

Ubicación y construcción del pilar en la Zona Especial de Desarrollo Mariel para el monitoreo del Campo Geomagnético

Omar González-Trujillo ^(1*), Zulia Bárbara Barcena-Fonseca ⁽¹⁾, María Elena Muñiz-Sánchez ⁽¹⁾, Ismael González-Metauten ⁽¹⁾, y Ernesto Alejandro Piloto-Zaldivar ⁽¹⁾

^{1*} *Instituto de Geofísica y Astronomía, la Habana, Cuba. Email: omarito@iga.cu*

Recibido: setiembre 2024	Aceptado: diciembre 2024
--------------------------	--------------------------

Resumen

La Zona Especial de Desarrollo Mariel (ZEDM) concede una gran importancia para nuestro país; el alto impacto al medioambiente, como las necesidades operacionales que necesita el puerto: comunicaciones, orientación, calibraciones de equipos de posicionamiento y otros, propician la necesidad de monitorear el área para así disminuir el impacto ante alguna eventualidad tanto natural como tecnológica. El Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) se inserta dentro de los trabajos de monitoreo del área como parte de un Servicio Científico Técnico (SCT) estatal. Se realizó un estudio y un levantamiento geomagnético de la zona de interés para determinar dónde se realizaría la construcción del pilar para el monitoreo del campo geomagnético. Como resultado se muestra la ubicación y el pilar construido con todas las normas y requerimientos para que el posterior monitoreo geomagnético tenga el mínimo margen de error; así como registros de levantamientos realizados in situ.

Palabras claves: campo geomagnético, ionosfera, monitoreo, pilar, Zona Especial de Desarrollo Mariel.

Location and construction of the pillar in the Mariel Special Development Zone for monitoring the Magnetic Field

Abstract

The Mariel Special Development Zone (ZEDM) attaches great importance to our country; the high impact on the environment, such as the operational needs of the port: communications, orientation, calibrations of positioning equipment and others, lead to the need to monitor the area in order to reduce the impact in the event of any eventuality, both natural and technological. The Institute of Geophysics and Astronomy (IGA) is inserted into the monitoring work of the area as part of a state Scientific Technical Service (SCT). A study and a geomagnetic survey of the area of interest were carried out to determine where the construction of the pillar and monitoring of the geomagnetic field would take place. As a result, the location and the pillar built with all the standards and requirements are shown so that the subsequent geomagnetic monitoring has the minimum margin of error; as well as records of surveys carried out in situ.

Key words: geomagnetic field, ionosphere, monitoring, pillar, Mariel Space Development Zone.

1. Introducción

El Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) se plantea como misión ejecutar y coordinar investigaciones y servicios de calidad de carácter Geofísico, Astronómico y Geólogo-Ambiental en interés del desarrollo socio-económico, científico y cultural del país. Una de las principales líneas de investigación es el monitoreo del estado de la ionosfera y el campo geomagnético para emitir alertas que pueden ayudar a una mejor comunicación por onda corta.

La ionosfera se define como la región de la atmósfera en la que la cantidad de iones y electrones libres es suficiente como para afectar la propagación de ondas de radio (Rishbeth and Garriott, 1969; Schunk and Nagy, 2009). Las partículas cargadas son, en su mayoría el resultado de la interacción de la radiación solar con la atmósfera neutra que hace que algunos átomos y moléculas sean disociados en pares ion-electrón. La ionosfera se extiende desde los 50 km aproximadamente, hasta un límite superior que en general se considera entre los 600 y 1000 km, donde finaliza la termosfera y comienza la exosfera. (Valentín, 2016)

El campo magnético de la Tierra, o campo geomagnético, data de $\sim 3.7 \times 10^9$ años, su valor en la componente total en la actualidad es de ~ 60000 nT en los polos magnéticos, y ~ 25000 en el Ecuador, y ha variado en el tiempo entre el valor actual y ~ 0.20 veces el valor del mismo. Este campo presenta variaciones en diversas escalas de tiempo, desde millones de años a segundos. Entre las variaciones de largo plazo, el cambio más drástico se produce durante la transición de polaridad, que es el período durante el cual se invierten los polos magnéticos. (Valentín, 2016)

