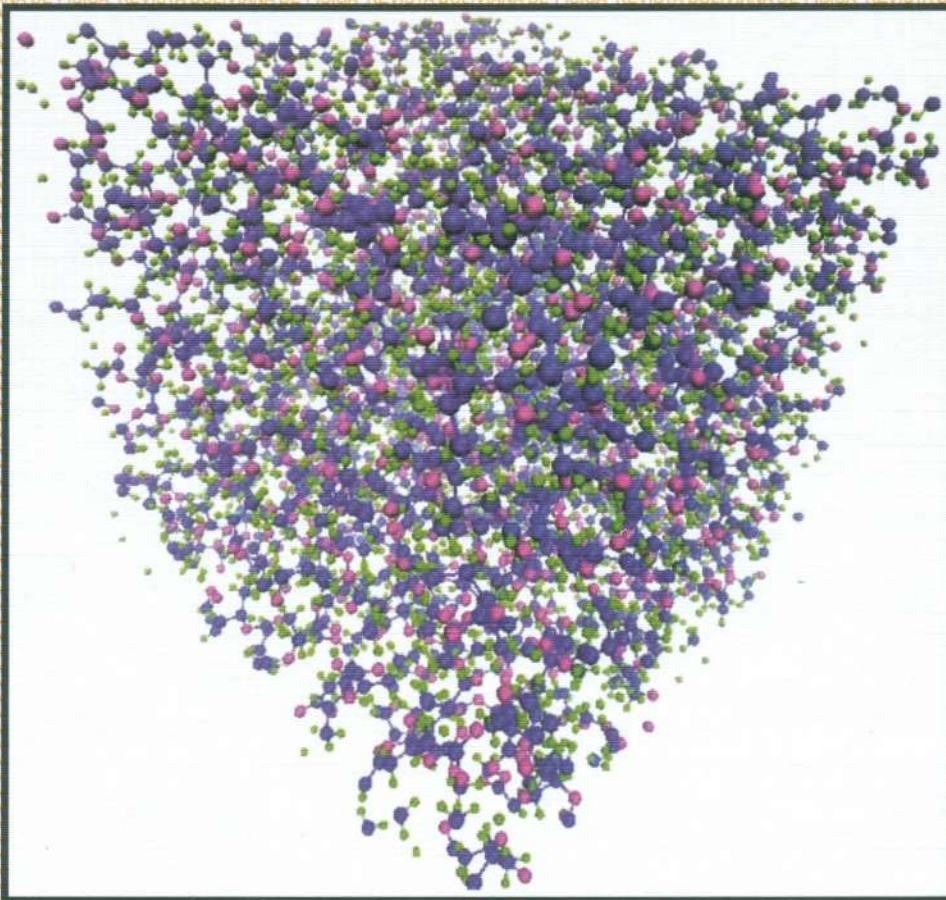


ISSN - 1562 - 3823

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 32

NOVIEMBRE 2018 • LA PAZ - BOLIVIA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
CARRERA DE FÍSICA - UMSA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

Ésta es una revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física

COMITÉ EDITORIAL

Sociedad Boliviana de Física

Lic. Alfonso Velarde Chávez

Email: avelarde@fiumsa.edu.bo

Instituto de Investigaciones Físicas

Dr. Marcelo Ramírez Ávila

Email: mravila@fiumsa.edu.bo

Carrera de Física

Dr. Armando R. Ticona Bustillos

Email: aticona@fiumsa.edu.bo

Casilla 8635, La Paz – Bolivia. Tel.: (591-2) 2792999, Fax: (591-2) 2792622

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Oscar Antonio Rondón

Institute of Nuclear and Particle Physics
University of Virginia
McCormick Road, Charlottesville, VA 22901
804 924-6787, USA
Email: or@virginia.edu

Dr. Carlos Navia

Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense
Av. Gen. Milton Tavares de Souza
24210-340, Niterói, RJ-Brasil
Email: gfcnoj@if.uff.br

Dr. Fabricio Augusto

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Minas Gerais
Brasil
Email: fbarone@unifei.edu.br

Dr. Jürgen Fritz Stilck

Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense
Av. Gen. Milton Tavares de Souza
24210-340, Niterói, RJ-Brasil
Email: jstilck@if.uff.br

ISSN 1562-3823



Revista Boliviana de Física

PUBLICACIÓN DE
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
CARRERA DE FÍSICA
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
Y
SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 32
NOVIEMBRE DE 2018

Revista Boliviana de Física

ISSN 1562-3823

Indexada en: SciELO, Latindex, Periódica

<http://www.scielo.org.bo>

<http://www.latindex.unam.mx>

Publicación del Instituto de Investigaciones Físicas, la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés y de la Sociedad Boliviana de Física.
Casilla 8635, La Paz, Bolivia.

Diseño: A. Ticona

Dirección: Carrera de Física, Campus Universitario, Calle 27, Cota Cota, La Paz.

Tel: (591 2) 2792999; FAX: (591 2) 2792622.

Portada: Configuración estable del aglomerado con 100 pentámeros en el ensamble NPT, con condiciones periódicas de contorno (La configuración corresponde a un cubo).

Formato $\text{\LaTeX}2_{\epsilon}$. *Tipo de fuente utilizada:* newcentury

IMPRESO EN BOLIVIA — PRINTED IN BOLIVIA

CONTENIDO

EDITORIAL	<i>Editor</i>	1
-----------	---------------	---

A. ARTÍCULOS

MODELO NUMÉRICO PARA EL ESTUDIO DEL SUBSUELO EN REGIONES URBANAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE INTERFEROMETRÍA SÍSMICA	<i>Miranda C. J. D. & Mansur W.</i>	3
---	---	---

DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (DEA'S - RAYOS) CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES EN EL CIELO BOLIVIANO	<i>Ricaldi Y. E. L., Torrez S. R., Qusipe C. & Qusipe M. J.</i>	12
---	---	----

DETERMINACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE TORSIÓN DEL POLIHIDROXIBUTIRATO (PHB) MEDIANTE SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE UN AGLOMERADO	<i>Colque-Zacarias E. J., Carrasco C., Ghezzi F. & Ticona-Bustillos A. R.</i>	20
--	---	----

D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE NIEBLA DE DIFUSIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES PARTÍCULAS CÓSMICAS	<i>Manzaneda A., Calle C. & Monasterios M.</i>	25
---	--	----

EDITORIAL

La gestión 2018 viene con algunos cambios en la Revista Boliviana de Física (RBF) a nivel del Comité Editorial y también en la implementación de las nuevas normas tales como la de recibir artículos originales escritos en inglés o portugués. Por el contrario, la política de árbitros extranjeros y de renombre sigue en pie con el fin de garantizar la calidad de la RBF.

Esta nueva entrega de la RBF en su número 32 muestra que los grupos de investigación del área de física de materiales mesoscópicos y geofísica están bastante activos; así, el primero empieza a plasmar en publicaciones tanto nacionales como internacionales los resultados de las investigaciones multidisciplinarias que realizan e involucran a diferentes institutos de investigación al interior de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA); en cuanto al segundo, su prolífica actividad investigativa coadyuvada por personal técnico especializado, laboratorios de tecnología de punta y colaboraciones externas, se refleja en la continuidad de publicaciones en los últimos números de la RBF.

En este número de la RBF, se presentan tres artículos científicos sometidos a proceso de arbitraje internacional. En el primer artículo, Miranda & Mansur (2018) hacen uso del modelado numérico para determinar la pertinencia de la utilización de la interferometría sísmica (IS) para estudiar el subsuelo de manera a evitar riesgo urbano. Los autores también muestran que el IS es comparable a la prospección sísmica tradicional y que además podría utilizarse incluso en microsísmica. El interesante fenómeno de descargas eléctricas atmosféricas (DEAs) es descrito por Ricaldi *et al.* (2018) quienes por medio de los registros de un seguidor de tormentas eléctricas atmosféricas, clasifican las DEAs con base a los movimientos propios de la Tierra y a los factores morfológicos del planeta. Finalmente, Colque-Zacariás *et al.* (2018) presentan los resultados de un extenso trabajo numérico utilizando la técnica de dinámica molecular, donde determinan los ángulos de torsión del polihidroxitirato (PHB), cuyos resultados son validados por su concordancia con los ya existentes en la literatura, lo cual hace de la técnica utilizada una potencial herramienta para estudios posteriores del polímero considerado y de otras moléculas que pueden tener interés práctico y de aplicaciones.

En la sección de contribuciones, más concretamente a enseñanza de la física, Manzaneda *et al.* (2018) muestran el diseño y construcción de una cámara de niebla de difusión, un sistema sencillo que permite la detección de partículas α , β y los procesos que involucran la producción de pares y el decaimiento del muón. Mediante fotogramas los autores muestran lo mencionado anteriormente. El mérito de este trabajo radica en que fue elaborado por completo por estudiantes de pregrado, lo que muestra el interés, entusiasmo y rigor que existe en la comunidad estudiantil.

Esperamos que el contenido de este ejemplar de la RBF sea de su agrado y pueda motivar al lector en la profundización de los trabajos expuestos a través de estas páginas. También invitamos a la comunidad científica a enviar sus trabajos para ser publicados en la RBF.

REFERENCIAS

- Miranda J. & Mansur W. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 3.
Ricaldi-Yarvi E. L., Tórrez R., Quispe C. & Quispe J. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 12.
Colque-Zacariás E. J., Carrasco C., Ghezzi F. & Ticona-Bustillos A. R. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 20.
Manzaneda O., Calle-García C. A. & Monasterios M. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 25.

EDITORIAL

During 2018 some changes were made in the Bolivian Journal of Physics (RBF) at the Editorial Committee level and also in the implementation of new norms such as the receipt of original articles written in English or Portuguese. The policy of external and renowned referees remains in place in order to guarantee the quality of the RBF.

This new issue of the RBF in its number 32 shows research groups in the area of mesoscopic materials and geophysics to be quite active. The first group is characterized by its multidisciplinary nature/approach involving different research institutes within the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) and is gradually giving result to both national and international publications. The second group demonstrates a continuity of solid research and publications in the RBF, as well as, underlining productive research activity carried out with the help of technicians, specialized and state of the art laboratories, and external collaborations.

In this issue of the RBF, three scientific articles have been submitted to the international arbitration process. In the first article, Miranda & Mansur (2018) make use of numerical modelling to determine the pertinence of seismic interferometry (IS) in subsoil studies that also help prevent urban risks. The authors also show that IS is comparable to traditional seismic prospecting and could also be used in micro seismic conditions/situations. Secondly, the interesting phenomena of atmospheric electrical discharges is described by Ricaldi *et al.* (2018) who by using data recorded by storm trackers have been able to classify AEDs based on the Earth's movements and morphological factors. Finally, Colque-Zacarias *et al.* (2018) present the results of an extensive numerical work using the technique of molecular dynamics, where they determine the polyhydroxybutyrate (PHB) torsion angles, and whose results are validated by their concordance with those found in existing literature. This shows the technique used to be a potential tool for further studies of PHB and other molecules that may have a practical interest.

In the contributions section, more concretely in what concerns teaching physics, Manzaneda *et al.* (2018) show the design and how to construct a diffusion cloud chamber, a simple system that allows the detection of α and β particles, as well as the processes involving the pair production and the muon-decay. The authors show the above-mentioned aspects using photograms. The merit of this work lies in that it was developed entirely by undergraduate students, which shows the interest, enthusiasm, and rigor that exists in the student community.

We hope that this issue of the RBF is of interest to the scientific community and that at the same time it motivates scientists to send their intellectual work for publication. We are grateful for the SciELO platform which is freely accessible to the entire scientific community and the general public.

REFERENCIAS

- Miranda J. & Mansur W. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 3.
Ricaldi-Yarvi E. L., Tórrez R., Quispe C. & Quispe J. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 12.
Colque-Zacarias E. J., Carrasco C., Ghezzi F. & Ticona-Bustillos A. R. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 20.
Manzaneda O., Calle-García C. A. & Monasterios M. 2018, Revista Boliviana de Física, **32**, 25.

MODELADO NUMÉRICO PARA EL ESTUDIO DEL SUBSUELO EN REGIONES URBANAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE INTERFEROMETRÍA SÍSMICA

NUMERICAL MODELLING TO STUDY THE SUBSOIL OF URBAN REGIONS USING SEISMIC INTERFEROMETRY METHODS

JAHIRO DAMIAN MIRANDA CALVET[†] & WEBE MANSUR[‡]

Instituto Alberto Luiz Coimbra - COPPE. Universidade Federal de Rio de Janeiro

^{†‡} Laboratorio de Métodos de Modelaje y Geofísica Computacional - LAMEMO

(Recibido 12 de abril de 2018; aceptado 1 de junio de 2018)

RESUMEN

Medidas basadas en interferometría sísmica pueden ser usadas para monitorear constantemente ruido urbano originado por diversas fuentes como vías de tren, tránsito en carreteras, construcciones civiles, entre las más usuales. El ruido de cada fuente es percibido por geofonos que tienen la capacidad de grabar extensos periodos de tiempo. Aplicando el método de correlación cruzada sobre los registros adquiridos, es posible recuperar la reflexión de la onda sísmica y conocer el estrato de una región estudiada. La calidad de los registros principalmente depende de la distribución de las fuentes, el tiempo de grabado y la longitud de onda de cada fuente. Para estudiar la relación de estas variables, se realizó un modelaje computacional de una prospección sísmica sobre tres modelos geológicos relacionados al túnel “Prefeito Marcello Alencar” en Rio de Janeiro, Brasil. Los resultados obtenidos por cada modelo fueron comparados entre una fuente y multifuentes sísmicas. Mostrando así, el potencial que el método de prospección IS tiene y cómo podría servir para la prevención de riesgo urbano.

Código(s) PACS: 95.75.Kk — 93.85.Rt — 02.70.Hm

Descriptor: Interferometría — métodos sísmicos — métodos espectrales

ABSTRACT

Measurements based on seismic interferometry can be used to constantly monitor urban noise produced by and transmitted through a variety of sources and media, such as, rail tracks, road traffic and civil constructions. Geophones with the ability to record for long periods of time, measure the noise of each seismic source. Applying the cross-correlation method to the acquired measurements we obtain the retrieved reflection of the seismic wave and the stratum of the studied region. The quality of the data depends on the distribution of the sources, the recorded time and the wavelength of each source. To study the relationship of these variables computational modelling of a seismic survey was carried out on three geological models related to the “Prefeito Marcello Alencar” tunnel in Rio de Janeiro, Brazil. For each model, the results obtained were compared between a single seismic source and multi-sources. Results demonstrate the potential of the survey method and how it could contribute to the prevention of urban risks.

Subject headings: Interferometry — seismic methods — spectral methods

1. INTRODUCCIÓN

Diversas regiones urbanas alrededor del mundo tienen problemas en el subsuelo, ya sea por causas naturales o por la intervención humana a través de construcciones civiles. Por ejemplo el año 2011 en la ciudad de La Paz-Bolivia, un área entre 0.8 y 1 km² desmoronó, dejando aproximadamente 5000 personas damnificadas; la razón aparentemente fue por “una activación geodinámica, cuyo promer reg-

istro data de 1930” (Observador 2011). El 2007 en la ciudad de São Paulo en Brasil, colapsó una área urbana que ha sido afectada por la construcción de la línea amarilla de metro (Francisco et al. 2017). La ciudad de México tiene un proceso de subsidencia en el rango de decenas de cm/año debido a la extracción de agua subterránea para el consumo (Tomar et al. 2009).

En todos esos ejemplos es posible percibir denominadas señales de baja frecuencia, usualmente llamadas por “ruido ambiente”, provenientes del subsuelo y que suelen portar información de la estruc-

[†]Email: jahiro@coc.ufrj.br

[‡]http://www.coppe.ufrj.br

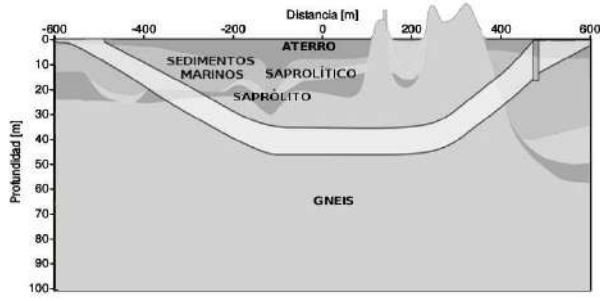


FIG. 1.— Vista satelital del túnel (superior) y el estrato usado para el modelaje (inferior) (O Globo 2015).

tura geológica (estrato) de forma intrínseca en cada señal registrada por un receptor sísmico (Nakata et al. 2011).

Es este artículo se propone aplicar el método de interferometría sísmica para monitorear el ruido ambiente de forma constante y desde la superficie de áreas urbanas, mediante una prospección SSP¹.

Con los datos adquiridos del modelaje computacional puede crearse una amplia base de datos que luego serían comparados constantemente con datos reales, adquiridos de una prospección sísmica; así, poder interpretar de forma más precisa alteraciones geológicas en tiempo real y que que sirvan para definir posibles índices de riesgo urbano.

Es por esta razón se ha modelado el túnel “Prefecto Marcello Alencar”² de la ciudad Rio de Janeiro en Brasil, puesto que al rededor túnel, se encuentran diversas estructuras generadoras de ruido sísmico, como ser un aeropuerto para vuelos nacionales, puertos marítimos comerciales en la bahía de Guanabara, líneas de tren, de metro, construcciones civiles y tránsito urbano (Porto Maravilha 2015; Andreatta et al. 2009).

2. TEORÍA

En geofísica se observa los modelos geológicos como un conjunto de lentes ópticas, equivalente al sistema presentado en el experimento “los anillos de Newton” en el siglo XVIII. En dicho experimento un haz de luz tiene reflexiones cuando pasa de un medio con propiedades físicas \mathbf{n} , para otro medio con propiedades \mathbf{n}' ($\forall \mathbf{n} \neq \mathbf{n}'$); creado así, un padrón de interferometría compuesta por regiones de onda constructiva y destructiva.

De forma similar, una onda sísmica que viaja a través de un estrato con diferentes propiedades físicas n^i ($\forall i \in \mathbb{N}$) tiene diversas reflexiones ocasionados por cuerpos incrustados en el medio, creando así un desfase de señal conocida como “estática” (Schulster 2009).

