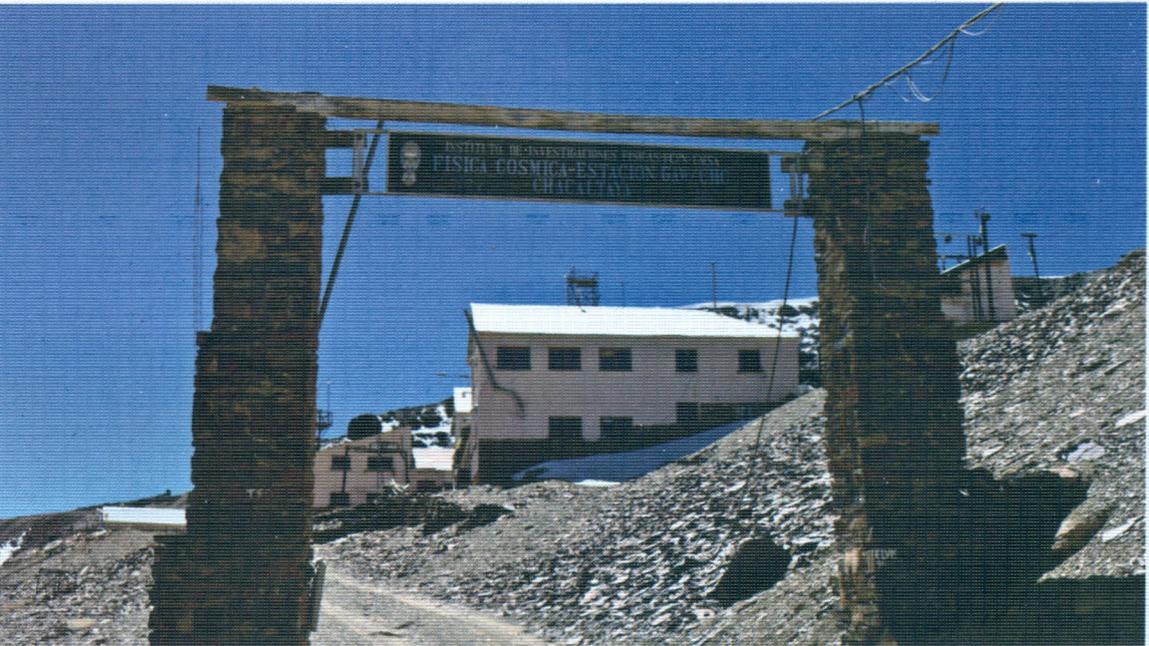


ISSN - 1562 - 3823

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 26

JUNIO 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

M. Sc. Franz Suño

Email: znarf@correo.nu

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. José Antonio de Souza

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

Dr. Oscar Saavedra

Dipartimento di Fisica Generale
Universita di Torino, Italia
Email: saavedra@to.infn.it

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 26
JUNIO 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: Estación GAW/CHACALTAYA 5400 msnm, La Paz - Bolivia.

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

IMPRESO EN BOLIVIA — PRINTED IN BOLIVIA

CONTENIDO

A. ARTÍCULOS

DINÁMICA ROTACIONAL RELATIVISTA	
<i>M. L. Peñafiel & V. M. Peñafiel</i>	1

PUESTA EN MARCHA DE UNA NUEVA ESTACIÓN DE MONITOREO CLIMÁTICO EN LOS ANDES CENTRALES DE BOLIVIA: LA ESTACIÓN GAW/CHACALTAYA	
<i>M. Andrade et al.</i>	6

B. CONTRIBUCIONES Y REVISIONES

CONDICIONAMIENTOS A LA SISMICIDAD EN BOLIVIA	
<i>E. Ricaldi</i>	17

D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

18 ^{va} OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA, 8 ^{va} OLIMPIADA BOLIVIANA DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA	
<i>Bustos R. et al.</i>	31

DINÁMICA ROTACIONAL RELATIVISTA

ROTATIONAL RELATIVISTIC DYNAMICS

M. L. PEÑAFIEL[†] & V. M. PEÑAFIEL[‡]

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 24 de Agosto de 2014; aceptado 20 de Abril de 2015)

RESUMEN

Se discute la teoría rotacional y los conceptos de cuerpo rígido en Relatividad Especial, postulando una transformación manifiestamente covariante para la rotación relativista. A partir de esa transformación, se analiza el cambio en la geometría de un disco que gira de manera uniforme, resolviendo la paradoja de Ehrenfest. Luego, se determina las expresiones generales de las fuerzas inerciales relativistas para rotaciones alrededor de todos los ejes espaciales y, finalmente, se analiza la dinámica en el sistema de referencia estudiado, hallando expresiones para las fuerzas inerciales con los respectivos términos de corrección. Se muestra que, tanto la transformación como el análisis dinámico, se reducen a las correspondientes para la rotación clásica en el límite de bajas velocidades.

