fuentes del núcleo terrestre, conocido como un modelo íntegro del campo magnético próximo a la tierra. (MIQUEL, 2010)

Investigaciones nivel nacional

En Colombia el geomagnetismo es un tema de investigación dirigido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en donde se afirma, contar con una más moderna y fortalecida infraestructura geodésica y geomagnética. Esto le asegura al país mejor información en campos tan importantes como la navegación aérea, climatología y meteorología, seguridad energética y de comunicaciones del país. También facilita determinar la afectación de las tormentas y rayos solares en la salud de los colombianos y su medio ambiente.

Toda la información que gestionará el IGAC con estos nuevos equipos le permitirán al instituto fortalecer el observatorio geomagnético, los equipos de geodesia y gravimetría para producir información básica y confiable en estos componentes, al tiempo que a la CAR le facilitará el monitoreo de control de crecidas, recarga de aguas subterráneas y determinación de acuíferos superficiales del complejo lagunar.

En el observatorio se obtienen valores horarios individuales sobre la base de un magnetograma, donde se pueden tener promedios horarios, diarios, valores máximos y mínimos instantáneo de cada día, indicándose la hora y minuto de ocurrencia. La reproducción diaria de registro gráfico (magnetogramas) de las variaciones de elementos del campo Magnético Terrestre CMT obtiene resultados detallados de cada una de las observaciones absolutas realizadas durante el año. Se tiene una lista de eventos diagnosticados sobre la base de magnetogramas, tales como: bahía, pulsaciones, efectos

de fulguraciones solares, índices de actividad geomagnética. (Instiuto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2020)

En el año 2020, Leidy Daniela Guarnizo Muñoz y Wilson Manuel Avendaño Hernández estudiantes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad del Medio ambiente y Recursos Naturales, realizaron un estudio y análisis del campo geomagnético titulado "Modelos del campo geomagnético en Colombia del año 1968 al año 1993". En este pronostican bajo proyecciones que Colombia alcanzará el límite crítico de la depresión geomagnética del atlántico sur con un valor cercano a las 25.000 nT en el año 2070. Por tanto, se estima que para esa fecha se presenten problemas asociados a distorsiones en las señale satelitales, vulneraría la calidad de vida humana por la exposición a una radiación solar severa, fallas en las redes de alta tensión, entre otros. 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.

2.2. Marco teórico

Historia magnetismo, geomagnetismo

A continuación, definiremos algunos términos o conceptos que serán mencionados y trabajados en el transcurso del desarrollo del proyecto.

En la actualidad, las características del campo geomagnético sobre la superficie terrestre vienen descritas por modelos físico-matemáticos. Para construir estos modelos, que pueden ser regionales o globales, es necesaria una buena cobertura espacial y temporal de medidas del campo previamente obtenidas mediante diferentes instrumentos geomagnéticos. Fue en la época de Gauss cuando se estableció un método matemático adecuado para la descripción del campo geomagnético a nivel global. Este método ha sido mejorado durante el siglo XX gracias a las nuevas técnicas de modelado geomagnético y a la capacidad creciente de analizar conjuntamente un volumen elevado de datos geomagnéticos, haciendo que la precisión de los modelos mejorase en las últimas décadas. Desde finales del siglo XX se observó un claro avance en la descripción global del campo geomagnético, propiciado por la aparición de datos satelitales. Éstos proporcionaron datos geomagnéticos con una excelente cobertura espacial, un prerrequisito importante para obtener una mayor precisión en los modelos. Ello es especialmente relevante en las zonas oceánicas, que ocupan el 71% del planeta Tierra, y en donde ha sido tradicionalmente más difícil obtener medidas por otros medios.

El magnetismo es la parte de la física que estudia los fenómenos relativos a los imanes y al campo magnético creado por estos, así como el comportamiento de los diferentes materiales sometidos a la acción de dicho campo. Un imán consta de tres partes: - Polos: Son los dos extremos del imán en los cuales las fuerzas de atracción son más intensas. Estos polos son el polo norte (N) y el polo sur (S), también denominados polo positivo y negativo respectivamente. Polos del mismo tipo (combinaciones N-N y S-S) se repelen y los polos de distinto tipo (combinaciones N-S y S-N) se atraen. - Eje magnético: Línea imaginaria que une los dos polos del imán. - Línea neutra: Línea imaginaria que separa las dos zonas polarizadas. Las corrientes eléctricas y, en general, las cargas en movimiento, se comportan como imanes o, lo que es lo mismo, producen campos magnéticos. Aunque las cargas eléctricas y los polos magnéticos de un imán son semejantes en muchos aspectos, hay una diferencia importante: los polos

magnéticos siempre se presentan por parejas. Si se rompe un imán por la mitad, vuelven a aparecer los polos N y S en cada una de las mitades. La mayoría de los metales (hierro, acero…) son atraídos por los imanes; sin embargo, en algunos, como el oro o la plata, no tiene lugar este suceso. En el caso de la Tierra se pueden observar los polos magnéticos en oposición a los polos geográficos, tal como se refleja en la figura 2. Se considera por convenio que las líneas de campo salen del polo magnético norte y entran en el polo magnético sur, pero carecen de principio y fin, ya que no existen polos magnéticos aislados y, por lo tanto, las líneas continúan por el interior de la Tierra. El polo sur magnético se encuentra a 1800 kilómetros del polo norte geográfico; esta diferencia, medida en grados, se denomina declinación magnética (Tipler, 2008).

La acumulación de datos de declinación e inclinación permitieron definir los primeros mapas de dichos elementos del campo geomagnético, como es el caso de Edmund Halley, que organizó una expedición para determinar la declinación en varios puntos del Atlántico, publicando en 1701 el primer mapa de curvas isogónicas del Atlántico. Las continuas medidas de declinación llevadas a cabo en Londres por George Graham durante los años 1722 y 1723 revelaron que ésta cambiaba incluso en un mismo día, descubriendo así los primeros indicios de las variaciones diurnas y las tormentas geomagnéticas. Siguiendo los mismos experimentos, Andreas Celcius y Olof Hjorter midieron la declinación en Uppsala (Suecia) entre 1740 y 1747, y no solo confirmaron los resultados de Graham, sino que además observaron que, a altas latitudes, como la de Suecia, las variaciones eran más acusadas. Declinación e inclinación magnética definen la dirección del campo geomagnético en los planos horizontal y vertical respectivamente, pero no se tenía aún conocimiento de la "fuerza" del magnetismo terrestre: la intensidad geomagnética. Ésta se determinó mucho más tarde que los elementos direccionales. Las primeras intensidades fueron medidas relativas, con una característica particular descubierta en 1798 cuando Alexander Von Humboldt comprobó que éstas aumentaban a medida que se acercaban hacia el Sur partiendo del ecuador terrestre. No fue hasta 1832 cuando Carl Friedrich Gauss ideó un método para determinar la intensidad de manera absoluta (Gauss, 1833).

Con la llegada de los ordenadores fue posible generar modelos del campo geomagnético mediante el uso de los datos disponibles. A consecuencia de la proliferación de diferentes modelos, fue

necesario agrupar esfuerzos para generar el mejor modelo posible de la época. Así nació en 1965 el campo geomagnético de referencia internacional (IGRF, del inglés International Geomagnetic Reference Field) coordinado por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA, del inglés International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Fue un modelo basado en los resultados de diferentes grupos de investigación a nivel mundial. El IGRF ha ido evolucionando en series de modelos cubriendo las épocas entre 1900 hasta el presente mediante intervalos temporales de 5 años, siendo la número 12 la última generación (Thébault et al., 2015a).

El geomagnetismo continuó avanzando en el siglo XX, donde la teoría y observación electromagnéticas permitieron estudiar la interacción Sol-Tierra. Además de crear nuevos observatorios alrededor del mundo, se llevaron a cabo otro tipo de medidas, como las oceánicas mediante buques oceanográficos o levantamientos aéreos. Aunque la revolución llegó mediante las misiones con satélites, obteniendo una cobertura espacial casi completa. La primera misión fue llevada a cabo por los soviéticos en 1958 mediante el Sputnik, al que siguió la serie OGO, y los Magsat, Ørsted, CHAMP, entre otros.

Unidades de geoeléctrica

Unidad de energía. Es la energía necesaria para mover un objeto una distancia de un metro aplicando una fuerza de un newton; es decir, fuerza por distancia.

Se le denomina julio (unidad) (en inglés, joule). Su símbolo es J. Por tanto:

$$\mathrm{J} = \mathrm{N} * \mathrm{m}$$

Ecuación 1

Intensidad de corriente eléctrica.

La corriente eléctrica. o intensidad eléctrica es el flujo de carga eléctrica (Culombio) por unidad de tiempo que recorre un material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en C/s (culombios sobre segundo), unidad que se denomina Amperio.

Voltio, (V). Unidad de potencial eléctrico y fuerza electromotriz. Definición: diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente de una intensidad de un amperio utiliza un vatio de potencia.

Vatio, (W). Unidad de potencia. Definición: un vatio es la potencia que genera una energía de un julio por segundo. En términos eléctricos, un vatio es la potencia producida por una diferencia de potencial de un voltio y una corriente eléctrica de un amperio.

Culombio, (C). Unidad de carga eléctrica. Definición: un culombio es la cantidad de electricidad que una corriente de un amperio de intensidad transporta durante un segundo.

Ohmio, (Ω). Unidad de resistencia eléctrica. Definición: un ohmio es la resistencia eléctrica existente entre dos puntos de un conductor cuando -en ausencia de fuerza electromotriz en este- una diferencia de potencial constante de un voltio aplicada entre estos dos puntos genera una corriente de intensidad de un amperio.

Unidad de intensidad del campo eléctrico. Definición: es la intensidad de un campo eléctrico que ejerce una fuerza de un newton sobre un cuerpo cargado con una cantidad de electricidad de un culombio. La corriente eléctrica o intensidad eléctrica es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material.

Unidad de intensidad del campo eléctrico. Definición: es la intensidad de un campo eléctrico que ejerce una fuerza de un newton sobre un cuerpo cargado con una cantidad de electricidad de un culombio.

TESLA, (T). Unidad de densidad de flujo magnético e intensidad de campo magnético. Definición: un Tesla es una inducción magnética uniforme que, repartida normalmente sobre una superficie de un metro cuadrado, a través de esta superficie produce un flujo magnético de un weber.

Fundamentos y consideraciones del método magnetométrico

Campo Magnético Terrestre: se describe como un dipolo magnético ubicado en el centro de la tierra, cuyo eje está inclinado con respecto al eje de rotación de la tierra.

En la magnetometría se emplean varias unidades: 1Oersted (Oe) = 1Gauss = 105 gamma = 105 nT (T = Tesla) (nT = nanotesla). 1gamma = 10-9T = 1nT.

El campo magnético terrestre es bastante débil, del orden de 30.000 nT en las proximidades del ecuador y de 70.000 nT en las regiones polares.

La intensidad total del campo magnético para un punto cualquiera sobre la superficie de la tierra será un vector F con dirección paralela a las líneas de fuerza del campo magnético, resultante de una componente vertical y una componente horizontal.

El campo magnético terrestre actual. La forma más simple de visualizar las características actuales del campo, es volcando en mapas las mediciones realizadas en todo el mundo. Para mayor claridad se confeccionaron curvas de igual valor de determinados elementos magnéticos. Estos mapas se llaman cartas isomagnéticas o isodinas (F). Las líneas que unen puntos de igual declinación se llaman isógonas (D). Similarmente, las de igual inclinación se llaman isoclinas (I).

Las componentes magnéticas (X, Y, Z, H) Los ángulos D (declinación) e I (inclinación) se definen a partir de la proyección del vector campo magnético (F) en un sistema de referencia local definido por el norte, el este y la vertical. La proyección horizontal del vector F nos indica la dirección del norte magnético. Es la dirección a lo largo de la cual se alineará una brújula y, en general, no coincide con la del norte geográfico El ángulo que forman el norte geográfico y el norte magnético (D en el dibujo) se conoce como declinación.

La circulación de los iones produce corrientes eléctricas que afectan directamente a la medida del campo geomagnético en la superficie. La corriente más importante en latitudes medias es la variación diurna, producida por el calentamiento de la atmósfera debido a dicha radiación solar. Este sistema de corrientes ionosféricas se conoce como solar quiet o corriente Sq y genera una variación magnética diaria importante, con amplitudes que pueden llegar a ser superiores a 80 nT, aunque varían fuertemente según la componente y la distancia al foco de esas corrientes. La geometría del campo

geomagnético en el ecuador, conjuntamente con la incidencia casi perpendicular de la radiación solar, conllevan a un aumento de la conductividad y, por tanto, un incremento de la corriente ionosférica al encontrarse los dos sistemas, conocido como electrojet ecuatorial. Este jet produce un campo magnético que perturba el componente horizontal del campo geomagnético, pudiendo alcanzar campos del orden de 50 a 100 nT cerca del ecuador magnético durante el mediodía. Otra fuente influyente en las latitudes medias y bajas es la corriente de anillo. Ésta puede ser visualizada como una corriente eléctrica toroidal que circula en dirección Oeste alrededor de la Tierra. Los electrones e iones provenientes de la ionosfera viajan hacia el este y el Oeste respectivamente, alterando el campo terrestre en cientos de nT. Este fenómeno ecuatorial (o de baja latitud) no presenta un comportamiento estacionario, sino que puede sufrir una inyección adicional de partículas provenientes de la magnetocola, por un aumento de corrientes eléctricas debido al viento solar. De modo que, durante los períodos de tormentas magnéticas, cuando se da el fenómeno de recombinación magnética (se explica en detalle más adelante), la energía total de la corriente de anillo aumenta provocando una disminución del campo magnético en la superficie terrestre en zonas cercanas al ecuador. Dicha perturbación magnética puede durar desde unas horas hasta días, volviendo posteriormente a niveles normales. Esta fase de recuperación suele durar varios días (Daglis et al., 1999).

3. Capítulo III

3.1. Metodología Preliminar

3.1.1. Análisis de regresión para el modelado de la intensidad total a través del tiempo

Mediante la implementación de modelos estadísticos de regresión se realiza un análisis multitemporal el cual permita describir y comparar los cambios que puedan presentarse en los valores para la intensidad total obtenidos por el IGAC (1971 -1975) y los generados por el programa PyIGRF de Python. Por lo tanto, para conocer la fiabilidad de los modelos se deben tener en cuenta algunas medidas de variabilidad y dependencia lineal

3.1.2. Medidas de localización: la media y la mediana de una muestra

Las medidas de localización están diseñadas para brindar valores cuantitativos de la ubicación central de una muestra. (RONALD E. WALPOLE, 2012)

La media de la muestra es el promedio numérico, que se denota con $\underline{x}$, es

$$\underline{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n}$$

Ecuación 2

La mediana de la muestra refleja la tendencia central de la muestra de manera que no sea influida por valores extremos

$$\underline{x} = \{x_{(n+1)/2} \qquad si\ n\ es\ impar, 1/2\left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}\right)\ si\ n\ es\ impar$$

Ecuación 3

Medidas de variabilidad

La variabilidad de la muestra desempeña un papel importante en el análisis de los datos. Ya que el éxito de un método estadístico específico podría depender de la magnitud de la variabilidad entre las observaciones de la muestra. (RONALD E. WALPOLE, 2012)

La medida muestral de dispersión que se utiliza más a menudo es la desviación estándar de la muestra. Denotada con s, es la raíz cuadrada positiva de s^2, es decir,

$$s = \sqrt{s^2}$$

Ecuación 4

Donde s^2 denota la varianza, dada por

$$s^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \underline{x})^2}{n-1}$$

Ecuación 5

Unidades para la deviación estándar y la varianza

Dado que la varianza es una medida de la desviación cuadrática promedio de la media $\bar{x}$. Se emplea el termino desviación cuadrática promedio aun cuando la definición utilice la división entre $n-1$ grados de libertad en vez de n. Si, n es grande, la diferencia en el denominador es inconsecuente. Por lo tanto, la varianza de la muestra tiene unidades que son el cuadrado de las unidades en los datos observados; aunque la desviación estándar de la muestra se encuentre en unidades lineales. (RONALD E. WALPOLE, 2012)

Medidas de dependencia lineal

Covarianza

La covarianza entre dos variables aleatorias es una medida de la naturaleza de la asociación entre ambas, el signo de la covarianza indica si la relación entre estas es negativa o positiva. (RONALD E. WALPOLE, 2012)

La covarianza solo describe la relación lineal entre dos variables aleatorias. Denotada como $cov(x, y)$,

$$cov(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \underline{x}) - (y_i - \underline{y})}{n-1}$$

Ecuación 6

Coeficiente de correlación lineal

El coeficiente de correlación entre dos variables es una medida de su relación lineal, un valor $r_{(x,y)} = 0$ implica falta de linealidad y no falta de asociación. (RONALD E. WALPOLE, 2012)

$$r_{(x,y)} = cor(x,y) = \frac{cov(x,y)}{S_x S_y}$$

Ecuación 7

Donde:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \underline{x})^2}{n-1}$$

Ecuación 8

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \underline{y}\right)^2}{n-1}$$

Ecuación 9

3.1.2. Campo de referencia geomagnético internacional IGRF 13 Python. Formulación

La IAGA público el campo de referencia geomagnético internacional de treceava generación (IGRF 13) disponible en lenguaje Python, la cual es una serie de modelos matemáticos del principal campo geomagnético de la tierra y su tasa anual de cambio (variación secular). Este surge como respuesta a la demanda de una representación armónica esférica del campo de la tierra

Como se mencionó anteriormente, elIGRF describe el principal campo geomagnético $B(r,\theta,\Phi,t)$ que es producido principalmente por fuentes internas dentro del núcleo de la tierra. (Alken, 2021)

El IGRF es válido sobre y por encima de la superficie terrestre, donde el campo geomagnético principal puede escribirse como el gradiente de un potencial escalar, $B = -\nabla V$ y la función potencial $V(r, \theta, \Phi, t)$ se representa como una expansión de serie finita en términos de coeficientes armónicos esféricos g_n^m, h_n^m, también conocidos como coeficientes de Gauss. (Alken, 2021)

$$V(r, \theta, \Phi, t) = a \sum_{n=1}^{N} \sum_{n=1}^{n} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(T)\,\mathrm{Cos}(m\Phi) + h_n^m(T) Sin(m\Phi)] P_n^m(cos\,\theta)$$

Ecuación 10

Donde, $a = 6371{,}2\ Km$ equivalente a un radio de referencia, el cual es una aproximación del radio medio de la tierra. r, θ, Φ se refieren a coordenadas en un sistema de coordenadas esféricas geocéntricas, siendo r la distancia radial desde el centro de la tierra, y θ, Φ, representan la colatitud y la longitud geocéntrica respectivamente (Alken, 2021). En un artículo de enciclopedia sobre geomagnetismo, Schmidt definió lo que ahora se llaman funciones semi-normalizadas de Schmidt, $P_n^m(cos\,\theta)$.

$$\left.\begin{aligned}
P_n^0(\mu) &= \frac{1}{2^n n!}\left(\frac{d}{d\mu}\right)^n (\mu^2 - 1)^n \equiv P_n(\mu) \\
&\text{and, when } m \neq 0, \\
P_n^m(\mu) &= \sqrt{2\frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(\mu) \\
&= \sqrt{2\frac{(n-m)!}{(n+m)!}} (1-\mu^2)^{m/2} \left(\frac{d}{d\mu}\right)^m P_n(\mu).
\end{aligned}\right]$$

Ecuación 11

El parámetro N especifica el grado armónico esférico máximo de expansión. Los coeficientes de Gauss $g_n^m(t), h_n^m(T)$ cambian en el tiempo y se miden en unidades de nanotesla para el IGRF-13 a intervalos de época de 5 años (Alken, 2021). La dependencia temporal de estos parámetros se modela de forma lineal y por partes, está dada por

$$g_n^m(T) = g_n^m(T_T) + (t - T_T)\dot{g}_n^m(T_T)$$

Ecuación 12

$$h_n^m(T) = h_n^m(T_T) + (t - T_T)\dot{h}_n^m(T_T)$$

Ecuación 13

Donde $g_n^m(T_T)$, $h_n^m(T_T)$ son los coeficientes de Gauss en la época T_T, que procede inmediatamente al tiempo t. Las épocas del modelo IGRF – 13 se proporcionan en múltiplos exactos de 5 años que comienzan en 1900 y terminan en 2020, de modo que $T_T \leq t < T_T + 5$. Para $T_T < 2020$, los parámetros $\dot{g}_n^m(T_T)$, $\dot{h}_n^m(T_T)$ representan la aproximación lineal al cambio en los coeficientes de Gauss durante el intervalo de 5 años que abarca $[T_T, T_T + 5]$ (Alken, 2021). Pueden calcularse en unidades de nanotesla por año (nT/año) como:

$$\dot{g}_n^m(T_T) = \frac{1}{5}(g_n^m(T_T + 5) - g_n^m(T_T))$$

Ecuación 14

$$\dot{h}_n^m(T_T) = \frac{1}{5}(h_n^m(T_T + 5) - h_n^m(T_T))$$

Ecuación 15

Para $T_T = 2025$ no se conocen los coeficientes del campo principal, y así para los últimos 5 años de validez del modelo (2020 a 2025 para IGRF -13), los coeficientes $\dot{g}_n^m(2020)$, $\dot{h}_n^m(2020)$ se proporcionan únicamente en unidades de nT/año. (Alken, 2021)

4. Capitulo IV

4.1. Metodología

4.1.2. Adquisición de datos

Para la fase de adquisición de la información se realizaron dos búsquedas, la primera de estaciones que contaran con mediciones de intensidad total y la segunda de puntos distribuidos sobre toda superficie del territorio colombiano con coordenadas conocidas, para este estudio estaciones meteorológicas activas del catálogo nacional de estaciones 2013 IDEAM, con el fin de realizar el cálculo correspondiente a la intensidad total a través del modelo IGRF 13 desarrollado en Python.