La estática sísmica puede ser corregida aplicando el concepto de “redatuming” (Zhou et al. 2018), basado en receptores virtuales (geófonos) (Mehta et al. 2007), que actúan como si grabaran la señal desde un punto diferente a su posición de origen

¹ SSP - Surface Seismic Profile

² El túnel Prefecto Marcello Alencar tendrá el acrónimo de tPMA en este artículo.

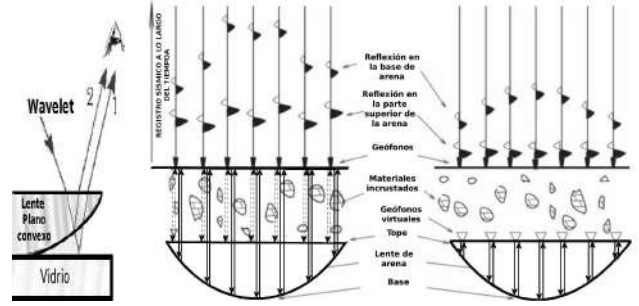


FIG. 2.— Izq: Sistema óptico experimental “Anillos de Newton”. Der: Sistema geofísico entre fuentes y receptores, basado en un sistema óptico (Schulster 2009).

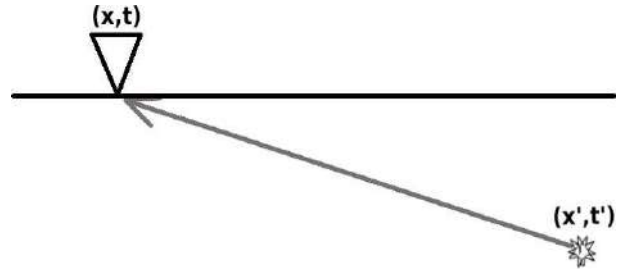


FIG. 3.— Sistema fuente-receptor en coordenadas (\vec{x}', t') - (\vec{x}, t) . (fig.2).

Para expresar de mejor forma una prospección por interferometría sísmica, partimos de un sistema simple de fuente-receptor (fig. 3) donde una onda sísmica que viaja a través de un medio inhomogéneo es descrita matemáticamente por la ecuación diferencial parcial 1 (Wapennar et al. 2010; berkhou 1987).

Cuya clasificación es definida como una ecuación hiperbólica de solución $f(x \pm vt)$, y que expresa la perturbación del medio percibida por el receptor como una función delta de Dirac (Stephenson 1975).

$$\ddot{u}(\vec{x}, \vec{x}'; t, t') - v^2 \nabla^2 u(\vec{x}, \vec{x}'; t, t') = \delta(\vec{x} - \vec{x}') \delta(t - t') \quad (1)$$

Considerando la función de Green (expresada por la letra G), como una solución de un sistema, se tiene que:

$$\ddot{G}(\vec{x}, \vec{x}'; t, t') - v^2 \nabla^2 G(\vec{x}, \vec{x}'; t, t') = \delta(\vec{x} - \vec{x}') \delta(t - t') \quad (2)$$

Ahora bien, la solución de la ecuación 1 puede ser resuelta asumiendo que la función de Green es conocida, lo que resume el problema en la integración en una integral doble.

$$u = \int \int_{\Omega} G(\vec{x}, \vec{x}'; t, t') f(\vec{x}', t') d\vec{x}' dt' \quad (3)$$

Extrapolando el concepto para \mathbf{s} número de fuentes en la coordenada \vec{x}_s y \mathbf{r} número de receptores en la coordenada \vec{x}_r , dentro de un dominio Ω , tenemos que cada receptor percibirá el registro sísmico de cada fuente.

Es decir, si consideramos dos receptores A y B que registran la perturbación de una misma fuente S, la función de Green en cada receptor es determinada por una función independiente.

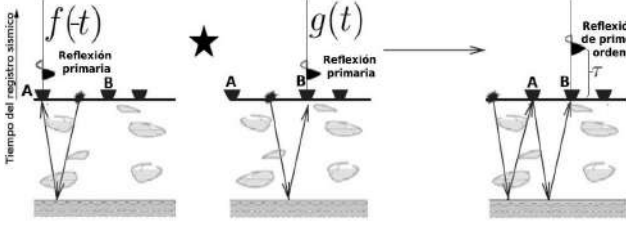


FIG. 4.— La convolución (\star) entre dos funciones primarias $f(t)$ y $g(t)$ dan como resultado una función de primer orden.

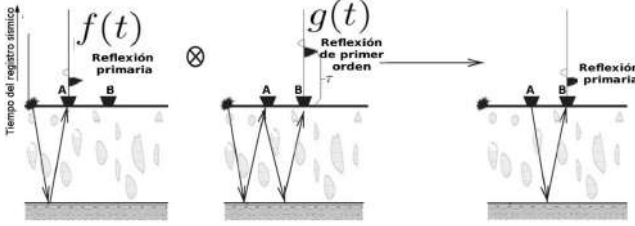


FIG. 5.— La correlación (\otimes) entre una función primaria $f(t)$ y otra función de primer orden $g(t)$, dan como resultado una función de reflexión primaria.

$$G_{(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_s, t)} = \delta_{(t-t_A)} = f(t), \quad \left(t_A = \frac{\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_s}{v} \right) \quad (4)$$

$$G_{(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_s, t)} = \delta_{(t-t_B)} = g(t), \quad \left(t_B = \frac{\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_s}{v} \right) \quad (5)$$

Aplicando el operador de correlación sobre las funciones $f(t)$ y $g(t)$, se obtiene la respuesta de la fuente sólo entre los dos receptores A y B.

$$G_{(x_B, x_s, t)} \star G_{(x_A, x_s, -t)} = f(t) \otimes g(t) = G_{(x_B, x_A, t)} \quad (6)$$

En la figura 4 se observa cómo el operador de convolución es aplicado sobre dos registros sísmicos (funciones $f(t)$ y $g(t)$), donde cada registro es generado por dos receptores (geófonos) A y B, los cuales perciben la primera reflexión de onda de la fuente S. Al aplicar el operador de convolución sobre esas funciones dan como resultado una función de primer orden, esto es equivalente a decir que el receptor B percibe la segunda reflexión de la onda en un desfase de tiempo τ .

En la figura 5 se observa cómo el operador de correlación al ser aplicado sobre un registro primario y uno de primer orden, generan una función con la que puede discriminarse la posición de la fuente sísmica. Esto es clave en la IS³ ya que en una prospección sísmica es indispensable conocer la localización de la fuente para el procesamiento de datos; sin embargo, al no ser necesario conocer la localización de la fuente, resulta ventajoso trabajar con la posición de los receptores ya que puede trabajarse con una o varias fuentes sin importar su localización original. Así, la correlación trabaja directamente sobre la función de Green (ec. 6), la cuál describe la

respuesta de un medio que propaga la perturbación de una fuente sísmica.

Con base en la teoría de sismología, la generación de sismogramas sintéticos \vec{u} se rige por la convolución de 4 variables fundamentales: $s(t)$ es el ruido de la fuente sísmica, $g(t)$ es la propagación de la onda, $q(t)$ la atenuación de la señal en el medio e $i(t)$ que es la respuesta instrumental. Sin embargo, es usual considerar la atenuación como parte de la respuesta del medio, por lo que puede considerarse también a las funciones $g(t)$ y $q(t)$ como una sola variable. Siendo ésta respuesta del medio, la función de Green (Batllo & Correig 1987).

$$u_{(r,t)} = s(t) \star \overbrace{g(t) \star q(t)}^{\text{función de Green}} \star i(t) \quad (7)$$

La función de ruido sísmico en la realidad se comporta como una onduleta (denominada comúnmente como “wavelet”), por lo que es necesario aplicar una autocorrelación a la función $s(t)$ antes de ser convolucionada con la función de Green (Wapenaar et al. 2010).

$$S(t) = s(t) \star s(-t) \quad (8)$$

Así, los sismogramas sintéticos generados por una fuente de ruido sísmico entre dos receptores, es dada por:

$$G_{(x_A, x_B, t)} \star S(t) = u_{(x_A, x_s, t)} \star u_{(x_B, x_s, t)} \quad (9)$$

Finalmente, habiendo definido la fuente como ruido sísmico, solo resta expresar el caso en que cada receptor pueda percibir un campo de ruido difernete \mathbf{m} ó \mathbf{n} , para ello es aplicado el concepto de correlación cruzada (Thorbecke & Draganov 2010).

$$u_{(x_A, t)} = \sum_{m=1}^n G_{(x_A, x_s^m, t)} \star S_m(t) \quad (10)$$

$$u_{(x_B, t)} = \sum_{n=1}^n G_{(x_B, x_s^n, t)} \star S_n(t) \quad (11)$$

Para \mathbf{m} e \mathbf{n} fuentes que pasan por las estaciones A y B, su producto $\langle \rangle$ dará como resultado el ruido medio del sistema $\langle S_m(t) \star S_n(t) \rangle = \delta_{mn} S(t)$, donde δ_{ij} representa la delta de Kronecker.

$$\langle u_{(x_B, t)} \star u_{(x_A, -t)} \rangle = \left[G_{(x_B, x_A, t)} + G_{(x_B, x_A, -t)} \right] \star S(t) \quad (12)$$

3. METODOLOGIA

Con la información estratigráfica observada en la figura 1, se construyó una tabla de propiedades físicas de cada material presente en el subsuelo (Mavko 2001; Elbra et al. 2011).

Se implementó tres modelos geológicos (fig. 7) con los que se recuperará la reflexión de ondas sísmicas y se construyó una comparación gráfica entre una

TABLA 1
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES EN EL
MODELO GEOLÓGICO DEL TÚNEL “PREFEITO MARCELLO
ALENCAR”.

Elementos del subsuelo	$\rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$	$V_p \left[\frac{m}{s} \right]$	$V_s \left[\frac{m}{s} \right]$
Aterro (relleno con tierra)	1700 - 2400	250 - 550	147 - 323
Sedimentos Marinos	2000 - 2400	1100 - 2500	200 - 800
Sapolítico	2100 - 2500	2000 - 3500	800 - 1800
Saprólito	2100 - 2500	2000 - 3500	800 - 1800
Gneis	2500 - 2700	4400 - 5200	2700 - 3200

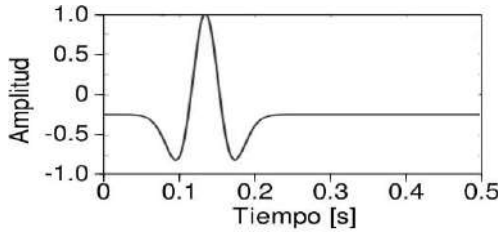


FIG. 6.— La wavelet de Ricker.

prospección con 1 y 100 fuentes sísmicas. Las coordenadas para una fuente sísmica (monofuente) fueron establecidas como constantes, el tiempo de grabado en los receptores fue de 3 [s] y el función para la wavelet fue definida por la 1^{ra} derivada de la función Gaussiana, dada por g_1 :

$$g_1 = \frac{f}{\sqrt{2}f_p} e^{-\frac{f^2}{2f_p^2}}. \quad (13)$$

Donde f es la frecuencia máxima (definida en 30[Hz]) y f_p es la frecuencia de pico (definida en 15 [Hz]); la razón del porqué se está usando esta wavelet es para tener una imagen más limpia sin dobles amplitudes para una misma reflexión, como es el caso de la segunda derivada de Gauss, también conocida como fuente de *Ricker wavelet* (fig. 6).

Las coordenadas espacio-temporales de las 100 fuentes sísmicas (multifuentes) fueron establecidas como aleatorias, con tiempo de grabado en los receptores de 6, 10, 30, 60 y 120 [s], una frecuencia límite de 30 [Hz] y la wavelet para cada fuente alternada de forma aleatoria entre la función Gaussiana g_0 , su 1^{ra} y 2^{da} g_2 derivada, respectivamente:

$$g_0 = e^{-\frac{f^2}{2f_p^2}}. \quad (14)$$

$$g_2 = \frac{f^2}{f_p} e^{-\frac{f^2}{f_p^2}}. \quad (15)$$

Finalmente, la longitud de onda de cada fuente fue establecida en función al tiempo de grabación, el tiempo de actividad que tiene cada fuente es aleatoria y no está restringida a al tiempo de grabación, con lo que cada fuente puede terminar o continuar su perturbación al medio en cualquier tiempo.

Los geófonos fueron posicionados a cada 10 [m] en la superficie de cada modelo; todas las fuentes fueron definidas como monopulares y el medio de propagación es de tipo acústico⁴.

La condición de borde aplicada en todos los modelos, es tipo PML⁵ definida con paredes absorbentes.

El primer modelo consiste en dos capas con velocidades mínimas (Aterro) y máximas (Gneis) vistas en la tabla 1; en el segundo modelo se aplicó una falla de tipo inversa sobre el primer modelo; en el tercer modelo se aplicó todas las capas presentes en tPMA (fig. 1).

El hardware usado para el modelado consta de un procesador AMD Phenom(tm) II X4 945, de 4 núcleos de 64 bits, una frecuencia de procesamiento de 0.8-3 GHz y 4GB de RAM sin recurso GPU.

Todo software usado en el modelado es de código abierto y bajo licencias GNU: FDELMODC está enfocado a la interferometría sísmica y permite grabar por extensos periodos de tiempo (Thorbecke 2016); Seismic Unix ejecuta parte de los cálculos hechos por FDELMODC y grafica los resultados (Stockwell & Cohen 2002); adicionalmente se usaron lenguajes BASH y AWK (Close et al. 1995), para la ejecución de scripts y procesamiento de datos; por último, GNU PLOT en la comparación de sismogramas (Jan-ert Philipp 2016).

Con esas características de hardware, fue necesario evaluar la eficiencia del tiempo en el modelado para las multifuentes; así, se realizaron diversas pruebas variando el número de fuentes de 1 a 3000 y posteriormente el intervalo de tiempo de grabado en los receptores para obtener una buena resolución de imagen (de 1 a 150 [s]); dando un buen resultado al trabajar con 100 fuentes y un intervalo máximo de tiempo de grabado en 120 [s].

El procedimiento inicial para el modelado consiste en crear una malla con espaciamiento bidimensional h entre los nodos, dado por $\Delta h = \Delta x = \Delta z$, siendo x la distancia (offset) lateral y z la profundidad, ambos dado en metros. El valor Δh es relevante en el modelado, ya que permite establecer una estabilidad en la discretización del sistema a través del número de Courant (0.606 en este caso). Partiendo de las ecuaciones de Hooke y Newton para un sistema linealizado de 1^{er} orden, se define la ecuación de onda para un medio acústico, dada por:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (16)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (17)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_z}{\partial t} \right] \quad (18)$$

Donde P es el campo de presión acústica, ρ es la densidad, k la compresibilidad V_x campo de velocidad lateral y V_z el campo de velocidad en profun-

⁴ Los medios de propagación pueden ser de tipo acústico, elástico, viscoacústico y viscoelástico.

⁵ PML - Perfectly Matched Layer

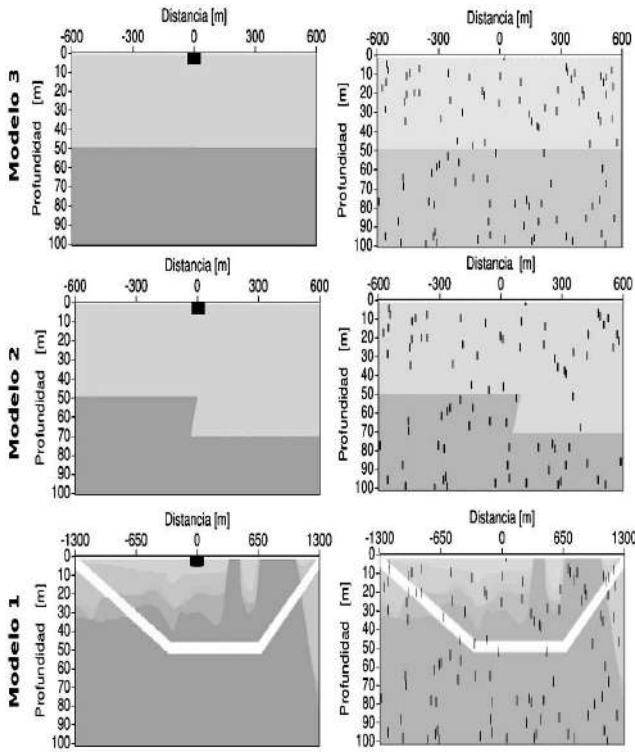


FIG. 7.— Izq: prospecciones sísmicas con 1 fuente (cuadrado negro). Der: prospecciones sísmicas con 100 fuentes sísmicas (líneas en negro). Los geófonos son posicionados en la superficie de cada modelo (0 [m]).

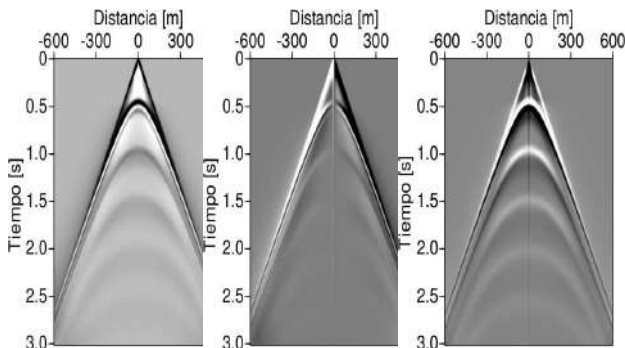


FIG. 8.— Conjunto de sismogramas sintéticos para el campo P (izq), V_x (cen) y V_z (der).

En cada nodo de la malla, para luego ser calculadas a través de un algoritmo implementado por el método de diferencias finitas, cuya aproximación es realizada por la ecuación Crank-Nicolson de 4^{ta.} orden en 2D.

3.1. Modelo 1 con una fuente sísmica

La figura 8 es el resultado de los sismogramas sintéticos para los campos P, V_x y V_z . En las imágenes puede observarse claramente la reflexión generada por la segunda capa, compuesta por Gneis, próximo a los 0.4 [s], cuyo valor teórico es determinado por la relación $v_p = \frac{2z}{t}$, donde v_p es la velocidad de la onda P que se propaga a través de la primera capa del modelo.

