

Local Geomagnetic Model for the First Magnetic Observatory of Honduras

Yvelice-Soraya Castillo-Rosales¹, Allan-Jeff Calderini-Castro¹, Daysi-Carolina Gómez-Medina¹, Misael-Arnaldo Espinal-Valladares¹, Oscar-Ronaldo García-Melgar¹, and Carmen-Gissela Díaz-Rios¹

¹National Autonomous University of Honduras

November 22, 2022

Abstract

As a preliminary step to install the First Magnetic Observatory of Honduras, the local geomagnetic components are being computed in Tegucigalpa, Honduras (TEG), for the temporal interval 2010–2013, using the Tsyganenko and Sitnov 2005 (J. Geophys. Res. 110, A03208, 2005: TS05) semi-empirical magnetospheric model. The diurnal variation of H (Sq) is obtained from the Chiripa Observatory (Costa Rica) data, using the International Quiet Days and the Normal Orthogonal Component Analysis. Pearson's correlation coefficients are calculated between the H-component computed with the TS05 model in the Tegucigalpa coordinates and the Chiripa Observatory (CRP) data. The best correlations are obtained in days with $K_p < 4$, when the Sq and the quiet daily variation are removed from the CRP-H data and the TEG-H-component respectively. Seven TS05 magnetospheric currents are obtained in order to evaluate their contribution to the Sq. Using the Normal Orthogonal Component Analysis, the Chapman-Ferraro current fits better in the 0.00–12.00 local time interval, and the Birkeland currents fit better in the 12.00–24.00 local time interval.

Local Geomagnetic Model for the First Magnetic Observatory of Honduras

Yvelice-Soraya Castillo-Rosales¹, Allan-Jeff Calderini-Castro¹, Daysi-Carolina Gómez-Medina¹, Misael-Arnaldo Espinal-Valladares¹, Oscar-Ronaldo García-Melgar¹, Carmen-Gissela Díaz-Ríos¹

¹National Autonomous University of Honduras, Department of Astronomy and Astrophysics, Tegucigalpa, Honduras.



Abstract

As a preliminary step to install the First Magnetic Observatory of Honduras, the local geomagnetic components are being computed in Tegucigalpa, Honduras, for the temporal interval 2010–2013, using the Tsyganenko and Sitnov 2005 (*J. Geophys. Res.* **110**, A03208, 2005: TS05) semi-empirical magnetospheric model. The diurnal variation of H (Sq) is obtained from the Chiripa Observatory (Costa Rica) data, using the International Quiet Days and the Normal Orthogonal Component Analysis. Pearson's correlation coefficients are being calculated between the H -component computed with the TS05 model in the Tegucigalpa coordinates and the Chiripa Observatory (CRP) data. The better correlations are obtained in days with $K_p < 4$, when the Sq and the quiet daily variation are removed from the CRP- H data and the TEG- H_{TSY} -component respectively. Seven TS05 magnetospheric currents are obtained in order to evaluate their contribution in the Sq. Using the Normal Orthogonal Component Analysis, the Chapman-Ferraro current fits better in the 0.00–12.00 local time interval, and the Birkeland currents fits better in the 12.00–24.00 local time interval.

1. Introduction

Space Weather (SWE) is about the electromagnetic perturbations and energetic particle events driven by changes in the Sun's magnetic field and solar wind (SW) and by their effects on Earth's magnetic field and upper atmosphere, that affects the Earth's space, atmosphere and surface environments (Thomson, 2012; Schrijver, 2015). SWE affects our modern way of life, some times in very dramatic ways, and its potential to impact is growing. Geomagnetic storms consist of disturbances of the magnetic field of our planet, having a minimum duration of several hours and a maximum duration of several days. The amplitudes with which storms are observed in different locations are greater the higher the latitudes and mainly affect electrical systems, satellites, high-altitude aircraft and radio communications. Magnetic observatories provide local measurements of space weather conditions and free data centres provide near-real-time magnetic data from many observatories (i.e., INTERMAGNET, World Data Centres for Geomagnetism of Kyoto and Edinburgh), valuable for analysis of global and regional space weather activity. Different products offered by them are helpful to use with models that simulate or predict impact on the environment and technologies (Thomson, 2012). We consider that since there is no magnetic observatory in Honduras and therefore data for ionospheric, magnetospheric and terrestrial core currents in Tegucigalpa, the TS05 model is suitable because it includes fundamental processes in the magnetosphere (terrestrial and satellite data) such as charge exchange, energy inputs and outputs of geomagnetic storms and thus compared with reference data from the closest magnetic observatory of the region, Chiripa.

The computing of TEG- H_{TSY} -component is the basis for the design and creation of a magnetic observatory in Honduras, to introduce and carry out future work in the fields of space weather and geophysical research and implementation.

2. Computing the TEG- H_{TSY} -component

The x -, y - and z -components of the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) were computed using the Geopack-2008 code from Nicolai Tsyganenko. The same Cartesian components were computed for the magnetosphere, using the Tsyganenko and Sitnov's TS04 code. From these components we obtained the sum of IGRF's H -component plus magnetosphere's H -component, formally named TEG- H_{TSY} . Figure 1 shows these series versus Chiripa Observatory data (CRP- H) for the time interval 2010–2013.

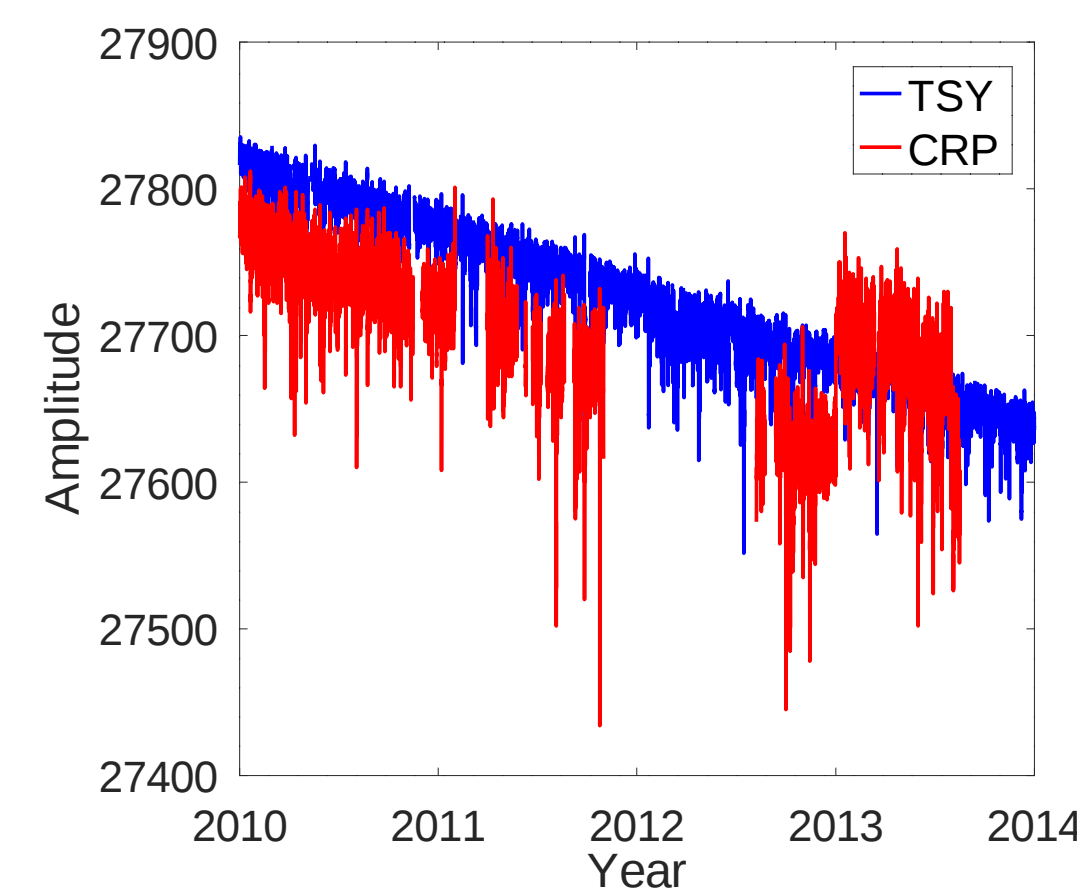


Figure 1: TEG- H_{TSY} values (blue) versus CRP- H data (red) obtained from World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh.

3. Sq Variation

The Sq variations that are measured on the Earth's surface contain both ionospheric currents and secondary currents induced inside the Earth. Several studies have shown that these Sq variations could be contaminated by the effect of various magnetospheric currents (see Yamazaki and Maute, 2017).

The Sq- H was computed in two ways: a) using the International Quietest Days (IQD) data of the CRP observatory for the 2010–2013 interval; b) applying the Singular Value Decomposition Analysis to the CRP-IQD data and selecting a model with 2 modes (Castillo et al., 2017):

$$\mathbf{Q} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \text{ where :}$$

$\mathbf{Q}$ is the data matrix of quietest days, with size 147 x 24 (the rest of quietest days were removed because contain gaps); $\mathbf{U}$ is a matrix 147 x 147,

with the normalized eigenvectors of the matrix $\mathbf{Q}\mathbf{x}\mathbf{Q}^T$; $\mathbf{V}$ is a matrix 24 x 24, with the normalized eigenvectors of the matrix $\mathbf{Q}^T\mathbf{x}\mathbf{Q}$; $\mathbf{S}$ is a matrix 147 x 24 matrix, with 24 singular values of $\mathbf{Q}$.

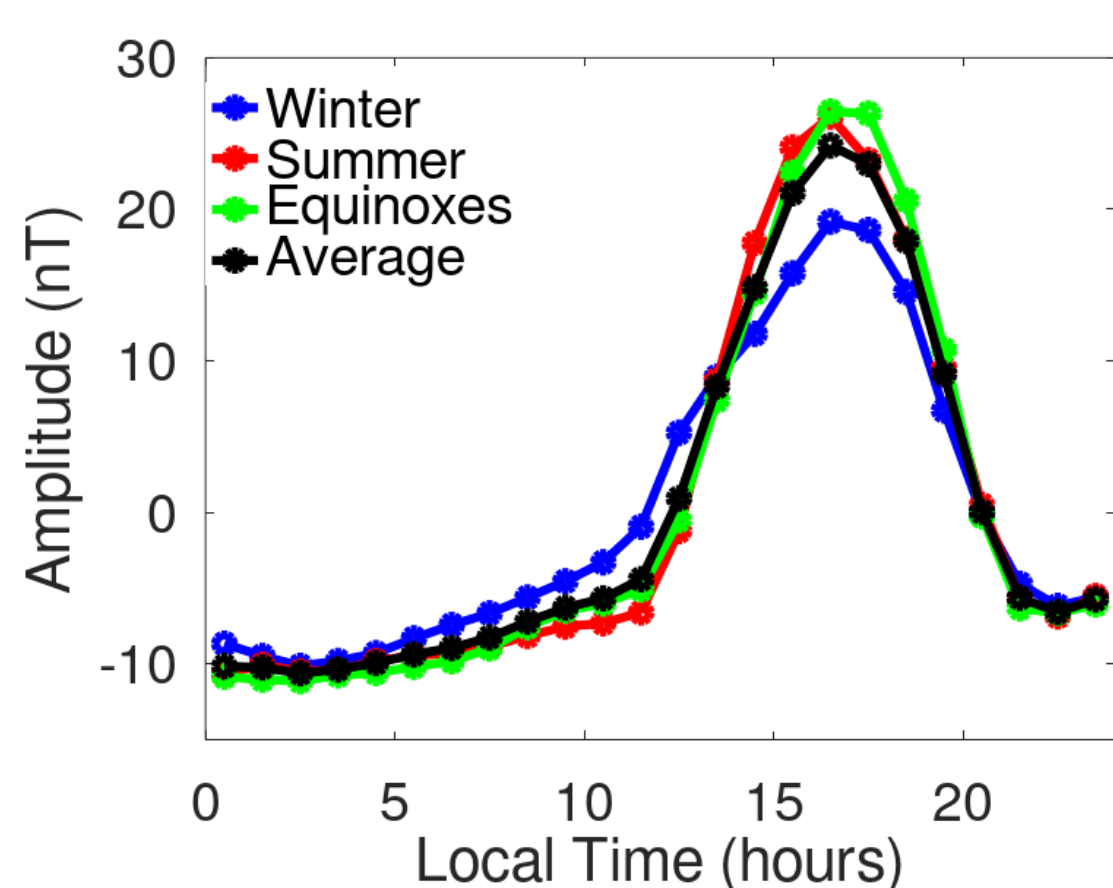


Figure 2: Lloyd's seasons plots represent the mean of the quietest days data of Chiripa in Winter, Summer, and equinoxes. Black plot is the annual average.

4. Magnetospheric Currents

The quietest-days values of the magnetospheric currents are obtained using the International Quietest Days. These values are projected into the Chiripa's Sq-model (CRP-NOC-Sq- H), in order to measure their contribution to the Sq daily variation.

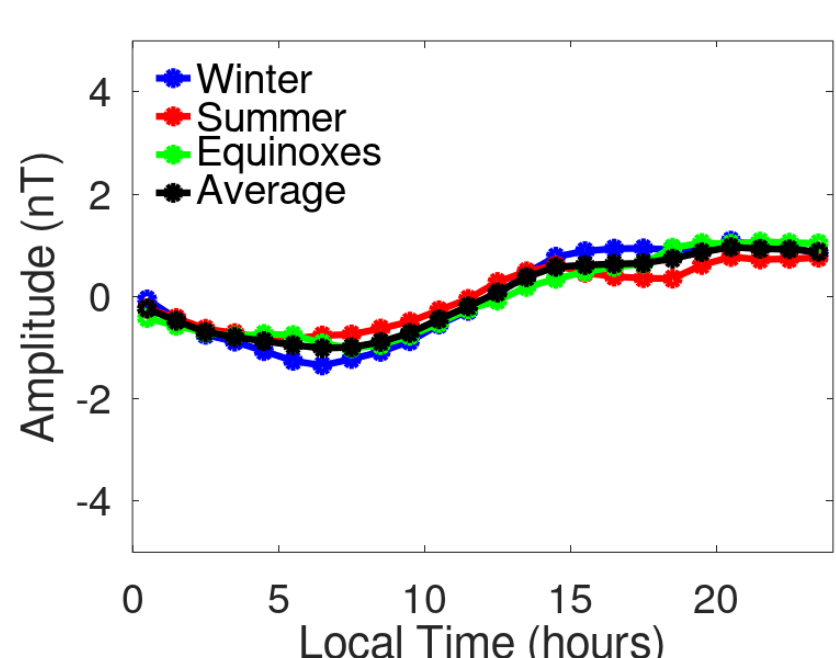


Figure 3: Chapman-Ferraro Lloyd's plot.

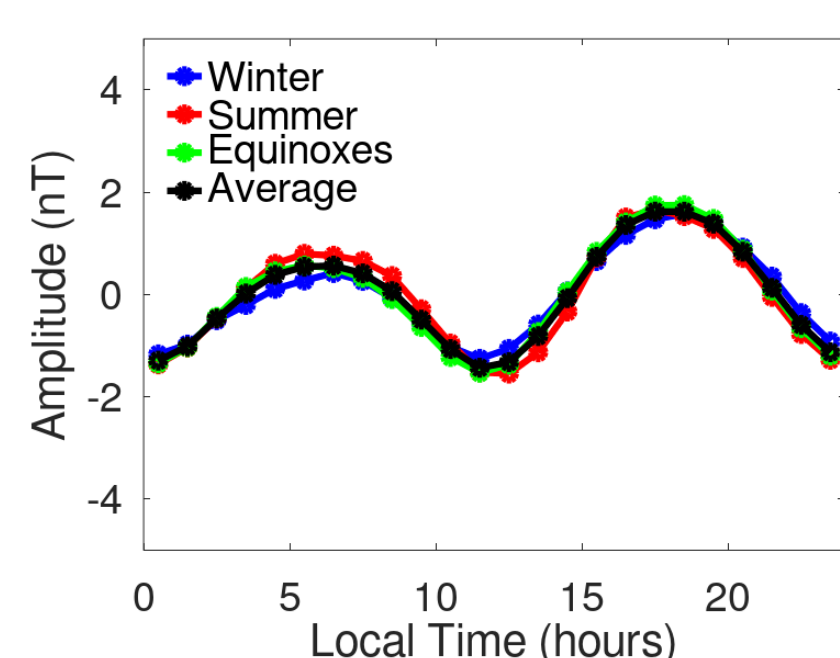


Figure 4: Birkeland Lloyd's plot.

5. Pearson's Cross-correlations

CRP- H time series were compared with the corresponding TEG- H_{TSY} using the Pearson correlation coefficients r with p-values ≤ 0.05 .

$$r(A, B) = \frac{\text{cov}(A, B)}{\sigma_A \sigma_B}$$

Where $\text{cov}(A, B)$ is the covariance between CRP- H and TEG- H_{TSY} , σ_A and σ_B are the corresponding standard deviations.

As can be seen in Figure 5, better correlations are obtained when both the Sq in CRP- H and the QDV in TEG- H_{TSY} are removed (right panel). For more details, see Castillo et al., 2017.

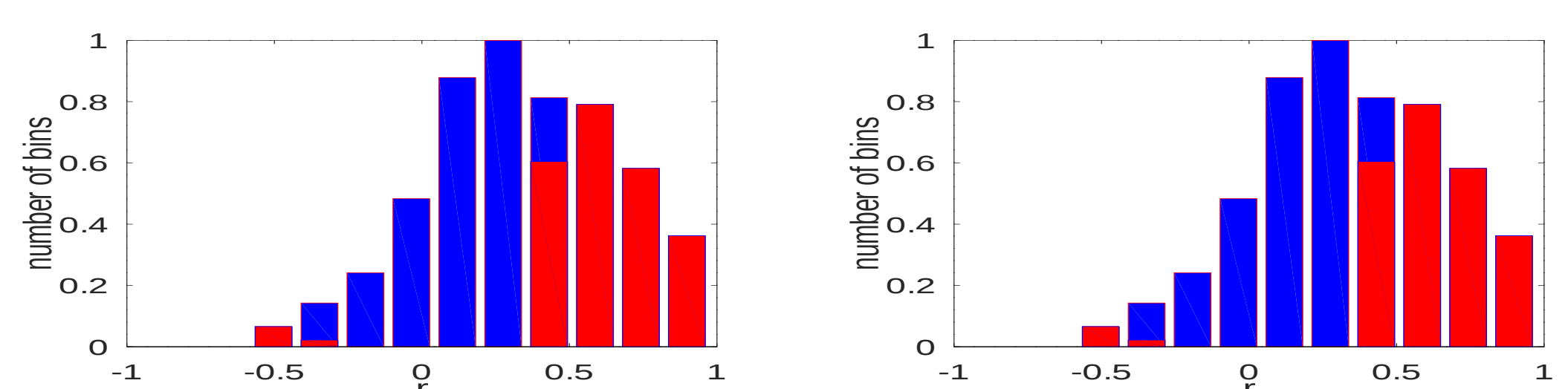


Figure 5: Left: r between CRP- H and TEG- H_{TSY} . Right: r between CRP- H -wo-Sq and TEG- H_{TSY} -wo-QD. In both, blue bars are the counts with p-value > 0.05 . Red bars are the counts for p-value ≤ 0.05 .

6. t-Welch test

The Levenberg-Marquardt algorithm was used to fit correlations to Gaussians (z-Fisher transformation). In the Welch t-test, the correlations of raw data are compared with the corrected correlations. Figure 6 shows the resulting values of the Welch t-test comparing CRP- H vs. TEG- H_{TSY} with CRP- H -wo-Sq (removing Sq signal) vs. TEG- H_{TSY} -wo-QD (removing quietest days signal) in days with $K_p < 4$ (z-Fisher mean = 0.56). For active days, when the diurnal variation is subtracted, there is not a significant change when we compare the same correlations (see Figure 7), because these are large values and just a small value of diurnal variation is subtracted (z-Fisher mean = 0.55).