Código(s) PACS: 03.30.+p — 45.40.-f — 45.20.dc

Descriptor(es): Relatividad especial — Dinámica y cinemática de cuerpos rígidos — Dinámica rotacional

ABSTRACT

Rotational theory and rigid body concepts in special relativity are discussed, postulating a manifestly covariant transformation for the relativistic rotation. Using this transformation the geometrical change of a uniformly rotating disk is analyzed, solving the Ehrenfest paradox. Also, the most general expressions for the relativistic inertial forces are determined for rotations around all the spatial axes and, finally, the dynamics for the studied reference frame is analyzed, finding expressions for the inertial forces with their respective correction terms. It is shown that the transformation and the dynamical analysis are reduced to the corresponding cases for the classical rotation in the low-speed limit.

Subject headings: Special relativity — Dynamics and kinematics of rigid bodies — Rotational dynamics

1. INTRODUCCIÓN.

Desde el origen y desarrollo de la Teoría Especial de la Relatividad por parte de Einstein (1905), surgió la idea de generalizarla para el tratamiento de un cuerpo rígido en rotación. Así, el concepto de rígido en relativista dado por Born (1909) fue - casi inmediatamente- refutado por Ehrenfest (1909) formulando la ahora famosa *Paradoja de Ehrenfest*. Desde entonces, gran parte de la literatura sobre este tema está orientada a la resolución de la misma, sin un resultado claro y convincente. Aparentemente, Einstein, más bien, utilizó el hecho de que la geometría del cuerpo deja de ser euclidiana para desarrollar la Teoría General de la Relatividad.

La paradoja de Ehrenfest condujo a muchos cues-

tionamientos hacia la Teoría de la Relatividad entre la comunidad, habiendo intentos de reformular la teoría para el caso rotacional (Carmelli 1986), de anular la Teoría Especial de la Relatividad (Rodrigues 1983) y, también, a diferentes intentos de eliminar la paradoja (Cavalleri 1973). En la actualidad, la resolución de esta paradoja y, claro, una formulación dinámica rotacional consistente, sigue siendo un tema de interés para la física teórica (Shaokai 1997; Jo 2012; Rizzi & Ruggiero 2004) debido a las aplicaciones que el rotador relativista puede tener tanto en modelos de partículas elementales, como en modelos cosmológicos.

En el presente trabajo, se trata de hallar un formalismo de la dinámica rotacional para objetos relativistas sin alterar los postulados de la Relatividad Especial ni, en lo posible, destruir la covariancia manifiesta.

[†]vmiguel@fiumsa.edu.bo

[‡]vmiguel@fiumsa.edu.bo

En primer lugar, es importante no ignorar el que, al menos en principio, todo sistema rotatorio debería mostrar efectos relativistas en las regiones muy alejadas del origen. Consecuentemente, las expresiones matemáticas de una transformación entre un sistema inercial y uno rotatorio deben corresponder gradualmente al caso clásico no únicamente para velocidades angulares bajas sino también en la vecindad del origen.

El tratamiento del disco rígido relativista y, en general, de la dinámica respectiva, sigue muy naturalmente, como se ve más adelante, de las propiedades de tal transformación.

2. TRANSFORMACIÓN ROTACIONAL

En efecto, las consideraciones anteriores requieren que la transformación de coordenadas debe:

(i) Ser expresable en términos de tetraesores, en la forma manifestamente covariante usual.

(ii) Debe corresponder a un sistema rotatorio en el sentido clásico.

(iii) Debe manifestar efectos relativistas en regiones alejadas del origen, dependiendo únicamente del valor absoluto de la velocidad angular.

Se propone, por tanto, una superposición de transformaciones rotacionales (variables con el tiempo) y transformaciones de Lorentz (variables con el radio) cuya forma explícita puede ser derivada de las consideraciones siguientes:

Aceptando las convenciones usuales, como la métrica

$$\delta^\mu_\nu = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

el empuje general de Lorentz (Goldstein & Poole 2001)

$$L^\mu_\nu = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma v_1 & -\gamma v_2 & -\gamma v_3 \\ -\gamma v_1 & 1 + g v_1^2 & g v_1 v_2 & g v_1 v_3 \\ -\gamma v_2 & g v_2 v_1 & 1 + g v_2^2 & g v_2 v_3 \\ -\gamma v_3 & g v_3 v_1 & g v_3 v_2 & 1 + g v_3^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

con $g = (\gamma - 1)$, las cantidades $\beta = V/c$ ($V =$ velocidad de la partícula, $c =$ velocidad de la luz en el vacío), $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ y -a menos que se indique expresamente otra opción- $c = 1$, para cierto instante representado por el ángulo θ entre ejes (Fig. 1), un punto en el sistema rotatorio debe tener velocidad tangencial con componentes $(v_1, v_2, 0) = (-\beta \sin\theta, \beta \cos\theta, 0)$ que fungen como parámetros *instantáneos* para la transformación de Lorentz (1), esto es,

$$z^\mu = L^\mu_{1\nu} x^\nu,$$

$$L^\mu_{1\nu} = \begin{pmatrix} \gamma & \gamma\beta S_\theta & -\gamma\beta C_\theta & 0 \\ \gamma\beta S_\theta & 1 + (\gamma - 1)S_\theta^2 & -(\gamma - 1)S_\theta C_\theta & 0 \\ -\gamma\beta C_\theta & -(\gamma - 1)S_\theta C_\theta & 1 + (\gamma - 1)C_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