Del conjunto de sismogramas sintéticos generados

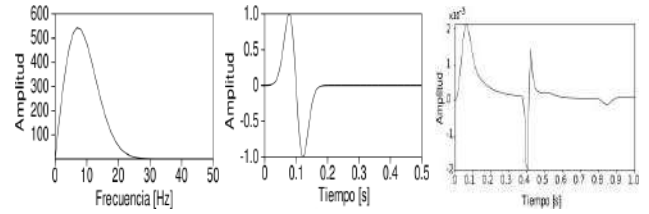


FIG. 9.— Espectro de frecuencias de la wavelet en el origen de la fuente (izq), la wavelet en un tiempo t_0 (cen) y respuesta del medio percibida en el receptor en un tiempo t (der).

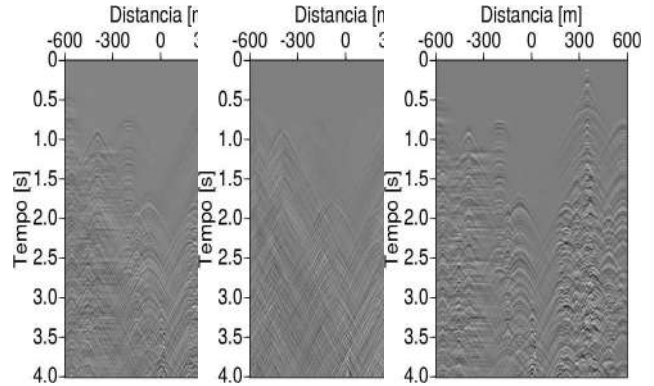


FIG. 10.— El ruido sísmico es graficado para los campos P (izq), V_x (cen) y V_z (der).

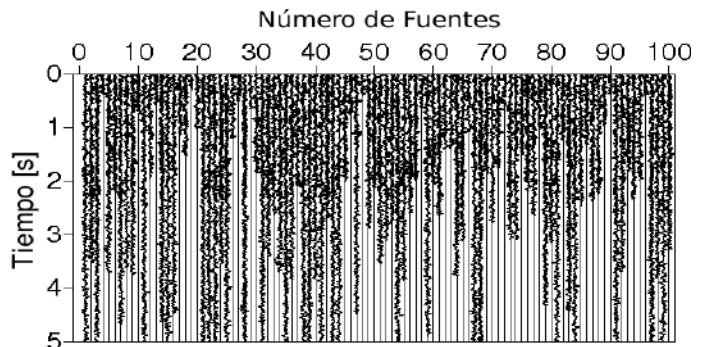


FIG. 11.— Sismograma de cada fuente (izq) y factor de correlación cruzada entre las fuentes (der).

en cada geofono se extrae el sismograma central, denominado como “traza central”, para observar cómo responde el medio a la perturbación ocasionada por la fuente sísmica (fig. 9).

3.2. Modelo 1 para multi fuentes sísmicas

La figura 10 es resultado del conjunto de sismograma sintéticos graficados para los campos P, V_x y V_z en los primeros 4[s] de grabado de un total de 10[s]. En ella, aparecen diversas fuentes activas, no dejando clara la reflexión generada por la capa de Gneis.

Para analizar el registro de cada fuente (fig.11), se observa el sismograma que genera cada una de ellas y un fator de correlación que permite analizar cuales fuentes pueden ser discriminadas si su valor es próximo a cero (fig. 12).

Observando el instante en que cada fuente inicia su actividad y el tiempo que demora activa, puede determinarse el origen de la fuente (como ejemplo en

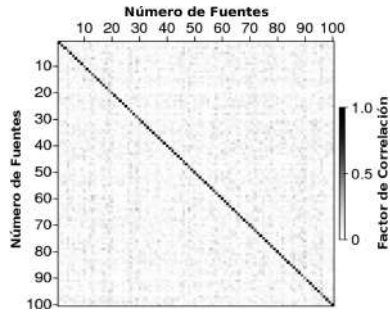


FIG. 12.— Sismograma de cada fuente (izq) y factor de correlación cruzada entre las fuentes (der).

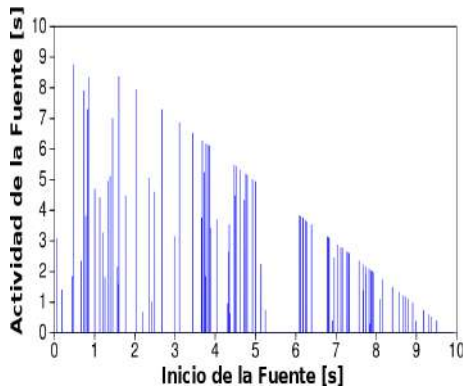


FIG. 13.— Instante en el que se activa cada fuente versus el tiempo en el que la fuente está activa a lo largo del tiempo.

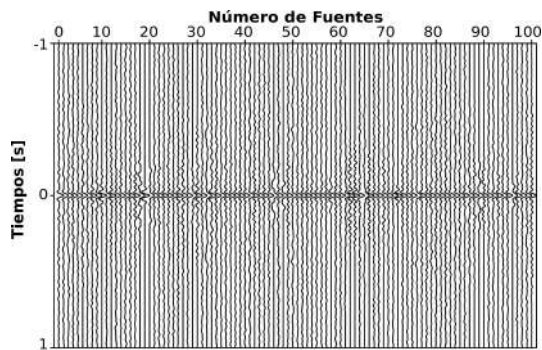


FIG. 14.— Autocorrelación de las fuentes sísmicas.

una prospección real, la perturbación que ocasiona un tren al pasar por elk área de estudio). También, si la fuente es eventual, pulsante o continua en el tiempo, mediante diversos gráficos a lo largo del tiempo (fig. 13).

Haciendo uso de la ecuación 8 se obtiene la autocorrelación de las trazas sísmicas de cada fuente y se extrae la traza central (fig. 14).

Sobre la correlación de la traza central autocorrelacionada con el resto de trazas no autocorrelacionadas se clasifican los registros sísmicos según el tipo de valor de tiempo tengan. Valores de tiempo positivos son clasificados como “Función Causal”, para valores de tiempo negativos los datos son clasificados como “Función No Causal”. Entiendase, de forma simple, la función Causal como el trayecto de onda originada desde la fuente al medio y a la función No Causal como el trayecto de onda desde el

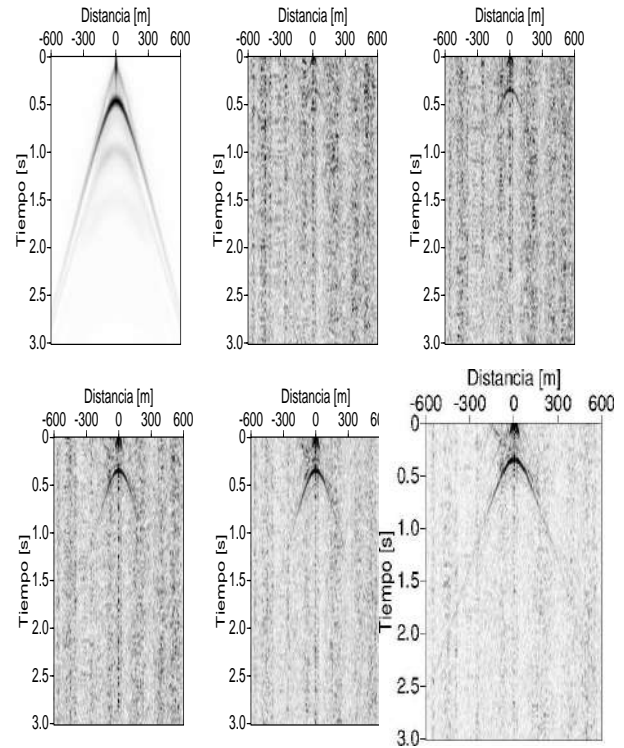


FIG. 15.— Fila superior: se compara el modelo 1 para el caso de una fuente sísmica (izq) y diversas fuentes con tiempo de grabado en 6 [s] (cen), 10 [s] (der). Fila inferior: 30[s] (izq), 60[s] (cen) y 120[s](der).

medio hacia la fuente, siendo está última un caso no real pero con importante contribución de análisis en el modelado computacional.

Sumando las funciones Causal y No Causal se genera una función llamada “ADD”, con ella se identificó la reflexión de onda generada por la segunda capa del modelo 1.

La figura 15 muestra la comparación entre una prospección sísmica con 1 y 100 fuentes sísmicas en el modelo 1.

En ella puede observarse claramente que la reflexión generada por la segunda capa aparece próximo a los 0.4 [s] (valor teórico). Sin embargo, cabe mencionar que para el caso de 1 fuente se graficaron los datos de forma directa a la adquisición y filtrando el ruido ambiente; para el caso de 100 fuentes, se graficaron las funciones ADD, sin filtrar el ruido ambiente y con diferentes intervalos de tiempo de grabado en los receptores. Comparando solo la traza central de cada registro mostrado en la figura 15, se observa cómo la amplitud del ruido se atenúa y deja más clara la amplitud de la reflexión a medida que se incrementa el tiempo de grabado.

Al comparar las trazas centrales en una sola figura (fig. 16), se observa una amplitud de reflexión común que representa la reflexión de la segunda capa del modelo.

Sobre el punto máximo de cada cresta de reflexión común, se hizo una lectura de tiempo con el que posteriormente se realizó una regresión lineal (fig. 17) con tendencia hacia el valor teórico, a mayor número

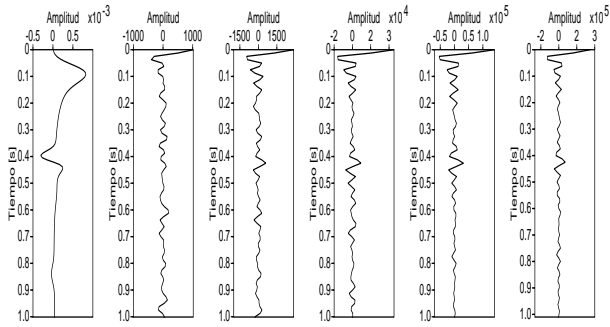


FIG. 16.— De izquierda a derecha. En el modelo 1, se comparan las trazas centrales para 1 fuente y 100 fuentes con tiempos de grabado en 6, 10, 30, 60 y 120 [s].

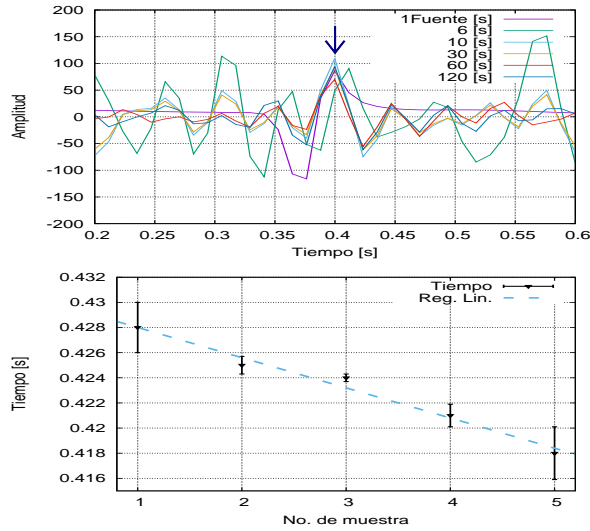


FIG. 17.— Reflexión común de las trazas centrales indicadas con la flecha azul (sup.). La refregión lineal es generada a partir de las lecturas en la cresta de reflexión común, sólo para los valores de multifuentes (inf.).

de intervalos para el tiempo de grabado. Caso algún intervalo de tiempo (número de muestra) esté completamente desfazada al tiempo teórico, puede ser aplicado el criterio de Chauvenet para discriminarlo.

3.3. Comparación de modelos

Repitiendo el mismo procedimiento sobre los modelos 2 y 3, a continuación (fig. 18) se presenta para los tres modelos, la comparación de los sismogramas con una 1 (con 3 [s] de grabado) y 100 fuentes (con 120 [s] de grabado, sin embargo, por razones de escala se presentan ambos en 3 [s]).

Realizando una ampliación sobre un offset de $\pm 300[m]$ en el modelo 3 (multifente), se puede ver que el modelado si muestra la reflexión de las 3 capas presentes por encima del tPMA (19), ya para poder observar la presencia del tunel (donde la señal sísmica es atenuada), es necesario incrementar un tiempo de grabado superior a los 120 [s] y aplicar otros procesamientos sísmicos como inversión de onda, migración entre los más relevantes o espectro de velocidades en profundidad.

Observando las trazas centrales para cada modelo

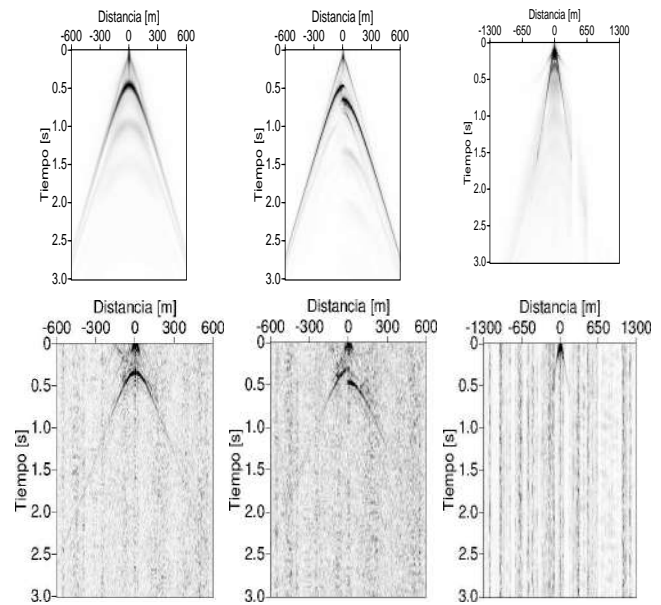


FIG. 18.— La columna a la izquierda representa el modelo 1, la columna central el modelo 2 y la tercera el modelo 3. La fila superior muestra los modelos con una fuente activa y la fila inferior con diversas fuentes activas para 120[s] de grabado. Todos las imágenes para las multifuentes son obtenidas a partir de la función ADD.

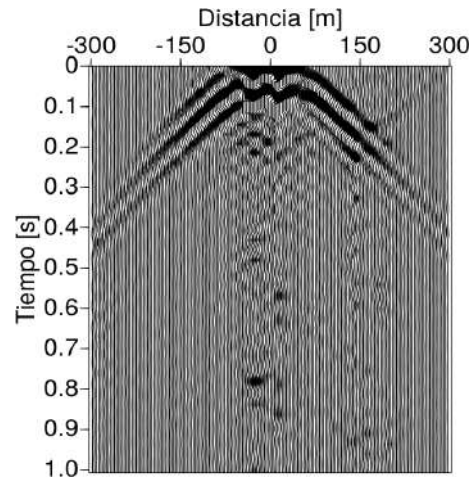


FIG. 19.— Ampliación en el modelo 3 con multifuentes a un offset de $\pm 300[m]$.

con 1 y 100 fuentes, se observan amplitudes comunes que indican la reflexión de onda (fig. 20).

El pico común de reflexión en las trazas centrales de los modelos 2 y 3, con 1 y 100 fuentes, se presenta en la figura 21, en ella se realiza la lectura de tiempos que son marcados sobre la mayor amplitud, indicadas por las flechas azules.

3.4. Conclusiones

La comparación hecha en cada modelo para una prospección con una o varias fuentes sísmicas presentan resultados similares, esto demuestra que el método IS es una potencial herramienta de prospección no sólo aplicada en la geofísica, si no también, en áreas relacionadas a propagación de on-

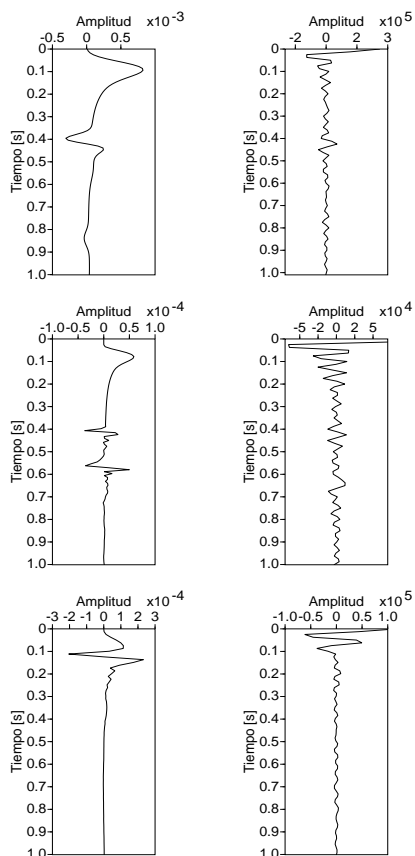


FIG. 20.— Trazas centrales para 1 fuente (columna izquierda) y 100 fuentes (columna derecha), amplitud de la reflexión de onda de los modelos 1 (fila superior), modelo 2 (fila central) y modelo 3 (fila inferior).

das en medios físicos, cómo se ve en ciencias e ingenierías. Con lo observado en este trabajo se concluye que los objetivos propuestos fueron alcanzados satisfactoriamente, puesto que la principal hipótesis planteada fue la efectividad del método IS comparado con una prospección sísmica tradicional.

En los modelos 1 y 2 (fig. 18) se observó con claridad la reflexión de onda ocasionada por la presencia de la capa de Gneis. Sin embargo, en este estudio no se aplicó el análisis de mínima resolución debido, es posible incrementar el tiempo de grabado en tiempos de grabado mucho mayores, así percibir una mínima variación de en las capas del modelo geológico, aunque esto representa un mayor costo de recursos computacionales en el modelado; pese a ello, el mismo método IS aplicado a frecuencias

aún menores, permite estudiar microfallas desde el campo de la microsísmica.