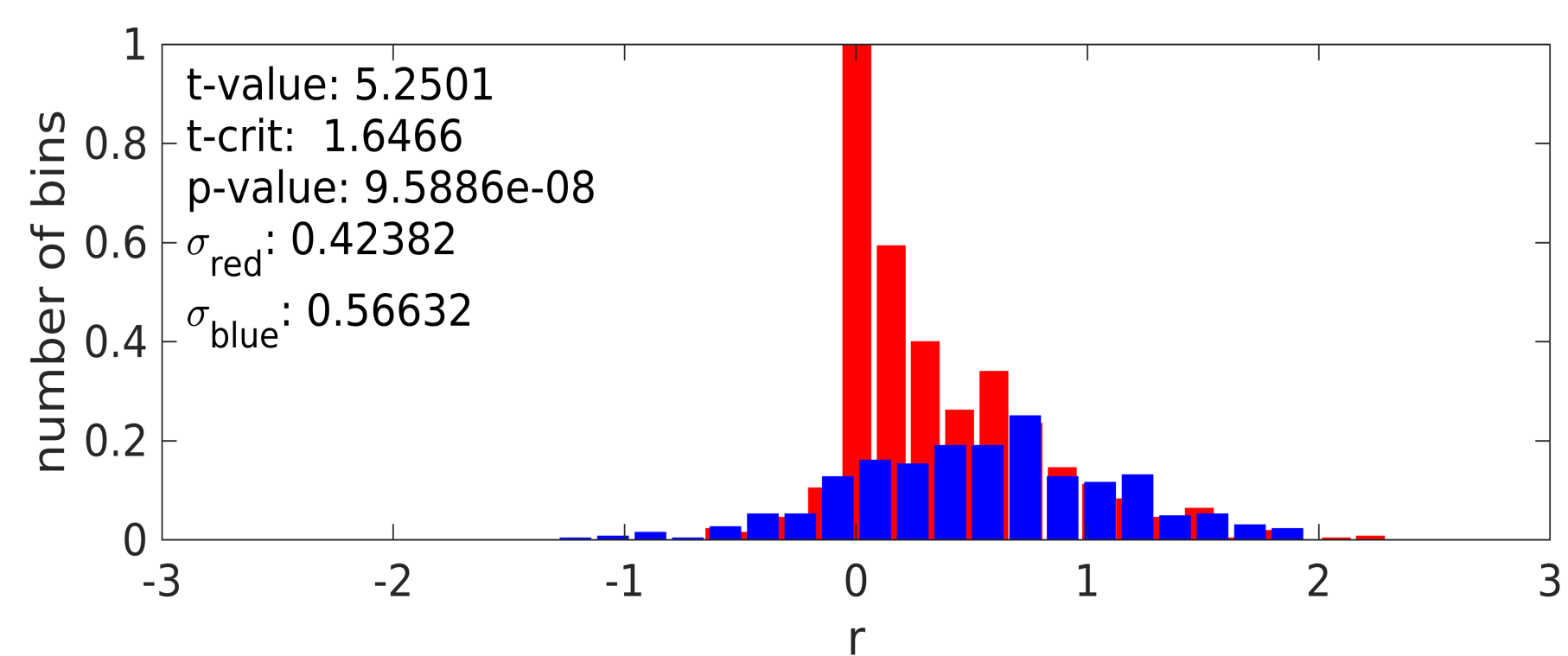
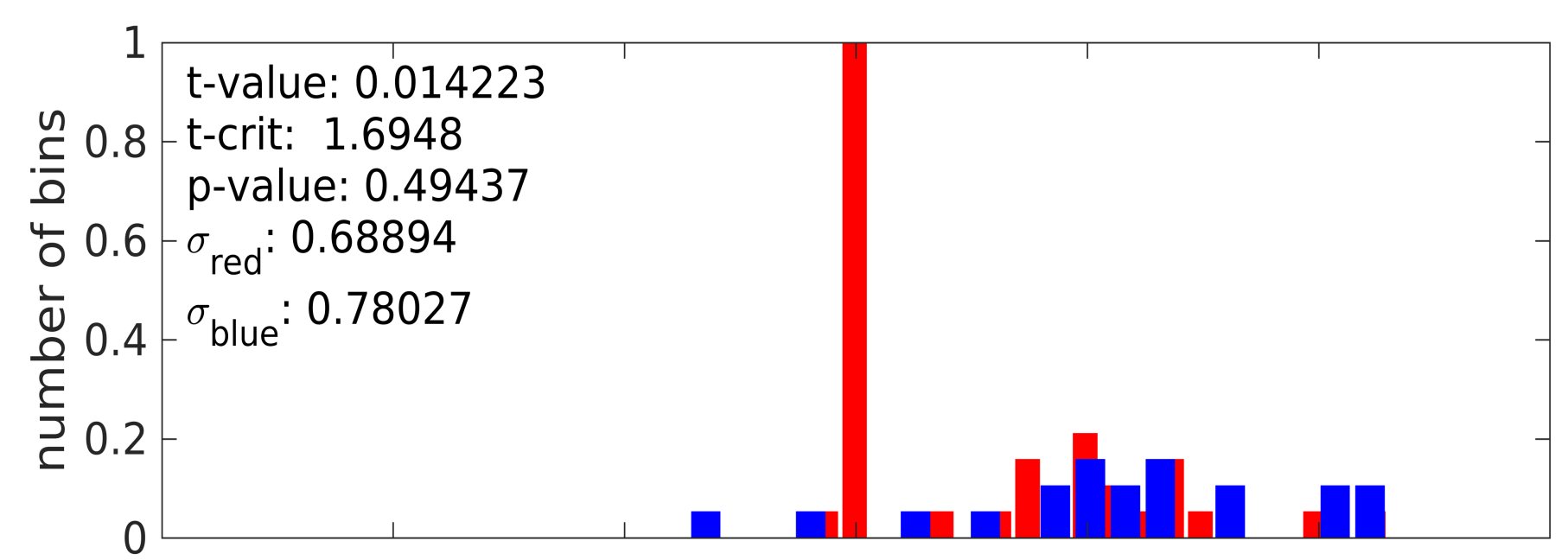


Figure 6 : t-test results between the Fisher's distribution of CRP- H versus TEG- H_{TSY} (red) and the corresponding CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QD (blue), in days with $K_p < 4$.



t-test results between the Fisher's distribution of CRP- H versus TEG- H_{TSY} (red) and the corresponding CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QD (blue), in days with $K_p \geq 4$.

7. Conclusions

- In days with $K_p < 4$ the correlations improve when the Sq and the QDV are removed from data and the model respectively. We consider that this is because TEG- H_{TSY} do not include the ionospheric neither the crustal field.
- In days with $K_p \geq 4$, the correlations do not improve when we remove the Sq neither the QDV. We conclude that this is because both the Sq and the QDV are small compared with the storm-time values.
- The projection of magnetospheric currents into the Sq model shows that Birkeland projection is the largest one in the noon-midnight local time interval and the Chapman-Ferraro projection is the largest in the midnight-noon interval, due the magnetosphere's dawn-dusk asymmetry (see Tsyganenko and Sitnov 2005 and references therein).

References

- Castillo, Y., Pais, M.A., Fernandes, J., Ribeiro, P., Morozova, A.L., Pinheiro, F.J.G., 2017. In: J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys., Vol. 165–166.
- Schrijver, C. J. (2015). In: Adv. in Space Res. 55, pp. 2745–2807.
- Thomson, A. W. P. (2012). Space weather applications of Geomagnetic Observatory Data. Cadiz, Spain: British Geological Survey.
- Tsyganenko, N. A. and Sitnov, M. I. In: JGR: Space Physics. 110, A03208, 2005.
- Yamazaki, Y. and A. Maute (2016). In: Space Sc. Rev.

Acknowledgements

We acknowledge to Christopher Turbitt (British Geological Survey, BGS) John Riddick (Intermagnet Digital Geomagnetic Observatories, INDIGO), Natalia Gomez (BGS), Jean Rasson (INDIGO), Francisco Herrera (Rector of the UNAH), Vilma Ochoa (Dean of the Faculty of Space Sciences (FACES)/UNAH), Norman Palma (Department of Astronomy and Astrophysics, FACES/UNAH); Manuel Rodríguez (Department of Earth Physics, Faculty of Sciences/UNAH); Javier Mejuto (Department of Archaeoastronomy and Cultural Astronomy/FACES/UNAH) for the valuable support they are providing to the establishment of the First Magnetic Observatory of Honduras. We also acknowledge Maria Alexandra Pais, João Fernandes and collaborators of the Centre for Earth and Space Research of the University of Coimbra (CITEUC); Esteban Hernández and collaborators of the Institute of Geophysics of UNAM; Iván Monge and collaborators of the Costa Rican Electricity Institute (ICE) and the Santa Helena Observatory, Costa Rica. Finally, we acknowledge to Nicolai Tsyganenko for making his codes available to the science community. Poster layout adapted from www.microwave.fr

THE FIRST MAGNETIC OBSERVATORY OF HONDURAS

NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF HONDURAS

Vilma Lorena Ochoa López

Yvelice Soraya Castillo

Norman Iván Palma

Manuel Rodríguez

Javier Mejuto González

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY

Christopher Turbitt



UNAH

COLLABORATORS

FROM THE NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF HONDURAS

Department of Astronomy and Astrophysics
Department of Arqueoastronomy and Cultural Astronomy
(Space Sciences College, FACES)
Department of Earth Sciences (College of Sciences)
Regional University Center of the Pacific Coast (CURLP)
Civil Engineering Laboratory (Engineering College)



UNAH

COLLABORATORS

NATIONALS AND INTERNATIONALS

British Geological Survey (BGS) – ÍNDIGO team
Geoforschungszentrum (GFZ), Postdam, Germany
Reservoir International Team II – German Cooperation and
Honduras National Electric Power Company (ENEE)
Centre for Earth and Space Research of the University of Coimbra
National Observatory of Brazil
UNAM Geophysical Institute
Costa Rican Electricity Institute (ICE)
Santa Helena Observatory, Costa Rica



UNAH

WHAT DO WE WANT?

- Capture the sources of the natural magnetic field vector at the earth's surface, free of artificial interference.
- Record a continuous, broadband, absolute, long-term time series (Turbitt, 2018).
- Publish the results FOR USE IN ACADEMIC AND COMMERCIAL ENVIRONMENTS.



UNAH

WHAT DO WE WANT?

- The records will be published in the open database of the World Data Centre for Geomagnetism Edinburgh and in INTERMAGNET, the world's largest network of magnetic observatories, giving worldwide visibility to the science of the region.
- We are looking for the data to be integrated into the International Geomagnetic Reference Field Model (IGRF).



UNAH

WHY IS A MAGNETIC OBSERVATORY IMPORTANT?

- **The data from observatories is very important to Geomagnetic research worldwide.**
- **As in south west Africa,... in Central America there are very few observatories providing data.**
- **An observatory in Honduras would greatly improve this situation and would be of great interest to the Geomagnetic Community worldwide.**



UNAH

APPLICATIONS

- **Determine the angle between magnetic North and geographic North for surveying, soil boring and other engineering applications.**
- **Evaluate the impact of geomagnetic induced currents on ENEE's main grid generators and transformers, telecommunication antennas and other technologies.**



UNAH

APPLICATIONS

- **The data can also be used for a wide range of research work in geophysics, seismic risk prevention and space weather hazards.**
- **Elaboration of magnetic maps of a country where the magnetic zero meridian passes through.**



UNAH

APPLICATIONS

- **This type of research would involve UNAH in co-operating with INTERMAGNET and other internationally based geomagnetic institutes into Main-field or Space Weather investigations which will generate papers/results which would be published in prestigious research documents.**



UNAH

POSTER PREPARED WITH THE STUDENTS OF THE RESEARCH SEMINAR OF THE BACHELOR'S DEGREE IN ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, FOR THE FALL MEETING OF THE AMERICAN GEOPHYSICAL UNION 2021.

Local Geomagnetic Model for the First Magnetic Observatory of Honduras

Yvelice-Soraya Castillo-Rosales¹, Allan-Jeff Calderini-Castro¹, Daysi-Carolina Gómez-Medina¹, Misael-Arnaldo Espinal-Valladares¹, Oscar-Ronaldo García-Melgar¹, Carmen-Gissela Díaz-Ríos¹

¹National Autonomous University of Honduras, Department of Astronomy and Astrophysics, Tegucigalpa, Honduras.



AGU FALL MEETING
New Orleans, LA & Online Everywhere
13-17 December 2021

Abstract

As a preliminary step to install the First Magnetic Observatory of Honduras, the local geomagnetic components were computed in Tegucigalpa, Honduras, for the temporal interval 2010 – 2013, using the Tsyganenko and Sitnov 2005 (*J. Geophys. Res.* **110**, A03208, 2005: TS05) semi-empirical magnetospheric model. Using the Chiripa Observatory (Costa Rica) H -component, the S_q component was obtained both using the International Quiet Days and the Normal Orthogonal Component Analysis. Pearson's correlation coefficients were calculated between the H -component computed with the TS05 model in the Tegucigalpa coordinates and the H -component of the Chiripa Observatory (CRP). The better correlations were obtained in days with $K_p < 4$, when the S_q and the quiet daily variation were removed from the CRP- H data and the TSY- H -component respectively. Seven TS05 magnetospheric currents were obtained in order to evaluate their contribution in the S_q . The Chapman-Ferraro current is the one that fits better in the 0.00 – 12.00 local time interval, and the Birkeland currents fits better in the 12.00 – 24.00 local time interval.

1. Introduction

Space Weather (SWE) is about the electromagnetic perturbations and energetic particle events driven by changes in the Sun's magnetic field and solar wind (SW) and by their effects on Earth's magnetic field and upper atmosphere, that affects the Earth's space, atmosphere and surface environments (Thomson, 2012; Schrijver, 2015). SWE affects our modern way of life, some times in very dramatic ways, and its potential to impact is growing. Geomagnetic storms consist of disturbances of the magnetic field of our planet, having a minimum duration of several hours and a maximum duration of several days. The amplitudes with which storms are observed in different locations are greater the higher the latitudes and mainly affect electrical systems, satellites, high-altitude aircraft and radio communications. Magnetic observatories provide local measurements of space weather conditions and free data centres provide near-real-time magnetic data from many observatories (i.e., INTERMAGNET, World Data Centres for Geomagnetism of Kyoto and Edinburgh), valuable for analysis of global and regional space weather activity. Different products offered by them are helpful to use with models that simulate or predict impact on the environment and technologies (Thomson, 2012). We consider that since there is no magnetic observatory in Honduras and therefore data for ionospheric, magnetospheric and terrestrial core currents in Tegucigalpa, the TS05 model is suitable because it includes fundamental processes in the magnetosphere (terrestrial and satellite data) such as charge exchange, energy inputs and outputs of geomagnetic storms and thus compared with reference data from the closest magnetic observatory of the region, Chiripa.

The computing of TEG- H_{TSY} -component is the basis for the design and creation of a magnetic observatory in Honduras, to introduce and carry out future work in the fields of space weather and geophysical research and implementation.

2. Computing the TEG- H_{TSY} -component

5. Pearson's Cross-correlations

CRP- H time series were compared with the corresponding TEG- H_{TSY} using the Pearson correlation coefficients r with p -values ≤ 0.05 .

$$r(A, B) = \frac{\text{cov}(A, B)}{\sigma_A \sigma_B}$$

Where $\text{cov}(A, B)$ is the covariance between CRP- H and TEG- H_{TSY} , σ_A and σ_B are the corresponding standard deviations. As can be seen in Figure 5, better correlations were obtained when both the S_q in CRP- H and the QDV in TEG- H_{TSY} were removed (right panel).

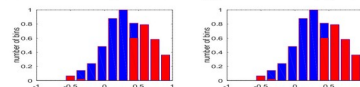


Figure 5: Left: r between CRP- H and TEG- H_{TSY} . Right: r between CRP- H -wo- S_q and TEG- H_{TSY} -wo-QD. In both, blue bars are the counts with p -value > 0.05 . Red bars are the counts for p -value ≤ 0.05 .

6. t-Welch test

The Levenberg-Marquardt algorithm was used to fit correlations to Gaussians (z-Fisher transformation). In the t-Welch test, the correlations of raw data are compared with the corrected correlations. Figure 6 shows the resulting values of the t-Welch test comparing CRP- H vs. TEG- H_{TSY} with CRP- H -wo- S_q (removing S_q signal) vs. TEG- H_{TSY} -wo-QD (removing quietest days signal) in days with $K_p < 4$ (z-Fisher mean = 0.56). For active days, when the diurnal variation is subtracted, there is not a significant change when we compare the same correlations (see Figure 7), because these are large values and just a small value of diurnal variation is subtracted (z-Fisher mean = 0.55).

2. Computing the TEG- H_{TSY} -component

The X-, Y- and Z-components of the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) were computed using the Geopack-2008 code from Nicolai Tsyganenko. The same Cartesian components were computed for the magnetosphere, using the Tsyganenko and Sitnov's TS04 code. From these components we obtained the sum of IGRF's H -component plus magnetosphere's H -component, formally named TEG- H_{TSY} . Figure 1 shows these series versus Chiripa Observatory data (CRP- H) for the time interval 2010 – 2013.

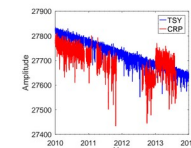


Figure 1: TEG- H_{TSY} values (blue) versus CRP- H data (red) obtained from World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh.

3. S_q Variation

The S_q variations that are measured on the Earth's surface contain both ionospheric currents and secondary currents induced inside the Earth. Several studies have shown that these S_q variations could be contaminated by the effect of various magnetospheric currents (see Yamazaki and Maute, 2017).

The S_q - H was computed in two ways: a) using the International Quietest Days (IQD) data of the CRP observatory for the 2010 – 2013 interval; b) applying the Singular Value Decomposition Analysis to the CRP-IQD data and selecting a model with 2 modes (Castillo et al, 2017):

$$Q = USV^T, \text{ where:}$$

Q is the data matrix of quietest days, with size 240×24 ; U is a matrix $240 \times$

240, with the normalized eigenvectors of the matrix $Q \times Q^T$; V is a matrix 24×24 , with the normalized eigenvectors of the matrix $Q^T \times Q$; S is a matrix 240×24 matrix, with 24 singular values of Q .

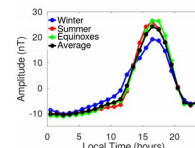


Figure 2: Lloyd's seasons plots represent the mean of the quietest days data of Chiripa in Winter (blue), Summer (red), and equinoxes (green). Black plot is the annual average.

4. Magnetospheric Currents

Seven magnetospheric currents were computed with the TS05 model, in order to measure their contribution to the S_q daily variation. Using the IQD, the corresponding quiet daily variation (QDV) were calculated for each current.

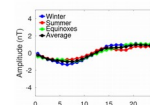


Figure 3: Chapman-Ferraro Lloyd's plot.

These quiet-days currents were projected into the NOC-Sq model of Chiripa (CRP-NOC-Sq- H). The Chapman-Ferraro current is the one that fits better with the midnight-noon QDV (Figure 3). The Birkeland currents QDV fits with the noon-midnight S_q (Figure 4).

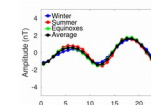


Figure 4: Birkeland Lloyd's plot.

compare the same correlations (see Figure 7), because these are large values and just a small value of diurnal variation is subtracted (z-Fisher mean = 0.55).

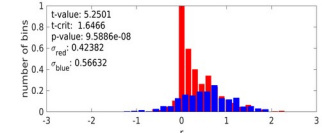
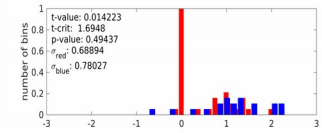


Figure 6: t-test results between the Fisher's distribution of CRP- H versus TEG- H_{TSY} (red) and the corresponding CRP- H -wo- S_q versus TEG- H_{TSY} -wo-QD (blue), in days with $K_p < 4$.



t-test results between the Fisher's distribution of CRP- H versus TEG- H_{TSY} (red) and the corresponding CRP- H -wo- S_q versus TEG- H_{TSY} -wo-QD (blue), in days with $K_p \geq 4$.

8. Conclusions

- In days with $K_p < 4$ the correlations improve when the S_q and the QDV are removed from data and the model respectively. We consider that this is because TEG- H_{TSY} do not include the ionospheric neither the crustal field.
- In days with $K_p \geq 4$, the correlations do not improve when we remove the S_q neither the QDV. We conclude that this is because both the S_q and the QDV are small compared with the storm-time values.
- The projection of magnetospheric currents into the NOC-Sq model shows that Birkeland currents are the ones that fit better in the noon-midnight time interval. Similarly, the Chapman-Ferraro currents are the ones that fit better in the midnight-noon interval (see Figures 3 and 4).

References

- Schrijver, C. J. (2015). In: Adv. in Space Res. 55, pp. 2745–2807.
- Thomson, A. W. P. (2012). Space weather applications of Geomagnetic Observatory Data. Cadiz, Spain: British Geological Survey.
- Tsyganenko, N. A. and Sitnov, M. I. In: JGR: Space Physics. 110, A03208, 2005.
- Yamazaki, Y. and A. Maute (2016). In: Space Sc. Rev.
- Castillo, Y., Pais, M.A., Fernandes, J., Ribeiro, P., Morozova, A.L., Pinheiro, F.J.G., 2017. In: J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys., Vol. 165–166.

Acknowledgements

We acknowledge to the British Geological Survey (BGS), UK, for the valuable support is providing to the establishment of First Magnetic Observatory of Honduras. We also acknowledge the collaboration of the GeoForschungsZentrum (GFZ), Germany: the Royal Observatory of Belgium; the Research Centre for Earth and Space, University of Coimbra (CITEUC); the Center National d'Etudes Spatiales, Paris; the Institute of Geophysics of UNAM, Mexico; the Costa Rican Electricity Institute (ICE); the Santa Helena Observatory, Costa Rica; the Department of Astronomy and Astrophysics of the Faculty of Space Sciences-UNAH; the Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences-UNAH; the Department of Archaeoastronomy and Cultural Astronomy, Faculty of Space Sciences-UNAH. Finally, we acknowledge Nicolai Tsyganenko for making his codes easily available to the science community.

poster layout adapted from www.microwave.fr

Aquaculture and fisheries research center

Regional University Center of the Pacific Coast

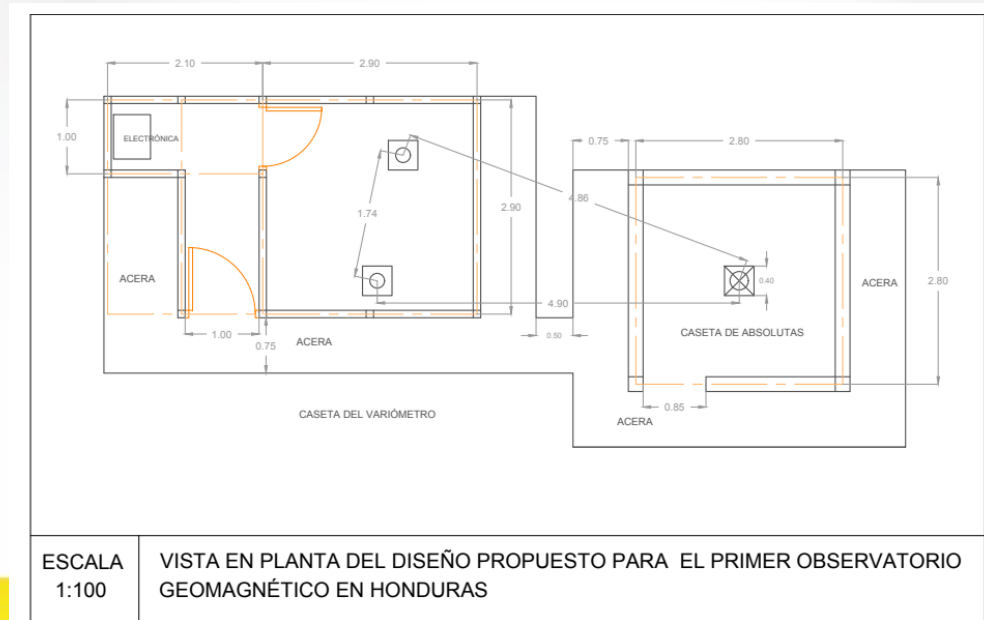


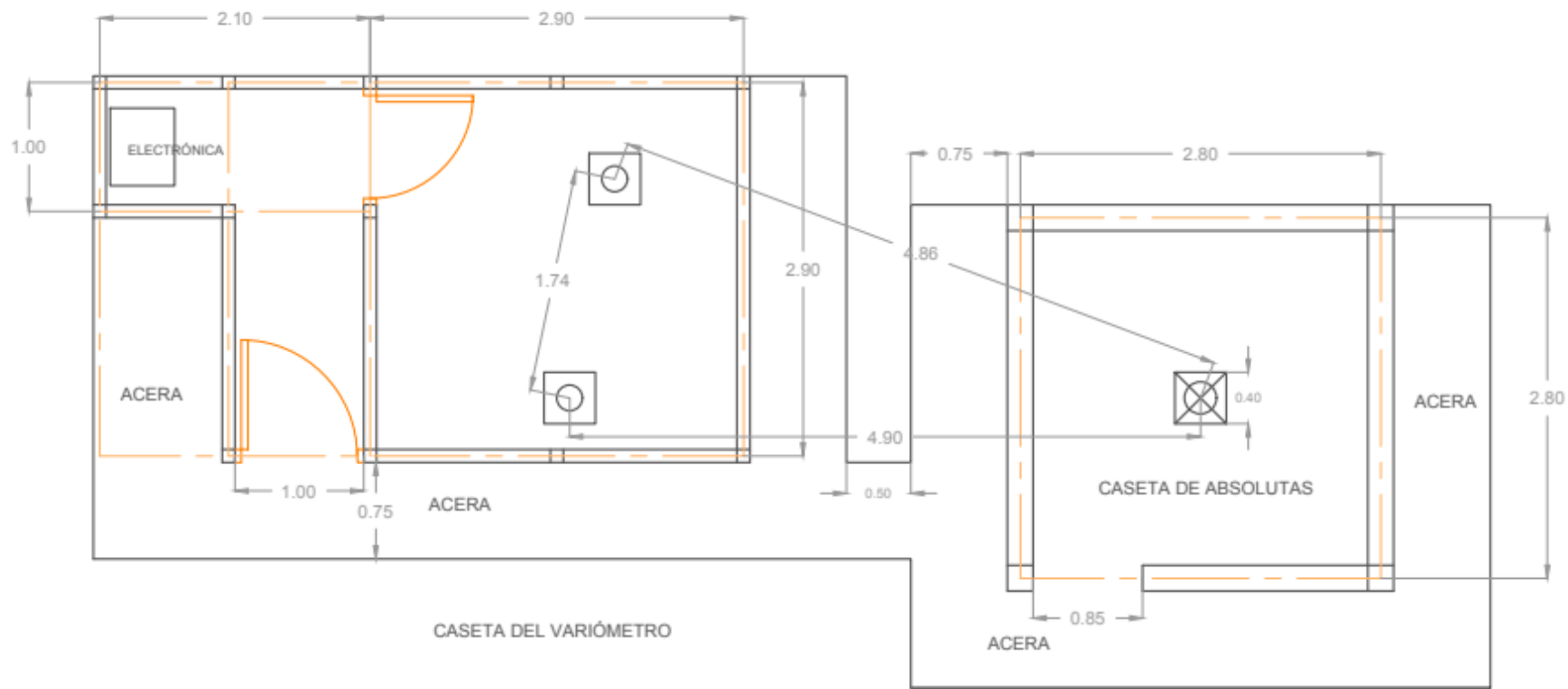
UNAH

The equipment to be donated by the British Geological Survey has a market value of

US\$ 200,000.

