

ISSN - 1562 - 3823

# REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 27

DICIEMBRE 2015 • 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**

**Dr. Diego Sanjinés Castedo**  
Email: sanjines@fiumsa.edu.bo

**Instituto de Investigaciones Físicas**

**Lic. Alfonso Velarde Chávez**  
Email: avelarde@fiumsa.edu.bo  
**Dr. Eduardo Palenque Vidaurre**  
Email: edyruy@yahoo.es

**Carrera de Física**

**Dr. Armando R. Ticona Bustillos**  
Email: aticona@fiumsa.edu.bo  
**Lic. Elba J. Colque Zacarias**  
Email: jhaba.elba@gmail.com

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. Carlos Eduardo Fellows**

Laboratorio de Espectroscopia LASER  
Universidade Federal Fluminense  
Av. Gen. Milton Tavares de Souza  
24210-340, Niterói, RJ-Brasil  
Email: fellows@if.uff.br

**Dr. Jason Gallas**

Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Email: jgallas@if.ufrgs.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 27  
DICIEMBRE DE 2015

## **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:* Espacio de parámetros basado en periodicidades para un modelo de neurona y comparación de sus patrones con los que se encuentran en troncos y follaje de palmeras.

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

IMPRESO EN BOLIVIA — PRINTED IN BOLIVIA

## CONTENIDO

### A. ARTÍCULOS

ANÁLISIS DEL PLANO DE FASES DE UN MODELO DISCRETO DE NEURONA BASADO EN LA DETERMINACIÓN DE PERIODICIDADES <i>G. M. Ramírez Ávila, M. Gallas &amp; J. Gallas</i>	1
ESPACIOS DE PARÁMETROS PARA EL ESTUDIO DE LA TURBULENCIA MEDIADA POR DEFECTOS Y OTROS FENÓMENOS NO LINEALES EN SISTEMAS ESPACIALMENTE DISTRIBUIDOS <i>J. Sirpa &amp; G. M. Ramírez Ávila</i>	10
VARIACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL EN LA ESTACIÓN ANTÁRTICA PERUANA MACHU PICCHU <i>J. S. Suazo &amp; R. A. Vásquez</i>	15
CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y EL POTENCIAL EÓLICO DEL ALTIPLANO CENTRAL <i>J. Encinas, R. Torrez, F. Ghezzi &amp; E. Palenque</i>	20

### C. MEMORIAS DE LA REUNIÓN ANUAL DE LA SOBOFI U OTRAS REUNIONES DE FÍSICA

XXVI REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA <i>Sociedad Boliviana de Física</i>	25
XXVII REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA <i>Sociedad Boliviana de Física</i>	32

### D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

MATERIAL EDUCATIVO PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA CULTURA NUCLEAR EN BOLIVIA <i>R. Bustos, I. Poma &amp; G. M. Ramírez Ávila</i>	35
ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE UNA SUSTANCIA COAGULANTE <i>S. Yáñez, J. Carrasco &amp; I. Ocampo</i>	42



ANÁLISIS DEL PLANO DE FASES DE UN MODELO DISCRETO DE NEURONA BASADO EN LA DETERMINACIÓN DE PERIODICIDADES

PHASE PLANE ANALYSIS OF A NEURON MAP-BASED MODEL BY DETERMINING PERIODICITIES

G. M. RAMÍREZ ÁVILA<sup>†</sup>

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

MARCIA R. GALLAS & JASON A. C. GALLAS<sup>‡</sup>

Departamento de Física  
Universidade Federal da Paraíba  
58051-970 João Pessoa, Brazil  
Instituto de Altos Estudos da Paraíba  
Rua Infante Dom Henrique 100-1801  
58039-150 João Pessoa, Brazil &  
Institute for Multiscale Simulation  
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg  
91052 Erlangen, Germany  
(Recibido 10 de noviembre de 2015; aceptado 12 de diciembre de 2015)

RESUMEN

Se estudia el plano de fases del modelo de Rulkov, basado en un mapa bidimensional que describe el comportamiento de una neurona. Fijando un parámetro de control de los tres en juego, se obtienen planos de fase mostrando las periodicidades definidas en ciertas regiones del mismo. Se muestra la importancia del parámetro  $\mu$  en la determinación de las periodicidades y número de picos por ráfaga, cantidades que además están ligadas por una relación lineal. Las zonas en las que están definidas estas periodicidades muestran en algunos casos, patrones similares a los que se encuentran en los troncos y hojas de ciertas palmeras. La determinación y descripción detallada de estas zonas de periodicidad puede constituirse en la base para un estudio de sincronización de neuronas no idénticas en regiones para las cuales los valores de los parámetros nos garanticen trabajar con la misma periodicidad. Se analiza también la fiabilidad y limitaciones del método.

Código(s) PACS: 05.45.-a, 02.70.-c, 87.19.L-

*Descriptores:* Dinámica no lineal y caos — Técnicas computacionales; simulaciones — Neurociencia.

ABSTRACT

We study the Rulkov model phase plane, a two-dimensional map-based model that describes the behavior of a neuron. Keeping constant one of the three parameters, we obtain phase planes showing well-defined periodicities. We show the importance of the parameter  $\mu$  identifying the periodicities and the number of spikes per burst, quantities that are related between them by a linear relationship. The zones in which these periodicities are well-defined exhibit in some cases, shapes similar to those appearing in some palm-tree patterns observed both in trunks and in leaves. The detailed determination and description of these periodicity zones could be the basis for a further study on synchronization of nonidentical neurons in regions in which the domain of the parameter values ensure the fact to work with the same periodicity. We also analyze the reliability and the limitations of this method.

*Subject headings:* Nonlinear dynamics and chaos — Computational techniques; simulations — Neuroscience.

<sup>†</sup><http://www.fumsa.edu.bo/docentes/mramirez/>

<sup>‡</sup><http://www.fisica.ufpb.br/jgallas/>

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el estudio del cerebro ha cobrado un notorio interés no solamente en científicos relacionados con ciencias médicas y biológicas, sino también en físicos, matemáticos, químicos e informáticos. El estudio inter, multi y transdisciplinar resultante es lo que se denomina neurociencia que es el estudio de la estructura y función del sistema nervioso como lo señala Purves (2010).

Las neuronas son las células que constituyen los bloques fundamentales para la funcionalidad cerebral. De acuerdo con Longstaff (2011), se estima que en el cerebro humano, se tienen  $8.6 \times 10^{10}$  neuronas, de las cuales  $1.6 \times 10^{10}$  están en la corteza cerebral y  $6.9 \times 10^{10}$  en el cerebelo. Existen diferentes tipos de neuronas en el cerebro humano y una gran variedad en el cerebro de otras especies por lo que referirse a un modelo de neurona es una abstracción que considera los aspectos claves de las neuronas sin pretender que el mismo pueda describir a cualquier neurona de la vasta variedad existentes, tal como lo indica Arbib (2003).

La utilización de ideas de dinámica no lineal en neurobiología radica en el hecho de tratar con sistemas de entrada/salida (input/output). Abarbanel & Rabinovich (2001) indican que los sistemas nerviosos reciben estímulos de su entorno y emplean secuencias de picos para transportar a través de circuitos neuronales la información contenida en los estímulos. En estos circuitos, la información es procesada y distribuida para finalmente producir respuestas conducentes a actividades funcionales. Además, Izhikevich (2007) puntualiza que las neuronas en el cerebro, también se comunican entre sí por secuencias de picos eléctricos o potenciales de acción; estos picos representan desde un punto de vista fisiológico, cambios abruptos en el potencial de membrana, el cual se propaga a otras neuronas a través de una larga protuberancia denominada axón. Uno de los desafíos mayores de la neurociencia es el de entender los mecanismos fisiológicos básicos subyacentes a los complejos patrones espacio-temporales de la actividad proveniente de las secuencias de picos durante el funcionamiento normal del cerebro y para determinar los orígenes de estados dinámicos patológicos tales como ataques de epilepsia y temblores parkinsonianos. Un segundo desafío es el de entender cómo estos patrones de actividad proporcionan un sustrato para la codificación y transmisión de la información, esto es, tal como se cuestionan Coombes & Bressloff (2005), ¿cómo se analizan neuronas con picos o potenciales de acción?

Hoy en día, los aspectos computacionales han adquirido gran importancia en neurociencia ya sea para el estudio de transmisión sináptica y la consecuente generación de potenciales de acción, de la interacción de neuronas en una red, de los procesos de alto nivel de percepción y memoria. Los modelos computacionales ofrecen nuevas visiones de la maquinaria compleja en la que subyace el comportamiento. Estos modelos permiten aclarar el en-

tendimiento de funciones y procesos en el sistema nervioso, además de otorgar el formalismo para expresar las hipótesis incluyendo todas las suposiciones en un marco conceptual coherente. Además, un modelo matemático por más simple que sea permite hacer predicciones que deben ser validadas por experimentos como lo expresa Cisek et al. (2007). El análisis de las ecuaciones de estos modelos ha resultado en técnicas matemáticas sofisticadas en los campos de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y en sistemas dinámicos en general; así, como lo expresa Borisjuk et al. (2005), el campo de la neurociencia computacional se considera ya como una disciplina bien establecida y que a veces se la denomina neurociencia teórica y que se integra al trabajo experimental. Tal integración requiere visión clara en los procesos de información realizados por las estructuras del cerebro en los diferentes niveles como se establece en el trabajo de Coward (2013). La neurociencia abarca enfoques que van desde los estudios moleculares y celulares de psicofísica y psicología. La neurociencia teórica favorece el contacto entre estas subdisciplinas mediante la construcción de representaciones compactas de lo que se ha aprendido, construyendo puentes entre diferentes niveles de descripción, y la identificación de los conceptos y principios unificadores tal como Dayan & Abbott (2001) lo indican. Nuevos campos aparecen, como la neurociencia cognitiva basada en modelos; esta se la define por una relación recíproca entre la neurociencia cognitiva con el modelado matemático del comportamiento como lo señalan Forstmann & Wagenmakers (2015).

Como se mencionó más arriba, el modelado de neuronas es esencial para el avance de la neurociencia. El modelo basado en ecuaciones diferenciales debido a Hodgkin & Huxley (1952), constituye el primer intento de describir el funcionamiento de una neurona, en particular, las respuestas de un axón aislado de calamar europeo (*Loligo vulgaris*) caracterizadas por variaciones del potencial de membrana debidas a estímulos eléctricos. Posteriormente, se formulan otros modelos tanto continuos como los debidos a FitzHugh (1961); Plant & Kim (1976); Hindmarsh & Rose (1984), como aquellos basados en mapas tales como los propuestos por Rulkov (2002); Chialvo (1995); Izhikevich & Hoppensteadt (2004); una revisión de los modelos neuronales basados en mapas se puede encontrar en el trabajo de Ibarz et al. (2011).

El estudio de periodicidades en diferentes tipos de sistemas ha cobrado interés recientemente; así, el hallazgo de secuencias periódicas como los árboles de Stern-Brocot en sistemas excitables tales como el de FitzHugh-Nagumo o el de Bonhoeffer-vander Pol descrito por Freire & Gallas (2011b) o en sistemas químicos que describen la paradigmática reacción de Belousov-Zhabotinsky (BZ) estudiados por Freire & Gallas (2011a) (Oporto Almaraz & Ramírez Ávila (2004) describen aspectos básicos de la reacción BZ; posteriormente, Oporto Almaraz &

Ramírez Ávila (2013) estudiaron aspectos no lineales de esta reacción, tales como su estabilidad; y finalmente, su comportamiento síncrono es analizado por Oporto Almaraz & Ramírez Ávila (2014); estos trabajos fueron publicados en esta misma revista). Otros sistemas tales como circuitos electrónicos mostrando oscilaciones antiperiódicas como los descritos por Freire et al. (2014); poblaciones celulares ligadas a la evolución de cáncer analizadas por Gallas et al. (2014); o en reacciones bioquímicas oscilantes tales como las estudiadas por Gallas & Gallas (2015) han sido también objeto de la aplicación de análisis de periodicidades para su estudio. En un número anterior de esta revista, habíamos resaltado el hecho de que los sistemas dinámicos, en particular aquellos representados por mapas eran susceptibles a ser analizados mediante periodicidades: uno de los sistemas escogidos fue el modelo de neurona debido a Rulkov (2002), en el cual encontramos regiones periódicas bien definidas en el espacio de parámetros comúnmente considerados en el análisis de este modelo y mostrado por Ramírez Ávila & Gallas (2011).

Este trabajo tiene como objetivo analizar un modelo de neurona en términos de periodicidades y también el abrir la posibilidad de extender este tipo de análisis a situaciones realistas en las que se puedan estudiar redes neuronales conducentes a la realización de funciones específicas en el cerebro.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en §2, se introduce el modelo neuronal de Rulkov que constituye el sistema dinámico objeto de nuestro análisis. Los resultados del análisis de periodicidades para diferentes valores del parámetro del control  $\mu$  se dan en §3. Finalmente, en §4 se señalan las conclusiones y perspectivas de la presente investigación.

## 2. MODELO

Como se indicó en §1, el modelo de neurona que utilizamos en este trabajo es el de Rulkov, el cual está formulado como:

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n) \quad (1)$$

$$y_{n+1} = y_n - \mu(x_n + 1 - \sigma), \quad (2)$$

donde

$$f(x_n, y_n) = \begin{cases} \alpha/(1-x_n) + y_n, & \text{si } x_n \leq 0, \\ \alpha + y_n, & \text{si } 0 < x_n < \alpha + y_n, \\ -1, & \text{si } x_n \geq \alpha + y_n. \end{cases} \quad (3)$$

Siendo  $x$  y  $y$  las variables dinámicas rápida y lenta respectivamente y  $\sigma$ ,  $\alpha$  y  $\mu$  son parámetros que caracterizan al sistema.

Los estudios correspondientes a este modelo consideran en general un valor pequeño para el parámetro  $\mu$  lo que garantiza una intensa actividad de secuencias de picos que como se indicó en §1 constituye la forma en la cual se transmite y recibe información conducentes a la realización de una determinada acción. El valor tomado para  $\mu$  es de 0.001

tal como lo hicieron Rulkov (2002) y Shilnikov & Rulkov (2003). El rol de  $\alpha$  es el de identificar el voltaje de reinicialización relativo a las ramas estables e inestables de la nulclina rápida; en tanto, el cambio en  $\sigma$  desplaza la nulclina lenta de manera vertical en el plano de fases tal como lo señalan Ibarz et al. (2011). En todos los trabajos anteriormente citados, se destaca el hecho de escoger un valor pequeño para  $\mu$ . Sin embargo, en este trabajo, pretendemos analizar qué es lo que ocurre cuando se consideran otros valores para el parámetro  $\mu$ , tanto menores como mayores. Para nuestro análisis, consideraremos siempre las mismas condiciones iniciales ( $x_0 = 0.028$  y  $y_0 = -0.05201$ ) para cada uno de los experimentos numéricos.

## 3. RESULTADOS

Para el análisis del modelo de Rulkov, primeramente fijamos el valor de los parámetros  $\sigma = -0.459$  y  $\alpha = 12.0$ ; con estos valores establecidos, se procede a variar el valor de  $\mu$  en el intervalo  $[10^{-5}, 0.35]$  (ver Tabla 1). En estas condiciones, se obtienen las series temporales para las variables rápida  $x$  y lenta  $y$ , las cuales están representadas en la Fig. 1, cuyo análisis permite resaltar los siguientes aspectos a ser profundizados: (i) El estudio detallado en función del parámetro  $\mu$  de periodicidades y del número de picos en las ráfagas cuando estas se presentan en la variable  $x$  (ver §3.1). (ii) La obtención de espacios de parámetros en el plano definido por los parámetros  $\sigma$  y  $\alpha$  variando el valor de  $\mu$  en el mismo intervalo señalado anteriormente y caracterizados por el valor de las periodicidades (ver §3.2). (iii) La evaluación de las ventajas y las limitaciones que presentan los espacios de parámetros basados en el cálculo de las periodicidades y la comparación con otros métodos como por ejemplo el espacio de parámetros caracterizados por los mayores exponentes de Lyapunov (ver §3.3). Es conveniente aclarar que se entiende por periodicidad, el número de pasos de tiempo  $n$  que transcurren hasta que la variable en cuestión alcance exactamente el mismo valor.

### 3.1. Ráfagas de picos y periodicidades

Una inspección más profunda de la Fig. 1 permite observar que la forma de las series temporales de las variables  $x$  e  $y$  parecen ser bastante diferentes entre sí; así, la variable dinámica rápida  $x$  para la mayor parte de los valores de  $\mu$  presenta ráfagas de picos; en tanto que la variable lenta  $y$  presenta señales típicas de una oscilación de relajación que como es bien sabido se caracteriza por no ser senoidal como lo señala Eggleston (2011). A pesar de la gran diferencia en forma de las señales de  $x$  e  $y$ , la periodicidad para ambas tiende a ser la misma.

Para valores pequeños de  $\mu$ , se tiene una gran actividad en los potenciales de acción de la neurona, manifestada por el gran número de picos por ráfaga ( $n_p$ ) y por grandes valores en la periodicidad de las variables  $x$  ( $T_x$ ) e  $y$  ( $T_y$ ) que además coinciden en su valor por lo que podríamos escribir genéricamente  $T_x = T_y = T$ . Así, en la Fig. 1(a) con  $\mu = 10^{-5}$ , se

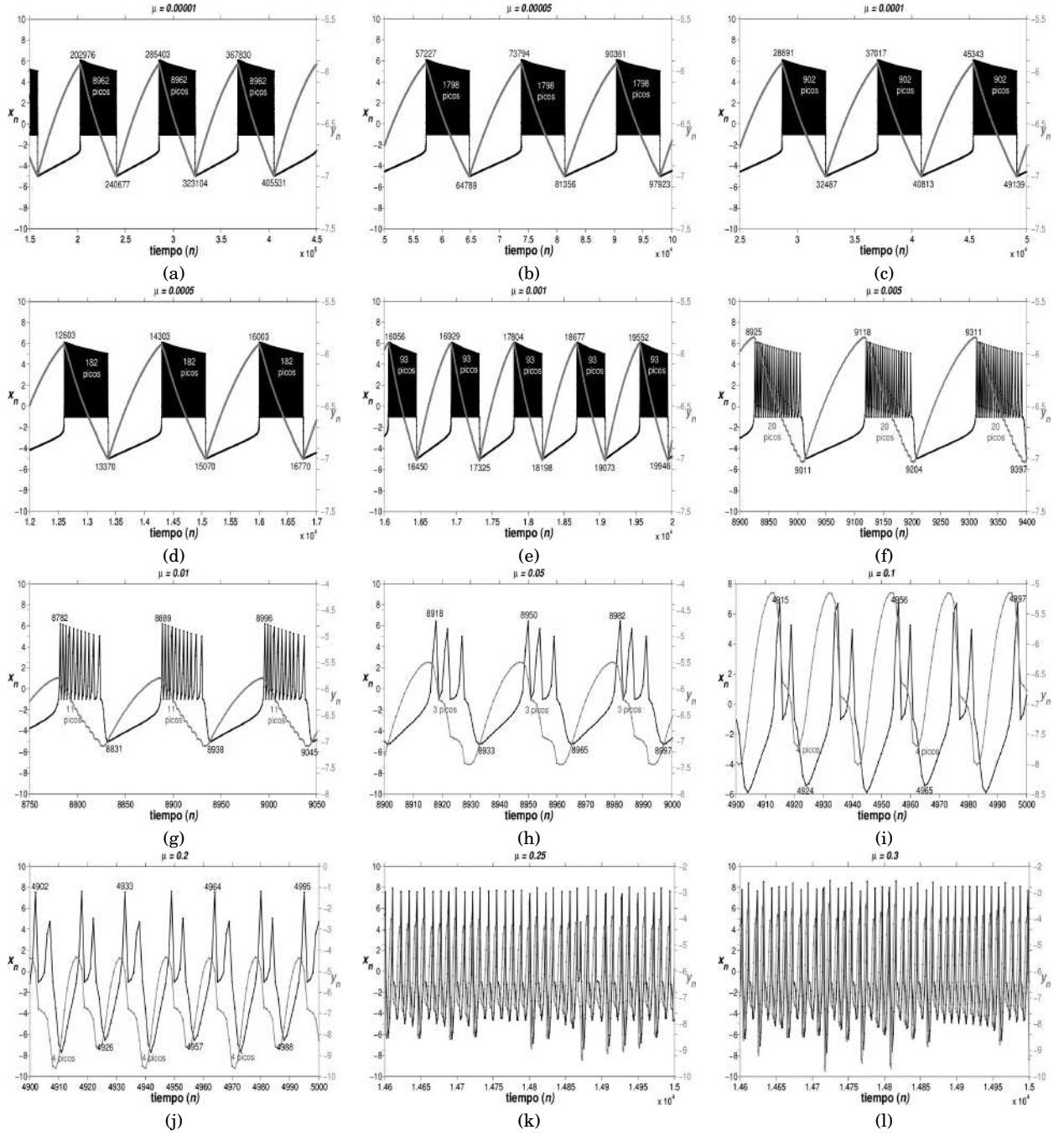


FIG. 1.— Series de tiempo para las variables rápida  $x$  (línea negra y eje de las ordenadas izquierdo) y lenta  $y$  (línea gris y eje de las ordenadas derecho) para el modelo de Rulkov. En cada gráfico se indican también los valores de  $n$  para los máximos y mínimos, lo que permite calcular la periodicidad  $T$ ; por otro lado, en la ráfaga de picos se indica el número de disparos por ráfaga  $n_p$ . (a)  $\mu = 0.00001$ ,  $T = 82427$ ,  $n_p = 8962$ . (b)  $\mu = 0.00005$ ,  $T = 16567$ ,  $n_p = 1798$ . (c)  $\mu = 0.0001$ ,  $T = 8326$ ,  $n_p = 902$ . (d)  $\mu = 0.0005$ ,  $T = 1700$ ,  $n_p = 182$ . (e)  $\mu = 0.001$ ,  $T = 875$ ,  $n_p = 93$ . (f)  $\mu = 0.005$ ,  $T = 193$ ,  $n_p = 20$ . (g)  $\mu = 0.01$ ,  $T = 107$ ,  $n_p = 11$ . (h)  $\mu = 0.05$ ,  $T = 32$ ,  $n_p = 3$ . (i)  $\mu = 0.1$ ,  $T = 41$ ,  $n_p = 4$ . (j)  $\mu = 0.2$ ,  $T = 31$ ,  $n_p = 4$ . (k)  $\mu = 0.25$ . (l)  $\mu = 0.35$ . En los dos últimos casos, el valor de  $T$  no está bien definido y para  $n_p$  se asume el valor 1 puesto que ya no existen ráfagas de picos propiamente dichas; estas dos situaciones pueden reflejar un carácter caótico de las variables  $x$  y  $y$ . En todos los caos, los valores de los parámetros fueron  $\sigma = -0.459$  y  $\alpha = 12.0$ , y las condiciones iniciales  $x_0 = 0.028$  y  $y_0 = -0.05201$ .

tienen 8962 picos por ráfaga y una periodicidad de 82427. A medida que aumenta el valor de  $\mu$ , tanto  $T$  como  $n_p$  disminuyen dramáticamente tal como muestran los valores de la Tabla 1. Es interesante ver que la señal de la variable  $y$  mantiene completamente su forma de oscilación de relajación (Figs. 1(a)–(e)) hasta el valor aproximado de  $\mu = 0.01$  (Fig. 1(g))

donde aparecen pequeñas deformaciones en la señal. Para valores mayores de  $\mu$ , se nota que la tendencia de la señal de  $y$  es a suavizarse perdiendo su carácter de relajación (Fig. 1(h)–(j)). Finalmente, para valores mayores de  $\mu$ ; a partir de  $\mu = 0.21$ , en la mayoría de las situaciones que se presentan no se puede determinar el valor de  $T$  lo que indica que en estos casos se

tienen comportamientos caóticos para las series temporales asociadas a las variables  $x$  e  $y$  (Fig. 1(k)–(l)).

TABLA 1  
VALORES DE PERIODICIDADES  $T$  Y NÚMERO DE PICOS POR DISPARO  $n_p$  EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO  $\mu$ .