4.1.3. Equipos, softwares y aplicaciones

Los recursos físicos e informáticos requeridos para la obtención y análisis de información son los siguientes:

- Softwares y aplicaciones para la representación gráfica y análisis de la información
    - Software ArcGIS 10.8 – aplicación ArcMap
    - Microsoft Excel y Microsoft Word
    - Campo de referencia geomagnético internacional, Modelo del IGRF 13 con interfaz simple orientada a objetos Python. Disponible en IAGA V-MOD Geomagnetic Field Modeling: International Geomagnetic Reference Field IGRF-13 (noaa.gov)
    - Editor de código fuente Visual Studio Code.
    - Versión Python 3.6 o superior
    - Numpy (Numerical Python), librería especializada para el cálculo numérico y análisis de datos
    - SciPy (Scientific Python), construida sobre la librería Numpy, expansión de bibliotecas de computación científica.
- Recursos físicos
    - Servicio de internet

- Dos computadores para el trabajo en paralelo con requerimientos mínimos de hardware con la capacidad de soportar los softwares y aplicaciones requeridas.

4.1.4. Procesamiento de la información

Contando con todos los recursos necesarios para iniciar el procesamiento de la información, como tarea inicial se realizó un análisis con el fin de comprender el funcionamiento, las características y utilidades que ofrecía el modelo IGRF 13 desarrollado en Python y ejecutado para este estudio, en el editor de código fuente Visual Studio Code.

Con la estructura del modelo en Python del IGRF 13 clara, se procedió a realizar los siguientes procesos para los datos recolectados.

Cálculo de la Intensidad utilizando el modelo IGRF 13 desarrollado en Python

Primero se realizó una selección inicial de los puntos con coordenadas conocidas, en este caso las estaciones Meteorológicas cuyo estado fuese "activo". A partir de este filtro en la aplicación ArcMap del software ArcGIS se cargó una capa de puntos que contenía la ubicación de las estaciones y una capa de la superficie del territorio colombiano, con esto se hizo un análisis visual buscando seleccionar las estaciones que cubriesen de la forma más uniforme posible la capa de la superficie del territorio, como resultado se obtuvieron un total de 211 estaciones.

Tabla 1. Estaciones seleccionadas para el cálculo de Intensidad total con el IGRF13 Python, IGAC (IDEAM - instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios ambientales, 2014)

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
26180220	LA PINTADA	AUT	Meteorológica	PM	ACT	-75.59847222	5.73361111	585
26185050	STA BARBARA AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	CP	ACT	-75.55622222	5.85961111	2580
23085260	LA SELVA AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	AM	ACT	-75.41472222	6.13166667	2090
26185030	JERICO AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	CP	ACT	-75.78955556	5.79925000	2765
27015280	PMO BELMIRA AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	CP	ACT	-75.64561111	6.63208333	3221
23105070	MACEO AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	CP	ACT	-74.79472222	6.57163889	980
11105020	CARMEN DEL DARIEN AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	CP	ACT	-76.97719444	7.15433333	18
12015110	CHIGORODO AUTOMATICA	AUT	Meteorológica	AM	ACT	-76.69405556	7.67119444	50

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
26225060	HDA COTOVE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.82738889	6.53391667	530
27015310	METROMEDELLIN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.55544444	6.33258333	1450
27015290	PAJARITO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.61288889	6.28638889	1956
12015100	PISTA INDIRA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-76.69622222	7.94075000	23
26255030	STA ISABEL VALDIVIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.44227778	7.15727778	1200
11135030	UNGUIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.08786111	8.03677778	15
23105060	VEGACHI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-74.79658333	6.77411111	1107
27015300	VILLANUEVA VILLAHERMOSA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.61288889	6.25305556	1596
11155030	CAPURGANA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.32502778	8.59108333	2
23050420	ARGELIA ANTIOQUIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	PG	ACT	-75.13333333	5.71666667	1669
23085270	A.J.M. CORDOVA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-75.42588889	6.16863889	2073
27015320	ARAGON AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.81666667	6.53333333	2600
35205501	Z_EMA_FINAL3	AUT	Meteoro lógica	PM	ACT	-71.83333333	4.56666667	140
12045020	CRISTO REY	CON	Meteoro lógica	CO	ACT	-76.22550000	9.07216667	15
25025270	UNISUCRE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.40222222	9.21166667	160
25025280	EL TESORO IDEAM AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.28925000	9.35708333	168
13055040	INCODER AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.90052778	8.74894444	37
29015040	CARMEN DE BOLIVAR AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.10641667	9.71575000	152
25025340	SAN MARCOS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.14269444	8.59683333	31
29035200	REPELON AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.11916667	10.50027778	10
14015080	A. RAFAEL NUÑEZAUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-75.51602778	10.44725000	2
29045180	LAS FLORES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.81975000	11.03936111	2
29045190	A.E. CORTISSOZ AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-74.77977778	10.88336111	14
25025350	PUERTA ROJA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.38750000	9.31638889	160
29015000	EL GUAMO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.97322222	10.03722222	75
29045000	SABANALARGA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.91888889	10.63672222	100
25025001	APTO LAS FLORES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.97083333	9.04633333	34

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
29035000	SINCERIN	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.27827778	10.14258333	10
35250020	PATEVACAL	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-69.12780556	6.17661111	76
38015030	APTO PTO CARRENO	CON	Meteoro lógica	SP	ACT	-67.49122222	6.18241667	50
42040010	YURUPARI	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-71.04080556	0.87038889	200
42070030	VILLAFATIMA	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-69.91069444	0.99372222	175
42080020	QUERARI	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-69.84394444	1.07394444	172
34035010	TUPARRO BOCAS TOMO	CON	Meteoro lógica	CO	ACT	-67.85825000	5.35313889	250
31095030	PTO INIRIDA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-67.93169444	3.86766667	100
32105080	SAN JOSE DEL GUAVIARE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-72.64708333	2.55302778	165
35185010	LA PALOMERA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-72.56447222	4.26036111	188
35035100	ICA VILLAVICENCIO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.62500000	4.13738889	444
35025110	LA LIBERTAD AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.46791667	4.05736111	336
35035110	SALINAS DE UPIN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.58686111	4.27386111	690
44180030	BACURI	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-69.47005556	-1.23433333	101
44150010	AGUAZUL	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-72.14494444	-0.55988889	129
44160020	STA ISABEL	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-71.12430556	-1.09833333	118
44120010	ESTRECHOS LOS	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-73.53413889	-0.48622222	139
21115170	LA PLATA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.07455556	2.75913889	2101
21015070	LOS GUACHAROS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.10680556	1.67583333	1590
21115010	DESIERTO LA TATACOA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.16819444	3.23447222	459
44035040	FLORENCIA-DESLIZAMIENTOS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.64502778	1.73300000	600
21015060	MARENGO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-76.11888889	2.22111111	1550
21015050	PURACE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.42755556	1.92591667	1900
21115180	HDA MANILA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.08152778	3.13316667	600
46015030	SAN VICENTE DEL CAGUAN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.76269444	2.06300000	300
21055070	INZA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.06394444	2.54819444	1800
21015040	LA PRIMAVERA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.11433333	2.02158333	1919

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
44035050	MACAGUAL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.66100000	1.49977778	280
15065040	LA PAULINA-UNIGUAJIRA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.82919444	10.89597222	170
15065160	APT ALM PADILLA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	RS	ACT	-72.91769444	11.52822222	4
15070090	PERPANA	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-71.81930556	12.08855556	65
29065120	BATALLON NO. 6 AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.92777778	10.46536111	1280
28035070	GUATAPURI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.39583333	10.73349444	1315
15075150	PAICI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-72.32575000	11.59494444	45
15085050	TOROMANA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-71.21094444	12.08352778	144
28035060	FEDEARROZ AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.24805556	10.46361111	184
29065130	LA GRAN VIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-74.13333333	10.85000000	30
15015120	UNIV TECNOLOGICA DEL MAGDALENA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.18591667	11.22305556	7
15065180	AP.ALM.PADILLA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-72.91769444	11.52822222	4
28025120	SERRANIA DEL PERIJA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.26938889	10.06944444	2200
28025130	LA LOMA CARBONES DEL CESAR AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.52394444	9.64061111	60
15065190	MONGUI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.82063889	11.22677778	60
25025000	EL DIFICIL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.08580556	9.91197222	120
29065000	MEDIA LUNA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.50666667	10.51002778	20
25025002	LOS ALAMOS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.27361111	9.30388889	10
35075070	CHINAVITA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.35038889	5.21925000	2012
36015020	EL DIAMANTE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-71.41983333	5.81619444	160
35095120	AQUITANIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.88175000	5.55663889	3021
35075080	PMO RABANAL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.56277778	5.39238889	3398
35215020	APTO YOPAL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.38750000	5.32044444	325
23125160	SAN PABLO DE BORBUR AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.07130556	5.64702778	742
35085080	LA CAPILLA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.43600000	5.09919444	1917
24035360	SOCHA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.99702778	5.98541667	2503
24035430	TUNGUAVITA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.11636111	5.74591667	2470

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
35085060	ZETAQUIRA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.16994444	5.29494444	1436
35085070	STA MARIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.25669444	4.84125000	1300
24035410	SOGAMOSO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	ME	ACT	-72.91115278	5.75333333	2495
24035370	EL ESPINO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.45266667	6.50672222	3510
24035380	NEV DEL COCUY AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.31416667	6.50911111	4676
47030030	SAN JOAQUIN	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-76.07825000	0.33811111	240
52090010	SALAHONDA	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-78.65833333	2.03888889	6
47060020	ESTRECHO-MARANDUA	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-72.67277778	-2.44397222	120
51025060	BIOTOPO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-78.28161111	1.40863889	512
53045040	APTO GUAPI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.89836111	2.57844444	17
52055170	LA JOSEFINA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.49119444	0.93030556	2450
52055150	CERRO PARAMO PUERRES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.38880556	0.84311111	3585
52015050	BALBOA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.22166667	2.03277778	1700
52055220	EL PARAISO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.63694444	1.07066667	3029
44015070	EL PEPINO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.66711111	1.08288889	760
57025020	GORGONA GUAPI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-70.18272222	2.96286111	4
52055210	BOTANA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.27861111	1.16000000	2846
52045080	UNIV DE NARI├æO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.29500000	1.21611111	2626
52035040	VIENTO LIBRE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.34372222	1.61850000	1005
52055160	VOLCAN CHILES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.92122222	0.84658333	4042
52025090	LA SIERRA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.79027778	2.19388889	1946
44015060	ACDTO MOCOA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.65183333	1.15730556	660
52025080	ESTRECHO PATIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.11444444	1.96888889	720
47035030	PNN LA PAYA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.89813889	0.17372222	194
51025080	ALTAQUER AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-78.09250000	1.24833333	1010
52045090	COMUN EL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CO	ACT	-77.62958333	0.93263889	3141
52055140	COBANEGRA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.34202778	1.17544444	3390

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
52055230	APTO SAN LUIS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-77.67775000	0.85708333	2961
53075020	EL DIVISO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.25877778	2.31141667	1750
23195190	SAN ANTONIO SANTANDER AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.06619444	7.09952778	1480
23210160	GAMARRA	AUT	Meteoro lógica	PM	ACT	-73.73777778	8.32666667	150
37050010	ARAUQUITA	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-71.41972222	7.03722222	100
37050050	VILLANUEVA	CON	Meteoro lógica	PM	ACT	-70.26555556	6.94027778	100
23195230	NEOMUNDO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.10730556	7.10261111	970
16015120	UNIV DE PAMPLONA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-72.66605556	7.36094444	2362
24025090	MOGOTES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-72.96888889	6.47000000	1673
24035390	PMO ALMORZADERO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.69633333	6.94538889	3600
16015110	UNIV FRANCISO DE PAULA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.48716667	7.89877778	311
24055080	VIZCAINA LA LIZAMA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.70488889	6.98297222	114
23195240	AGUACHICA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.57986111	8.12341667	103
37015030	BERLIN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.86850000	7.18700000	3316
24055070	SAN VICENTE DE CHUCURI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.47205556	6.82338889	1073
16055120	AGUAS DE LA VIRGEN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.39750000	8.22769444	1700
16015130	ALCALDIA DE HERRAN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-72.48536111	7.50672222	2040
23195250	AP.PALO NEGRO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-73.18452778	7.12147222	1189
26055110	LA INDEPENDENCIA JAMUNDI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-76.56938889	3.18538889	997
26155230	EMAS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.50713889	5.08530556	2207
26125290	ARMENIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.68300000	4.54100000	1458
26125300	CALARCA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.65000000	4.53333333	1500
26135330	LA LAGUNA DEL OTUN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.40058333	4.77922222	4000
26135290	MARSELLA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.73797222	4.92997222	1649
26145090	STA EMILIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.90297222	5.20747222	2004
26075120	LA DIANA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.18577778	3.31402778	1626
26105240	EL PLACER AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.10041667	3.87894444	2200

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
26135310	STA ROSA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.63563889	4.84688889	1908
26135300	PNN QUIMBAYA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.57822222	4.72858333	1881
26155220	VILLAMARIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.51388889	5.04869444	1902
26095320	EL VINCULO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-76.29952778	3.83519444	979
26105250	ZARAGOZA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-75.93011111	4.70125000	927
26035100	HDA SUECIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-76.82775000	2.47955556	1755
26115090	LAS BRISAS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.14377778	4.77600000	1985
26015030	PNN PURACE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.40336111	2.35680556	3683
26015010	EL TABLAZO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.58127778	2.47488889	1822
26085160	SILOE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.56063889	3.42525000	1234
22025040	EL DIABLO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.02333333	2.97727778	4100
26035090	LA LAGUNA DE CAJIBIO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.78247222	2.62922222	1850
26055100	FARALLONES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.65155556	3.41602778	2275
26055120	UNIV DEL VALLE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.53377778	3.37800000	985
26055140	JAMUNDI AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.54166667	3.27444444	990
26075150	A.A. BONILLA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-76.38894444	3.53602778	961
26085170	BASE AEREA MFS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.50322222	3.45730556	954
26155240	PNN NEVADOS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.38241667	4.85958333	3637
26155250	PMO CONEJERAS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CO	ACT	-75.37583333	4.82980556	4413
26155260	SENDERO LAG VERDE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CO	ACT	-75.36158333	4.84072222	4325
26155270	SAN ANTONIO CALDAS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CO	ACT	-75.42905556	4.88666667	3064
26155280	NEV STA ISABEL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.37401667	4.81755000	4661
54075100	JUANCHACO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-77.34908333	3.92519444	10
55015010	PIE DE PATO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.97633333	5.52386111	30
26015050	PALETARA - PNUD	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-76.48202778	2.19172222	2990
21160260	PTO LLERAS TOLIMA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	PG	ACT	-74.68827778	3.83983333	1195
21215160	CERROS NOROCCIDENTALES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.23147222	4.47227778	1936

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
21255160	HDA PAJONALES AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-74.83086111	4.75794444	258
23035030	BASE PALANQUERO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.65800000	5.49536111	174
21250660	MURILLO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	PG	ACT	-75.17347222	4.87060000	2960
21185090	NATAIMA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.95950000	4.18761111	431
22075050	PMO DE YERBABUENA LAS HERMOSAS AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.70083333	4.07583333	3600
21215180	BATALLON ROOKE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.24852778	4.43538889	1200
21215190	CAJAMARCA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.50216667	4.43580556	2507
21215150	NEV DEL TOLIMA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.32777778	4.67077778	4635
21255170	MURILLO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-75.17347222	4.87060000	2960
21206710	SAN JOAQUIN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.51666667	4.63333333	757
21206790	HDA STA ANA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.88125000	5.09050000	2572
21201580	PASQUILLA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	PM	ACT	-74.15483333	4.44650000	3000
24015110	LA BOYERA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CO	ACT	-73.85175000	5.30380556	2610
21201200	ESC LA UNION AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	PM	ACT	-74.18388889	4.34294444	3320
21206600	NUEVA GENERACION AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CO	ACT	-74.09433333	4.78222222	2590
48015010	A VASQUEZ COBO	CON	Meteoro lógica	SP	ACT	-69.94091667	-4.19386111	84
21206930	PMO GUERRERO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.02216667	5.08644444	3257
23125170	SAN CAYETANO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.02247222	5.34111111	2807
23065180	VILLETA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.47097222	5.01686111	878
35035130	PMO CHINGAZA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.80325000	4.71366667	3863
23065190	QDA NEGRA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.48125000	5.13761111	1107
21195170	PAQUILO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.39805556	3.99361111	2957
21206950	PMO GUACHENEQUE AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.52508333	5.23605556	2300
21206980	STA CRUZ DE SIECHA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-73.87080556	4.78427778	3100
21195160	SUBIA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.38388889	4.47661111	2075
21206990	TIBAITATA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-74.20900000	4.69141667	2543
21205012	UNIV NACIONAL AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.08908333	4.63808333	2556

CODIGO	NOMBRE ESTACION	TIPO	CLASE	CATEGORIA	EST	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
21195190	PASCA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	AM	ACT	-74.31175000	4.31011111	2256
21195180	BATAN AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.30000000	4.25000000	2695
21206920	VILLA TERESA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.15000000	4.35000000	3624
21206940	CIUDAD BOLIVAR AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.17677778	4.57686111	2687
21206960	IDEAM BOGOTA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.06666667	4.60000000	2646
21235030	UNIV DE CUNDINAMARCA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.80811111	4.30533333	309
35025080	PNN CHINGAZA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.83333333	4.66102778	3077
35025090	BOSQUE INTERVENIDO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-73.84663889	4.66488889	2920
35025100	CALOSTROS BAJO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	ME	ACT	-73.86359167	4.66431944	2494
23065210	SUPATA AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	CP	ACT	-74.23916667	5.05969444	1798
21205791	APTO EL DORADO AUTOMATICA	AUT	Meteoro lógica	SP	ACT	-74.15066667	4.70558333	2547
21202270	PLUVIOMETRO AUTOMATICO TEMPORAL	AUT	Meteoro lógica	PM	ACT	-74.07288889	4.60805556	2685
21202271	PLUVIOMETRO AUTOMATICO TEMPORAL	AUT	Meteoro lógica	PM	ACT	-74.07288889	4.60805556	2685

Con la selección de las estaciones finalizada, se procedió a seleccionar la fecha para el cálculo de la intensidad total, debido a que se requiere un modelo del campo magnético actualizado para Colombia la fecha será 2021. Posterior a esto se a utilizar el editor de código fuente Visual Studio Code, para ejecutar el modelo IGRF13.

Como se aprecia en la siguiente imagen en la ventana principal del editor se selecciona la subcarpeta “release” la cual se encuentra dentro de la carpeta Python, que contiene la programación del modelo IGRF 13 desarrollado en Python y que previamente fue descargada del IAGA Division V-MOD Geomagnetic Fiel Modeling en formato .zip y descomprimida.

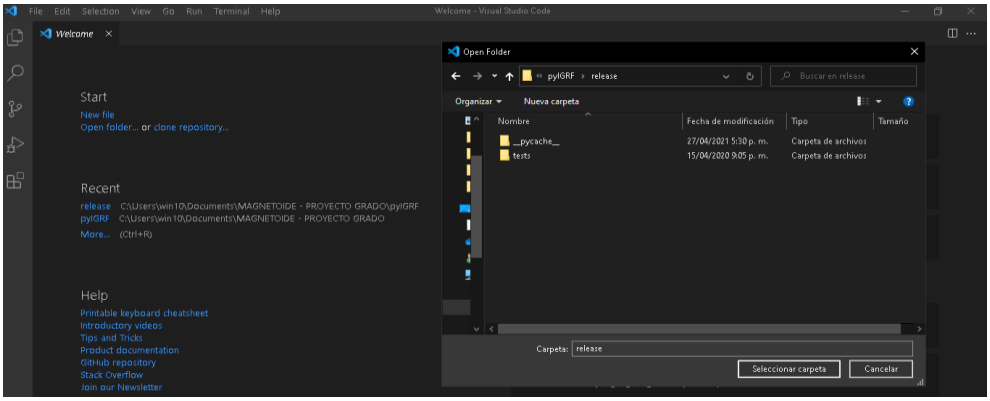


Ilustración 1. Carga del modelo IGRF 13 en Visual Studio Code. Fuente IGRF 13 Python

Enlazada la carpeta "release", se pueden apreciar las diferentes funciones y características del modelo IGRF13. Dentro de la cinta de opciones se encuentra pyIGRF.py el cual es un código que sintetiza los valores del campo magnético, permite el cálculo de datos geomagnéticos y que para el presente estudio fue el implementado para el cálculo de la intensidad total para cada uno de los puntos seleccionados. Se procede a dar clic sobre Run Python File in Terminal, que da paso a la interfaz del terminal de PyIGRF donde se empezó a realizar la selección de las opciones para llegar al cálculo de la intensidad total.