En los últimos años ha ganado mucho interés las investigaciones sobre posibles impactos de variaciones geomagnéticas sobre el sistema terrestre y también sobre la biosfera. En particular, estas variaciones afectan directamente características de la magnetosfera terrestre y de la ionosfera. (Valentín, 2016)

La Zona Especial de Desarrollo (ZED) Mariel es la primera zona de su tipo en Cuba y goza de una posición geográfica privilegiada, en el centro del mar Caribe, en el cruce de las principales rutas del tráfico marítimo de mercancías en el hemisferio. Es un área del territorio nacional, ubicada en el norte de la provincia de Artemisa, a 45 km al oeste de la Habana, regulada por regímenes y política especiales, diseñada para atraer inversiones en la producción de bienes y servicios de valor agregado, utilizando el conocimiento y la innovación, así como tecnologías limpias, generando a su vez concentración industrial para la sustitución de importaciones, el fomento de las exportaciones y la generación de nuevas fuentes de empleo. (ZED Mariel, 2017)

Debido a la gran importancia que le concede nuestro estado a la ZED Mariel y por los impactos tanto al medioambiente, como a las necesidades operacionales que necesita el puerto: comunicación, orientación, calibraciones de equipos de posicionamiento, entre otros, IGA se inserta dentro de los trabajos de monitoreo del área como parte de un Servicio Científico Técnico (SCT) estatal.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la ubicación más adecuada para la construcción de un pilar destinado al monitoreo del campo geomagnético. Para ello, se seguirán varias etapas fundamentales las cuales incluyen la selección del sitio donde se llevará a cabo un análisis exhaustivo para identificar que cumpla con las condiciones y requerimientos técnicos indispensables (selección de un terreno que minimice las interferencias electromagnéticas, un área que proporcione una base estable y uniforme para la construcción, consideración de la variaciones climáticas que puedan afectar la estabilidad y la operación del pilar, usos de materiales que aseguren la durabilidad y estabilidad del pilar). Esta etapa incluye la evaluación de factores geográficos, ambientales y estructurales para asegurar la idoneidad del sitio; evaluación y análisis de las componentes donde una vez seleccionada el área adecuada, se procederá a evaluar y analizar detalladamente todos los componentes necesarios para el montaje del pilar, esto comprende una revisión minuciosa de los materiales y recursos a emplear, garantizando su calidad y conformidad con las especificaciones técnicas. Una vez seleccionada la ubicación y evaluados los componentes, se iniciará la construcción del pilar. Este proceso se realizará conforme a los más altos estándares técnicos y de ingeniería, asegurando la estabilidad y precisión del pilar construido.

El principal resultado esperado de este trabajo es la fabricación del pilar en la zona que mejor cumpla con las condiciones técnicas, permitiendo realizar un monitoreo preciso del campo geomagnético. Esto asegurará un mínimo margen de error en los estudios realizados, contribuyendo así al avance del conocimiento en este campo de investigación.

2. Materiales y métodos

2.1. Fuentes de información

En septiembre de 2013 fue creada la ZED Mariel la cual se localiza al oeste de la ciudad de La Habana, a una distancia de 45 km de esta y con una extensión de 465.4 km² (figura 1). La zona cuenta con condiciones logísticas y de ubicación muy favorables ya que está diseñada para fomentar el desarrollo sostenible además de ser un lugar atractivo para las inversiones y el desarrollo de actividades comerciales.