$\mu$	$T$	$n_p$	$\mu$	$T$	$n_p$	$\mu$	$T$	$n_p$
0.00001	82427	8962	0.003	308	32	0.14	17	2
0.00002	41280	4486	0.004	235	24	0.15	37	2
0.00003	27562	2994	0.005	193	20	0.16	16	2
0.00004	20686	2246	0.006	165	17	0.17	16	2
0.00005	16567	1798	0.007	146	15	0.18	28	2
0.00006	13819	1500	0.008	128	13	0.19	15	2
0.00007	11856	1285	0.009	117	12	0.20	31	2
0.00008	10386	1126	0.010	107	11	0.21	caos	1
0.00009	9247	1002	0.020	60	6	0.22	caos	1
0.00010	8326	902	0.030	44	4	0.23	14	2
0.00020	4191	453	0.040	34	3	0.24	15	2
0.00030	2812	303	0.050	32	3	0.25	caos	1
0.00040	2118	228	0.060	caos	2	0.26	caos	1
0.00050	1700	182	0.070	23	2	0.27	caos	1
0.00060	1431	153	0.080	21	2	0.28	13	2
0.00070	1235	132	0.090	20	2	0.29	caos	2
0.00080	1077	115	0.100	41	2	0.30	caos	1
0.00090	966	103	0.110	19	2	0.31	caos	1
0.00100	875	93	0.120	18	2	0.33	caos	1
0.00200	459	48	0.130	38	2	0.35	caos	1

Utilizando los datos de la Tabla 1 se hace una representación log-log tanto de  $T$  como  $n_p$  en función de  $\mu$  como se muestra en la Fig. 2(a)–(b) donde se nota inmediatamente que se está frente a situaciones que siguen leyes de potencia de la forma:

$$T = a_T \mu^{b_T} + c_T \quad (4)$$

$$n_p = a_n \mu^{b_n} + c_n, \quad (5)$$

donde los coeficientes se calcularon con un umbral de confianza del 95%, siendo sus valores:

$$a_T = 0.8536 \pm 0.0047, a_n = 0.09152 \pm 0.00022$$

$$b_T = -0.9969 \pm 0.0005, b_n = -0.9982 \pm 0.0003$$

$$c_T = 15.99 \pm 4.36, c_n = 1.429 \pm 0.205.$$

No es sorprendente encontrar este tipo de comportamiento puesto que sistemas que obedecen este tipo de leyes están omnipresentes en la naturaleza. Cuando la probabilidad de medir un valor particular de alguna magnitud varía inversamente como una potencia de este valor, se dice que la magnitud sigue una ley de potencia como lo expresa Newman (2005). En términos más simples, una ley de potencia es un modelo matemático que describe una relación dinámica entre dos objetos; habiendo una gran cantidad de ejemplos en sistemas naturales y artificiales; además de estar ligada a fenómenos tales como las transiciones de fase en materiales ferromagnéticos revisadas por Lucano Lucano & Ramírez Ávila (2012) o en numerosos ejemplos que se mencionan en Novak (2002) tales como aquellos relacionados con series de tiempo fisiológicas, con distribuciones de poblaciones, con series temporales fi-

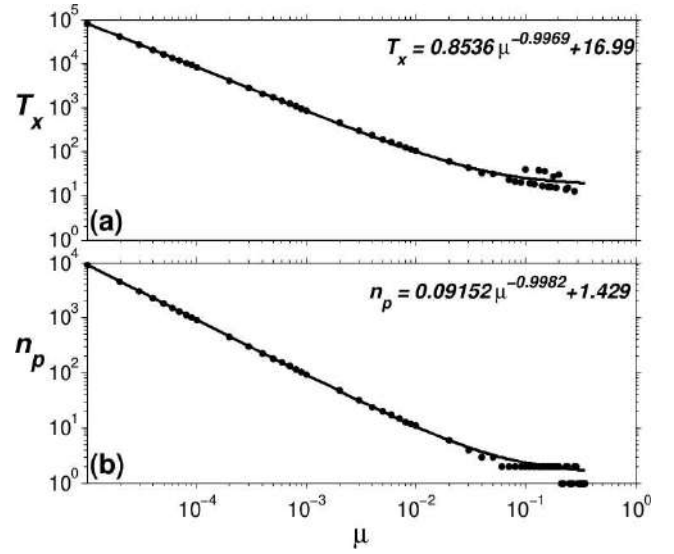


FIG. 2.— Dependencia (a) de la periodicidad de la variable  $x$  ( $T_x$ ) y (b) del número de picos por ráfaga ( $n_p$ ) con el parámetro  $\mu$ . Se nota que tanto  $T_x$  y  $n_p$  siguen una ley de potencias cuyo exponente para ambas es negativo y aproximadamente unitario.

nancieras, o con física de partículas entre otros; o en los tratados por Ghosh (2011), donde se hace énfasis en ejemplos geométricos y mecánicos que tienen como objetivo el explicar y aplicar procesos de miniaturización como lo explican en detalle Ghosh & Corves (2015). Todas estas leyes de potencia tienen como característica principal el denominado exponente crítico que varía de acuerdo a los sistemas considerados. En nuestro caso, se observa que el exponente crítico ligado a la periodicidad  $b_T$  es prácticamente igual a aquel relacionado con el número de picos por ráfaga  $b_n$  lo que nos muestra que estos fenómenos están estrechamente relacionados entre sí y que se corrobora en la Fig. 3, donde se tiene una dependencia lineal entre  $n_p$  y  $T_x$  de la forma:

$$n_p = aT_x + b, \quad (6)$$

donde  $a = 0.10870 \pm 0.00001$  y  $b = -0.7565 \pm 0.4065$ , calculados con un umbral de confianza de 95%.

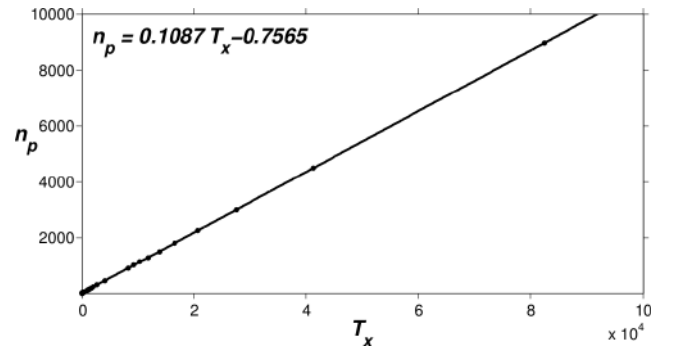


FIG. 3.— Dependencia del número de picos por ráfaga ( $n_p$ ) con la periodicidad de la variable  $x$  ( $T_x$ ) considerando el mismo valor del parámetro  $\mu$  para cada par de valores ( $T_x, n_p$ ).

Para terminar este apartado, resaltamos el hecho de la estrecha relación entre  $n_p$  y  $T$  lo que, en principio, para el análisis dinámico del modelo podríamos

considerar cualquiera de estas cantidades; sin embargo, como se pudo constatar a partir de lo expuesto anteriormente,  $n_p$  sólo se presenta en  $x$  por lo que el análisis sólo sería para esta variable. En contraposición, cuando el análisis se lo realiza mediante periodicidades, se nota que es prácticamente indistinto considerar una u otra variable como se verá en §3.2.

### 3.2. Periodicidades en el espacio de parámetros

Como se indicó al final de §3.1, elegimos las periodicidades para caracterizar el sistema dinámico correspondiente al modelo de Rulkov. Para tal efecto, se procede a obtener los espacios de parámetros  $\alpha$  vs.  $\sigma$  en la región comprendida en los intervalos  $\sigma = [-4, 4]$  y  $\alpha = [-10, 20]$  considerando la periodicidad  $p_x = T_x$  como la cantidad que caracteriza a estos espacios de parámetros, siendo  $p_x = 5000$  que se elige como valor máximo de periodicidad que se computa en nuestros experimentos numéricos de. Se trabaja con los mismos valores del parámetro  $\mu$  que se usaron en la Fig. 1 así como las mismas condiciones iniciales señaladas en §2. Estos espacios de parámetros se muestran en la Fig. 4, donde en cada uno de ellos se identifican regiones típicas tales como las representadas en blanco que indican la existencia de puntos fijos (desde la parte central hasta la izquierda en su totalidad), rúbrica de que no se tienen oscilaciones en las variables  $x$  e  $y$ ; también para valores que van de la parte central hasta la integridad de la parte derecha en, donde las periodicidades son en general pequeñas y con pequeñas regiones caóticas en la parte inferior-central; finalmente, se tiene otra región en forma de triángulo esférico ubicada desde la parte central y extendiéndose a la parte superior, la cual merecerá especial atención para su análisis puesto que es en esta zona en la cual se presentan los comportamientos dinámicos más interesantes, tales como la existencia de ráfagas de picos en la variable  $x$  y la formación de interesantes patrones de periodicidad como se verá más adelante; por esta razón, en lo que sigue la denominaremos *region de interés* (RI). Para valores pequeños de  $\mu$  se nota una predominancia de comportamiento caótico en la RI (Fig. 4(a)–(c)) que como veremos más adelante no es más que una mala interpretación de los resultados que se aclarará en §3.3. Para valores ligeramente mayores de  $\mu$  en el intervalo  $[5, 50] \times 10^{-4}$ , se tienen en la RI, zonas predominantes de periodicidades  $p_x \geq 33$  intercaladas con zonas caóticas (Fig. 4(d)–(f)). Para valores aun mayores de  $\mu$  en el intervalo  $[0.01, 0.05]$ , se nota que en la RI aparecen pequeñas zonas periódicas (Fig. 4(g)–(h)) que se ven consolidadas en la Fig. 4(i) cuyo detalle fino en cuanto a valores de periodicidad se muestra en la Fig. 5(a), donde se notan patrones de periodicidad bien definidos en la parte central de la RI y que son similares a los patrones que se observan en troncos de ciertas especies de palmera (Fig. 5(b)); en tanto que la parte contigua al borde izquierdo de la RI exhibe patrones periódicos que tienen la forma del follaje también de palmeras (Fig. 5(c)); justamente con este valor de parámetro

$\mu = 0.1$  pero para la periodicidad en la variable  $y$  (Fig. 5) se explica con mayor claridad el código de colores mostrado en las figuras de los espacios de parámetros basados en la periodicidad. Finalmente, en la Fig. 4(j)–(l), para valores de  $\mu$  comprendidos entre 0.2 y 0.3, se nota que el patrón tipo follaje de palmera en la RI se torna más evidente. Se puede ver también que existen ciertas regularidades en lo que concierne a la secuencia de periodicidades; así, se nota en la parte central de la RI sucesiones que van de derecha a izquierda para las zonas de mayor área:

$$\begin{aligned} 18, 19, 20, \dots &\rightarrow \dots 28 \dots \\ 20, 21, 22, \dots &\rightarrow \dots 24 \dots \end{aligned}$$

### 3.3. Ventajas y limitaciones del uso de periodicidades

Así mismo, se puede señalar que el método utilizado de análisis de periodicidades en el espacio de parámetros, tiene muchas ventajas, entre las cuales se pueden mencionar: (i) Permite conocer la dinámica del sistema de manera completa; es decir, no solo distinguir el comportamiento regular del caótico como se lo puede hacer utilizando el máximo exponente de Lyapunov sino también caracterizar el comportamiento regular diferenciando los puntos fijos de las periodicidades de diferente orden. (ii) Permite la identificación de patrones en las estructuras que denotan periodicidades. (iii) Permite estudiar los tipos de bifurcaciones que se presentan en el sistema dinámico. (iv) Desde el punto de vista computacional, es menos costoso en tiempo obtener periodicidades que exponentes de Lyapunov. Empero, este método también presenta algunas limitaciones que se manifiestan especialmente, en el caso concreto que estudiamos, cuando los valores de  $\mu$  son pequeños. Por ejemplo, consideremos el espacio de parámetros para el valor de  $\mu = 0.0001$  (Fig. 4(c)), donde se ve claramente que la RI parece ser caótica casi en su totalidad. Sin embargo, si se consideran las series de tiempo de  $x$  y  $y$  mostradas en la (Fig. 1(c)) se ve que la periodicidad es de 8326, lo que contradice a lo que se muestra en el plano de fases con base en la periodicidad; por otra parte, el plano de fases construido a partir del máximo exponente de Lyapunov (Fig. 6) muestra que en efecto, la RI es predominantemente periódica. Lo anterior muestra que para la obtención de los planos de fase se debe tener mucho cuidado al calcular las periodicidades. En general, es inusual tener periodicidades relevantes mayores a 5000, es por eso que para los espacios de parámetros de la Fig. 4 se había considerado este valor de 5000 como máximo, aunque, como se acaba de mencionar no es suficiente este criterio y para la obtención adecuada de los espacios de parámetros con base en las periodicidades, se tendrá que explorar previamente el sistema para así poder trabajar con los valores adecuados para el cálculo de dichas periodicidades.

## 4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

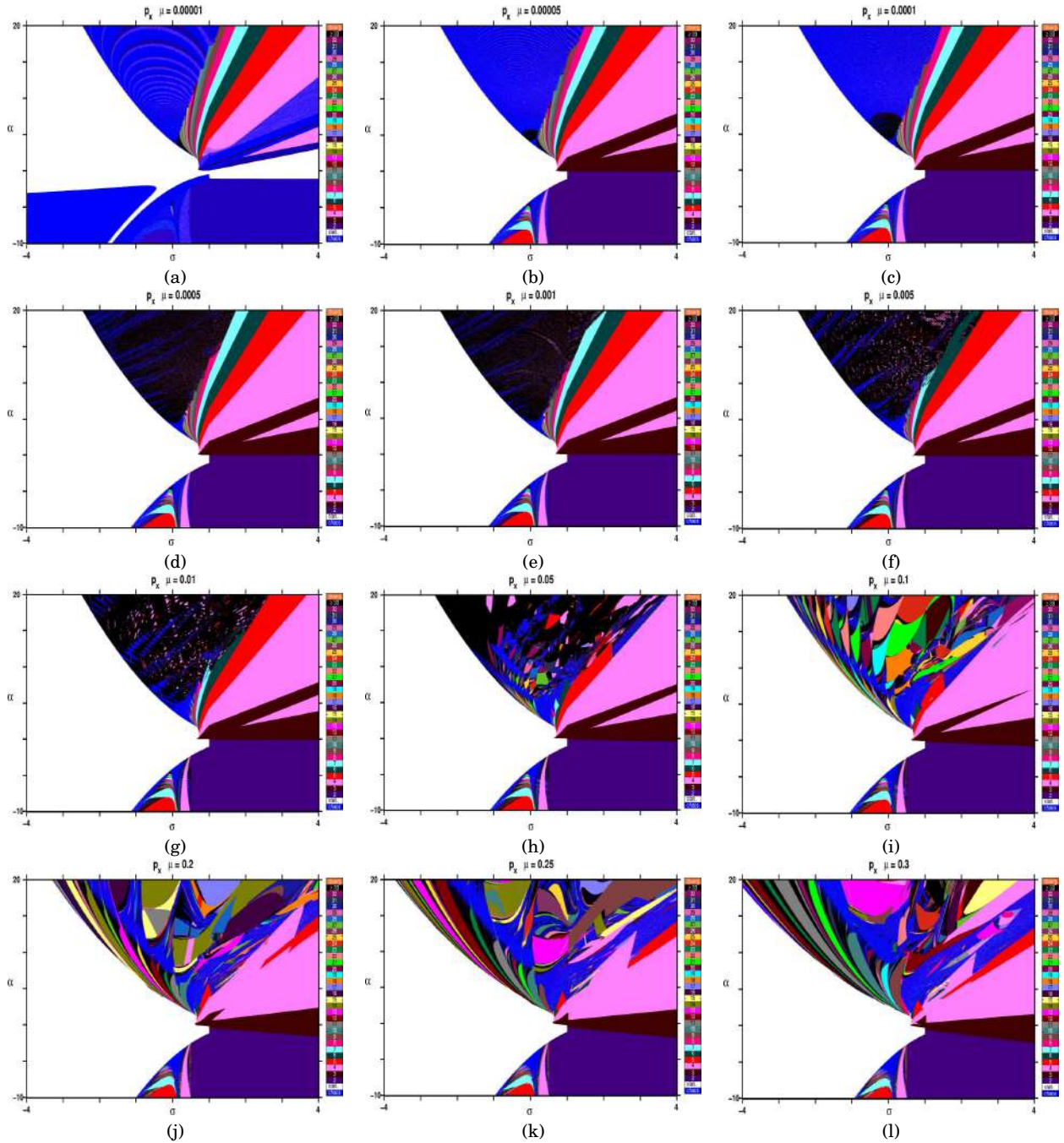
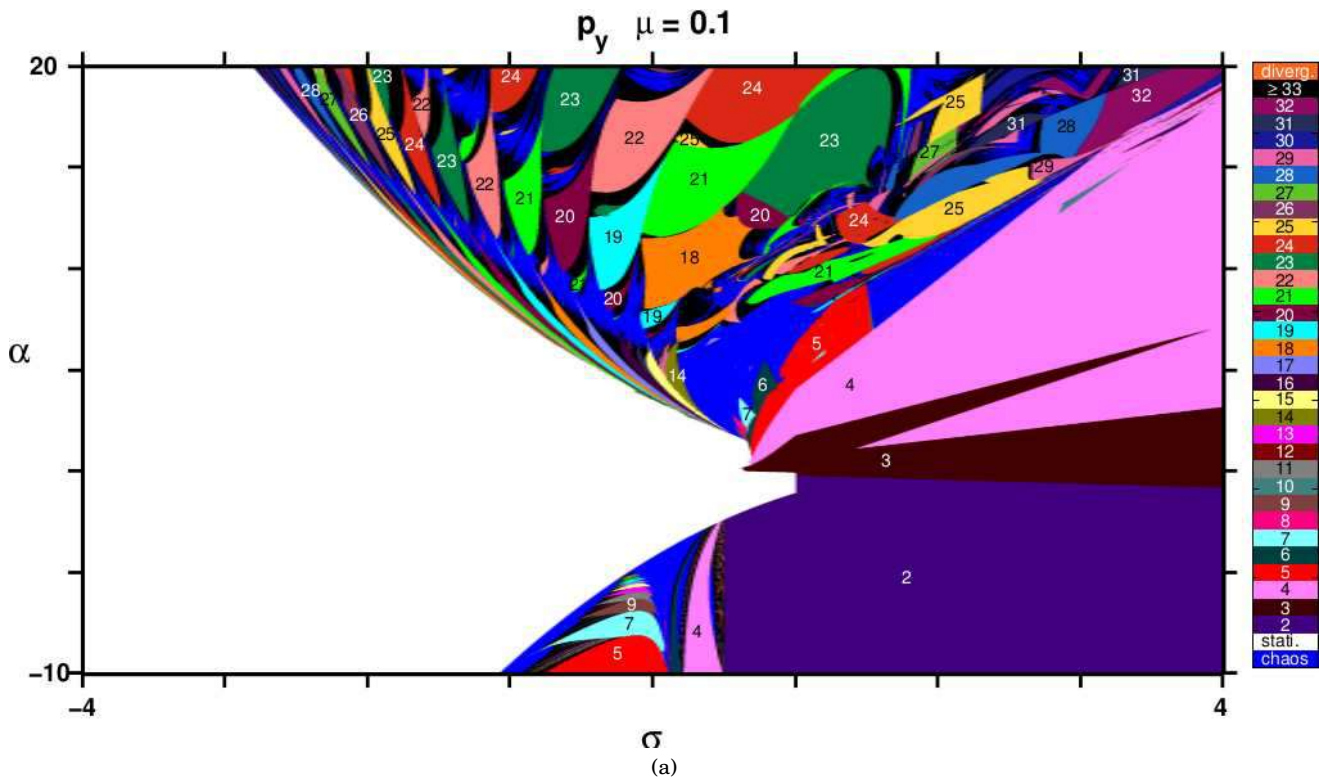


FIG. 4.— (Color online) Espacios de parámetros  $\alpha$  vs.  $\sigma$  caracterizados por la periodicidad en la variable  $x$  ( $p_x = T_x$ ) para una misma región y las mismas condiciones iniciales para cada situación ( $x_0 = 0.028$  y  $y_0 = -0.05201$ ) y variando el valor del otro parámetro: (a)  $\mu = 10^{-5}$ , (b)  $\mu = 5 \times 10^{-5}$ , (c)  $\mu = 10^{-4}$ , (d)  $\mu = 5 \times 10^{-4}$ , (e)  $\mu = 10^{-3}$ , (f)  $\mu = 5 \times 10^{-3}$ , (g)  $\mu = 0.01$ , (h)  $\mu = 0.05$ , (i)  $\mu = 0.1$ , (j)  $\mu = 0.2$ , (k)  $\mu = 0.25$ , (l)  $\mu = 0.3$ . La barra de colores, leída de abajo hacia arriba, indica la situación de caos, de estacionariedad (punto fijo), de periodicidades de orden 2 a 32, de periodicidades mayores o iguales a 33 y finalmente, posibles situaciones en las que puede presentarse divergencia. Se hace notar que para todos los espacios de parámetros obtenidos, se consideró una periodicidad máxima de 5000.

El análisis detallado del modelo de neurona de Rulkov nos muestra interesantes aspectos tales como el hecho de que el parámetro  $\mu$  juega un rol muy importante en la determinación de la periodicidad y del número de picos por ráfaga. Como se vio, el aumento del valor de  $\mu$  hace que las periodicidades puedan variar desde cantidades del orden de cientos de miles hasta valores tan pequeños como 2 (ciclo de orden 2); similarmente, el número de picos

por ráfaga para la variable rápida  $x$  varía también con este aumento entre un número del orden de decena de miles hasta 2. Desde el punto de vista de la neurociencia, este número es quizás uno de los aspectos más importantes del modelo puesto que tiene una relación directa con los aspectos fisiológicos de la neurona y la funcionalidad de la misma. No obstante, desde una perspectiva de sistemas dinámicos, la periodicidad se presenta como una característica más



(b)



(c)

FIG. 5.— (Color online) (a) Espacio de parámetros  $\alpha$  vs.  $\sigma$  caracterizado por la periodicidad en la variable  $y$  ( $p_y$ ). Se especifican los valores de periodicidad dentro de algunas de las zonas. Se hace notar que los patrones observados tienen formas similares a los que se presentan en (b) los troncos y (c) el follaje de algunas especies de palmera.

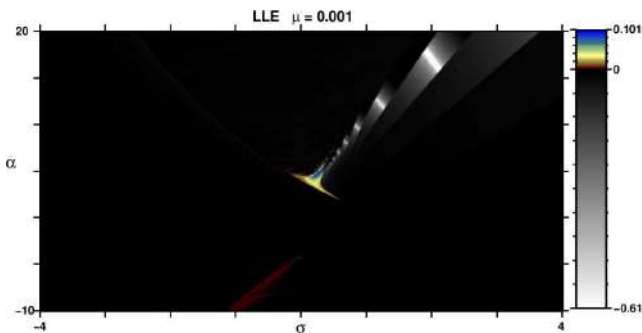


FIG. 6.— (Color online) Espacio de parámetros  $\alpha$  vs.  $\sigma$  caracterizado por el máximo exponente de Lyapunov del sistema. El código de colores indica que las regiones en blanco y negro corresponden a comportamientos regulares, en tanto que las coloreadas a caóticos.

de las dos variables  $x$  o  $y$  puede ser utilizada para la descripción del mismo; siendo incluso la variable lenta  $y$  más apropiada para determinar periodicidades. Hacemos notar que en general, los valores de periodicidad calculados utilizando cualesquiera de las variables coincide. Se observa también que para valores grandes de  $\mu$ , los comportamientos caóticos del sistema son más probables. Es interesante notar que para los valores escogidos de los parámetros, la periodicidad y el número de picos por ráfaga están relacionados linealmente. El análisis de los espacios de parámetros basados en la periodicidad nuestra que los mismos son muy dependientes del valor de  $\mu$ , especialmente en la región que denominamos RI. Para valores crecientes de  $\mu$  aparecen zonas de periodicidad que en algunos casos muestran estructuras tales como los patrones que se observan en

interesante para el sistema, por lo que cualquiera

troncos y follaje de palmeras. Destacamos el hecho que el análisis basado en periodicidades comparado a aquel basado en exponentes de Lyapunov presenta varias ventajas, tales como la de brindar mayor información desde el punto de vista dinámico, y la de ser menos costoso computacionalmente hablando; sin embargo, también tiene limitaciones y requiere de ciertas precauciones en su uso, tales como el hecho de explorar previamente el sistema en cuestión para así poder determinar los valores adecuados para los que se considerará el máximo de periodicidad; caso contrario, se corre el riesgo de obtener resultados falsos. La complementariedad de periodicidades y exponentes de Lyapunov puede ser muy útil para el análisis de sistemas dinámicos dadas las virtudes y limitaciones que ofrecen ambos métodos.

Los resultados obtenidos, nos muestran la gran riqueza dinámica del modelo de Rulkov, en el cual

existen muchos aspectos que todavía pueden ser explorados tales como el estudio de las bifurcaciones, las dependencias entre periodicidades y número de picos por ráfaga para otros valores de los parámetros, el estudio de los patrones que presentan las zonas de periodicidad, entre otros.

## AGRADECIMIENTOS

G.M.R.A. agradece al Prof. Juergen Kurths del Potsdam Institute for Climate Impact (PIK-Potsdam) por la invitación científica a su institución, tiempo en el cual parte de este trabajo fue desarrollado. Agradecemos también a la Dra. Mónica Moraes del Herbario Nacional de Bolivia por su colaboración en lo concerniente a los detalles de palmeras y por permitirnos utilizar sus imágenes de estos vegetales.

## REFERENCIAS

- Abarbanel H. D. I. & Rabinovich M. I. (2001), *Current Opinion in Neurobiology* **11**, 423.
- Arbib M. A. (2003), *The handbook of brain theory and neural networks*, 2nd edn. (Massachusetts: MIT Press).
- Borisjuk A., Friedman A., Ermentrout B. & Terman D. (2005), *Mathematical neuroscience* (Berlin: Springer-Verlag).
- Chialvo D. R. (1995), *Chaos, Solitons & Fractals* **5**, 461.
- Cisek P., Drew T. & Kalaska J. F. (2007), *Computational neuroscience: theoretical insights into brain functions* (Amsterdam: Elsevier).
- Coombes S. & Bressloff P. C. (2005), *Bursting: The Genesis of Rhythm in the Nervous System* (Singapore: World Scientific Publishing).
- Coward L. A. (2013), *Towards a Theoretical Neuroscience: from Cell Chemistry to Cognition* (Dordrecht: Springer), 443.
- Dayan P. & Abbott L. (2001), *Theoretical Neuroscience* (London: MIT Press), 460.
- Eggleston D. L. (2011), *Basic Electronics for Scientists and Engineers* (New York: Cambridge University Press), 251.
- FitzHugh R. (1961), *Biophysical Journal* **1**, 445.
- Forstmann B. U. & Wagenmakers E. J. (2015), *An introduction to model-based cognitive* (New York: Springer).
- Freire J. G., Cabeza C., Marti A. C., Pöschel T. & Gallas J. A. C. (2014), *European Physical Journal: Special Topics* **223**, 2857.
- Freire J. G. & Gallas J. A. C. (2011) a, *Physical Chemistry Chemical Physics* **13**, 12191.
- (2011)b, *Physics Letters A* **375**, 1097.
- Gallas M. R., Gallas M. R. & Gallas J. A. C. (2015), *European Physical Journal: Special Topics* **223**, 2131.
- Gallas M. R. & Gallas J. A. C. (2015), *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* **25**, 064603.
- Ghosh A. (2011), *Scaling Laws, in Chakraborty, S. Ed., Mechanics Over Micro and Nano Scales* (New York: Springer), 61.
- Ghosh A. & Corves B. (2015), *Introduction to Micromechanisms and Microactuators* (New Delhi: Springer India), 161.
- Hindmarsh J. L. & Rose R. M. (1984), *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* **221**, 87.
- Hodgkin A. L. & Huxley A. F. (1952), *Journal of Physiology* **117**, 500.
- Ibarz B., Casado J. M. & Sanjuán M. A. F. (2011), *Physics Reports* **501**, 1.
- Izhikevich E. (2007), *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting* (Cambridge: MIT Press), 505.
- Izhikevich E. M. & Hoppensteadt F. (2004), *International Journal of Bifurcation and Chaos* **14**, 3847.
- Longstaff A. (2011), *Instant Notes in Neuroscience* (New York: Garland Science), 379.
- Lucano Lucano M. J. & Ramírez Ávila G. M. (2012), *Copérnico* **1**, 3.
- Newman M. E. J. (2005), *Contemporary Physics* **46**, 323.
- Novak M. M. Ed. (2007), *Emergent Nature: Pattern, Growth and Scaling in the Sciences* (World Scientific Publishing Company), 44.
- Oporto Almaraz S. A. & Ramírez Ávila G. M. (2004), *Revista Boliviana de Física* **10**, 45.
- (2013), *Revista Boliviana de Física* **23**, 16.
- (2014), *Revista Boliviana de Física* **25**, 7.
- Plant R. E. & Kim M. (1976), *Biophysical Journal* **16**, 227.
- Purves D. (2010), *Brains. How they seem to work* (Pearson Education, Inc.), 294.
- Ramírez Ávila G. M. & Gallas J. A. C. (2011), *Revista Boliviana de Física* **19**, 1.
- Rulkov N. F. (2002), *Physical Review E* **65**, 041922.
- Shilnikov A. L. & Rulkov N. F. (2003), *International Journal of Bifurcation and Chaos* **13**, 3325.