Ilustración 2. ejecución del modelo IGRF13 para el cálculo de la intensidad Total

La descripción del procedimiento realizado a partir de la ejecución de PyIGRF.py en el terminal se describe a continuación:

- Inicialmente PyIGRF.py pide un nombre para asignarle al archivo de salida que se generara. se utilizó como nombre de los archivos de salida el código de cada estación con el fin de identificar más fácilmente la información extraída. (Después de definir cada opción se debe dar "Enter")

```
PROBLEMS    OUTPUT    DEBUG CONSOLE    TERMINAL
*
* the values are definitive.                          *
*                                                     *
*                                                     *
*            (on behalf of) IAGA Working Group V-MOD *
*******************************************************

Enter name of output file
or press "Return" for output to screen
Enter filename: 26180220.1
```

Ilustración 3. IGRF13 Python. Definición nombre del archivo de salida

- Con el nombre definido aparecerá una lista de opciones para definir el tipo de datos que se poseen. se optó por la opción 1 ya que se contaba con valores de localización y fecha

```
Choose an option:
1 - values at one location and date
2 - values at yearly intervals at one location
3 - values on a latitude/longitude grid at one date
->1
```

Ilustración 4.IGRF13 Python. Definición del tipo de datos

- Después de seleccionar que tipo de datos se posee, se selecciona el formato en el cual se encuentran las coordenadas. Se definió grados decimales ya que en ese formato se encontraban los datos recolectados y su manejo es mucho más sencillo

```
Enter value for format of latitudes and longitudes:
1 - in degrees & minutes
2 - in decimal degrees
->2
```

Ilustración 5. IGRF13 Python. Definición de formato de las coordenadas

- PyIGRF.py también preguntara si las coordenadas se encuentran en un sistema geocéntrico o geodésico, se debe tener claro esto ya que afecta el resultado de la intensidad total. Para el presente estudio se definió como sistema de coordenadas geodésico

```
Enter value for coordinate system:
1 - geodetic (shape of Earth using the WGS-84 ellipsoid)
2 - geocentric (shape of Earth is approximated by a sphere)
->
```

Ilustración 6. IGRF13 Python. Definición del sistema de proyección

- Posterior a esto, el programa indica que se deben ingresar los valore de latitud y longitud según el formato definido. Los datos deben estar separados por espacio y la separación de decimales se realiza con punto

```
Enter latitude & longitude in decimal degrees
-> -75.598472222 5.733611111
```

Ilustración 7. IGRF13 Python. Digitación de coordenadas

- Para finalizar también será requerido ingresar el dato de la altitud en km y la fecha en la cual se desea calcular la intensidad total para este caso se definió 2021, pero se pueden realizar cálculos con valores de fecha desde 1900 a 2025.

```
Enter altitude in km: 0.585
Enter decimal date in years 1900-2025: 2021
Written to file: 26180220.1
```

Ilustración 8. IGRF13 Python. Digitación de altitud y año

- Si todo el procedimiento se realizó de manera correcta aparecerá el mensaje que se aprecia en la siguiente imagen, indicando que sobre el archivo cuyo nombre ya fue definido se generó el cálculo de la información suministrada

```
Written to file: 26180220.1
PS C:\Users\win10\Documents\MAGNETOIDE - PROYECTO GRADO\pyIGRF\release>
```

Ilustración 9. IGRF13 Python. Archivo de salida

Al visualizar el archivo extraído se pueden observar las variables que fueron calculadas, entre ellas la intensidad total. Este procedimiento se realizó con las 210 estaciones

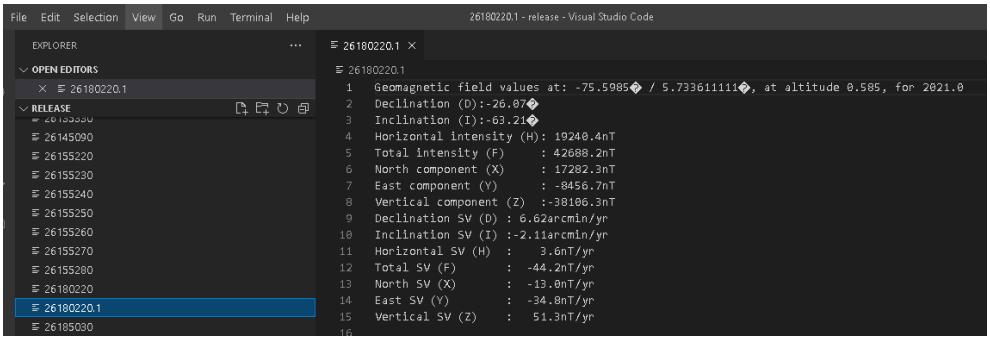


Ilustración 10.IGRF13 Python. Visualización de archivo de salida y valores calculados

Finalizado el cálculo de la intensidad total para cada uno de los puntos, se procedió a realizar el tratamiento de la información en la aplicación ArcMap del software ArcGIS, con el fin de representar gráficamente los resultados obtenidos y evaluar las variaciones de intensidad total.

Cálculo de la Intensidad utilizando Métodos de proyección estadística

Con el fin de evaluar los métodos estadísticos para la proyección de la intensidad total se debieron buscar estaciones cuya función fuese registrar actividad gravimétrica, durante el proceso se encontraron registros de 23 estaciones contenidos dentro de la monografía realizada por colegas la cual ha sido guía y base para el inicio y desarrollo de este proyecto.

Ya que etas estaciones cuentan con datos de intensidad total para los años 1971 y 1975 también se procedió a realizar el cálculo para el año 2021 utilizando el IGRF 13 desarrollado en Python, con el fin de evaluar las variaciones de intensidad total en el tiempo

Tabla 2. Ubicaciones de estaciones con mediciones gravimétricas

		Coordenadas		
Departamento	**Municipio**	**Latitud**	**Longitud**	**Altura (m)**
Amazonas	Leticia	-4,192	-69,942	78
Antioquia	Medellín	6,213	-75,591	1501
Boyacá	Tunja	5,538	-73,34	2710
Arauca	Arauca	7,069	-70,753	130
Bolívar	Cartagena	10,433	-75,538	1
Caldas	Manizales	5,044	-75,511	1927
Caquetá	Base aérea	0,747	-75,242	193
Casanare	Maní	4,811	-72,273	175
Cesar	Patiyal	10,699	-73,201	366
Chocó	Carmen de Atrato	5,881	-76,146	1612

		Coordenadas		
Departamento	**Municipio**	**Latitud**	**Longitud**	**Altura (m)**
Cundinamarca	La mesa	4,618	-74,481	1040
Guajira	Riohacha	11,533	-72,902	14
Guaviare	San José del Guaviare	2,564	-72,641	186
Magdalena	Santa Marta	11,129	-74,281	4
Meta	Puerto Guaviare	2,896	-72,133	176
Nariño	Ipiales	0,86	-77,662	2956
Nte. Santander	Cúcuta	7,908	-72,503	296
Putumayo	Solita	0,84	-75,614	205
Quindío	El Socorro	6,482	-73,254	1309
Tolima	Ibagué	4,422	-75,131	909
V. del cauca	Cali	3,497	-76,527	999
Vaupés	Mitú	1,239	-70,226	172
Vichada	-	4,008	-68,221	94

Finalizada la búsqueda de estaciones se procedió a determinar los métodos de proyección estadista en los cuales se involucran.

- **Método de proyección Geométrico**: Consiste en que la proyección crece en un mismo monto por cada unidad de tiempo. En donde:

  Tasa de crecimiento está definida como.

$$r = \left[\frac{nTi}{nTj}\right]^{\frac{1}{(año_i - año_j)}} - 1$$

Ecuación 16

De este modo involucramos la intensidad total para cada año en análisis y el intervalo del tiempo entre los años seleccionados, en donde ***nTi - nTj*** serán nuestras intensidades por año definido. Así, teniendo en cuenta los años a proyectar establecida como la variable ***año**pry*, nuestra proyección estará definida por. (Sucesiones o Progresiones Geométricas, s.f.)

$$Pf = nTj(1 + r)^{año_{pry} - año_j}$$

Ecuación 17

- **Método de proyección Lineal:** Relación estadística entre dos variables continúas conocidas como variables de predicción y respuesta para predecir el valor de una variable según el valor

de otra. La variable que desea predecir se denomina variable dependiente. (Limeres, 2012) Bajo esta definición se involucró intensidades geomagnéticas de cada una de las estaciones y años en los que se tomaron dichos datos. (Limeres, 2012)

$$Ka = \frac{nTi - nTj}{año_j - año_i}$$

Ecuación 18

De esta manera la proyección se estableció así.

$$Pf = nTj + Ka * (año_{pry} - año_j)$$

Ecuación 19

Se hizo uso del software office Excel, en este se realizó la previa programación para las proyecciones y estimaciones futuras. Los cálculos detallados de cada método de proyección se encuentran en el Anexo 2 método lineal y Anexo1 para el método geométrico

METODO LINEAL								
año	Intensidad total (nT)	año	Intensidad total (nT)	Ka	1980	1985	1990	1995
1971	30156,217	1975	29516,161	=(F49-D49)/(E49-C49)			27116	26316

Ilustración 11. Método de Proyección Lineal. Elaboración Propia, Software Excel

METODO GEOMETRICO								
año	Intensidad total (nT)	año	Intensidad total (nT)	r	1980	1985	1990	1995
1971	30156,217	1975	29516,161	=((F22/D22)^(1/(E22-C22)))-1			27235	26514

Ilustración 12. Método de proyección Geométrica. Elaboración propia, Software Excel

Por último, la evaluación de la funcionalidad del modelo geomagnético para Colombia presentando los resultados y conclusiones obtenidos en comparación con los procesos de programación de cada proyección o modelo de predicción adaptados en un intervalo-tiempo y con valores de intensidad de estaciones definidas estratégicamente, estos datos de intensidad cabe mencionar han sido extraídos de la monografía realizada por colegas y que han sido base fundamental para el inicio y desarrollo de este proyecto.

IGRF, programación Python.

El IGRF y su estructura de programación hace uso de fórmulas geodésicas, geofísicas entre otras, la compresión y claridad de estas fueron base para proyección y estimaciones futuras concebidas como base de la investigación y análisis realizado. Ejemplo de estas y como más relevantes para comprensión de la estructura programada son.

- Sistemas de referencia WGS-84

  La estructura de programación del IGRF se basa en las constantes elipsoidales del GRS80.

Constante	**Relación matemática**	**Valor**
Semieje mayor (a)	Constante definida	$a = 6\ 378\ 137{,}000$ m
Constante gravitacional geocéntrica (GM)	Constante definida	$GM = 3\ 896\ 005 \cdot 10^{8}\ m^{3}\ s^{-2}$
Factor de aplanamiento dinámico (J_2)	Constante definida	$J_2 = 108\ 263 \cdot 10^{-8}$
Velocidad angular de rotación (ω)	Constante definida	$\omega = 7\ 292\ 115 \cdot 10^{11}$ rad s^{-1}
Primera excentricidad (e^2)	Cálculo iterativo a partir de a, GM, J_2, ω	$e^2 = 6{,}694\ 380\ 022\ 90 \cdot 10^{-3}$
Segunda excentricidad (e'^2)	$e'^2 = \frac{e^2}{1-e^2}$	$e'^2 = 6{,}739\ 496\ 775\ 48 \cdot 10^{-3}$
Semieje menor (b)	$b = a\sqrt{1-e^2}$	$b = 6\ 356\ 752{,}314\ 14$ m
Aplanamiento recíproco ($1/f$)	$f = \frac{a-b}{a}$	$1/f = 298{,}257\ 222\ 101$

Ilustración 13. Contantes Elipsoidales, (Valverde, 2015)

Transformación de coordenadas geocéntricas- geodésicas.

-Semieje mayor. R_{ea}

-Factor de achatamiento F

-Semieje menor R_{eb}

-Primera excentricidad *e*

-Segunda excentricidad *e´*

-Radio de curvatura sobre el meridiano M_E

-Radio de curvatura primer vertical N_E

Algunos de los cálculos fueron realizados en base a las fórmulas expresadas a continuación:

Para representación de la circunferencia terrestre de forma analítica, se hace uso de la ecuación reducida, cuyos ejes y origen serán ejes de coordenadas representando la tierra aproximada representación a un elipsoide. (CAPITULO 5, s.f.)

- Concluyendo el **radio geocéntrico** en kilómetros, además de la colatitud geocéntrica, grados y la altitud.

$$r = \sqrt{x_e^2 + y_e^2}$$

Ecuación 20

- Las dimensiones de los semiejes del elipsoide, con *a* representando el semieje mayor y *b* el semieje menor de la elipse, concluyendo como parámetro la excentricidad. (CAPITULO 5, s.f.)

$$E^2 = R_{Ea}^2 - R_{Eb}^2$$

Ecuación 21

La conversión inversa de coordenadas geocéntricas es profunda y desencadena cálculos que contienen las ya mencionadas, además de cálculos que desembocan una secuencia de otras para la cúspide del proceso. Así cada punto puede representar un movimiento de ejes, asegurando un alineamiento de datos (coordenadas).

Se usa la transformación de **Helmert de siete parámetros** *(ECEF; x,y,z)*, traduciendo un modelo de transformación basado en coordenadas cartesianas geocéntricas aplicando siete parámetros de transformación, tres los cuales describen la traslación propia del origen, además de los giros especificando las direcciones de los ejes de los sistemas de referencia representados matricialmente,

matriz de rotación $R(w_x, w_y, w_z)$, por último, un factor de escala. Con esta transformación se asegura la conservación de ángulos y la precisión relativa. (UPV, 2017)

Ilustración 14. Transformación de Helmert, 7 parametros, (UPV, 2017)

De esta manera el IGRF basado en lenguaje de programación Python lleva el modelo Helmer a la geodesia, basando un sistema origen y un sistema de destino, entonces se tiene un vector en el sistema origen que será rotado, cambiado de escala, trasladado, y finalmente como resultado obteniendo un vector posición en el sistema destino. Base fundamental y de la estructura adoptada en el IGRF. (UPV, 2017)

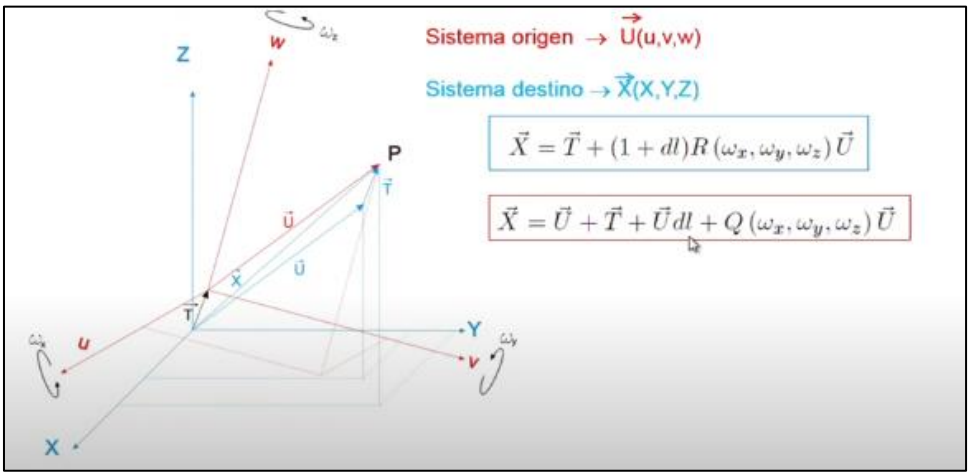


Ilustración 15. Transformación de Helmert a geodesia. (UPV, 2017)

La programación del IGRF 13 en Python parametriza las fórmulas para cada una de las variables de la siguiente forma

Cálculo de la colatitud geocéntrica y el radio a partir de la colatitud geodésica y altura.

```
    # Use WGS-84 ellipsoid parameters

    eqrad = 6378.137 # equatorial radius
    flat  = 1/298.257223563
    plrad = eqrad*(1-flat) # polar radius
    ctgd  = np.cos(np.deg2rad(gdcolat))
    stgd  = np.sin(np.deg2rad(gdcolat))
    a2    = eqrad*eqrad
    a4    = a2*a2
    b2    = plrad*plrad
    b4    = b2*b2
    c2    = ctgd*ctgd
    s2    = 1-c2
    rho   = np.sqrt(a2*s2 + b2*c2)

    rad   = np.sqrt(h*(h+2*rho) + (a4*s2+b4*c2)/rho**2)

    cd    = (h+rho)/rad
    sd    = (a2-b2)*ctgd*stgd/(rho*rad)

    cthc  = ctgd*cd - stgd*sd           # Also: sthc = stgd*cd + ctgd*sd
    thc   = np.rad2deg(np.arccos(cthc)) # arccos returns values in [0, pi]

    return rad, thc, sd, cd


def geo_to_gg(radius, theta):
```

Ilustración 16. Cálculo de la colatitud geocéntrica y el radio. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

Calculo la colatitud geodésica y la altura vertical sobre el elipsoide desde radio geocéntrico y colatitud.

```
    # Use WGS-84 ellipsoid parameters
    a =  6378.137  # equatorial radius
    b =  6356.752  # polar radius

    a2 = a**2
    b2 = b**2

    e2 = (a2 - b2) / a2  # squared eccentricity
    e4 = e2*e2
    ep2 = (a2 - b2) / b2  # squared primed eccentricity

    r = radius * np.sin(radians(theta))
    z = radius * np.cos(radians(theta))

    r2 = r**2
    z2 = z**2

    F = 54*b2*z2

    G = r2 + (1. - e2)*z2 - e2*(a2 - b2)

    c = e4*F*r2 / G**3

    s = (1. + c + np.sqrt(c**2 + 2*c))**(1./3)

    P = F / (3*(s + 1./s + 1.)**2 * G**2)
```

Ilustración 17. Calculo la colatitud geodésica y la altura vertical. Parte 1. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

```
    Q = np.sqrt(1. + 2*e4*P)

    r0 = -P*e2*r / (1. + Q) + np.sqrt(
        0.5*a2*(1. + 1./Q) - P*(1. - e2)*z2 / (Q*(1. + Q)) - 0.5*P*r2)

    U = np.sqrt((r - e2*r0)**2 + z2)

    V = np.sqrt((r - e2*r0)**2 + (1. - e2)*z2)

    z0 = b2*z/(a*V)

    height = U*(1. - b2 / (a*V))

    beta = 90. - degrees(np.arctan2(z + ep2*z0, r))

    return height, beta


def synth_values(coeffs, radius, theta, phi, \
                 nmax=None, nmin=None, grid=None):
```

Ilustración 18. Calculo la colatitud geodésica y la altura vertical. Parte 2. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

Basado en chaosmagpy de Clemens Kloss (DTU Space, Copenhague) Calcula los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal a partir del campo de potencial magnético en términos de coeficientes armónicos esféricos. Una versión reducida del código caosmagpy de DTU synth_values

```python
# ensure ndarray inputs
coeffs = np.array(coeffs, dtype=np.float)
radius = np.array(radius, dtype=np.float) / 6371.2  # Earth's average radius
theta = np.array(theta, dtype=np.float)
phi = np.array(phi, dtype=np.float)

if np.amin(theta) <= 0.0 or np.amax(theta) >= 180.0:
    if np.amin(theta) == 0.0 or np.amax(theta) == 180.0:
        warnings.warn('The geographic poles are included.')
    else:
        raise ValueError('Colatitude outside bounds [0, 180].')

if nmin is None:
    nmin = 1
else:
    assert nmin > 0, 'Only positive nmin allowed.'

# handle optional argument: nmax
nmax_coeffs = int(np.sqrt(coeffs.shape[-1] + 1) - 1)  # degree
if nmax is None:
    nmax = nmax_coeffs
else:
    assert nmax > 0, 'Only positive nmax allowed.'

if nmax > nmax_coeffs:
    warnings.warn('Supplied nmax = {0} and nmin = {1} is '
                  'incompatible with number of model coefficients. '
                  'Using nmax = {2} instead.'.format(
                    nmax, nmin, nmax_coeffs))
    nmax = nmax_coeffs
```