What we need is the funding to build two huts to house the equipment.





SCALE
1:100

PLAN VIEW OF THE PROPOSED DESIGN FOR THE FIRST
MAGNETIC OBSERVATORY OF HONDURAS

EQUIPMENT INSIDE THE 4 x 3 m HUT

- Proton magnetometer.
- Triaxial fluxgate magnetometer.
- Server.
- Raspberri Pi.



EQUIPMENT INSIDE THE 3 x 3 m HUT

Theodolite with magnetometer. Fluxgate magnetometer and theodolite on concrete pillar, isolated from the ground.



UNAH

THE INDIGO PROJECT

- **INDIGO project (Riddick et al., 2009) aims to provide the means for achieving observatories goals where there are gaps in the observatories world map, directing its efforts to Asia, Africa and Latin-America.**
- **Equipment, software, training, and data processing, when missing on site, are given to collaborators worldwide so that they might improve or start their own geomagnetic observations (Borodin et al., 2011).**



UNAH

THE INDIGO PROJECT

- **If necessary, local staff are trained in observatory operations and observing skills (we are currently hosting a tutorial with Christopher Turbitt).**
- **With the help of the INDIGO project, most common problems can be overcome.**



UNAH

REFERENCES

- **Pavel Borodin, Jorge Brenes, Elias Daudi, Noor Efendi, Simon Flower, Muhammad Hidayat, Muhammad Husni, Manuel Kampine, Oleg Kusonski, Artur Langa, Iván Monge, Antonio Mucussete, Armino Nhatsave, I Kadek Oca Santika, Jean Rasson, John Riddick, Didik Suharyadi, Christopher Turbitt, and Mahmud Yusuf. (2011). Indigo: Better Geomagnetic Observatories where We Need them. Data Science Journal, Volume 10, 30.**



UNAH

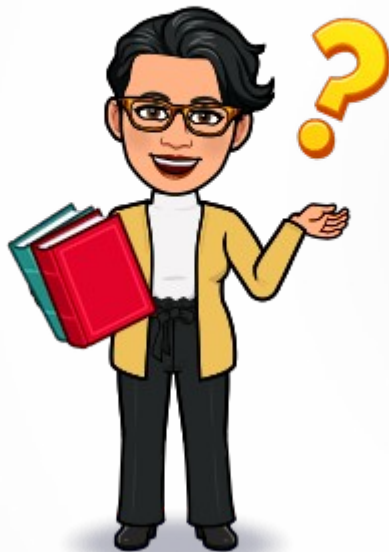
REFERENCES

- **Riddick, J., Rasson, J., Turbitt, C., & Flower, S. (2009). Indigo Digital Observatory Project, 2004 – 2008. Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009–1226, pp. 232-238.**
- **Turbitt, C., 2018. Data Processing. IAGA-Workshop 2018 Summer School. Conrad Observatory, Austria.**



UNAH

¿Alguna pregunta?



¡GRACIAS!



UNAH

Universidad Nacional Autónoma de Honduras
Facultad de Ciencias Espaciales
Departamento de Astronomía y Astrofísica
Asignatura AAF-551 Seminario de Investigación



***Cálculo de componentes locales del
campo magnético terrestre en
Honduras, empleando el modelo de
Tsyganenko y Sitnov 2005***

Propuesta de tesis elaborada por:
Allan Calderini, Carmen Díaz, Daysi Gómez,
Misael Valladares, Oscar García

Tutora: Ph.D. Yvelice Castillo

Tegucigalpa, M.D.C., 18 de agosto de 2021

A. Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a John Riddick, ideólogo del proyecto INDIGO, a Christopher Turbitt, Gerente de los Observatorios Magnéticos del Servicio Geológico Británico (BGS) y a Natalia Gómez-Pérez (BGS), por brindarnos su apoyo para la instalación y operación del Primer Observatorio Magnético de Honduras; a Martha Talavera, Jefa del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Facultad de Ciencias Espaciales de la UNAH; a Vilma Lorena Ochoa, Decana de la Facultad de Ciencias Espaciales, por su incondicional apoyo; a Manuel Rodríguez, Lidia Torres Bernhard y Elizabeth Espinoza, del Departamento de Física de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la UNAH; a Javier Mejuto, del Departamento de Arqueoastronomía y Astronomía Cultural de la Facultad de Ciencias Espaciales de la UNAH, por su valiosa participación como colaboradores de este proyecto; a Iván Monge, por su colaboración con los datos del Observatorio de Chiripa, Costa Rica.

B. Resumen

La Universidad Nacional Autónoma de Honduras y el Servicio Geológico Británico pretenden instalar un Observatorio Magnético por primera vez en Honduras, para capturar las fuentes del vector de campo magnético natural en la superficie de la Tierra, libre de interferencia artificial, grabando series de tiempo continuas, de banda ancha, absolutas y a largo plazo. Como contribución a este proyecto, proponemos una metodología para analizar los datos de este nuevo observatorio, mediante comparación con datos de observatorios cercanos y con modelos de campo magnético principal y de magnetosfera, y empleando técnicas estadísticas. Como primer paso, se computan las componentes geomagnéticas locales en Tegucigalpa, Honduras (TEG), para el intervalo temporal 2010–2013, utilizando el modelo semi-empírico de magnetosfera terrestre de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05) y el Modelo de Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF). La variación diaria en días calmos (Sq) de la componente horizontal (H -) del campo magnético local, se extrae de los datos del Observatorio Chiripa, Costa Rica, empleando los días calmos internacionales y el análisis de componentes ortogonales normales. Se calculan los coeficientes de correlación de Pearson entre la componente H - calculada con el modelo TS05 en las coordenadas de Tegucigalpa y la componente H - del Observatorio Chiripa. Las mejores correlaciones se obtienen en días con índice planetario $K_p < 4$, cuando Sq y la variación diurna son removidas de los datos CRP- H y de los valores de TEG- H , respectivamente. Las corrientes magnetosféricas calculadas para Tegucigalpa parecen contribuir significativamente al Sq local, en el intervalo de tiempo de 12,00–24,00 hora local.

Abstract

The National Autonomous University of Honduras and the British Geological Survey intend to install a Magnetic Observatory for first time in Honduras, in order to capture the sources of the natural magnetic field vector at the earth's surface, free of artificial interference, recording a continuous, broadband, absolute, long-term time series (Turbitt, 2018). As a contribution to this project, we propose a methodology to analyze this new observatory data, comparing with nearby observatories data, main field model, magnetosphere model, and using statistic techniques. As a first step, local geomagnetic components are computed in Tegucigalpa, Honduras (TEG), for the temporal interval 2010–2013, using the Tsyganenko and Sitnov 2005 semi-empirical magnetospheric model (TS05) and the International Geomagnetic Reference Field (IGRF). The quiet daily variation (Sq) of the local geomagnetic field horizontal component (H -) is extracted from the Chiripa Observatory (Costa Rica) data, using the International Quiet Days and the Normal Orthogonal Component Analysis. Pearson's correlation coefficients are calculated between the H -component computed with the TS05 model in the Tegucigalpa coordinates and the H - component of the Chiripa Observatory. The best correlations are obtained in days with planetary index $K_p < 4$, when the Sq and the quiet daily variation are removed from the CRP- H data and the TEG- H values respectively. The magnetospheric currents computed for Tegucigalpa seem to contribute significantly to local Sq, in the time interval 12,00–24,00 local time.

C. Objetivos

1. Objetivo general

Analizar los datos del Primer Observatorio Magnético de Honduras, comparándolos con datos de observatorios cercanos, así como con las componentes del campo magnético local calculadas para el sitio del observatorio, empleando el Modelo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) y el modelo de corrientes magnetosféricas de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05), con el auxilio de técnicas estadísticas, para futuros estudios geofísicos y de amenazas de clima espacial en Honduras.

2. Objetivos específicos

- Comparar las componentes del campo magnético local calculadas en Tegucigalpa, mediante el IGRF y el TS05, con los datos del Observatorio de Chiripa, Costa Rica, para el intervalo 2010–2013, validando así la metodología con la que se analizarán los datos del Primer Observatorio Magnético de Honduras.
- Contar con análisis estadísticos y físicos para realizar las primeras mediciones del Observatorio Magnético y para futuros estudios geofísicos y de clima espacial.
- Modelar la variación diaria en días calmos y las contribuciones de cada una de las corrientes de la magnetosfera terrestre a la misma.
- Publicar en eventos y en revistas nacionales e internacionales los resultados de los análisis del campo magnético regional.

Tabla de contenidos

	Página
A. Agradecimientos	2
B. Resumen	3
C. Objetivos	4
1. Objetivo general	4
2. Objetivos específicos	4
D. Introducción	6
1. Observatorios magnéticos	6
2. Ionosfera	7
a. Corrientes ionosféricas	8
3. Magnetosfera	9
a. Corrientes magnetosféricas	10
4. Campo magnético local	10
5. Clima espacial	11
a. Eventos severos de clima espacial	12
b. Consecuencias observadas de corrientes inducidas geomagnéticamente	17
6. Modelo de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05)	19
a. Características generales del modelo	20
E. Contribución de tesis	24
F. Metodología	24
1. Cómputo de componente H - para Tegucigalpa	24
2. Variación S_q	24
3. Corrientes magnetosféricas	26
4. Pruebas estadísticas	26
a. Correlaciones de Pearson	26
b. Transformada z -Fisher	27
c. Prueba t de Welch	27
G. Resultados y discusión	29
1. Análisis de corrientes magnetosféricas	29
2. Análisis de correlaciones de Pearson	29
3. Análisis de la prueba t de Welch	30
H. Conclusiones	36
I. Plan de trabajo	37
J. Referencias bibliográficas	41

D. Introducción

1. Observatorios magnéticos

Un observatorio magnético tiene como objetivo principal registrar las fuentes naturales de las componentes del vector de campo magnético terrestre, de manera continua, precisa y sin interferencias artificiales. De esta manera se tiene conocimiento preciso de la actividad magnética del sitio en el que se encuentra el observatorio. Para realizar una medida del campo magnético terrestre se emplea instrumentación de varios tipos. Por ejemplo, un grupo lo forman los variómetros, que registran de forma continua y automática las variaciones alrededor del cero de las componentes del campo geomagnético y que requieren de una instalación en entornos controlados térmicamente y sobre una plataforma completamente estable. También se emplean instrumentos para mediciones absolutas, que miden el vector total de campo magnético terrestre con observaciones periódicas, y que permiten dar escala a los valores medidos por los variómetros. En la figura 1 podemos ver la vista en planta de la propuesta para las casetas del Observatorio Magnético. Procesando los datos obtenidos en los observatorios se

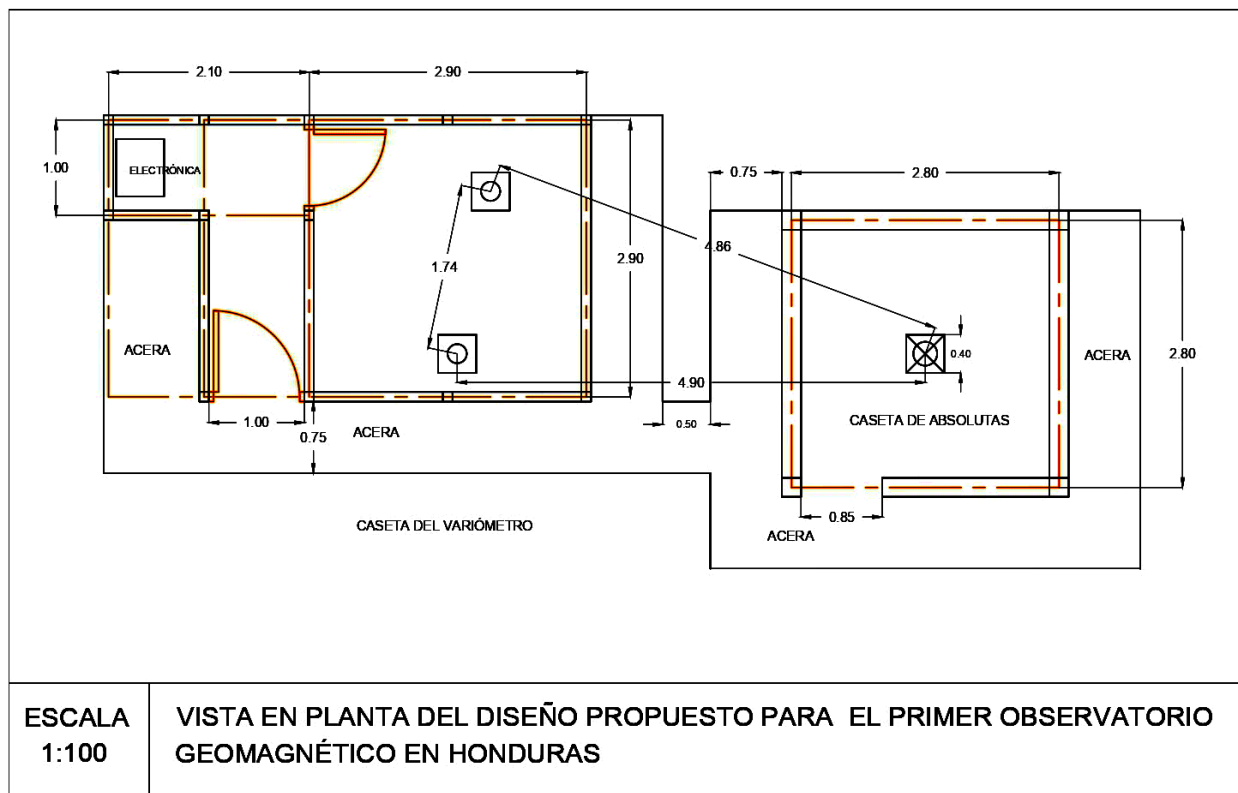


Figura 1: Vista en planta de la propuesta para las casetas del Observatorio Magnético. Izquierda: cuarto de variómetro. Derecha: cuarto de mediciones absolutas. Diseño: Ing. Daysi Gómez.

pueden determinar los índices de actividad geomagnética, los valores medios horarios, dia-

rios, mensuales y anuales, así como la variación anual de las componentes geomagnéticas. La curva semanal de la componente H - del Observatorio de Chiripa, para los días 1 a 7 de enero de 2010 se muestra en la figura 2. Los datos de los observatorios magnéticos registran

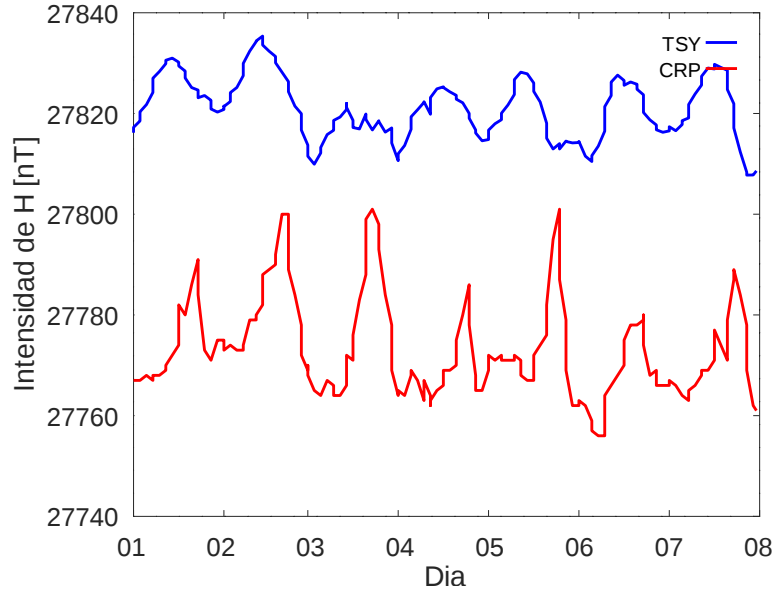


Figura 2: Intensidad de CRP- H - y de TEG- H_{TSY} -, para los días 1 a 7 de enero de 2010.

una superposición de señales dependientes del tiempo, relacionadas con una diversidad de fenómenos físicos en el núcleo de la Tierra, el manto, la ionosfera, la magnetosfera e, incluso, el Sol y el viento solar. Estos datos se utilizan a menudo para la investigación científica; además son cada vez más importantes para aplicaciones prácticas, para la vigilancia del clima espacial y la mitigación de riesgos. Hoy en día, los observatorios magnéticos de todo el mundo son operados por una variedad de instituciones gubernamentales y académicas, a veces en colaboración con empresas privadas.

2. Ionosfera

La ionosfera es una capa que se superpone en la parte superior de la atmósfera y el comienzo del espacio. Lo que sucede en la ionosfera es que el Sol calienta los gases que se encuentran en esa capa y hace que estos pierdan electrones, por lo que en esta capa se crea un mar de partículas cargadas. La ionosfera se extiende aproximadamente de 80 km a 644 km sobre la superficie de la Tierra. La ionosfera está en constante cambio debido a que se forma cuando sus partículas son ionizadas por el Sol, causando que su tamaño varíe en los períodos diurnos y nocturnos. En los periodos nocturnos esta capa se adelgaza cuando las partículas ionizadas se recombinan, formando partículas neutras (e.g. Frazier y Tran, 2019).

La ionosfera tiene tres regiones o capas: E, D y F. Estas capas no tienen límites bien definidos porque varían durante el transcurso del día, ensanchándose o adelgazándose. La capa D es

la más baja y se encuentra a 60 km del suelo y se extiende hacia arriba hasta uno 90 km. La capa E comienza de 90 km hacia arriba y se extiende hasta uno 150 km. La capa F que es la más alta de la ionosfera y se extiende de 150 km hasta a veces 500 km sobre la superficie de la Tierra (Atmospheric Research, 2014).

La ionosfera es muy diferente durante el día y la noche. Durante el día, tanto los rayos X como la luz ultravioleta del Sol suministran continuamente la energía que golpea a los electrones para liberarlos de los átomos y las moléculas, lo que proporciona un suministro continuo de iones y electrones libres. Algunos de estos iones y electrones chocan y se vuelven a combinar para formar átomos y moléculas eléctricamente neutros. Durante el día, se crean más iones de los que se destruyen, por lo que aumenta el número de iones en las tres regiones. Por la noche, el proceso de recombinación comienza debido a la ausencia de la luz solar, lo que provoca que el número de iones disminuya en las tres capas. (Atmospheric Research, 2014).

a. Corrientes ionosféricas

Cuando la radiación solar impacta la atmósfera, en particular en la ionosfera, se producen vórtices de corriente, que son mayores del lado en el que incide la luz del Sol; del otro lado se tendrán pocas corrientes o ninguna. A estas se les conoce como corrientes ionosféricas. En la figura 3 se observa que se dividen en dos hemisferios, cuya dirección de giro es diferente. En el hemisferio norte, giran en sentido anti-horario; en el hemisferio sur, giran en sentido horario.

Se conoce como corrientes Sq a las causadas por vientos de marea en la atmósfera, es decir, son las oscilaciones diurnas y semi-diurnas, que son excitadas por el calentamiento solar de la atmósfera debido a la radiación solar. Tienen una fuerte variación estacional: son más fuertes en verano, cuando el calentamiento solar y la ionización de la atmósfera son mayores. Estas corrientes crean variaciones magnéticas diarias, cuyos registros se obtienen en observatorios magnéticos distribuidos por todo el mundo (Baumjohann y Nakamura, 2007).

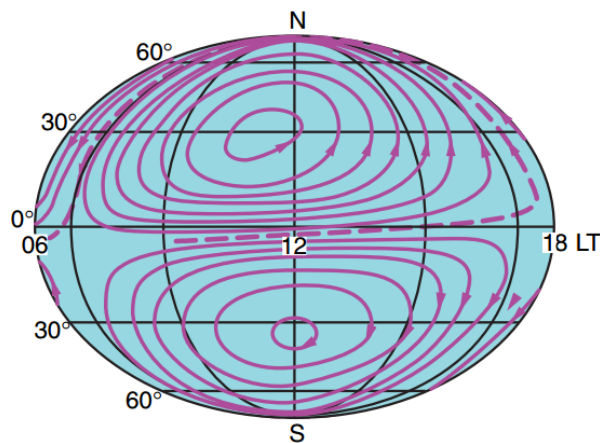


Figura 3: Vista diurna de los sistemas de corriente Sq. Imagen adaptada de (Baumjohann y Nakamura, 2007)

Las variaciones Sq que son medidas en la superficie de la Tierra, contienen señales no solo de las corrientes ionosféricas, sino también de las corrientes secundarias inducidas en el interior de la Tierra. La fuerza de las corrientes inducidas es de alrededor de un tercio de la de las corrientes ionosféricas. Estas corrientes inducidas tienden a estar en la dirección opuesta a las corrientes ionosféricas de origen y, por lo tanto, actúan para reducir las variaciones de Sq en la componente vertical y aumentar las variaciones de Sq en la componente horizontal en el suelo. Además del efecto de la inducción electromagnética en el manto superior, la presencia del océano conductor tiene un impacto medible en las variaciones de Sq, especialmente alrededor de la costa (ver Yamazaki y Maute, 2017).

Diversos estudios han demostrado que las variaciones de Sq en el suelo podrían estar contaminadas por el efecto de varias corrientes magnetosféricas. Se cree que las corrientes de cola producen un patrón diurno similar a Sq en el campo geomagnético. Según el modelo de campo geomagnético CHAOS-5 las corrientes de cola pueden causar una perturbación magnética de ± 5 nT en la superficie de la Tierra en latitudes medias (Yamazaki y Maute, 2017).