## ESPACIOS DE PARÁMETROS PARA EL ESTUDIO DE LA TURBULENCIA MEDIADA POR DEFECTOS Y OTROS FENÓMENOS NO LINEALES EN SISTEMAS ESPACIALMENTE DISTRIBUIDOS

### PARAMETER SPACES FOR STUDYING DEFECT-MEDIATED TURBULENCE AND OTHER NONLINEAR PHENOMENA IN SPATIALLY DISTRIBUTED SYSTEMS

J. W. SIRPA POMA<sup>†</sup> & G. M. RAMÍREZ ÁVILA<sup>‡</sup>

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

(Recibido 15 de noviembre de 2015; aceptado 17 de diciembre de 2015)

#### RESUMEN

Se utiliza la ecuación compleja de Landau-Ginzburg (ECLG) como base para el estudio de sistemas espacialmente distribuidos. Se considera diferentes comportamientos de un fluido tales como la laminaridad, la aparición de fuentes y sumideros, el régimen intermitente, la turbulencia de fase y la turbulencia mediada por defectos, siendo esta la que en principio concitó nuestra atención. El análisis numérico de la ECLG nos permitió caracterizar espacio-temporalmente cada uno de estos comportamientos. Por medio de la construcción del espacio de parámetros con base en la amplitud promedio, se identifican cada uno de estos regímenes.

Código(s) PACS: 47.27.Cn, 02.70.-c, 05.45.-a

*Descriptor:* Transición a la turbulencia — Técnicas computacionales; simulaciones — Dinámica no lineal y caos.

#### ABSTRACT

The complex Landau-Ginzburg equation (CLGE) has been used as the basis of the study of spatially distributed systems. We considered a variety of behaviors on a fluid, such as laminarity, the apparition of sources and sinks, the intermittent regime, and the defect-mediated turbulence; being the last one that focused our attention. Numerical analysis of the CLGE allowed us the spatio-temporal characterization of each of these behaviors. By means of the parameters space, based on the mean amplitude, the phase diagram distinguishes clearly the occurrence of the above mentioned regimes.

*Subject headings:* Transition to turbulence — Computational techniques; simulations — Nonlinear dynamics and chaos.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La comprensión del orden espacio-temporal en sistemas abiertos alejados del equilibrio termodinámico y sus simetrías es un tema importante de investigación dentro de las estructuras de la materia continua. Es también conocido que las transiciones laminar/turbulento en fluidos son una consecuencia del orden espacio-temporal como lo señalan Walgraed & Ghoniem (1990).

Uno de los trabajos paradigmáticos en el estudio de organización espacio-temporal es el propuesto por Turing (1952) que analiza la morfogénesis a partir de una inestabilidad que hace alusión a la ruptura de simetría, donde la longitud característica es intrínseca al sistema (dependiendo solamente de los parámetros y no así de la geometría ni de las condi-

ciones de frontera).

La convección térmica es el origen de importantes y sorprendentes fenómenos naturales; entre ellos, la circulación de la atmósfera y océanos, el movimiento de placas continentales, etc. Este problema fue abordado mediante un sencillo experimento a escala en 1900 por Bénard, y que desembocó en una gran cantidad de propiedades interesantes; siendo la principal, la aparición de multiestabilidad cuando se supera el valor crítico de la temperatura.

Así, no es sorprendente encontrar inestabilidades y bifurcaciones en una gran variedad de sistemas conocidos, tales como el flujo de vórtices de Taylor, dinámica de solidificación, física de láseres y muchos otros que guardan similaridad con las observadas en el problema de Bénard y en sistemas de reacción-difusión tal como lo señala Nicolis (1995).

En la Sec. 2 se presenta el modelo que se utiliza para el estudio de sistemas espacialmente distribui-

<sup>†</sup>dneutron.js@gmail.com

<sup>‡</sup>http://www.fiumsa.edu.bo/docentes/mramirez/

dos que luego de un análisis de estabilidad lineal se llega a la forma normal en la vecindad de una inestabilidad, lo que se constituye en la ECLG, la cual es la base para los análisis ulteriores. En la Sec. 3 se dan los detalles del método utilizado para la resolución de la ECLG. En la Sec. 4 se muestran los resultados más importantes usando espacios de parámetros y finalmente se mencionan las conclusiones y perspectivas en la Sec. 5.

## 2. MODELO

Para el estudio de cada uno de los sistemas mencionados, se tiene una variedad de modelos matemáticos dependiendo del tipo de inestabilidades que se vayan a presentar. Entre los más habituales están los expuestos por Cross & Hohenberg (1993), de los cuales, se pueden mencionar: la ecuación de Swift-Hohenberg (SH) y sus variantes para inestabilidades del tipo estacionario-periódico; la ecuación de Kuramoto-Sivashinky (KS) que representa un modelo microscópico; las ecuaciones de reacción-difusión para inestabilidades de tipo oscilatorio-uniforme para la descripción de reacciones químicas; y por último el modelo de Landau-Ginzburg, el cual es adecuado para sistemas espacialmente distribuidos.

La descripción de sistemas compuestos por muchas partículas está dada a través de muchas variables de estado que dependen continuamente de las coordenadas espaciales y que obedecen las leyes de la física clásica. De manera general, las leyes de evolución de estas variables de estado se las expresa en términos de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de la forma:

$$\frac{\partial W_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = F_i(\{W_j(\mathbf{r}, t)\}, \{\nabla^k W_j(\mathbf{r}, t)\}, \lambda). \quad (1)$$

Sistemas representados con la anterior ecuación son denominados sistemas espacialmente distribuidos y en principio a causa de inhomogeneidades espaciales, llegan a tener una infinidad de variables que pueden estar acopladas por fenómenos de transporte. Por otra parte, la presencia de derivadas espaciales posibilita la aparición de inestabilidades espontáneas de ruptura de simetría. En otros términos, esta aparición indica la existencia de una dependencia espacial de las perturbaciones.

Además, los sistemas con gran extensión espacial, a diferencia de los sistemas espacialmente pequeños, llegan a presentar nuevas características por el hecho de poseer un número mayor de grados de libertad.

Considerando un número finito de variables de manera que las restricciones actuando sobre el sistema no dependan del tiempo (sistemas autónomos), se tendrá que las leyes de evolución pueden ser escritas de manera más compacta:

$$\frac{d\mathbf{W}}{dt} = F(\mathbf{W}, \lambda), \quad (2)$$

donde  $\lambda$  es el parámetro de control, el cual refleja la estructura interna del sistema o la manera en que se

comunica con el mundo externo. Los sistemas reales presentan un gran conjunto de parámetros, entre los más conocidos podemos mencionar los coeficientes de viscosidad, el coeficiente de difusión, etc.

Por otra parte, las soluciones están bien definidas en el espacio de fases  $\Gamma$ , excepto en algunos puntos  $\mathbf{W}_s = \{W_{js}\}$ , puntos que son determinados a partir de un conjunto de ecuaciones algebraicas:

$$F_1(\{W_{js}\}, \lambda) = \dots = F_n(\{W_{js}\}, \lambda) = 0. \quad (3)$$

Dichos puntos reciben la denominación de puntos singulares. En sistemas autónomos estos puntos permanecen fijos en el espacio de fases permanentemente, definiendo un conjunto invariante y describiendo soluciones estacionarias.

En los sistemas reales se observa que no permanecen en un solo estado a lo largo del tiempo; se tiene así, un conjunto de variables que interactúan de manera compleja intercambiando masa, momento y energía de manera impredecible. Como resultado se tiene una desviación constante alrededor de las soluciones estables, nos referimos a estas como una perturbación.

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}_s + \mathbf{w}(t). \quad (4)$$

Dependiendo de la respuesta del sistema ante una perturbación se puede inferir si el sistema es estable, inestable o asintóticamente estable. Realizando una expansión de Taylor en términos de  $\mathbf{w}$  alrededor de  $\mathbf{W}_s$ , la ecuación adopta la siguiente forma:

$$\frac{d\mathbf{w}}{dt} = \mathcal{L}(\lambda)\mathbf{w} + h(\mathbf{w}, \lambda), \quad (5)$$

donde se tiene una contribución de una parte lineal y otra no lineal, esta última en correspondencia con términos de orden superior en el desarrollo de Taylor.

Para la descripción generalizada, se incluye la derivada espacial conjuntamente con un análisis de bifurcación de Hopf en sistemas espacialmente uniformes, con lo que se llega a obtener la forma normal de la dinámica en sistemas espacialmente distribuidos, en la vecindad de una inestabilidad  $(\lambda - \lambda_c)$ . En la literatura se la denomina como la ecuación compleja de Landau-Ginzburg (ECLG):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = (\lambda - \lambda_c)A + (1 + i\alpha)\nabla^2 A - (1 + i\beta)|A|^2 A, \quad (6)$$

donde los parámetros  $\lambda_c$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros asociados al punto de bifurcación (transiciones en la estabilidad), a la dispersión lineal y no lineal (o conservación de la no linealidad), respectivamente.

Realizando un análisis de estabilidad lineal de la anterior ecuación se llega a obtener soluciones estacionarias de la forma:

$$A_s = (\lambda - \lambda_c)^{1/2} e^{-i\beta(\lambda - \lambda_c)t}. \quad (7)$$

Considerando soluciones generales o perturbadas:

$$A(r, t) = A_s + \delta A(r, t) e^{-i\beta(\lambda - \lambda_c)t}, \quad (8)$$

y reemplazando en la ECLG se llega a obtener la ecuación característica descrita por Nicolis (1995),

producto de esta se tiene el criterio de Benjamin-Feir-Newell, demostrando que la única inestabilidad puede surgir cuando se cumple la desigualdad  $1 + \alpha\beta < 0$ . Lo contrario garantiza soluciones en el régimen laminar; dicha inestabilidad se presenta en forma de turbulencia espacio-temporal caracterizada por la aparición espontánea de defectos como muestra Conway (2008).

Otros comportamientos encontrados son la turbulencia de fase caracterizada por tener amplitudes saturadas, el régimen de turbulencia mediada por defectos caracterizada por un carácter caótico que puede incluir amplitudes de valor cero; por último se tiene un régimen intermitente caracterizado por la coexistencia entre la turbulencia mediada por defectos y ondas planas estables (laminaridad), lo que típicamente se presenta como regiones laminares separadas por estructuras localizadas con una gran depresión de la amplitud. Además, estas estructuras localizadas pueden llegar a formar fuentes y sumideros bajo ciertos valores de los parámetros como lo mencionan Rabinovich et al. (2000). En este trabajo se caracterizan los diferentes regímenes de un fluido.

### 3. MÉTODOS PARA LA RESOLUCIÓN DE LA ECLG

En este trabajo, se resuelve la ECLG en una dimensión utilizando el método pseudoespectral para la discretización espacial y el método de diferenciación de tiempo exponencial (ETD por su sigla en inglés) para la discretización temporal, método que nos proporciona una alta resolución de los resultados en comparación al método de diferencias finitas.

#### 3.1. Discretización Espacial

El método utilizado para resolver la parte espacial de la ECLG, es el denominado pseudoespectral de Fourier, esto con el fin de no perder resolución en las soluciones numéricas ya que el orden del error está en función del modo de oscilación  $k$  y del orden máximo de la derivada espacial  $\mathcal{O}(k^{-2})$ . Este método consiste en escribir las soluciones como una combinación lineal de funciones base, en este caso funciones base de Fourier  $e^{ikx}$ ; además, nos permite trabajar fácilmente con la derivada espacial.

Así, se analiza la ECLG en el espacio de Fourier, esto es, aplicando la transformada de Fourier  $A(x, t) \rightarrow \hat{A}(k, t)$  (ver (9)) y calculando los coeficientes de Fourier a partir de la transformada discreta de Fourier (TDF) como indica Geldhof (2013).

$$\frac{\partial \hat{A}}{\partial t} = [(\lambda - \lambda_c) - (1 + i\alpha)k^2]\hat{A} - \mathcal{F}[(1 + i\beta)|A|^2 A]. \quad (9)$$

Se trabajó en el intervalo de  $[-100, 100]$  con condiciones de contorno periódicas, con una grilla de 0.4.

#### 3.2. Discretización Temporal

Nuestro interés es ver la evolución de la ecuación no lineal (9). Así, reescribiendo la ecuación vemos que esta tiene la contribución de una parte lineal y otra no lineal de la forma:

$$\hat{A}_t = \mathcal{L}\hat{A} + \mathcal{N}(A, t). \quad (10)$$

Ecuaciones con esta forma pueden ser resueltas por el método ETD, consistente en multiplicar la ecuación por el factor de integración  $e^{-qt}$ , donde  $q$  representa la parte lineal  $\mathcal{L}$  de la ecuación (10), e integrando en el intervalo  $[t_n, t_n + h]$ :

$$\left(\hat{A}(t_{n+1})e^{-qh} - \hat{A}(t_n)\right)e^{-qt_n} = \int_{t_n}^{t_n+h} e^{-qt} \mathcal{N}(A, t) dt. \quad (11)$$

Esta relación es exacta, y la esencia de este método es derivar aproximaciones de la integral (11). Este método cuenta con muchas variantes ya sea aproximaciones de primer orden (ETD1) o de segundo orden (ETD2) de la integral por diferencias, o la combinación con otros métodos (p.ej. Runge-Kutta). Sin embargo, teniendo en cuenta que los procesos son de variación lenta se opta por una aproximación de primer orden  $\mathcal{O}(h)$  en la integral como lo señalan Cox & Matthew (2002) obteniendo así:

$$\hat{A}_{n+1} = \hat{A}_n e^{qh} + \mathcal{N}_n \frac{e^{qh} - 1}{q}. \quad (12)$$

En el presente trabajo se escogió como paso de tiempo  $h = 0.05$ , como compromiso de no extender demasiado el tiempo de cálculo y de no perder resolución en las soluciones.

### 4. RESULTADOS

Con base en las soluciones numéricas de (12), aplicando la transformada inversa de Fourier, y variando los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se puede observar distintos patrones espacio-temporales, desde laminaridad hasta turbulencia mediada por defectos en la región de inestabilidad.

En concreto, se varió  $\alpha$  y  $\beta$  en un intervalo de  $[-2, 2]$  con pasos de 0.08. Se obtuvieron múltiples patrones espacio-temporales, incluyendo la región de turbulencia mediada por defectos. Con el fin de caracterizar la región en consideración fue imperativo el tener un criterio con el cual se puedan distinguir los diferentes regímenes del sistema. Es así que se optó por calcular el promedio de las amplitudes de cada uno de los patrones espacio-temporales resultantes, obteniendo así los valores para construir el espacio de parámetros (mapa de promedios en función de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ ) como se ve en la Fig. 1(a). El código de colores en el espacio de parámetros indica los promedios de la amplitud de cada patrón espacio-temporal. Se puede observar una clara diferenciación entre los distintos regímenes del sistema, además de presentar una simetría respecto a la diagonal que va de (-2,-2) a (2,2), a pesar de que en algunos casos, los patrones espacio-temporales son diferentes aunque parezca que la región en el espacio de parámetros sea la misma (ver por ejemplo Fig. 1(b) y (c)). La región roja del mapa corresponde a regímenes laminares (Fig. 1(b)). Se distingue claramente que la región de inestabilidad está dividida en ocho partes: dos regiones de intermitencia donde predomina la laminaridad en una (Fig. 1(d)) y la turbulencia en la otra (Fig. 1(e)), zonas de color amarillo y verde respectivamente. Por otra parte, una región

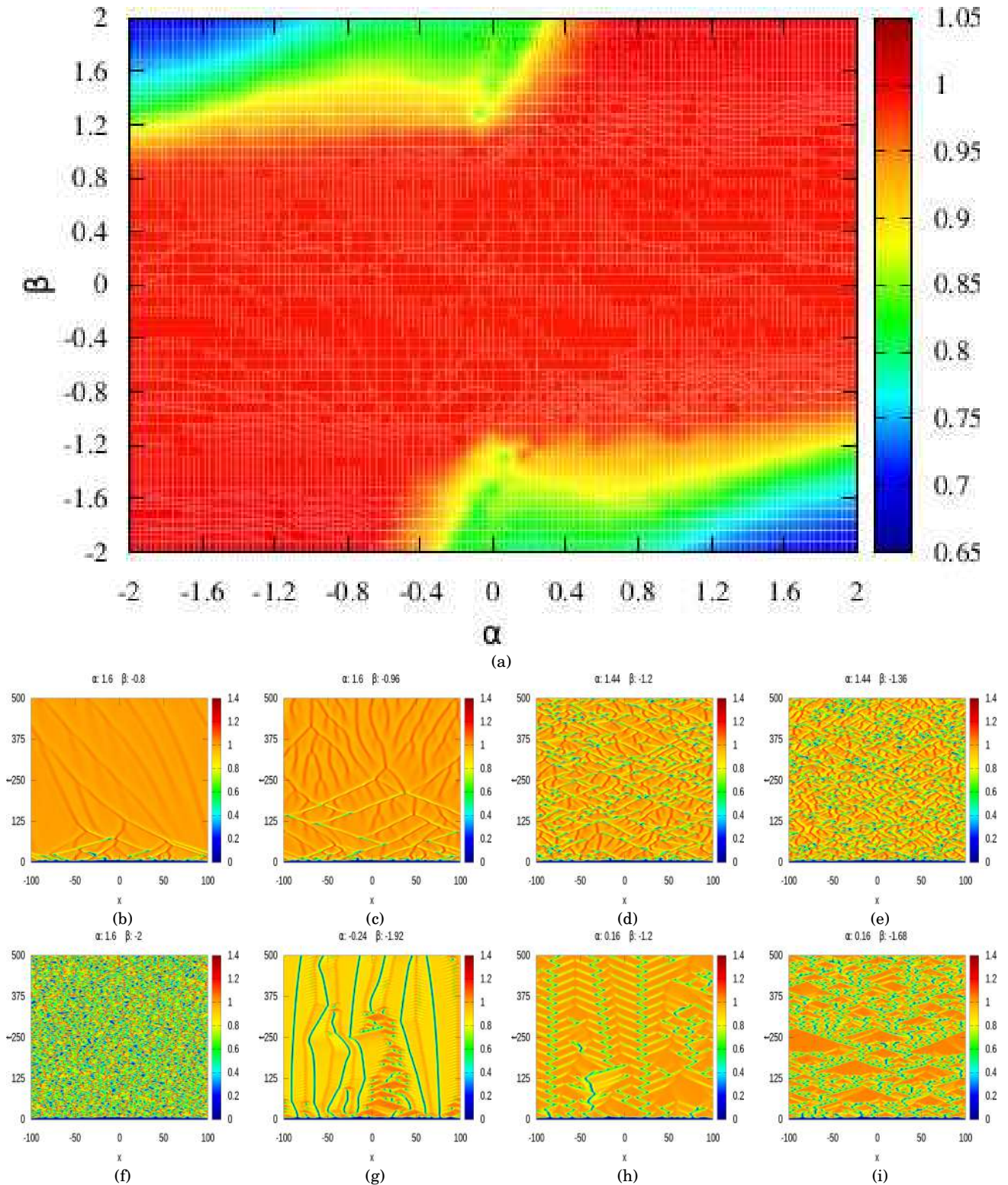


FIG. 1.— (Color online) (a) Espacio de parámetros  $\beta$  vs.  $\alpha$  en el cual se pueden distinguir diferentes regiones correspondientes a distintos patrones espacio-temporales tales como (b) régimen laminar, (c) régimen de turbulencia de fase, (d) y (e) regímenes de intermitencia, (f) régimen de turbulencia mediada por defectos, (g) formación de fuentes y sumideros, (h) e (i) transiciones de fase entre las regiones de fuentes-sumideros e intermitencia.

dominada por la turbulencia mediada por defectos de color azul (Fig. 1(f)); y otra región dominada por una fuerte formación de fuentes y sumideros (Fig. 1(g)) en el extremo del régimen intermitente próximo al

valor cero del parámetro de dispersión lineal  $\alpha$ . Finalmente, dos regiones de transición de fase entre las regiones de laminaridad, intermitencia y turbulencia, zonas de color rojo claro (definida como la tur-

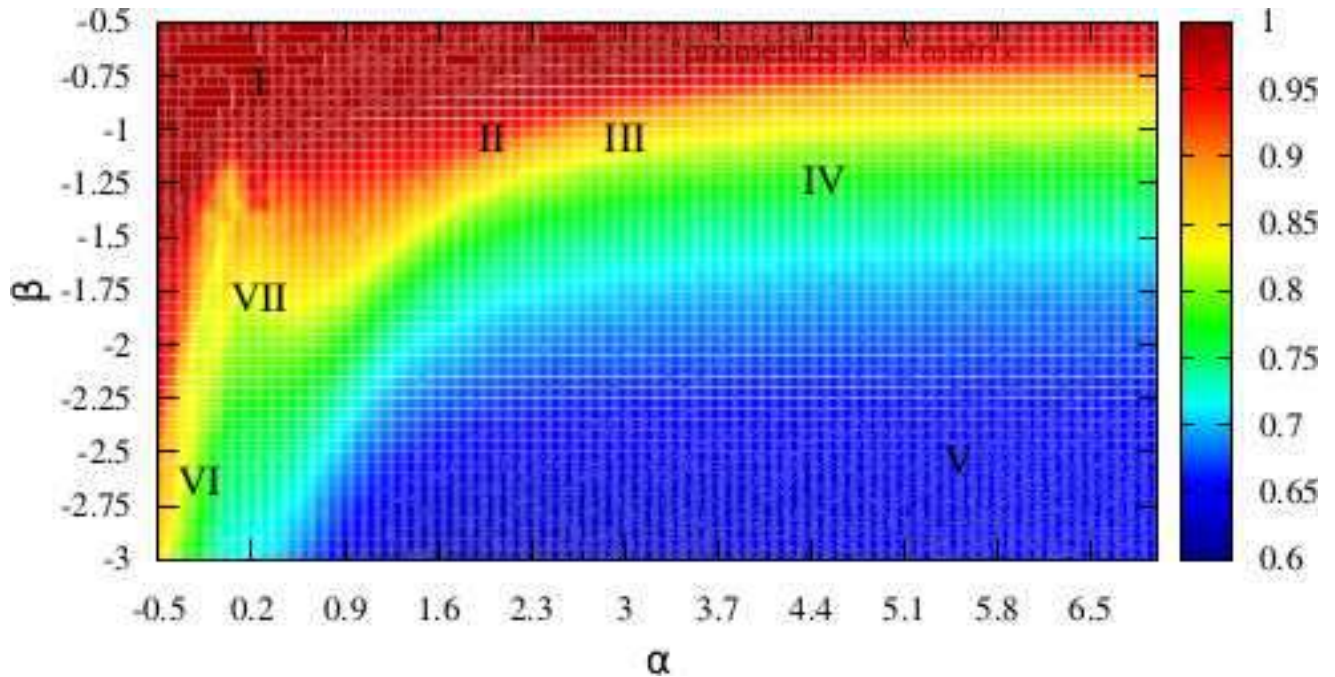


FIG. 2.— (Color online) Ubicación en el espacio de parámetros  $\beta$  vs.  $\alpha$  de los diferentes regímenes del sistema. I: Régimen laminar. II: Turbulencia de fase. III y IV: Régimen intermitente. V: Turbulencia mediada por defectos. VI: Fuentes y sumideros. VII: Región de transición entre fuentes-sumideros y las regiones intermitentes.

bulencia de fase que aparece en la Fig. 1(c) y celeste, y dos regiones de transición de fase entre la zona de fuentes y sumideros, y las regiones de intermitencia (Fig. 1(h) e (i));

Finalmente, con el fin de tener un panorama más amplio de las distintas regiones mencionadas, se magnifica el espacio de parámetros, trabajando con el mismo paso de tiempo, para valores de  $\alpha$  en el intervalo  $[-0.5, 7]$  con pasos de 0.05 y  $\beta$  en el intervalo  $[-3, -0.5]$  con pasos de 0.08 (Fig. 2), más allá de estos valores se presenta divergencia en las soluciones.

## 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Después de realizar un intenso trabajo numérico con el fin de poder distinguir entre los diferentes regímenes, se pudo construir el espacio de parámetros  $\alpha$  vs.  $\beta$  que permite hacer una clara distinción de los comportamientos existentes, in-

cluyendo las regiones de transición de fase. Además, se pudo también observar una simetría respecto a la diagonal en términos de los promedios y que la región correspondiente al régimen de turbulencia mediada por defectos es pequeña comparada con la región de laminaridad.

Como perspectivas, se tiene previsto realizar un análisis más detallado del espacio de parámetros, en especial de la región de fuentes y sumideros; también se pretende tener una visión más amplia del régimen turbulento y su cuantificación mediante otras herramientas de la dinámica no lineal tales como el cálculo de exponentes de Lyapunov y/o periodicidades; por otra parte, se buscarán otras formas de modelar el problema, por ejemplo usando sistemas multiagentes; por último, se pretende observar el comportamiento del sistema frente a perturbaciones externas, así como estudiar situaciones que puedan ser aplicadas en el área de la física del estado sólido.