Ilustración 19. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 1. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

```python
if nmax < nmin:
    raise ValueError(f'Nothing to compute: nmax < nmin ({nmax} < {nmin}.)')

# handle grid option
grid = False if grid is None else grid

# manually broadcast input grid on surface
if grid:
    theta = theta[..., None]  # first dimension is theta
    phi = phi[None, ...]  # second dimension is phi

# get shape of broadcasted result
try:
    b = np.broadcast(radius, theta, phi,
                     np.broadcast_to(0, coeffs.shape[:-1]))
except ValueError:
    print('Cannot broadcast grid shapes (excl. last dimension of coeffs):')
    print(f'radius: {radius.shape}')
    print(f'theta:  {theta.shape}')
    print(f'phi:    {phi.shape}')
    print(f'coeffs: {coeffs.shape[:-1]}')
    raise
```

Ilustración 20. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 2. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

```python
    grid_shape = b.shape

    # initialize radial dependence given the source
    r_n = radius**(-(nmin+2))

    # compute associated Legendre polynomials as (n, m, theta-points)-array
    Pnm = legendre_poly(nmax, theta)

    # save sinth for fast access
    sinth = Pnm[1, 1]

    # calculate cos(m*phi) and sin(m*phi) as (m, phi-points)-array
    phi = radians(phi)
    cmp = np.cos(np.multiply.outer(np.arange(nmax+1), phi))
    smp = np.sin(np.multiply.outer(np.arange(nmax+1), phi))

    # allocate arrays in memory
    B_radius = np.zeros(grid_shape)
    B_theta = np.zeros(grid_shape)
    B_phi = np.zeros(grid_shape)

    num = nmin**2 - 1
    for n in range(nmin, nmax+1):
        B_radius += (n+1) * Pnm[n, 0] * r_n * coeffs[..., num]

        B_theta += -Pnm[0, n+1] * r_n * coeffs[..., num]

        num += 1
```

Ilustración 21. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 3. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

```python
        for m in range(1, n+1):
            B_radius += ((n+1) * Pnm[n, m] * r_n
                         * (coeffs[..., num] * cmp[m]
                            + coeffs[..., num+1] * smp[m]))

            B_theta += (-Pnm[m, n+1] * r_n
                        * (coeffs[..., num] * cmp[m]
                           + coeffs[..., num+1] * smp[m]))

            with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
                # handle poles using L'Hopital's rule
                div_Pnm = np.where(theta == 0., Pnm[m, n+1], Pnm[n, m] / sinth)
                div_Pnm = np.where(theta == degrees(pi), -Pnm[m, n+1], div_Pnm)

            B_phi += (m * div_Pnm * r_n
                      * (coeffs[..., num] * smp[m]
                         - coeffs[..., num+1] * cmp[m]))

            num += 2

        r_n = r_n / radius  # equivalent to r_n = radius**(-(n+2))

    return B_radius, B_theta, B_phi

def legendre_poly(nmax, theta):
```

Ilustración 22. Cálculo de los componentes del campo radial, de colatitud y azimutal. Parte 4. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

Devuelve los polinomios de asociados de Legendre Ecuación 11

```
    costh = np.cos(radians(theta))
    sinth = np.sqrt(1-costh**2)

    Pnm = np.zeros((nmax+1, nmax+2) + costh.shape)
    Pnm[0, 0] = 1  # is copied into trailing dimenions
    Pnm[1, 1] = sinth  # write theta into trailing dimenions via broadcasting

    rootn = np.sqrt(np.arange(2 * nmax**2 + 1))

    # Recursion relations after Langel "The Main Field" (1987),
    # eq. (27) and Table 2 (p. 256)
    for m in range(nmax):
        Pnm_tmp = rootn[m+m+1] * Pnm[m, m]
        Pnm[m+1, m] = costh * Pnm_tmp

        if m > 0:
            Pnm[m+1, m+1] = sinth*Pnm_tmp / rootn[m+m+2]

        for n in np.arange(m+2, nmax+1):
            d = n * n - m * m
            e = n + n - 1
            Pnm[n, m] = ((e * costh * Pnm[n-1, m] - rootn[d-e] * Pnm[n-2, m])
                         / rootn[d])
```

Ilustración 23. polinomios de Legendre. parte 1. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

```
    # dP(n,m) = Pnm(m,n+1) is the derivative of P(n,m) vrt. theta
    Pnm[0, 2] = -Pnm[1, 1]
    Pnm[1, 2] = Pnm[1, 0]
    for n in range(2, nmax+1):
        Pnm[0, n+1] = -np.sqrt((n*n + n) / 2) * Pnm[n, 1]
        Pnm[1, n+1] = ((np.sqrt(2 * (n*n + n)) * Pnm[n, 0]
                       - np.sqrt((n*n + n - 2)) * Pnm[n, 2]) / 2)

        for m in np.arange(2, n):
            Pnm[m, n+1] = (0.5*(np.sqrt((n + m) * (n - m + 1)) * Pnm[n, m-1]
                           - np.sqrt((n + m + 1) * (n - m)) * Pnm[n, m+1]))

        Pnm[n, n+1] = np.sqrt(2 * n) * Pnm[n, n-1] / 2

    return Pnm

def xyz2dhif(x, y, z):
```

Ilustración 24. polinomios de Legendre. Parte 2. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

Cálculo de D, H, I y F a partir de (X, Y, Z). Basado en código de D. Kerridge, 2019

```
    hsq = x*x + y*y
    hoz  = np.sqrt(hsq)
    eff = np.sqrt(hsq + z*z)
    dec = np.arctan2(y,x)
    inc = np.arctan2(z,hoz)

    return r2d(dec), hoz, r2d(inc), eff


def xyz2dhif_sv(x, y, z, xdot, ydot, zdot):
```

Ilustración 25. Cálculo de D, H, I y F. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

Cálculo de la variación secular en D, H, I y F a partir de (X, Y, Z) y (Xdot, Ydot, Zdot). Basado en código de D. Kerridge, 2019

```
    h2  = x*x + y*y
    h   = np.sqrt(h2)
    f2  = h2 + z*z
    hdot = (x*xdot + y*ydot)/h
    fdot = (x*xdot + y*ydot + z*zdot)/np.sqrt(f2)
    ddot = r2d((xdot*y - ydot*x)/h2)*60
    idot = r2d((hdot*z - h*zdot)/f2)*60

    return ddot, hdot, idot, fdot
```

Ilustración 26. Cálculo de la variación secular. Fuente IGRF 13 Python Visual StudioCode

Desarrollo de Mapas

Con las proyecciones de intensidad total de cada una de las estaciones y las extraídas del modelo geomagnético IGRF 13 se realizó procesamiento de los datos en el software ArcMap con el fin de representar de manera gráfica las variaciones en el campo magnético de la superficie del territorio colombiano.

Bajo el software se hizo uso de herramientas de representación vectorial para triangulación conservando la precisión de los datos de entrada al mismo tiempo que modela los valores entre los puntos conocidos. Con los modelos se generaron curvas de nivel las cuales conectan ubicaciones de igual valor de intensidad total en un dataset de ráster.

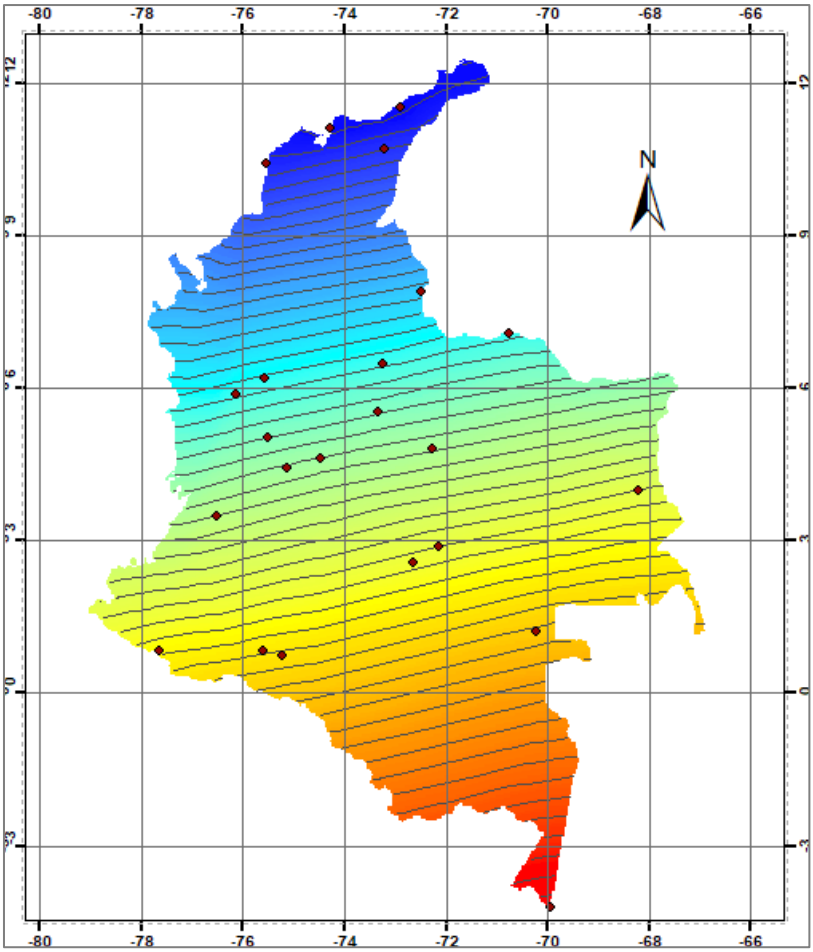


Ilustración 27. Representación Gráfica del comportamiento de la intensidad total (n T) en la aplicación ArcMap del Software ArcGIS. Fuente: Elaboración Propia

5. Capítulo V

5.1. Resultados

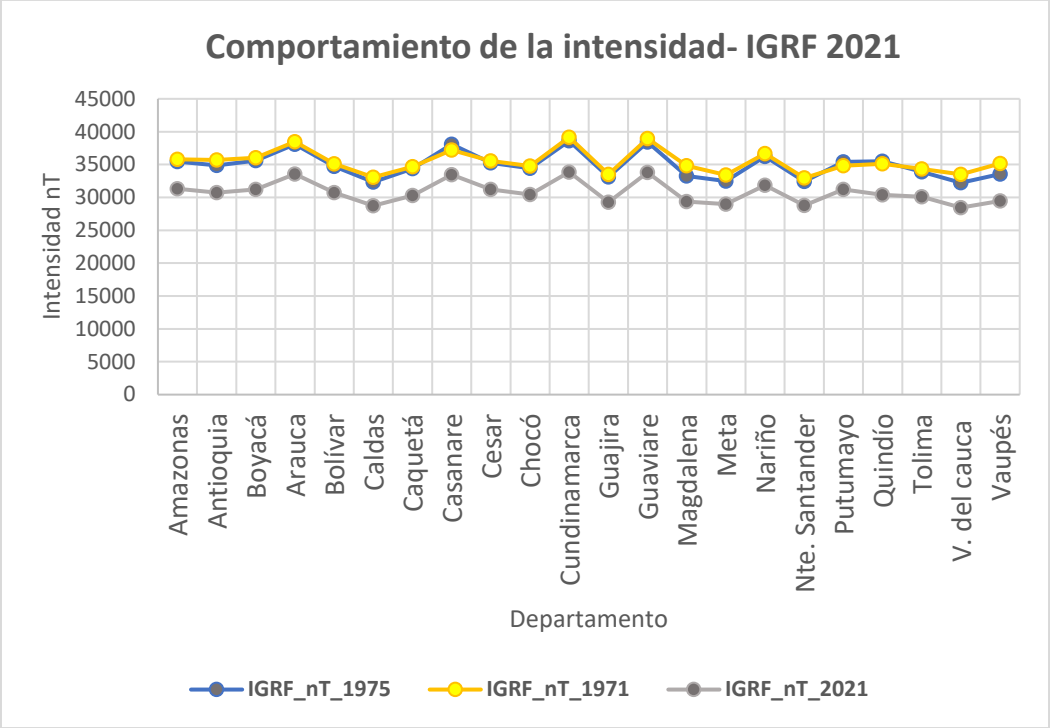
5.1.2. Cálculo de la intensidad total (n T) mediante modelos de proyección estadístico

Definidas las estaciones a usar con su respectiva latitud, longitud y altura, se compila resultados de las proyecciones respectivas y de interés bajo la intensidad total establecida para los años 1975, 1971, y finalmente para el 2021. Datos obtenidos bajo sistemas y proyecciones estadísticas Lineal y Geométrica.

Tabla 3. Resultados obtenidos de la proyección de lo modelo estadísticos lineal y geométrico

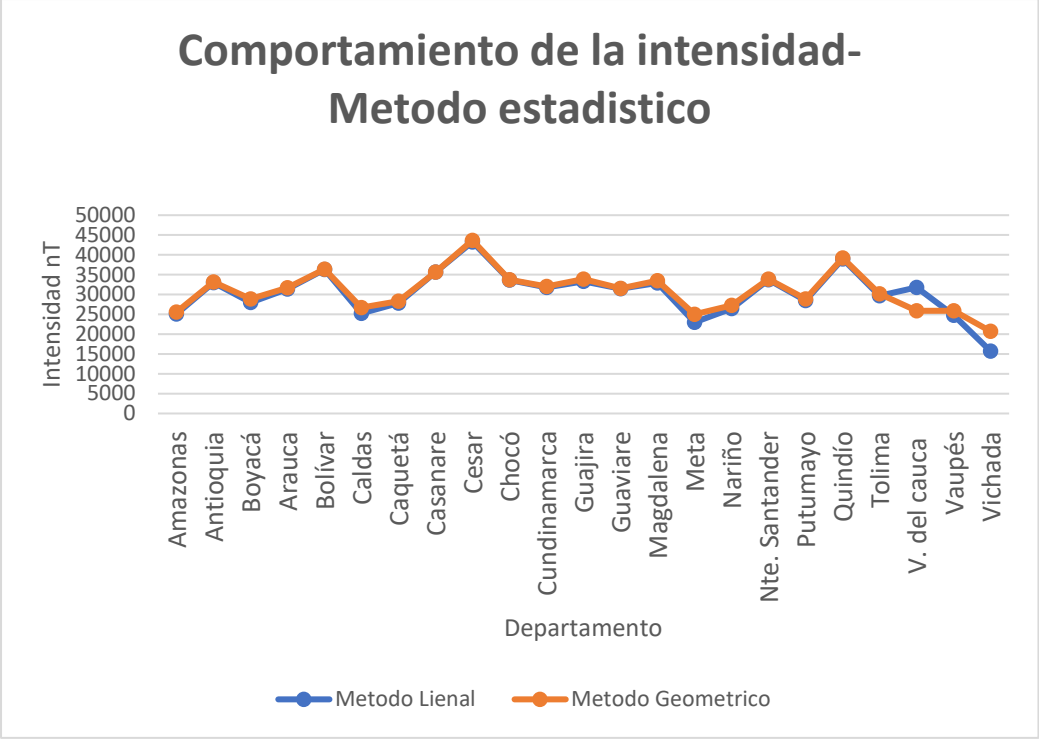
		Coordenadas			Intensidad total (nT) Total				
Departamento	**Municipio**	**Latitud**	**Longitud**	**Altura (m)**	**IGRF (1975)**	**IGRF (1971)**	**IGRF (2021) Python**	**Lineal**	**Geométrico**
Amazonas	Leticia	-4.192	-69.942	78	29590.8	29901.3	26302.8	25115.776	25593.195
Antioquia	Medellín	6.213	-75.591	1501	35436.4	35779.9	31321.1	32980.797	33118.663
Boyacá	Tunja	5.538	-73.34	2710	34886.6	35710.7	30724.3	27984.639	28901.739
Arauca	Arauca	7.069	-70.753	130	35597.4	36018.9	31233.9	31349.190	31713.003
Bolívar	Cartagena	10.433	-75.538	1	38079.1	38477.8	33576.2	36328.842	36401.073
Caldas	Manizales	5.044	-75.511	1927	34736.7	35112.2	30722.2	25250.448	26717.643
Caquetá	Base aérea	0.747	-75.242	193	32347.8	33076.0	28730.4	27851.527	28331.692
Casanare	Mani	4.811	-72.273	175	34384.6	34691.4	30291.7	35624.856	35630.897
Cesar	Patiyal	10.699	-73.201	366	38082.8	37221.5	33435.5	43268.185	43680.172
Chocó	Carmen de Atrato	5.881	-76.146	1612	35267.6	35532.9	31209.6	33650.666	33725.028
Cundinamarca	La mesa	4.618	-74.481	1040	34427.5	34781.2	30420.8	31823.938	31992.651
Guajira	Riohacha	11.533	-72.902	14	38598.1	39165.1	33863.2	33339.706	33850.914
Guaviare	San José del Guaviare	2.564	-72.641	186	33138.6	33496.6	29278.1	31453.688	31531.370
Magdalena	Santa Marta	11.129	-74.281	4	38445.9	38942.7	33811.8	32945.386	33495.021
Meta	Puerto Guaviare	2.896	-72.133	176	33283.4	34830.8	29377.4	23010.451	25023.340
Nariño	Ipiales	0.86	-77.662	2956	32495.8	33392.7	28973.6	26428.756	27229.934
Nte. Santander	Cúcuta	7.908	-72.503	296	36257.3	36673.4	31864.8	33723.391	33863.802
Putumayo	Solita	0.84	-75.614	205	32415.8	32949	28806.7	28484.007	28850.687
Quindío	El Socorro	6.482	-73.254	1309	35426.2	34811	31206.5	38973.149	39172.998
Tolima	Ibagué	4.422	-75.131	909	35522.2	35099.9	30395.2	29692.755	30172.910
V. del cauca	Cali	3.497	-76.527	999	33889.9	34324.6	30091.7	31804.260	31924.876
Vaupés	Mitú	1.239	-70.226	172	32229.5	33509	28448.9	24730.197	25908.790
Vichada	-	4.008	-68.221	94	33557	35172	29476.3	15710.470	20717.180

Se deduce el comportamiento de la intensidad para los años representados en cada estación según departamento, el comportamiento es semejante para los tres años definidos, se podría estimar la diferenciación frente al año actual tomando valores de intensidad menores a los años restantes en comparación, sin embargo, la línea de continuidad para los valores de la intensidad son análogos como se evidencia en el grafico lineal.



Grafica 1. Comportamiento de la intensidad - IGRF 2021. Fuente: Elaboración propia, Software Excel.

Respecto a los métodos estadísticos como se demuestra en el gráfico tipo lineal, tanto la proyección lineal como la geométrica tienden a comportamientos igualitario con excepciones puntuales, como en ejemplo, para el departamento del Vichada la intensidad calculada demuestra una diferencia de casi de un 55% una de la otra, pero si se analiza a manera general la conducta de los métodos son similares.



Grafica 2. Comportamiento de la intensidad- Método estadístico. Fuente: Elaboración Propia. Software Excel.

Se estimó una diferencia entre los métodos estadísticos y del software IGRF obteniendo los subsecuentes datos para cada una de las estaciones en los departamentos referidos en la siguiente tabla.