En el modelo 3 se puede observar la presencia de las diferentes capas geológicas del modelo propuesto inicialmente, aunque la intensidad de reflexión de las múltiples ondas sísmicas haya resultado algo tenue. Para mejorar esto, es necesario incrementar el intervalo de tiempo de grabado en los receptores. Otra forma de mejorar esto es considerar regiones de mayor influencia, por ejemplo que todas las fuentes estén distribuidas aleatoriamente próximas a la superficie sin exceder unas decenas de profundidad; en

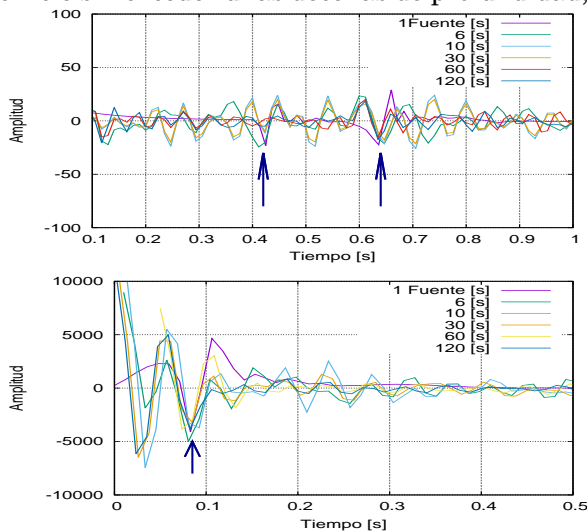


FIG. 21.— En las imágenes se observa el pico de reflexión común (flecha azul), para los modelo 2 (superior) y modelo 3 (inferior).

un próximo artículo se espera mostrar los resultados de esta última afirmación sobre el tPMA y pruebas similares aplicadas a minería.

Los resultados obtenidos en este trabajo hacen parte de una base de datos para modelos acústicos, el siguiente paso a seguir es continuar el modelado aplicado a medios con propiedades físicas tipo elásticas, viscoelásticas y viscoacústicas, sobre estratos más complejos que puedan reflejar en mejor medida diversas estructuras geológicas reales.

Con todo el procedimiento mostrado, puede construirse una red de receptores distribuidos en una región urbana que generen registros sísmicos constantemente, con esos datos crear modelos sintéticos que reproduzcan no sólo el estrato en tiempo real, si no también ofrecer las propiedades del medio como ser su densidad y velocidades sísmicas entre otras importantes.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

REFERENCIAS

- Andreatta, V., Pace, M., & H., R. 2009, Coleção estudos cariocas
 Batllo, J. & Correig, M. 1987, Estudios Geológicos, 43, 459
 berkhout, A. 1987, Applied Seismic Wave Theory (Universidad de California, USA: Elsevier)
 Claerbout, J. 1968, Geophysics, 33, 264
 Close, B., Robbins, A., Rubin, P., Stallman, R., & Oostrum, P. 1995, The AWK Manual (Cambridge, MA 02139. USA: Free Software Foundation, Inc.)
 Elbra, T., Karlqvist, R., Lassila, I., Edward, H., & L., P. 2011, Geophysical Journal International, 405
 Francisco, J., Silva, M., & Clotilde, M. 2017, II Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação

- Janert Philipp, K. 2016, GNU PLOT in action (Shelter Island, NY 11964. USA.: Manning Publications Co.,2016.)
- Mavko, G. Conceptual Overview of Rock and Fluid Factors that Impact Seismic Velocity and Impedance (Stanford Rock Physics Laboratory), 1–40
- Mehta, K., Bakulin, A., Sheiman, J., Calvert, R., & Snieder, R. 2007, *Geophysics*, 72, V79
- Nakata, N., Snieder, R., Tsuji, T., Larner, K., & Matsuoka, T. 2011, *Geophysics*, 76, SA97
- O Globo, G. 2015, Rio de Janeiro, a cidade dos túneis, <https://infograficos.oglobo.globo.com/rio/rio-cidade-dos-tuneis.html>
- Observador, E. 2011, Lluvias causan derrumbe de casas en barrios de La Paz, <https://www.elobservador.com.uy/lluvias-causanderrumbe-casas-barrios-la-paz-n109629>
- Porto Maravilha, C. 2015, Esclarecimentos sobre o Túnel Prefeito Marcello Alencar. Companhia de Desenvolvimento Urbano da Região do Porto do Rio de Janeiro, <http://portomaravilha.com.br/viaexpressa>
- Schulster, G. T. 2009, *Seismic Interferometry* (University of Utah, USA: Cambridge University Press)
- Stephenson, G. 1975, Uma introdução as equações diferenciais parciais para estudantes de ciências, 1st edn. (R. Peixoto Gomide, São Paulo, Brasil.: Edgar Blucher Ltda)
- Stockwell, W. & Cohen, K. 2002, *The new SU User's Manual* (Golden, CO80401. Estados Unidos: The Society of Exploration Geophysicist)
- Thorbecke, J. 2016, *2D Finite-Difference Wavefield Modelling. Fdelmodc Manual*, 1st edn., Delf University
- Thorbecke, J. & Draganov, D. 2010, *Geophysics*, 76, H1
- Tomar, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. 2009, *Ciencias de la Tierra*, 295
- Wapenaar, K., Ruigrok, E., Neut, J., Draganov, D., Hunzinker, J., Slob, E., & Thorbecke, J. 2010, 43, 459
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., & Verdel, A. 2010, *Geophysics*, 75, 195
- Zhou, W., Hu, H., Zhihui, Z., Yukai, W., & Oong, Y. 2018, *Elsevier*, 179, 207

DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (DEA's – RAYOS)
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES EN EL CIELO BOLIVIANO

CHARACTERISTIC ELECTRICAL ATMOSPHERIC DISCHARGES IN THE BOLIVIAN SKY

EDGAR LIBORIO RICALDI-YARVI¹, RENÉ TORREZ-SANTALLA², CARLA QUISPE, & JAVIER QUISPE-MAMANI¹

Instituto de Investigaciones Físicas

¹ Área de Geofísica (AGF),

² Área de Energías Alternivas,

Universidad Mayor de San Andrés

c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635

La Paz - Bolivia

(Recibido 20 de febrero de 2018; aceptado 30 de agosto de 2018)

RESUMEN

Los registros del Seguidor de Tormentas Eléctricas Atmosféricas, localizada en la comunidad de Patacamaya, 17.2608° latitud Sur, 67.9481° longitud Oeste y 3794 *m.s.n.m.*, de los años 2012 a 2015 fueron sometidos a un primer análisis con la finalidad de obtener las características principales de las mismas en el cielo boliviano, en realidad en el denominado Territorio de Observación que cubre las áreas de los siguientes departamentos de Bolivia: más de la mitad de La Paz, Oeste del Beni, el Oeste de Santa Cruz, el Noroeste de Chuquisaca, todo Oruro, todo Cochabamba y toda la parte Norte de Potosí. Se realiza una primera clasificación de los registros de las Descargas Eléctricas Atmosféricas (DEA's) en: Comportamiento Regular (CDR) e Irregular (CDI), diversas variedades. En base al estudio del CDR de las DEAs, se explora el Comportamiento Anual (CA) del mismo, las mismas nos dicen que: el área donde se desarrollan las DEA's en la práctica son las mismas donde se presentan las áreas de masas húmedas de la atmósfera, las nubes. La posición de las mismas obedece a dos movimientos astronómicos fundamentales, el movimiento de la Tierra sobre la eclíptica y al movimiento rotacional de la Tierra sobre su propio eje y a factores morfológicos de la superficie de la Tierra (las cordilleras). Los mismos que definen el comportamiento temporal y espacial de las masas húmedas, la dirección de los vientos y el estancamiento de las mismas. El Comportamiento Secular (CS) está en directa relación con los cambios climáticos naturales globales como el Niño, la Niña y el comportamiento de los Monzones climáticos.

Código(s) PACS: a92.60.Pw — 95.75.Wx — 91.25.G

Descriptores: Descriptores: Descargas eléctricas atmosféricas — series de tiempo — distribución espacial

ABSTRACT

Data obtained from a Storm Tracker PCI (Boltek), located in the community of Patacamaya, 17.2608° South Latitude, 67.9481° West longitude and at 3794 meters above sea level, between the years 2012-2015 were first analysed to identify the phenomenology of atmospheric electrical discharges in the Bolivia sky. The territory under observation covers areas in the following Departments of the Plurinational State of Bolivia: more than half of La Paz, West Beni, West Santa Cruz, Northwest Chuquisaca, Oruro, Cochabamba and the Northern part of Potosí. A first classification of the atmospheric electrical discharge data (AED) is performed in order to obtain: the regular and irregular behavior of several discharge types. Based on the steady regular behavior of AED, the annual performance of AED is explored. It is found that the areas where lightning regularly strikes are places characterised by the presence of wet cloud masses. The position of the cloud masses is due to two fundamental astronomical movements, the movement of the Earth on the ecliptic and the rotational movement of the Earth on its axis, as well as, morphological factors of the Earth's surface (ridges). These define the temporal and spatial behavior of wet masses, the wind direction and their stagnation. The characteristic behavior observed is directly related to natural global climate changes such as the climate phenomenon known as "El Niño", "La Niña" and monsoon climate behavior.

Subject headings: Atmospheric electricity — time series analysis — spatial distribution

Seguidor de Tormentas (ST), Stormtracker – PCI, marca BOLTEK de origen canadiense, instalado en la localidad de Patacamaya, a 17.2608° de Latitud sur y a 67.9481° de Longitud Oeste a 3794 m.s.n.m. El Seguidor de Tormentas en Enero de 2012 inicia su trabajo de obtención de datos y ha estado trabajando continuamente hasta la fecha, de manera que ya se cuentan con tres años de registros, se ha hecho uso de los registros del 2012 al 2015. El análisis del comportamiento de las Descargas Eléctricas Atmosféricas (**DEA's**) se limita al total de las **DEA's**, que involucra a todas las **DEA's**, efectivas y ruido, tal como vienen los registros brutos. El área de observación del STA fue ajustado a 600 [km] a la redonda, pero los datos analizados son restringidos a un radio de 400 [km] , por considerar inseguros los datos provenientes de distancias lejanas. Esta restricción en términos geográficos corresponde a un Territorio de Observación (TO) que incluye el Sur del Departamento de La Paz, Oeste del Departamento del Beni, Oeste del Departamento de Santa Cruz, El Noroeste del Departamento de Chuquisaca, El Departamento de Potosí y el Departamento de Oruro.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS REGISTROS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (DEA'S)

La estructura de las tablas de los registros diarios nos permiten clasificar los mismos desde dos puntos de vista: su comportamiento temporal, generando de gráficas de actividad y su comportamiento espacial generando mapas de densidades eléctricas (Kridler & Noggli 1975.).

2.1. Comportamiento Temporal (CT)

Comportamiento Diario (CD)

En el estudio de los registros diarios de las **DEA's** se ha introducido dos magnitudes que caracterizan convenientemente el comportamiento de los rayos, la primera de estas es la frecuencia:

$$f = n \cdot \frac{\text{DEA's}}{t} \quad (1)$$

donde f es la frecuencia del número de **DEA's** sobre unidad de tiempo t . La segunda caracteriza la actividad de rayos a diario, este parametro suele ser muy variable, pero tambien se observa como los rayos mantienen una cierta regularidad en el tiempo por las características del contexto ambiental y esta es definida como:

$$A = n \cdot \frac{\text{DEA's}/t}{\Delta t} = \frac{f}{\Delta t} \quad (2)$$

donde A es la actividad de rayos definida como la frecuencia por intervalo de tiempo Δt . Los registros diarios se clasifican en dos tipos de registros: (a) registros con comportamiento regular y (b) registros con comportamiento irregular.

2.1.1. Comportamiento Regular Diario (CRD)

El registro de comportamiento regular diario (RCRD) se caracteriza por la no presencia de **DEA's** en las horas de la madrugada y de la mañana y la presencia de **DEA's** solo en horas de la tarde. La actividad de las **DEA's** en este caso es creciente desde las 12 [h] hasta las 18 [h], durante 6 horas, con máximo que se alcanza alrededor de las 17 [h], a continuación la actividad es rápidamente decreciente, desde las 17 [h] hasta las 22 [h], 3 horas. Los registros con estas características no son numerosos dentro de un mes y además pueden mostrar diferentes niveles de actividad, pero todos muestran el mismo comportamiento (ver Fig.[1]). A partir de estos registros se puede determinar el Promedio del Comportamiento Regular Diario Mensual (PCRDM) de las **DEA's** como se muestra en la gráfica Fig.[2 (a)].

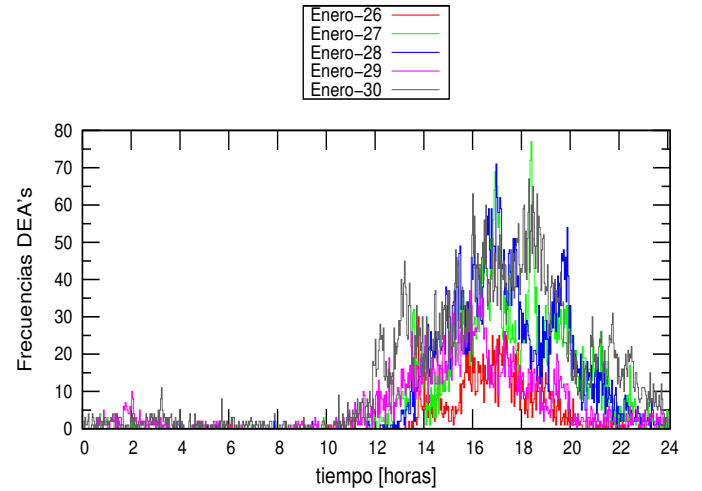


FIG. 1.— Registros del comportamiento regular diario de un mes.

La Fig.[2 (a)] del PCRDM puede ser ajustada por una curva que represente el modelo del PCRDM por medio de armónicos de una serie de Fourier (Rakov & Uman 2009; Lucas 2001; Metz-Nablat & Mila 2009), con las siguientes componentes generales.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right] \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + b_1 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{24}t\right) + b_2 \text{sen}\left(\frac{4\pi}{24}t\right)$$

La gráfica Fig.[2 (b)] ilustra los valores de los coeficiente de fourier de las funciones seno y coseno que se ajustan al PCRDM.

PCRDM y el Modelo del Comportamiento Regular Diario Mensual (MCRDM) son generados para cada

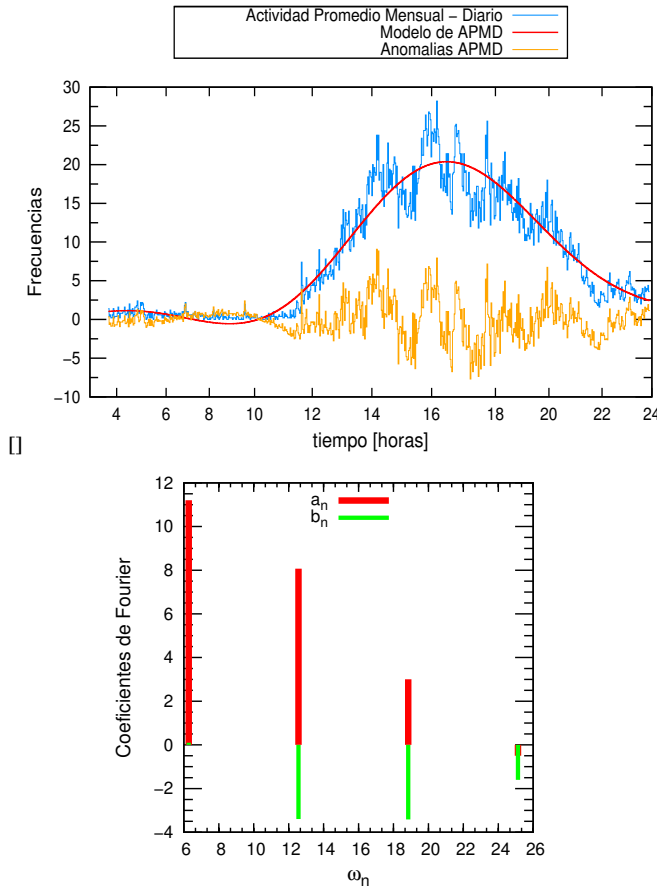


FIG. 2.— (a): Promedio del comportamineto regular diario mensual (azul), Modelo del comportamineto regular diario mensual (roja) y anomalía diaria (amarilla). (b): Representación gráfica de los coeficientes de fourier

uno de los meses, tomando en consideración que la actividad de las **DEA's** es nula o mínima en los meses correspondientes al invierno austral.

2.1.2. Comportamiento Irregular de las DEAs (CID)

Las CID's ya no siguen el patrón del comportamiento de las de CRD y más bien se las puede agrupar en algunos tipos de curvas, entre las que podemos mencionar:

1. Registros con DEA's por las madrugadas y con DEA's por las tardes (DEAM – DEAT),
2. Registros comenzando con DEAs desde la madrugada eliminando las DEAs de la tarde (DEAPNT).
3. Registro con DEA's Pulsantes durante el día (DEAPS),
4. Registro con DEA's de Pulsos Agudos Regulares e Irregulares (DEAPA, DEAPI)
5. Registros con DEA's constituidos por Pulsos Agudos Esporádicos (PAE)y
6. Registros como Pulsaciones Menores o ruido (RA).

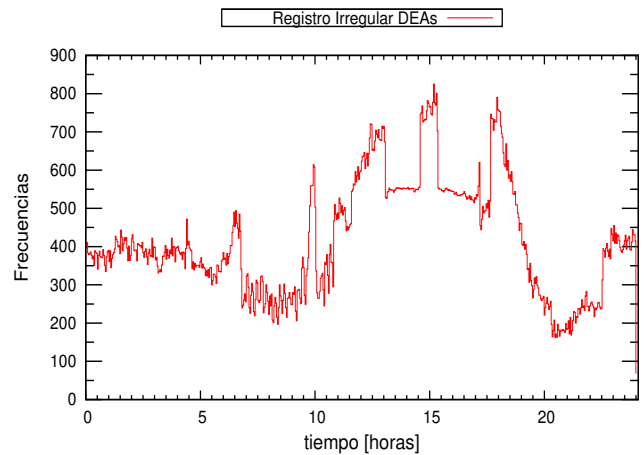


FIG. 3.— Comportamineto Irregular diario de DEA's

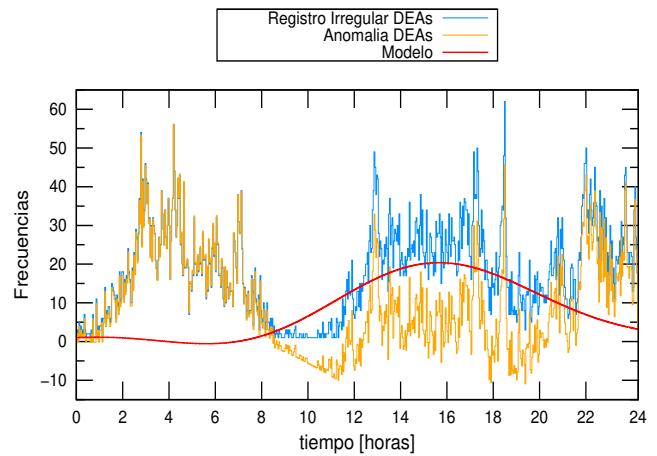


FIG. 4.— Modelo del comportamineto regular diario mensual (roja), comoportamineto Irregular DEA's (Azul) y anomalía diaria (amarilla).