## REFERENCIAS

- Conway J. M. (2008), *Complex Patterns in Oscillatory Systems*. (Tesis doctoral - Northwestern University).
- Cox S. M. & Matthew P. C. (2002), *Journal of Computational Physics* **176**, 430.
- Cross M. C. & Hohenberg P. C. (1993), *Review of Modern Physics* **65**, 851.
- Geldhof S. (2013), *Pseudospectral Methods for a class of Evolutionary Systems*. (Tesis doctoral - Colorado School of Mines).
- Nicolis G. (1995), *Introduction to nonlinear science*. (Cambridge University Press).
- Rabinovich M. I. Ezersky A. B. & Weidman P. D. (2000), *The dynamics of patterns*. (Singapur: World Scientific Publishing).
- Turing A. M. (1952), *The Chemical Basis of Morphogenesis*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* **237**, 37.
- Walgraed D. & Ghoniem N. M. Ed. (1990), *Patterns, Defects and Materials Instabilities*. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

VARIACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL  
EN LA ESTACIÓN ANTÁRTICA PERUANA MACHU PICCHU

VARIATION OF AEROSOL OPTICAL DEPTH  
IN THE ANTARCTICA PERUVIAN MACHU PICCHU STATION

JULIO ANGELES SUAZO<sup>†</sup>

Dirección de Investigación de la Universidad Continental  
Huancayo, Perú.

ROBERTO ANGELES VÁSQUEZ

Departamento de Ciencias Físicas  
Universidad Nacional del Centro del Perú  
Perú

(Recibido 13 de octubre de 2015; aceptado 18 de diciembre de 2015)

RESUMEN

En este trabajo se describe los resultados del estudio del espesor óptico de aerosol (EOA) durante la campaña de mediciones y monitoreos realizada en la *XVII* y *XXI* Expedición Antártica Peruana (enero de 2007 y febrero de 2013 respectivamente), en la Estación Científica Antártica Machu Picchu (ECAMP) a  $62^{\circ}05'30''$  S,  $58^{\circ}28'16''$  W y 6 *msnm*. Se utilizó un fotómetro solar SP02-L, comprendido dentro del marco instrumental del Año Polar Internacional, que dispone de 4 canales: 412 *nm*, 500 *nm*, 675 *nm* y 862 *nm*, lo que permitió medir espectros de irradiación directa. El resultado calculado para el promedio del EOA en latitudes polares es  $0,0551 \pm 0,0139$ , que es el valor más bajo del mundo (en el canal de 500 *nm*) durante los veranos australes de 2007 y 2013; en estos años el EOA (500 *nm*) varió entre 0,0336 y 0,0743, lo que es típico por las condiciones de turbidez atmosférica en un sitio polar dominado por las condiciones marítimas. Durante esta época del año los valores del EOA también son inferiores a los registrados en las ciudades (entre 0,25 y 1,7), y mucho menores que los registros durante la quema de biomasa, temporada donde los valores de EOA pueden llegar hasta 0,4. Los valores reportados de EOA (500 *nm*) están dentro del rango de las estaciones Antárticas costeras de la estación de Neumayer y Aboa, que son 0,06 y 0,0551 respectivamente.

Código(s) PACS: 92.60.Mt, 07.05.Hd, 93.30.Ca

*Descriptores:* Partículas y aerosoles — Adquisición de datos — Antártida.

ABSTRACT

We describe the results of the study of aerosol optical depth (AOD) aerosols, obtained from the measurement and monitoring campaign carried out during the *XVII* and *XXI* Antarctic Peruvian Expedition in the months of January 2007 and February 2013 respectively, in the Antarctic Research Machu Picchu Station (ARMPS) at  $62^{\circ}05'30''$  S,  $58^{\circ}28'16''$  W and 6 *masl*. We used a SP02-L sun photometer, which is within the instrumental framework of the International Polar Year. This instrument has 4 channels: 412 *nm*, 500 *nm*, 675 *nm* and 862 *nm*, thus allowing direct radiation spectra measurements. The results calculated of AOD in polar latitudes show the lowest average in the world,  $0,0551 \pm 0,0139$  (at 500 *nm*) during the austral summers of 2007 and 2013; also during these years the AOD (500 *nm*) ranged from 0.0336 to 0.0743, which is typical in conditions of atmospheric turbidity on a polar site dominated by sea conditions. During this time of year, these AOD reported values are lower than in cities (from 0.25 to 1.7) and much lower than the measurements during biomass burning, when values can reach 0.4. The reported AOD values (500 *nm*) are within the range of coastal Antarctic stations Neumayer and Aboa which are 0.06 and 0.0551 respectively.

*Subject headings:* Particles and aerosols — Data acquisition — Antarctica.

<sup>†</sup>Email: julio\_as.1@hotmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Los aerosoles son una pequeña fracción de la composición de la atmósfera, pero son omnipresentes para todas las localidades con implicaciones importantes para la química y física de la atmósfera, el clima y la salud humana (Pöschl 2005). Pueden ser emitida a partir de fuentes naturales y antropogénicas y sus concentraciones pueden tener valores típicos en el aire urbano de  $\sim 105$  partículas por  $\text{cm}^{-3}$  de aire y concentraciones tan bajas como 10 partículas por  $\text{cm}^{-3}$  en los sitios polares. Nominalmente los aerosoles se denominan como “una suspensión en un medio gaseoso de partículas sólidas, partículas líquidas o partículas sólidas y líquidas que tienen una velocidad de caída insignificante (ISO 1994). En relación con los aerosoles del cambio climático están definidos por el IPCC 2007 por el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Forster et al. 2007), como “una colección de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, con un tamaño típico de entre 0,01 y 10 micras que residen en la atmósfera durante al menos varias horas” (para tener un efecto sobre el clima). Extensos estudios de investigación mostraron que los aerosoles atmosféricos afectan el clima de dos maneras. El primero se llama “efecto directo” por el cual las partículas de aerosoles dispersan hacia atrás la luz solar entrante (onda corta) al espacio, lo que afecta el balance de radiación global. Esto provoca un aumento del albedo de la Tierra, y se traduce en una influencia de enfriamiento neto sobre el clima. Una amplia investigación sugiere que los aerosoles y sus interacciones con las nubes han compensado una parte sustancial de la media mundial del forzamiento de gases efecto invernadero mezclados. (IPCC, 2014). La segunda manera “el efecto indirecto” se relaciona con la propiedad de los aerosoles de actuar como núcleo de condensación de las nubes (CCN). Así que su variabilidad afecta al número, densidad y tamaño de gotas de las nubes. Esto puede cambiar la cantidad y las propiedades ópticas de las nubes, y por lo tanto su reflexión y absorción (Tao et al. 2012). Este efecto indirecto es más difícil de entender que el efecto directo ya que los procesos físicos y químicos implicados que se producen en la atmósfera son aún más complejo.

Intensa investigación se ha realizado para discriminar estos papeles clave de los aerosoles sobre el clima. Monitoreo de sitios de propiedades ópticas se han implementado en los últimos años y las campañas intensivas se han realizado para caracterizar sus propiedades químicas y físicas, así los procesos atmosféricos que influye en el transporte de aerosoles en diferentes lugares del mundo (Martin et al. 2010; Ramanathan et al. 2007; Niranjana et al. 2011; Delene & Ogren 2002). Las mediciones en sitios polares son escasas a pesar de que es una región crítica para los efectos adversos del cambio climático y en el balance de energía (Tomasi et al. 2007). Los aerosoles en sitios polares se componen

de una mezcla de partículas muy pequeñas, sobre todo de origen marino. Sin embargo, muy diferentes cargas columnares y características de composición química se encontraron en las dos zonas polares. Debido a las fuentes de altas emisiones de aerosol, el hemisferio norte tiene valores de concentración superior. En ese sentido el transporte de aerosol a partir de fuentes contaminantes puede ser un factor importante para la alteración. En la Antártida valores de espesor óptico de aerosol en sitios costeros tienen valores típicos entre 0,02 y 0,08. Las principales variaciones fueron causadas por las erupciones Pinatubo y Cerro Hudson en 1991, que causó valores de *EOA* (500 nm) superior a 0,30 en el verano austral 1991/1992 (Herber et al. 1996).

Comunidad investigadora peruana tiene un interés especial en la Antártida por lo que tienen una estación de investigación en los que ha estado haciendo campañas anuales para evaluar propiedades de los aerosoles sobre todo el espesor óptico de aerosol (*EOA*) como una medida de la luz sea dispersada o absorbida por las partículas de aerosol. Aunque no se encontraron variaciones importantes en los promedios de *EOA* en los tiempos medidos con el fotómetro solar en lugares de la Antártida (Tomasi et al. 2007). Hay una necesidad de mejorar la comprensión del papel de los aerosoles en el forzamiento radiativo en sitios libre de contaminación y su posible variación debido a las actividades antropogénicas. Este trabajo se centra en la evaluación de efecto de la variación del *EOA* en la Estación Científica Antártica Machu Picchu (*ECAMP*), basado en las campañas durante el verano austral del 2007 y 2013.

## 2. DATOS Y MÉTODOS

## 2.1. Descripción del Sitio

La Estación Científica Peruana en la Antártida “Machu Picchu” (referido como *ECAMP*,  $62^{\circ}05'30''$  S,  $58^{\circ}28'16''$  W y 6 msnm) se encuentra en la Isla Rey Jorge, en el extremo norte de la península Antártica (figura 1). Alrededor del 90% de la extensión de la isla Rey Jorge está cubierta por el hielo (Simoes et al. 1999). La estación peruana se encuentra muy cerca del mar abierto por lo que el régimen climático se caracteriza por las condiciones marítimas. Estaciones brasileras y polaca Antártica son los más cercanos. La estación peruana solamente funciona durante el período del verano austral de diciembre a marzo como máximo, en función de los aspectos logísticos. Esta estación es operada por el Instituto Antártico Peruano y en realidad está a cargo de la Oficina de Asuntos Antárticos del Ministerio de Asuntos Exteriores.

La estación más cercana a la estación peruana con mediciones meteorológicas continuas es la estación antártica brasileña Comandante Ferraz, está a sólo 5 km de la peruana. Registros de temperatura para el período de 1947 – 1995 muestra que la media es  $-2,8^{\circ}\text{C}$ , con un mínimo de  $5,2^{\circ}\text{C}$  y un máximo de  $-0,8^{\circ}\text{C}$ , para el año 1959 y 1989, respectivamente. Se

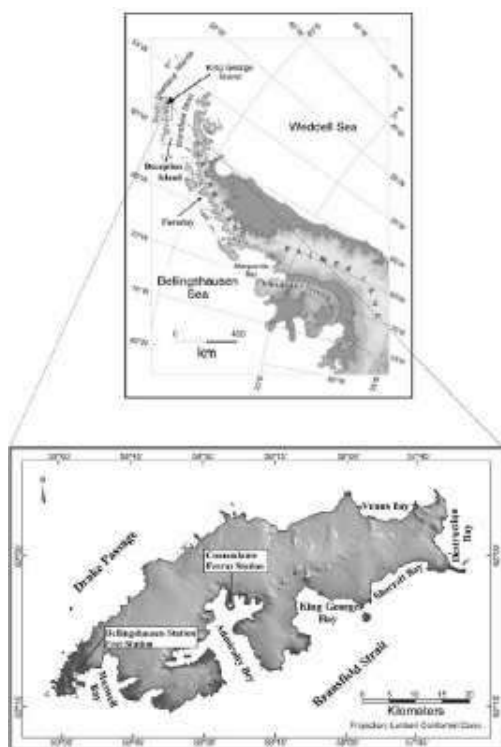


FIG. 1.— Representación del mapa de localización de la Estación Antártica Peruana “Machu Picchu” y las principales referencias geográficas.

mostró una tendencia al calentamiento de  $0,022^{\circ}\text{C}$  por año, lo que resulta en un aumento de la temperatura media del aire de más de 49 años  $1.1^{\circ}\text{C}$ . La temperatura durante el verano, en la temporada que abarca la toma de muestras de aerosoles en la estación peruana, podría llegar a algunos grados más de  $0^{\circ}\text{C}$ , con una media de  $0,9^{\circ}\text{C}$  (Ferron et al. 2004). Las tormentas son muy frecuentes en esta región de la Península Antártica, donde la velocidad del viento es superior a  $4\text{ m/s}$  con una alta variabilidad debido a los patrones de circulación sinópticos como los siguientes que se describen por Braun et al. (2001):

- Advección de norte a noroeste
- Transporte de masa de aire del sur al sureste,
- Advección desde el noroeste
- Advección de oeste a suroeste

## 2.2. Instrumento

Las campañas de campo para la toma de mediciones con el fotómetro solar se realizaron durante las campañas antárticas peruana: *ANTAR XVII* (enero de 2007 y *ANTAR XXI* (enero y febrero de 2013). El trabajo de campo en la *ECAMP* fue programado con el objetivo principal de la cuantificación de la *EOA* como un indicador de la contaminación atmosférica y evaluar su variación entre los diferentes años de mediciones.

El principal instrumento utilizado fue el fotómetro solar que recoge información sobre las propiedades

físicas y ópticas de los aerosoles a lo largo de una trayectoria vertical de la atmósfera. Este fotómetro solar *SP02 - L*, se utiliza para medir la irradiancia solar en Volts a cuatro longitudes de onda diferentes que son nominalmente 412, 500, 675, 862 *nm* con 10 *nm* de ancho de banda (Middleton 2004). En este modelo mejorado tiene un campo de visión de  $2,5^{\circ}$  ( $1,25^{\circ}$  ángulo de apertura), un ángulo de inclinación de  $0,7^{\circ}$  y un ángulo límite de  $1,8^{\circ}$ .

## 2.3. Espesor Óptico de Aerosol

La irradiación solar directa medido con este fotómetro solar se utiliza para describir los valores espectrales del espesor óptico de aerosol (*EOA*) asociada a cada longitud de onda que se determinan con base en la conocida ley de Lambert-Bouguer-Beer.

$$I(\lambda) = I_0 R^{-2} e^{m\tau(\lambda)} \quad (1)$$

Donde  $I(\lambda)$  es la intensidad solar a cada longitud de onda  $\lambda$  en Volts,  $I_0(\lambda)$  es el valor de la intensidad solar en la parte superior de la atmosfera (*TOA*) obtenidos por el método de Langley-plot en Volts,  $R$  es la distancia solar expresado en unidades astronómicas,  $m$  es la masa óptica del aire y  $\tau(\lambda)$  es el espesor óptico total dependiendo de la longitud de onda. Donde se puede expresar como la suma de los distintos constituyentes de la atmosfera.

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda) + \tau_R(\lambda) + \tau_{o_3}(\lambda) \quad (2)$$

Donde  $\tau_a(\lambda)$  es el espesor óptico de aerosol,  $\tau_R(\lambda)$  es el espesor óptico de Rayleigh-Scattering, y  $\tau_{o_3}(\lambda)$  es el espesor óptico del ozono (Liou 2007). El espesor óptico de Rayleigh (*EOR*), conocido también como espesor óptico de Rayleigh-scattering, es calculado usando la ecuación 3 de Bodhaine et al. (1999) donde la longitud de onda,  $\lambda$ , está en micrómetros.

$$\tau_R(\lambda)(sealevel, 45N) = 0.002152 * \frac{1.0455996 - 341.29061\lambda^{-2} - 0.90230850\lambda^2}{1 + 0.0027059889\lambda^{-2} - 85.968563\lambda^2} \quad (3)$$

El espesor óptico de ozono depende de la concentración de la columna de ozono total ( $\Omega$ ) en unidades Dobson como se señaló en la ecuación 4. Este valor se obtiene a través de mediciones de Ozone Monitoring Instrument (*OMI*) instrumento de satélite *Aura* (Levelt et al. 2006), y el uso de los coeficientes de absorción de ozono ( $\sigma$ ) para las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 8624 *nm* que tienen los siguientes valores 0,000295974375, 0,031997375, 0,0401001875, 0,00247309125 respectivamente.

$$\tau_{o_3} = \frac{\Omega \times \sigma}{1000} \quad (4)$$

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Calibración

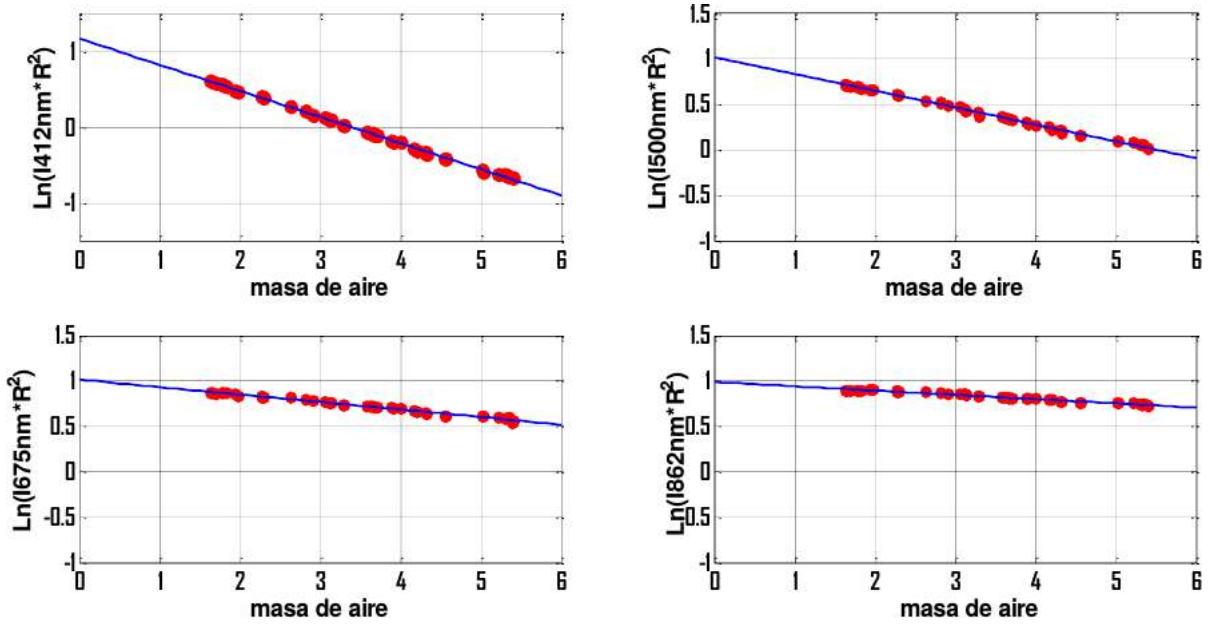


FIG. 2.— Grafico de Langley plot trabajado para cada longitud de onda del Fotómetro solar SP02.

El usual procedimiento para la calibración del fotómetro solar es el clásico método de Langley plot que está basado en la extrapolación de la señal espectral  $I(\lambda)$  en Volts para la determinación de la constante extraterrestre,  $I_o(\lambda)$  ( $m = 0$ ) de la ecuación 5 que resulta de la regresión lineal de la ecuación 1, obtenido reduciendo el logaritmo en los dos términos. Así, el intercepto de la regresión lineal de  $\ln(I(\lambda)R^2)$  versus  $m$  (masa óptica del aire) resulta que sean igual al logaritmo natural de la constante de calibración  $I_0(\lambda)$ .

$$\ln(I(\lambda)R^2) = \ln(I_o(\lambda)) - m\tau(\lambda)\dots \quad (5)$$

Para adecuar la determinación del valor de calibración de  $I_o(\lambda)$ , es apropiado considerar solo las mediciones de los periodos de condiciones atmosféricas estables (Reagan et al. 1986). La Figura 2 muestra los mejores resultados Langley-plot para cada longitud de onda del fotómetro solar. Es posible tener en cuenta la buena correlación.

Basado en la calibración de las intensidades en la parte superior de la atmósfera  $I_o(\lambda)$ . El  $I_o(\lambda)$  representa la radiación incidente para una atmósfera limpia sin contaminantes obteniéndose las intensidades iniciales de 3,3, 2,75, 2,75 and 2,575 volts para las longitudes de ondas de 412, 500, 675 and 862 nm, respectivamente. Resultando el root mean squared difference (RMSD) alrededor de  $10^{-3}$  para todas las longitudes de ondas indicadas y con ellas es posible establecer la buena calidad de los datos en la determinación de las intensidades iniciales para cada longitud de onda (Harrison & Michalsky 1994).

### 3.2. Espesor óptico de aerosol

Para el cálculo del EOA, como el primer paso se requiere la determinación de los valores del espesor óptico de Rayleigh (EOR), el espesor óptico de ozono

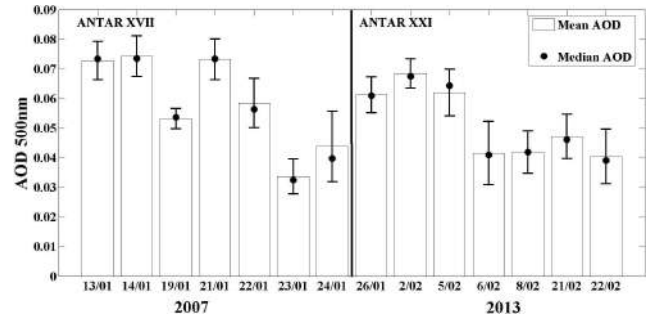


FIG. 3.— Variación diaria del EOA a 500 nm para el verano austral del 2007 y 2013. Las barras de error representa la desviación estándar.

(EOO) y el ángulo cenital (SZA) para el análisis de datos. Fue verificado que: (a) EOR tiene valores de 0,1434 a 500 nm, (b) los valores promedio de EOO a 500 nm son alrededor de 0,0089.

Los registros de EOA en latitudes polares muestran los valores más bajos del mundo, con los valores más altos en el Ártico que en la Antártida. La Figura 3 muestra el conjunto completo de registros diarios de EOA durante las campañas antárticas peruanas en la ECAMP, se desarrolló durante los veranos australes de 2007 y 2013. Durante estos años el EOA (500 nm) varió entre 0,0336 hasta 0,0743, siendo un valor típico por las condiciones de turbidez atmosférica en un sitio polar dominada por las condiciones marítimas, durante esta época del año (Tomasi et al. 2007), también son inferiores a los registrados en las ciudades urbanas, 0,25 – 1,7 (Castro et al. 2001), y mucho menor que los registros durante la quema de biomasa temporada donde los valores pueden tener valores de hasta 0,4 para las mismas longitudes de onda (Eck et al. 2003).

Asimismo la figura 4, en relación con EOA, se presentan los valores que se encontraron para cada longitud de onda de trabajo, del total de los registros,

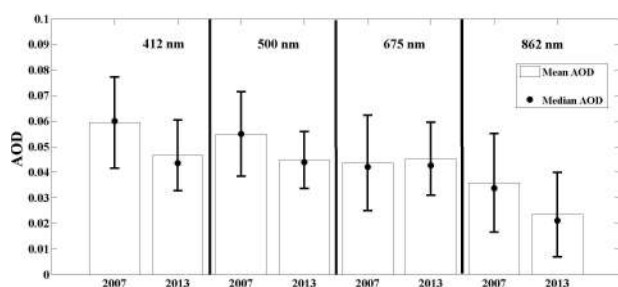


FIG. 4.— Variación del promedio y mediana del espesor óptico de aerosol para cada longitud de onda. Las barras de error representa la desviación estandar.

pero con una masa de aire solamente con los valores de 2 a 5. Es posible observar que disminuye el EOA a medida que longitud de onda aumenta mientras tanto la interacción entre la radiación y los aerosoles aumenta, siendo la longitud de onda a 862 nm la que tiene la mayor variación causada por el efecto de los aerosoles en el que el valor medio y el coeficiente de variación de EOA a 500 nm y 862 son  $0,0551 \pm 0,0139$  y  $0,0255 \pm 0,0177$ , respectivamente.

Comparando estos valores con otras estaciones de monitoreo de la Antártida, la ECAMP presenta una media de EOA (500 nm) de 0.0551 dentro del rango de otras estaciones Antárticas. Ya que el EOA que registró la estación de Neumayer y Aboa eran 0,06 y 0,0551, respectivamente. Estos sitios también están muy cerca de la costa, donde la influencia es mayor de los aerosoles marinos. Asimismo sitios Continentales, lejos de la costa, presentan valores más bajos. El EOA en las estaciones de Kohne y Suth Pole eran valores tan bajos de 0,015 (Tomasi et al. 2007).

La comparación entre la ECAMP y la otra estación ofrece la evidencia de los principales e importantes diferencias de las propiedades ópticas de los

aerosoles. Sitios polares tiene un ambiente relativamente muy limpio, pero tienen una fuerte influencia de las partículas, muy pequeñas, sobre todo de origen marino y, finalmente, a partir de fuentes antropogénicas y las condiciones de turbidez que suele estar presente en el verano y el otoño, debido a los vientos fuertes dominantes que transporta neblina y polvo (Shaw 1982).

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo analizo las medidas del espesor óptico de aerosol durante las campañas antárticas peruanas de los años 2007 y 2013. Los valores esperados de EOA fueron muy bajas durante estos años, el EOA a 500 nm varió de 0,0336 hasta 0,0743, pero era más alto que otros sitios marítimos cerca de la Península Antártica alejados de la zona costera. Es cierto que el aire es limpio en regiones polares, pero tienen una mezcla de partículas muy pequeñas principalmente de origen marino y a las condiciones de turbidez que suelen aplicar en verano y en otoño, como los fuertes cambios debidos al transporte de bruma y polvo. Asimismo se permitió cuantificar el EOA en la ECAMP, con la finalidad de proveer y contribuir al estudio futuro de los efectos de los aerosoles en el balance radiativo y sus efectos climáticos en la Antártida.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Instituto Antártico Peruano por su apoyo en la realización de las mediciones y elaboración del presente artículo como parte de la expedición antártica.