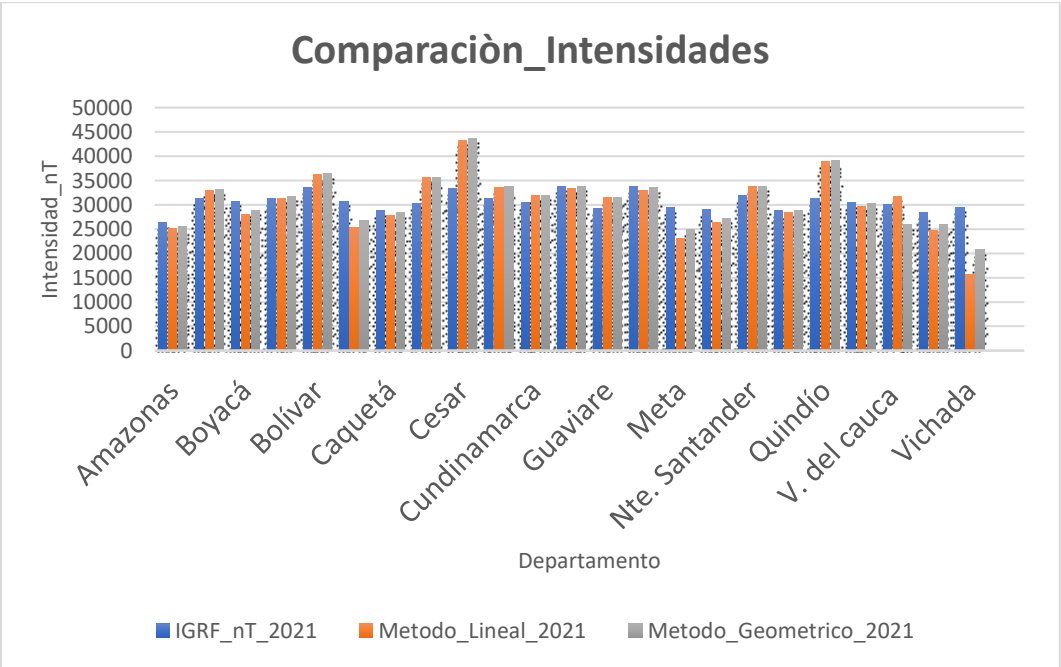
Tabla 4. Diferencias para valores de intensidad según métodos empelados

		Coordenadas			Intensidad total (nT) Total			Diferencia Intensidad (n T)	
Departamento	**Municipio**	**Laltitud**	**Longitud**	**Altura (m)**	**IGRF (2021) Python**	**Lineal**	**Geométrico**	**IGRF 2021 - LINEAL**	**IGRF2021- GEOMETRICO**
Amazonas	Leticia	-4.192	-69.942	78	26302.8	25115.776	25593.195	1187.024	709.605
Antioquia	Medellín	6.213	-75.591	1501	31321.1	32980.797	33118.663	-1659.697	-1797.563
Boyacá	Tunja	5.538	-73.34	2710	30724.3	27984.639	28901.739	2739.661	1822.561
Arauca	Arauca	7.069	-70.753	130	31233.9	31349.19	31713.003	-115.29	-479.103
Bolívar	Cartagena	10.433	-75.538	1	33576.2	36328.842	36401.073	-2752.642	-2824.873
Caldas	Manizales	5.044	-75.511	1927	30722.2	25250.448	26717.643	5471.752	4004.557
Caquetá	Base aérea	0.747	-75.242	193	28730.4	27851.527	28331.692	878.873	398.708
Casanare	Mani	4.811	-72.273	175	30291.7	35624.856	35630.897	-5333.156	-5339.197
Cesar	Patiyal	10.699	-73.201	366	33435.5	43268.185	43680.172	-9832.685	-10244.672
Chocó	Carmen de Atrato	5.881	-76.146	1612	31209.6	33650.666	33725.028	-2441.066	-2515.428
Cundinamarca	La mesa	4.618	-74.481	1040	30420.8	31823.938	31992.651	-1403.138	-1571.851
Guajira	Riohacha	11.533	-72.902	14	33863.2	33339.706	33850.914	523.494	12.286
Guaviare	San José del Guaviare	2.564	-72.641	186	29278.1	31453.688	31531.37	-2175.588	-2253.27
Magdalena	Santa Marta	11.129	-74.281	4	33811.8	32945.386	33495.021	866.414	316.779

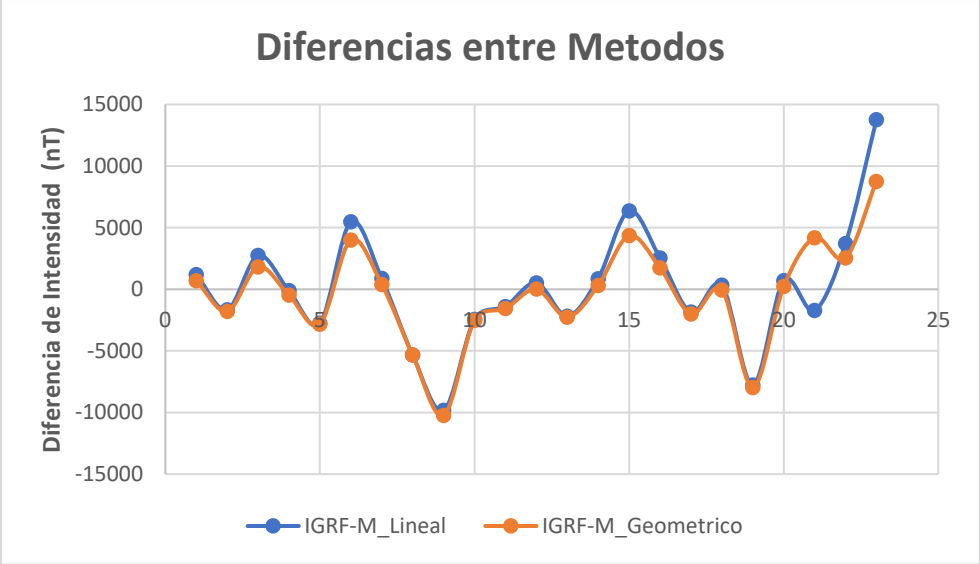
		Coordenadas			Intensidad total (nT) Total			Diferencia Intensidad (n T)	
Departamento	**Municipio**	**Laltitud**	**Longitud**	**Altura (m)**	**IGRF (2021) Python**	**Lineal**	**Geométrico**	**IGRF 2021 - LINEAL**	**IGRF2021- GEOMETRICO**
Meta	Puerto Guaviare	2.896	-72.133	176	29377.4	23010.451	25023.34	6366.949	4354.06
Nariño	Ipiales	0.86	-77.662	2956	28973.6	26428.756	27229.934	2544.844	1743.666
Nte. Santander	Cúcuta	7.908	-72.503	296	31864.8	33723.391	33863.802	-1858.591	-1999.002
Putumayo	Solita	0.84	-75.614	205	28806.7	28484.007	28850.687	322.693	-43.987
Quindío	El Socorro	6.482	-73.254	1309	31206.5	38973.149	39172.998	-7766.649	-7966.498
Tolima	Ibagué	4.422	-75.131	909	30395.2	29692.755	30172.91	702.445	222.29
V. del cauca	Cali	3.497	-76.527	999	30091.7	31804.26	31924.876	-1712.56	-1833.176
Vaupés	Mitú	1.239	-70.226	172	28448.9	24730.197	25908.79	3718.703	2540.11
Vichada	-	4.008	-68.221	94	29476.3	15710.47	20717.18	13765.83	8759.12

Los métodos usados y mencionados en el presente documento en comparación como se demuestra en la gráfica de barras tienden a valores homogéneos, sin embargo, este comportamiento es evidente para los métodos estadísticos que a diferencia de los valores resultantes con el Software del IGRF se refleja una gran diferencia respecto con los métodos lineal y geométrico.

Las diferencias entre IGRF y los métodos estadísticos si representan una gran disparidad, esta es significativa y nos puede demostrar la viabilidad de los métodos y según la estructura de cada método.



Grafica 3. Comparación de Intensidades. Fuente: Elaboración Propia, Software Excel



Grafica 4. Diferencia entre métodos. Fuente: Elaboración propia, Software Excel.

5.1.3. Cálculo de la intensidad total implementando el IGRF13 Python

A partir del cálculo de la intensidad total utilizando el IGRF13 desarrollado en Python para cada una de los puntos definidos para el presente trabajo, se adquirieron los siguientes resultados

Tabla 5. Resultados obtenidos de Intensidad total (n T) implementando la programación del IGRF13 desarrollada en Python. (IDEAM - instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios ambientales, 2014) y IGRF 13 Python

Estación	Longitud	Latitud	Altitud Km	CODIGO	Intensidad	Total Nt
A VASQUEZ COBO	-69.940917	-4.193861	0.0840	48015010.0		26302.000
A. RAFAEL NUÑEZ AUTOMATICA	-75.516028	10.447250	0.0020	14015080.0		33581.500
A.A. BONILLA AUTOMATICA	-76.388944	3.536028	0.9610	26075150.0		30097.100
A.E.CORTISSOZ AUTOMATICA	-74.779778	10.883361	0.0140	29045190.0		33735.700
A.J.M. CORDOVA AUTOMATICA	-75.425889	6.168639	2.0730	23085270.0		31272.500
ACDTO MOCOA AUTOMATICA	-76.651833	1.157306	0.6600	44015060.0		29039.500
AGUACHICA AUTOMATICA	-73.579861	8.123417	0.1030	23195240.0		32105.200
AGUAS DE LA VIRGEN AUTOMATICA	-73.397500	8.227694	1.7000	16055120.0		32113.700
AGUAZUL	-72.144944	-0.559889	0.1290	44150010.0		27880.400
ALCALDIA DE HERRAN AUTOMATICA	-72.485361	7.506722	2.0400	16015130.0		31629.100
ALTAQUER AUTOMATICA	-78.092500	1.248333	1.0100	51025080.0		29211.700
AP.ALM.PADILLA AUTOMATICA	-72.917694	11.528222	0.0040	15065180.0		33862.700
AP.PALO NEGRO AUTOMATICA	-73.184528	7.121472	1.1890	23195250.0		31525.000
APT ALM PADILLA AUTOMATICA	-72.917694	11.528222	0.0040	15065160.0		33862.700
APTO EL DORADO AUTOMATICA	-74.150667	4.705583	2.5470	21205791.0		30406.500
APTO GUAPI AUTOMATICA	-77.898361	2.578444	0.0170	53045040.0		29808.700
APTO LAS FLORES AUTOMATICA	-73.970833	9.046333	0.0340	25025001.0		32639.700
APTO PTO CARRENO	-67.491222	6.182417	0.0500	38015030.0		30417.900
APTO SAN LUIS AUTOMATICA	-77.677750	0.857083	2.9610	52055230.0		28973.800

Estación	Longitud	Latitud	Altitud Km	CODIGO	Intensidad	Total Nt
APTO YOPAL AUTOMATICA	-72.387500	5.320444	0.3250	35215020.0		30549.100
AQUITANIA AUTOMATICA	-72.881750	5.556639	3.0210	35095120.0		30679.000
ARAGON AUTOMATICA	-75.816667	6.533333	2.6000	27015320.0		31491.000
ARAUQUITA	-71.419722	7.037222	0.1000	37050010.0		31296.100
ARGELIA ANTIOQUIA AUTOMATICA	-75.133333	5.716667	1.6690	23050420.0		31020.600
ARMENIA AUTOMATICA	-75.683000	4.541000	1.4580	26125290.0		30501.400
BACURI	-69.470056	-1.234333	0.1010	44180030.0		27359.600
BALBOA AUTOMATICA	-77.221667	2.032778	1.7000	52015050.0		29470.500
BASE AEREA MFS AUTOMATICA	-76.503222	3.457306	0.9540	26085170.0		30071.200
BASE PALANQUERO AUTOMATICA	-74.658000	5.495361	0.1740	23035030.0		30882.600
BATALLON NO. 6 AUTOMATICA	-73.927778	10.465361	1.2800	29065120.0		33382.000
BATALLON ROOKE AUTOMATICA	-75.248528	4.435389	1.2000	21215180.0		30409.500
BATAN AUTOMATICA	-74.300000	4.250000	2.6950	21195180.0		30200.300
BERLIN AUTOMATICA	-72.868500	7.187000	3.3160	37015030.0		31490.000
BIOTOPO AUTOMATICA	-78.281611	1.408639	0.5120	51025060.0		29307.400
BOSQUE INTERVENIDO AUTOMATICA	-73.846639	4.664889	2.9200	35025090.0		30349.300
BOTANA AUTOMATICA	-77.278611	1.160000	2.8460	52055210.0		29070.100
CAJAMARCA AUTOMATICA	-75.502167	4.435806	2.5070	21215190.0		30416.400
CALARCA AUTOMATICA	-75.650000	4.533333	1.5000	26125300.0		30493.600
CALOSTROS BAJO AUTOMATICA	-73.863592	4.664319	2.4940	35025100.0		30357.000
CAPURGANA AUTOMATICA	-77.325028	8.591083	0.0020	11155030.0		32769.000
CARMEN DE BOLIVAR AUTOMATICA	-75.106417	9.715750	0.1520	29015040.0		33130.700
CARMEN DEL DARIEN AUTOMATICA	-76.977194	7.154333	0.0180	11105020.0		31972.100
CERRO PARAMO PUERRES AUTOMATICA	-77.388806	0.843111	3.5850	52055150.0		28931.700
CERROS NOROCCIDENTALES AUTOMATICA	-75.231472	4.472278	1.9360	21215160.0		30414.800
CHIGORODO AUTOMATICA	-76.694056	7.671194	0.0500	12015110.0		32212.700
CHINAVITA AUTOMATICA	-73.350389	5.219250	2.0120	35075070.0		30579.300
CIUDAD BOLIVAR AUTOMATICA	-74.176778	4.576861	2.6870	21206940.0		30344.900
COBANEGRA AUTOMATICA	-77.342028	1.175444	3.3900	52055140.0		29075.300
COMUN EL AUTOMATICA	-77.629583	0.932639	3.1410	52045090.0		28999.700
CRISTO REY	-76.225500	9.072167	0.0150	12045020.0		32910.100
DESIERTO LA TATACOA AUTOMATICA	-75.168194	3.234472	0.4590	21115010.0		29840.500
EL DIABLO AUTOMATICA	-76.023333	2.977278	4.1000	22025040.0		29753.400
EL DIAMANTE AUTOMATICA	-71.419833	5.816194	0.1600	36015020.0		30687.000
EL DIFICIL AUTOMATICA	-74.085806	9.911972	0.1200	25025000.0		33118.100
EL DIVISO AUTOMATICA	-77.258778	2.311417	1.7500	53075020.0		29600.100
EL ESPINO AUTOMATICA	-72.452667	6.506722	3.5100	24035370.0		31095.800
EL GUAMO AUTOMATICA	-74.973222	10.037222	0.0750	29015000.0		33291.800
EL PARAISO AUTOMATICA	-77.636944	1.070667	3.0290	52055220.0		29062.300
EL PEPINO AUTOMATICA	-76.667111	1.082889	0.7600	44015070.0		29006.800
EL PLACER AUTOMATICA	-76.100417	3.878944	2.2000	26105240.0		30213.500
EL TABLAZO AUTOMATICA	-76.581278	2.474889	1.8220	26015010.0		29608.600

Estación	Longitud	Latitud	Altitud Km	CODIGO	Intensidad	Total Nt
EL TESORO IDEAM AUTOMATICA	-75.289250	9.357083	0.1680	25025280.0		32956.900
EL VINCULO AUTOMATICA	-76.299528	3.835194	0.9790	26095320.0		30230.300
EMAS AUTOMATICA	-75.507139	5.085306	2.2070	26155230.0		30738.500
ESC LA UNION AUTOMATICA	-74.183889	4.342944	3.3200	21201200.0		30223.700
ESTRECHO PATIA AUTOMATICA	-77.114444	1.968889	0.7200	52025080.0		29445.200
ESTRECHO-MARANDUA	-72.672778	-2.443972	0.1200	47060020.0		27185.900
ESTRECHOS LOS	-73.534139	-0.486222	0.1390	44120010.0		28044.100
FARALLONES AUTOMATICA	-76.651556	3.416028	2.2750	26055100.0		30047.100
FEDEARROZ AUTOMATICA	-73.248056	10.463611	0.1840	28035060.0		33315.700
FLORENCIA-DESLIZAMIENTOS AUTOMATICA	-75.645028	1.733000	0.6000	44035040.0		29198.100
GAMARRA	-73.737778	8.326667	0.1500	23210160.0		32229.300
GORGONA GUAPI AUTOMATICA	-70.182722	2.962861	0.0040	57025020.0		29208.000
GUATAPURI AUTOMATICA	-73.395833	10.733494	1.3150	28035070.0		33463.100
HDA COTOVE AUTOMATICA	-75.827389	6.533917	0.5300	26225060.0		31524.100
HDA MANILA AUTOMATICA	-75.081528	3.133167	0.6000	21115180.0		29782.400
HDA PAJONALES AUTOMATICA	-74.830861	4.757944	0.2580	21255160.0		30536.900
HDA STA ANA AUTOMATICA	-73.881250	5.090500	2.5720	21206790.0		30565.000
HDA SUECIA AUTOMATICA	-76.827750	2.479556	1.7550	26035100.0		29635.600
ICA VILLAVICENCIO AUTOMATICA	-73.625000	4.137389	0.4440	35035100.0		30108.900
IDEAM BOGOTA AUTOMATICA	-74.066667	4.600000	2.6460	21206960.0		30345.100
INCODER AUTOMATICA	-75.900528	8.748944	0.0370	13055040.0		32700.000
INZA AUTOMATICA	-76.063944	2.548194	1.8000	21055070.0		29592.000
JAMUNDI AUTOMATICA	-76.541667	3.274444	0.9900	26055140.0		29988.300
JERICO AUTOMATICA	-75.789556	5.799250	2.7650	26185030.0		31114.100
JUANCHACO AUTOMATICA	-77.349083	3.925194	0.0100	54075100.0		30390.900
LA BOYERA AUTOMATICA	-73.851750	5.303806	2.6100	24015110.0		30665.800
LA CAPILLA AUTOMATICA	-73.436000	5.099194	1.9170	35085080.0		30531.300
LA DIANA AUTOMATICA	-76.185778	3.314028	1.6260	26075120.0		29962.600
LA GRAN VIA AUTOMATICA	-74.133333	10.850000	0.0300	29065130.0		33638.900
LA INDEPENDENCIA JAMUNDI AUTOMATICA	-76.569389	3.185389	0.9970	26055110.0		29949.000
LA JOSEFINA AUTOMATICA	-77.491194	0.930306	2.4500	52055170.0		28995.200
LA LAGUNA DE CAJIBIO AUTOMATICA	-76.782472	2.629222	1.8500	26035090.0		29698.800
LA LAGUNA DEL OTUN AUTOMATICA	-75.400583	4.779222	4.0000	26135330.0		30550.900
LA LIBERTAD AUTOMATICA	-73.467917	4.057361	0.3360	35025110.0		30055.900
LA LOMA CARBONES DEL CESAR AUTOMATICA	-73.523944	9.640611	0.0600	28025130.0		32905.000
LA PALOMERA AUTOMATICA	-72.564472	4.260361	0.1880	35185010.0		30059.200
LA PAULINA-UNIGUAJIRA	-72.829194	10.895972	0.1700	15065040.0		33500.200
LA PINTADA	-75.598472	5.733611	0.5850	26180220.0		31094.300
LA PLATA AUTOMATICA	-75.074556	2.759139	2.1010	21115170.0		29586.700
LA PRIMAVERA AUTOMATICA	-76.114333	2.021583	1.9190	21015040.0		29355.300
LA SELVA AUTOMATICA	-75.414722	6.131667	2.0900	23085260.0		31252.400
LA SIERRA AUTOMATICA	-76.790278	2.193889	1.9460	52025090.0		29498.600

Estación	Longitud	Latitud	Altitud Km	CODIGO	Intensidad	Total Nt
LAS BRISAS AUTOMATICA	-76.143778	4.776000	1.9850	26115090.0		30655.000
LAS FLORES AUTOMATICA	-74.819750	11.039361	0.0020	29045180.0		33827.300
LOS ALAMOS AUTOMATICA	-74.273611	9.303889	0.0100	25025002.0		32813.500
LOS GUACHAROS AUTOMATICA	-76.106806	1.675833	1.5900	21015070.0		29203.700
MACAGUAL AUTOMATICA	-75.661000	1.499778	0.2800	44035050.0		29100.200
MACEO AUTOMATICA	-74.794722	6.571639	0.9800	23105070.0		31426.100
MARENGO AUTOMATICA	-76.118889	2.221111	1.5500	21015060.0		29451.400
MARSELLA AUTOMATICA	-75.737972	4.929972	1.6490	26135290.0		30694.100
MEDIA LUNA AUTOMATICA	-74.506667	10.510028	0.0200	29065000.0		33496.800
METROMEDELLIN AUTOMATICA	-75.555444	6.332583	1.4500	27015310.0		31378.800
MOGOTES AUTOMATICA	-72.968889	6.470000	1.6730	24025090.0		31163.100
MONGUI AUTOMATICA	-72.820639	11.226778	0.0600	15065190.0		33682.800
MURILLO AUTOMATICA	-75.173472	4.870600	2.9600	21250660.0		30587.400
MURILLO AUTOMATICA	-75.173472	4.870600	2.9600	21255170.0		30587.400
NATAIMA AUTOMATICA	-74.959500	4.187611	0.4310	21185090.0		30271.700
NEOMUNDO AUTOMATICA	-73.107306	7.102611	0.9700	23195230.0		31510.000
NEV DEL COCUY AUTOMATICA	-72.314167	6.509111	4.6760	24035380.0		31063.800
NEV DEL TOLIMA AUTOMATICA	-75.327778	4.670778	4.6350	21215150.0		30481.200
NEV STA ISABEL AUTOMATICA	-75.374017	4.817550	4.6610	26155280.0		30557.000
NUEVA GENERACION AUTOMATICA	-74.094333	4.782222	2.5900	21206600.0		30437.100
PAICI AUTOMATICA	-72.325750	11.594944	0.0450	15075150.0		33822.700
PAJARITO AUTOMATICA	-75.612889	6.286389	1.9560	27015290.0		31353.700
PALETARA - PNUD	-76.482028	2.191722	2.9900	26015050.0		29453.000
PAQUILO AUTOMATICA	-74.398056	3.993611	2.9570	21195170.0		30084.200
PASCA AUTOMATICA	-74.311750	4.310111	2.2560	21195190.0		30236.800
PASQUILLA AUTOMATICA	-74.154833	4.446500	3.0000	21201580.0		30275.100
PATEVACAL	-69.127806	6.176611	0.0760	35250020.0		30603.600
PERPANA	-71.819306	12.088556	0.0650	15070090.0		34029.500
PIE DE PATO AUTOMATICA	-76.976333	5.523861	0.0300	55015010.0		31138.600
PISTA INDIRA AUTOMATICA	-76.696222	7.940750	0.0230	12015100.0		32355.600
PLUVIOMETRO AUTOMATICO TEMPORAL	-74.072889	4.608056	2.6850	21202270.0		30349.100
PLUVIOMETRO AUTOMATICO TEMPORAL	-74.072889	4.608056	2.6850	21202271.0		30349.100
PMO ALMORZADERO AUTOMATICA	-72.696333	6.945389	3.6000	24035390.0		31343.200
PMO BELMIRA AUTOMATICA	-75.645611	6.632083	3.2210	27015280.0		31513.800
PMO CHINGAZA AUTOMATICA	-73.803250	4.713667	3.8630	35035130.0		30354.400
PMO CONEJERAS AUTOMATICA	-75.375833	4.829806	4.4130	26155250.0		30566.900
PMO DE YERBABUENA LAS HERMOSAS AUTOMATICA	-75.700833	4.075833	3.6000	22075050.0		30247.200
PMO GUACHENEQUE AUTOMATICA	-73.525083	5.236056	2.3000	21206950.0		30602.100
PMO GUERRERO AUTOMATICA	-74.022167	5.086444	3.2570	21206930.0		30567.800
PMO RABANAL AUTOMATICA	-73.562778	5.392389	3.3980	35075080.0		30666.500
PNN CHINGAZA AUTOMATICA	-73.833333	4.661028	3.0770	35025080.0		30343.700
PNN LA PAYA AUTOMATICA	-74.898139	0.173722	0.1940	47035030.0		28451.400