Figura 1: Ubicación de la Zona Especial del Mariel

Fuente: Caribbean Professional Services Ltd. / Oficina de la ZED Mariel
(<http://www.cubadebate.cu/noticias/2015/09/30/mariel-umbral-del-futuro/>)

Para la realización de este estudio se nos entregó el plan de desarrollo del sector A (figura 2) y se determinaron cuáles serían las zonas de interés, siendo estas las zonas A3, A4 y A7. En el año 2016 se realizaron varias mediciones de los parámetros geomagnéticos en estas zonas antes mencionadas, donde se determinó que el gradiente geomagnético era muy grande. Las mediciones antes mencionadas se realizaron con el Magnetómetro Geometrics 826, dispositivo avanzado que mide las variaciones en el campo magnético terrestre, y el GPS Garmin serie GPSMAP 62 es un receptor de GPS de alta precisión que facilita la geolocalización exacta durante las mediciones.

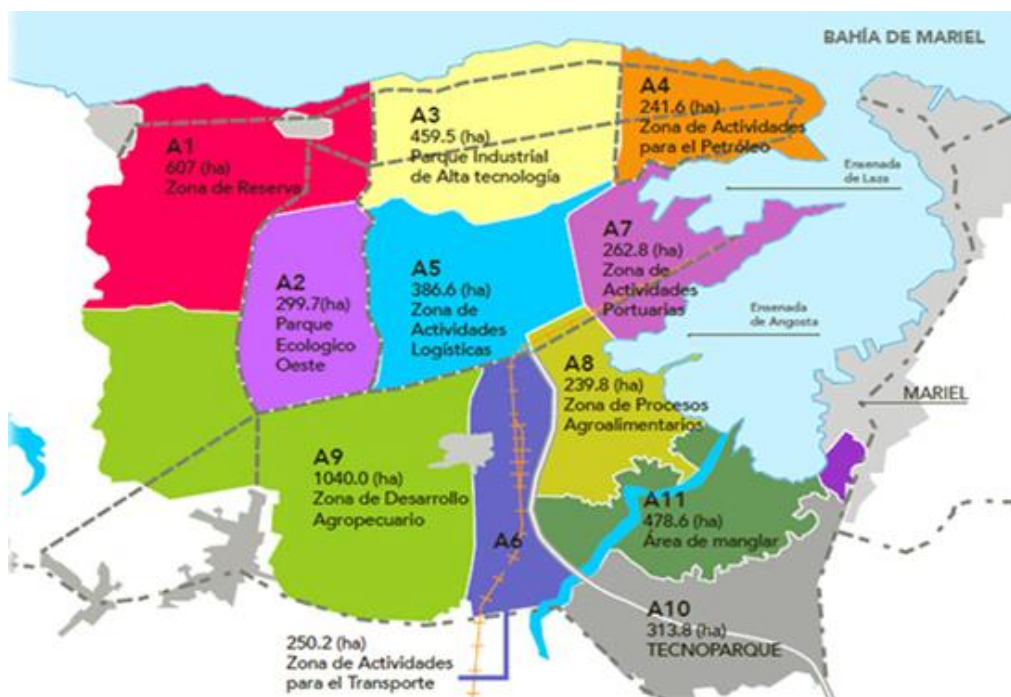


Figura 2: Sector A y su distribución por zonas de las ZED Mariel
Fuente: Caribbean Professional Services Ltd. / Oficina ZED Mariel
 (<http://www.cubadebate.cu/noticias/2015/09/30/mariel-umbral-del-futuro/>)

Conjunto al análisis antes mencionado también se propuso localizar un área que no sufra modificaciones ya que hay que tener en cuenta las condiciones de durabilidad en el tiempo de ese punto, teniendo como limitante que desconocíamos el plan de desarrollo en cuanto a construcciones de edificaciones y departamentos de la zona. Para esto se determinó realizar un estudio del comportamiento del campo geomagnético en la misma zona donde se instalaría la estación meteorológica [figura 3(A,B,C,D,E,F)], debido a que este lugar será un punto de observación permanente de las distintas variables meteorológicas y por ende se pudiera ubicar también el pilar nuestro, pues cumple en principio con las condiciones de estabilidad y permanencia en el tiempo que se necesitan debido a que además contará con un nivel de seguridad y vigilancia.

Para esto se realizaron varias mediciones preliminares del campo geomagnético en dicha área, debido a que la zona debe ser limpiada de las malezas, no obstante, las comprobaciones realizadas en el borde externo del área de la zona muestran un comportamiento del gradiente geomagnético favorable.