#### REFERENCIAS

- Bodhaine B., Wood N., Dutton E. & Slusser J. (1999), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **16**, 1854.
- Braun M., Saurer H., Vogt S., Simoes J. C. & Gobmann H. (2001), *International Journal of Climatology* **21**, 21.
- Castro T., Madronich S., Rivale S., Muhlia A. & Mar B. (2001), *Atmospheric Environment* **35**, 1765.
- Delene J. D. & Ogren J. A. (2002), *Atmos. Sci.* **59**, 1135.
- Eck T., Holben B., Reid J., O'Neill N., Dubovik O., Simimov, A., Yamamaso, M. & Artaxo P. (2003), *Geophysical Research Letters* **20**, 2035.
- Ferron F. A., Simões J. C., Aquino F. E. & Setzer A. W. (2004), *Pesquisa Antártica Brasileira* **4**, 155.
- Forster P. et al. (2007), *Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing, in: Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.).
- Harrison L. & Michalsky J. (1994), *Applied Optics* **33**, 5126.
- Herber A., Thomason L. W., Dethloff K., Viterbo P., Radionov V. F. & Leiterer U. (1996), *Geophys. Res.* **101**, 3921.
- ISO 1994 (1994), *Air quality General aspects Vocabulary* (International Organization for Standardization, Geneva.).
- Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R., Malkki A., Visser H., de Vries J., Stammes P., Lundell J. O. V. & Saari H. (2006), *Geoscience and Remote Sensing* **44**, 1093.
- Liou K. (2007), *An introduction to atmospheric radiation* (2nd Ed. New York: Academic Press).
- Martin S. T. et al. (2010), *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 11415.
- Middleton Solar (2004), <http://www.middletonsolar.com/documents/SP2data.pdf>
- Niranjan K., Spandana B., Devi T. A., Sreekanth V. & Madhavan B. L. (2011), *Ann. Geophys.* **29**, 973.
- Pöschl U. (2005), *Angew. Chem. Int.* **44**, 7520.
- Ramanathan V., Li F., Ramana M. V., Praveen P. S., Kim D., Corrigan C. E., Nguyen H., Stone E. A., Schauer J. J., Carmichael G. R., Adhikary B. & Yoon S. C. (2007), *J. Geophys. Res.* **11**, 112.
- Reagan J. A., Thomason L. W., Herman B. M. & Palmer J. M. (1986), *Geoscience and Remote Sensing* **2**, 258.
- Shaw G. (1982), *J. Appl. Meteorol.* **21**, 1080.
- Simoes J. C., Bremer U. F., Aquino F. E. & Ferron F. E. (1999), *Ann. Glaciol.* **29**, 220.
- Tao W. K., Chen J. P., Li Z., Wang C. & Zhang C. (2012), *Rev. Geophys.* **50**, 2001.
- Tomasi C. et al. (2007), *Geophysical Research* **112**, 8432.

## CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y DEL POTENCIAL EÓLICO DEL ALTIPLANO CENTRAL

### WIND CHARACTERISTICS AND WIND POWER POTENTIAL IN BOLIVIAN'S ALTIPLANO REGION

JESUS ENCINAS, RENÉ TORREZ, FLAVIO GHEZZI, & EDUARDO R. PALENQUE

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

(Recibido 9 de septiembre de 2015; aceptado 22 de diciembre de 2015)

#### RESUMEN

Se describen las principales características de la atmósfera sobre el Altiplano Central (3800 *msnm*) para poder estimar el potencial eólico de la región. Se recolectó simultáneamente datos de la dirección e intensidad del viento, temperatura y humedad relativa del aire, y presión atmosférica; en intervalos de cinco minutos, durante el período septiembre de 2010 a enero de 2012. Los sensores estaban a 3 metros sobre el nivel del suelo. Se analizan los promedios de la energía eólica en periodos estacionales, mensuales y diarios. También se consideran parámetros como variaciones de la densidad del aire e intensidad de la turbulencia. Los resultados obtenidos muestran una correlación interesante entre la disponibilidad y la demanda local de energía.

Código(s) PACS: 92.70.Cp, 47.85.Gj, 07.05.Hd

*Descriptor:* Física de la atmósfera — Dinámica de fluidos — Adquisición de datos.

#### ABSTRACT

This work sets out to study the atmospheric features of Bolivia's Altiplano region at 3800 *masl*, as a means to estimate the region's wind power potential. We simultaneously collected data: wind speed and direction as well as temperature, air pressure and humidity, at five-minute intervals at 3 meters above ground level during the period September 2010 to January 2012. Density and turbulence intensity variations were also considered. We analyzed average wind power levels for seasonal, monthly and daily time periods. The obtained results indicate an interesting coincidence between energy demand and supply.

*Subject headings:* Atmosphere physics — Fluid dynamics — Data acquisition.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La política energética boliviana incluye una componente de energía eólica para cubrir las demandas actuales y futuras, en especial en las áreas rurales, donde la distribución de energía eléctrica es difícil y costosa. La falta de datos validados sobre los parámetros atmosféricos, y por consiguiente de los modelos de vientos, en especial a nivel de superficie, significan que la producción de energía eólica recién está comenzando. En este trabajo se presentan resultados sobre datos recolectados en la estación meteorológica de Patacamaya, en el altiplano central, (parte del IIF). Se eligió esa localidad por ser representativa de las características topográficas del altiplano, y por su posición económica estratégica. Mientras Patacamaya tiene principalmente actividades agropecuarias, es también el centro de abastecimiento para el comercio entre Bolivia y el Océano Pacífico. Además la zona presenta un nivel de contaminación muy bajo, por lo que se convierte en un sitio ideal para realizar estudios que

pudiesen tener influencia en el mercado energético.

#### 2. CARACTERÍSTICAS Y MEDICIONES LOCALES

Se instaló una estación meteorológica autónoma (Fischer Barometer G-bH) en la localidad de Patacamaya ( $17^{\circ}15'39''S, 67^{\circ}56'53''O, 3798$  *msnm*) que mide presión atmosférica, temperatura y humedad del aire, e intensidad y dirección del viento. Los sensores están colocados a tres metros sobre el nivel del suelo. Patacamaya está en el altiplano central, al sur del Departamento de La Paz, y es un área representativa del altiplano boliviano por sus características geográficas, que incluyen la altura geográfica, una superficie plana sin vegetación alta y la lejanía de las montañas de las Cordillera de los Andes. Los valores típicos que se midieron en la región incluyen los siguientes: en los meses de verano, la radiación solar alcanza valores máximos de  $1594$   $W/m^2$  entre las 12 : 00 y 13 : 00 horas. El máximo de temperatura de  $25.2^{\circ}C$  se da entre las 13 : 00 y 14 : 00 horas en primavera, mientras que la temperatura mínima, de  $-11.7^{\circ}C$  se da entre las 06 : 00 y 07 : 00 en invierno.

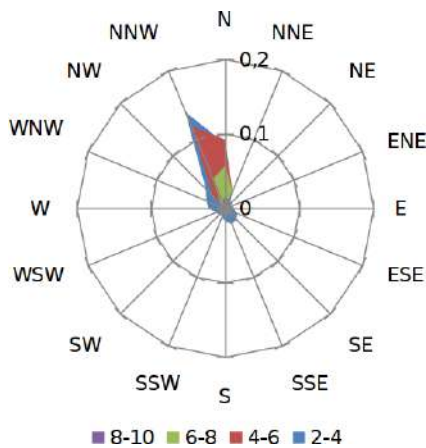


FIG. 1.— Rosa de vientos de la región de Patacamaya.

La humedad relativa del aire tiene un valor medio de 50.16% en los días sin lluvias. Este estudio sobre las características del viento y la estimación de la energía eólica en el área de Patacamaya se basa en los datos de: dirección y velocidad del viento; presión atmosférica; y temperatura y humedad relativa del aire; los cuales se tomaron a intervalos de cinco minutos entre el 21 de septiembre de 2010 hasta el 20 de enero de 2012. A fin de tener una mejor comprensión del potencial eólico, se dividió la base de datos de la siguiente forma:

- **Primavera 2010:** del 21-09-2010 al 20-12-2010
- **Verano 2011:** del 21-12-2010 al 20-03-2011
- **Otoño 2011:** del 21-03-2011 al 20-06-2011
- **Invierno 2011:** del 21-06-2011 al 20-09-2011
- **Primavera 2011:** del 21-09-2011 al 20-12-2011
- **Verano 2011:** del 21-09-2011 al 20-12-2011

Para poder determinar el potencial eólico de una área en particular es necesario conocer las características del viento en la misma. Para ello, estudiamos el patrón de comportamiento (diario y estacional) de los vientos, la dirección predominante de los mismos, los niveles de turbulencia; y la influencia de la densidad y humedad atmosférica sobre el comportamiento de los vientos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Dirección del viento

Es necesaria para determinar la orientación de los álabes y las turbinas para optimizar la producción de energía eólica. Se construyó una rosa de vientos a partir de los datos de las medidas de la dirección del viento, expresada en grados respecto de la dirección norte. En la Figura 1 se muestra en carácter unidireccional del viento, lo que indica que éste circula dentro del mismo rango de direcciones, en forma independiente de la estación, el mes, o el día en que se haya medido.

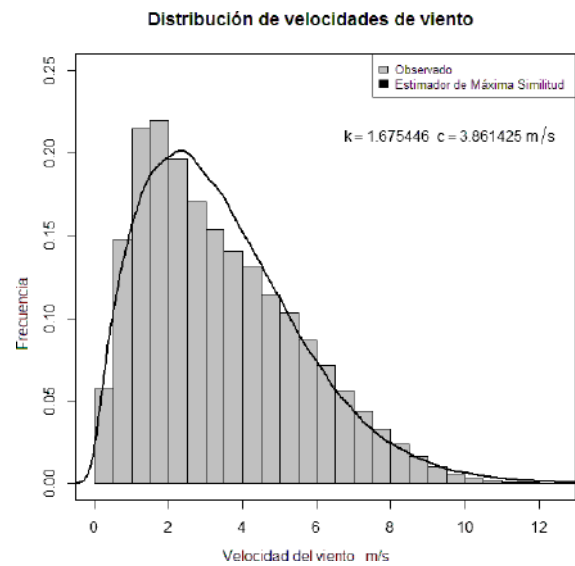


FIG. 2.— Función de distribución de probabilidades de la velocidad del viento en la región de Patacamaya.

El rango obtenido de las medidas está entre los 337.5° a 360 en relación al norte (ó desde 0° a 22.5° si se mide contra las manecillas del reloj) Existen fluctuaciones fuera de este rango, pero que no son frecuentes.

#### 3.2. Distribución de la velocidad de vientos

Para poder construir la función de distribución de probabilidades de la velocidad del viento mostrada en la Figura 2; se utilizó un rango de intervalos de 0.5 m/s y una distribución de Weibull bi-paramétrica (Caretto 2014). El ajuste fue realizado con el Método de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Method MLM) (Caretto 2014; Shamshad et al. 2014) para estimar el factor de forma (k) y el factor de escala (c) de la ecuación 1:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Después del proceso de ajuste, se obtuvo la siguiente función de distribución (ec.2) donde v es la velocidad del viento:

$$f(v) = 0.174v^{0.674} e^{-\left(\frac{v}{3.861}\right)^{1.675}} \quad (2)$$

Una vez que se conocen los parámetros de la distribución de probabilidades, se pueden calcular la curtosis (3.1087), la asimetría (0.7518), la velocidad más probable ( $v_{mp} = 2.245 \text{ m/s}$ ) y velocidad promedio ( $v_{ave} = 3.448 \text{ m/s}$ )

#### 3.3. Intensidad del viento

Para poder determinar el potencial eólico es necesario conocer la intensidad del viento en los diferentes periodos. En este trabajo se utilizaron promedios diarios, mensuales y estacionales para estimar el potencial eólico local. Como se muestra en la Figura 3a, sobre datos de más de un año, la velocidad media del viento alcanza máximos entre 4 y 4.3 m/s, en los meses de noviembre y diciembre; durante

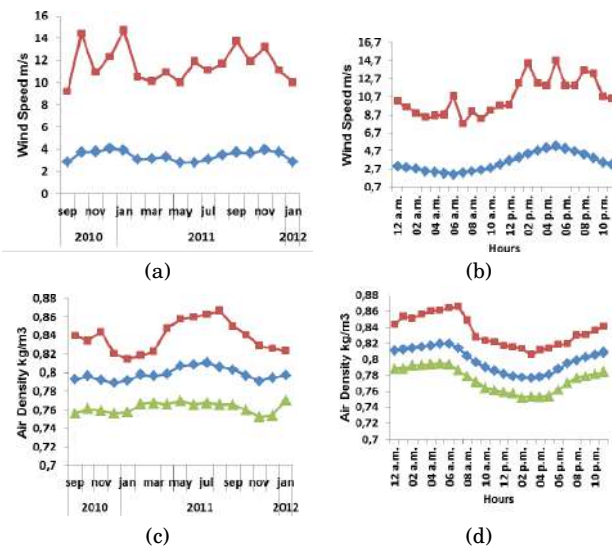


FIG. 3.— Parámetros atmosféricos característicos para Patacamaya, a 3 metros sobre el nivel del suelo. Valores diarios y mensuales de la velocidad del viento y la densidad del aire: máximas cuadrados rojos, medias rombos azules, mínimas triángulos verdes.

el periodo de transición de primavera a verano. Para comparación, al inicio del invierno, en los meses de mayo y junio, los mínimos se dan entre 2.5 y 3.0 m/s. En la Figura 3b se observa que, durante un ciclo diario, el máximo de la velocidad media, con valores entre 5.0 y 5.2 m/s se da entre las 16:00 y 17:00 horas, cercano al ocaso. También se observa que la velocidad mínima media entre 2.3 y 2-0 m/s se produce entre las 05:00 y 06:00, al alba.

#### 3.4. Densidad del aire

La densidad del aire es un factor clave para poder estimar el potencial eólico, por lo que fue incorporada al análisis, considerando valores diarios y mensuales. La densidad local del aire se calculó utilizando el modelo CIPM 2007 (Picard et al. 2008; Farkas 2014) para asegurar la precisión y un mejor estudio de sus variaciones. Se encontró que la densidad del aire se incrementa en los periodos de transición de primavera a verano y de otoño a invierno; pero disminuye al pasar de invierno a primavera, como se puede ver en la Figura 3c. El análisis de los datos diarios demuestra que la densidad llega a su máximo valor (0.820 kg/m<sup>3</sup>) entre las 05:00 y 06:00 horas, cuando la velocidad del viento llega a valores de 2.0 m/s. El valor mínimo diario (0.778 kg/m<sup>3</sup>) ocurre entre las 14:00 y 15:00 horas, cuando la velocidad del viento alcanza el valor máximo de 5.0 m/s; tal como se aprecia en las Figuras 3d y 3b.

#### 3.5. Humedad del aire

A pesar que la humedad del aire no está en forma explícita en el cálculo del potencial eólico, es importante considerar su influencia sobre la velocidad del viento y la densidad del aire. Comparando la densidad del aire y la humedad relativa, como se muestran en las Figuras 3c y 4a, encontramos una relación inversa entre estas dos variables so-

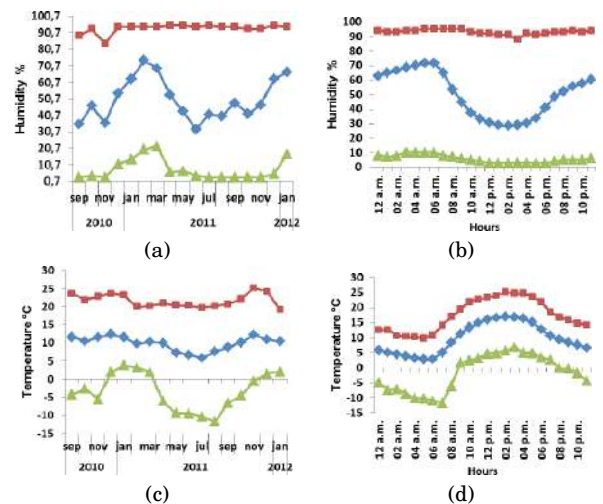


FIG. 4.— Valores diarios y mensuales de humedad y temperatura: máxima cuadrados rojos, medias diamantes azules, mínimas triángulos verdes

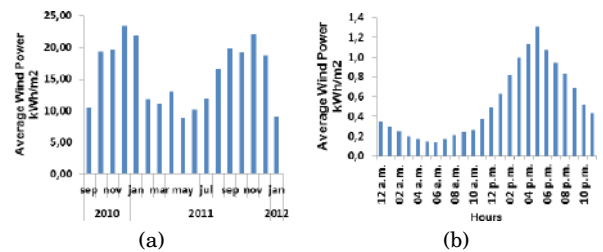


FIG. 5.— Potencia eólica en la región de Patacamaya a) promedio mensual b) promedio diario

bre periodos mensuales, y también se observa que la humedad del aire incrementa durante los meses de primavera, verano e invierno, pero disminuye en otoño. Se encuentra que los valores diarios de la humedad alcanzan máximos de 71.5% entre las 05 : 00 y 06 : 00 horas; mientras el mínimo de 29% se alcanza entre las 14 : 00 y 15 : 00 horas. Analizando las figuras 3d y 4b se encuentra que durante los periodos diarios, existe una relación directa entre la densidad del aire y humedad relativa.

#### 3.6. Temperatura

Las variaciones de las temperaturas son más significativas que las variaciones de la densidad del aire o las de humedad relativa. Esas variaciones nos ayudan a describir y entender mejor las fluctuaciones locales de la velocidad del viento. En las figuras 4c y 5a se observa que a inicios de primavera y hasta el final del verano, se tienen los valores más altos de potencial eólico, mientras que en los meses de otoño e invierno, se tienen los valores más bajos, en concordancia con los incrementos de temperatura. Las mismas relaciones se encuentran en una escala diaria. Se destaca que durante los periodos mensuales, los valores de temperatura varían en un rango desde  $-14^{\circ}C$  hasta  $20^{\circ}C$ .

#### 3.7. Intensidad de Turbulencia

El indicador más común para la turbulencia local es la desviación estándar de la velocidad del viento.

TABLA 1  
INTENSIDAD DE TURBULENCIA A 3 M SOBRE EL NIVEL DE SUELO

2010		2011		2012	
Mes	$I_t$	Mes	$I_t$	Mes	$I_t$
Sep	0.71	Ene	0.59	Ene	0.60
Oct	0.59	Feb	0.64		
Nov	0.59	Mar	0.57		
Dic	0.57	Abr	0.58		
		May	0.63		
		Jun	0.66		
		Jul	0.63		
		Ago	0.61		
		Sep	0.61		
		Oct	0.63		
		Nov	0.57		
		Dic	0.58		

Al normalizar este valor en relación al valor medio, se obtiene la intensidad de la turbulencia, como se ve en la ecuación 3.

$$I_t = \frac{\sigma}{\langle v \rangle} \quad (3)$$

Este valor nos permite evaluar el nivel de turbulencia local, y como indicador de niveles bajos, con valores menores a 0.10, niveles moderados de 0.25 y valores altos a mayores que 0.25. La Tabla 1 muestra las intensidades estimadas para la intensidad de la turbulencia para cada mes, mostrando que todos los valores son mayores a 0.5, con una media de 0.62 para el periodo de estudio. Como no existen obstáculos naturales para la altura del anemómetro, la turbulencia está producida por fricción del viento contra el suelo.

### 3.8. Potencial Eólico:

Para estimar el potencial eólico para periodos diarios, mensuales y estacionales, se utilizó la ecuación 4, que considera valores discretos de la velocidad del viento y la densidad del aire.

$$\frac{P}{A} = \frac{C_P}{N} \sum_i^N \frac{1}{2} \rho_i v_i^3 \quad (4)$$

donde  $P(W)$  es la potencia,  $\rho(kg/m^3)$  es la densidad del aire, que no es constante;  $v(m/s)$  es la velocidad horizontal del viento,  $A (m^2)$  es la sección transversal, y  $C_P$  es el coeficiente máximo de potencia (límite de Betz) del aero-generador, cuyo valor es 0.5927 (16/27) (Torrez et al. 2009). La Tabla 2 muestra las variaciones estacionales de la potencia eólica y la energía disponible. En la Tabla 2 se observa que la primavera es el periodo de mayor potencia eólica. En la figura 4 a se observa que se alcanzaron los

valores máximos de  $23.32 kWh/m^2$  y  $22.03 kWh/m^2$  respectivamente en los meses de diciembre de 2010 y noviembre de 2011; mientras que los mínimos de  $8.87 kWh/m^2$  y  $10.12 kWh/m^2$  a los que se llegan en los meses de mayo y junio. Estos resultados concuerdan con el comportamiento estacional descrito en la Tabla 2.

TABLA 2  
POTENCIA EÓLICA ESTACIONAL EN LA REGIÓN DE PATACAMAYA DURANTE EL PERIODO 21/09/2010 A 20/01/2012.

Temporada	P [W/m <sup>2</sup> ]	Tiempo [horas]	Energía [KWh/m <sup>2</sup> ]
Primavera 2010	26.73	1939.41	51.85
Verano 2010	21.21	1789.08	37.96
Otoño 2011	13.88	2020.08	28.04
Invierno 2011	21.48	2057.41	44.2
Año Completo	20.82	7805.98	162.52
Primavera 2011	29.44	2180.41	64.2
Verano 2012	13.44	679.44	9.11
Periodo Completo de Estudio	22.06	10665.83	235.36

### 3.9. Potencia Eólica

En cuanto a la potencia Eólica a escalas diarias en la figura 5b se encuentra que entre las 16 : 00 y 17 : 00 horas, se alcanzan respectivamente valores máximos de  $1.13 kWh/m^2$  y  $1.30 kWh/m^2$ ; mientras que el valor mínimo de  $0.14 kWh/m^2$  se alcanza entre las 05 : 00 y 06 : 00. Estos valores concuerdan con el comportamiento medio diario para la velocidad del viento y la densidad del aire.

## 4. CONCLUSIONES

En este estudio se describen las principales características atmosféricas del altiplano boliviano. Nuestro análisis indica que los valores del potencial eólico son suficientemente altos como para permitir el aprovechamiento del viento como una fuente alternativa (o complementaria) de energía para cubrir la demanda básica de los habitantes del altiplano boliviano (Geerts et al. 2006; García et al. 2007). Utilizando un análisis estadístico estimamos que el potencial eólico en el altiplano central tiene vientos básicamente unidireccionales, con una curva de distribución de curtosis ( $k$ ) 3.1087 y un valor medio de  $3.448 m/s$ ; que nos llevan a concluir que sí es posible utilizarlos como fuente de energía. Además, ocurre que los valores máximos diarios ocurren al atardecer, justo al tiempo del pico de mayor demanda en la red eléctrica. Nuestro estudio es único en el sentido que se basa sobre datos recolectados en campo, a intervalos específicos y cortos, por lo que podría ser importante para verificar futuros modelos y simulaciones. Confiamos que este será un punto de partida para el desarrollo y diversificación de la matriz energética del altiplano, en especial en el altiplano central.

## REFERENCIAS

- Caretto L. (2014), <http://www.csun.edu/~lcaretto/me483/09-windPDF.pdf>  
 Farkas Z. (2014), <http://arxiv.org/pdf/1103.2198v1.pdf>  
 García M., Raes D., Jacobsen S. E. & Michel T. (2007), *Journal of Arid Environments* **71**, 109.  
 Geerts S., Raes D., García M., Del Castillo C. & Buytaert W. (2006), *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 399.

- Shamshad A., Wam Hussim W. M. A., Bawardi, M. A., & Mohd Samusi, S. A. (2014), [http://eprints.usm.my/10959/1/Analysis\\_of\\_Wind\\_Speed\\_Variations\\_and\\_Estimation\\_of\\_Weibull\\_Parameters\\_for\\_Wind\\_Power\\_\(PPK\\_Awam\).pdf](http://eprints.usm.my/10959/1/Analysis_of_Wind_Speed_Variations_and_Estimation_of_Weibull_Parameters_for_Wind_Power_(PPK_Awam).pdf)
- Picard A., Davis R. S., Gläser M. & Fujii K. (2008), *Metrología* **48**, 149.
- Torrez R., Ghezzi F. & Palenque E. (2009), *Revista Boliviana de Física* **15**, 8.

XXVI REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA  
DEL 27 AL 31 DE OCTUBRE DE 2014  
COCHABAMBA–BOLIVIA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

RESUMEN

Se presenta la relación de ponencias de la XXVI Reunión Nacional de Física realizada en Cochabamba entre el 27 y el 31 de Octubre de 2014.

Código(s) PACS: 01.30.Cc — 01.10.Hx

*Descriptor:* Resúmenes de conferencias — Actividades organizacionales de física

• **Título:**

**OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA ESTÁTICO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS**

**Expositor:**

Niels Saavedra Tapia

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

El presente trabajo tiene la finalidad de mostrar la aplicación de un algoritmo genético para optimizar la geometría de un sistema estático de barras conectadas sometidas a esfuerzos de tracción y compresión. La función objetivo a minimizar en este problema es el peso total de la estructura, sujeta a la verificación de estabilidad y a un desplazamiento máximo admisible. Para implementar el algoritmo genético y efectuar el análisis estructural de cada individuo mediante elementos finitos, se realizó un programa escalable orientado a objetos de Matlab. Con esta herramienta pudimos comprobar la eficiencia computacional de éste método y mostrar cualitativamente las etapas de convergencia del algoritmo en cada generación.

• **Título:**

**VEINTE AÑOS DEL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA ATMÓSFERA : LAS LECCIONES APRENDIDAS Y LOS DESAFÍOS FUTUROS**

**Expositor:**

Francesco Zaratti

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se realiza un análisis crítico del surgimiento, crecimiento y desarrollo de un laboratorio de Investigación a lo largo de 20 años de vida. Se enfatizan algunas lecciones aprendidas útiles para otros grupos.

• **Título:**

**MONITORIZADO DE REGIONES ACTIVAS DEL SOL MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES**

**Expositor:**

Luis Carlos Saavedra Rodriguez

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Este trabajo realiza el monitoreo de cambios en el disco solar realizado sobre imágenes obtenidas por el SDO, en los días de las erupciones solares más fuertes registradas entre los años 2011 y 2013 correspondientes al ciclo solar 24.