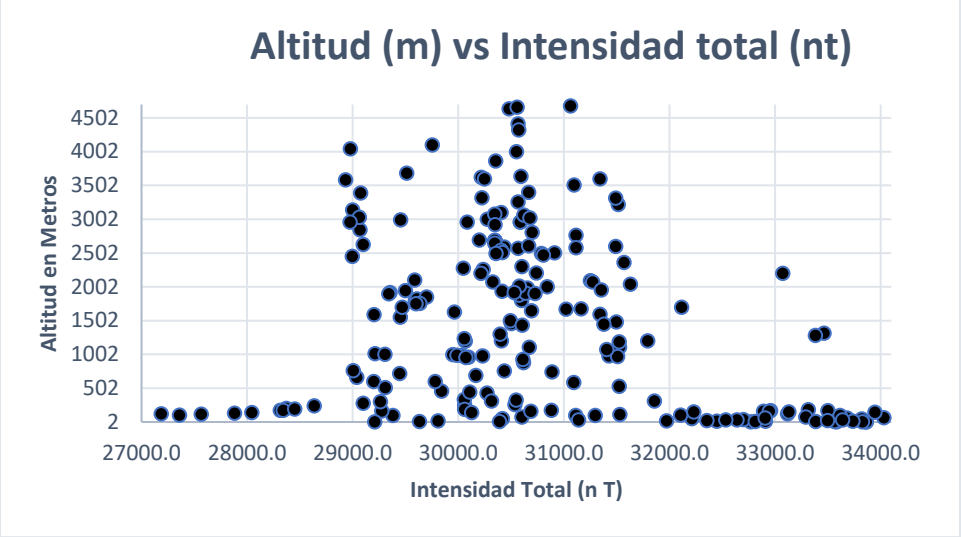
Estación	Longitud	Latitud	Altitud Km	CODIGO	Intensidad	Total Nt
PNN NEVADOS AUTOMATICA	-75.382417	4.859583	3.6370	26155240.0		30593.600
PNN PURACE AUTOMATICA	-76.403361	2.356806	3.6830	26015030.0		29510.700
PNN QUIMBAYA AUTOMATICA	-75.578222	4.728583	1.8810	26135300.0		30575.700
PTO INIRIDA AUTOMATICA	-67.931694	3.867667	0.1000	31095030.0		29381.100
PTO LLERAS TOLIMA AUTOMATICA	-74.688278	3.839833	1.1950	21160260.0		30066.600
PUERTA ROJA AUTOMATICA	-75.387500	9.316389	0.1600	25025350.0		32946.100
PURACE AUTOMATICA	-76.427556	1.925917	1.9000	21015050.0		29342.800
QDA NEGRA AUTOMATICA	-74.481250	5.137611	1.1070	23065190.0		30673.400
QUERARI	-69.843944	1.073944	0.1720	42080020.0		28340.600
REPELON AUTOMATICA	-75.119167	10.500278	0.0100	29035200.0		33564.300
SABANALARGA AUTOMATICA	-74.918889	10.636722	0.1000	29045000.0		33614.400
SALAHONDA	-78.658333	2.038889	0.0060	52090010.0		29633.000
SALINAS DE UPIN AUTOMATICA	-73.586861	4.273861	0.6900	35035110.0		30166.500
SAN VICENTE DE CHUCURI AUTOMATICA	-73.472056	6.823389	1.0730	24055070.0		31407.200
SAN ANTONIO CALDAS AUTOMATICA	-75.429056	4.886667	3.0640	26155270.0		30620.200
SAN ANTONIO SANTANDER AUTOMATICA	-73.066194	7.099528	1.4800	23195190.0		31495.900
SAN CAYETANO AUTOMATICA	-74.022472	5.341111	2.8070	23125170.0		30699.400
SAN JOAQUIN	-76.078250	0.338111	0.2400	47030030.0		28634.800
SAN JOAQUIN AUTOMATICA	-74.516667	4.633333	0.7570	21206710.0		30436.200
SAN JOSE DEL GUAVIARE AUTOMATICA	-72.647083	2.553028	0.1650	32105080.0		29274.000
SAN MARCOS AUTOMATICA	-75.142694	8.596833	0.0310	25025340.0		32534.400
SAN PABLO DE BORBUR AUTOMATICA	-74.071306	5.647028	0.7420	23125160.0		30886.700
SAN VICENTE DEL CAGUAN AUTOMATICA	-74.762694	2.063000	0.3000	46015030.0		29263.600
SENDERO LAG VERDE AUTOMATICA	-75.361583	4.840722	4.3250	26155260.0		30572.100
SERRANIA DEL PERIJA AUTOMATICA	-73.269389	10.069444	2.2000	28025120.0		33071.400
SILOE AUTOMATICA	-76.560639	3.425250	1.2340	26085160.0		30057.700
SINCERIN	-75.278278	10.142583	0.0100	29035000.0		33386.100
SOCHA AUTOMATICA	-72.997028	5.985417	2.5030	24035360.0		30911.400
SOGAMOSO AUTOMATICA	-72.911153	5.753333	2.4950	24035410.0		30787.000
STA BARBARA AUTOMATICA	-75.556222	5.859611	2.5800	26185050.0		31114.100
STA CRUZ DE SIECHA AUTOMATICA	-73.870806	4.784278	3.1000	21206980.0		30407.000
STA EMILIA AUTOMATICA	-75.902972	5.207472	2.0040	26145090.0		30842.500
STA ISABEL	-71.124306	-1.098333	0.1180	44160020.0		27566.200
STA ISABEL VALDIVIA AUTOMATICA	-75.442278	7.157278	1.2000	26255030.0		31793.200
STA MARIA AUTOMATICA	-73.256694	4.841250	1.3000	35085070.0		30395.700
STA ROSA AUTOMATICA	-75.635639	4.846889	1.9080	26135310.0		30639.100
SUBIA AUTOMATICA	-74.383889	4.476611	2.0750	21195160.0		30327.100
SUPATA AUTOMATICA	-74.239167	5.059694	1.7980	23065210.0		30599.400
TIBAITATA AUTOMATICA	-74.209000	4.691417	2.5430	21206990.0		30405.800
TOROMANA AUTOMATICA	-71.210944	12.083528	0.1440	15085050.0		33944.200
TUNGUAVITA AUTOMATICA	-73.116361	5.745917	2.4700	24035430.0		30806.200

Estación	Longitud	Latitud	Altitud Km	CODIGO	Intensidad	Total Nt
TUPARRO BOCAS TOMO	-67.858250	5.353139	0.2500	34035010.0		30061.100
UNGUIA AUTOMATICA	-77.087861	8.036778	0.0150	11135030.0		32447.800
UNISUCRE AUTOMATICA	-75.402222	9.211667	0.1600	25025270.0		32891.200
UNIV DE CUNDINAMARCA AUTOMATICA	-74.808111	4.305333	0.3090	21235030.0		30314.500
UNIV DE NARIÑO AUTOMATICA	-77.295000	1.216111	2.6260	52045080.0		29099.400
UNIV DE PAMPLONA AUTOMATICA	-72.666056	7.360944	2.3620	16015120.0		31570.300
UNIV DEL VALLE AUTOMATICA	-76.533778	3.378000	0.9850	26055120.0		30036.300
UNIV FRANCISO DE PAULA AUTOMATICA	-72.487167	7.898778	0.3110	16015110.0		31858.000
UNIV NACIONAL AUTOMATICA	-74.089083	4.638083	2.5560	21205012.0		30367.200
UNIV TECNOLOGICA DEL MAGDALENA AUTOMATICA	-74.185917	11.223056	0.0070	15015120.0		33852.300
VEGACHI AUTOMATICA	-74.796583	6.774111	1.1070	23105060.0		31527.700
VIENTO LIBRE AUTOMATICA	-77.343722	1.618500	1.0050	52035040.0		29305.500
VILLA TERESA AUTOMATICA	-74.150000	4.350000	3.6240	21206920.0		30219.100
VILLAFATIMA	-69.910694	0.993722	0.1750	42070030.0		28312.900
VILLAMARIA AUTOMATICA	-75.513889	5.048694	1.9020	26155220.0		30725.700
VILLANUEVA	-70.265556	6.940278	0.1000	37050050.0		31112.600
VILLANUEVA VILLAHERMOSA AUTOMATICA	-75.612889	6.253056	1.5960	27015300.0		31342.200
VILLETA AUTOMATICA	-74.470972	5.016861	0.8780	23065180.0		30616.500
VIZCAINA LA LIZAMA AUTOMATICA	-73.704889	6.982972	0.1140	24055080.0		31529.300
VOLCAN CHILES AUTOMATICA	-77.921222	0.846583	4.0420	52055160.0		28977.100
YURUPARI	-71.040806	0.870389	0.2000	42040010.0		28370.800
Z_EMA_FINAL3	-71.833333	4.566667	0.1400	35205501.0		30127.500
ZARAGOZA AUTOMATICA	-75.930111	4.701250	0.9270	26105250.0		30612.400
ZETAQUIRA AUTOMATICA	-73.169944	5.294944	1.4360	35085060.0		30605.400

Con la determinación de los valores de intensidad total para cada uno de los puntos, se realizó un análisis gráfico con el fin de comparar cómo se comportan los componentes x, y, z respecto a los valores de intensidad total. A continuación, se muestran los resultados obtenidos

5.1.4. Altitud vs intensidad total (n T)

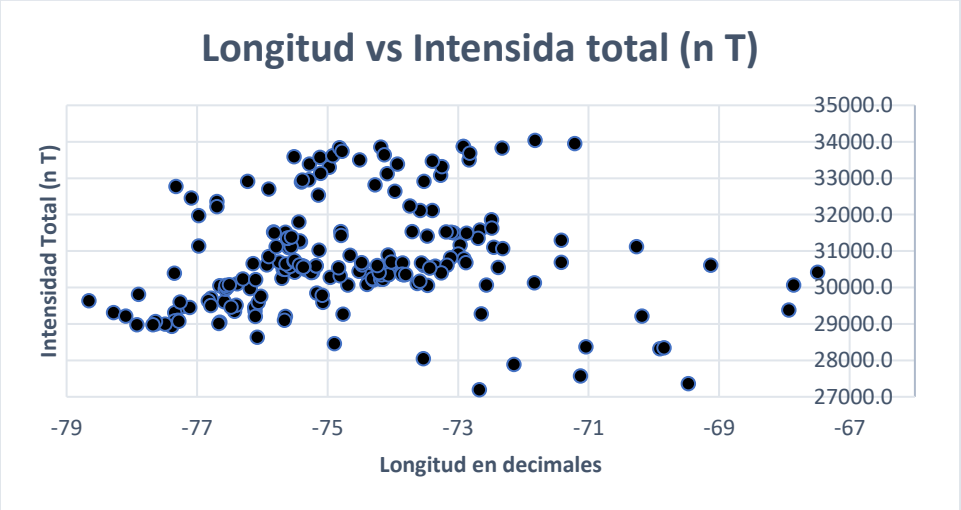
no se puede establecer correlación entre los valores de intensidad total (nT) y la altitud (m), pero se observa que los valores entre 2900 y 3200 nT se agrupan y distribuyen dentro de todo el rango de altitudes.



Grafica 5. Variación de la intensidad total (nT) Vs Altitud en metros Calculo en IGRF13 Python. Fuente: Elaboración Propia, Software Excel.

5.1.5. Longitud vs Intensidad total (nT)

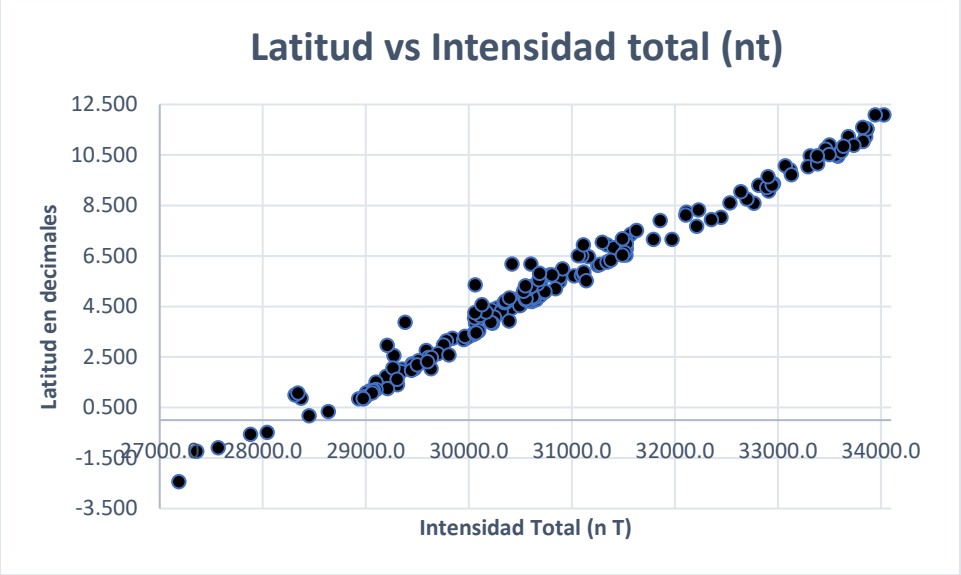
No se puede establecer una correlación entre los valores de longitud (Grados decimales) e intensidad total (nT)



Grafica 6. Variación de la intensidad total (nT) Vs Longitud en Grados decimales Calculo en IGRF13 Python. Fuente: Elaboración Propia, Software Excel.

5.1.6. Latitud vs Intensidad total (nT)

se puede establecer una correlación directamente proporcional entre la latitud (Grados decimales) y la intensidad total (nT), cada vez que aumenta el valor de la latitud aumenta el valor de la intensidad



Grafica 7. Variación de la intensidad total (nT) Vs Latitud en Grados decimales Calculo en IGRF13 Python. Fuente: Elaboración Propia, Software Excel.

5.1.7. Comparación entre valores de intensidad total (n T) 1971 y 1975 vs 2021

Tomando como referencia los datos existentes de intensidad total de las 23 estaciones contenidas en monografías de colegas, se calculó la intensidad total (n T) para el año 2021 implementado el IGRF 13 desarrollado en Python y se realizó una comparación de valores y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 6. Comparación entre valores de intensidad total (n T) 1971 y 1975 vs 2021

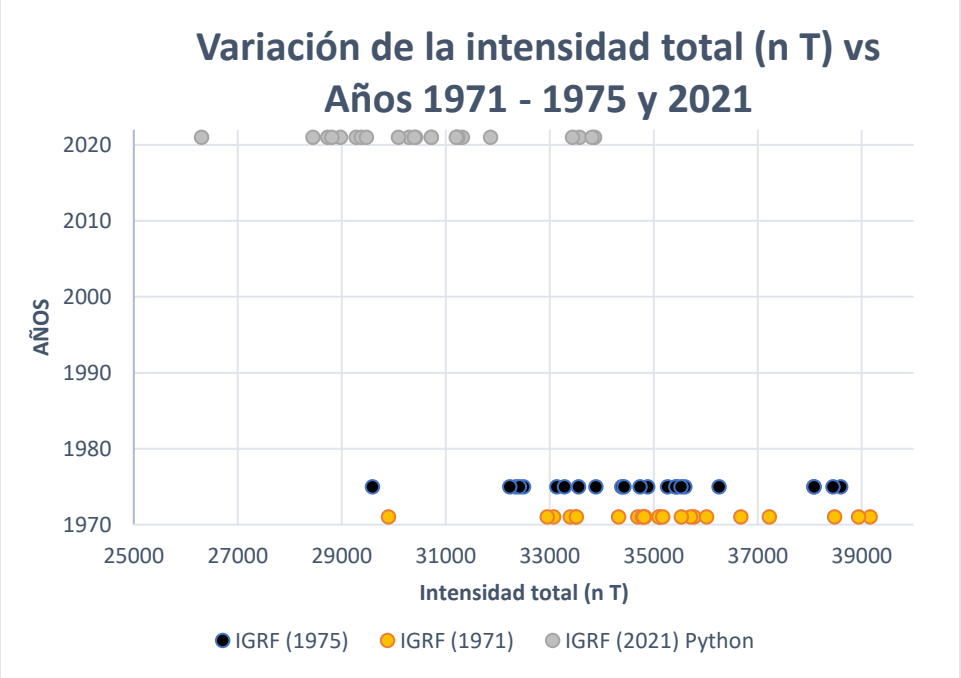
Coordenadas					Variación de la intensidad total 1971 y 1975 respecto a valores del 2021	
Departamento	**Municipio**	**Latitud**	**Longitud**	**Altura (m)**	**IGRF 1795 - IGRF 2021**	**IGRF 1971 - IGRF 2021**
Amazonas	Leticia	-4.192	-69.942	78	3288	3598.5
Antioquia	Medellín	6.213	-75.591	1501	4115.3	4458.8
Boyacá	Tunja	5.538	-73.34	2710	4162.3	4986.4
Arauca	Arauca	7.069	-70.753	130	4363.5	4785
Bolívar	Cartagena	10.433	-75.538	1	4502.9	4901.6
Caldas	Manizales	5.044	-75.511	1927	4014.5	4390
Caquetá	Base aérea	0.747	-75.242	193	3617.4	4345.6
Casanare	Mani	4.811	-72.273	175	4092.9	4399.7
Cesar	Patiyal	10.699	-73.201	366	4647.3	3786
Chocó	Carmen de Atrato	5.881	-76.146	1612	4058	4323.3
Cundinamarca	La mesa	4.618	-74.481	1040	4006.7	4360.4
Guajira	Riohacha	11.533	-72.902	14	4734.9	5301.9

Coordenadas					Variación de la intensidad total 1971 y 1975 respecto a valores del 2021	
Departamento	**Municipio**	**Latitud**	**Longitud**	**Altura (m)**	**IGRF 1795 - IGRF 2021**	**IGRF 1971 - IGRF 2021**
Guaviare	San José del Guaviare	2.564	-72.641	186	3860.5	4218.5
Magdalena	Santa Marta	11.129	-74.281	4	4634.1	5130.9
Meta	Puerto Guaviare	2.896	-72.133	176	3906	5453.4
Nariño	Ipiales	0.86	-77.662	2956	3522.2	4419.1
Nte. Santander	Cúcuta	7.908	-72.503	296	4392.5	4808.6
Putumayo	Solita	0.84	-75.614	205	3609.1	4142.3
Quindío	El Socorro	6.482	-73.254	1309	4219.7	3604.5
Tolima	Ibagué	4.422	-75.131	909	5127	4704.7
V. del cauca	Cali	3.497	-76.527	999	3798.2	4232.9
Vaupés	Mitú	1.239	-70.226	172	3780.6	5060.1
Vichada	-	4.008	-68.221	94	4080.7	5695.7

Se observa un decrecimiento promedio de la intensidad total (n T) para el año 1975 de 4110.187 n T y para el año 1971 de 4569.909 n T

Dentro de los resultados obtenidos para la columna de diferencias de valores de intensidad total (n T) 1975 vs 2021 se ubica la estación con mayor variación en el departamento del Tolima con valor un de 5127 n T y menor variación en el departamento del Amazonas con un valor de 3288 n T

Se realizó la observación anterior con la columna de diferencia de valores de intensidad total (n T) 1971 vs 2021 y se encontró la estación con mayor variación, que en este caso está ubicada en el departamento de Vichada con un valor de 5695.7 (n T) y la menor variación nuevamente en el departamento del Amazonas con un valor de 3598.5 n T



Grafica 8. Variación de la intensidad total (n T) vs Años 1971 - 1975 y 2021. Fuente: Elaboración Propia, Software Excel-

Los resultados de la representación gráfica realizada mediante mapas se encuentran a partir del Anexo 3

5.2. Conclusiones y Recomendaciones

Las proyecciones realizadas demuestran la disminución de la intensidad (nT) a través del tiempo, para el año actual este refiere valores menores que para los años 1971 y 1975, sin embargo, entre estos también se demostró una disminución recurrente. No obstante, en comparación con los métodos estadísticos establecidos para este proyecto (lineal, geométrico) se conserva una disparidad para algunos casos puntuales en comparación con los resultados por el IGRF.13

En suma, se puede demostrar un comportamiento de descenso para la intensidad en el total de las estaciones definidas y mencionadas en el presente documento, ello se puede aliar al comportamiento de inversión magnética o de las anomalías actuales y descritas en los polos y campo magnético. Sin embargo, la estimación para años venideros es invariables y no se puede reflejar con exactitud. Aquí se ha demostrado que en el intervalo de los años 1971 al 2021 la intensidad Total ha disminuido y se puede inferir bajo proyección estadística que seguirá este comportamiento para años próximos, ahora, se puede también concluir que este fenómeno puede presentarse cada cierto periodo de tiempo, sin embargo, bajo el estudio empleado se refleja que la diminución es inversamente proporcional al paso del tiempo. Este fenómeno estimado en proyección bajo software y métodos estadísticos constata el traslado de los polos terrestres y del flujo magnético; la manifestación de este fenómeno puede significar, según estudios, la perturbación y debilitamiento en el campo magnético en su totalidad, se ignora la fuente puntual de esta anomalía, consecuente a ello se presentan manifestaciones de índole natural inesperadas como en ejemplo, el aumento de la radiación solar.