Figura 3: Zona de interés y el estado durante los años 2017(A y B), 2018 (C y D) y 2019 (E y F, además de señalar las tomas de agua de la instalación de la estación meteorológica).

Fuente: Imágenes tomadas por los autores.

En abril del 2022, ya una vez acomodada la zona anterior y construida la estación meteorológica, se decidió realizar mediciones del campo geomagnético en el área de interés (levantamiento en la cuadrícula 10 x 10 metros) para determinar el comportamiento del gradiente geomagnético en la zona con coordenadas Lat: 23°.016 N y Long: 82°.7724 W y determinar si el área cumple con los requerimientos que establece la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (figura 4).



Figura 4: Levantamiento geomagnético en la zona de interés.

Fuente: Imágenes tomadas por los autores

3. Resultados

3.1. Procesamiento y análisis de los datos

Para las mediciones se utilizó el Magnetómetro GEM Systems GSM-19T (magnetómetro de precesión de protones avanzado y robusto) y el GPS Garmin serie GPSMAP 62, estas se realizaron cada 1m en dirección N-S y E-W a partir del centro, a dos alturas 1m y 2m para poder calcular el gradiente vertical. Para procesamiento de los datos se utilizó el software Surfer ® 17.1.288 (64-bit) Dec 11 2019 (figuras 5, 6 y 7).