Son los comportamientos de las DEA's que serán estudiadas con mayor detalle en trabajos posteriores haciendo uso de los Modelos de Comportamiento Regular Diario Mensual (MCRDM), que son el resultado del ajuste de una función de Series de Fourier de 5 armónicos a las curvas Promedio del Comportamiento Regular Diario Regular Mensual (PCRDM) de los registros correspondientes a los días de Comportamiento Regular Diario (CRD), restado sus valores de Registros con Comportamiento Irregular Diario de las DEAs, pueden producir las denominadas Curvas de Residuos de las DEA's o Anomalías de las DEA's respecto del Comportamiento Regular Diario la cual es mostrada en la Fig.[3] y Fig.[4] constituyendo una buena técnica para el estudio.

3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE DEA'S

Iniciamos este estudio comenzando con el comportamiento regular diario (CRD) de la DEA's para luego, estudiar el comportamiento de las DEAS en periodos de observación de mayor tiempo: El Comportamiento Anual (CA-CRD) de las DEAs y el comportamiento secular (CS-CRD) de las DEA's.

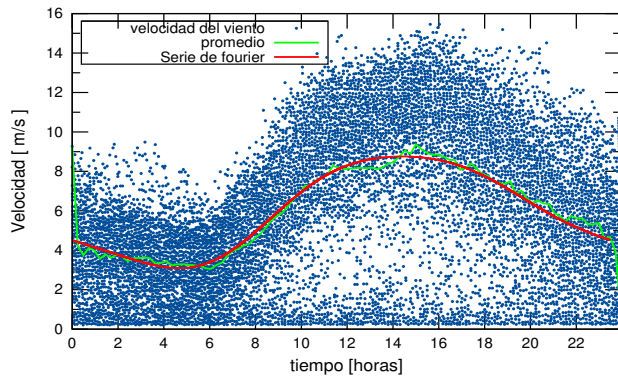


FIG. 5.— Comportamiento regular diario mensual de la velocidad del viento, la línea de color verde representa el promedio diario mensual.

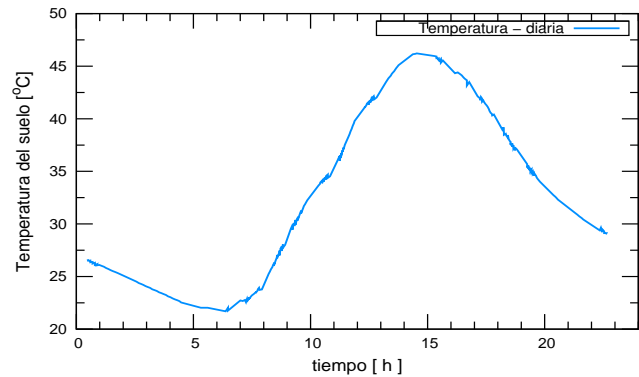


FIG. 7.— Comportamiento regular diario de la temperatura del suelo

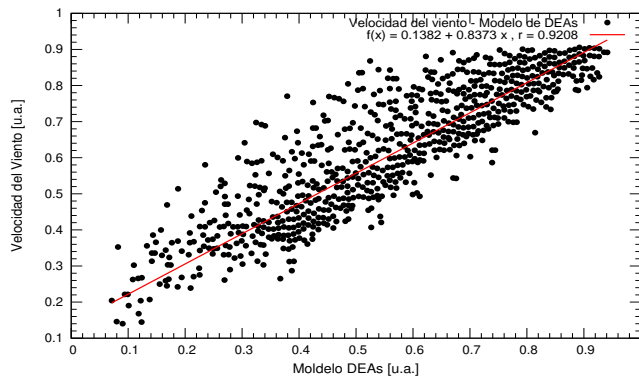


FIG. 6.— Correlación entre el comportamiento regular diario mensual de DEA's y el comportamiento regular diario mensual de la velocidad del viento.

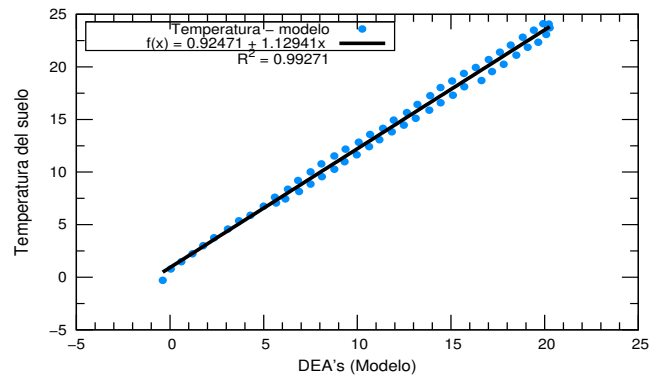


FIG. 8.— Correlación entre el comportamiento regular diario mensual de DEA's y el comportamiento regular diario de la temperatura del suelo.

Entonces, se ingresara al estudio de los detalles menores, de los registros correspondientes al comportamiento regular diario de las DEA's.

3.1. Comportamiento Regular Diario de las DEAs (CRD)

La gráfica del PCRDM o de su modelo por Armónicos de Fourier (MCRD-AF) resultan estar en perfecta correlación con los registros de Velocidad de los Vientos (VV) de las estaciones meteorológicas situadas dentro del territorio de observación y de la Temperatura del Suelo a 15 [cm] de profundidad, en condiciones climáticas semejantes a los que definen los registros en días de comportamiento regular diario de DEA's. Vease las Fig.[5], Fig.[6], Fig.[7] y Fig.[8].

Los registros de las temperaturas de la atmósfera, en estas mismas condiciones comienzan por las mañanas aproximadamente a las 6 [h] y muestran un máximo a las 12 del mediodía para anularse a las 18 [h]. Estos registros nos permiten indicar que la radiación solar se acumularía en forma de calor durante toda la mañana tanto en la atmósfera como con un retraso de 6 horas en el suelo, como se indico a 15 [cm] de profundidad (z), para que a partir del medio día ambas fuentes (medios: atmósfera y capa superficial de suelo) empiecen a liberar el calor acumulado hacia la atmósfera generando condiciones

de movimientos convectivos de las masas de aire y en consecuencia DEA's de todo tipo (descargas eléctricas efectivas (rayos nube-nube, rayos nube-tierra) y ruido (Metz-Nablat & Mila 1998; Rousseau et al. Upsala, Sweden, 2008).

3.2. Comportamiento anual (CA)

Con el fin de observar el comportamiento anual establecemos la magnitud denominada actividad anual:

$$\text{Actividad anual} = \text{Actividad (por meses)}$$

La cual es generada en función de los valores máximos del promedio del comportamiento regular diario mensual (PCRDM). La Fig.[9] muestra el CA de las DEA's que están en directa relación con el comportamiento climático anual, es decir, con las estaciones climáticas del año. Claramente las DEA's están completamente vinculadas a la época húmeda del año en esta región (Primavera, Verano en el hemisferio Sur) y se desarrollan aparejadas a la misma como se observa en la Fig.[9].

La Fig.[9] permite disgregarla en periodos de tiempo e interpretarlas como una función de las características del territorio de observación.

El ingreso de las nubes en el territorio de observación Fig[10], se produce en nuestro caso a fi-

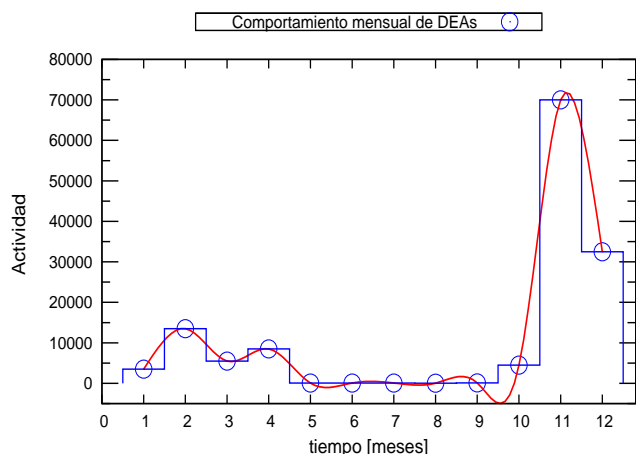


FIG. 9.— Comportamiento anual de CRD de las DEAs.

nales de Septiembre, Noviembre y Diciembre, caracterizada por una actividad creciente de DEAs, mostrando un máximo a finales de Noviembre (25 de Noviembre), pulso que coincide con el paso del Sol por el Zenit de Patacamaya en su recorrido a latitudes del Sur.

Se observa un periodo de estancamiento de nubes en el territorio en consideración, en los meses: finales de Diciembre, Enero, un pulso en Febrero, continuando hasta inicios de Marzo, caracterizado por una mediana actividad de DEAs con un máximo en Febrero (Fig[10]). El comportamiento de este periodo corresponde al denominado invierno boliviano caracterizado por un bajón de las temperaturas durante el verano austral, debido precisamente al estancamiento de nubes en el territorio de observación por efecto de la presencia del Macizo Andino (MA) y las alturas que la caracterizan, constituido por: La cordillera de los Andes, cordillera Oriental, Cordillera Oriental y el Altiplano.

El repliegue de las masa de nubes del territorio de observación, que se produce en los meses finales de Marzo y Abril, caracterizado por una decreciente actividad de DEAs, con un pulso en Abril (16 de Abril), correspondiente al paso del Sol por la latitud de Patacamaya en su recorrido de regreso a latitudes del Norte.

Periodo de anulación de las DEAs se produce en la época seca (Otoño e Invierno del hemisferio Sur). Cabe, sin embargo, mencionar la presencia de registros episódicos de menor actividad correspondientes al ingreso de nubes desde el sur, durante los denominadas Surazos (a fines de Junio, a mitad de Julio, comienzos de agosto y a mitad de Agosto).

Toda esta información ofrecida por los registros de las DEAs correspondientes a Días de Comportamiento Regular en todas sus componentes nos permiten formular y confirmar cuales serian los factores que las estarían regulando.

3.3. Factores que contribuyen al Comportamiento Anual de las DEAs

3.3.1. Factores Astronómicos que contribuyen al comportamiento de las DEAs

Podemos observar dos movimientos que contribuyen a determinar las características temporales y espaciales de las DEAs, también de las nubes:

El movimiento de la tierra sobre la eclíptica o del Sol sobre el Zenit, de Norte a Sur correspondiente a los periodos de ingreso de las nubes al territorio de observación, el periodo de estancamiento de las nubes hasta cuando el sol alcanza el Solsticio de Verano austral y el movimiento del Sol, a partir del Sur hacia el norte definiendo el periodo de repliegue de las nubes del territorio de observación. Este movimiento se realiza a una velocidad promedio de $0,334 [m/s]$ ($28 [km/día]$) El movimiento de la Tierra, en 24 horas, sobre su propio eje de Oeste hacia el Este, con una velocidad superficial variable, en nuestro caso aproximadamente de $380 [m/s]$. La velocidad tangencial provocada por el movimiento de la tierra sobre su propio eje domina, provocando vientos en dirección Oeste (del Este). La fuente de calor (haz de radiación solar sobre la superficie de la tierra) arrastra las grandes masas de nubes, generando por su parte trasera una estela de masas de nubes frías que se mueven hacia la fuente caliente por transferencia térmica convectiva.

Estas anotaciones son validas para una superficie esférica homogénea. Para una descripción más realista hay que añadir otros factores que puedan influir en el movimiento de las nubes.

3.3.2. Los circuitos atmosféricos del hemisferio sur

En la zona entre los 5° a 30° de Latitud Sur, se establece la primera Celda de Hadley, caracterizado por amplios movimientos convectivos, se localiza ocupando el territorio de observación de la antena del seguidor de tormentas (ST), caracterizado por vientos provenientes del Este que influyen en el movimiento de la atmósfera de manera global Fig[10].

3.3.3. Factores morfo geológicos u orográficos

Para nuestros propósitos estos son de enorme importancia. De los factores morfo geológicos en territorio boliviano el más importante es la presencia del Macizo Andino (MAN), conformada por las cordilleras Real u Oriental, la Cordillera Occidental y el Altiplano boliviano. El Macizo Andino (MAN) localiza las DEAs en su gran mayoría al Este de la Cordillera Real, en sus faldas, sobre el limite montaña – llano (Chapare y los Yungas) y los llanos orientales. Una línea de dirección Noroeste Sur este que hace un ángulo de 30° con la línea de latitud 18° Sur, partiendo desde aproximadamente la ciudad de Santa Cruz en Bolivia. Sin embargo, también se desarrollan DEAs sobre una línea paralela a la anterior mencionada, a una distancia de separación entre ellas de aproximadamente $140 [km]$ al sur, que involucra el límite entre los departamen-

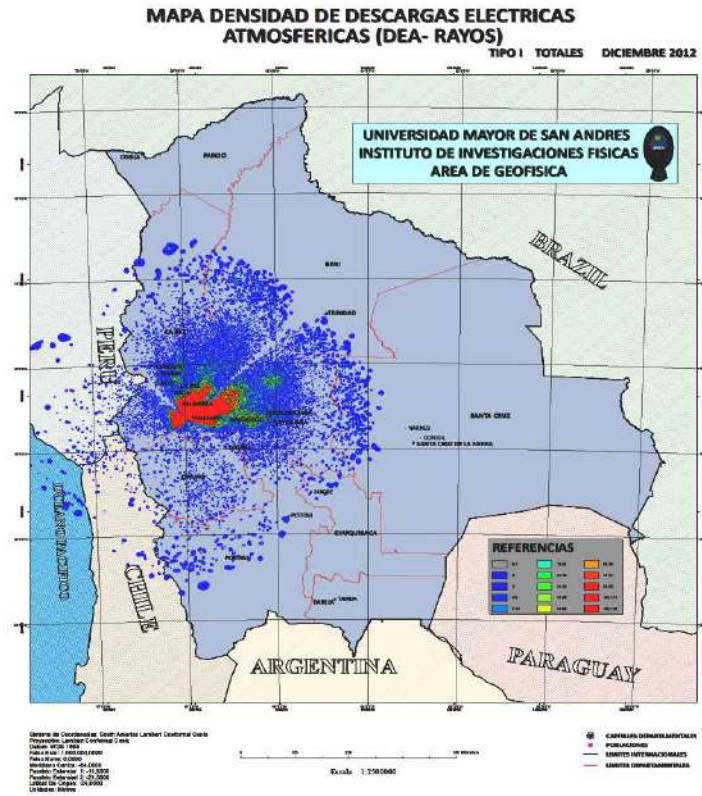


FIG. 10.— Comportamiento anual de CRD de las DEA's.

tos de Chuquisaca y Cochabamba y el Norte de Potosí, debido fundamentalmente a factores orográficos favorables, presencia de valles amplios y profundos con directa conexión con los valles de orientación norte–sur de los territorios del sureste del país.

3.3.4. Factor de heterogeneidad de los materiales del suelo

Queda formulada como hipótesis, como factores que definen los tipos de DEA's que se producen a lo largo y ancho del territorio de observación. Todos estos territorios están situados al Este del Meridiano de Patacamaya.

4. COMPORTAMIENTO SECULAR (CS)

Las DEA's varían en Actividad de año a año como lo muestra la Fig.[11],

$$A_s = f_{max}(\text{años}) \quad (4)$$

donde A_s es la Actividad secular y es igual a f_{max} frecuencia máxima por año.

Las Fig.[11] y Fig.[12] ilustra la concentración de las lluvias y en consecuencia de las DEA's al 20 de Febrero, aumentando su frecuencia, disgregándolas a regiones pequeñas mucho más puntuales, disminuyendo su densidad. Dejando inferir en líneas generales que la localización y la densidad de las DEA's son variables de año en año. Estudios mas detallados seran motivos de futuros

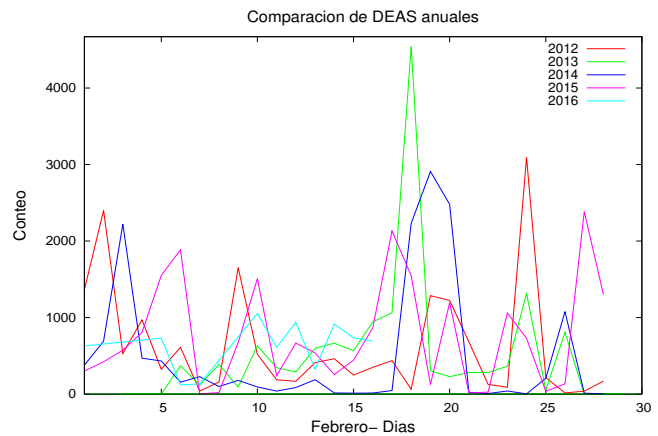


FIG. 11.— Comportamiento regular diario por cada año de DEA's.

trabajos.