Las variaciones geomagnéticas de Sq pueden observarse en cualquier lugar del mundo. Una característica importante de la distribución latitudinal de las Sq es la amplificación en la componente x cerca del ecuador magnético. Normalmente, la amplitud de las Sq en x en una estación magnética que esta dentro del rango de $\pm 3^\circ$ del ecuador magnético es de 2 a 3 veces mayor que en una estación de baja latitud de la misma longitud (Yamazaki y Maute, 2017).

3. Magnetosfera

Cuando nos referimos a la magnetosfera nos referimos a la región del espacio que rodea a la Tierra donde el campo magnético que domina es el campo magnético de la Tierra, en lugar del campo magnético del espacio interplanetario. La magnetosfera está modelada por la interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra. La magnetosfera de la Tierra tiene forma de una gran burbuja con forma de cometa y que se extiende hasta 57.936 km en el espacio. La importancia de la magnetosfera radica en que protege nuestro planeta de la radiación de partículas cósmicas y solares, así como de la erosión de la atmósfera por el viento solar, que es el flujo constante de partículas cargadas que salen del Sol (NASA, 2021).

La magnetosfera terrestre es generada por el movimiento convectivo de hierro fundido que está por debajo de la superficie en el núcleo exterior de la Tierra. El bombardeo constante del viento solar comprime el lado de nuestro campo magnético que mira hacia el Sol. Este lado se extiende una distancia de aproximadamente seis a diez veces el radio de la Tierra. El lado de la magnetosfera que mira en dirección opuesta al Sol, se extiende en una inmensa cola magnética, que fluctúa en longitud y que puede medir cientos de radios terrestres (NASA, 2021).

La magnetosfera depende de varias variables: la naturaleza de las fuentes de plasma y el momento, el período de giro, la naturaleza del eje, el eje del dipolo magnético y la magnitud y dirección del flujo del viento solar. La distancia planetaria donde la magnetosfera pueda

resistir la presión del viento solar se llama distancia Chapman-Ferraro (Hussey, 2014).

a. Corrientes magnetosféricas

La magnetosfera es un sistema complejo, de corrientes interconectadas, que se agrupan espacialmente en los siguientes sistemas de corrientes (ver figura 4).

- Chapman–Ferraro: Son las corrientes que se mueven sobre la superficie de la magnetosfera. Son producidas por la circulación de partículas cargadas en la magnetopausa y sostienen la presión causada por el viento solar (Castillo, 2018).
- Cola transversal: Son sistemas de corriente que se encuentran en el lado opuesto al Sol. Circulan en los hemisferios norte y sur del ecuador magnético, en sentido anti-horario el primero y en sentido horario el segundo, visto desde el Sol, uniéndose en el extremo del amanecer. El conjunto toma la forma de la letra griega θ (Castillo, 2018).
- Hoja neutral de corriente: Son corrientes que circulan en el plano del ecuador magnético, en dirección amanecer–atardecer. Es aquí donde desembocan las corrientes del hemisferio norte y las corrientes del hemisferio sur de la cola (Castillo, 2018).
- Birkeland o corrientes alineadas con el campo (FAC): Son corrientes poloidales, que transportan energía entre el ecuador magnético y la ionosfera.
- Corrientes de anillo: Son producidas por una región anular que contienen una gran cantidad de protones y electrones atrapados a la altura del ecuador magnético. Son los indicadores de actividad magnética más significativos. A estas corrientes se les conoce como corrientes de anillo simétrico o completo (SRC). Las corrientes de anillo parcial (PRC) abarcan principalmente la zona ecuatorial que va poco después del atardecer hasta la medianoche. Las corrientes de Birkeland transportan energía de este anillo a la ionosfera, a la altura de los casquetes polares (Tsyganenko, Singer y Kasper, 2003).

4. Campo magnético local

De acuerdo a Jankowski y Sucksdorff, 1996, el campo magnético local es un campo vectorial, que se puede describir o representar por un vector o por sus tres componentes; a este vector se le representa con la letra F . Estas componentes cartesianas son x , y y z , donde x representa la componente norte-sur del vector, y representa la componente este-oeste y z representa la componente vertical, llamada intensidad vertical, positiva cuando apunta hacia abajo (ver figura 5).

Entonces el modulo del vector F se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$F^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (1)$$

De acuerdo a Jankowski y Sucksdorff, 1996, hay otra forma para calcular el módulo del vector F , utilizando la componente H . Esta, a su vez, se calcula al sumar vectorialmente las componentes x y y de la ecuación anterior. La componente H es la componente horizontal del vector F a lo largo del meridiano magnético local y se le conoce como intensidad horizontal,

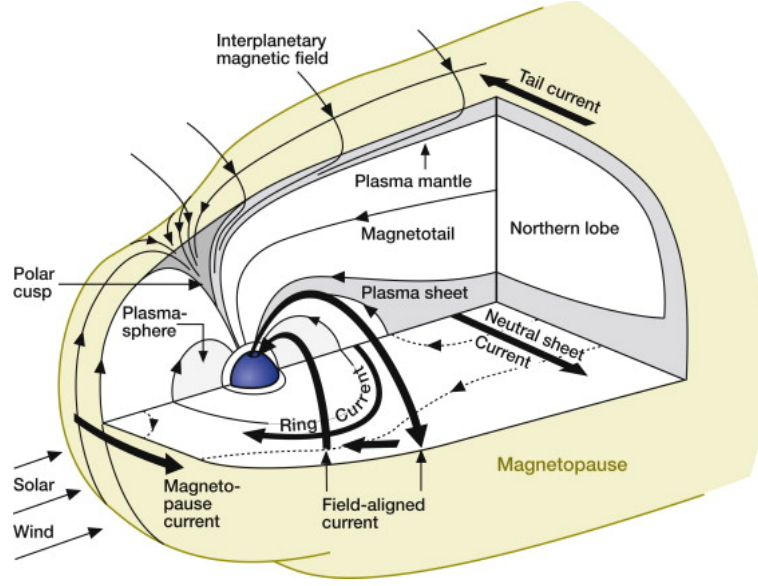


Figura 4: Ilustración detallada de la magnetosfera, que muestra las características de sus diferentes corrientes. Imagen adaptada de Luhmann y Solomon, 2014

siendo positiva cuando apunta hacia al norte. Entonces el modulo del vector F también se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$F^2 = H^2 + z^2 \quad (2)$$

El campo magnético terrestre se genera a partir de las corrientes eléctricas debidas al movimiento de los iones de los metales que se funden en el interior de la tierra principalmente hierro y níquel. Esto sucede esencialmente en la región del núcleo externo. De acuerdo a Finlay y col., 2010. En cuanto a la intensidad del campo magnético terrestre, oscila entre 25.000 a 65.000 nT. Las coordenadas esféricas para medir el campo magnético local son la declinación y la inclinación.

La declinación magnética es el ángulo que se encuentra entre el norte geográfico y el meridiano magnético. Este ángulo resulta ser positivo para una desviación hacia el este del campo con respecto al norte verdadero Jankowski y Sucksdorff, 1996. La declinación magnética se calcula con la siguiente formula:

$$D = \arctg(y/x) \quad (3)$$

La inclinación magnética en cambio es el ángulo entre el vector H y la dirección del vector de intensidad total F . Jankowski y Sucksdorff, 1996 La inclinación magnética se calcula de la siguiente forma:

$$I = \arctg(Z/H) \quad (4)$$

5. Clima espacial

El clima espacial se refiere a las condiciones en el Sol y en el viento solar, la magnetosfera, la ionosfera y la termosfera que pueden influir en el rendimiento y la confiabilidad de los

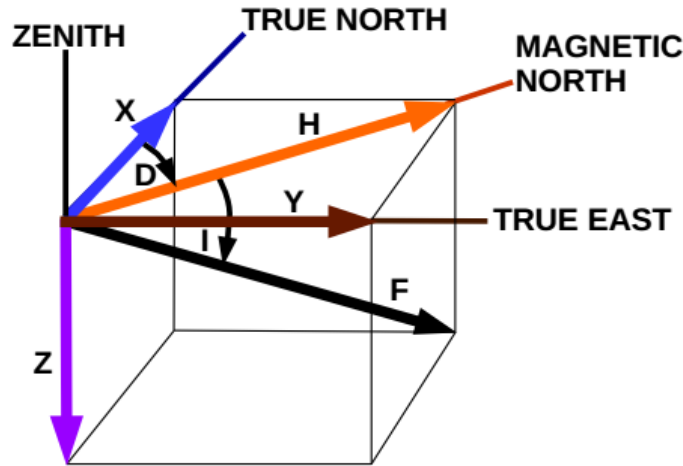


Figura 5: Componentes del campo geomagnético en sistema de coordenadas cartesiano, cilíndrico y esférico. Imagen adaptada de Castillo, 2018

sistemas tecnológicos espaciales y terrestres y pueden poner en peligro la vida o la salud humana ((Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research), 1995). El Sol siempre está arrojando partículas al espacio. Esta corriente de partículas se conoce como viento solar y proviene de la atmósfera exterior caliente del Sol llamada corona. Estas partículas de la corona están cargadas eléctricamente. El viento solar lleva estas partículas hacia la Tierra a una gran velocidad, y son muchos los efectos negativos que pueden tener sobre nuestro planeta.

De acuerdo a Portillo, 2020 son varias las razones por las que el campo magnético es importante. Una fundamental es que el campo magnético es responsable de que tengamos nuestra atmósfera, puesto que ayuda a que se den las condiciones para que los humanos podamos sobrevivir, y contribuye a que el planeta tenga una temperatura habitable. Hay que mencionar que la ionosfera puede ser afectada tanto por el clima espacial como por el clima terrestre. Un ejemplo son los huracanes, que pueden crear ondas de presión que se expanden hacia la ionosfera, provocando cambios en la misma. De aquí surge la necesidad de conocer como es el clima espacial y las condiciones climáticas para tener registros y monitorear la actividad magnética en la Tierra. La figura 6 es una representación artística de la interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre.

a. Eventos severos de clima espacial

Tormentas Geomagnéticas. Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones del campo magnético de la Tierra, que duran desde varias horas hasta incluso algunos días. Su origen es externo y se producen por un aumento brusco de las partículas cargadas emitidas en las erupciones solares que alcanzan la magnetosfera. Las tormentas geomagnéticas tienen un carácter global, comenzando simultáneamente en todos los puntos de la Tierra. No obstante,

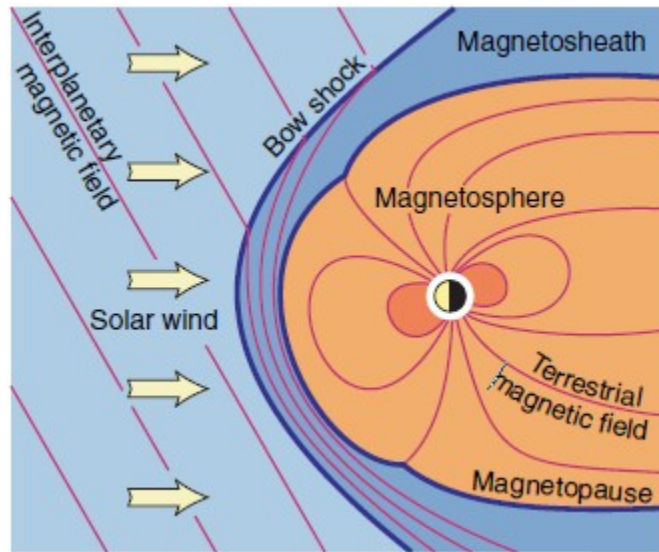


Figura 6: Interacción del viento solar con la magnetosfera de la Tierra. Imagen adaptada de Castillo, 2018

las amplitudes con que se observan las tormentas en distintos lugares son diferentes, siendo mayores cuanto más altas son las latitudes. La tabla 1 muestra algunos ejemplos de tormentas geomagnéticas severas.

Apagón de radio. En condiciones normales, las ondas de radio de alta frecuencia (HF) pueden soportar la comunicación a largas distancias por refracción a través de las capas superiores de la ionosfera. Cuando ocurre una llamarada solar lo suficientemente fuerte, la ionización se produce en las capas inferiores y más densas de la ionosfera (la capa D), y las ondas de radio que interactúan con los electrones en las capas pierden energía debido a las colisiones más frecuentes que ocurren en el entorno de mayor densidad de la capa D. Esto puede hacer que las señales de radio HF se degraden o se absorban por completo. Esto da como resultado un apagón de radio: la ausencia de comunicación de HF, que afecta principalmente a la banda de 3 a 30 MHz. El producto D-RAP (predicción de absorción de la región D) correlaciona la intensidad de la llamarada con la fuerza de absorción y propagación de la capa D (NOAA, 2011a). Este rango de frecuencia puede degradarse o incluso perderse por completo durante épocas de alta actividad (Lanzerotti, 2000). La figura 7 es una infografía de los efectos del clima espacial sobre la Tierra. En la tabla 2 se describen algunos ejemplos de efectos adversos debidos al clima espacial.

Tormenta de radiación. Las tormentas de radiación solar ocurren cuando una erupción magnética a gran escala, que a menudo causa una eyección de masa coronal y una llamarada solar asociada, acelera las partículas cargadas en la atmósfera solar a velocidades muy altas. Las partículas más importantes son los protones que pueden acelerarse a grandes fracciones de la velocidad de la luz. A estas velocidades, los protones pueden atravesar los 150 millones de kilómetros desde el sol hasta la Tierra en tan solo decenas de minutos o menos. Cuando

llegan a la Tierra, los protones que se mueven rápidamente penetran en la magnetosfera, que protege a la Tierra de las partículas cargadas de menor energía (NOAA, 2011b).

Tabla 1: Ejemplos de tormentas geomagnéticas severas. Adaptado de Eastwood y col., 2017.

Fecha	Comentario
Septiembre, 1959	El evento “Carrington” es la referencia mas utilizada para estudios de clima espacial extremo. La erupción solar, la tormenta geomagnética y el flujo de partículas energéticas asociado con este evento, lo convierten en uno de los más grandes registrados. Muchos parámetros cruciales no se midieron directamente, por lo que sus propiedades precisas están sujetas a incertidumbre. En particular, la estimación de la fuerza de la tormenta geomagnética asociada con el evento de Carrington ha suscitado cierto debate.
Mayo, 1921	Se ha estimado que esta tormenta geomagnética es comparable en tamaño a la mejor estimación actual del evento Carrington. Se observaron auroras cerca del ecuador en Samoa, y las corrientes inducidas geomagnéticamente (GIC) provocaron incendios en varias estaciones de telégrafo en Suecia.
Mayo, 1967	Una erupción solar extrema y una eyección de masa coronal causaron apagones de radio muy importantes, tormentas de radiación solar y una gran tormenta geomagnética. Esto provocó una interrupción particularmente significativa de las comunicaciones, específicamente a las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos de América, y marcó el inicio de una importante inversión estadounidense en el monitoreo del clima espacial, que continúa hasta el día de hoy.
Marzo, 1989	La tormenta geomagnética más grande de la era espacial, que causó la falla de toda la red eléctrica de Quebec y dañó dos transformadores en el Reino Unido.

Daños a satélites

Satélites:

En un solo evento, pueden ocurrir alteraciones en los componentes electrónicos, cuando una partícula cargada (por ejemplo, un ion pesado) ioniza una parte sensible de un circuito y hace que el circuito cambie de estado. Estos posibles daños son considerados en la construcción del modulo principal del Satélite Morazán (primer satélite hondureño). Morazán es un proyecto de integración de las naciones centroamericanas a través de la colaboración en el sector Espacio. El proyecto consiste en el desarrollo de un CubeSat por profesionales de Honduras, con la colaboración de profesionales de Costa Rica, desarrolladores del primer satélite de Centroamérica, y profesionales de Guatemala (Monge y col., 2018). En la actualidad se ha desarrollado software de corrección para reducir los daños (Pulkkinen, 2007). El exceso de carga negativa aumenta las diferencias de potencial, provocando intensas descargas de voltaje y sobrecargas de energía dentro de los circuitos, dañando sus sistemas. Tanto la intensidad máxima del flujo de electrones como la duración de la exposición determinan la cantidad de exceso de carga acumulada, lo que significa una enorme amenaza para todas las redes satelitales del mundo. De ahí la importancia de conocer con precisión las componentes magnéticas, que registran las perturbaciones del viento solar sobre el campo magnético terrestre.

Aeronaves a gran altura:

Por encima de los 10 km de altitud el blindaje atmosférico de los aviones se reduce considerablemente. Las tripulaciones de las aeronaves y los pasajeros en rutas transpolares están sujetos a mayores dosis de radiación de las partículas energéticas. Estos problemas son mayores durante los máximos de manchas solares.

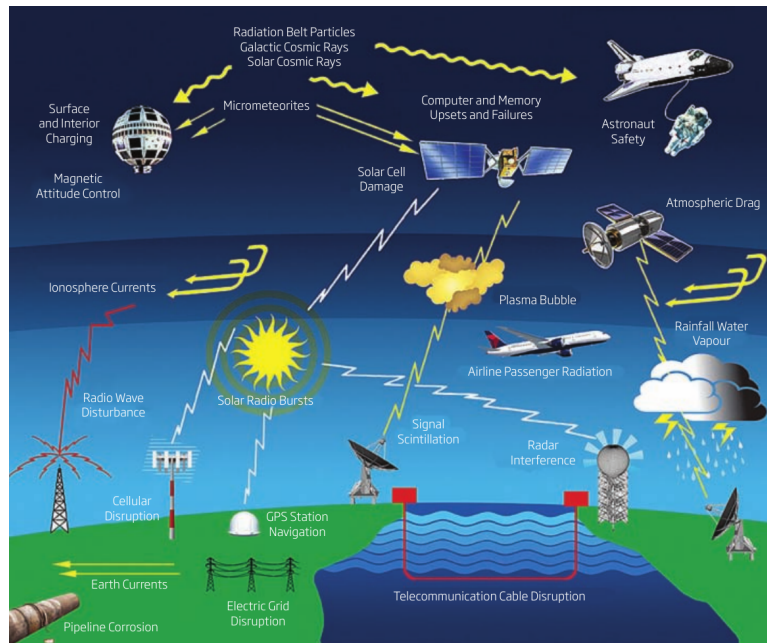


Figura 7: Efectos del clima espacial sobre la Tierra. Adaptado de Cannon y col., 2013

Tabla 2: Efectos adversos provocados por eventos severos de clima espacial sobre la Tierra.
Adaptado de Oughton y col., 2016

Evento extremo primario	Tiempo de advertencia	Duración	Impacto sobre la Tierra
Tormenta Geomagnética	17 a 90 horas	1 a 2 días	■ Posible colapso del voltaje de la red eléctrica a granel y daño a transformadores eléctricos. ■ Interferencia o pérdida de radio satelital y de ondas de comunicaciones, debido a centelleo. ■ Operaciones satelitales afectadas. Posible pérdida de satélites.
Apagón de radio	Ninguno	Minutos a 3 horas	■ Pérdida de comunicaciones de radio de alta frecuencia (HF) en el lado de día de la Tierra. ■ Pérdida de GPS de corta duración (minutos a una hora). ■ Interferencia en sistemas de radar civiles y militares.
Tormenta de radiación	30 minutos a varias horas	Horas a días	■ Apagón de HF en las regiones polares. ■ Mayor exposición a la radiación de los pasajeros y de la tripulación en aviones a altas latitudes.

Alteraciones a las cadenas de suministro global debido al clima espacial

La gran dependencia de la sociedad moderna a las redes de suministro nacionales e internacionales aumenta nuestra susceptibilidad a un evento meteorológico espacial severo. Para un evento al estilo de Quebec de 1989, los impactos económicos actualmente oscilarían entre 2,4 y 3,4 miles de millones de dólares en más de un año. De este choque económico total, alrededor del 50 % se hace sentir en países fuera de la zona de impacto directo, lo que da una pérdida en el Producto Interno Bruto (PIB) global de 3,9 a 5,6 % (Bäumen y col., 2014). En la tabla 3 se puede observar algunas de las áreas mas afectadas y las pérdidas económicas estimadas a consecuencia de un clima espacial severo.

b. Consecuencias observadas de corrientes inducidas geomagnéticamente

Las corrientes y campos eléctricos asociados con una mayor precipitación de partículas pueden inducir corrientes masivas en redes eléctricas globales que podrían resultar en cortes de energía a gran escala, apagones y daños permanentes a los transformadores eléctricos (Pirjola y col., 2000). La fuerza de las corrientes inducidas geomagnéticas (GIC) depende de varios factores. Suelen aumentar con la latitud geomagnética, la longitud y el voltaje de la línea de transmisión, pero disminuyen con la distancia al océano y una mayor resistividad del suelo (Wei, Homeier y Gannon, 2013).

Las GIC producen daños a tuberías y cables de telecomunicaciones, corrosión acelerada, daños físicos y eléctricos a los satélites e interrupciones de la navegación por radio, que pueden afectar particularmente a los sectores del transporte y la aviación (Cannon y col., 2013). En un estudio de Homeier y Wei, 2013 se estima que las pérdidas económicas en América del Norte y Europa por un apagón durante 5 meses, causado por un evento similar a Carrington, estaría entre 0,5 y 2,6 miles de millones de dólares. En el mismo estudio se estimó que un apagón de la red eléctrica en el norte estadounidense resultaría en una pérdida del PIB en los EE.UU. de aproximadamente 30 mil millones de dólares por día, acumulando a más de 10 mil millones de dólares por año, sin tomar en cuenta las variaciones globales debidas al comercio.

Las áreas de riesgo están relacionadas con las bandas actividad auroral. Los dos factores geofísicos clave que afectan la producción de GIC son, latitud geomagnética y la estructura de conductividad de la tierra profunda. En general, las áreas de riesgo son las de mayor latitud geomagnética, ya que están más cerca de la banda de actividad auroral.

La red compleja e interconectada del mundo actual hace difícil determinar los efectos exactos de un evento meteorológico espacial severo en la economía y en la infraestructura mejoradas. El impacto económico más importante de tales eventos en la historia es la interrupción de la distribución en redes eléctricas y las fallas de los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Por lo que se debe dar una especial atención al clima espacial y a sus efectos negativos sobre múltiples factores humanos. Los observatorios magnéticos permiten tener más información del comportamiento del clima espacial, lo que se puede aprovechar para predecir otro fenómeno de clima espacial a gran escala, tomar las precauciones posibles y evitar daños en la red

Tabla 3: Ejemplos de clientes, impactos y pérdidas en datos meteorológicos espaciales. Fuente: William Murtagh, NOAA Space Weather Prediction Center, “Current Space Weather Services Infrastructure”, presentación en el Taller de Clima Espacial de NOAA, Mayo 22, 2008.