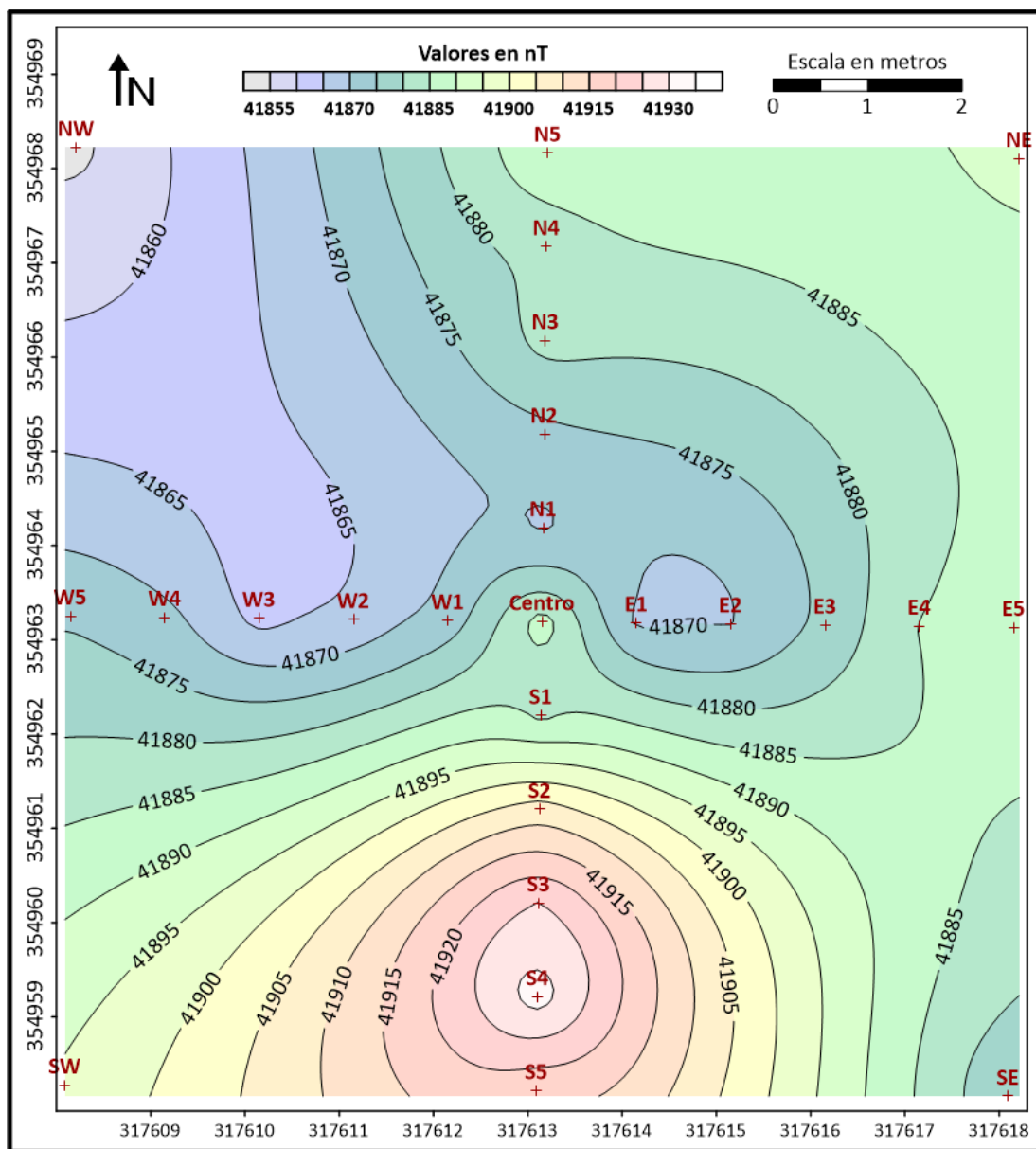


Figura 5: Mapa de la Componente Total F (nT) para 1 metro de altura.

Fuente: Elaborado por los autores.