• **Título:**

**SEGUIDOR SOLAR EN UN EJE POLAR**

**Expositor:**

Oscar Erick Castellón Corrales

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Este sistema de medición compuesto por un logger y varios sensores se encuentra alimentado por la red eléctrica, de modo que cualquier discontinuidad en el suministro de energía genera pérdida de datos, a vista de este problema y a manera de promover más el estudio de los sistemas fotovoltaicos en el departamento de Física, se ha planteado como solución el diseño y fabricación de un sistema fotovoltaico autónomo con seguimiento solar. La implementación del equipo no solo dio autonomía al sistema también permitió demostrar que un sistema con seguimiento es más eficiente que un sistema estático.

---

- **Título:**

**EL EXPERIMENTO AEGIS (ANTIMATTER EXPERIMENT: GRAVITY INTERFEROMETRY, SPECTROSCOPY) EN EL C.E.R.N.**

**Expositor:**

Martin Alfonso Subieta Vasquez

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

El experimento AEGIS tiene como objetivo medir por primera vez la influencia del campo gravitacional terrestre en la antimateria. En la presente conferencia se hablará de los detalles del experimento y la importancia física de esta medición experimental.

---

- **Título:**

**CIENCIA Y SIMETRÍA PRECOLOMBINA EN EL CAMINO REAL (QHAPAQ ÑAN)-VIACHA**

**Expositor:**

Edgar Coronel Canaviri

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

En el camino real (Qhapac ñan) vecino a Viacha (La Paz-Bolivia), existe una colina cónica de granito rodeada por restos de muros masivos de origen precolombino y canales circulares concéntricos en la planicie circundante. Los restos de una gran edificación configuran un gran pentágono alrededor de la colina. El pentágono no es regular pero posee un eje de simetría especular. Este eje se inicia en el centro del lado más largo del pentágono, cruza la cima circular de la colina y continúa hacia un vértice del pentágono donde existen restos de un torreón elevado. La dirección de este eje es hacia el sudeste y apunta a la comunidad de Jalsuri (donde surge) y el siglo XV, estaba alineado con la salida de constelación Cruz del Sur. Actualmente, existe un desplazamiento de alrededor de 3.5 grados respecto del alineamiento original, debido al fenómeno conocido como precesión de los equinoccios. En la planicie circundante subsisten restos de cuatro anillos coaxiales con centro común en el centro de un cimiento circular ubicado en la cima de la colina. Estos canales llenos de agua forman un conjunto de superficies reflectoras. Un análisis detallado de la configuración del pentágono, permite describir un sistema de líneas radiales (ceques) con intersección en los vértices del pentágono, prolongables hacia los anillos concéntricos. Estos constituirán ejes de referencia subsidiarios para realizar la observación de la salida y puesta de los astros. La subdivisión angular del conjunto contiene 36 segmentos de 10 grados,

los cuales pueden subdividirse en grados. Estas subdivisiones permiten identificar la línea equinoccial del sistema, apropiado para observaciones solares y en consecuencia la determinación de solsticios.

---

- **Título:**

**PEQUEÑAS DIFERENCIAS EN OSCILADORES DE RELAJACIÓN INDUCEN CAMBIOS IMPORTANTES EN SU COMPORTAMIENTO SÍNCRONO**

**Expositor:**

Marcelo Ramírez ávila

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se estudia la sincronización y la agregación de dos tipos de osciladores acoplados por pulsos: los de integración y disparo, y los fotocontrolados. Se consideran osciladores globalmente acoplados ya sea por un acoplamiento tipo campo medio o una dependiente de la distancia. Utilizando diferentes medidas estadísticas tales como el transiente, la probabilidad total de sincronización, la fracción de individuos agregados, el tamaño medio de los cúmulos y el número medio de cúmulos, se estudia la agregación y el comportamiento síncrono para poblaciones de osciladores no idénticos y se realiza un análisis comparativo de las similitudes y diferencias en su comportamiento. Se encuentran grandes diferencias en el comportamiento síncrono y de agregación a pesar de que los osciladores difieren ligeramente entre sí.

---

- **Título:**

**DETERMINACIÓN DE PLASTICIDAD DE BENTONITAS DE LA LOCALIDAD DE PUTUNI CONDORACA-LA PAZ**

**Expositor:**

Yoshiko Cristina Panozo Jaldin

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se analizan diversas propiedades de arcillas provenientes de los depósitos de bentonita que se encuentran ubicados al sur del departamento de La Paz, provincia Pacajes, en la localidad de Putuni Condoroca a 80 Km de la ciudad de La Paz, entre la localidades del Coro Coro Topohoco. La principal característica de estas bentonitas es su alta plasticidad, con índice IP entre 320 y 100, y con el límite de Atterberg plástico superior a 200.

---

- **Título:**

**DETERMINANDO SINCRONIZACIÓN EN OSCILADORES ACOPLADOS UTILIZANDO PERIODICIDADES**

**Expositor:**

Roy Omar Edgar Bustos Espinoza  
*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Estudiamos la sincronización de dos osciladores móviles acoplados cuando ellos están acoplados difusivamente. La dinámica de cada oscilador sigue la estructura del mapa logístico debido a su simplicidad y rico comportamiento. Mediante el definido factor de sincronización identificamos fácilmente no solo sincronización completa o anti-sincronización sino también sincronización en fase. Este último fenómeno analizado mediante el factor de sincronización nos permite caracterizar el comportamiento dinámico del sistema dentro del espacio de parámetros encontrando zonas de sincronización utilizando los periodos hallados en el análisis. Finalmente resaltamos algunas posibles aplicaciones de éste tipo de sistemas.

construido un instrumento basado en sensores infrarrojo y un microcontrolador, los resultados acercan a la exactitud de los valores conocidos como gravedad terrestre.

---

- **Título:**

**RESIDUOS COMPLEJOS**

**Expositor:**

Fernando Poma Ajoruro  
*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Las integrales de contorno en el plano complejo se utilizan a menudo para encontrar integrales reales complicadas, mediante la teoría de los residuos. Si una función tiene una singularidad en algún punto o número finitos de ellos, se puede definir el residuo de la función en dicha singularidad, pero el estudio de los residuos llega a ser más amplio de lo pensado, por tanto en el presente trabajo se realiza una técnica sencilla y conveniente para resolver éste problema complejo.

---

- **Título:**

**ANÁLISIS DE PRESENCIA DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN LA PLANTA DE QUINUA EN DIFERENTES POBLACIONES DEL ALTIPLANO**

**Expositor:**

Armando Reynaldo Ticona Bustillos  
*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se obtuvieron datos de presencia de elementos en el crecimiento de plantas de quinua, utilizando un espectrómetro ICP. Los datos consideran diferentes etapas del desarrollo de la planta, incluyendo el análisis del suelo. Estos datos fueron tomados en diez localidades del altiplano boliviano. Se realizan análisis comparativos de estos datos, considerando concentraciones relativas por el elemento entre poblaciones y partes de la planta. A partir de dichas concentraciones relativas, se caracteriza la planta de quinua a partir de los grupos en la tabla periódica.

---

- **Título:**

**MEDIDOR DE TIEMPO Y PERIODO PARA EXPERIMENTOS DE FÍSICA**

**Expositor:**

Pedro P. Miranda Loza  
*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Con la finalidad de precisar las medidas y periodos en los experimentos básicos de física se ha

---

- **Título:**

**APLICACIONES DE SIMULACIONES EN DINAMICA MOLECULAR A SISTEMAS DIPOLARES**

**Expositor:**

Magali Yanina Tapia Cruz  
*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Se desarrolla una breve introducción de lo que son las simulaciones computacionales basadas en la dinámica molecular, se describen y desarrollan los diferentes pasos de la simulación computacional para un sistema conformado por dipolos, variando la temperatura del sistema y aplicando diferentes campos eléctricos externos constantes y paralelos al eje z del sistema de coordenadas. Se muestran las configuraciones desde la inicial, la estabilización de la muestra, la obtención del sistema final estabilizada mediante diferentes ensambles de la Mecánica Estadística; hasta el análisis de las propiedades físicas como el volumen y el ángulo de orientación y propiedades termodinámicas como la entropía.

- **Título:**  
**LOCALIZACIÓN DINÁMICA EN UN CAMPO MAGNÉTICO**

**Expositor:**

Diego Sanjinés

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se investiga el fenómeno de localización dinámica debida a un campo magnético armónico en una red bidimensional conformada por dos cadenas unidimensionales acopladas. Dicho campo magnético induce un campo eléctrico a lo largo de cada cadena, pero las simulaciones numéricas muestran que la condición de localización dinámica de las cadenas desacopladas ya no se cumple cuando las cadenas están acopladas. Se obtiene una ecuación diferencial cuya solución debe conducir a una expresión analítica para la nueva condición de localización que se busca.

- 
- **Título:**  
**APLICACIÓN DEL EFECTO DE QUENCHING DE RADIACIÓN CERENKOV DEL K-40 NATURAL COMO TÉCNICA FOTOMÉTRICA**

**Expositor:**

Edgar Coronel Canaviri

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

El emisor beta K-40 del KCL disuelto en agua, produce fotones caracterizados como radiación Cerenkov. Esta radiación es medible por espectrometría de centelleo líquido. Sustancias que producen color en fase líquida muestran capacidad para atenuar la intensidad de la radiación Cerenkov del K-40. Se ha estudiado el efecto de atenuación producido por una serie de sustancias caracterizadas por su espectro de absorción de luz visible y ultravioleta, excepto sustancias sin color. Los sistemas estudiados siguen la ecuación de Ster-Volmer, evaluando estas constantes, los valores altos indican sistemas con elevada atenuación de radiación como el caso del Rojo Congo, y los valores bajos indican baja atenuación tal es el caso de Violeta Cristal. Existen correlaciones lineales entre las longitudes de onda de absorción de luz visible máxima de los agentes que presentan atenuación y las relaciones del contaje. Sustancias de naturaleza inorgánica y solventes orgánicos sin color no muestran propiedades de atenuación de fotones Cerenkov. Se plantea un procedimiento para determinar Cerenkov mediante fotometría, concentraciones de sustancias sin color en fase líquida y espectros Cerenkov producidos por emisores beta.

- **Título:**  
**LA ANTIGUEDAD DE LA PUERTA DEL SOL**

**Expositor:**

Jose Bernardo Puña

*Universidad Técnica de Oruro*

**Resumen:**

Luego del descubrimiento de los códigos de la Puerta del Sol de Tiwanacu, por medio de la teoría del Cilindro Tiwanacota, basado en la aplicación de los principios astronómicos para el diseño y construcción de un reloj solar cilíndrico ecuatorial, se ha desarrollado un modelo matemático que hace posible el cálculo de la antigüedad de la reliquia. Se espera realizar un valioso aporte desde la Física para resolver uno de los misterios más enigmáticos de la ciencia: conocer la antigüedad de la civilización Tiwanacota.

- 
- **Título:**  
**EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE COBRANTES NATURALES PARA CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS**

**Expositor:**

Bayron Nath Cerda Rojas

*Universidad de Concepción*

**Resumen:**

Una celda solar de tinta sensibilizada está compuesta de un foto electrodo un contra electrodo y un electrolito en medio, formando un sándwich. El foto electrodo consta de una película de dióxido de Titanio aplicada mediante la técnica Doctor Blade sobre un sustrato de vidrio con una película de oxido de estaño dopado con Fluor; luego éste es sintetizado a 450 grados por 30 min. En un horno, finalmente se deposita una película de tinta sumergiendo el sustrato en ella por un día. El contra electrodo está compuesto por una película de platino depositada directamente sobre el sustrato y luego sinterizada a 400 grados y por 20 min. El objetivo del trabajo es desarrollar fotos electrodos con distintos colorantes para aumentar la eficiencia de este tipo de celdas solares. Los colorantes fueron obtenidos de fuentes frescas de maqui, murta negra, espinaca y una mezcla de colorantes de espinacamaqui y espinaca-murta negra. La técnica utilizada para la extracción de los colorantes es la maceración por un día, el solvente a utilizar es el metanol. Los colorantes y los foto electrodos fueron caracterizados utilizando un espectrofotómetro UV-vis para obtener la absorbancia, también se obtuvo la eficiencia, el factor de forma, el voltaje en circuito abierto y la corriente en corto circuito.

---

- **Título:**

**ORIENTACIÓN MOLECULAR DE LÍQUIDOS IÓNICOS DEBIDO A LA INTERACCIÓN DE POTENCIALES**

**Expositor:**

Elba Jhannet Colque Zacarias

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Usando el programa de la Dinámica Molecular DL-POLY, se realizan simulaciones de líquidos iónicos, estudiando el comportamiento de sus densidad, el desplazamiento cuadrático medio, la distribución especial de las moléculas y las orientaciones de las mismas. En un principio se estudia el líquido iónico puro, luego se introducen superficies neutras. Se utilizan dos configuraciones una esfera y un plano. Los resultados muestran los efectos de estos potenciales en todas las características del líquido iónico, presentando resultados equivalentes con respecto a las distribuciones y las orientaciones de las moléculas.

---

- **Título:**

**AMORTIGUACIÓN DE CICLOTRON EN PLASMAS MAGNETIZADAS**

**Expositor:**

Rolando Ayllon Salinas

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se hizo el estudio del amortiguado del campo eléctrico debido a la interacción onda-partícula en un plasma inmerso en un campo magnético externo. Además se ha hecho el análisis de la evolución temporal de la función de distribución.

---

- **Título:**

**REPRESENTACIÓN TÉRMICA Y DE HUMEDAD DE UNA JARDINERA PARA LA CIUDAD DEL POTOSÍ**

**Expositor:**

Ivar Oscar Valda Chavarria

*Universidad Autónoma Tomás Frías*

**Resumen:**

La conservación de la temperatura y la humedad en la tierra de las jardineras ayuda a la buena salud del césped, ahora que factores hacen que esto se mantenga? 1) Clima del lugar 2) Cantidad del agua necesaria 3) Características físicas y de construcción de sus muros de contención 4) Mantenimiento de la construcción de la tierra. Estos factores son el comienzo hacia un césped verde todo el año.

---

- **Título:**

**CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS. METODOLOGÍA REVISITADA UTILIZANDO APROXIMACIONES POLINÓMICAS**

**Expositor:**

Israel Antezana Lopez

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

La necesidad de dotar la energía eléctrica a la totalidad de la población boliviana y las dificultades técnicas que plantea la inclusión de todas las comunidades al Sistema Interconectado Nacional (SIN), han hecho que se vuelque la atención a fuentes energéticas alternativas como la eólica o la solar. Actualmente los sistemas fotovoltaicos en Bolivia son enviados a laboratorios del exterior para su certificación. Dentro de este contexto, la UMSS ha creado el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) como parte del Centro Universitario de Investigaciones de energía (CUIE) en el que se pretende desarrollar las capacidades necesarias para llevar a cabo una adecuada certificación de sistemas fotovoltaicos. Para la presente investigación se ha construido un montaje experimental en base a metodologías conocidas para la obtención de curvas características de corriente y voltaje de paneles de Si monocristalino. A partir de las curvas se han obtenido potencias de salida pico de cada panel, corriente de cortocircuito, corriente de voltajes pico y el voltaje de circuito abierto, así mismo se observó la disminución del potencial pico disminuye a medida que la temperatura de la celda aumenta, por tanto este resultado es similar a lo que predice la literatura.

---

- **Título:**

**AGENT BASED DYNAMICS ABD**

**Expositor:**

Masami Nakagawa

*Colorado School of Mines*

**Resumen:**

In this series of planned presentations, behavior of stakeholders in a community of interest will be understood as a complex phenomenon and Agent-Based modeling will be introduced as a bottom up method. The ABM is an ideal method for a phenomenon such as this for which no master equations can not be written. The presentation will go through basic theory, NetLogo applications, and examples of socio-economic behavior of stakeholders in a community.

- **Título:**

**ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL EN EL VALLE ALTO DEL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA-BOLIVIA**

**Expositor:**

René Moreira Calizaya

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Este trabajo pretende mostrar una metodología simple para la estimación de la distribución de temperaturas superficiales, en días con vientos calmos a suaves y sin nubosidad. Esta metodología parte de datos de temperatura superficial hipotéticos registrados en las estaciones meteorológicas del valle alto del departamento de Cochabamba (Bolivia). El procedimiento se basa en la elaboración de una serie de imágenes de temperatura superficial, que se estimó a partir de imágenes Landsat-8. Inicialmente se obtuvo la temperatura de brillo utilizando la banda 10, luego se estimó la emisividad de la superficie con las bandas 2, 3, 4 y 5, para finalmente estimar la temperatura superficial. Además se realizó un análisis de correlación lineal entre las temperaturas superficiales de las posiciones de cada estación y todo los puntos en el interior de la región de estudio, encontrando regiones donde las estaciones son representativas (correlaciones mayores). Esta representatividad permitió estimar la temperatura en cada pixel de la zona de estudio, tomando como dato de entrada la temperatura superficial en cada estación meteorológica. Como una aplicación operativa del procedimiento se introdujeron datos de temperatura atmosférica (debido a la falta de datos de temperatura superficial) en el procedimiento y se estimó la distribución de temperaturas mínimas mensuales para el periodo de junio a septiembre de 2012, para luego determinar la distribución espacial de amenaza de helada en este periodo.

- **Título:**

**MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ESTUDIO DE LOS ELECTRODOS DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN (EDM)**

**Expositor:**

Alberto Alarcón Paredes

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

El mecanizado mediante descarga eléctrica (EDM) es una técnica conocida desde hace más de 50 años. Este principio utiliza el efecto erosivo proveniente de las descargas eléctricas en

forma de chispa, en el presente trabajo se realizó simulaciones de las diferentes fases y etapas del EDM, también se estudió la influencia de la temperatura y de las propiedades termo-físicas en los materiales de la erosión. El método numérico utilizado es el método de los elementos finitos (MEF) con el paquete COMSOL. Los resultados muestran que la erosión tiene una fuerte dependencia con las propiedades termo-físicas del material independientemente de la función del electrodo.

- **Título:**

**DINÁMICA ROTACIONAL RELATIVISTA**

**Expositor:**

Miguel Luis Peñafiel Ramírez

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se discute la teoría rotacional relativista y los conceptos de cuerpo rígido en relatividad especial, postulando una transformación manifiestamente covariante para la rotación relativista. A partir de dicha transformación, se analiza el cambio en la geometría de un disco rotatorio resolviendo la paradoja de Ehrenfest. Luego, se analiza la dinámica del sistema estudiado hallando expresiones para las fuerzas inerciales con términos de corrección relativista. Finalmente, se determinan las expresiones generales para las fuerzas inerciales relativistas para rotaciones alrededor de todos los ejes espaciales.

- **Título:**

**SEPARACIÓN DE LOS CENTROS DE MASA Y DE CARGA DURANTE LA PROPAGACIÓN LIBRE DE UN PARTÍCULA CARGADA EN UNA RED**

**Expositor:**

Javier Alejandro Velasco Villaroel

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se investiga la propagación libre de un paquete de ondas electrónico en una red de enlace fuerte. Se demuestra que los centros de masa y de carga del paquete se separan mientras el paquete se propaga; dicha separación corresponde al sesgo de una distribución de probabilidad. Como resultado de aplicar el método pseudo-espectral a este problema, se encuentra que dicho sesgo tiene una dependencia temporal cúbica. Se propone que un posible efecto físico debido a la interacción de este paquete (mientras se propaga en una red bidimensional) con un pulso de campo eléctrico externo es la aparición de un momento magnético dipolar

- **Título:**

**PARAMETRIZACIÓN TEMPORAL DE SEÑALES EN LOS DETECTORES DEL OBSERVATORIO PIERRE AUGER**

**Expositor:**

Hugo Marcelo Rivera Bretel

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Con el objetivo de estimar la composición de los rayos cósmicos detectados en el observatorio Pierre Auger, realizamos la parametrización de los cuantiles de las trazas en los WCD. La parametrización está basada en simulaciones numéricas detalladas del desarrollo de los chubascos atmosféricos externos y de la respuesta de los detectores. El modelo de tiempos resultante describe los observables de la traza con bastante precisión y podría ser utilizado para estudiar la composición evento por evento.

XXVII REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA  
DEL 3 AL 7 DE NOVIEMBRE DE 2015  
SUCRE–BOLIVIA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

RESUMEN

Se presenta la relación de ponencias de la XXVII Reunión Nacional de Física realizada en Sucre entre el 3 y el 7 de Noviembre de 2015.

Código(s) PACS: 01.30.Cc — 01.10.Hx

*Descriptores:* Resúmenes de conferencias — Actividades organizacionales de física

• **Título:**

**DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD EN COCHABAMBA UTILIZANDO MEDIAS PONDERADAS DE 4 DISTINTOS MÉTODOS**

**Expositor:**

Agustin Jaime Quispe Quispe

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Se determina el valor de la gravedad en la ciudad de Cochabamba, se utilizan diferentes métodos experimentales y el concepto de la media ponderada para obtener el valor de la gravedad el cual se aproxima con el valor obtenido por British Geological Survey.

• **Título:**

**ECLIPSES DE LUNA, UNA OPORTUNIDAD PARA MARAVILLARNOS CON EL UNIVERSO**

**Expositor:**

Marcelo Marin Rivero Richard Quispe Molina  
Tania Aguilar

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Se realizó una proyección de videos de tres eclipses de luna y el fenómeno denominado Luna Azul.

• **Título:**

**SOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE MONTE CARLO DE LA ECUACIÓN DE LAPLACE Y DIFUSIÓN CON CONDICIONES DE CONTORNO ABIERTAS**

**Expositor:**

Franz Suxo Mamani

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se resuelve dos ecuaciones diferenciales parciales importantes en la física como ser: La ecuación de Laplace y la difusión por el método de Monte Carlo, en ambos casos con condiciones de contorno abiertas. Lo importante de este trabajo reside en la posibilidad de abordar este tipo de condición de contorno mediante caminos aleatorios (Random Walk). En el caso de la ecuación de Laplace se realizó una aproximación imponiendo un contorno artificial, en cambio en la ecuación de Difusión no es necesaria ninguna aproximación.

• **Título:**

**SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE UN SISTEMA DIPOLAR MEDIANTE EL MÉTODO DE DINÁMICA MOLECULAR**

**Expositor:**

Magali Yanina Tapia Cruz

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Se tiene un sistema compuesto por dipolos, el sistema se encuentra inicialmente neutro. Se realizan las simulaciones desde su estado inicial como un solido cristalino incrementando la temperatura hasta sobrepasar su punto de fusión y dar lugar a una transición de fase, en este estado se observan los cambios de estructura, las orientaciones de los dipolos, las variaciones de volumen y entropía por efecto del proceso de fusión. Se aplica al sistema una fuerza externa y se observan nuevamente los cambios que sufren las propiedades físicas y termodinámicas del sistema.

---

- **Título:**

**ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE CRECIMIENTO DE UNA BACTERIA HALÓFILA POR LOS MÉTODOS DE ESPECTROSCOPIA POR IMPEDANCIAS Y TURBIDIMETRÍA**

**Expositor:**

Alejandra Ayllin Vargas Gómez

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se realizó el estudio de la cinética de crecimiento de la bacteria halófila encontrada en Bolivia (Laguna Colorada), midiendo la admitancia del sistema y su densidad óptica. Se dividió la curva de crecimiento en dos partes, en la primera parte se observó un comportamiento exponencial para ambos métodos, cada uno caracterizado por un exponente diferente, en la segunda parte se observa un incremento lineal en las medidas de la densidad óptica y valores casi constantes de admitancia. Debido a estos resultados, relacionamos la cantidad de bacterias (P) medidas con la admitancia y la cantidad de biopolímero (B), medidas con la densidad óptica, obteniendo un factor de relación F entre ambas medidas. Los resultados de la medición nos dan una estimación de la relación entre el número de bacterias en el medio y la cantidad de biopolímero generado por las mismas en sus distintas fases.

inox se obtuvo una corriente de  $8.98\mu\text{A}$  y el aluminio  $30.83\mu\text{A}$ ; sin embargo la producción de polihidroxibutirato es mayor en el inox con 44.4% que en el aluminio con 28.0%. Estudios científicos adicionales están siendo desarrollados en nuestros laboratorios para optimizar el bioproceso, considerando un incremento en el área de los electrodos y membrana protónica.

---

- **Título:**

**ENTROPÍA DE UN SISTEMA DE ESFERAS CARGADAS CONFINADAS**

**Expositor:** Franz Suño Mamani

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Datos experimentales de un sistema de esferas cargadas confinadas, primeramente se realizó un análisis de Voronoi obteniendo diagramas para varias configuraciones y finalmente se obtuvo la entropía de Shannon en base a los diagramas obtenidos con el fin de observar la dinámica de un sistema.

---

- **Título:**

**GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD PRODUCIDA POR EL CRECIMIENTO CELULAR DE LA BACTERIA H. BOLIVIENSIS EN PILAS COMBUSTIBLES MICROBIANAS**

**Expositor:**

Milka Monica Torrico Troche    Ivan Ruiz Ucumari

*Universidad Mayor de San Simón*

**Resumen:**

Las celdas combustibles microbianas se usan en plantas piloto de generación de energía eléctrica en países como Japón. En estas celdas el microorganismo se encuentra en el ánodo y el oxígeno puede ser empleado como el agente oxidante en el cátodo. En nuestros estudios de investigación, se usó la bacteria h. bolivien-sis, que además de generar electricidad produce polihidroxibutirato PHB, como fuente de electrones en el ánodo para optimizar el proceso de generación de bioelectricidad, se usaron diferentes materiales en el ánodo: acero inoxidable 304, aluminio 6061 y grafito. Para el grafito que tiene alta resistividad los valores generados son los más bajos ( $2.08\mu\text{A}$ ), para el

---

- **Título:**

**CURVATURA DE LA LUZ MEDIANTE LA VARIACIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN**

**Expositor:**

Gerardo Francisco Meyer Forgues    Indira Ocampo Carlos Pizarroso

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

El objetivo es obtener un material sólido y transparente capaz de curvar un haz de luz que incida y lo atraviese. Se crea un gradiente de concentraciones que se formó a partir de una solución heterogénea de agua y azúcar, la solución presentó problemas por ser líquida y orgánica. Para obtener el gradiente de concentraciones se realizaron varias pruebas con distintos materiales hasta que se encontró que la resina de vidrio líquido con su catalizador y thinner podían ser mezclados y mantener su transparencia, para la obtención de gradiente se realizó una variación de concentración de resina, catalizador y thinner entre varias capas, se toma en cuenta que la primera capa estaba completamente compuesta por resina y catalizador, la última capa contenía thinner en mayor cantidad que el vidrio líquido. Finalmente se caracterizó la resina generada y luego se pudo describir la trayectoria de la luz a través del material.