Área de impacto	Cliente	Ejemplos de acciones	Ejemplos de pérdidas (US\$)
Astronave (Sistemas individuales para completar la falla de la nave espacial; comunicaciones y efectos de radiación)	▪ Lockheed Martin ▪ Orbital ▪ Boeing ▪ Space Systems Loral ▪ NASA, DoD	▪ Posponer Lanzamiento. ▪ En órbita: reiniciar los sistemas	▪ Pérdida de naves espaciales US\$ 500 millones. ▪ Tormenta en el peor de los casos: US\$ 100 mil millones. ▪ La pérdida comercial supera los \$mil millones.
Energía eléctrica Falla de la red y apagón (daño del equipo a las condiciones eléctricas)	▪ Comisión Reguladora Nuclear de EE. UU. ▪ N. America Electric Reliability Corp. ▪ Allegheny Power. ▪ Autoridad de Energía de Nueva York.	▪ Ajustar / reducir la carga del sistema. ▪ Desconectar componentes. ▪ Posponer el mantenimiento.	▪ Pérdida estimada US\$ 400 millones, debido a tormentas geomagnéticas inesperadas. ▪ Pérdida de US\$ 3–6 miles de millones en el PIB (apagón).
Aerolíneas (comunicaciones) (Pérdida de comunicación HF en vuelo y dosis de radiación para la tripulación y los pasajeros)	▪ United Airlines ▪ Lufthansa ▪ Continental Airlines ▪ Korean Airlines ▪ NavCanada (control de tráfico aéreo)	▪ Desviar vuelos polares. ▪ Cambiar planes de vuelo. ▪ Cambiar altitud. ▪ Seleccionar comunicaciones alternativas.	▪ Costo US\$ 100.000 por vuelo desviado. ▪ US\$ 10.000 – US\$ 50.000 para cambios de ruta. ▪ Riesgos a la salud.
Topografía y navegación (el uso de campo magnético o GPS podría verse afectado)	▪ FAA-WAAS ▪ Departamento de Transporte ▪ BP Alaska y Schlumberger	▪ Posponer actividades. ▪ Rehacer encuesta. ▪ Utilizar sistemas de respaldo.	▪ De US\$ 50.000 a US\$ 1 millón por día para una sola empresa

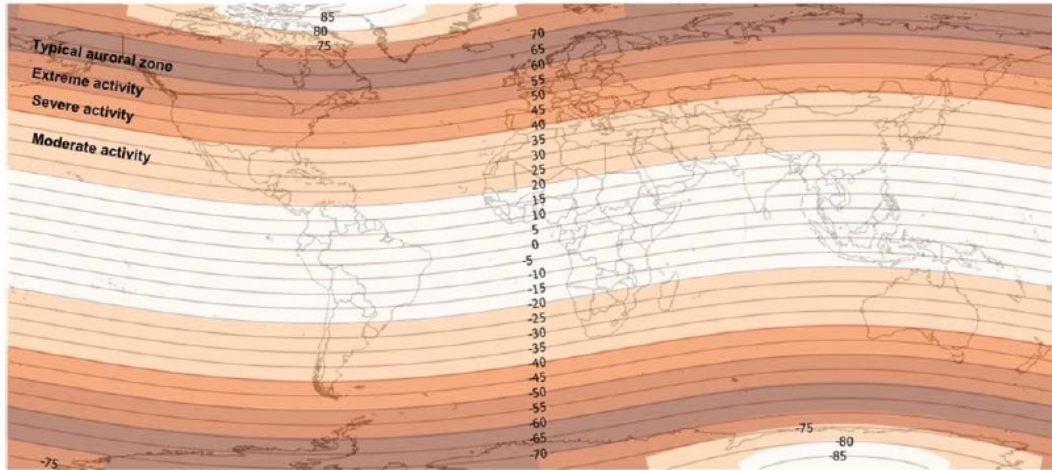


Figura 8: Mapa de amenazas por latitud geomagnética después de un cambio en el óvalo auroral. Adaptado de Oughton y col., 2016

eléctrica, para evitar sufrir pérdidas económicas globales y demás consecuencias.

En la actualidad, el mayor riesgo planteado de la actividad geomagnética es en la red eléctrica. Allí, hay varios factores que influyen en la gravedad de los efectos de los GIC por el aumento de la carga en transformadores de extra-alto voltaje (EHV). La probabilidad de daño inducido que provoquen interrupciones en el cliente depende, en primer lugar, de factores geofísicos que determinan el tamaño de los campos eléctricos en el sistema y, en segundo lugar, las características tecnológicas que afectan cómo un sistema responde al campo eléctrico generado.

6. Modelo de Tsyganenko y Sitnov 2005 (TS05)

“El modelo de Tsyganenko es una representación semi-empírica de mejor ajuste para el campo magnético, basada en un gran número de observaciones satelitales.” Este modelo está conformado por sistemas a gran escala de corrientes alineadas con el campo, corrientes de cola magnética, de magnetopausa y de anillo, es decir, las fuentes magnetosféricas externas del planeta Tierra. Se auxilia del código GEOPACK-2008 para calcular las fuentes internas (Tsyganenko, 2021).

Los sistemas de coordenadas utilizados por TS05 son los sistemas de coordenadas geocéntrico solar magnético (GSM) (ver figura 9) y geocéntrico de viento solar (GSW). La diferencia entre ellos es que en el primero el componente positivo X_{GSM} se dirige desde el centro de la Tierra al centro del Sol, y en el sistema GSW, el componente x_{GSW} es la dirección anti-paralela al vector de flujo del viento solar. Este es un sistema dinámico que cambia con la dirección del vector de flujo del viento solar (para mas detalles, ver Tsyganenko, 1998).

La figura 10 muestra la dinámica de tormenta magnética solar utilizando el modelo semi-empírico de campo geomagnético y las técnicas avanzadas de extracción de datos de Sitnov y col., 2008. La distribución de los vectores de densidad de corriente ecuatorial y sus di-

recciones se muestran mediante el código de colores y las flechas, respectivamente. La fase correspondiente de la tormenta está marcada por el rombo rojo en el gráfico del índice SYM-H en el recuadro.

La figura 11 muestra la distribución ecuatorial de los datos de los satélites Polar (rojo), GOES-12 (amarillo), CLUSTER (magenta), Geotail (azul) e IMP-8 (negro). Los datos de las 37 tormentas empleadas para calcular los parámetros del modelo TS05 (142.787 en total) se distribuyen espacialmente de la siguiente forma:

- $\approx 23 \%$, $7 \leq R \leq 20 R_E$
- $\approx 68 \%$, $6 \leq R \leq 7 R_E$ (GOES 8, 9, 10)
- $\approx 5.3 \%$, $4 \leq R \leq 6 R_E$
- $\approx 3.7 \%$, $2.5 \leq R \leq 4 R_E$

Donde R_E es el radio del planeta Tierra.

El modelo TS05 incluye la energía en la magnetosfera e IMF, los tiempos de desintegración, escala de tiempo de cada componente, procesos de carga y descarga y disipación de partículas energéticas. De tal forma que permitirá calcular las corrientes magnetosféricas.

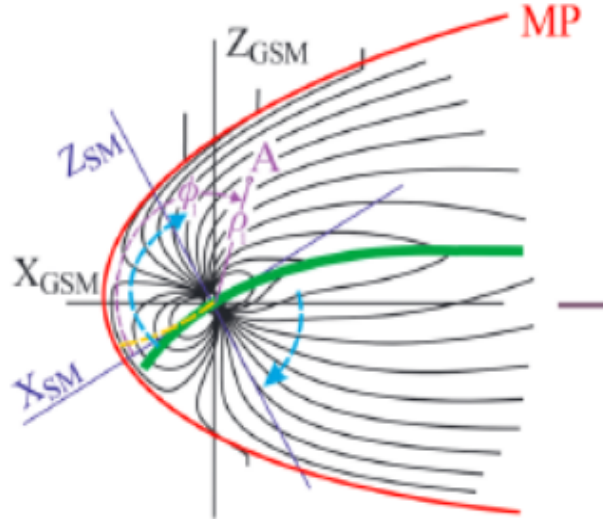


Figura 9: En esta figura, adaptada de Tsyganenko, 2014, se muestran los sistemas de coordenadas magnético solar geocéntrico (GSM) y magnético solar (SM).

a. Características generales del modelo

“El modelo asume que la magnetosfera interior es una función predecible del estado del viento solar, corriente arriba, que impulsa y da forma al campo, significando que en condiciones iniciales similares y con la misma historia del exterior, puede esperarse casi la misma respuesta de la magnetosfera y la misma evolución temporal de configuración del campo” (ver Castillo, 2018).

Módulos

El modelo TS05 está conformado por las contribuciones de siete campos vectoriales:

1. B_{CF} : Campo de las corrientes Chapman-Ferraro.
2. B_{SRC} : Corriente del anillo simétrico.
3. B_{PRC} : Corrientes de anillo parcial.
4. B_{T1} : Corriente transversal de la cola, región 1 (la mas cercana a la Tierra).
5. B_{T2} : Corriente transversal de la cola, región 2 (mas alejada de la Tierra).
6. B_{FAC1} : Sistema de corrientes de Birkeland, región 1 (mas alejada de la Tierra).
7. B_{FAC2} : Sistema de corrientes de Birkeland, región 2 (la mas cercana a la Tierra).
8. B_{INT} : Penetración del campo magnético interplanetario en la magnetosfera o término de interconexión.

Cada sistema cuenta con un ajuste de viento solar y de campo magnético interplanetario (IMF, por sus siglas en inglés), ligados a los ciclos de tormentas solares (Castillo, 2018). El campo magnético interplanetario (IMF) en este modelo representa el parámetro físico del campo magnético solar, el cual es transportado por corrientes de partículas cargadas compuestas principalmente por partículas alfa, protones y electrones (viento solar), entre los planetas del sistema solar.

El cálculo de la parte externa del dipolo magnético terrestre es la suma de las siete fuentes de campo magnetosférico:

$$B_E = B_{CF} + B_{SRC} + B_{PRC} + B_{T1} + B_{T2} + B_{FAC1} + B_{FAC2} + B_{INT} \quad (5)$$

En los modelos empíricos clásicos de campo geomagnético, este se presenta como una suma del campo interno (IGRF) y algunos módulos que representan los principales sistemas de corriente magnetosférica: La corriente Chapman-Ferraro confina el campo dipolo dentro de la magnetopausa; la corriente de cola se cierra a través de la magnetopausa; la corriente de anillo simétrica; corriente de anillo parcial; Corrientes de Birkeland, conectando la ionosfera con el viento solar (corrientes Región 1) o con la corriente de anillo parcial (Región 2). La geometría de cada módulo es fija y se basa en particular en algunos principios físicos. Por ejemplo, el sistema de corriente Chapman-Ferraro debe cancelar la componente del campo dipolo normal a la magnetopausa, mientras que el sistema de corriente de cola debe ubicarse cerca del plano ecuatorial, teniendo en cuenta los efectos, torsión y deformación de la hoja de corriente de la cola magnética. Cada sistema de corriente magnetosférica está blindado de forma independiente (tiene su propio subsistema de corrientes de tipo Chapman-Ferraro en la magnetopausa). Las contribuciones individuales de los módulos al campo magnético total se determinan mediante los coeficientes de amplitud correspondientes y se encuentran ajustando el modelo a las medidas disponibles del campo geomagnético. Los coeficientes de

amplitud están agrupados por el nivel de actividad o son algunas funciones predefinidas de los parámetros del plasma del viento solar (densidad y velocidad) y el campo magnético interplanetario.

También es importante mencionar que se utiliza la ley de Biot-Savart, una ley fundamental de la magnetostática. Se asume una densidad de corriente y por medio de su integral se obtiene el vector de potencial, que representa la contribución del dipolo magnético externo. Esta se representa como:

$$A = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{j(r')}{|r - r'|} dV \quad (6)$$

Donde A es el potencial vectorial, μ_0 es la permeabilidad del vacío, j la densidad de corriente eléctrica volumétrica, dV es el diferencial de volumen, r es un radio cualquiera y r' es el radio del planeta Tierra.

El campo magnético se obtiene de $\mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A}$.

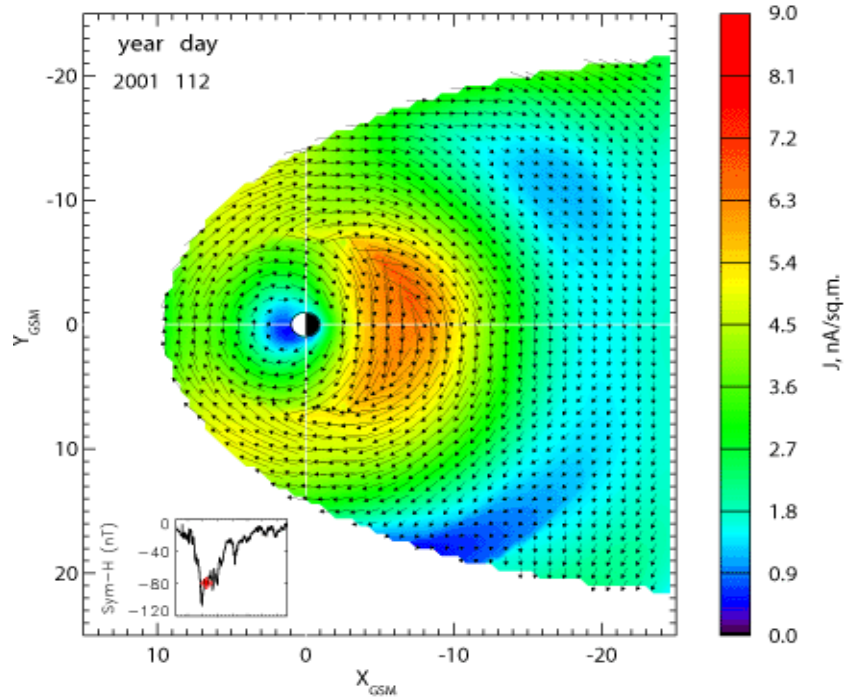


Figura 10: Resultados de la reconstrucción dinámica de la tormenta magnética de abril de 2001 (Sitnov, 2011).

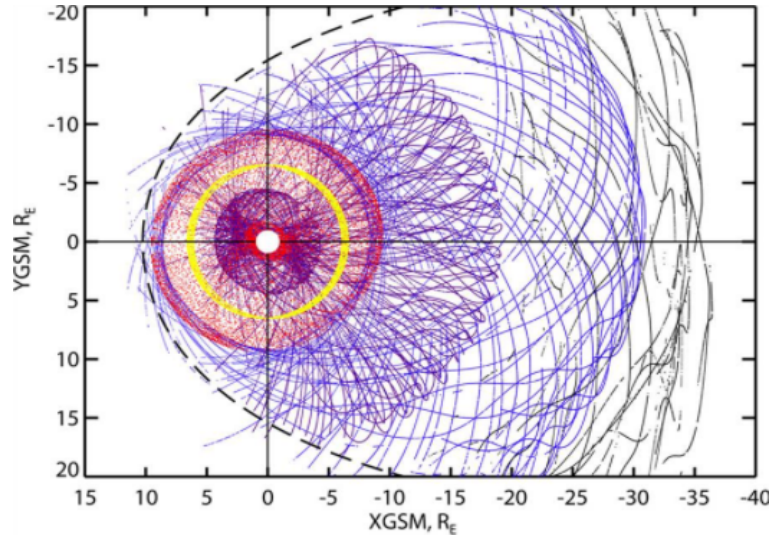


Figura 11: En esta imagen adaptada de (Sitnov, 2011) se muestra la distribución de las mediciones de datos del campo magnético en la magnetosfera y las proyecciones en el plano ecuatorial de ubicaciones de medición para subconjuntos de datos tomados de los satélites Polar (rojo), GOES-12 (amarillo), CLUSTER (magenta), Geotail (azul) e IMP-8 (negro).

Parámetros

Los parámetros de entrada del modelo TS05 se obtienen de la base de datos OMNI de NASA <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/> y se listan a continuación (Castillo, 2018):

- Año, día del año, hora del día y minuto de la hora: datos y hora de la medición.
- Magnitudes de los componentes x , y , z del campo magnético interplanetario.
- Magnitudes de los componentes x , y , z del viento solar.
- Densidad de protones del viento solar: número de protones por centímetro cúbico.
- Temperatura del viento solar: temperatura del medio interplanetario.
- Índice SYM-H: magnitud del índice de perturbación longitudinalmente simétrico para H , con una resolución de un minuto, desde diferentes conjuntos de estaciones y en un sistema de coordenadas ligeramente diferente.
- Indicadores de disponibilidad de datos de campo magnético interplanetario y viento solar: indican si los datos se midieron, se interpolaron o si no existen.
- Ángulo de inclinación del dipolo: ángulo del eje geomagnético de la Tierra en el momento de la medición;
- Presión ram del viento solar: $p = \rho v^2$, donde p es la presión, ρ es la densidad de protones y v la velocidad relativa entre el objeto y el viento solar.

- Seis variables de conducción del modelo, W1, W2, W3, W4, W5, W6.

E. Contribución de tesis

1. Evaluar la precisión del modelo TS05 para calcular las componentes geomagnéticas locales en Honduras.
2. Validar una metodología para analizar los efectos de las corrientes magnetosféricas en el sitio del Primer Observatorio Magnético de Honduras y determinar cuales de esas corrientes contribuyen más a la señal local.
3. Evaluar la eficiencia del modelo TS05 para realizar estudios geomagnéticos y de clima espacial a futuro, i.e., análisis de corrientes inducidas en transformadores de la red primaria hondureña y otros efectos adversos tanto de las tormentas atmosféricas como de las geomagnéticas.

F. Metodología

1. Cómputo de componente H - para Tegucigalpa

Las componentes x , y y z del IGRF se calculan utilizando el código Geopack-2008 de Nicolai Tsyganenko. Las mismas componentes cartesianas se calculan para la magnetosfera, utilizando el código TS04 de Tsyganenko y Sitnov. De estas componentes obtenemos la suma de componente H - de IGRF más la componente H - de la magnetosfera, formalmente denominada $TEG-H_{TSY}$. La figura 12 muestra estas series junto a los datos del Observatorio Chiripa (CRP- H) para el intervalo temporal 2010–2013.

2. Variacion Sq

La variación Sq- H se calcula de dos formas: a) utilizando los datos de días calmos internacionales (IQD) del observatorio CRP para el intervalo 2010–2013; b) aplicando el análisis de descomposición de valores singulares a los datos de CRP-IQD. (Castillo et al, 2017)

El primer paso es extraer los datos de CRP en los días calmos internacionales y colocarlos en una matriz donde las filas representan los días (240 días) y las columnas los datos horarios (24 por día), en el periodo 2010–2013. Seguidamente, se removieron las filas en donde existían vacíos de datos, ya que el modelo no puede utilizarse si hay vacíos. En total, se obtuvieron 147 días sin vacíos. A la matriz filtrada se le aplica el análisis de descomposición de valores singulares, factorizando la matriz original en tres matrices.

$$\mathbf{Sq} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \text{ donde :}$$

- $\mathbf{Sq}$ es la matriz de datos de los días calmos internacionales, con dimensiones 147 x 24.
- $\mathbf{U}$ es una matriz 147 x 147, con los autovectores normalizados de la matriz $\mathbf{Sq} \otimes \mathbf{Sq}^T$.

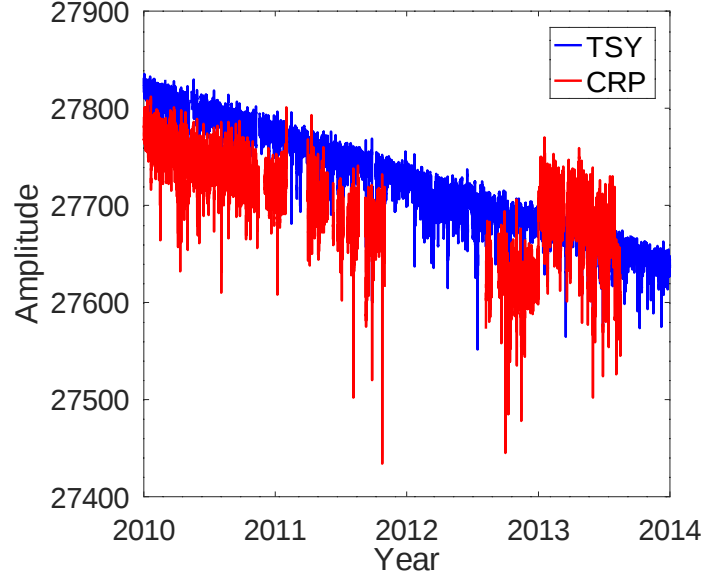


Figura 12: TEG- H_{TSY} values (blue) versus CRP- H data (red) obtained from World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh.

- $\mathbf{V}$ es una matriz 24 x 24, con los autovectores normalizados de la matriz $\mathbf{Sq}^T \otimes \mathbf{Sq}$, o EOF.
- $\mathbf{S}$ es una matriz de tamaño 147 x 24 matriz, con 24 valores singulares de $\mathbf{Sq}$.

La expansión de coeficientes representan las coordenadas no estandarizadas de los datos a lo largo de los ejes principales y se calculan utilizando la matriz $\mathbf{A}$ que es una matriz $n \times m$ cuyas columnas son los coeficientes de expansión, o series de tiempo de la evolución de los EOF. Cada columna representa las variaciones en la amplitud de cada modo a lo largo de 147 días calmos. La matriz $\mathbf{A}$ se calcula mediante el producto matricial $\mathbf{A} = \mathbf{U} \otimes \mathbf{S}$ con un tamaño de 147 x 24. Para poder calcular el modelo, se extraen las amplitudes y se multiplican por los EOF, que son modos de variabilidad o funciones ortogonales empíricas, mediante la siguiente fórmula:

$$\mathbf{NOCSq}_l = \sum_{i=1}^{l} \mathbf{a}_i \otimes \mathbf{v}_i^T, \text{ donde :}$$

- $\mathbf{a}_i$ es la i -ésima columna (i -ésimo vector) de la matriz $\mathbf{A}$.
- $\mathbf{v}_i$ es la i -ésima columna (i -ésimo vector) de la matriz $\mathbf{V}$.
- donde l es el numero de modos(vectores) utilizados para construir el modelo.

Respecto al modelo hay que recordar que cada $\mathbf{NOCSq}_l$ es una matriz de 147 filas x 24 columnas que representan un porcentaje de señal. La suma de los 24 modos devuelve los datos originales. En este trabajo se emplearon uno, dos, tres y cuatro modos para el modelo

NOCS q_1 , ya que estos representan alrededor del 80 % de la señal original. El siguiente paso es restar **NOCS q_1** de los datos crudos de las observaciones, para así obtener la serie corregida $\hat{H}$:

$$\hat{H} = H - \text{NOCS}q_1 \quad (7)$$

3. Corrientes magnetosféricas

Se calcularon seis sistemas de corrientes magnetosféricas con el modelo TS05, para las coordenadas de Tegucigalpa: Birkeland (FAC), Chapman-Ferraro (CF), transversal de la cola región 1 (TAIL-1), transversal de la cola región dos (TAIL-2), anillo parcial (PRC), anillo simétrico (SRC). De estas corrientes se extrajeron sus respectivas matrices de días calmos internacionales. Seguidamente, se proyectó cada matriz de días calmos internacionales sobre los EOF del modelo NOCS q de Chiripa, para evaluar la contribución de cada corriente magnetosférica a la variación diaria de días calmos en Chiripa.