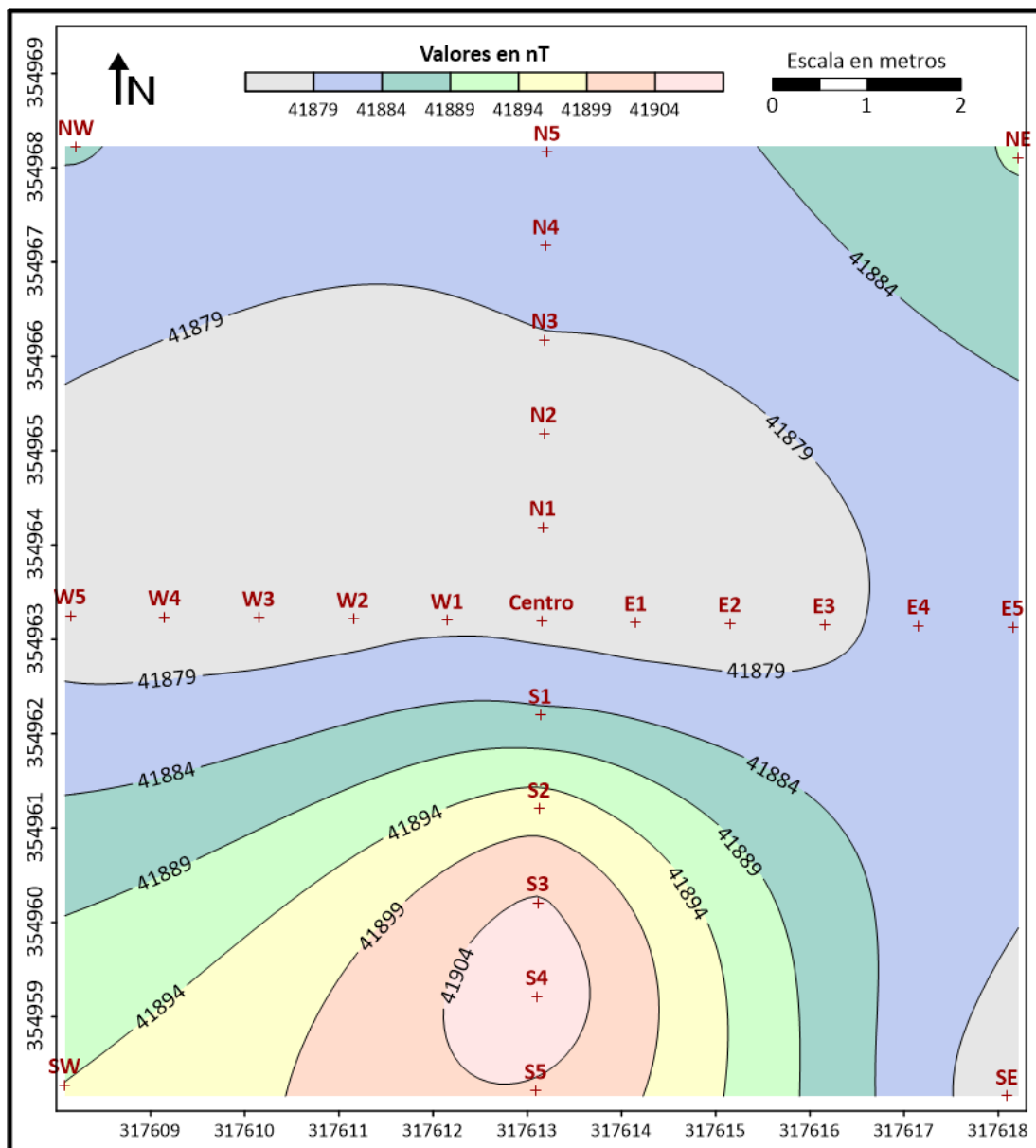


Figura 6: Mapa de la Componente Total F (nT) para 2 metros de altura.

Fuente: Elaborado por los autores.