El comportamiento de las DEA's Regulares acompaña a los cambios climáticos naturales. En el año de presencia del fenómeno climático La Niña (2012) la humedad penetra muy profundamente en el Altiplano Sur, generando DEAs en estas áreas: En el lado Oeste del Lago Titicaca, el lado Oeste de Potosí (Salar de Uyuni). También, en este año se generan DEA's, en los Yungas y Valles del Sureste, disminuyendo en los llanos del Noreste. Durante el año de

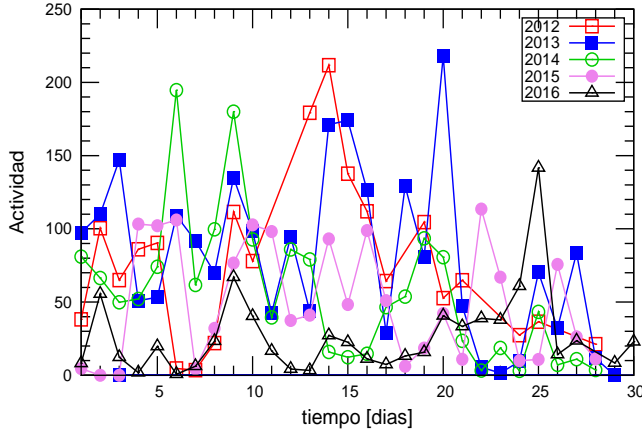


FIG. 12.— Comportamiento anual de precipitaciones pluviales por año.

desarrollo del fenómeno climático El Niño (2015) las DEAs quedan restringidas a la región del altiplano norte, reduciéndose en las regiones anteriormente mencionadas, concentrándose al Norte y al Noreste del territorio de observación. En línea generales está en función del comportamiento de los monzones en el hemisferio Sur.

5. COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS DEA'S

El presente estudio se realiza considerando dos variables importantes:

- La densidad de las DEA's

$$D_{DEA's} = n \frac{DEA's}{A_{sup.}} \quad (5)$$

donde $D_{DEA's}$ es la densidad de DEA's por unidad de superficie

- Índice Keraúcnico o Ceraúcnico

$$I_C = n \frac{DEA's}{A_{sup.} \cdot years} \quad (6)$$

donde, I_C es el índice ceraúcnico y es igual al número de DEA's por unidad de área por año.

Para la realización de este trabajo se procesaron los datos de manera que se obtuvieron nuevos registros diarios de las variables X y Y no repetidas, más una columna que indica cuantas veces se han repetido las mismas en el registro original inicial. A partir de estos registros se pueden producir mapas de densidades de DEA's, con ayuda de software graficador en 2D y/o 3D a saber Matlab, Gnuplot, Surfer y ArcGIS entre otros.

Siguiendo el tratamiento del comportamiento de datos de las DEA's en el tiempo, también es posible establecer gráficas bidimensionales (mapas) correspondientes a las Fig.[13] y Fig.[14]. Periodos de comportamiento regular, ingreso, estancamiento

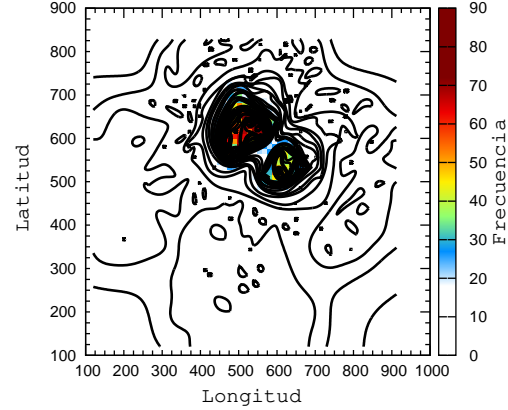


FIG. 13.— Mapa (2D) de densidades de DEA's (Enero 2012). El sensor se encuentre en (500, 500) (expresado en píxeles)

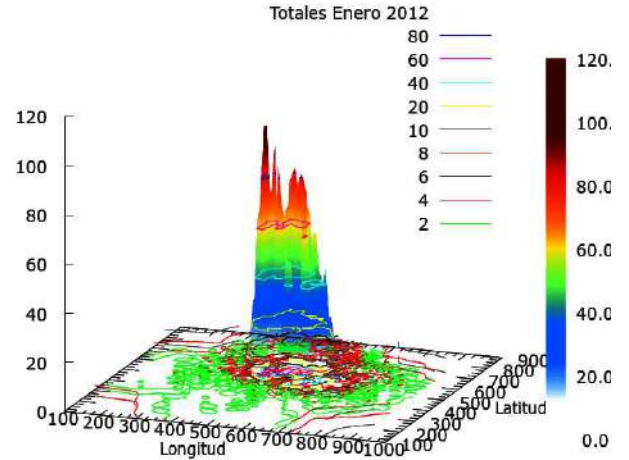


FIG. 14.— Gráfica (3D) de densidad de DEA's (Enero 2012) (superficie en píxeles).

y repliegue de las nubes al/en el territorio de observación y periodos de comportamiento irregular: con características especiales como DEA's en las madrugadas y en las tardes, DEA's que comienzan por la madrugada eliminando las DEA's de la tarde, DEA's pulsantes, pulso agudos regulares e irregulares y pulsaciones menores continuas, etc., a ser reportadas posteriormente.

La distribución espacial de las DEA's en la mayoría de estas circunstancias ya ha sido reportadas anteriormente, al comentar el comportamiento temporal de las DEA's (Vea las Fig.[13]¹ y Fig.[14]).

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. Las DEA's están completamente vinculadas a la presencia de masas de nubes, es decir se producen en temporadas de lluvia, mayormente en el verano austral y muy poco durante el In-

¹ Las dimensiones de (500,500) es expresado en píxeles

- vierno, restringido al ingreso de las denominadas surazos.
2. Los DEA's se generan normalmente durante las horas de la tarde de un día, pero muchas veces por las madrugadas y las mañanas y también por las tardes, algunas veces se comienza con DEA's por la madrugada y toda la mañana anulándolas en horas de la tarde, otras veces son pulsantes en forma regular e irregular y otras ocasiones se presentan como pulsaciones menores pero continuas reportándose como ruido atmosférico.
 3. El movimiento de las nubes de cuando ingresan al territorio de observación de manera general son de Norte a Sur tanto en horas de las mañanas como de las tardes y de sur a norte en el periodo de estancamiento y repliegue de nubes tanto por las mañanas como por las tardes. El movimiento de los enjambres de DEA's son correlacionables con los movimientos de las nubes.
 4. La mayoría de las DEAs se localizan en las zonas de los valles (los departamentos de Cochabamba, Chuquisaca, Norte Potosí) y las faldas orientales de la cordillera real, o en el límite de las montañas y los llanos (Chapare, Yungas) y los llanos orientales.
 5. en los años cuando se desarrolla el fenómeno climático La Niña, las nubes ingresan por los Valles del Río Apurímac y Sagrado de los Incas, Cuzco, La Cordillera Oriental con pocos y difíciles puntos de ingreso (Sorata, La Cumbre) al Sureste, Las Juntas (al Sur del Illimani) y los valles de Ayopaya (departamento de Cochabamba) y el Isiboro Secure alcanzando las profundidades sureñas del Altiplano y en él las zonas activas se localizan en los bordes de: El lado occidental del lago Titica, La parte oriental del Lago Poopo, Salar de Coipasa, Salar de Uyuni. La humedad bordea la Cordillera al sur del Chapare e ingresa a casi todo el territorio del Sudeste boliviano y el Noroeste del departamento de Chuquisaca, disminuyendo en los territorios del Noreste.
 6. Sucede justamente lo contrario en los años correspondientes al fenómeno climático de El Niño, En el Altiplano la humedad se concentra en el Norte y se generan intensas lluvias en los territorios del Noreste y prolongadas sequías en todo el resto del país.
 7. De manera general la mayoría de las DEA's se localizan al este del Meridiano que pasa por Patacamaya, punto de observación donde está instalada la Antena sensora.
 8. Las regiones de mayor densidad de DEA's se sitúa en el Departamento de Cochabamba y Chuquisaca a lo largo del Río Caine que es tomado como límite entre los departamentos de Chuquisaca y Cochabamba y el Norte de Potosí.
 9. Los DEA's que se producen en horas diferentes a los de la tarde, registros irregulares, serán objeto de un análisis detallado en posteriores trabajos
 10. Durante toda la mañana, el Sol transfiere calor a las nubes que se encuentran al este del meridiano del sensor. Estas nubes calientes, en horas de la tarde realizan movimientos convectivos tratando de moverse a regiones más calientes (Zonas calentadas por la radiación solar en horas de la tarde) dejando atrás las zonas que empiezan a enfriarse. Los movimientos convectivos de las nubes mas la fricción entre las mismas y con las faldas de las montañas genera las condiciones propicias para la producción de las DEA's, además, de otras condiciones físicas propias de fenómenos de electrificación e inducción.
- Conflicto de intereses** Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

REFERENCIAS

- Finke, U. & Haul, T. August 1996, p 361-374, 1986., The characteristics of lightning occurrence in southern Germany (Beitrag Phys. Atmosph.)
- Flitz. 2004, Flash localization by interferometry and tune of arrival system (Royal Netherlands Meteorological Institut)
- Krider, P. E. & Nogli, R. 1975., roadband antenna systems for lightning magnetic fields (B Journal of applied meteorology)
- Lucas, J. R. 2001, Lightning Phenomena (High Voltage Engineering)
- Metz-Nablat, B. & Mila, E. 1998, El rayo y las instalaciones eléctricas en AT Cuaderno técnico (Schneider 168)
- . 2009, ERITECH Lightning Protection (Handbook, 2009)
- Pando, R. 2008, Aspectos básicos de las descargas eléctricas atmosféricas (ISSN 1668-9178)
- Raizman, S., Mendez, Y., Vivas, J., & Arevalo, J. 2004, Caracterización del nivel cera único de Venezuela a partir de un sistema de detección de descargas eléctricas atmosféricas (SDDA) (CVG-EDELCA)
- Rakov, A. V. & Uman, M. A. 2009, Lightning physics and effects (Handbook, 2009)
- Rousseau, A., Jian, C. W., Qiang, W., & Tao, M. Upsala, Sweden, 2008, Testing facility and methodology for local lightning detectors basis for scientific and standardisation discussions (29 th international conference on lightning practices)
- Tarazona, J., Ferro, C., & Urdaneta, A. J. 2006, Cartographic representation of Venezuelan Keraunic activity CIGRE (publication B2-206)
- Uman, M. A. & Krider, P. E. 1989, Natural and artificially initiated lightning, Science, 246, 262

DETERMINACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE TORSIÓN DEL POLIHIDROXIBUTIRATO (PHB) MEDIANTE SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE UN AGLOMERADO

COMPUTATIONAL SIMULATIONS TO DETERMINE POLYHYDROXYBUTYRATE TORSION ANGLES OF A CLUSTER

ELBA J. COLQUE-ZACARIAS¹, CRISTHIAN CARRASCO², FLAVIO GHEZZI¹, & ARMANDO R. TICONA-BUSTILLOS¹

¹Instituto de Investigaciones Físicas
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz - Bolivia

²Carrera de Ingeniería Química
Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos
Universidad Mayor de San Andrés
La Paz - Bolivia

(Recibido 22 de mayo de 2018; aceptado 5 de octubre de 2018)

RESUMEN

Mediante Dinámica Molecular, se implementa un modelo que represente las propiedades del polímero Polihidroxibutirato (PHB), se analizan diferentes tamaños de cadena de PHB aislados (monómero, dímero, pentámero, decámero y vigémero). Se genera un aglomerado de 100 pentámeros en el ensamble a presión constante (NPT); obteniendo una configuración cúbica estable que permite calcular el valor de la densidad, el cual es aproximado a lo reportado en la literatura. Por otro lado, se realizan los cálculos de los ángulos de torsión tanto para las cadenas aisladas como para el aglomerado, en ambos casos se pudo verificar que estos valores coinciden con los valores reportados en la literatura, por tanto, podemos indicar que los parámetros utilizados en nuestro modelo representan adecuadamente las características del PHB, con lo cual obtenemos una herramienta para estudios posteriores de este polímero.

Código(s) PACS: 31.15.at — 33.15.Dj — 61.41.+e

Descriptor: Dinámica molecular — distancias interatómicas y ángulos — polímeros elastómeros y plásticos

ABSTRACT

By means of Molecular Dynamics, a model that represents the properties of the polymer Polyhydroxybutyrate (PHB) is implemented. Different chain sizes of isolated PHBs (monomer, dimer, pentamer, decamer and vigomer) are analyzed. An agglomeration of 100 pentamers is produced in the ensemble at a constant pressure (NPT) forming a stable cubic configuration. This configuration allows for the calculation of density values which correspond to those found in the literature. Also, the calculation of torsion angles for both isolated chains and the agglomeration are found to coincide with those values reported in the literature. The parameters used in our model adequately represent the PHB characteristic. We conclude that the model is a useful tool for further studies of PHB.

Subject headings: Molecular dynamics — Interatomic distances and angles — Polymers, elastomers, and plastics

1. INTRODUCCIÓN

La producción de materiales plásticos es uno de los grandes problemas de contaminación para el medio ambiente debido a que estos pueden tardar miles de años para su degradación; una de las alternativas para contrarrestar este efecto es la producción de plásticos con diferentes grados de biodegradabilidad. El Polyhydroxybutirato (PHB) es uno de los polímeros con mayor grado de biodegradabilidad, estas macromoléculas pueden ser sintetizadas por algunas bacterias que almacenan nutrientes en exceso

en forma de PHB para cuando se acaben los recursos del medio en el que viven (Lundgren et al. 1964). Las propiedades de estos polímeros son similares a termoplásticos sintéticos como el polipropileno (PP). Entre sus propiedades físicas se puede mencionar el punto de fusión que se encuentra en un rango entre 169 a 182 °C y la densidad de 1.25 g/cm³ a temperatura ambiente (Ojumu et al. 2004). Sin embargo, el costo de la producción e industrialización del PHB resulta ser muy elevado, por lo que actualmente se están buscando estrategias para optimizar

la producción industrial de este plástico a bajos costos; varios proyectos utilizan las técnicas de la biorrefinería para aminorar los costos en la generación de la biomasa. En Bolivia se están realizando trabajos sobre la producción de PHB a partir de la bacteria *Halomonas Bolivienensis*; también, se realizan proyectos para el uso del PHB en la medicina y la industria, pero el costo y el tiempo requerido para estos experimentos son bastante grandes (Kawata & K.Kawasaki 2012; Koller et al. 2010). Para el presente trabajo, se pretende buscar una alternativa mediante simulaciones computacionales usando técnicas de DM que generen un modelo capaz de representar diferentes características del PHB; para esto, se utilizan ciertos parámetros y potenciales al momento de simular el polímero aislado como el aglomerado; el cálculo de los valores para los ángulos de torsión en ambos casos no deberían sufrir cambios relevantes, esto confirmaría la eficiencia de los potenciales y parámetros aplicados a este nuevo modelo que está siendo implementado.

2. MÉTODO

En el presente trabajo se utiliza el programa DL.POLY (Todorov & Smitch 2010) que facilita de manera eficiente simulaciones de macromoléculas, polímeros, sistemas iónicos y otros tipos de sistemas atómicos, a su vez este programa considera una gran cantidad de interacciones que dependen de las posiciones de los átomos, los tipos de potencial e información general.

Hasta el momento los trabajos realizados sobre el PHB se enfocaron en estudiar las características de la estructura molecular del mismo en sistemas con un solo polímero compuesto con diferentes cantidades de monómeros (Kyles & Tonelli 2003). En el presente trabajo se realizan simulaciones computacionales para un polímero aislado con diferentes cantidades de monómeros; y para un sistema compuesto por moléculas con una cantidad fija de monómeros. Con todo esto se puede observar el comportamiento de la densidad y los ángulos de torsión del PHB, resultante de las interacciones inter e intra moleculares.

3. GENERACIÓN DEL POLÍMERO

El programa DL.POLY requiere información básica y fundamental de las componentes de la molécula, en primera instancia se requiere la información para controlar la simulación como ser: temperatura, presión, tipo de ensamble, pasos de simulación, entre otras; por otro lado, es necesario obtener parámetros iniciales como ser: masas, cargas, posiciones, enlaces y ángulos de enlace. Para esto se consideraron valores del programa Avogadro, una vez que la molécula se encuentra en un estado con mínima energía como se muestra en la figura 1; además, estos valores fueron comparados con diferentes fuentes bibliográficas, debido a que la mayor parte de los átomos que compone esta cadena son conocidas. Es importante destacar que estos parámetros de la configuración de la molécula

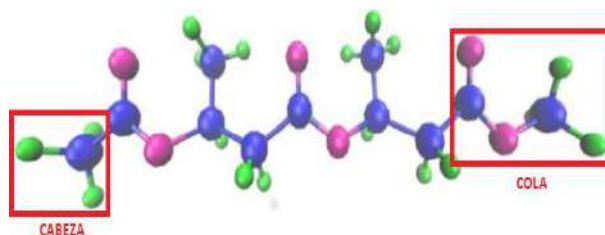


FIG. 1.— Configuración inicial de una cadena de PHB.

TABLA 1
PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Radio de corte	Aislado Å	Aglomerado Å
Coulomb	30.000	12.000
van der Waals	9.000	9.000

coinciden con los valores obtenidos experimentalmente, los cuales han sido utilizados en los diferentes trabajos para determinar los valores de los ángulos de torsión.

La unidad básica del polímero es el monómero compuesto por dos átomos de Oxígeno (color magenta), 4 átomos de carbono (color azul) y 6 átomos de hidrógeno (color verde). En general, el polímero en su estado natural tiende a formar cadenas muy largas (cientos de monómeros), debido a que los extremos siempre se encuentran libres, con un desbalance de carga que le permite unirse con otras cadenas de PHB, para formar cadenas compuestas, las cuales no necesariamente presentan la misma cantidad de monómeros, presentándose en general una polidispersividad muy grande. Los trabajos de Kyles & Tonelli (2003); Sasanuma & Katsumata (2012) mencionan que para realizar un balance de cargas se deben completar los extremos con moléculas que contengan porciones del mismo polímero generando una “cabeza” (metilo) y “cola” (acetato) como se muestra en el Figura 1. Este balance de cargas es necesario para poder mantener los tamaños de los polímeros en un valor constante, ya que en el presente trabajo no se pretende estudiar la interacción entre extremos de polímeros, lo cual generaría polímeros más grandes.

Es importante mencionar que los enlaces y los ángulos de enlace están representados por osciladores armónicos como es usual para éste tipo de simulaciones. Además, en el presente trabajo se considera que los átomos de la cadena interactúan con el resto de la molécula (interacciones intra moleculares) mediante potenciales de Lennard Jones y Coulomb, el mismo tipo de potenciales es usado para las interacciones inter moleculares.