4. Pruebas estadísticas

Se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson, que son útiles cuando se busca una relación lineal entre variables y cuando ambas variables tienen una distribución normal bivariada. La distribución de los coeficientes de correlación de Pearson puede tener una curva de probabilidad muy sesgada. Por eso se aplica la transformación de Fisher para convertirla en una distribución aproximadamente normal. Además se hizo uso de las pruebas t de significancia de Welch para evaluar si dos distribuciones normales eran significativamente diferentes.

a. Correlaciones de Pearson

Esta prueba estadística se realizó para comparar los datos de Chiripa y el modelo de Tsyganenko en Tegucigalpa, y así encontrar los valores de correlación de Pearson r con valores-p menores a 0,05. Entre mayor sea la cantidad de valores con ese nivel de significancia, nos dará como resultado una mejor correlación.

La fórmula para los coeficientes de correlación de Pearson, está dada por:

$$r(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (A^i - \bar{A})(B^i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (A^i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (B^i - \bar{B})^2}} = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B}$$

En donde $A = \text{CRP-}H$ y $B = \text{TEG-}H_{TSY}$, $\bar{A}$ y $\bar{B}$ son las medias de A y B, $cov(A, B)$ es la covarianza entre $\text{CRP-}H$ y $\text{TEG-}H_{TSY}$, σ_A y σ_B son sus desviaciones estándar respectivamente. Un $r=0$ indica que no hay relación lineal entre ambas series de tiempo. Si se obtiene un $r=1$ indica que hay una fuerte relación lineal entre ambas series de datos. Por último, un $r=-1$ indica que hay una fuerte relación lineal negativa entre ambas series de datos.

Esta correlación se aplicó para los datos crudos del observatorio de Chiripa y el modelo de Tsyganenko mas IGRF (en adelante, Tsyganenko total). También se comparó la serie de datos de Chiripa sin la señal de la corriente Sq, contra el modelo de Tsyganenko total sin variación diurna. Por último, para obtener una mejor correlación de los datos, se comparó la serie de datos de Chiripa, removiendole de ella el NOC-Sq para los casos de 1, 2, 3 y 4 modos, con el modelo de Tsyganenko total sin variación diurna. Este procedimiento se hizo tanto para los días con $Kp < 4$ como para los días con $Kp \geq 4$. Los gráficos más significativos de estas correlaciones con $Kp < 4$ se describen en la sección de resultados.

b. Transformada z-Fisher

La transformación z-Fisher se utiliza para convertir histogramas de r a histogramas aproximadamente normales, es decir, z-Fisher es útil para transformar un histograma sesgado a la izquierda a una gaussiana, lo cuál es buen indicativo de que existen pocas anti-correlaciones (valores negativos). Esto se logra con el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

$$z = (0,5)\ln[(1 + r)/(1 - r)] \quad (8)$$

c. Prueba t de Welch

La prueba t de Welch es una prueba paramétrica muy similar a la t-student, que se emplea cuando las muestras tienen varianzas distintas. En este caso comparamos las correlaciones de valores crudos contra las correlaciones de valores sin variación diurna, normalizadas y transformadas a distribuciones aproximadamente gaussianas. Se usan tres parámetros: cantidad de datos, medias y desviaciones estándar. La hipótesis nula de referencia es: las dos distribuciones son iguales. Se usa un intervalo de confianza de 95 %.

Para probar si dos distribuciones normales son significativamente diferentes, una prueba de Welch se les puede aplicar la prueba t. El parámetro del estadístico t para probar la hipótesis de que dos medias $\bar{z}_1$ y $\bar{z}_2$ de dos conjuntos diferentes son iguales es:

$$t = \frac{\bar{z}_1 - \bar{z}_2}{\sigma_{1,2}} \quad (9)$$

donde $\bar{z}_1$ y $\bar{z}_2$ son los valores medios de los gaussianos ajustados a los histogramas de z y

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{\sigma_{z_1}^2}{N_1} + \frac{\sigma_{z_2}^2}{N_2}} \quad (10)$$

donde σ_{z_1} y σ_{z_2} son las desviaciones estándar ajustadas, N_1 y N_2 son el número de valores z para calcular cada histograma. El número de grados de libertad (*d.f.*) requeridos para

calcular la distribución t de Student viene dada por

$$d.f = \frac{\sigma_{1,2}^4}{\frac{1}{N_1-1}(\frac{\sigma_{z_1}^2}{N_1})^2 + \frac{1}{N_2-1}(\frac{\sigma_{z_2}^2}{N_2})^2} \quad (11)$$

La hipótesis nula es que las dos distribuciones son iguales. El valor p da la confianza en nuestra decisión, y se calcula a partir del problema de distribución t de Student función de densidad de capacidad (pdf):

$$p = 1 - F(x|d.f.) = 1 - \int_{-\infty}^x \frac{\Gamma(\frac{d.f.+1}{2})}{\sqrt{(d.f.)\pi}\Gamma(\frac{d.f.}{2})(1 + \frac{t^2}{d.f.})^{\frac{d.f.}{2}}} dt \quad (12)$$

donde F es la función de distribución acumulativa y

$$\Gamma(d.f.) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{d.f.-1} dx \quad (13)$$

es una integral impropia convergente definida para todos los números complejos excepto los enteros no positivos, denominada función Gamma (ver, por ejemplo, Weatherburn, 1961). Si d.f. es un entero positivo, $\Gamma(d.f.) = (d.f. - 1)!$

Comparamos el estadístico t con un valor t-crítico, que se calcula a partir de la inversa de la función de distribución acumulativa t de Student (cdf):

$$t_c = F^{-1}(1 - \alpha|d.f.) \quad (14)$$

donde t_c es t-crítico y α el nivel de significancia.

Para un intervalo de confianza (IC) del 95 %, $\alpha = 0.05$. El criterio es:

- Si $t < t_c$, entonces $p > 0.05$ y no podemos rechazar la hipótesis nula (las dos las distribuciones son las mismas).
- Si $t > t_c$, entonces $p < 0.05$ y consideramos que las dos distribuciones son diferentes.

G. Resultados y discusión

1. Análisis de corrientes magnetosféricas

Al proyectarse cada una de las matrices de corrientes magnetosféricas en días calmos sobre los EOF del modelo NOCSq de Chiripa (CRP-NOC-Sq- H), la mayoría de las corrientes magnetosféricas presentan contribuciones significativas a los EOF en el intervalo de mediodía a medianoche (ver figuras 13, 14 y 16). En cambio, en el intervalo medianoche a mediodía, las contribuciones de todas las corrientes a los EOF son bajas (ver figuras 13 y 15). Esto está en correspondencia con la asimetría de la magnetosfera que han reportado Tsyganenko, Singer y Kasper, 2003, donde las contribuciones de Birkeland y PRC son mayores en lado del atardecer.

Las corrientes de Birkeland son proporcionales al seno de la longitud magnética, por lo que en altitudes bajas alcanzan su punto máximo al amanecer y al anochecer. No obstante, en el lado del amanecer, las corrientes PRC cancelan a las corrientes de Birkeland (Tsyganenko y Sitnov, 2005).

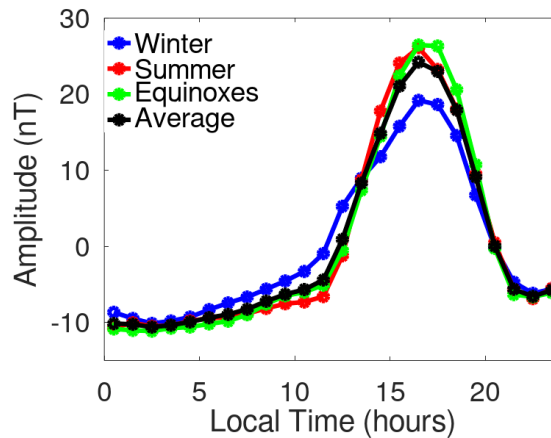


Figura 13: Las curvas de Lloyd representan las medias de los días calmos internacionales de los datos de un observatorio (en este caso, del Observatorio de Chiripa, para el intervalo temporal 2010–2013), agrupados por estaciones: invierno corresponde a los meses de noviembre a febrero; verano a los meses de mayo a agosto; equinoccios comprende los meses de marzo, abril, septiembre y octubre.

2. Análisis de correlaciones de Pearson

Primero tenemos la comparación de los datos crudos de CRP- H y TEG- H_{TSY} , tanto para $K_p < 4$ como para $K_p \leq 4$ (ver figura 17). Vemos que para los días calmos, la correlación entre ambas series de tiempo no es tan mala, ya que hay una buena cantidad de valores altos de r con valores $p \leq 0.05$. En cambio, para los días de tormenta geomagnética, se obtuvieron pocos datos; pero la mayoría de estos, son valores de r arriba de 0.5, con valores $p \leq 0.05$.

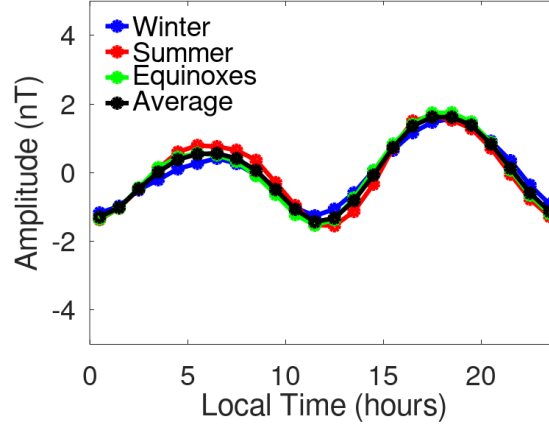


Figura 14: Curvas de Lloyd para las corrientes de Birkeland.

Luego se puede ver en la figura 18, hay un incremento de correlaciones r con valores $p \leq 0,05$, cuando se remueve el Sq de CRP- H y cuando se remueve la QDV de TEG- H_{TSY} , para días con $Kp < 4$ (panel izquierdo). Esto sucede porque el modelo TS05 no incluye la señal ionosférica. Entonces al quitar las corrientes Sq de los datos de Chiripa (CRP- H -wo-Sq), estos se correlacionan mejor con los valores del modelo sin variación diaria en días calmos (TEG- H_{TSY} -wo-QDV). En cambio, para días con $Kp \geq 4$ (panel derecho), no se aprecia mejoría significativa en las correlaciones (ver Castillo, 2018).

Una buena correlación se obtuvo cuando se restó el NOC-Sq de dos modos a los datos de Chiripa (CRP-wo-NOCsq₂- H) y se comparó con la serie de tiempo de TEG- H_{TSY} -wo-QDV. Observamos en la figura 19 un aumento de los valores de r con $p \leq 0,05$, para $Kp < 4$, respecto a la correlación de datos crudos.

En todas las figuras observamos que existe un sesgo hacia la izquierda y para lograr una distribución normal de estos valores, se recurrió a otros métodos estadísticos, tal como veremos a continuación.

3. Análisis de la prueba t de Welch

La Figura 20 muestra los valores resultantes de la prueba t-Welch que compara CRP- H versus TEG- H_{TSY} con CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QD en días con $Kp < 4$, obteniéndose un valor de t mayor que el t -crítico. Esto significa que las distribuciones semi-normales entre ambas correlaciones no son iguales. De nuevo, se aprecia una mejora en la distribución z-Fisher de las correlaciones CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QD, respecto a las correlaciones CRP- H versus a TEG- H_{TSY} , con una media de z-Fisher de 0,56 para el primer caso.

Para los días activos, cuando se resta la variación diaria, no hay un cambio significativo cuando comparamos las mismas correlaciones (ver Figura 21), porque la variación diaria es mucho menor que los valores de H - en estos casos (media de z-Fisher = 0,55).

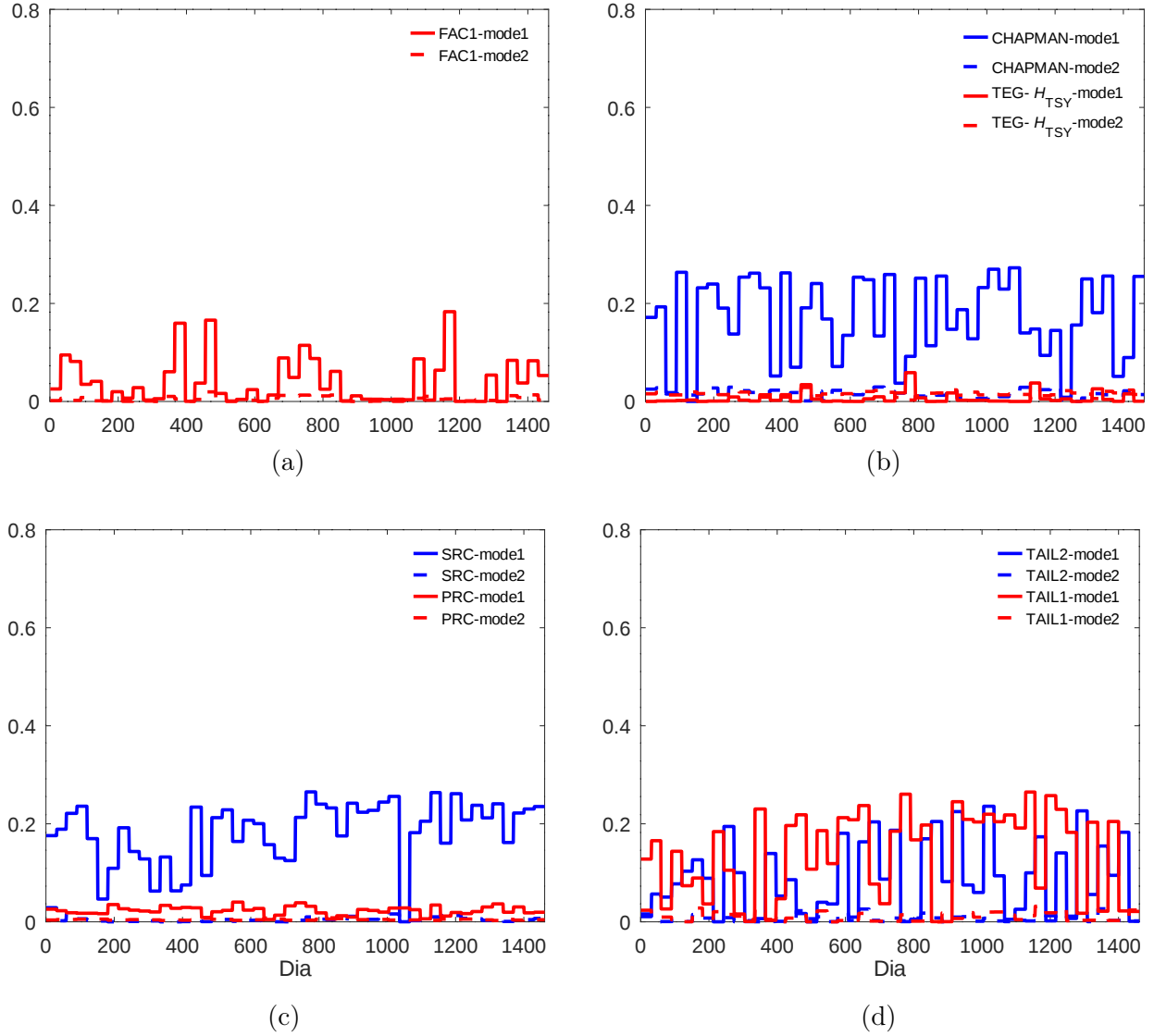


Figura 15: Proyección de la matriz de días calmos de la componente H - de cada corriente magnetosférica sobre los modos 1 y 2 de los EOF del modelo NOCSq de Chiripa, en el intervalo temporal de 0,00 a 12,00 horas tiempo local: (a) Birkeland; (b) Chapman-Ferraro y magnetosfera total; (c) Anillo simétrico y anillo parcial; (d) Corriente transversal de la cola, regiones 1 y 2.

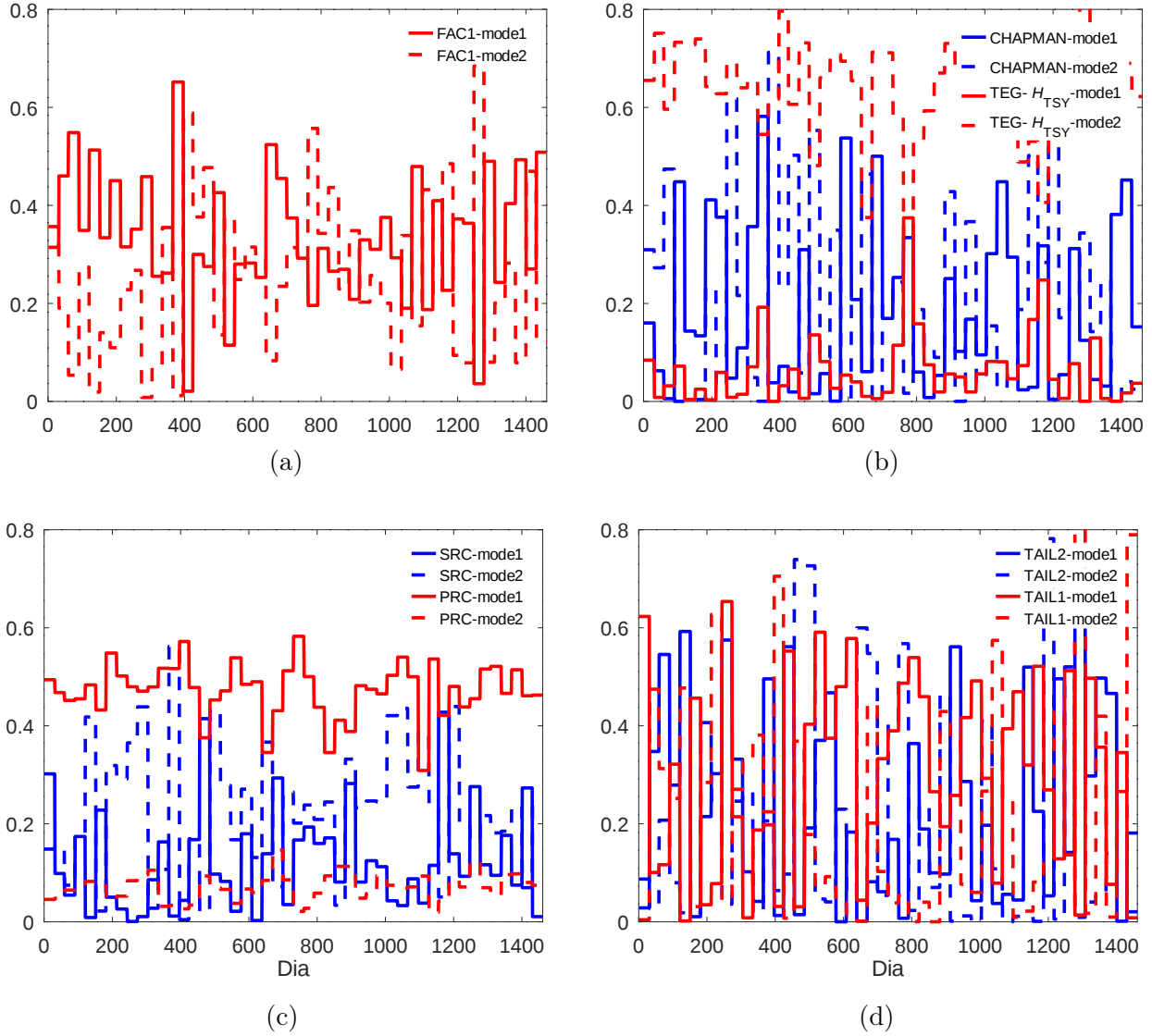


Figura 16: Proyección de la matriz de días calmos de la componente H - de cada corriente magnetosférica sobre los modos 1 y 2 de los EOF del modelo NOCSq de Chiripa, en el intervalo temporal de 12,00 a 0,00 horas tiempo local: (a) Birkeland; (b) Chapman-Ferraro y magnetosfera total; (c) Anillo simétrico y anillo parcial; (d) Corriente transversal de la cola, regiones 1 y 2.

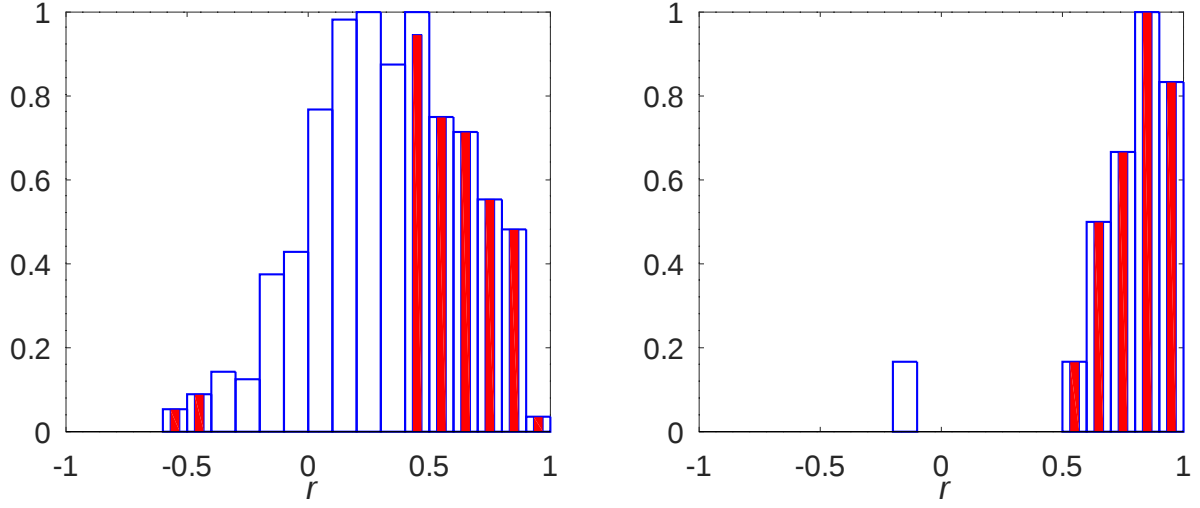


Figura 17: Izquierda: Histograma normalizado de r entre CRP- H y TEG- H_{TSY} para $K_p < 4$. Derecha: Igual que el panel izquierdo para $K_p > 4$. En ambos, las barras blancas son todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor $p \leq 0,05$.