Se realizaron comparaciones diferentes a intensidad y tiempo para analizar y establecer correlaciones con mayor puntualidad bajo los datos extraídos y sometidos a estudio, en ejemplo, la altitud y longitud de cada estación puntual con relación a la intensidad calculada, a pesar de ello, para estas estimaciones no se pudo fundar una correlación, la representación gráfica solo muestra una dispersión sin ningún fin conjunto. Por el contrario, la comparación entre la latitud y el valor de intensidad para cada estación se ligó a un comportamiento directamente proporcional; el incremento en latitud refiere un valor de intensidad significativo e igualmente mayor. La intensidad gravitatoria en un punto se puede semejar a una representación de la fuerza gravitatoria en ese punto, esto puede indicar

la presencia de materiales que presentan perturbación que produce en el espacio que lo rodea y por su materia este recibe a su vez la fuerza gravitatoria que produce la atracción actuando como intercesor. La conclusión mencionada está basada en el comportamiento extraído por los métodos sobredichos anteriormente de 23 estaciones.

Además, se dedujo que la estación con mayor irregularidad y desviación en los datos calculados y proyectados se encuentra en el departamento del Vichada.

6. ANEXOS

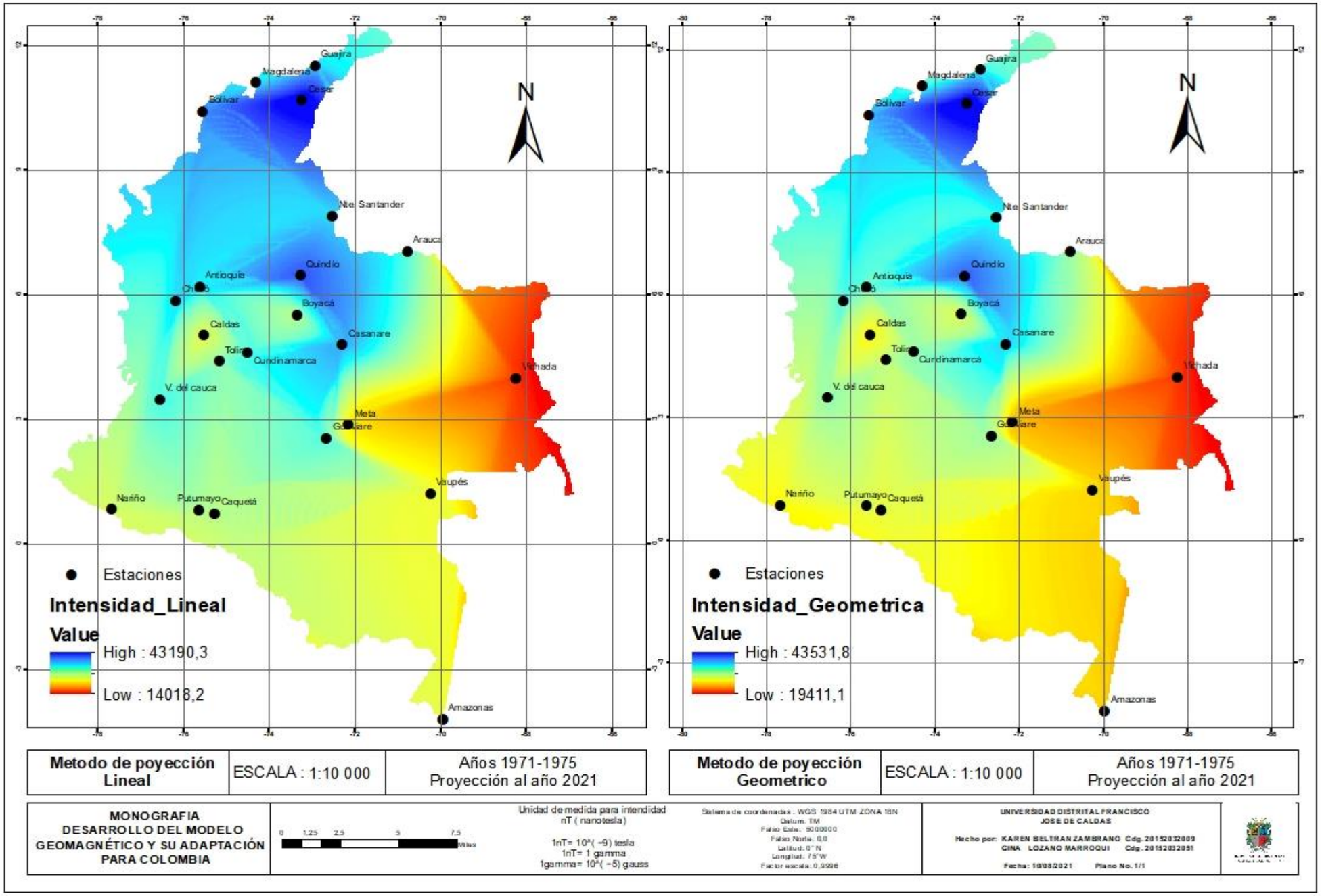
6.1. Anexo1

METODO GEOMETRICO																	
Departamento	año	Intensidad total (nT)	año	Intensidad total (nT)	r	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	PROMEDIO
Amazonas	1971	30156.217	1975	29516.161	-0.00534893	28735.161	27974.8262	27234.61	26513.98	25812.4179	25129.4192	24464.4927	23817.1603	23186.9562	23062.9308	25593.1954
Antioquia	1971	35681.733	1975	35338.757	-0.00241173	34914.6693	34495.6709	34081.7008	33672.6985	33268.6046	32869.36	32474.9067	32085.187	31700.1442	31623.6919	33118.6634
Boyacá	1971	35775.479	1975	34786.166	-0.00698622	33587.9076	32430.9249	31313.7961	30235.1484	29193.6562	28188.0397	27217.063	26279.533	25374.2975	25197.0272	28901.7394
Arauca	1971	36046.005	1975	35449.584	-0.00416244	34717.9161	34001.3495	33299.5726	32612.2802	31939.1733	31279.9591	30634.3509	30002.0678	29382.8348	29260.5304	31713.0035
Bolívar	1971	38226.071	1975	37985.153	-0.00157935	37686.1396	37389.48	37095.1556	36803.1481	36513.4393	36226.011	35940.8453	35657.9243	35377.2305	35321.3575	36401.0731
Caldas	1971	35261.487	1975	33990.244	-0.00913745	32465.4447	31009.0478	29617.9847	28289.3246	27020.2681	25808.1413	24650.3904	23544.5761	22488.3685	22282.8822	26717.6428
Caquetá	1971	33125.651	1975	32455.921	-0.00509325	31637.7676	30840.2384	30062.8134	29304.9858	28566.2617	27846.1594	27144.2095	26459.9545	25792.9483	25661.5785	28331.6917
Casanare	1971	34455.859	1975	34604.303	0.00107532	34790.7577	34978.217	35166.6864	35356.1713	35546.6771	35738.2095	35930.7739	36124.3758	36319.0209	36358.0756	35630.8965
Cesar	1971	37514.867	1975	38245.447	0.00483345	39178.7119	40134.7504	41114.1181	42117.3843	43145.1322	44197.9592	45276.4773	46381.3133	47513.1096	47742.7617	43680.1718
Chocó	1971	35525.924	1975	35287.796	-0.00167996	34992.3793	34699.4358	34408.9447	34120.8854	33835.2377	33551.9814	33271.0963	32992.5627	32716.3609	32661.3987	33725.0283
Cundinamarca	1971	34825.778	1975	34444.592	-0.00274768	33973.9714	33509.7809	33051.9328	32600.3403	32154.9179	31715.5814	31282.2476	30854.8345	30433.2612	30349.6402	31992.6508
Guajira	1971	39229.048	1975	38481.195	-0.00480039	37566.3955	36673.3433	35801.5212	34950.4246	34119.5609	33308.449	32516.6193	31743.6135	30988.9841	30840.2248	33850.9136
Guaviare	1971	33329.741	1975	33091.512	-0.00179172	32796.1188	32503.3625	32213.2195	31925.6665	31640.6803	31358.2381	31078.3171	30800.8949	30525.949	30471.2551	31531.3702
Magdalena	1971	39063.662	1975	38286.738	-0.00500969	37337.2762	36411.3598	35508.405	34627.8423	33769.1164	32931.6858	32115.0224	31318.6112	30541.9499	30388.9444	33495.0213
Meta	1971	34855.735	1975	33351.572	-0.01096761	31562.3178	29869.054	28266.6309	26750.175	25315.0744	23956.9644	22671.7146	21455.4163	20304.3703	20081.68	25023.3398
Nariño	1971	33446.767	1975	32555.591	-0.00672876	31474.9379	30430.1562	29420.055	28443.4832	27499.3278	26586.5127	25703.9978	24850.7771	24025.8783	23864.2138	27229.934
Nte. Santander	1971	36478.601	1975	36128.733	-0.00240643	35696.113	35268.6734	34846.3522	34429.0879	34016.8202	33609.4891	33207.0356	32809.4012	32416.5283	32338.52	33863.8021
Putumayo	1971	33021.039	1975	32444.908	-0.00439068	31738.8592	31048.1751	30372.5213	29711.5707	29065.0034	28432.5063	27813.7733	27208.5048	26616.4078	26499.5437	28850.6866
Quindío	1971	34951.197	1975	35461.921	0.00363327	36110.8335	36771.6204	37444.4989	38129.6903	38827.42	39537.9173	40261.4158	40998.1536	41748.3728	41900.0561	39172.9979
Tolima	1971	35105.857	1975	34418.479	-0.0049314	33578.1522	32758.3419	31958.5473	31178.2797	30417.0623	29674.43	28949.9291	28243.1169	27553.5615	27417.6839	30172.9105
V. del cauca	1971	34261.646	1975	33949.597	-0.00228477	33563.5294	33181.8521	32804.5151	32431.4691	32062.6653	31698.0555	31337.592	30981.2275	30628.9156	30558.9355	31924.8757
Vaupés	1971	33393.752	1975	32293.618	-0.00833983	30969.2766	29699.2457	28481.2979	27313.2975	26193.196	25119.0292	24088.9133	23101.0418	22153.6823	21968.9244	25908.7905
Vichada	1971	35514.614	1975	32999.802	-0.01819315	30105.2077	27464.5143	25055.4505	22857.6991	20852.7245	19023.6172	17354.9511	15832.6528	14443.8836	14181.1039	20717.1805

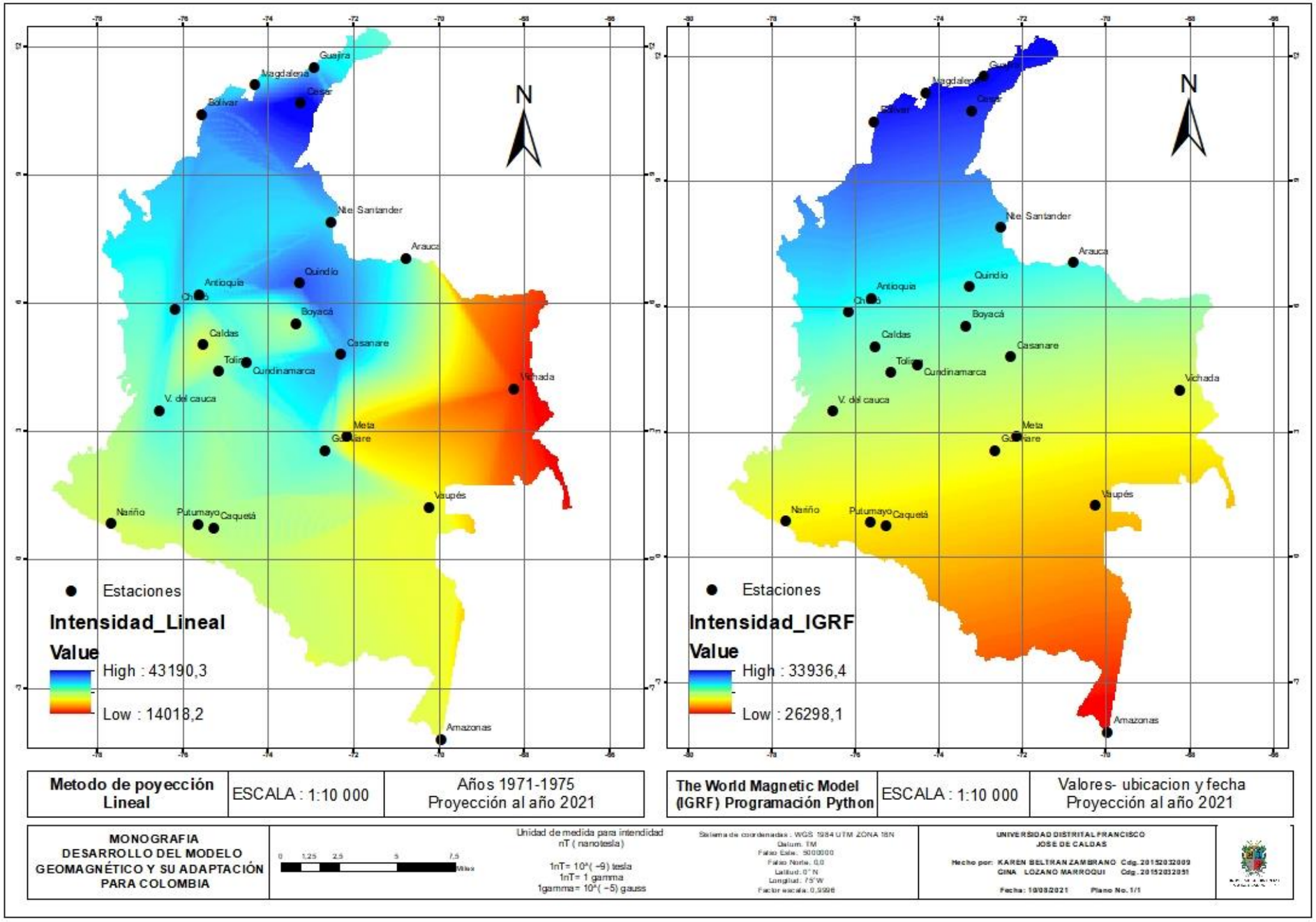
6.2. Anexo 2

METODO LINEAL																
Departamento	año	Intensidad total (nT)	año	Intensidad total (nT)	Ka	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	PROMEDIO
Amazonas	1971	30156.217	1975	29516.161	-160.014	28716.091	27916.021	27115.951	26315.881	25515.811	24715.741	23915.671	23115.601	22315.531	21515.461	25115.776
Antioquia	1971	35681.733	1975	35338.757	-85.744	34910.037	34481.317	34052.597	33623.877	33195.157	32766.437	32337.717	31908.997	31480.277	31051.557	32980.797
Boyacá	1971	35775.479	1975	34786.166	-247.32825	33549.52475	32312.8835	31076.24225	29839.601	28602.95975	27366.3185	26129.67725	24893.036	23656.39475	22419.7535	27984.63912
Arauca	1971	36046.005	1975	35449.584	-149.10525	34704.05775	33958.5315	33213.00525	32467.479	31721.95275	30976.4265	30230.90025	29485.374	28739.84775	27994.3215	31349.18963
Bolívar	1971	38226.071	1975	37985.153	-60.2295	37684.0055	37382.858	37081.7105	36780.563	36479.4155	36178.268	35877.1205	35575.973	35274.8255	34973.678	36328.84175
Caldas	1971	35261.487	1975	33990.244	-317.81075	32401.19025	30812.1365	29223.08275	27634.029	26044.97525	24455.9215	22866.86775	21277.814	19688.76025	18099.7065	25250.44838
Caquetá	1971	33125.651	1975	32455.921	-167.4325	31618.7585	30781.596	29944.4335	29107.271	28270.1085	27432.946	26595.7835	25758.621	24921.4585	24084.296	27851.52725
Casanare	1971	34455.859	1975	34604.303	37.111	34789.858	34975.413	35160.968	35346.523	35532.078	35717.633	35903.188	36088.743	36274.298	36459.853	35624.8555
Cesar	1971	37514.867	1975	38245.447	182.645	39158.672	40071.897	40985.122	41898.347	42811.572	43724.797	44638.022	45551.247	46464.472	47377.697	43268.1845
Chocó	1971	35525.924	1975	35287.796	-59.532	34990.136	34692.476	34394.816	34097.156	33799.496	33501.836	33204.176	32906.516	32608.856	32311.196	33650.666
Cundinamarca	1971	34825.778	1975	34444.592	-95.2965	33968.1095	33491.627	33015.1445	32538.662	32062.1795	31585.697	31109.2145	30632.732	30156.2495	29679.767	31823.93825
Guajira	1971	39229.048	1975	38481.195	-186.96325	37546.37875	36611.5625	35676.74625	34741.93	33807.11375	32872.2975	31937.48125	31002.665	30067.84875	29133.0325	33339.70563
Guaviare	1971	33329.741	1975	33091.512	-59.55725	32793.72575	32495.9395	32198.15325	31900.367	31602.58075	31304.7945	31007.00825	30709.222	30411.43575	30113.6495	31453.68763
Magdalena	1971	39063.662	1975	38286.738	-194.231	37315.583	36344.428	35373.273	34402.118	33430.963	32459.808	31488.653	30517.498	29546.343	28575.188	32945.3855
Meta	1971	34855.735	1975	33351.572	-376.04075	31471.36825	29591.1645	27710.96075	25830.757	23950.55325	22070.3495	20190.14575	18309.942	16429.73825	14549.5345	23010.45138
Nariño	1971	33446.767	1975	32555.591	-222.794	31441.621	30327.651	29213.681	28099.711	26985.741	25871.771	24757.801	23643.831	22529.861	21415.891	26428.756
Nte. Santander	1971	36478.601	1975	36128.733	-87.467	35691.398	35254.063	34816.728	34379.393	33942.058	33504.723	33067.388	32630.053	32192.718	31755.383	33723.3905
Putumayo	1971	33021.039	1975	32444.908	-144.03275	31724.74425	31004.5805	30284.41675	29564.253	28844.08925	28123.9255	27403.76175	26683.598	25963.43425	25243.2705	28484.00738
Quindío	1971	34951.197	1975	35461.921	127.681	36100.326	36738.731	37377.136	38015.541	38653.946	39292.351	39930.756	40569.161	41207.566	41845.971	38973.1485
Tolima	1971	35105.857	1975	34418.479	-171.8445	33559.2565	32700.034	31840.8115	30981.589	30122.3665	29263.144	28403.9215	27544.699	26685.4765	25826.254	29692.75525
V. del cauca	1971	34261.646	1975	33949.597	-78.01225	33559.53575	33169.4745	32779.41325	32389.352	31999.29075	31609.2295	31219.16825	30829.107	30439.04575	30048.9845	31804.26013
Vaupés	1971	33393.752	1975	32293.618	-275.0335	30918.4505	29543.283	28168.1155	26792.948	25417.7805	24042.613	22667.4455	21292.278	19917.1105	18541.943	24730.19675
Vichada	1971	35514.614	1975	32999.802	-628.703	29856.287	26712.772	23569.257	20425.742	17282.227	14138.712	10995.197	7851.682	4708.167	1564.652	15710.4695