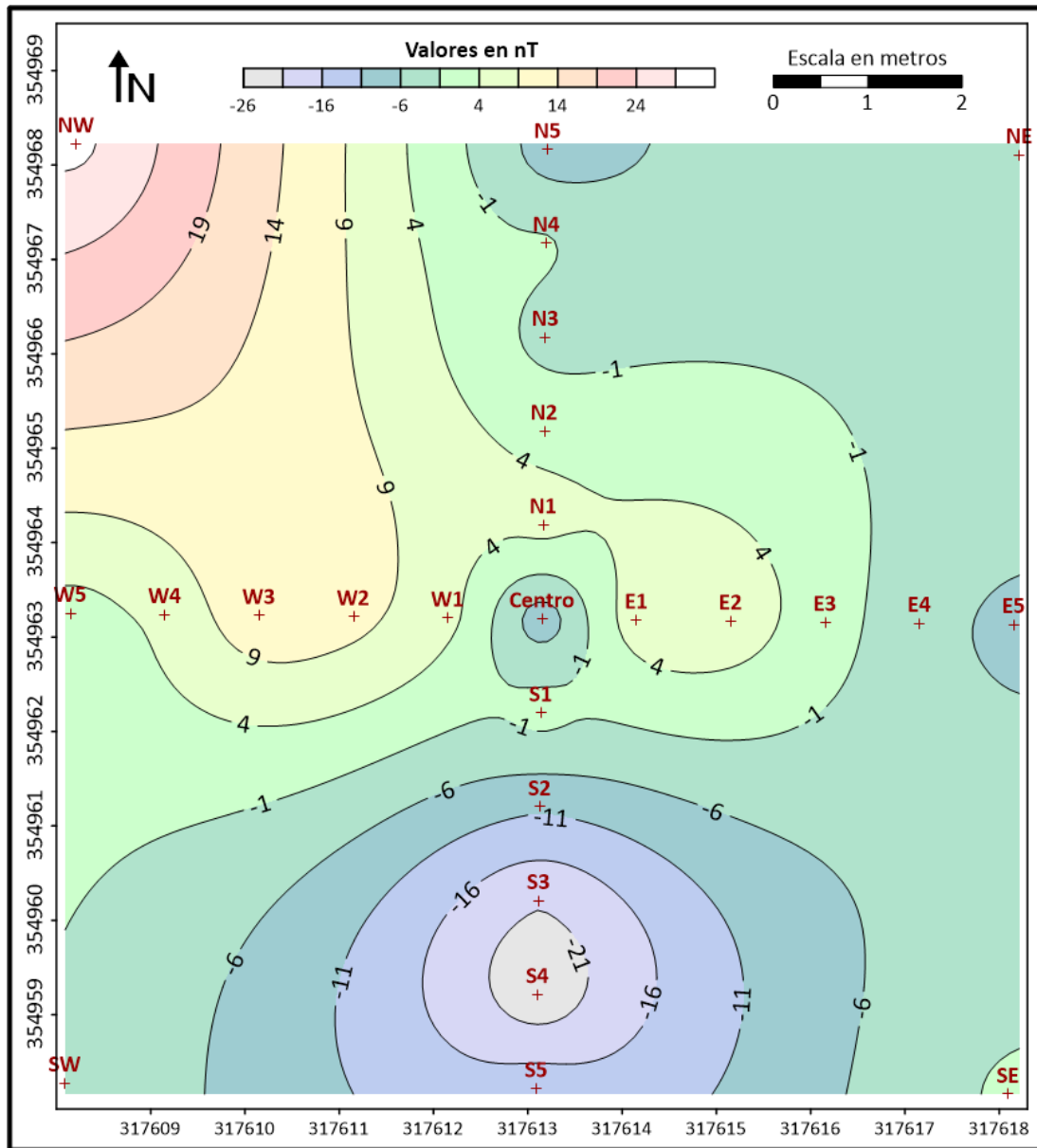


Figura 7: Mapa de Gradiente Vertical (nT) de la zona.

Fuente: Elaborado por los autores.

A partir del análisis de los resultados de los mapas obtenidos (figura 5 y 6), con respecto al Componente Total F (1 metro y 2 metros) se puede observar valores constantes de la componente total del campo geomagnético en diferentes profundidades, es decir la similitud entre ambos valores en distintas profundidades sugiere una estabilidad geomagnética del área, lo cual es favorable para obtener datos precisos. Con respecto al gradiente vertical (figura 7) los valores varían entre -26 y 30 nT, es decir la presencia de un gradiente vertical bien definido indica una clara diferenciación en las intensidades del campo magnético a diferentes alturas, lo cual es útil para el análisis detallado de las variaciones geomagnéticas. La ausencia de anomalías significativas o grandes variaciones abruptas en los valores presentados sugiere que el área no está sujeta a interferencias electromagnéticas externas, lo cual es crucial para la precisión de las mediciones. En resumen, el área es adecuada para la construcción del pilar debido a su estabilidad geomagnética, la constancia de los valores en diferentes profundidades, la definición del gradiente vertical y la ausencia de

interferencias significativas hacen que estas condiciones garanticen que las mediciones ulteriormente en este sitio sean precisas y fiables.

3.2 Construcción del Pilar

Definida el área para la construcción (figura 8) se pasa a los requerimientos técnicos que establece la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA) los cuales se tienen que cumplir para el montaje de este. Se requiere que los materiales sean medidos para no estar contaminados magnéticamente, de lo contrario el gradiente va a variar y además seguir las recomendaciones para este tipo de instalación durante el proceso constructivo. El pilar debe tener 2 metros de profundidad y 1 metro de altura y además para la construcción del mismo se necesitan una serie de materiales (Tabla I):

- Cemento 350.
- Tubería de PVC.
- Arena.
- Alambrón de bronce.
- Piedra.
- Polvo piedra
- Plancha de mármol



Figura 8: Proceso constructivo del pilar.

Fuente: Imágenes tomadas por los autores.

Tabla I: Lista de materiales con sus mediciones geomagnéticas.

Material	Mediciones (nT)
Cemento P350	41.82867
	41.82867
	41.82868
	41.82857
Arena	41.82883
	41.82881
	41.82879
	41.82889
Piedra (media)	41.82852
	41.82852
	41.82852
	41.82852
Polvo piedra	41.82897
	41.82890
	41.82898
	41.82895
Tubería de PVC	41.82827
	41.82838
	41.82843
	41.82832

Posterior a la construcción del mismo se pasaron a hacer las pruebas de control, es decir, se hace varias mediciones para asegurar que funcione correctamente y que las mediciones sean precisas y fiables. La inauguración del pilar (figura 9) da inicio a un Servicio Científico Técnico (SCT) estatal y brinda nuevas oportunidades para las investigaciones futuras.