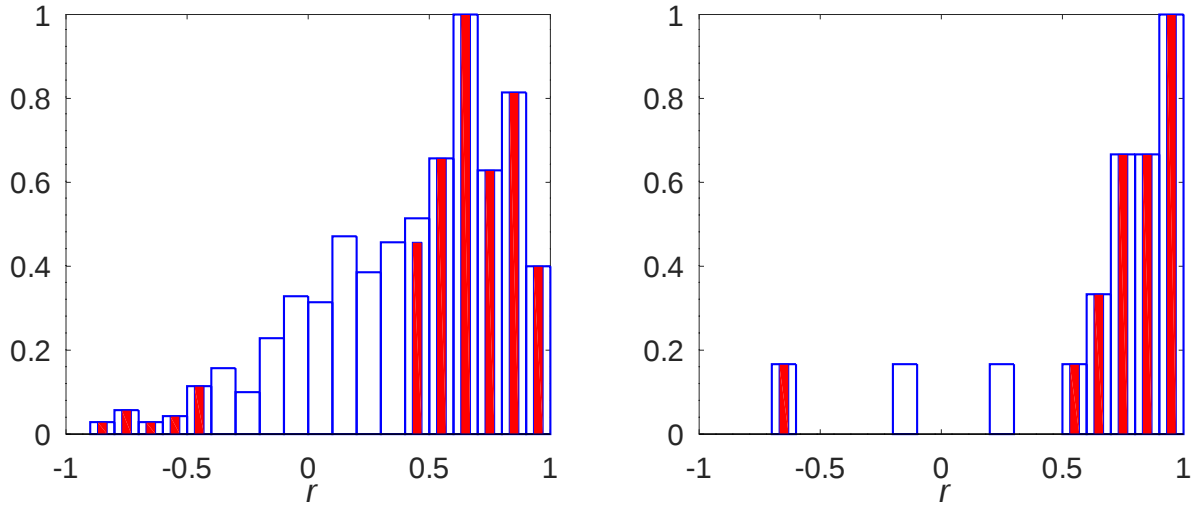


Figura 18: Izquierda: Histograma normalizado de r entre CRP- H -wo-Sq y TEG- H_{TSY} -wo-QDV para $K_p < 4$. Derecha: Igual que el panel izquierdo, para $K_p > 4$. En ambos, las barras blancas son los recuentos de todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor $p \leq 0,05$.

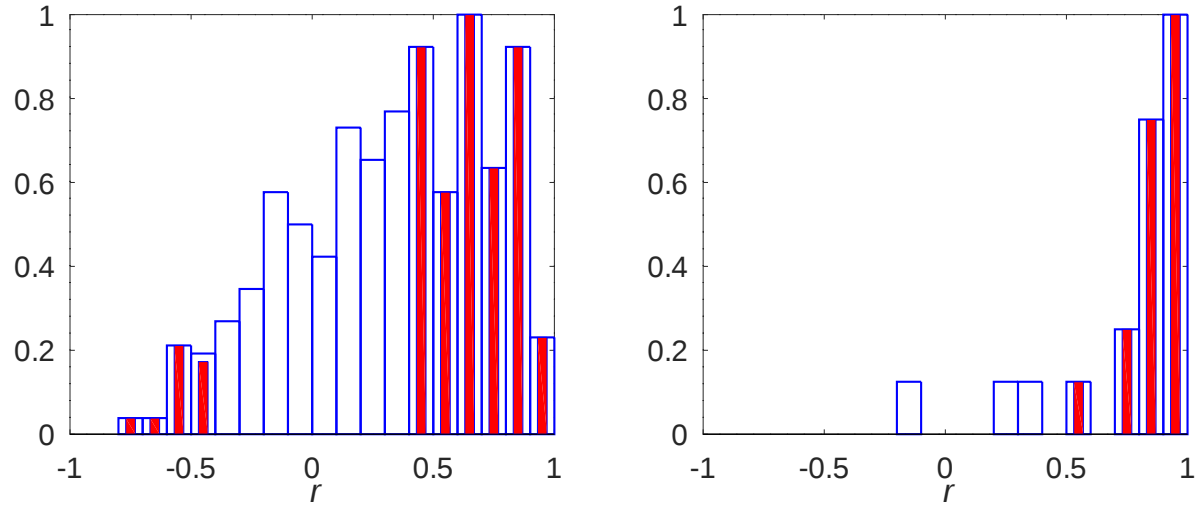


Figura 19: Izquierda: Histograma normalizado de r entre CRP-wo-NOCSq₂- H y TEG- H_{TSY} -wo-QDV para $K_p < 4$. Derecha: Igual al panel izquierdo, para $K_p > 4$. En ambos, las barras blancas son todas las correlaciones y las barras rojas son los recuentos con valor $p \leq 0,05$.

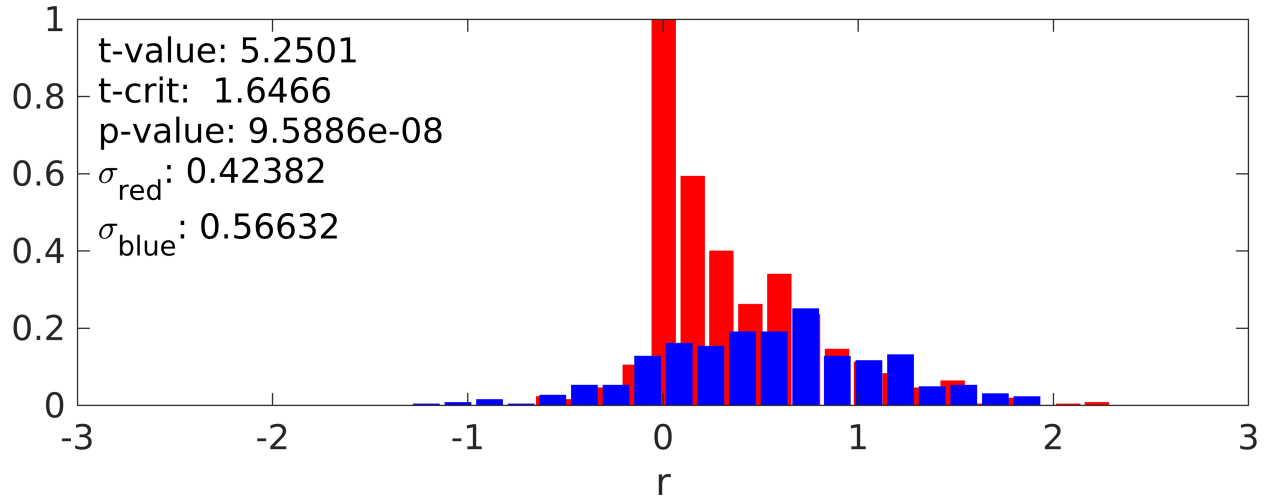


Figura 20: Resultados de la prueba t entre la distribución de Fisher de CRP- H versus TEG- H_{TSY} (rojo) y el correspondiente CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QDV (azul), en días con $K_p < 4$

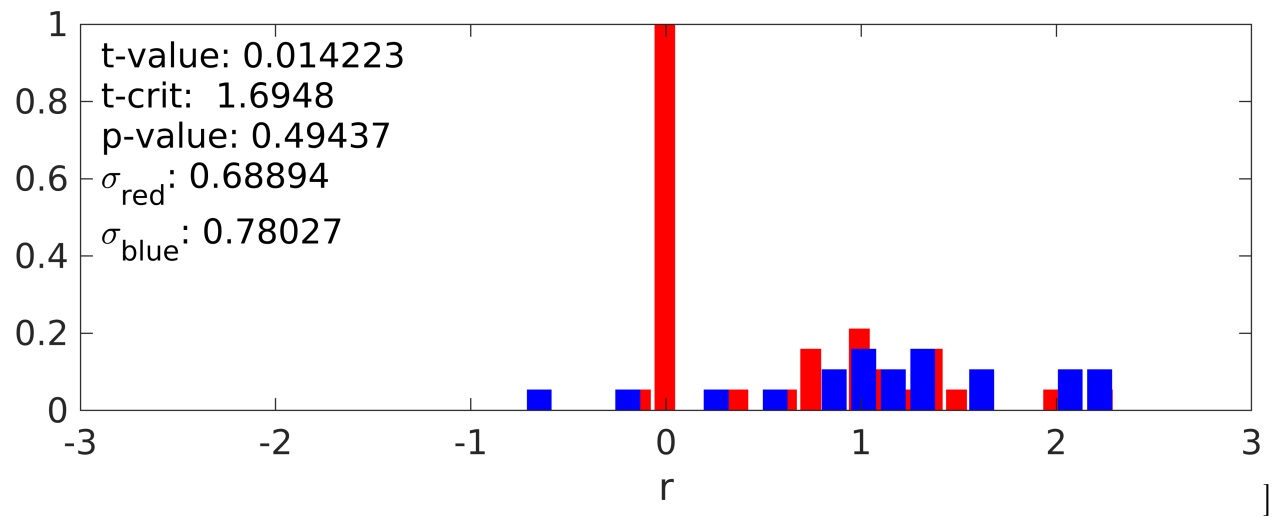


Figura 21: Resultados de la prueba t entre la distribución de Fisher de CRP- H versus TEG- H_{TSY} (rojo) y el correspondiente CRP- H -wo-Sq versus TEG- H_{TSY} -wo-QDV (azul), en días con $Kp \geq 4$.

H. Conclusiones

- Es conocido que la variación diaria en días calmos, S_q , contiene una contribución de las corrientes magnetosféricas (e.g., Xu, 1992; Yamazaki y Maute, 2017; Lühr y col., 2017) y que durante las tormentas geomagnéticas, la depresión en la componente horizontal H - se incrementa considerablemente en el sector del atardecer (e.g., Tsyganenko, Singer y Kasper, 2003; Tsyganenko y Sitnov, 2005. En la latitud de Tegucigalpa, encontramos que también para días calmos, la influencia magnetosférica parece ser considerablemente mayor en el sector del atardecer (12,00 – 0,00 horas tiempo local), respecto al sector del amanecer (0,00 – 12,00 horas), para todas las corrientes magnetosféricas, especialmente el anillo parcial de corriente y las corrientes de Birkeland, cuya contribución siempre es positiva (ver figuras 15 y 16). Se requiere realizar un análisis mas detallado para identificar porqué son mas importantes las contribuciones de los modos 1 o 2 en cada caso (ver Xu y Kamide, 2004; De Michelis, Tozzi y Consolini, 2010; Castillo y col., 2017).
- La contribución del modo 2 de la suma de las corrientes magnetosféricas ($TEG-H_{TSY}$) en el sector del atardecer es considerablemente mayor (30 % a 80 %) que en el sector del amanecer (muy cercana a cero). Se debe analizar el porqué contribuye mas que el modo 1 (ver Xu y Kamide, 2004; De Michelis, Tozzi y Consolini, 2010).
- Las correlaciones entre datos de Chiripa y el modelo TS05 en días con $K_p < 4$ mejoran al remover de los datos de Chiripa la variación diaria en días calmos, debido a que así se remueve la contribución de la ionosfera, la contribución de la magnetosfera en días calmos y la contribución de litosfera, mientras que del modelo TS05 se remueve solo contribución magnetosférica en días calmos (ver Castillo, 2018).
- Por otro lado, las correlaciones en días con $K_p \geq 4$ (20 días) no mejoran significativamente cuando se remueven las respectivas variaciones diurnas en días calmos, porque la contribución de variación diaria es mucho menor a la intensidad de una tormenta. Esto se refleja en la prueba t de Welch, que nos indica que no hay mayor diferencia entre las correlaciones con datos crudos y las correlaciones corregidas. No obstante, la muestra es muy pequeña y se recomienda repetir el proceso para una muestra estadísticamente significativa (ver Castillo, 2018).
- Una vez obtenidos los datos del Observatorio Magnético, se propone replicar la metodología aquí desarrollada para analizar la influencia de las corrientes magnetosféricas en el sitio del observatorio y validar el uso del modelo TS05 para futuros estudios de geofísica y de amenazas de clima espacial, e.g., efectos de corrientes inducidas en transformadores de líneas primarias de potencia eléctrica (e.g., Alves-Ribeiro, Pinheiro y Pais, 2021), prevención de riesgos sísmicos (e.g., KUK-ÀHPÁN, 2021), etc.

I. Plan de trabajo

Nº	Actividad	Meses
1	Lectura de libros, tesis, papers y sitios Web.	may - jul 2021
2	Elaboración de la estructura inicial de la propuesta de tesis.	jun 2021
3	Cálculo de IGRF con GEOPACK-2008 para Fortran 95.	jun 2021
4	Limpieza de datos horarios Chiripa de 2010-2013.	jun 2021
5	Remoción de la media diurna de los datos de Chiripa.	jun 2021
6	Cálculo de modelo de variación diurna en días calmos.	jun 2021
7	Proyección de matrices de días calmos internacionales de las corrientes magnetosféricas sobre los EOF del modelo Sq.	jul 2021
8	Correlaciones de Pearson entre datos CRP y modelo Tsyganenko, tanto con valores crudos como con valores sin QDV.	jul 2021
9	Utilizar la transformada de z-Fisher para convertir histogramas sesgados a histogramas semi-gaussianos.	jul 2021
10	Hacer la prueba de t-Welch entre las correlaciones de valores crudos y las correlaciones de valores sin QDV.	jul 2021
11	Elaboración y selección de gráficos para propuesta de tesis.	jul 2021
12	Elaboración de póster para reunión de otoño de AGU 2021, con los resultados obtenidos a la fecha.	jul 2021
13	Corrección y revisión de propuesta de tesis.	ago 2021
14	Defensa de propuesta de tesis.	ago 2021
15	Desarrollo de la metodología con los datos del Observatorio Magnético de Honduras y el modelo TS05 en las mismas coordenadas del observatorio.	sep - oct 2021
16	Análisis de resultados, discusión y conclusiones.	nov - dic 2021
17	Revisiones del borrador de tesis.	ene - feb 2022
18	Defensa de tesis.	mar 2022

J. Referencias bibliográficas

- Alves-Ribeiro, J., F.J.G. Pinheiro y M.A. Pais (2021). «First estimations of geomagnetically induced currents in the South of Portugal». En: *Space Weather* 19. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020SW002546>.
- Atmospheric Research, University Corporation for (2014). *The Ionosphere*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/ionosphere>.
- Baumjohann, W y R Nakamura (2007). «Magnetospheric contributions to the terrestrial magnetic field». En: 5, págs. 77-92.
- Bäumen, H.H. Schulte in dem, D. Moran, M. Lenzen, I. Cairns y A. Steenge (2014). «How severe space weather can disrupt global supply chains». En: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 2749–2759. DOI: <http://10.5194/nhess-14-2749-2014>.
- Cannon, Paul, Matthew Angling, Les Barclay, Charles Curry, Clive Dyer, Robert Edwards, Graham Greene, Michael Hapgood, Richard Horne, David Jackson, Cathryn Mitchell, John Owen, Andrew Richards, Christopher Rogers, Keith Ryden, Simon Saunders, Sir Martin Sweeting, Rick Tanner, Alan Thomson y Craig Underwood (2013). *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. last access: 9 September 2014. London. URL: <http://www.raeng.org.uk/spaceweather>.
- Castillo, Yvelice (2018). «The impact of solar activity on terrestrial ionosphere and magnetosphere using observational data of the Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra». Tesis doct. Universidade de Coimbra.
- Castillo, Yvelice, Maria Alexandra Pais, João Fernandes, Paulo Ribeiro, Anna L. Morozova y Fernando J.G. Pinheiro (2017). «Geomagnetic activity at Northern Hemisphere's mid-latitude ground stations: How much can be explained using TS05 model». En: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 165-166, págs. 38-53. ISSN: 1364-6826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682617303668>.
- De Michelis, P., R. Tozzi y G. Consolini (2010). «Principal components' features of mid-latitude geomagnetic daily variation». En: *Annales Geophysicae* 28.12, págs. 2213-2226. DOI: 10.5194/angeo-28-2213-2010. URL: <https://angeo.copernicus.org/articles/28/2213/2010/>.
- Eastwood, J. P., E. Biffis, M. A. Hapgood, L. Green, M. M. Bisi, R. D. Bentley, R. Wicks, L.-A. McKinnell, M. Gibbs y C. Burnett (2017). «The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand?». En: *Risk Analysis* 37.2, págs. 206-218. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12765>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/risa.12765>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/risa.12765>.
- Finlay, C. C., S. Maus, C. D. Beggan, T. N. Bondar, A. Chambodut, T. A. Chernova, A. Chulliat, V. P. Golovkov, B. Hamilton, M. Hamoudi, R. Holme, G. Hulot, W. Kuang, B. Langlais, V. Lesur, F. J. Lowes, H. Lühr, S. Macmillan, M. Manda, S. McLean, C. Manoj, M. Menvielle, I. Michaelis, N. Olsen, J. Rauberg, M. Rother, T. J. Sabaka, A. Tangborn, L. Tøffner-Clausen, E. Thébaud, A. W. P. Thomson, I. Wardinski, Z. Wei y T. I. Zvereva (dic. de 2010). «International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation». En: *Geophysical Journal International* 183.3, págs. 1216-1230. ISSN: 0956-

- 540X. DOI: {10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x}. eprint: <https://academic.oup.com/gji/article-pdf/183/3/1216/1785065/183-3-1216.pdf>.
- Frazier, Sarah y Lina Tran (2019). *10 Things to Know About the Ionosphere*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/news/1127/10-things-to-know-about-the-ionosphere/>.
- Homeier, Nicole y Lisa Wei (2013). *Solar Storm risk to the North American grid*. last access: 4 June 2014. URL: <https://www.lloyds.com/~media/lloyds/reports/emerging-risk-reports/solar-storm-risk-to-the-north-american-electric-grid.pdf>.
- Hussey, J. (2014). *Bang to Eternity and Betwixt: Cosmos*. John Hussey. URL: <https://books.google.cz/books?id=NhHvAwAAQBAJ>.
- Jankowski, Jerzy y Christian Sucksdorff (1996). *Guide for magnetic measurements and observatory practice*. eprint: <http://www.iaga-aiga.org/data/uploads/pdf/guides/iaga-guide-observatories.pdf>.
- KUK-ÀHPÁN, Proyecto (2021). *KUK ÀHPÁN: Estudio regional integrado de la estructura y evolución 4D de la litosfera en América Central. Implicaciones en el cálculo de la amenaza y riesgo sísmico*. URL: <https://blogs.upm.es/proyectokukahpan/sobre-el-proyecto/>.
- Lanzerotti, L.J. (2000). «Space Weather Effects on Communications». En: *Space Storms and Space Weather Hazards* 18, págs. 313-334.
- Luhmann, J. G. y S. C. Solomon (2014). *Encyclopedia of the Solar System*. Tomado de ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/planetary-magnetosphere>.
- Lühr, Hermann, Chao Xiong, Nils Olsen y Guan Le (2017). «Near-Earth Magnetic Field Effects of Large-Scale Magnetospheric Currents». En: *Space Science Reviews* 206, págs. 521-545. DOI: 10.1007/s11214-016-0267-y.
- Monge, L., C. Alvarado Briceño, M. Molinac, F. Zorto, E. Gross, J. Mejuto, V. Hernández y M. Becker (2018). «MORAZÁN MRZ-SAT cubesat project for integration of the Central American Nations trough collaboration in space». En: URL: https://www.researchgate.net/publication/336889086_MORAZAN_MRZ-SAT_CUBESAT_PROJECT_FOR_INTEGRATION_OF_THE_CENTRAL_AMERICAN_NATIONS_TROUGH_COLLABORATION_IN_SPACE.
- NASA (2021). *Earth's Magnetosphere*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://www.nasa.gov/magnetosphere>.
- NOAA (2011a). *radio blackout*. Last accessed 11 August 2021. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- NOAA (2011b). *Solar Radiation Storm*. Last accessed 11 August 2021. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-radiation-storm>.
- (Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research), OFCMS (1995). *The National Space Weather Program - Strategic Plan*.
- Oughton, E., J. Copic, A. Skelton, V. Kesaite, Z. Y. Yeo, S. J. Ruffle, M. Tuveson, A. W. Coburn y D. Ralph (2016). «Helios Solar Storm Scenario». En:
- Pirjola, R. J., A. Viljanen, A. Pulkkinen y O. Amm (2000). «Space weather risk in power systems and pipelines». En: 25 (4), págs. 333-337. DOI: <https://doi.org/10.1016/S1464->

- 1917(00)00027-1. eprint: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464191700000271>.
- Portillo, German (2020). *Campo Magnetico terrestre*. Last accessed 19 July 2021. URL: https://www.meteorologiaenred.com/campo-magnetico-terrestre.html#Importancia_del_campo_magnetico.
- Pulkkinen, T. (2007). «Space Weather: Terrestrial Perspective». En: *Space Storms and Space Weather Hazards* 4. accessed 27 May 2010. URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2007-1>.
- Sitnov, M. I. (2011). «Empirical Modeling of the Geomagnetic Field». En: Last accessed 11 August 2021. URL: https://rbspgway.jhuapl.edu/geomag_field/model/index.html.
- Sitnov, M. I., N. A. Tsyganenko, A. Y. Ukhorskiy y P. C. Brandt (2008). «Dynamical data-based modeling of the storm-time geomagnetic field with enhanced spatial resolution». En: *Journal of Geophysical Research* 113.A07218. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JA013003>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JA013003>.
- Tsyganenko (1998). «Modeling of twisted/warped magnetospheric configurations using the general deformation method». En: *Journal of Geophysical Research* 103.A4, 23551–23563. DOI: <https://doi.org/10.1029/98JA02292>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/98JA02292>.
- Tsyganenko, Dr. N. A. (2021). *Tsyganenko Magnetic Field Model and GEOPACK s/w*. Last accessed 19 July 2021. URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/magnetos/tsygan.html>.
- Tsyganenko, N. A. (2014). «Data-based modeling of the geomagnetosphere with an IMF-dependent magnetopause». En: *J. Geophys. Res. Space Physics*, 335–354. DOI: 10.1002/2013JA019346.
- Tsyganenko, N. A., H. J. Singer y J. C. Kasper (2003). «Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get?». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 108.A5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2002JA009808>.
- Tsyganenko, N. A. y M. I. Sitnov (2005). «Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110.A3. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2004JA010798>.
- Turbitt, C. (2018). *Data Processing. IAGA-Workshop 2018 Summer School*. URL: <https://cobs.zamg.ac.at/iaga2018/index.php/downloads/summary/3-summerschool/3-lecture-chris-turbitt-dataanalysis>.
- Wei, L. H., N. Homeier y J. L. Gannon (2013). «Surface electric fields for North America during historical geomagnetic storms». En: 11, págs. 451-462. DOI: <https://doi.org/10.1002/swe.20073>.
- Xu, Wen-Yao (1992). «Effects of the Magnetospheric Currents on the Sq-Field and a New Magnetic Index Characterizing Sq Dynamo Current Intensity». En: *Journal of geomagnetism and geoelectricity* 44.6, págs. 449-458. DOI: 10.5636/jgg.44.449.