• **Título:**  
**EFECTO DE POTENCIALES EN LÍQUIDOS IÓNICOS**

**Expositor:**

Elba Jhannet Colque Zacarias

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Usando el programa DLPOLY, se simula el comportamiento de un líquido iónico, estudiando el comportamiento de su densidad, el desplazamiento cuadrático medio, la distribución espacial de las moléculas y las orientaciones de las mismas. Se introduce placas con cargas neutras y se analiza el efecto de dichas placas en el líquido iónico, mediante su distribución espacial y la orientación de las moléculas.

han encontrado los relojes solares de piedra, denominados Los relojes de Evo, valiosas piezas de arte lítico que hasta ahora tenían una equivocada interpretación en su origen y función.

• **Título:**  
**ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE UNA SUSTANCIA DE RÁPIDA COAGULACIÓN**

**Expositor:**

Juliana Mara Carrasco Mejia Indira Ocampo Sergio Yañez

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se realiza el estudio de la resistividad durante el enfriamiento de una sustancia de rápida coagulación mediante el uso de un dispositivo de cuatro puntas de Wenner.

• **Título:**

**INTERACCIÓN Y POSTERIOR FUSIÓN DE SOLITONES EN FIBRAS ÓPTICAS DE DISPERSIÓN NORMAL MODELADOS CON LA ECUACIÓN CÚBICA-QUÍNTICA Y COMPLEJA DE GINZBURG-LANDAU**

**Expositor:**

D. Urzagasti

*Universidad Mayor de San Andrés*

**Resumen:**

Se estudia la interacción y fusión de solitones ópticos en láseres de fibras de dispersión normal dentro del marco de la ecuación de Ginzburg-Landau compleja cúbica-quíntica (CGL). Se empieza con la búsqueda de soluciones analíticas homogéneas de esta ecuación, que se utilizan después en simulaciones numéricas para construir frentes interactuantes que conducen a la formación de solitones estables. A continuación, se estudia numéricamente la interacción y la fusión de estos solitones y se caracteriza este proceso mediante momentos tales como la energía y el momento lineal a lo largo de la fibra. Se ha encontrado que el proceso de fusión se produce sólo para valores suficientemente pequeños de la distancia inicial (que depende de la diferencia de fase) entre solitones, de lo contrario, éstos se repelen entre sí de forma monótona. La estructura de la fusión muestra un doble pico de fulguración energética y (dependiendo de la diferencia de fase) una ganancia y/o pérdida de momentum. Finalmente, se propone una representación analítica para los solitones, que se utiliza para construir una adecuada representación analítica de la ley de interacción para valores suficientemente grandes de la distancia entre solitones antes de su fusión.

• **Título:**  
**LA GNOMONICA TIWANACOTA DESCUBRIMIENTO DEL NOVENO RELOJ SOLAR "LOS RELOJES DE EVO"**

**Expositor:**

Jose Bernardo Puña Velasco

*Universidad Técnica de Oruro*

**Resumen:**

Mediante la gnómonica se diseña y construyen relojes solares, ha servido para descubrir el sistema cronológico empleado por la cultura Tiwanacota. Por medio de éste descubrimiento se

## MATERIAL EDUCATIVO PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA CULTURA NUCLEAR EN BOLIVIA

### EDUCATIONAL MATERIAL TO ENHANCE NUCLEAR AWARENESS IN BOLIVIA

BUSTOS ESPINOZA R. O. E, POMA MAMANI I, & RAMÍREZ ÁVILA G. 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

Con el objetivo de fortalecer la cultura nuclear en Bolivia, el año 2008 se elaboró un texto para el último año de educación secundaria donde se introdujeron tópicos “nuevos” al currículum oficial, como ser “estructura nuclear”. Siendo éste el primer material con el que se contó, se lo intentó introducir como texto oficial en el sistema educativo boliviano; sin embargo, debido a la falta de formación de la mayoría de los profesores de física de colegio, ese intento no prosperó. Debido a eso se tomaron otras iniciativas, tales como la apertura de una página wikifísica y la inserción del módulo: “Introducción a la Física Nuclear” en el Diplomado en Física para Profesores de Colegio (DFIS), ambos proyectos desarrollados en la Carrera de Física, UMSA. La página wikifísica Nuclear es visitada frecuentemente y se la actualiza con regularidad a fin de optimizarla. En cuanto al DFIS, la interacción docenteestudiante (profesionales de Física, UMSA profesores del nivel secundario) se realiza a través de encuentros virtuales utilizando la plataforma de educación a distancia, *moodle*, y encuentros presenciales donde se realizan experimentos, exposiciones, evaluaciones y una monografía. El DFIS espera cubrir el vacío de cultura nuclear de los educadores de secundaria bolivianos y de esa manera capacitarlos para que puedan transmitir a sus estudiantes conocimientos de Física Nuclear. Otra actividad importante en relación al fomento de la cultura nuclear, es la realización de la Olimpiada Boliviana de Física (OBF) y la Olimpiada Boliviana de Astronomía y Astrofísica (OBAA) donde se incluyen tópicos relacionados con la física nuclear desde 1997 y 2006 respectivamente. Asimismo deseamos incluir el dictado de charlas técnicas y divulgativas sobre Física Nuclear a modo de coadyuvar en el objetivo de aumentar la cultura nuclear en Bolivia.

Código(s) PACS: 01.40.ek, 20

*Descriptor:* Educación, nivel secundario — Física nuclear.

#### ABSTRACT

In order to strengthen the nuclear culture in Bolivia, we prepared in 2008 a book to be used at the ending year of high school, where new topics were introduced, especially those concerned to modern physics, such as nucleostatics and nucleodynamics. We tried to include this book as the official contents to be taught in the Bolivian high schools; however, due to the lack of training of most teachers in physics, this attempt was unsuccessful. On the other hand, we carried out other initiatives, such as the opening of a wikifísica in the server of the Department of Physics of our University (UMSA), and the inclusion of the module “Introduction to Nuclear Physics” in the refresher course given to teachers in physics once a year. The number of visits of the Nuclear wikifísica page is increasing and we frequently update the contents of this website in order to improve it. The above mentioned refresher course, called DFIS is an outreach project, where physicists train high school teachers in physics that in the near future will teach these new topics to high school students. The development of DFIS is done using new information technologies that allow distance learning, and the virtual interaction between the trainers and students via a moodle platform. At the end of DFIS, the high-school teachers carry out experiments, prepare a monograph and pass a final test in order to obtain the grade. These activities pretend to enhance the knowledge on nuclear physics of high school students through the improvement of the level of high school teachers in physics. Another important activity, related with the enhancement of nuclear culture, are the Bolivian Olympiad on Physics and the Bolivian Olympiad on Astronomy and Astrophysics, both for high school students where it were included topics about nuclear

physics since 1997 and 2006 respectively. Finally, some other activities are in progress, such as informative talks and popularization publications on nuclear physics.

*Subject headings:* Education, secondary school — Nuclear physics.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la gestión de 1997 un grupo de docentes de la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) en La Paz, Bolivia, decidieron llevar a cabo competencias académicas para estudiantes de colegio en el área de la física. Poco tiempo después, esa misma gestión, la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y la Carrera de Física, UMSA, recibieron una invitación para participar en la II Olimpiada Iberoamericana de Física (OIbF) que se llevó a cabo en México (la I OIbF se llevó a cabo en Colombia en el año 1991 donde Bolivia no pudo participar), pero en el año 1997 las competencias académicas para estudiantes de colegio pasaron a conocerse como la Olimpiada Boliviana de Física (OBF), de donde se seleccionan anualmente las delegaciones bolivianas que participan en las OIbF.

En la gestión 2006 y de manera adelantada el Comité Olímpico de la OBF, creó el proyecto: Olimpiada Boliviana de Astronomía y Astrofísica (OBAA), antes de la realización de la 1ra Olimpiada Internacional de Astronomía y Astrofísica (IOAA: International Olympiad on Astronomy and Astrophysics) que se llevó a cabo en Tailandia en la gestión 2007.

En las olimpiadas bolivianas: OBF - OBAA, como es natural en una olimpiada por definición fundamental, se introdujeron tópicos no tradicionales, dando énfasis no solo a los contenidos mínimos de la curricula en Bolivia sino abordando tópicos nuevos como por ejemplo conceptos básicos de física nuclear, entre otros.

En la misma gestión, la empresa SANTILLANA de EDICIONES S. A. nos contactó para que escribamos textos de Física para los últimos 3 años de colegio en Bolivia. Se aceptó el reto y los textos salieron publicados y puestos a disposición del público estudiantil nacional en la gestión 2008 (Bustos 2008b,c,d). Los textos fueron planificados de un modo novedoso para no solo enseñar la física del siglo XVII, sino poder introducir, en los colegios y en consecuencia en l@s estudiantes, tópicos contemporáneos de la física del siglo XX.

Durante los primeros años de la OBF y la OBAA se pudo evidenciar un rendimiento no muy óptimo en l@s estudiantes participantes, el comité olímpico de ambos eventos, en conjunto con la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y la carrera de Física, UMSA, decidieron ofrecer a l@s profesor@s de todos los colegios del país un curso de actualización docente el cual se llevó a cabo con éxito durante dos semanas en la gestión 2006. Ahí nació la idea de llevar adelante el primer DIPLOMADO EN FÍSICA PARA PROFESORES DE COLEGIO (DFIS) para dar la oportunidad de actualizar y/o introducir nuevos conocimientos en l@s maestr@s normalistas (profe-

sor@s de colegio) para que como efecto multiplicador ell@s transmitan esos conocimientos a sus estudiantes y logremos incrementar el rendimiento en general. Para que el DFIS tenga más alcance se decidió utilizar la tecnología de comunicaciones InterNet y poder llegar así no solo a las zonas urbanas sino también rurales de todo el territorio nacional (Bustos 2008a).

El 5to DFIS se llevó a cabo durante el primer semestre de la gestión 2015, donde se dictaron nuevos módulos, como por ejemplo: INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR.

Como una nueva actividad pero ligada a las dos anteriores, se desarrolló material digital bajo la tecnología WIKI dando énfasis al tema denominado: Nucleoestática Nucleodinámica. Dicho material ha sido enriquecido con animaciones/simulaciones computacionales, exámenes den línea, etc. para que l@s usuarios puedan medir sus conocimientos en el campo de la Física en general y de los conceptos básicos de la Física Nuclear en particular (WIKIFISICA: Estructura Nuclear 2013).

## 2. LA OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA, ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Los proyectos Olimpiada Boliviana de Física (OBF) y Olimpiada Boliviana de Astronomía y Astrofísica (OBAA) nacen de la necesidad de dar una urgente respuesta al desafío sobre ¿cómo incentivar a la juventud Boliviana al estudio de la Física, la Astronomía y la Astrofísica?, para de esta manera generar mayores capacidades científicas y tecnológicas como aporte al desarrollo tanto cultural como económico y social del país.

Ambas olimpiadas se llevan a cabo anualmente buscando motivar a la juventud Boliviana al estudio de las ciencias físicas desde los últimos 7 años de colegio. En el sistema educativo de Bolivia se contempla 12 años de estudios divididos en 2 partes: 6 años de primaria y 6 años de secundaria. Las edades de ingreso al primer año de primaria oscilan entre los 5 y 6 años según la región, el tipo de unidad educativa, etc. Existen 3 tipos de unidades educativas: particulares o privados, de convenio y fiscales o del estado. Un estudiante de 6 de Primaria tiene entre 10 a 11 años de edad, es decir, los bachilleres en Bolivia tienen una edad entre 17 y 18 años en promedio general.

En la OBF y la OBAA se invita a que participen 7 categorías, es decir el último año de primaria (1) y toda secundaria (6). L@s jóvenes participantes tienen entre los 10 a 17 y/o 11 a 18 años de edad.

### 2.1. *La Olimpiada Boliviana de Física, Astronomía y Astrofísica y las Olimpiadas Internacionales organizadas en Bolivia.*

En el transcurso de las distintas gestiones, el comité olímpico de las OBF OBAA han organizado los siguientes eventos internacionales en el país:

- VI Olimpiada Iberoamericana de Física (VI OIBF), Sorata, La Paz, Bolivia, (2001) (SOBOFI 2001)
- 1ra Olimpiada Andina de Astronomía y Astrofísica (1ra OAAA <sup>1</sup>), Lago Titikaka, La Paz, Bolivia, (2009) (Bustos 2009)
- V Olimpiada Latinoamericana de Astronomía y Astronáutica (V OLAA), Cochabamba, Bolivia, (2013)
- XX OIBF, Cochabamba, Bolivia, (2015)

La 1ra OAAA <sup>1</sup> se llevó a cabo en Junio de 2009, posteriormente Brasil creó la 1ra Olimpiada Latinoamericana de Astronomía y Astronáutica (OLAA) en Octubre de ese mismo año. Bolivia participa continuamente en la OLAA y ya no impulsó la OAAA para no difuminar esfuerzos en la región.

Mediante la organización de los mencionados eventos se ha motivado al estudio, en las distintas generaciones de estudiantes Bolivian@s, a la profundización de conocimientos en el campo de la física y la astronomía.

## 2.2. La Olimpiada Boliviana de Física, Astronomía y Astrofísica y la Física Nuclear.

Se ha realizando un análisis de contenidos en cada una de las 7 categorías de la OBF OBAA, donde se resaltan los temas referentes a la física nuclear. Como se puede apreciar, se puede ver la estrecha relación existente entre el contenido mínimo de las olimpiadas y los temas que son la base para el comienzo del estudio de Física Nuclear.

## 2.3. La Olimpiada Científica Estudiantil Plurinacional Boliviana (OCEPB)

La OCEPB es un proyecto impulsado por el actual gobierno desde la gestión 2011. Se incentiva al estudio, a la juventud Boliviana, de las siguientes áreas de las ciencias puras, naturales y tecnológicas: Astronomía y Astrofísica, Biología, Física, Geografía, Informática, Matemática, Química y Robótica. Las olimpiadas OBF - OBAA se han acoplado a la OCEPB y los comités olímpicos de Física, Astronomía y Astrofísica se han vuelto específicamente en comités académicos de Física, Astronomía y Astrofísica, siendo sus principales actividades:

- Proponer/Actualizar los contenidos mínimos en cada una de las 7 categorías<sup>1</sup>

<sup>1</sup> La 1ra OAAA se llevó a cabo en Junio de 2009, posteriormente Brasil creó la 1ra Olimpiada Latinoamericana de Astronomía y Astronáutica (OLAA) en Octubre de ese mismo año. Bolivia participa continuamente en la OLAA y ya no impulsó la OAAA para no difuminar esfuerzos en la región.

- Elaborar las pruebas (simultáneas a nivel nacional) y las metodologías de calificación.
- Seleccionar a los mejores estudiantes a nivel distrital, departamental y nacional.
- Realizar el entrenamiento de los equipos postulantes a eventos internacionales, con actividades como:
  - El DFIS (ver más adelante)
  - Exámenes en línea automatizados, tal que los usuarios pueden ver su nota inmediatamente haya acabado la prueba.
  - Entrenamientos concentrados en Universidades.
- Coordinar con el Ministerio de Educación, el Magisterio, etc. todo lo referente a temas educativos en el país, que se pueden resolver unificando esfuerzos.

## 3. DIPLOMADO EN FÍSICA PARA PROFESORES DE COLEGIO (DFIS)

El DFIS tiene como objetivo final el de otorgar al graduado las condiciones para desarrollar estudios que demuestren el dominio de los instrumentos conceptuales y metodológicos esenciales en su área, calificándolo como profesor y docente habilitado del nivel de Unidades Educativas en la rama de las ciencias puras y naturales, especializado en física con mención en los módulos aprobados.

El DFIS cuenta con una duración de 800 horas académicas de duración, según está estipulado en normas universitarias, de las cuales 80% son actividades virtuales y 20% actividades presenciales.

El DFIS en todas sus versiones contó con el respaldo institucional de la UMSA. El título otorgado es el de DIPLOMADO EN FÍSICA haciendo énfasis en el nombre de los módulos vencidos en el mismo. De igual modo el DFIS se amplía para que los mejores estudiantes de colegio, en el área de Física, Astronomía y Astrofísica ganadores de la OBF y de la OBAA puedan cursar los módulos como un mecanismo de entrenamiento para optimizar su aprendizaje en futuras competencias internacionales <sup>2</sup>.

En el 5to DFIS se dictaron 13 módulos (de los cuales el diplomante debió aprobar solo 4 a excepción de los estudiantes olímpicos que debían aprobar 12): MECÁNICA - MECÁNICA DE LOS FLUIDOS - ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO - TEORÍA DE ERRORES Y EXPERIMENTOS - ONDAS MECÁNICAS RELATIVIDAD FÍSICA CUÁNTICA TERMODINÁMICA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA CAMBIO CLIMÁTICO DIDÁCTICA DE LA FÍSICA

<sup>2</sup> Los estudiantes de las olimpiadas que cursan el DFIS no reciben ningún título universitario ni certificado. Los docentes los evalúan como si fueran alumnos oficiales del módulo respectivo y su nota lo habilita para que sea parte de la selección boliviana respectiva.

## INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DE PARTÍCULAS.

Los dos últimos módulos han sido introducidos en el 5to DFIS, con una aceptable participación de profesores de colegio y estudiantes ganadores de las olimpiadas: OBF - OBAA.

El módulo titulado INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR ha cubierto el siguiente contenido mínimo (Poma 2015):

### CAPITULO I:

#### DEFINICIONES NUCLEARES BÁSICOS:

Introducción. El átomo. El núcleo. Nomenclatura. Propiedades nucleares independientes del tiempo: tamaño, masa, carga, spin nuclear. Propiedades nucleares dependientes del tiempo: desintegraciones y reacciones nucleares. Problemas.

### CAPITULO II:

**ESTRUCTURA NUCLEAR:** Introducción. Energía de enlace nuclear. Modelo de la gota líquida.- Fórmula semiempírica de masa. Parábolas de masa. Números mágicos. Modelo de capas. Niveles de energía de los núcleos. Problemas.

### CAPITULO III:

#### INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA:

**MATERIA:** Introducción. Radiaciones de origen nuclear. Interacción de partículas cargadas con la materia. Interacción de neutrones con la materia. Interacción de la radiación gamma con la materia. Detección de las Radiaciones nucleares. Problemas.

### CAPITULO IV:

#### DESINTEGRACIÓN RADIATIVA:

Introducción. Desintegración radiactiva de núcleos inestables.- Series radiactivas naturales. Vida media. Producción de núcleos radiactivos por bombardeo. Producción de núcleos radiactivos por decaimiento. Desintegraciones: Alfa, Beta y Gamma. Problemas.

### CAPITULO V:

**REACCIONES NUCLEARES:** Introducción. Aplicaciones de las leyes de conservación. Tipos de reacciones nucleares. Reacciones por núcleo compuesto. Reacciones directas. Sección eficaz. Fisión y Fusión. Problemas.

### CAPITULO VI:

**APLICACIONES NUCLEARES:** Introducción. Aplicaciones en la industria. Aplicaciones en la agricultura. Ciclotrón. Reactor nuclear.



FIG. 1.— Estadísticas generales del módulo: INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR, 5to DFIS.



FIG. 2.— Estadísticas generales del módulo: INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR, 5to DFIS Estudiantes de Olimpiadas.

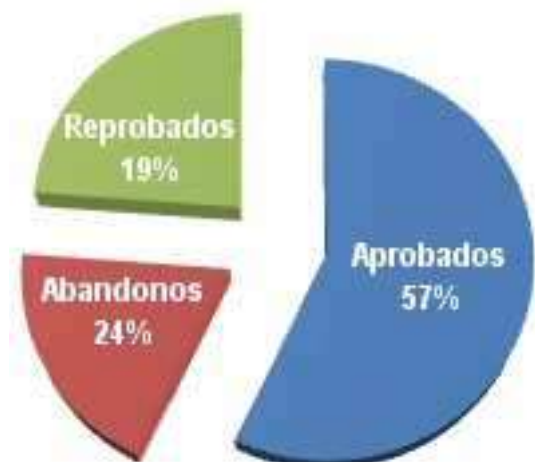


FIG. 3.— Estadísticas generales del 5to DFIS.

Lo más valioso de los módulos del DFIS es que reflejan las muchas gestiones de experiencia que tienen cada uno de los docentes de la carrera de Física en su módulo específico, es decir, se ha desarrollado en material original en ese sentido, además, todos los módulos han sido enriquecidos con animaciones/simulaciones computacionales, exámenes en línea, etc. El módulo sobre INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR ha tenido una buena demanda convirtiéndose en una de las principales novedades del 5to DFIS.

### 3.1. Resultados Estadísticos del 5to DFIS

A continuación se presentan algunos gráficos porcentuales del 5to DFIS. En la Figura 1. se muestran las Estadísticas generales, en la Figura 2. las Estadísticas generales del módulo titulado: INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR para los profesores y en la Figura 3. Las estadísticas generales del mismo módulo pero para los estudiantes de las olimpiadas: OBF y OBAA

#### 4. PAGINA WIKI SOBRE LA INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR

La página WIKIFISICA se desarrolló en la gestión 2013 con el objetivo de ofrecer al público un sitio WEB donde se ofrezcan los conceptos básicos de la estática y la dinámica del núcleo no solo de una manera fría (solo texto) sino que se enriquezca, con gráficos explicativos, animaciones/simulaciones computacionales, exámenes en línea, etc, que permita una interacción más eficaz entre el usuario y el sis-

tema computacional.

El sistema está siendo constantemente enriquecido y también se ha puesto a consideración de la Red Latinoamericana para la Educación y la Capacitación en Tecnología Nuclear (LANENT) y ha sido presentado en el Organismo Internacional de Energía Atómico (OIEA) en reuniones de la red LANENT.

Los exámenes en línea permiten al usuario saber su rendimiento inmediatamente se haya concluido sus respuestas en línea (WIKIFISICA: Estructura Nuclear 2013).

## 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los proyectos presentados son material educativo dentro de las distintas actividades que la Carrera de Física, UMSA ha estado realizando para contribuir al desarrollo del país no solo científico y tecnológico sino cultural, económico y social.

Se espera que en un futuro próximo, la experiencia acumulada pueda servir de base para nuevos proyectos educativos que se preocupen fundamentalmente por el aumento de conocimiento en las nuevas generaciones, para que en un futuro próximo, gente joven pueda estar motivada para tener estudios y/o especializaciones en física nuclear y sus aplicaciones. Lo anterior será de gran importancia en el país que requiere ampliar el uso de tecnologías nucleares en el afán de garantizar una de las premisas del Estado boliviano que es “el vivir bien” siempre atendidos al lema del OIEA: “átomos para la paz”.

## REFERENCIAS

- Bustos Espinoza R. (2008)a, *Revista Boliviana de Física* **14**, 150.  
 —. (2008)b, *FÍSICA 2* (SANTILLANA DE EDICIONES S. A., La Paz, Bolivia).  
 —. (2008)c, *FÍSICA 3* (SANTILLANA DE EDICIONES S. A., La Paz, Bolivia).  
 —. (2008)d, *FÍSICA 4* (SANTILLANA DE EDICIONES S. A., La Paz, Bolivia).  
 —. (2009), *Revista Boliviana de Física* **15**, 67.
- WIKIFISICA: Estructura Nuclear (2013), [http://fiumsa.edu.bo/olimpiada/fisicaenlinea/doku.php?id=contenido:fisica\\_nuclear:estructura\\_nuclear](http://fiumsa.edu.bo/olimpiada/fisicaenlinea/doku.php?id=contenido:fisica_nuclear:estructura_nuclear)  
 Poma I. (2015), *5to DIPLOMADO EN FÍSICA PARA PROFESORES DE COLEGIO (5to DFIS): Introducción a la Física Nuclear*  
<http://www.fiumsa.edu.bo/dfis/>  
 SOBÓFI (2001), *Revista Boliviana de Física* **7**, 179.