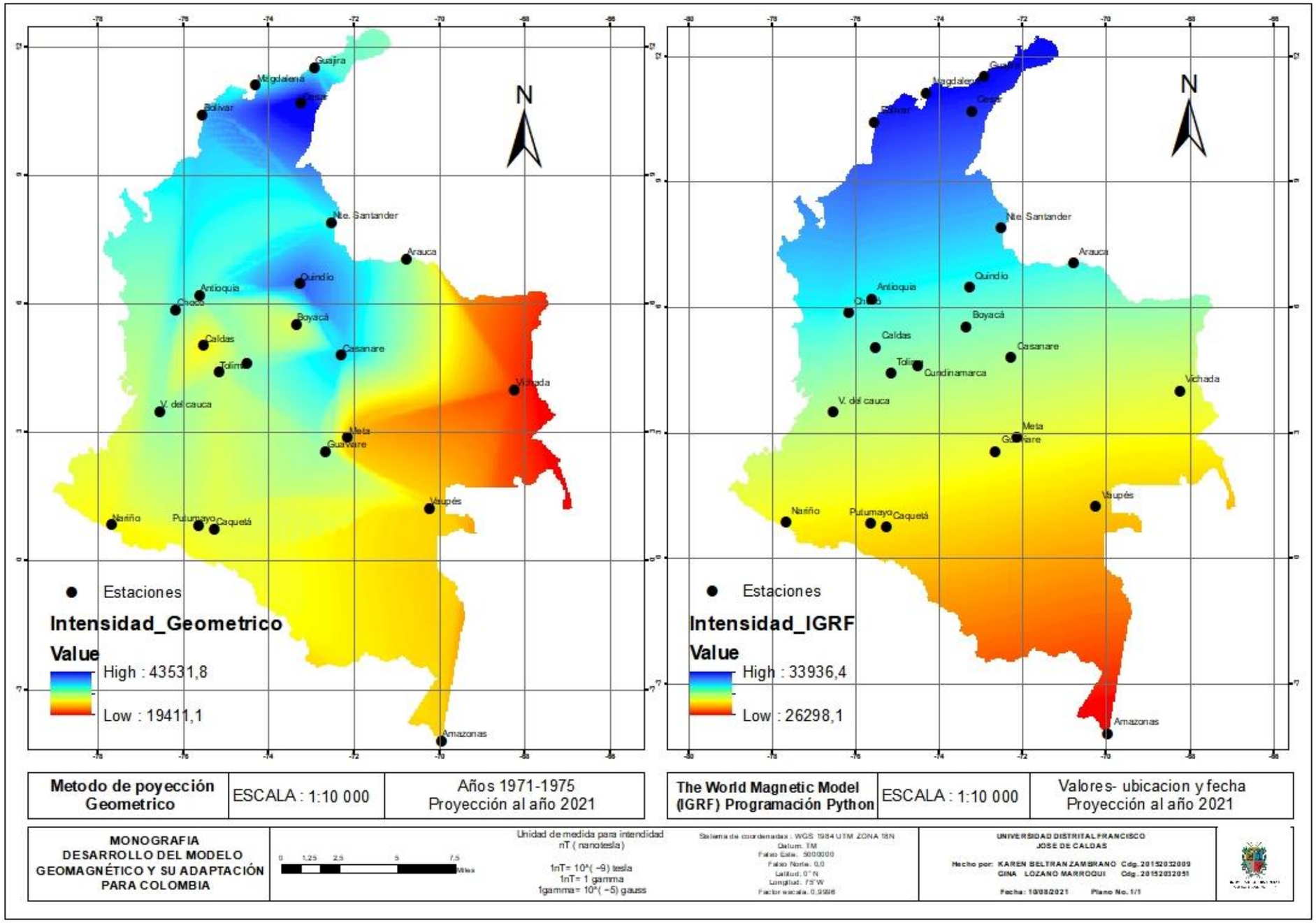
6.3. Anexo 3


Guajira
Magdalena
Cesar
Bolivar
N
Nte. Santander
Arauca
Quindio
Antioquia
Chocó
Boyacá
Caldas
Casanare
Tolima
Cundinamarca
Vichada
V. del cauca
Meta
Guaviare
Vaupés
Nariño
Putumayo
Caquetá
Amazonas
Estaciones
Intensidad_Lineal
Value
High : 43190,3
Low : 14018,2
Intensidad_Geometrica
Value
High : 43531,8
Low : 19411,1
Metodo de poyección Lineal
ESCALA : 1:10 000
Años 1971-1975
Proyección al año 2021
Metodo de poyección Geometrico
ESCALA : 1:10 000
Años 1971-1975
Proyección al año 2021
MONOGRAFIA
DESARROLLO DEL MODELO
GEOMAGNÉTICO Y SU ADAPTACIÓN
PARA COLOMBIA
Unidad de medida para intendidad
nT (nanotesla)
1nT= 10^(-9) tesla
1nT= 1 gamma
1gamma= 10^(-5) gauss
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO
JOSÉ DE CALDAS
Hecho por: KAREN BELTRAN ZAMBRANO Cdg. 20152032009
GINA LOZANO MARROQUI Cdg. 20152032051
Fecha: 10/08/2021 Plano No. 1/1

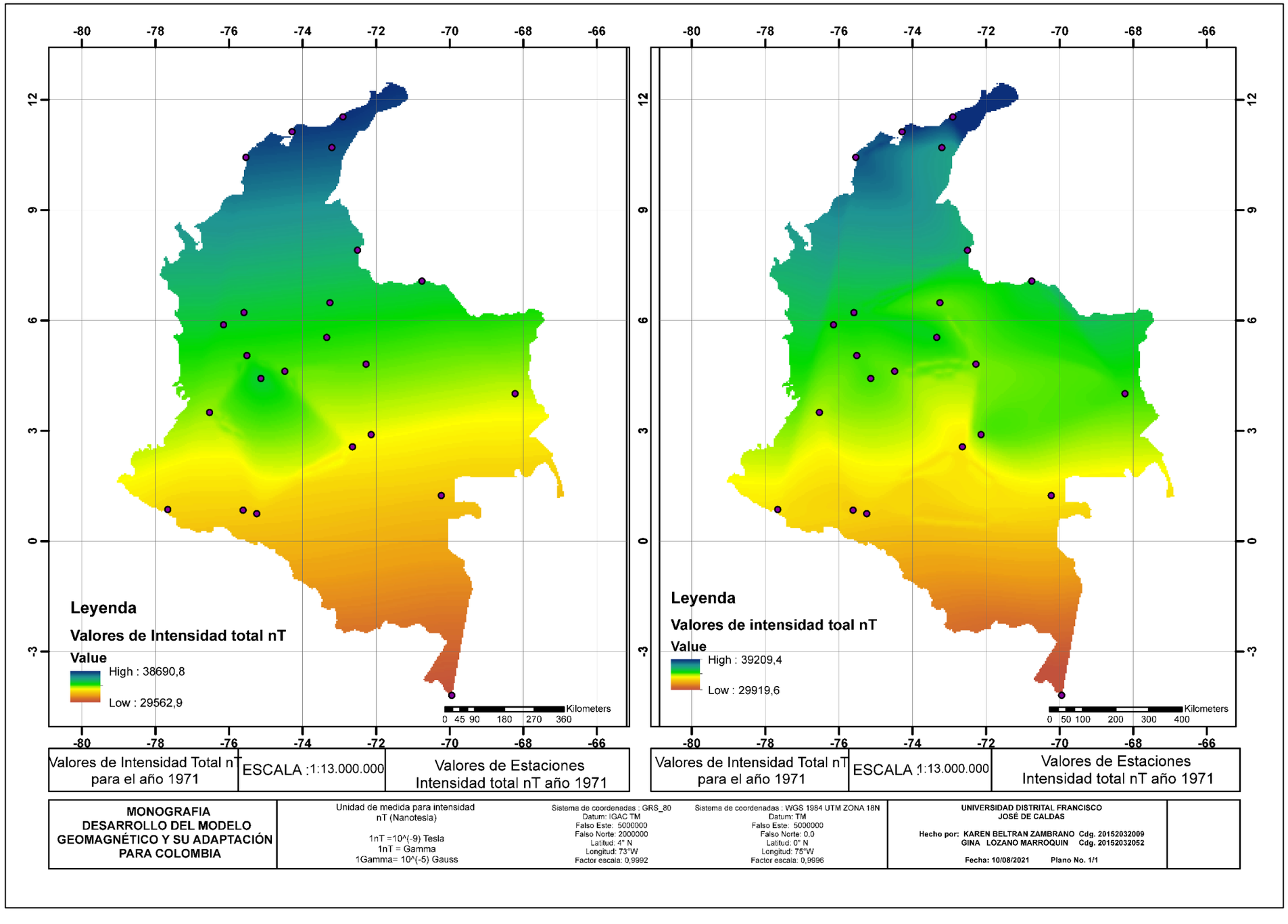
6.4. Anexo 4


Guajira
Magdalena
Cesar
Bolivar
Nte. Santander
Arauca
Quindio
Antioquia
Chocó
Boyacá
Caldas
Casanare
Tolima
Cundinamarca
Vichada
V. del cauca
Meta
Guaviare
Vaupés
Nariño
Putumayo
Caquetá
Amazonas
N
Estaciones
Intensidad_Lineal
Value
High : 43190,3
Low : 14018,2
Intensidad_IGRF
High : 33936,4
Low : 26298,1
Metodo de poyección Lineal
ESCALA : 1:10 000
Años 1971-1975
Proyección al año 2021
The World Magnetic Model (IGRF) Programación Python
ESCALA : 1:10 000
Valores- ubicacion y fecha
Proyección al año 2021
MONOGRAFIA
DESARROLLO DEL MODELO GEOMAGNÉTICO Y SU ADAPTACIÓN PARA COLOMBIA
Unidad de medida para intendidad
nT (nanotesla)
1nT= 10^(-9) tesla
1nT= 1 gamma
1gamma= 10^(-5) gauss
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Hecho por: KAREN BELTRAN ZAMBRANO Cdg. 20152032009
GINA LOZANO MARROQUI Cdg. 20152032051
Fecha: 10/08/2021 Plano No. 1/1

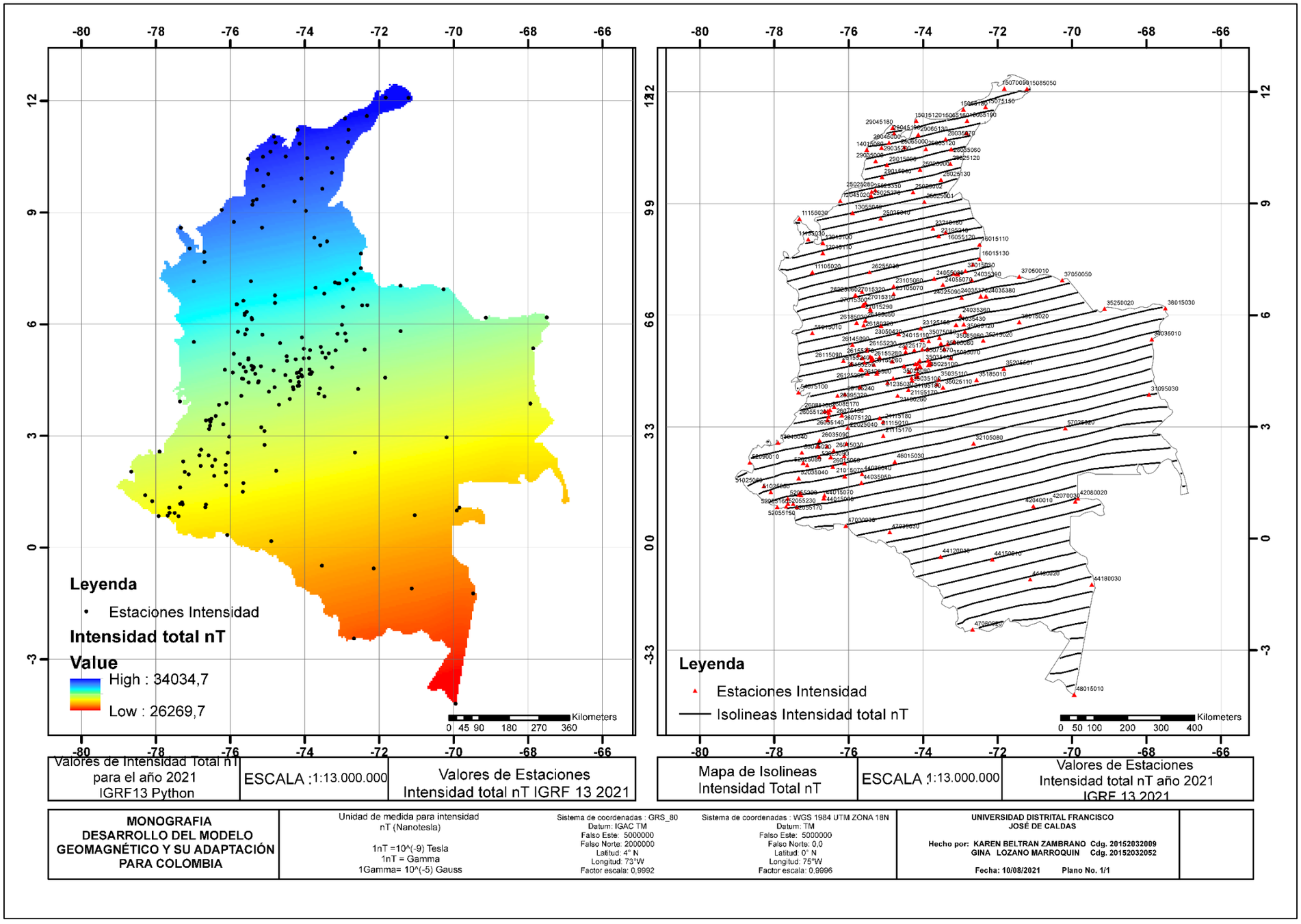
6.5. Anexo 5


Guajira
Magdalena
Cesar
Bolivar
Nte. Santander
Arauca
Quindio
Antioquia
Chocó
Boyacá
Caldas
Casanare
Tolima
Vichada
V. del cauca
Meta
Guaviare
Vaupés
Nariño
Putumayo
Caquetá
Amazonas
N
Estaciones
Intensidad_Geometrico
Value
High : 43531,8
Low : 19411,1
Cundinamarca
Intensidad_IGRF
High : 33936,4
Low : 26298,1
Metodo de poyección Geometrico
ESCALA : 1:10 000
Años 1971-1975
Proyección al año 2021
The World Magnetic Model (IGRF) Programación Python
ESCALA : 1:10 000
Valores- ubicacion y fecha
Proyección al año 2021
MONOGRAFIA
DESARROLLO DEL MODELO
GEOMAGNÉTICO Y SU ADAPTACIÓN
PARA COLOMBIA
Unidad de medida para intendidad
nT (nanotesla)
1nT= 10^(-9) tesla
1nT= 1 gamma
1gamma= 10^(-5) gauss
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO
JOSÉ DE CALDAS
Hecho por: KAREN BELTRAN ZAMBRANO Cdg. 20152032009
GINA LOZANO MARROQUI Cdg. 20152032051
Fecha: 10/08/2021 Plano No. 1/1

6.6. Anexo 6


Leyenda
Valores de Intensidad total nT
Value
High : 38690,8
Low : 29562,9
Kilometers
0 45 90 180 270 360
Valores de Intensidad Total nT para el año 1971
ESCALA :1:13.000.000
Valores de Estaciones Intensidad total nT año 1971
Leyenda
Valores de intensidad toal nT
Value
High : 39209,4
Low : 29919,6
Kilometers
0 50 100 200 300 400
Valores de Intensidad Total nT para el año 1971
ESCALA :1:13.000.000
Valores de Estaciones Intensidad total nT año 1971
MONOGRAFIA
DESARROLLO DEL MODELO GEOMAGNÉTICO Y SU ADAPTACIÓN PARA COLOMBIA
Unidad de medida para intensidad
nT (Nanotesla)
1nT =10^(-9) Tesla
1nT = Gamma
1Gamma= 10^(-5) Gauss
Sistema de coordenadas : GRS_80
Datum: IGAC TM
Falso Este: 5000000
Falso Norte: 2000000
Latitud: 4° N
Longitud: 73°W
Factor escala: 0,9992
Sistema de coordenadas : WGS 1984 UTM ZONA 18N
Datum: TM
Falso Este: 5000000
Falso Norte: 0.0
Latitud: 0° N
Longitud: 75°W
Factor escala: 0,9996
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Hecho por: KAREN BELTRAN ZAMBRANO Cdg. 20152032009
GINA LOZANO MARROQUIN Cdg. 20152032052
Fecha: 10/08/2021 Plano No. 1/1

6.7. Anexo 7


Leyenda
Estaciones Intensidad
Intensidad total nT
Value
High : 34034,7
Low : 26269,7
Kilometers
0 45 90 180 270 360
Valores de Intensidad Total nT para el año 2021 IGRF13 Python
ESCALA :1:13.000.000
Valores de Estaciones Intensidad total nT IGRF 13 2021
Leyenda
Estaciones Intensidad
Isolineas Intensidad total nT
Kilometers
0 50 100 200 300 400
Mapa de Isolineas Intensidad Total nT
ESCALA 1:13.000.000
Valores de Estaciones Intensidad total nT año 2021 IGRF 13 2021
MONOGRAFIA
DESARROLLO DEL MODELO GEOMAGNÉTICO Y SU ADAPTACIÓN PARA COLOMBIA
Unidad de medida para intensidad
nT (Nanotesla)
1nT =10^(-9) Tesla
1nT = Gamma
1Gamma= 10^(-5) Gauss
Sistema de coordenadas : GRS_80
Datum: IGAC TM
Falso Este: 5000000
Falso Norte: 2000000
Latitud: 4° N
Longitud: 73°W
Factor escala: 0,9992
Sistema de coordenadas : WGS 1984 UTM ZONA 18N
Datum: TM
Falso Este: 5000000
Falso Norte: 0,0
Latitud: 0° N
Longitud: 75°W
Factor escala: 0,9996
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Hecho por: KAREN BELTRAN ZAMBRANO Cdg. 20152032009
GINA LOZANO MARROQUIN Cdg. 20152032052
Fecha: 10/08/2021 Plano No. 1/1

7. Bibliografía

(s.f.).

Alken, P. T. (11 de 02 de 2021). *International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation*. Obtenido de https://www.springeropen.com/: https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-020-01288-x

CAPITULO 5, C. D. (s.f.). *Capítulo 5. CONVERSIÓN DE*. Obtenido de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12130/fichero/Cap%C3%ADtulo+5.pdf

España, H. R.-N. (26 de 05 de 2020). *www.nationalgeographic.com.es*. Obtenido de www.nationalgeographic.com.es: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/campo-magnetico-terrestre-se-esta-debilitando-gradualmente_15557

IDEAM - instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios ambientales. (27 de 08 de 2014). *www.ideam.gov.co/*. Obtenido de ideam: http://www.ideam.gov.co/capas-geo

Instiuto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (03 de 10 de 2020). *www.igac.gov.co*. Obtenido de http://www.igac.gov.co/

J.M.Torta. (Noviembre de 2003). *Temas de fisica.* Obtenido de Una visión sobre el estado actual de invesigacion en Geomagnetismo : https://digital.csic.es/bitstream/10261/13096/1/REF_Vision_geomagnetismo.pdf

Limeres, C. C. (2012). *REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.* Obtenido de REGRESIÓN LINEAL SIMPLE: http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_50140116_Regr_%20simple_2011_12.pdf

MIQUEL, J. (2010). *Publicacions de l'Observatori de l'Ebre.* Obtenido de Publicacions de l'Observatori de l'Ebre: http://www.obsebre.es/php/biblioteca/publicacions.php

RONALD E. WALPOLE, R. H. (2012). *Probabilidad y estadistica pata ingeniería y ciencias.* Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.

Sucesiones o Progresiones Geométricas. (s.f.). Obtenido de Sucesiones o Progresiones Geométricas: https://www.matesfacil.com/ESO/progresiones/sucesion-geometrica-formulas-ejemplos-problemas-resueltos.html

UPV. (19 de 10 de 2017). *Transformaciones estándar en Geodesia | | UPV*. Obtenido de Transformaciones estándar en Geodesia | | UPV: https://www.youtube.com/watch?v=E6nb09kQ4ZI

Valverde, I. F. (2015). *Geodesia*. Obtenido de Geodesia: https://player.slideplayer.es/14/4689854/#