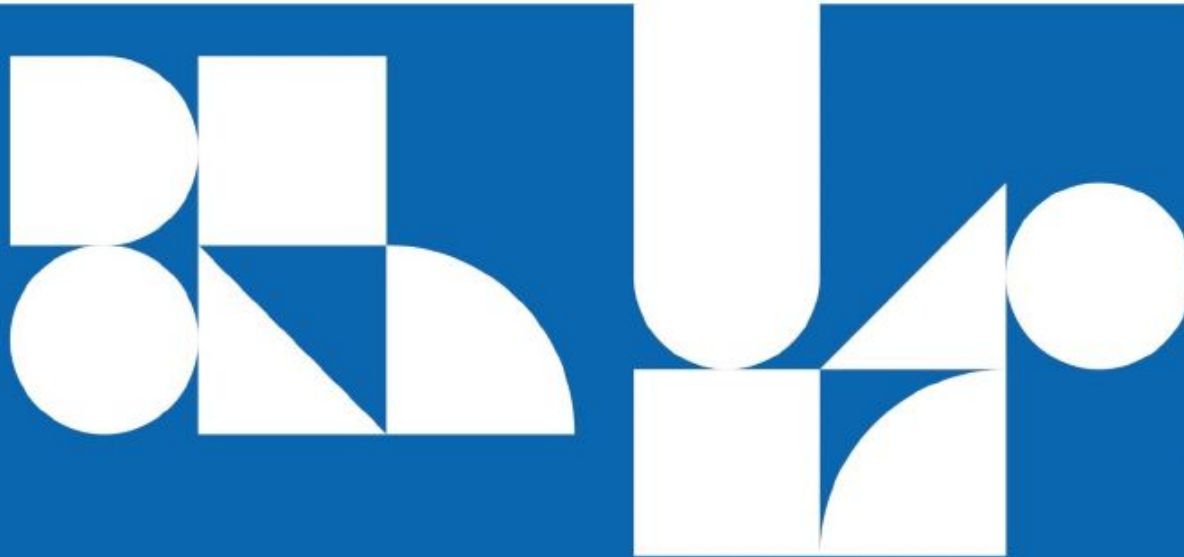
- Xu, Wen-Yao e Y. Kamide (2004). «Decomposition of daily geomagnetic variations by using method of natural orthogonal component». En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 109.A5. DOI: 10.1029/2003JA010216. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2003JA010216>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003JA010216>.
- Yamazaki, Yosuke y Astrid Maute (2017). «Sq and EEJ—A review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents». En: *Space Science Reviews* 206.1-4, págs. 299-405. DOI: 10.1007/s11214-016-0282-z. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-016-0282-z>.



**IX CONGRESO
UNIVERSITARIO
CENTROAMERICANO
DEL CSUCA
16 y 17 JUNIO
HONDURAS 2021**

Ph.D. Yvelice Castillo, Ph.D. Javier Mejuto

**¿PORQUÉ NUESTRAS
UNIVERSIDADES
DEBEN INVERTIR
MAS EN
INFRAESTRUCTURA
PARA CIENCIA?
EL CASO DEL PRIMER
OBSERVATORIO
MAGNÉTICO DE HONDURAS**





COLABORADORES Y COOPERANTES

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS

Departamento de Astronomía y Astrofísica

**Departamento de Astronomía y Astronomía Cultural
(Facultad de Ciencias Espaciales, FACES)**

Departamento de Ciencias de la Tierra (Facultad de Ciencias)

Laboratorio de Ingeniería Civil (Facultad de Ingeniería)

Centro Universitario del Litoral Pacífico (CURLP)

INTERNACIONALES

Servicio Geológico Británico (BGS) – Grupo INDIGO

Geoforschungszentrum (GFZ) de Alemania

**Centro de Investigación para la Tierra y el Espacio de la Universidad de
Coimbra (CITEUC)**

Observatorio Nacional de Brasil

Instituto de Geofísica de la UNAM

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

Observatorio Santa Helena de Costa Rica





OBJETIVOS DE UN OBSERVATORIO

- **Capturar las fuentes del vector de campo magnético natural en la superficie de la tierra, libre de interferencias artificiales.**
- **Mantener series temporales continuas, de banda ancha, absolutas y a largo plazo.**
- **Publicar los resultados para uso en el ámbito académico y comercial.**





OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- . Los registros serán publicados en el World Data Centre for Geomagnetism y en INTERMAGNET, la red de observatorios magnéticos mas grande del mundo, dando visibilidad mundial a la ciencia de la región.**
- . Consolidar grupos de investigadores en campo magnético terrestre, clima espacial, corrientes inducidas geomagnéticas y otros.**





APLICACIONES POSTERIORES

- **Análisis geofísico del suelo.**
- **Medición de anomalías magnéticas para prevención de riesgos sísmicos.**
- **Estudio de corrientes inducidas en el suelo y en redes de potencia eléctrica.**
- **Elaboración de mapas magnéticos.**
- **Ser parte del modelo magnético global (IGRF).**





II TALLER PANAMERICANO DE GEOMAGNETISMO

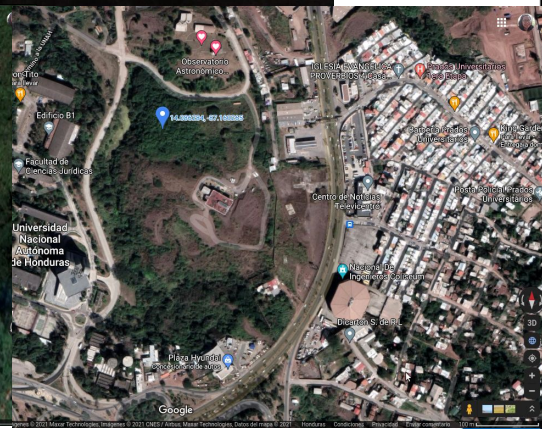


Vassouras, Brasil, noviembre de 2017





EVALUACIÓN DE SITIOS



**Arriba: Nueva Rosario. Abajo, de izq. a der:
UNAH-Tec Danlí; El Piligüín; Ciudad Universitaria.**





EVALUACIÓN DE SITIOS



**Centro de Investigaciones Acuícolas y Pesqueras (CIAP) del
Centro Universitario Regional del Litoral Pacífico de la UNAH**





PROPUESTAS PARA OBTENCIÓN DE FONDOS

Part A: To be completed by the Project Implementer

Project Title	The Honduras' first magnetic station as a counterparty for seismic risk and threat prevention.
Which thematic objective does this intervention help meet (e.g. climate change, human rights and democracy, economic growth and improving business environment, illegal wild life trade, disaster risk preparedness, beyond plastics)	Disaster risk preparedness.
Purpose <i>This must be NO MORE than one sentence, clearly setting out the "change" to be delivered</i>	To build a magnetic station as a counterparty for local geomagnetic anomalies identification for seismic risk and threat prevention.
Short Project Summary <i>In no more than 200 words explain what the project plans to achieve and how (setting out how the Outputs will deliver the Purpose/Objective, and how the activities will deliver each relevant Output), and what difference will it make on the ground over the next few years?</i> <i>This question will be looked at again during any Evaluation of this project, and when an Impact Report is done. The success of the project will largely be judged on what is said here</i>	The first permanent geomagnetic observatory of Honduras will be established to register in a continuous and absolute basis the magnitude and direction of the Earth's magnetic field vector, and their variations over a baseline. One of the magnetic observatory applications is the detection of major space weather events (i.e., geomagnetic storms). This detection is necessary to identify the local geomagnetic anomalies that contribute to seismic risk and threat prevention. The project execution demands to construct the facilities (two small huts), driveways and perimeter fence, the equipment installation, and the safety personnel recruitment. The equipment, software, hardware, and training related has been matched with the INDIGO project (Intermagnet Digital Geomagnetic Observatories) of the British Geological Survey. This station also intends to be linked to the project "KUK ÀHPÁN: Integrated Regional Study of the Structure and 4D Evolution of the Lithosphere in Central America. Implications in the Calculation of Seismic Risk and Threat", an international project integrated by researchers of Spain, Honduras, Guatemala, El Salvador, Nicaragua, and the Dominican Republic, funded by the Ministry of Science, Innovation, and Universities of the Government of Spain with reference code: RTI-09427-B-C21/C22.

**Becas de la Oficina de Asuntos Exteriores y del
Commonwealth de Reino Unido**





PROPUESTAS PARA OBTENCIÓN DE FONDOS

2019 OWSD Early Career Fellowship

Yvelice Soraya Castillo Rosales

The application must be completed in English by the individual project leader.

Please read the eligibility criteria at this [link](#).

While completing this application please use the helptexts where available.

Please note that the system will only accept your application if you answer all the mandatory questions and upload the documents when requested. Mandatory questions are marked with an asterisk*.

All documents must be uploaded through this online application system. Do not email any document to OWSD unless requested. The OWSD Secretariat reserves the right to judge an application ineligible if the answers and/or documentation do not correspond to the specific question asked (e.g. blank documents, false certification, etc.).

Have you read the information about eligibility criteria at the relevant link above? *

Yes

Family name/Surname (as it appears in your passport) *

Castillo Rosales

Given name(s) (as it appears in your passport) *

 IHCIETI Instituto Hondureño de Ciencia, Tecnología y la Innovación	 GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DE HONDURAS	 SECRETARÍA NAACI TECNOLOGÍA Y I
FORMULARIO "A" PROPUESTA TÉCNICA		
Código: ICDT-A01	Versión: 02 Página 1 de 17	Elaboró: Departamento de Investigación Científica Aprobó: Dirección Ejecutiva

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN APLICADA (PIA) 2021

A. INFORMACIÓN GENERAL

TÍTULO DEL PROYECTO

PRIMER OBSERVATORIO GEOMAGNÉTICO DE HONDURAS

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO

Biotechnología	☐
Tecnologías de la información y la comunicación (TIC)	☐
Energía y medio ambiente	☒
Electrónica aplicada	☐
Ciencia e ingeniería de materiales	☐

NOTA: Seleccionar todas las que apliquen.

RESUMEN DEL PROYECTO

El "PRIMER OBSERVATORIO GEOMAGNÉTICO DE HONDURAS" se instalará dentro de los predios de Ciudad Universitaria, Tegucigalpa. La medición continua de las variaciones del campo magnético terrestre permitirá determinar la intensidad de las corrientes eléctricas que penetran desde el espacio exterior, atraviesan la atmósfera terrestre y el suelo hasta varios kilómetros de profundidad, y que pueden causar sobrecargas en las líneas de potencia eléctrica, daños a los satélites y a los sistemas dependientes de ellos, como GPS, drones, navegación aérea, marítima y terrestre, redes bancarias, aplicaciones geodésicas y de ingeniería, transmisiones de televisión, de sistemas meteorológicos, militares, comunicaciones UHF y VLF, etc. El grupo INDIGO (Observatorios geomagnéticos digitales de la red INTERMAGNET), con sede en Reino Unido, proveerá los instrumentos necesarios para la medición continua de la intensidad del campo magnético terrestre y de las perturbaciones al mismo, ocasionadas por eventos solares intensos que impactan a la Tierra (eventos geomagnéticos). Se pretende que el Observatorio Geomagnético de Honduras llegue a formar parte de la red de observatorios geomagnéticos global INTERMAGNET, y que sus datos se publiquen de manera continua en los portales Web del *World Data Centre for Geomagnetism, Edinburgh*, y de *INTERMAGNET*. Sus datos permitirán realizar posteriormente estudios de campo magnético terrestre,

**Beca de la Organización para Mujeres en Ciencia para Países en
Desarrollo (OWSD), Beca del Instituto Hondureño de Ciencia y Tecnología**



PUBLICACIONES

Scanning the crust with magnetospheric currents

Fernando Pinheiro¹ Paulo Ribeiro¹ Fernando M. Santos² Yvelice Castillo⁵ Alexandra Pais^{1,3} Cristiana Francisco³ Anna Morozova¹ João Fernandes^{1,4}

¹CITEUC, Geophysical and Astronomical Observatory, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

²IDL, Faculdade de Ciências, Lisbon University, Lisbon, Portugal

³Department of Physics, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

⁴Department of Mathematics, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

⁵Department of Astronomy and Astrophysics, National Autonomous University of Honduras, Tegucigalpa, Honduras



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



INSTITUTO
DOM LUIZ

FCT
Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

A proposal for a Magnetic Observatory in Honduras

Yvelice Castillo^[1,2,3], M. Alexandra Pais^[1,3], P. Ribeiro^[2], João Fernandes^[1,4], Anna L. Morozova^[1], Fernando J. G. Pinheiro^[1]

[1] CITEUC, Geophysical and Astronomical Observatory, University of Coimbra, 3040-004 Coimbra, Portugal; [2] Department of Astronomy and Astrophysics, National Autonomous University of Honduras; [3] Department of Physics, University of Coimbra; [4] Department of Mathematics, University of Coimbra. yvelicesoraya@gmail.com

Abstract

The Department of Astronomy and Astrophysics of the National Autonomous University of Honduras (UNAH) is interested in installing the first magnetic observatory of Honduras. The nearest magnetic observatories are located in Costa Rica, Cuba, México, Puerto Rico and Colombia. During the II PANGEO we made the first approaches to people of those observatories. We are also in touch with the Magnetic Observatory of the University of Coimbra (COI) in Portugal, where we will make a traineeship in magnetic measurements and data treatment. Later, with local collaborators we are planning to purchase the equipment to make local geomagnetic field measurements in different places of Honduras, in order to define the best location for our future magnetic observatory. We also want to establish alliances with the nearest observatories

Magnetic observatories can monitor the geomagnetic activity and give information on the arrival of energetic particles from the Sun. They can contribute to a deeper understanding and a better prediction of space weather events

Acknowledgements

CITEUC is funded by National Funds through FCT Foundation for Science and Technology (project UID/Multi/00611/2013) and FEDER - European Regional Development Fund through COMPETE 2020 Operational Programme Competitiveness and Internationalization (project: POCI-01-0145-FEDEF-006922).

Yvelice Castillo is supported by the Department of Astronomy and Astrophysics of the UNAH.



Geomagnetic induced currents in south-western Iberia
Fernando Pinheiro^{1,3}, Joana Alves Ribeiro^{1,3}, Fernando Santos², Maria Alexandra Pais^{1,3}, Anna Morozova^{1,3}, Paulo Ribeiro^{1,4}, Yvelice Castillo⁵, Cristiana Francisco³, João Fernandes^{1,6}
¹CITEUC, Geophysical and Astronomical Observatory of UC, 3040-004 Coimbra, Portugal; ²IDL, Faculty of Sciences, University of Lisbon, Lisbon, Portugal; ³Department of Physics, University of Coimbra, R. Larga, 3004-516 Coimbra, Portugal; ⁴Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra, 3040-004 Coimbra, Portugal; ⁵Department of Astronomy and Astrophysics, National Autonomous University of Honduras, Tegucigalpa, Honduras; ⁶Department of Mathematics, University of Coimbra, Apartado 3008, 3001-501 Coimbra, Portugal

Abstract

Geomagnetic storms induce electric fields along power lines, which are the source of GICs observed at high latitudes. However, there have been accounts of GICs at mid-latitudes. For this reason, countries such as Spain, Italy and Brazil are evaluating the impact of GICs in their territory. Portugal is also giving its first steps in this field. MAG-GIC is a project funded by the Portuguese Science Foundation (FCT) aiming to assess the potential hazard of GICs on the national high voltage power grid. This project involves a collaboration with REN - the Portuguese power distribution company.

In this presentation, we show how to evaluate the geoelectric fields generated in the Portuguese mainland during some of the strongest geomagnetic storms recorded at University of Coimbra's geomagnetic observatory (IAGA code: COI) during solar cycle 24. This analysis takes into account impedance matrices computed considering local magnetotelluric (MT) observations. The geomagnetic observations are complemented with simulations from the Tsyganenko-Sitnov TS04 model, which can separate the contribution of different magnetospheric current systems, giving a better insight of the phenomena involved. Additionally, we provide our first estimations of the expected GIC values based on the real distributions of transformer stations located across the Portuguese South-West (the region with the sparsest distribution of transformer stations).

1. Introduction

Geomagnetic field disturbances (B) and ground resistivities play a key role in the generation of the GICs driving electric fields (E). As is known since Tikhonov (1950) and Cagniard (1953), the ID induced field can be expressed:

$$E_{X,Y}(\omega) = (1/\mu_0)Z(\omega) \times B_{Y,X}(\omega),$$

where $Z(\omega)$ is the MT impedance of the Earth.

Compared to the 50Hz high voltage AC current, GICs behave like a quasi-direct current. Thus the computation of GICs can be reduced to solving an electric circuit problem, using Kirchhoff laws (Lehtinen & Pirjola's, 1985):

$$GIC = (1 + YZ)^{-1}J$$

where I is the identity matrix, Y the network admittance matrix and Z the earthing impedance matrix. The "perfect-earthing" currents generated along a grounded conductor (J) are computed from the integration of the electric field along its path.

5. Preliminary GIC model

Our model was tested against Horton's (2012) benchmark. Figure 5 shows the GIC amplitudes generated at each transformer station, assuming normalised geoelectric fields of 1V/km in the North-South and East-West directions. Results for SPM, SER, SAV, STVR are unreliable, as these stations are connected to other nodes not included in the calculations (substations further north and/or connected to substations in Spain).

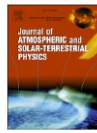
Portimão substation (SPO) seems to be the most susceptible to GICs, which makes it the right candidate for connecting a GIC sensor to test our model (see poster p11 in this session).



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jastp



Geomagnetic activity at Northern Hemisphere's mid-latitude ground stations: How much can be explained using TS05 model

Yvelice Castillo^{a,b,d,*}, Maria Alexandra Pais^{a,b}, João Fernandes^{a,c}, Paulo Ribeiro^a, Anna L. Morozova^a, Fernando J.G. Pinheiro^a

^aCITEUC, Geophysical and Astronomical Observatory, University of Coimbra, 3040-004 Coimbra, Portugal

^bDepartment of Physics, University of Coimbra, 3004-516 Coimbra, Portugal

^cDepartment of Mathematics, University of Coimbra, 3004-516 Coimbra, Portugal

^dDepartment of Astronomy and Astrophysics, National Autonomous University of Honduras, Tegucigalpa, Honduras

ARTICLE INFO

Keywords:

Magnetic observatories
Geomagnetic activity
Magnetospheric sources
Tsyganenko and Sitnov model

ABSTRACT

For the 2007 to 2014 period, we use a statistical approach to evaluate the performance of Tsyganenko and Sitnov [2005] semi-empirical model (TS05) in estimating the magnetospheric transient signal observed at four Northern Hemisphere mid-latitude ground stations: Coimbra, Portugal; Panagurishte, Bulgaria; Novosibirsk, Russia and Boulder, USA. Using hourly mean data, we find that the TS05 performance is clearly better for the X (North-South) than for the Y (East-West) field components and for more geomagnetically active days as determined by local K-indices. In ~50% (X) and ~30% (Y) of the total number of geomagnetically active days, correlation values yield $r \geq 0.7$. During more quiet conditions, only ~30% (X) and ~15% (Y) of the number of analyzed days yield $r \geq 0.7$. We compute separate contributions from different magnetospheric currents to data time variability and to signal magnitude. During more active days, all tail, symmetric ring and partial ring currents contribute to the time variability of X while the partial ring and field aligned currents contribute most to the time variability of Y. The tail and symmetric ring currents are main contributors to the magnitude of X. In the best case estimations when $r \geq 0.7$, remaining differences between observations and TS05 predictions could be explained by global induction in the Earth's upper layers and crustal magnetization. The closing of field aligned currents through the Earth's center in the TS05 model seems to be mainly affecting the Y magnetospheric field predictions.



PROCESOS ADMINISTRATIVOS

Engorrosos procesos para gestiones administrativas:

- donaciones y desaduanajes,**
- obtención y manejo de fondos,**
- construcción de infraestructura,**
- movilidad de equipo y personal,**
- contratación de nuevo personal,**
- manejo de fondos,**
- instalación de equipos,**
- manejo de inventario.**

Hace falta de una oficina encargada de la gestión de fondos para proyectos de investigación, como se acostumbra en otras universidades.





EL OBSERVATORIO DE ARECIBO

- **El ejemplo de infraestructura científica mas exitosa en Astronomía, para toda América Central y el Caribe fue el telescopio de Arecibo, en Puerto Rico, recién desmantelado por falta de financiamiento.**
- **Por muchos años fue el motor principal que impulsó la Astronomía, representando el 72% de la producción científica en Astronomía de la región.**
- **Este telescopio atraía astrónomos visitantes y motivaba a los jóvenes a estudiar astronomía y otras ciencias o ingenierías: 100.000 visitantes anuales, 30% de ellos niños (Montero-Camacho, 2021).**





PRESUPUESTOS PARA CIENCIA

- **Estos presupuestos provienen primariamente del presupuesto público asignado a la educación superior, que en Honduras es de 0,9 % del Producto Interno Bruto (PIB)¹, en Costa Rica es el 1,58 %, en Cuba es el 2,23 % (Montero-Camacho, 2021).**
- **En Costa Rica, el 56% del presupuesto público de educación superior se asigna a la UCR, la cual invierte ~12% en investigación para todas las áreas (Montero-Camacho, 2021).**

¹PIB: el valor total de bienes y servicios producidos por un país en un año (Economipedia, 2021).





CONCLUSIONES

- **Nuestros países deben reconsiderar su inversión en infraestructura, así como la simplificación de los procesos para apoyar a la investigación.**
- **Es urgente reducir y simplificar los procesos burocráticos en las universidades y en los estados, para favorecer la investigación y los proyectos científicos.**
- **El personal administrativo debe apoyar mas a los investigadores y comprender que la actividad académica universitaria no es simplemente impartir las tradicionales 3 a 5 asignaturas.**





CONCLUSIONES

- **Es necesaria también la inversión en programas de doctorado en ciencia básica, en incrementar las estadías de investigadores provenientes de países con mas desarrollo e infraestructura de investigación, para realizar investigaciones, proyectos y posdoctorados, que eleven el nivel de nuestros investigadores y de nuestras investigaciones, contribuyendo también a mejorar el nivel de vida de la sociedad.**
- **Debemos motivar mas al estudio de la ciencia desde la infancia, en particular a niñas, mediante modelos de científicos nacionales y extranjeros.**





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Turbitt, C., Gómez-Pérez, N. Magnetic Observatories & Absolute Observation Method. 2021 BGS Magnetic Observatory Training Session.
- [2] Castillo, Y., Pais, M.A., Fernandes, J., Ribeiro, P., Morozova, A.L., Pinheiro, F.J.G. (2017). "Geomagnetic activity at Northern Hemisphere's mid-latitude ground stations: How much can be explained using TS05 model". J. of Atm. and Solar-Terr. Phys. Vol 165-166. Pag. 38-53.
- [3] Castillo, Y., Pais, M.A., Fernandes, J., Ribeiro, P., Morozova, A.L., Pinheiro, F.J.G. (2018a). "A proposal for a Magnetic Observatory in Honduras". Libro de resúmenes del II Taller Panam. de Geomagnetismo.
- [4] Castillo, Y., Palma, N., Rodríguez, M., Martínez, H., Turbitt, C., Riddick, J., Rasson, J., García-Mejía, M., Barahona, C., Mejuto, J. (2019). "Caracterización del sitio para la instalación del primer observatorio magnético de Honduras." Libro de resúmenes del I Congreso de Ciencias Espaciales de la Facultad de Ciencias Espaciales (FACES) de la UNAH.
- [5] Montero-Camacho, Paulo. (20 de abril de 2021). "The Status of Astronomy in Central America and the Caribbean". Nature Portfolio Astronomy Community blog.
- [6] Pinheiro, F., Ribeiro, J., Santos, F., Pais, M.A., Morozova, A.L., Ribeiro, P., Castillo, Y., Francisco, C., Fernandes, J. (2019). "Geomagnetic induced currents in south-western Iberia". 16ª Semana Europea de Clima Espacial.



¡MUCHAS GRACIAS!