TABLA 1  
TEMAS REFERENTES A LA FÍSICA NUCLEAR EN LA OBF - OBAA

CURSO	OBAA	OBF
6°P	<p><u>El Sistema Solar</u>: Teoría Geocéntrica (Ptolomeo). Teoría Helio-céntrica (Copérnico). <u>Tierra Luna</u>: Forma, alteraciones en la superficie. Distancias Tierra Sol, Tierra Luna. Tamaño, Masa. Volumen y Densidad de la Tierra y de la Luna. Origen, estructura interna. Superficies. Atmósfera. Puntos cardinales. Fases de la Luna.</p>	<p><u>Materia</u>: Estados: sólido, líquido, gaseoso y plasmático. <u>Propiedades</u>: volumen, masa, peso. Densidad, punto de ebullición y punto de congelamiento. <u>Constitución</u>: Átomos y Moléculas. <u>Tipos de Partículas</u>: protón, electrón, neutrón. <u>Energía</u>: Renovables y No Renovables: eólica, geotérmica, hidráulica, solar, etc. carbón, centrales nucleares, energía atómica, etc.</p>
1° S	<p><u>El Sistema Solar</u>: ¿Es el Sol una estrella? Sistema Tierra Sol, Tierra Luna. Fenómenos: Mareas, Estaciones, Eclipses. <u>Tiempo</u>: Día Solar Medio. <u>Planetas</u> Visibles a simple vista. <u>El Sistema Solar</u> Planetas. Planetas Enanos. Orden. Características. Orbitas. Cometas. Satélites Naturales. Asteroides. <u>Fenómenos</u> Auroras Boreales, Meteoroides, Meteoro y Meteorito. Lluvia de Meteoros.</p>	<p><u>Materia</u> Clasificación: <u>Tabla Periódica</u>. <u>Características</u>: nombre, símbolo, número atómico, masa atómica, estado. Volumen de algunos cuerpos. <u>Sistemas MKS y CGS</u>. <u>Conversiones</u>. <u>Potencias de diez</u>. <u>Cifras Significativas</u>. <u>Ondas de Sonido</u> Eco. Velocidad del sonido. <u>Energía</u>: Mecanismos de Transferencia de Energía: Ondas Mecánicas.</p>
2° S	<p>Características Físicas: Masa, Volumen, Densidad. Temperaturas. Distancias. <u>Viajes Interplanetarios</u>: Velocidad y Tiempo de Viaje. <u>Medidas Astronómicas</u>: año luz, pársec, unidad astronómica. <u>El Sol Estructura Solar</u>: Ciclo Solar. Rotación Solar. <u>Radiación</u>. <u>Relaciones Sol Tierra</u>, Campos Magnéticos. <u>Viento Solar</u>.</p>	<p><u>Fundamentos</u> El Método Científico. <u>Mediciones</u> Volumen. Masa. Longitud. Tiempo. Peso. Temperatura. Densidad. <u>Carga eléctrica Positiva, Negativa y Neutra</u>. <u>Electricidad estática y dinámica</u>. <u>Movimiento</u> Causas. Clasificación. Desplazamiento. Tiempo. Velocidad constante.</p>
3°S	<p><u>Esfera Celeste</u>: Cenit, Nadir, Horizonte, Polos, Ecuador, Paralelos, Meridianos. Coordenadas Geográficas y Astronómicas: Latitud, Longitud. Sistema Horizontal, Ecuatorial Celeste, Ecuatorial Local. Solsticios y Equinoccios. <u>Estrellas</u>: Observación. Mapas Estelares básicos. Medición de distancias estelares. Magnitud estelar aparente y absoluta, módulo de distancia, Ley de Pogson.</p>	<p><u>Notación</u> Científica. Prefijos. <u>Errores</u> Tipos. <u>Clasificación</u>. <u>Error relativo y porcentual</u>. <u>Redondeo</u>. <u>Representación de un resultado de una sola medición</u>. <u>Cinemática 1D</u>. <u>Vectores y Escalares</u>. <u>Definición, Suma y Resta gráfica</u>. <u>Cinemática 2D</u> <u>Gráficos en 2D</u>: <math>v</math>, <math>t</math>, <math>x</math>, <math>t</math>, en general <math>x</math> y <math>t</math>.</p>
4° S	<p><u>Estrellas</u>: Medición de la Distancia a las estrellas. Mapas Estelares y Catálogos. <u>Galaxias</u>: La Vía Láctea. Estructura. Composición, Rotación y Dimensiones. <u>Óptica</u> Leyes de Reflexión y refracción. <u>Óptica Geométrica</u>. Lentes. Espejos Planos y Esféricos. Formación de Imágenes. <u>Instrumentos astronómicos</u>: Telescopios. Binoculares, Cámaras, etc. Aumento. Poder de resolución.</p>	<p><u>Análisis de Datos</u> Valor medio (promedio). <u>Desviación Típica (Standard)</u> de una muestra. <u>Error de la media</u>. <u>Resultado de varias mediciones</u>. <u>Uso de la calculadora científica</u>. <u>Vectores Suma y Resta analítica</u>. <u>Cinemática 2D</u>: <u>Mov. Parabólico y Circular</u>. <u>Ondas Velocidad, Frecuencia, Período, Amplitud, Longitud de Onda</u>. <u>Ondas Transversales y Longitudinales</u>. <u>Sonido</u>.</p>
5°S	<p><u>Mecánica Celeste</u>: Leyes de Kepler. <u>Ondas</u>: Velocidad, Frecuencia, Período, Amplitud, Longitud de Onda. Intensidad. Ley Inversa del cuadrado. Polarización. Interferencia. Difracción. <u>Instrumentos astronómicos</u>: Telescopios. <u>Mecánica Celeste</u> Ley de la Gravitación Universal. Energía Potencial Gravitacional. Clasificación estelar: Secuencia de Harvard. Diagrama Hertzsprung Russell. Impactos de asteroides. Cráteres. <u>Tiempo</u>: Día Sideral, Día Juliano. <u>Estrellas</u> Estrellas Binarias. Medio Interestelar. <u>Ondas</u>: Efecto Doppler. <u>Composición del Universo</u>: El átomo. <u>Elementos y Abundancias relativas</u>. <u>Formación del Sistema Solar</u>. <u>Nube de Oort</u>. <u>Constante Solar</u>. <u>Fenómenos en la superficie Solar</u>. <u>luminosidad, Índices de Color y Temperatura</u>.</p>	<p><u>Vectores</u> Tipos de Multiplicación. Regla de la mano derecha. <u>Aplicaciones</u>. <u>Cinemática gráfica y vectorial</u>. <u>Aceleración Centrípeta y tangencial</u>. <u>Mecánica Fuerza</u>. <u>Momentum Lineal</u>. <u>Leyes de Newton</u>. <u>Energía, Trabajo y Potencia</u>. <u>Conservación</u>: <u>Conservación de la Energía y del Momentum Lineal</u>. Ley de la Gravitación Vectores Tipos de Multiplicación. Regla de la mano derecha. <u>Aplicaciones</u>. <u>Cinemática gráfica y vectorial</u>. <u>Aceleración Centrípeta y tangencial</u>. <u>Mecánica Fuerza</u>. <u>Momentum Lineal</u>. <u>Leyes de Newton</u>. <u>Energía, Trabajo y Potencia</u>. <u>Conservación</u>: <u>Conservación de la Energía y del Momentum Lineal</u>. Ley de la Gravitación Universal. <u>Energía Potencial Gravitacional</u>. <u>Hidromecánica</u>: <u>Presión</u>. <u>Principio de Arquímedes</u>. <u>Ecuación de continuidad</u>. <u>Ecuación de Bernoulli</u>. <u>Trabajo en Laboratorio</u> instrumentos básicos de medida. <u>Óptica</u> Reflexión y Refracción de la luz. <u>Fuerzas</u>: Gravitacional. <u>Electromagnética</u>. <u>Nuclear Fuerte y Nuclear Débil</u>. <u>Ecuaciones Despeje de variables</u>. <u>Mediciones y análisis de datos</u> <u>Propagación de Errores</u>. <u>Ajustes Lineales</u>. <u>Uso de la calculadora</u>.</p>

6° S

Termodinámica Temperatura. Leyes de la Termodinámica. Modelo de un Gas Ideal, Numero de Avogadro. Procesos Isotérmicos y Adiabáticos. Ciclo de Carnot, Eficiencia Termodinámica, Procesos Reversibles e Irreversibles. Equilibrio termodinámico. Radiación. Espectro electromagnético, Leyes de radiación, Radiación del cuerpo negro, Ley Planck, Ley Stefan-Boltzmann Ley Wien. Galaxias: Galaxias espirales y elípticas. Clasificación de Galaxias. Astronomía en todo el Espectro Electromagnético. Observaciones en Radio, Microondas, Infrarrojo, Visible, Ultravioleta, Rayos X, Rayos Gamma. Efectos Atmosféricos. Estrellas Enanas Blancas. Estrellas de Neutrones. Agujeros Negros. Galaxias Galaxias de Núcleos Activos. Quásares. Evolución Estelar Formación Estelar. Clasificación estelar: Secuencia de Harvard, clases de luminosidad. Espectroscopia Absorción, Emisión. Espectro de objetos Celestes. Cosmología Materia Oscura. Ley de Hubble, Cúmulos de Galaxias, Big Bang.

Dinámica Fuerzas Conservativas y No conservativas. Sistemas Inerciales. Fricción: estática y dinámica. Ley de Conservación del Momentum Angular. Inercia. Centro de Masa. Torque. Energía Cinética Rotacional. Campo Eléctrico Conservación de la carga. Ley de Coulomb. Campo Eléctrico. Capacitores. Potencial Eléctrico. Corriente. Resistencia. Ley de Ohm. Dispositivos Eléctricos: Capacitores. Corriente. Resistencia. Ley de Ohm. Leyes de Kirchoff. Termodinámica Leyes de la Termodinámica. Modelo de un Gas Ideal, Numero de Avogadro. Procesos Isotérmicos y Adiabáticos. Ciclo de Carnot, Eficiencia Termodinámica, Procesos Reversibles e Irreversibles. Calorimetría Calor. Temperatura. Dilatación de los cuerpos. Optica Geométrica. Espejos Planos y Esféricos. Lentes. Formación de Imágenes. Campo Magnético Fuerza magnética. Campo magnético terrestre. Imanes. Campo Magnético y Corriente. Inducción Electromagnética. Análisis de Datos: Ajustes No Lineales.

## ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE UNA SUSTANCIA COAGULANTE

### RESISTIVITY STUDIES OF A COAGULATING SUBSTANCE DURING COOLING

SERGIO YÁÑEZ PAGANS, JULIANA CARRASCO MEJIA, & INDIRA OCAMPO JUSTINIANO

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

El experimento consistió en caracterizar el comportamiento de la resistividad en una sustancia coagulante durante el enfriamiento de la misma. Se empleó gelatina como sustancia coagulante y mediante el arreglo de las cuatro puntas de Wenner se estudiaron las dependencias de la resistividad con la temperatura, el voltaje y la corriente eléctrica.

Código(s) PACS: 06.60.-c, 01.50.Pa

*Descriptores:* Procedimientos de laboratorio — Experimentos y aparatos.

#### ABSTRACT

This experiment was carried out to characterize the behavior of the resistivity in a coagulating substance during its cooling process. We used jelly as the coagulating substance; by means of a four-point Wenner setting we studied the resistivity dependence on temperature, voltage and electric current.

*Subject headings:* Laboratory procedures — Laboratory experiments and apparatus.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La resistividad eléctrica es una propiedad de los materiales conductores. Su valor no depende de la forma ni de la masa del cuerpo. Sino más bien, su dependencia es únicamente de las propiedades microscópicas de la sustancia de la que está hecha el cuerpo. A esta propiedad se le clasifica como intensiva. Mientras que las cantidades macroscópicas como el voltaje o la corriente son fáciles de medir existen cantidades microscópicas como la resistividad, es por esto que la medición de la misma fue de gran interés durante mucho tiempo.

En el siglo XIX Lord Kelvin inventó uno de los primeros métodos para la determinación de la resistividad de una muestra. Posteriormente, a principios del siglo XX, el método de Kelvin fue perfeccionado por el científico Frank Wenner, quien la utilizó para medir la resistividad de muestras de tierra. Actualmente, este método, también conocido como método de las cuatro puntas, es ampliamente utilizado en el campo de la geofísica para el estudio de suelos y en la industria para controlar el proceso de producción de semiconductores.

El objetivo del experimento es caracterizar el comportamiento de la resistividad de una sustancia de rápida coagulación durante su enfriamiento mediante el uso del arreglo de las cuatro puntas de Wenner, en el que se empleó gelatina común como sustancia coagulante.

#### 2. MARCO TEÓRICO

##### 2.1. Dependencia de la resistividad eléctrica con la temperatura

La relación entre la temperatura y resistividad para conductores en general, es lineal en un cierto intervalo de temperatura. Para estas relaciones lineales podemos escribir una aproximación empírica, dada por la ecuación 1:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad,  $\alpha$  es el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura,  $T$  es la temperatura del conductor,  $T_0$  una temperatura seleccionada de referencia (temperatura ambiente) y  $\rho_0$  es la resistividad a la temperatura  $T_0$ .

##### 2.2. Arreglo de Wenner de los cuatro electrodos

El arreglo de Wenner de los cuatro electrodos (four-electrode Wenner array) se utiliza para estimar la resistividad de una muestra tridimensional grande. (Wenner 1915; Schuetze et al. 2004) El arreglo consiste en cuatro electrodos colineales, igualmente espaciados a una distancia  $a$ , los cuales deben ser sumergidos en la muestra, tal como se muestra en la figura 1. La corriente se inyecta mediante los electrodos exteriores (la cual a su vez circula a través de la muestra) y el potencial se mide entre los electrodos interiores.

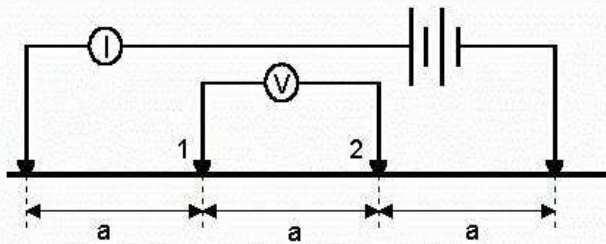


FIG. 1.— Se muestra la representación gráfica del arreglo de Wenner de cuatro electrodos.

Las ventajas del arreglo de Wenner son que la sensibilidad del instrumento no es tan crucial como en geometrías similares y que la resistividad puede calcularse directamente mediante la ecuación 5. Se necesitan pequeñas magnitudes de corriente para producir diferencias de potencial mensurables. Suponiendo que se tiene una muestra homogénea se calcula la resistividad mediante la diferencia de potencial entre los electrodos internos, aplicando la ley de Ohm a los puntos 1 y 2 (figura 1) se obtiene:

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi a} - \frac{I\rho}{2\pi(2a)} = \frac{I\rho}{4\pi a} \quad (2)$$

$$V_2 = -\frac{I\rho}{2\pi a} - \frac{I\rho}{2\pi(2a)} = -\frac{I\rho}{4\pi a} \quad (3)$$

$$V = V_1 - V_2 = \frac{I\rho}{2\pi a} \quad (4)$$

De esta manera se deduce la ecuación 5, la cual nos permite calcular la resistividad en una sustancia homogénea teniendo los valores del voltaje y la corriente:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (5)$$

### 2.3. Gelatina

La gelatina es un polímero o proteína natural, está formada por macromoléculas (proteínas) hidrófilas, es decir, que tienen la capacidad de retener agua. Cuando se la disuelve se convierte en lo que se conoce como una sustancia coloidal; esto significa que es una sustancia no homogénea compuesta por dos o más fases: generalmente una continua, líquida, y otra dispersa en menor cantidad en forma de partículas sólidas (proteínas reticuladas).

La heterogeneidad en la fase coloidal de la gelatina se produce debido al proceso de descomposición espinodal, en el cual la separación de fases tiene lugar de manera homogénea en todo el material.

Lo que tenemos son muchas fibras de proteínas o fibras colágenas que se unen entre sí y permanecen suspendidas en el agua. Estas fibras hidrosolubles están en constante ruptura y reformación dando a la gelatina su estructura semi-sólida. Cuando la gelatina es recalentada esta no vuelve a su estado gelificante a la misma temperatura en la que se coagulo inicialmente, esto se debe a que presenta una histéresis térmica, es decir, como si el sistema recordase sus estados estructurales previos.

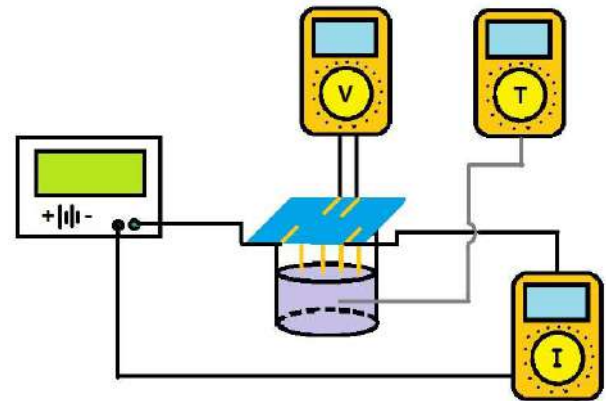


FIG. 2.— Se muestra el esquema del arreglo experimental empleado para la recolección de datos.

### 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Se empleó una fuente eléctrica capaz de generar distintos voltajes, una resistencia de  $100k\Omega$ , una termocupla para tester, tres testers (para el voltaje, la corriente, y la temperatura respectivamente) una hornilla, un vaso de precipitado, distintos cables (con clavija y pinzas), gelatina sin sabor, sal, cucharilla. Primeramente se prepararon  $42g$  de gelatina sin sabor en  $500ml$  de agua a temperatura ambiente ( $20^\circ C$ ), añadiendo  $4g$  de sal para aumentar la conductividad de la misma. Tras ser disueltos se calentó la mezcla hasta una temperatura de  $60^\circ C$ . Simultáneamente se armó un sistema como el mostrado en la figura 2. Seguidamente, se conectó la fuente de corriente continua y el amperímetro a los electrodos externos del arreglo de Wenner (sistema inyector de corriente a la sustancia), y se conectó un voltímetro a los electrodos internos del arreglo. A continuación, se sumergieron dichos electrodos en la sustancia (gelatina) y se empleó una termocupla para el monitoreo de la temperatura media de la misma, prosiguiéndose a tomar datos de la corriente, voltaje, y temperatura en intervalos de  $2^\circ C$ . Se realizó este procedimiento dos veces, las cuales se denominaron serie 1 y serie 2 respectivamente.

### 4. ANÁLISIS DE DATOS

A partir de los datos obtenidos en el experimento se calcula la resistividad a diferentes temperaturas (diferentes estados de coagulación) mediante el método de Wenner. Se aplicó la ecuación 5 a cada par de datos de voltaje y corriente de ambas series, de esta manera se obtuvo la figura 3, se observa en ésta el comportamiento de la resistividad en función de la temperatura (para las series 1 y 2), el cual a su vez se divide en tres regiones (I, II y III). En las regiones I y III no se aprecian cambios significativos en la resistividad, ya que en estas regiones predominan las fases líquida y sólida respectivamente. Por otro lado en la región II existe un aumento de la resistividad para un mayor grado de coagulación (temperaturas más bajas), nótese que en los intervalos de temperaturas de  $28^\circ C$  a  $38^\circ C$  (serie 1) y  $29^\circ C$  a  $40^\circ C$  (serie 2) se observan aumentos bruscos de la resistividad en función a la temper-

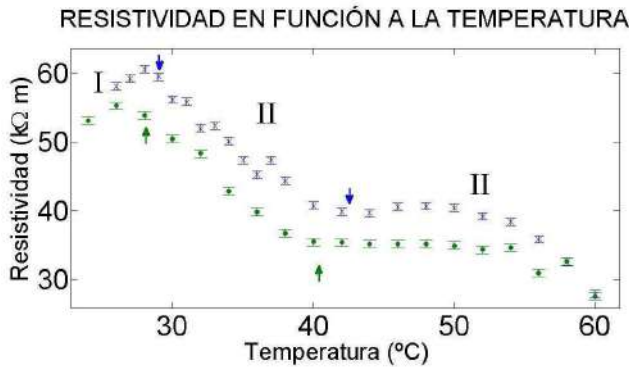


FIG. 3.— Comportamiento de la resistividad en función de la temperatura durante la coagulación de la sustancia para ambas series (indicando por flechas la separación entre las regiones I, II y III para cada serie respectivamente). Se aprecia un aumento abrupto de la resistividad en la región II de tipo lineal, correspondiente al cambio de fase.

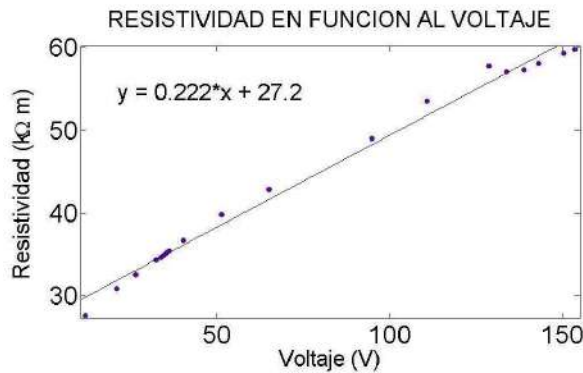


FIG. 4.— Comportamiento de la resistividad en función del voltaje durante la coagulación de la sustancia. Se observa un comportamiento de forma lineal. Implícitamente estos se dan a la temperatura a la cual se produce la transición de fase de líquida a coloidal. Calculando la relación resistividad-temperatura en la región II mediante una regresión lineal, para ambas series, se obtienen las ecuaciones de las rectas 6 (serie 1) y 7 (serie 2), las cuales a su vez se asemejan a la ecuación 1 de la sección 2.2.

$$\rho(T) = m_1 T + b_1 \quad (6)$$

$$\rho(T) = m_2 T + b_2 \quad (7)$$

donde:

$$m_1 = -1.76 \Omega \cdot m / ^\circ C$$

$$m_2 = -1.6 \Omega \cdot m / ^\circ C$$

$$b_1 = 103.3 \Omega \cdot m$$

$$b_2 = 104.8 \Omega \cdot m$$

La resistividad se mide en  $[\Omega \cdot m]$  y la temperatura en  $[^\circ C]$ .

Por otro lado, analizamos el comportamiento entre la resistividad y el voltaje aplicado a los electrodos internos del dispositivo de Wenner, obteniéndose de esta manera la figura 4. Se aprecia un comportamiento de tipo lineal entre ambas magnitudes, el cual se describe mediante la ecuación 5. Debido a la similitud en los comportamientos de las series 1 y 2

se realizó este análisis únicamente para una de las series (serie 1). Realizando un ajuste lineal obtenemos la ecuación 8.

$$\rho(V) = m_v V + b_v \quad (8)$$

donde:

$$m_v = 0.22 m/V$$

$$b_v = 27.2 \Omega \cdot m$$

La resistividad se mide en  $[\Omega \cdot m]$  y el voltaje en  $[V]$ .

## 5. CONCLUSIONES

Habiendo caracterizado el comportamiento de la resistividad en función a la temperatura, el voltaje y la corriente eléctrica durante el enfriamiento de la gelatina, a partir del arreglo de cuatro puntas de Wenner, se obtuvo que la relación entre la resistividad y el voltaje es de tipo lineal, dicha relación está dada por la ecuación 8, cuya pendiente presenta un error porcentual del 5%, lo cual indica una gran precisión del método de Wenner. Además, debido a la linealidad de la ley de Ohm podemos concluir que la resistividad tiene un comportamiento inversamente proporcional a la corriente.

Por otro lado, la relación entre la resistividad y la temperatura presentó un comportamiento lineal durante el cambio de fase de la sustancia coagulante, el cual se dio en el intervalo de  $28^\circ C$  a  $38^\circ C$  para la serie 1 y de  $29^\circ C$  a  $40^\circ C$  para la serie 2. Ambos comportamientos quedan descritos por las ecuaciones 6 y 7, obteniéndose errores porcentuales del 13% y del 15% en las pendientes de las rectas de las series 1 y 2 respectivamente. También es importante mencionar que ambas series de datos presentan aproximadamente las mismas temperaturas de transición de fase. Los errores encontrados indican que la coagulación de la gelatina no se dio de manera homogénea durante el enfriamiento, sino que existió un gradiente de coagulación debido a las menores temperaturas en sus extremos (contacto directo con el aire y contacto con la superficie de apoyo), pues se trata de una sustancia coloidal (Cahn 1961; Kanamaru & Sugiura 1961). En las secciones de datos que corresponden a las temperaturas en las que no existía transición de fase, se pudo observar un comportamiento casi constante por parte de la resistividad; entonces podemos concluir que la resistividad tiene una dependencia lineal con la temperatura solo en presencia de la transición de fase. Finalmente podemos mencionar que el método tiene como ventajas ser bastante preciso y ser de fácil aplicación para la determinación de la resistividad de sustancias coagulantes (Wikipedia 2013).

## 6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Univ. Carlos Pizarroso por su colaboración en el montaje del experimento y en la recolección de datos, al Dr. Flavio Ghezzi por sus sugerencias y orientación a lo largo del experimento, y a los integrantes del Laboratorio de Materia Condensada.

## REFERENCIAS

- Cahn J. W. (1961), *Acta Met.* **9**, 795.  
Kanamaru K. & Sugiura M. (1961), *Kolloid-Z* **1**, 178.  
Schuetze A. P., Lewis W., Brown C. & Geerts W. J. (2004), *Am. J. Phys.* **72**, 149.  
Wenner F. (1915), *Bur. Stand. U.S. Bull.* **12**, 469.  
Wikipedia 2013  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fourterminal\\_sensing](http://en.wikipedia.org/wiki/Fourterminal_sensing)



---

## REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

### COMITÉ EDITORIAL

**Sociedad Boliviana de Física    Instituto de Investigaciones Físicas**

**Dr. Diego Sanjinés Castedo**

Email: sanjines@fiumssa.edu.bo

**Lic. Alfonso Velarde Chávez**

Email: avelarde@fiumssa.edu.bo

**Dr. Eduardo Palenque Vidaurre**

Email: edyruy@yahoo.es

**Carrera de Física**

**Dr. Armando R. Ticona Bustillos**

Email: aticona@fiumssa.edu.bo

**Lic. Elba J. Colque Zacarias**

Email: jhaba.elba@gmail.com

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

Los trabajos enviados para su publicación deberán estar escritos preferentemente en castellano. Trabajos escritos en inglés podrán ser aceptados por el Comité Editorial y, pasado el proceso de aceptación, serán traducidos al castellano para su publicación en la RBF.

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

ANÁLISIS DEL PLANO DE FASES DE UN MODELO DISCRETO DE NEURONA BASADO EN LA DETERMINACIÓN DE PERIODICIDADES  
*G. M. Ramírez Ávila, M. Gallas & J. Gallas*

ESPACIOS DE PARÁMETROS PARA EL ESTUDIO DE LA TURBULENCIA MEDIADA POR DEFECTOS Y OTROS FENÓMENOS NO LINEALES EN SISTEMAS ESPACIALMENTE DISTRIBUIDOS  
*J. Sirpa & G. M. Ramírez Ávila*

VARIACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL EN LA ESTACIÓN ANTÁRTICA PERUANA MACHU PICCHU  
*J. S. Suazo & R. A. Vásquez*

CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y EL POTENCIAL EÓLICO DEL ALTIPLANO CENTRAL  
*J. Encinas, R. Torrez, F. Ghezzi & E. Palenque*

### C. MEMORIAS DE LA REUNIÓN ANUAL DE LA SOBOFI U OTRAS REUNIONES DE FÍSICA

XXVI REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA  
*Sociedad Boliviana de Física*

XXVII REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA  
*Sociedad Boliviana de Física*

### D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

MATERIAL EDUCATIVO PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA CULTURA NUCLEAR EN BOLIVIA  
*R. Bustos, I. Poma & G. M. Ramírez Ávila*

ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE UNA SUSTANCIA COAGULANTE  
*S. Yáñez, J. Carrasco & I. Ocampo*