Por su parte, en las simulaciones del aglomerado se implementan ciertas técnicas y aproximaciones típicas de la DM; por ejemplo, los radios de corte de Coulomb y de Van der Waals, así como la precisión de Ewald para las sumatorias; entre otras. A continuación, se denotan algunos parámetros utilizados para nuestro modelo de una cadena simple.

Se recalca que el parámetro de precisión de Ewald para las sumatorias no sufre cambios en ambos ca-

sos y es igual a: 10^{-5} . Una vez generados los principales archivos se ejecutaron las simulaciones para los diferentes tamaños de polímeros (un monómero, dos monómeros (dímero), cinco monómeros (pentámeros), diez monómeros (decámeros) y veinte monómeros (vigémeros)) en el ensamble NVT, obteniendo las distribuciones de probabilidad de las distancias entre la cabeza-cola, para diferentes valores de temperatura, cuyo rango se muestra en la Figura 3. Luego de la ejecución del programa se obtuvieron distribuciones de probabilidad de las distancias entre la cabeza y cola para cada tamaño de cadena; para los casos del monómero y el dímero no se obtienen distribuciones de probabilidad normales, por otro lado, el pentámero, decámero y vigémero muestran distribuciones de probabilidad normales. Además, es importante recalcar que éstas distribuciones indican la libertad de movimiento para la extensión o contracción de la cadena. Para el caso del monómero y dímero se observó que esta libertad de movimiento presenta alguna restricción a medida que la cadena se contrae. Por su lado, la curva de distribución de probabilidad del pentámero presenta mayor libertad de movimiento al contraerse o al extenderse.

Las curvas de distribuciones de probabilidad para el decámero y vigémero también presentan curvas que indican mayor flexibilidad en la cadena tanto al contraerse como al extenderse, replicando el comportamiento real de los polímeros que habitualmente tienden a estar contraídos formando estructuras helicoidales. Es importante recalcar que el equipo computacional utilizado presenta restricciones para realizar simulaciones más allá de 10000 átomos, las cuales toman tiempos muy largos de simulación.

Por todo lo mencionado anteriormente, se procede a escoger al pentámero como cadena eventualmente idónea (representa de manera adecuada las características del polímero y las simulaciones no son muy demoradas) para construir nuestro modelo de varios polímeros (aglomerado).

Para el presente trabajo se realiza una configuración para un sistema con 100 pentámeros (7100 átomos). En principio se construye un sistema de 25 polímeros realizando una simulación en un ensamble NVT hasta obtener un aglomerado estable. Se replica el aglomerado cuatro veces para obtener un sistema de 100 polímeros, realizando la simulación también en un ensamble NVT hasta obtener un aglomerado estable.

Una vez que se obtiene el aglomerado se cambia al ensamble NPT, para analizar el comportamiento del volumen a presión constante en condiciones realistas y considerando condiciones periódicas cúbicas de contorno, para mantener la simetría isotrópica del sistema. Finalmente, se ejecuta el programa a diferentes temperaturas hasta obtener las correspondientes configuraciones estables, la Figura 2 muestra una configuración estable a 300 K.

Una vez que se obtiene las configuraciones estables se procede a calcular el volumen del cubo resultante, con este se determina la densidad para diferentes

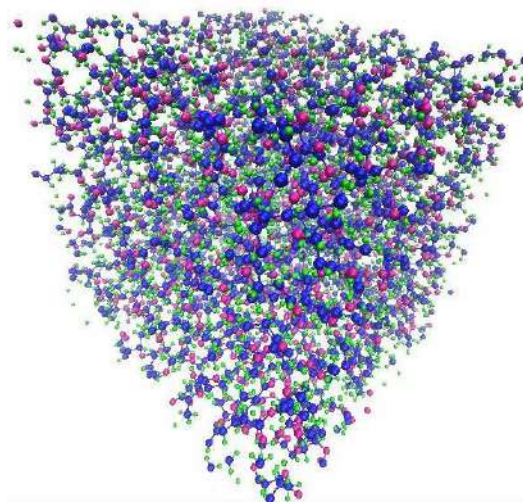


FIG. 2.— Configuración estable del aglomerado con 100 pentámeros en el ensamble NPT, con condiciones periódicas de contorno (La configuración corresponde a un cubo).

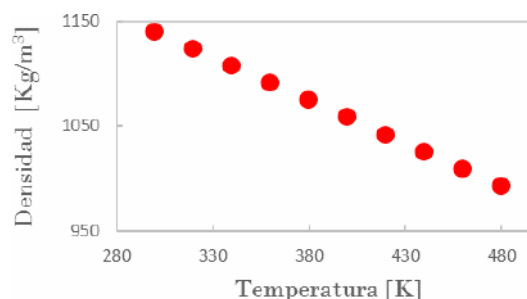


FIG. 3.— Comportamiento de la densidad en función a la temperatura.

temperaturas como se muestra en la Figura 3. A temperatura ambiente (300 K), la densidad que se obtuvo es $\rho = (1.1401 \pm 0.0002) \text{ g/cm}^3$, el valor experimental reportado en la literatura es de 1.25 g/cm^3 , entonces podemos decir que el valor obtenido de nuestra simulación es una buena aproximación, dada a la simplicidad de nuestro modelo.

4. ÁNGULOS DE TORSIÓN

Uno de los valores más importantes que caracteriza a cualquier molécula son los ángulos de torsión que pueden modificar la geometría y las propiedades físico-químicas de la misma. En general, el ángulo de torsión está definido por un ángulo diedro entre los dos planos que definen la interacción de cuatro átomos consecutivamente enlazados. A pesar que se pueden definir varios ángulos de torsión en toda la molécula, la columna principal del PHB está conformada por sólo cuatro ángulos de torsión, en cada monómero. La cantidad de repeticiones del monómero en la cadena aumenta las repeticiones de estos cuatro ángulos de torsión. Para el caso de la cadena aislada se realizaron los cálculos de las distribuciones de probabilidad de los ángulos de torsión para los diferentes tamaños de cadena y a diferentes valores de temperatura, los cuales fueron comparados con resultados obtenidos en Kyles & Tonelli (2003), se pudo observar que las distribuciones de

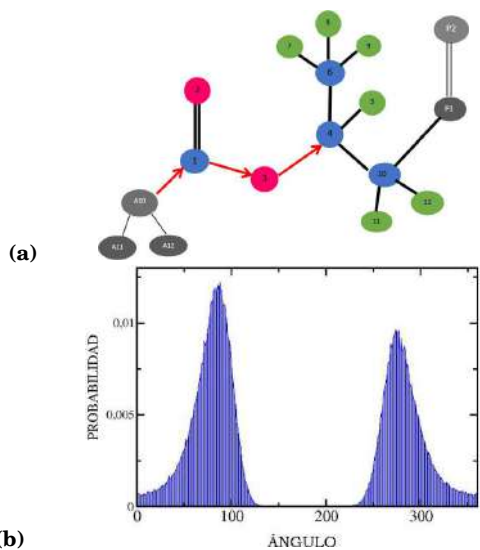


FIG. 4.— (a) Esquema representativo del ángulo de torsión A. (b) Histograma de la distribución de probabilidad del ángulo de torsión A.

probabilidad de los ángulos de torsión, son independientes del tamaño de la cadena, así como de la temperatura; sin embargo, a medida que se aumenta la cantidad de monómeros en la simulación, disminuye la dispersión alrededor de los ángulos más probables. A continuación, se describirán las distribuciones de probabilidad de estos 4 ángulos de torsión.

El primer ángulo de torsión *A* es formado por los átomos A10-1-3-4 de la cadena principal como se muestra en la Figura 4 (a); la Figura 4 (b) muestra el histograma de la distribución de probabilidad para éste ángulo, donde los puntos máximos a 90 y 275 grados implica que existe una energía mínima en estos valores, para el cual se obtiene configuraciones estables; Los resultados de la Figura 4 (b) son obtenidos a partir de las simulaciones con DM para el polímero aislado y para el aglomerado donde los valores de estos ángulos de torsión presentan los mismos comportamientos y estos a su vez son semejantes a los modelos teóricos y simulaciones de trabajos anteriores para polímeros aislados (Kyles & Tonelli 2003).

Tanto en nuestras simulaciones como en otras (Kyles & Tonelli 2003) los histogramas presentan distribuciones alrededor del máximo, esto se debe a las oscilaciones de los componentes de las moléculas a temperatura finita; en el caso de los cálculos teóricos el resultado se presenta como un pico debido a que no se toman en cuenta estas oscilaciones. El segundo ángulo de torsión *B* está conformado por los átomos 1-3-4-10 de la columna principal como se muestra en la Figura 5 (a); las simulaciones con DM tanto para el polímero aislado como para el aglomerado muestra un solapamiento entre las distribuciones de probabilidad para los ángulos a 260 y 310 grados como se observa en la Figura 5 (b), este comportamiento es similar a lo que se obtiene en la literatura (Kyles & Tonelli 2003). Nuestro modelo muestra una distribución con mayor probabilidad alrededor de los 110 grados, a pesar que este ángulo de estabilidad es reportado en la literatura en

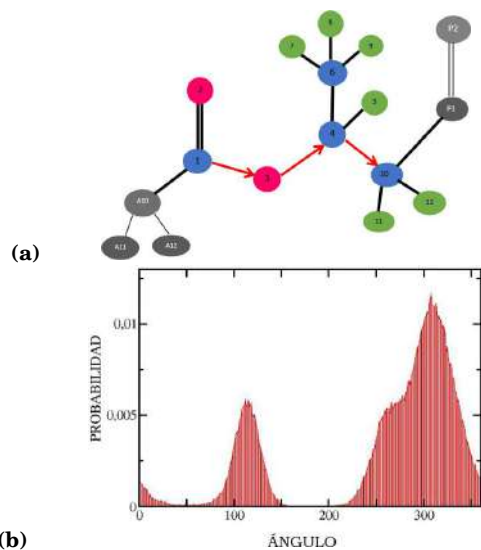


FIG. 5.— (a) Esquema representativo del ángulo de torsión B. (b) Histograma de la distribución de probabilidad del ángulo de torsión B.

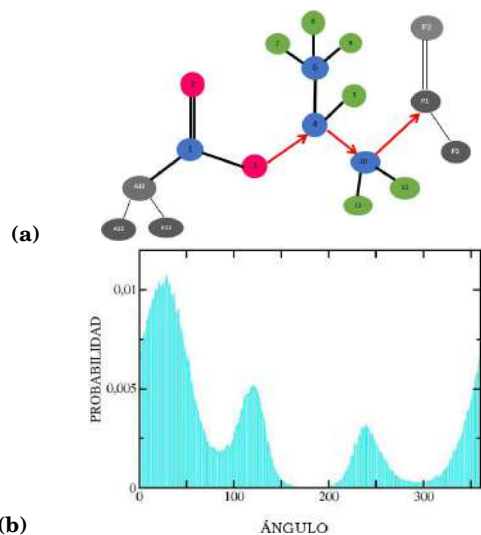


FIG. 6.— (a) Esquema representativo del ángulo de torsión C. (b) Histograma de la distribución de probabilidad del ángulo de torsión C.

los histogramas mostrados Kyles & Tonelli (2003) es presentado con menor probabilidad.

Los átomos 3-4-10-P1 de la Figura 6 (a) forman el ángulo de torsión *C*; la Figura 6 (b) muestra la distribución de probabilidad de este ángulo de torsión, donde los puntos máximos se encuentran en 25, 125 y 240 grados.

Finalmente, la Figura 7 (a) muestra los ángulos de torsión *D* conformado por los átomos 4-10-P1-P3, la Figura 7 (b) muestra el histograma de la distribución de probabilidad del ángulo D para el aglomerado, en la cual estas distribuciones de tienen el mismo comportamiento que en el caso del polímero aislado, por tanto, se valida nuevamente los parámetros y potenciales utilizados en la simulación.

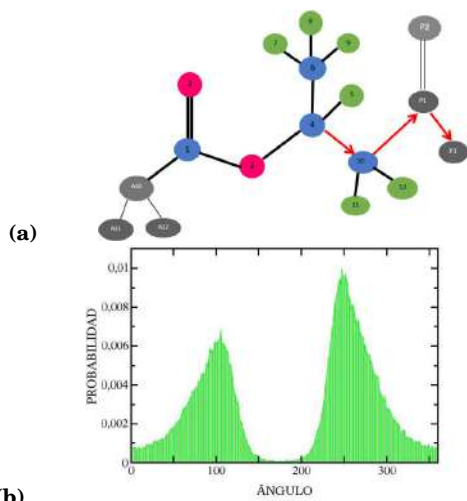


FIG. 7.— (a) Esquema representativo del ángulo de torsión D. (b) Histograma de la distribución de probabilidad del ángulo de torsión D.

Las simulaciones computacionales son una alternativa que permiten realizar simulaciones de sistemas con muchos componentes de forma económica, en tiempos cortos y de manera segura. Para una buena aplicación de esta alternativa, es necesario validar el método de simulación, en el presente trabajo se genera un modelo de DM para el PHB el cual se valida comparando sus resultados con los obtenidos previamente de manera teórica y experimental. En nuestro modelo se representan los enlaces y los ángulos de enlace mediante osciladores armónicos. Además, se utilizó el potencial de Lennard Jones para representar interacciones intra e inter moleculares. También se tomaron en cuenta las interacciones electrostáticas, mediante la ley de Coulomb. Nuestros resultados demuestran que los potenciales escogidos tanto para el polímero aislado como para el aglomerado representan adecuadamente a los valores de los ángulos de torsión, los cuales fueron comparados con los resultados dados por muchos trabajos que simularon polímeros aislados y por resultados experimentales (Kyles & Tonelli 2003). En nuestro modelo para el aglomerado se utiliza una cadena de tamaño único

y pequeño (pentámero), esto debido a las limitaciones computacionales ya que al generar el aglomerado con 100 pentámeros se tienen 7100 átomos que implican tiempos relativamente largos de simulación computacional. Nuestras simulaciones muestran que el pentámero es el tamaño mínimo que cumple con las características de flexibilidad y helicidad del PHB. Estas características fueron respaldadas con los cálculos de las distribuciones de probabilidad de la distancia entre la cabeza y cola para cada tamaño de cadena. Se recomienda que para una mejor representación del sistema se utilicen cadenas con mayor cantidad de monómeros, de diferentes tamaños y con los extremos libres; todos estos factores ayudarían a obtener un valor de densidad más aproximado, al valor real. El presente trabajo se enfoca en una de las características más importantes en la representación de una molécula, estos son los ángulos de torsión que determinan la forma de cualquier polímero, todos los trabajos hasta la actualidad, muestran los valores de estos ángulos para polímeros aislados (Kyles & Tonelli 2003), realizando comparaciones con modelos teóricos. En el presente trabajo se realizaron las distribuciones de probabilidad de estos ángulos para diferentes tamaños de cadena aislados a diferentes temperaturas, donde los resultados son semejantes a lo obtenido en la literatura (Kyles & Tonelli 2003; Sasanuma & Katsumata 2012). Posteriormente se realizaron las distribuciones de probabilidad de estos ángulos para un sistema compuesto por varios polímeros, donde los resultados nuevamente muestran los mismos valores obtenidos con polímeros aislados, a pesar de haber incluido las interacciones con otras moléculas. Los potenciales inter e intra moleculares utilizados en el presente trabajo (Lennard Jones Coulomb) brindan resultados adecuados. Finalmente podemos decir que nuestro modelo ya es una herramienta adecuada para poder realizar nuevos estudios acerca del comportamiento del PHB.

Conflicto de intereses Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

REFERENCIAS

- Alder, B. J. & Wainwright, E. 1958, *Molecular Dynamics by Electronic Computers*. (Interscience-Wiley)
- Avogadro. 2009
- Babel, W. & Steinbuchel, A. 2003, *Biopolyester* (Springer)
- Doi, Y., Kanesawa, Y., & Kunioka, M. 1990, *Macromolecules*, 23, 26
- Gutierrez, G. 2001, *Elementos de simulación computacional- Dinámica Molecular y Metodo de Montecarlo* (Departamento de Física- Universidad de Santiago de Chile)
- Kawata, Y. A. & K.Kawasaki. 2012, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96, 913
- Koller, M., Salerno, A., Dias, M., Reiterer, A., & Braunegg, G. 2010, *Food Technol. Biotechnol.*, 48, 255
- Kyles, R. & Tonelli, A. 2003, *Macromolecules*, 36, 1125
- Lundgren, D., Pfister, R. M., & Merrick, J. M. 1964, *Macromolecules*, 34, 441
- Ojumu, T. V., Yu, J., & Solomon, B. O. 2004, *Biotechnology*, 3, 18
- R.J.Pazur, S.Raymond, Hocking, P., & R.H.Marchessault. 1998, *Elsevier*, 39, 3065
- Sasanuma, Y. & Katsumata, S. 2012, *Polymer*, 45, 727
- Staudinger, H. 1920, *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 53, 1073
- Todorov, I. & Smitch, W. 2010, *Manual of DL-POLY* (STFC Daresbury Laboratory Daresbury- Warrington- UK)
- Valenzuela-González, G. E. 2011, *Efectos de termostatos Berendsen y de cadenas Nos- Hoover en dinámica molecular* (Universidad de Concepción - Chile)

CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE NIEBLA DE DIFUSIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES PARTÍCULAS CÓSMICAS

CONSTRUCTION OF A DIFFUSION CLOUD CHAMBER FOR THE IDENTIFICATION OF DIFFERENT COSMIC PARTICLES

ALEJANDRO MANZANEDA O.[†], CARLA A. CALLE GARCÍA[‡], & MANUEL MONASTERIOS M.^{*}

Instituto de investigaciones Físicas, Carrera de Física:
Universidad Mayor de San Andrés
c.27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz - Bolivia

RESUMEN

En este trabajo se presentan los fotogramas de las partículas cósmicas observadas en la cámara de niebla de difusión que construimos para la feria de Física a Puertas Abiertas de la carrera de Física en la Universidad Mayor de San Andrés. El objetivo principal del experimento fue mostrar la existencia de partículas cósmicas que constantemente llegan a la Tierra e identificarlas dependiendo del tipo de traza que dejaban en el detector. Se identificaron las trazas de muones, partículas β de alta y baja energía, partículas α y fenómenos como la producción de pares y el decaimiento del muón.