Figura 9: Inauguración del pilar para el Servicio Científico Técnico en la ZED Mariel para mediciones del campo geomagnético. **Fuente:** Imágenes tomadas por los autores.

Conclusiones

- El procesamiento de las mediciones de campo permitió determinar el área para la posterior construcción del pilar, basados en todos los requerimientos técnicos.
- Se construyó el pilar una vez seleccionado el área, cumpliendo con la evaluación y análisis de todos los componentes a utilizar en el montaje de este.

Recomendaciones

- Hacer seguimiento de las mediciones en el pilar y comparar resultados con otras estaciones.
- Reinstalación del observatorio geomagnético de Cuba con vistas a contrastar las mediciones de la estación ZED Mariel.

Referencias Bibliográficas

- Venchiarutti Valentín, J. 2016. Efecto de variaciones en el campo magnético de la Tierra sobre la región F2 de la ionosfera. Licenciatura en Física. Universidad Nacional de Tucumán.
- Rishbeth, H. and O.K. Garriott (1969), Introduction to ionospheric physics, Academic Press, New York, USA.
- Schunk, R.W. and A.F. Nagy (2009), Ionospheres. Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mielich, J. and J. Bremer (2013), Long-term trends in the ionospheric F2 region with different solar activity indices, Ann. Geophys.
- Universidad de Ciencias informáticas (UCI). 2017. ZED Mariel [En línea]. Disponible: <https://www.zedmariel.com/nosotros>.

Acerca de los autores:

Omar González Trujillo: Graduado de Ingeniero Geofísico en la Universidad Tecnológica de Habana José Antonio Echeverría (2019). Actualmente trabajando en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) donde ejerce el puesto de Especialista en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y posterior fue ascendido a jefe del Departamento de Geofísica Espacial. Con 6 años de experiencia laboral. Además, ha participado en eventos nacionales e internacionales relacionados con temas de su especialidad. ORCID: 0000-0001-8811-1394.

Zulia Bárbara Bárcena Fonseca: Graduada en Educación en la especialidad Economía (1993). Se incorporó a trabajar en el Instituto de Geofísica y Astronomía en el año 2003 y pasó a ser subdirectora científica en el año 2014. En el año 2023 asumió el cargo de directora hasta el momento. Ha trabajado en diversos proyectos científicos además de dirigir y supervisar muchos de ellos, tiene gran conocimiento en las áreas de las Geociencias, Astronomía y Geofísica Espacial. Ha participado en eventos nacionales e internacionales relacionados con temas de su especialidad y del instituto. ORCID: 0000-0002-2029-2133.

María Elena Muñiz Sánchez: Especialista en Geomagnetismo (específicamente en observatorios geomagnéticos y levantamientos de campo) además en geofísica espacial. Más de 45 años de experiencia en la temática brindando asesorías tanto en Cuba como en el extranjero, así como participando como ponente en múltiples eventos nacionales e internacionales. Posee más de 30 publicaciones como autora principal o coautora. ORCID: 0009-0005-7922-9362.

Ismael González Metauten: Ingeniero Geofísico, Especialista en levantamientos aero geofísicos y marinos, geología y geofísica regional. así como en riesgo geológico, con más de 40 años de experiencia. Ha trabajado como experto consultor en estudios de diagnóstico ambientales; en temáticas diversas. Ha participado en eventos nacionales e internacionales como autor principal y coautor. ORCID: 0009-0007-6016-3839.

Ernesto Alejandro Piloto-Zaldívar: Graduado de Ingeniero Geofísico en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (2022). Actualmente trabaja en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) donde ejerce como Adiestrado. Ha participado en eventos científicos nacionales, proyectos y servicios del instituto, así como en cursos de Astronomía. ORCID: 0000-0003-0162-7529.