Código(s) PACS: 95.55.Vj — 96.40.z — 01.50.My

Descriptores: Detectores de rayos cósmicos — rayos cósmicos — Aparatos y experimentos demostrativos

ABSTRACT

In this work we present the cosmic particles frames observed in the diffusion cloud chamber that we built for the outreach fair “Física a Puertas Abiertas” of the Department of Physics at “Universidad Mayor de San Andrés”. The aim of the experiment was to show the existence of cosmic particles that are constantly reaching the Earth and identify them based on their tracks left in the detector. We identified the traces of muons, high and low energy β particles, α particles and phenomena such as pair production and muon decay.

Subject headings: Cosmic ray detectors — cosmic ray — demonstration experiments and apparatus

1. INTRODUCCIÓN

Constantemente la Tierra es bombardeada por partículas subatómicas que llegan de diferentes fuentes del Universo, como explosiones de estrellas u otros eventos astronómicos altamente energéticos que no pueden ser percibidos por las personas.

Inicialmente, los científicos estudiaban la ionización remanente del aire y la atribuían a fuentes radiactivas presentes en la superficie terrestre. Sin embargo, en 1911 el austriaco Victor Hess envió electrómetros en globos alcanzando los 5 Km, para realizar medidas de la ionización en la atmósfera. Sus resultados mostraron que a partir de una cierta altura la ionización aumentaba, entonces concluyó que existía una fuente de radiación ionizante extraterrestre (Gruppen (2005)). Posteriormente, recibió el premio Nobel de Física en 1936, “por el descubrim-

iento de la radiación cósmica”, (Nobel-Foundation (1936)).

La radiación de origen extraterrestre denominada rayos cósmicos (RC) está compuesta por partículas muy energéticas, sobretudo protones y núcleos de Helio que viajan a velocidades relativistas. Cuando estas partículas colisionan con los núcleos de la atmósfera terrestre generan una cascada de partículas secundarias mediante diferentes interacciones y estas a su vez generan nuevas partículas, lo cual se conoce como un chubasco atmosférico de partículas, (Gruppen (2005)).

El estudio de los RC siempre ha llamado la atención de los científicos, razón por la cual se desarrollaron una gran cantidad y variedad de detectores usando diferentes técnicas y con distintos propósitos. Por ejemplo, aquellos para medir la velocidad de las partículas (detectores Cherenkov), otros para medir su energía (calorímetros), los que muestran sus trayectorias (detectores de traza), entre otros, (Gruppen & Shwartz (2008)).

[†]lmanzaneda@fiums.a.edu.bo.

[‡]ccalle@fiums.a.edu.bo.

^{*}mmonasterios@fiums.a.edu.bo.

El primer detector capaz de mostrar las trazas de las partículas fue la cámara de niebla desarrollada por el físico escocés Charles Thomson Rees Wilson. Por éste trabajo, Wilson junto con Arthur Compton recibieron el premio Nobel de Física en 1927, (Nobel-Foundation (1927)). Este dispositivo fue denominado “Cámara de Niebla de Expansión”, estaba compuesto por un recipiente lleno de una mezcla de vapor y gas a la presión de saturación del vapor.

Cuando una partícula cargada atraviesa la cámara ioniza los átomos que se encuentran en su camino. Se incluyeron detectores de centelleo para crear un sistema de coincidencias de manera que cuando se registraba una señal en todos los detectores, se enviaba una señal de disparo que iniciaba una expansión rápida en la cámara. Debido a esta expansión adiabática, la temperatura de la mezcla de gases disminuye y el vapor entra en un estado de sobresaturación. Posteriormente se condensa en los núcleos de condensación (que son los iones) que dejó la partícula cargada en su camino (Grupen & Shwartz (2008)).

Por otro lado, una “Cámara de Niebla de Difusión” es sensible permanentemente y no necesita de un sistema de disparo para que se observen las trazas de las partículas. En este caso el recipiente es llenado con una mezcla de gas y vapor. Se crea un gradiente de temperatura que permite obtener una región inestable donde el vapor está permanentemente sobresaturado. Cuando las partículas pasan por la cámara, se observan sus trazas por el mismo proceso descrito anteriormente (Grupen & Shwartz (2008)).

Carl Anderson en 1932, empleando el invento de Wilson y añadiendo un campo magnético externo de 2.5 T, descubrió el positrón (antipartícula del electrón), examinando la trayectoria seguida. Cuatro años más tarde, en 1936 Anderson recibió el premio Nobel de Física por su descubrimiento, (Nobel-Foundation (1936)). Ese mismo año Anderson y Seth Neddermeyer descubrieron el muón (≈ 207 veces más masivo que el electrón) en la cámara de Wilson.

En este trabajo presentamos la construcción de la cámara de niebla de difusión expuesta en la feria *Física a puertas abiertas* (F.A.P.A.) 2018 con el objetivo de demostrar la existencia de partículas subatómicas que bombardean constantemente la Tierra y a partir de la observación de sus trazas lograr identificarlas. Con todo ello esperamos incentivar a estudiantes y público en general a involucrarse en esta área tan apasionante de la Física.

2. DESCRIPCIÓN Y ELABORACIÓN DE LA CÁMARA DE NIEBLA

La construcción de la cámara de niebla que describiremos a continuación tiene como antecedente el trabajo original realizado por Alexander Langsdorf (Langsdorf 1939), sin embargo el diseño empleado es mucho más simple.

Utilizamos un recipiente de vidrio de base cuadrada de lado 30 [cm] y altura 20 [cm] como cámara del detector, además de una lámina metálica (buen conductor térmico) de color negro para sellar

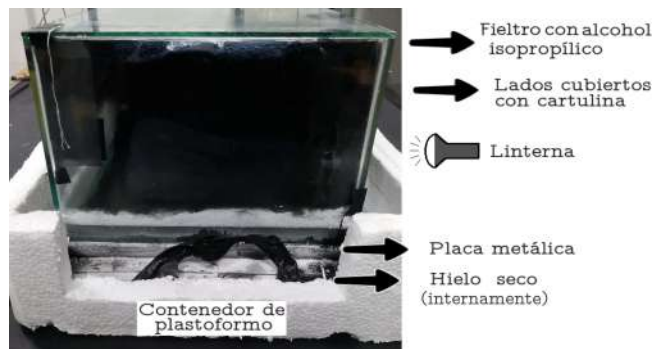


FIG. 1.— Arreglo experimental de la cámara de niebla de difusión. Es importante conseguir un fondo oscuro dentro de la cámara para poder observar las trazas fácilmente.

la base, la cual es expuesta a CO_2 en estado sólido (hielo seco aprox. -78°C a 1 atm). Fue preciso emplear un contenedor de plástico como aislante del hielo seco, con dimensiones ligeramente mayores a la base del detector. En el arreglo experimental también fue necesario emplear cinta aislante, silicona para vidrio, cartulina negra, fieltro y una linterna.

Para el ensamble de la cámara, el fieltro se fijó en la base del recipiente con silicona y fue empapado completamente con alcohol isopropílico. Los lados laterales se forraron internamente con cartulina negra (para evitar reflejos y para obtener una mejor visualización), dejando dos lados adyacentes semi cubiertos, ya que por un lado se debe iluminar con linterna y por el otro se visualiza el interior de la cámara. La parte superior fue sellada con la placa metálica lo mejor posible para evitar fugas, como se muestra en la Fig. (1).

El recipiente se volteó y fue depositado sobre el contenedor de plástico que almacena el CO_2 , que debe ser manipulado con mucha precaución evitando el contacto con la piel debido a la baja temperatura a la que se encuentra.

Deben transcurrir unos minutos para que el vapor de alcohol alcance el estado de sobresaturación al descender y entrar en contacto térmico con la base metálica a muy baja temperatura, como se observa en la Fig. 2. Iluminando por un lado con la linterna se observaron las estelas generadas por el paso de distintas partículas.

3. IDENTIFICACIÓN DE PARTÍCULAS EN LA CÁMARA DE NIEBLA

Las estelas generadas por el paso de partículas son relativamente fugaces lo cual dificulta la observación directa del tipo de traza y más aún la toma fotográfica. Para evitar tal inconveniente se realizó una grabación en video y posteriormente se extrajeron los fotogramas con el reproductor *VLC media player* de libre acceso y multiplataforma, (videoLAN 2001). La identificación de las partículas se realizó a través de un análisis cualitativo observando la forma de las estelas como se describe a continuación.

- Estelas cortas y gruesas, Fig. 3.



FIG. 2.— Vista del interior de la cámara de niebla cuando el vapor de alcohol ha llegado al estado de sobresaturación.



FIG. 3.— Traza corta y gruesa dejada por una partícula α , ya que interactúa con facilidad en el medio.

Las estelas corresponden a partículas α (núcleos de He-4) provenientes del gas Rn-222 presente en el ambiente. Estas partículas se atenúan fácilmente en el medio debido a que son muy masivas.

En consecuencia las estelas que generan son cortas, gruesas y más brillantes.

- Estelas largas y delgadas, Fig. 4.

Este tipo de estela corresponde a electrones o positrones muy energéticos que ionizan las moléculas del medio dejando una traza recta y delgada sin sufrir dispersión.

- Estelas largas y gruesas, Fig. 5.

Las trazas son muy parecidas a las producidas por electrones, sin embargo son más gruesas debido a que son aproximadamente 207 veces más masivas que los electrones. De la misma manera, al ser muy energéticas no se dispersan.

- Estelas zig-zag, Fig. 6.



FIG. 4.— Se observa una trayectoria recta y delgada, este tipo de estela es producida por electrones e^- o positrones e^+ muy energéticos.



FIG. 5.— Estela producida por un muón μ^- o su antipartícula μ^+ .



FIG. 6.— Tipos de trazas producidas por electrones o positrones de baja energía cinética.

Partículas β con baja energía cinética generan este tipo de trayectorias erráticas, ya que son propensos a dispersarse por repulsión electromagnética con otros electrones presentes en el medio. Estas trayectorias también pueden deberse a múltiples colisiones que sufren en el medio.

- Decaimiento del muón, Fig. 7.

Las Ecs. (1a) y (1b) describen la desintegración del muón y de su anti-partícula respectivamente.

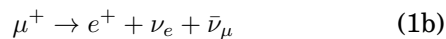
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1a)$$



FIG. 7.— La parte superior de la estela es más gruesa respecto a la parte inferior, esto puede indicar la desintegración de un muón o de su anti-partícula.



FIG. 8.— Se observa el paso de una partícula que repentinamente produce dos trazas en diferentes direcciones, lo cual puede corresponder a una “creación de pares”.



Sin embargo, también puede deberse a la dispersión de la partícula debido a una colisión con otro tipo de partículas en el medio.

- Bifurcación, Fig. 8.

Si una partícula tiene suficiente energía (> 1.022 [MeV]) puede crear un electrón y un positrón. Fenómeno conocido como *creación de pares*, Ec. (2).

En la Fig. 8 se observa este fenómeno, donde la traza principal se bifurca en dos más tenues.



En las Figs. 3-8, la escala añadida de aproximadamente 1 [cm] muestra el tamaño relativo de las diferentes trazas dejadas por las partículas.

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La identificación de las partículas realizada en la sección 3 no es completamente certera, ya que se basa en un análisis meramente cualitativo, e.g., el tipo de estela *larga y delgada* puede corresponder a un electrón o a su antipartícula. Si se desea conocer el tipo de partícula hace falta un campo magnético muy intenso (en el orden de los *Teslas*) que producirá una deflexión particular que dependerá de la carga de la partícula y se podrá determinar si corresponde a un electrón o positrón. Por otro lado, si el propósito consiste en la determinación exacta del tipo de partícula, la cámara de niebla de difusión no es la adecuada debido a su carácter cualitativo.

La escala de longitud añadida en la parte superior izquierda de las Figs. 3-8, de 1 [cm] (medida aproximada), permitió la clasificación de las partículas, e.g. en la Fig. 3 la longitud de la traza es más corta respecto a las Figs. 4 y 5, esto sugiere que es debido a una partícula α , y a su vez la traza de la Fig. 4 es más delgada que la traza de la Fig.5, lo cual permite diferenciar partículas beta de muones.

En el experimento se observaron las primeras trazas después de aproximadamente 20 minutos, lo cual puede deberse a la lentitud del proceso de evaporación del alcohol isopropílico. Para reducir el tiempo de espera, se podría acelerar la evaporación calentando la parte superior de la cámara donde se encuentra el fieltro empapado con el alcohol.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Investigaciones Físicas (IIF) y a su director Ing. Pedro Miranda por el apoyo económico brindado, al Laboratorio de Rayos Cósmicos y Física de Altas Energías de la carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés por brindarnos sus instalaciones para realizar el experimento. Al estudiante Reynaldo Mamani por colaborar en el desarrollo de este proyecto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

REFERENCIAS

Gruppen, C. 2005, *Astroparticle Physics* (Springer)
 Gruppen, C. & Shwartz, B. 2008, *Particle detectors* (Cambridge)
 Langsdorf, A. 1939, *Review of Scientific Instruments*, 10, 91

Nobel-Foundation. 1927, The nobel prize in Physics 1927, url-
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/summary/>,
 accedido 26-03-2019
 —. 1936, The nobel prize in Physics 1936, url-
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1936/summary/>,
 accedido 26-03-2019
 videoLAN. 2001, VLC media player, url-
<https://www.videolan.org/vlc/>, accedido 03-04-2019

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

COMITÉ EDITORIAL

Sociedad Boliviana de Física Instituto de Investigaciones Físicas

Lic. Alfonso Velarde Chávez

Email: avelarde@fiumsa.edu.bo

Dr. Marcelo Ramírez Ávila

Email: mravila@fiumsa.edu.bo

Carrera de Física

Dr. Armando R. Ticona Bustillos

Email: aticona@fiumsa.edu.bo

Casilla 8635, La Paz – Bolivia. Tel.: (591-2) 2792999, Fax: (591-2) 2792622

Misión

La Revista Boliviana de Física (RBF) es el órgano oficial de la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y se publica semestralmente en forma conjunta con el Instituto de Investigaciones Físicas y la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés (IIF-UMSA).

La RBF busca difundir la producción científica de la comunidad de físicos y profesionales de ciencias afines, especialmente dentro de Iberoamérica.

Secciones

Los artículos, revisiones y colaboraciones se distribuyen en las siguientes secciones:

- A. **Artículos:** Son trabajos que presentan material nuevo y original. Para su publicación, deben ser revisados y aprobados por árbitros del Consejo Editorial. Los artículos deberán tener un resumen no mayor a 200 palabras y secciones de Introducción, Métodos y Procedimientos, Resultados y/o Discusión de datos, Conclusiones y Referencias.
- B. **Contribuciones y Revisiones:** Estos trabajos no presentan, necesariamente, material original sino que definen la posición del (de los) autor(es) sobre un determinado tópico de debate (en el caso de Contribuciones) o bien, son una revisión de temas conocidos en algún área de la física (en el caso de Revisiones). Las contribuciones deberán estar orientadas hacia la difusión de algún problema o debate interpretativo. Las revisiones estarán orientadas a exponer temas de trascendencia para el desarrollo de las ciencias relacionadas con la física, o exponer en forma didáctica algún tema que los autores encuentren que no ha sido tratado en forma adecuada en la literatura asequible en lengua castellana.
- C. **Memorias de la Reunión Anual de la SOBOFI u otras reuniones de física:** Esta sección reúne los resúmenes de los trabajos presentados durante la última Reunión Nacional Anual de la SOBOFI o de otras reuniones científicas importantes sobre física.
- D. **Enseñanza de la Física:** Esta sección está dedicada a artículos que tratan sobre problemas relacionados a la enseñanza de la física o a la promoción del estudio de la física entre los jóvenes estudiantes. Se incorporan regularmente en esta sección los exámenes de las Olimpiadas de Física y las Olimpiadas de Astronomía y Astrofísica. Las contribuciones a esta sección son seleccionadas exclusivamente por el Comité Editorial.
- E. **Historia:** Esta sección se dedica a la conmemoración de hechos importantes en la historia de la Física Boliviana e Iberoamericana. De igual manera, se orienta a la recopilación de publicaciones relacionadas a la física que, por su importancia histórica, merecen ser nuevamente publicadas.

Instrucciones para los autores

La Revista Boliviana de Física recibe trabajos escritos en castellano, inglés o portugués y deben contar con un resumen en castellano y su correspondiente traducción en inglés.

Los autores deberán enviar sus trabajos preferentemente en los formatos $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$, *MS Word*, o *sólo texto* (con extensiones *.tex*, *.doc* y *.txt*, respectivamente), ya sea mediante una copia en dispositivo magnético o bien por correo electrónico. En este caso, deberán incluir una carátula donde se especifique el título del trabajo, los nombres de los autores, las direcciones (postal y/o electrónica) y el resumen del trabajo. Además, las figuras, tablas y notas de pie de página contenidas deberán estar indicadas en el texto, debidamente numeradas y referenciadas. Las figuras deberán tener una resolución razonable a fin de que puedan ser vistas con suficiente claridad por el lector.

Los artículos científicos serán revisados por el Comité Editorial y posteriormente por un par de árbitros anónimos quienes dan el veredicto sobre si el artículo es aceptado o no.

La comunicación de los autores con los árbitros se realiza únicamente a través del editor encargado del área.

Los trabajos y consultas sobre la RBF deberán enviarse a las direcciones del Comité Editorial indicadas arriba.

Conflicto de interés: Los autores que envíen artículos para su publicación en la RBF admiten que no tienen conflicto de interés en relación a los trabajos realizados y presentados.

CONTENIDO

A. ARTÍCULOS

MODELO NUMÉRICO PARA EL ESTUDIO DEL SUBSUELO EN REGIONES URBANAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE INTERFEROMETRÍA SÍSMICA
Miranda C. J. D. & Mansur W.

DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (DEA'S - RAYOS) CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES EN EL CIELO BOLIVIANO
Ricaldi Y. E. L., Torrez S. R., Qusipe C. & Quispe M. J.

DETERMINACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE TORSIÓN DEL POLIHIDROXIBUTIRATO (PHB) MEDIANTE SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE UN AGLOMERADO
Colque-Zacarias E. J., Carrasco C., Ghezzi F. & Ticona-Bustillos A. R.

D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE NIEBLA DE DIFUSIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES PARTÍCULAS CÓSMICAS
Manzaneda A., Calle C. & Monasterios M.