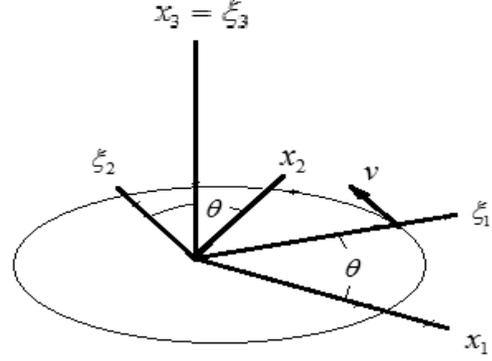


Fig. 1. Rotación del sistema ξ respecto del x . ($S_\theta \equiv \sin\theta$; $C_\theta \equiv \cos\theta$); ésta, acoplada a la rotacional

$$\xi^\mu = \mathbf{R}^\mu_\rho z^\rho = \mathbf{R}^\mu_\rho L^\rho_{1\nu} x^\nu,$$

$$\mathbf{R}^\mu_\nu = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

conduce a la transformación rotacional relativista

$$\xi^\mu = \mathcal{R}^\mu_\nu x^\nu \quad (2)$$

con

$$\mathcal{R}^\mu_\nu = \mathbf{R}^\mu_\rho L^\rho_{1\nu}. \quad (3)$$

Es posible proceder en el orden inverso; esto es, efectuar primero la rotación instantánea

$$y^\mu = \mathbf{R}^\mu_\nu x^\nu$$

seguida del empuje de Lorentz. En este caso, la primera operación (con el mismo ángulo θ como parámetro) rota los ejes hasta que los auxiliares instantáneos son y^1 perpendicular y y^2 paralelo a la dirección del movimiento (ver Fig. 1); ahora, las componentes de la velocidad para la matriz de Lorentz (1) devienen $(0, v_2, 0) = (0, \beta, 0)$ y dan lugar al operador *instantáneo*

$$L^\mu_{2\nu} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & -\gamma\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Entonces

$$\xi^\mu = L^\mu_{2\rho} y^\rho = L^\mu_{2\rho} \mathbf{R}^\rho_\nu x^\nu \quad (4)$$

y la rotación relativista será

$$\mathcal{R}^\mu_\nu = L^\mu_{2\rho} \mathbf{R}^\rho_\nu. \quad (5)$$

Se comprueba, por cálculo directo, que los productos matriciales (2) y (4) conducen ambos al mismo resultado: la forma explícita de la matriz de transformación \mathcal{R}^μ_ν que es

$$\mathcal{R}^\mu_\nu = \begin{pmatrix} \gamma & \gamma\beta\text{sen}\theta & -\gamma\beta\text{cos}\theta & 0 \\ 0 & \text{cos}\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ -\gamma\beta & -\gamma\text{sen}\theta & \gamma\text{cos}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde, considerando una velocidad angular constante $(0, 0, \omega)$, es $\beta = \omega r$ y $\theta = \omega x^0$.

Esta transformación es pseudo ortogonal en el sentido en que preserva la tetra distancia s . Sin embargo, el hecho de que la matriz (4) depende de las coordenadas complica el ejercicio de hallar la transformación inversa. Como se verá luego, aún es posible usar simplemente la *inversa de la matriz* (5), calculada por el observador no inercial $\{\xi\}$, para el análisis dinámico. Es evidente el que consideraciones similares a las ya empleadas permiten escribir la forma

$$R^\mu_\nu = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & \gamma\beta & 0 \\ -\gamma\beta\text{sen}\theta & \text{cos}\theta & -\gamma\text{sen}\theta & 0 \\ \gamma\beta\text{cos}\theta & \text{sen}\theta & \gamma\text{cos}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

para el paso de $\{\xi\}$ a $\{x\}$, con las modificaciones correspondientes en θ y β .

3. ROTADOR RELATIVISTA

Ahora, sea un disco rígido de radio R girando junto con el sistema $\{\xi\}$ alrededor del eje $\xi_3 = x_3$. Por estar en reposo en el sistema giratorio, la ecuación que describe su circunferencia es, simplemente,

$$(\xi^1)^2 + (\xi^2)^2 = R^2 \quad .$$

Por otra parte, (2) con la matriz (6) proporciona las siguientes 4 ecuaciones:

$$\begin{cases} \xi^0 = \gamma x^0 - \gamma\beta x^2 \\ \xi^1 = \text{cos}\theta x^1 + \text{sen}\theta x^2 \\ \xi^2 = -\gamma\beta x^0 - \gamma \text{sen}\theta x^1 + \gamma\text{cos}\theta x^2 \\ \xi^3 = x^3 \end{cases} \quad (8)$$

de modo que la sustitución directa, usando momentáneamente $y^1 = \text{cos}\theta x^1 + \text{sen}\theta x^2$, $y^2 = -\text{sen}\theta x^1 + \text{cos}\theta x^2$, conduce a

$$(y^1)^2 + \gamma^2(y^2 - \beta x^0)^2 = R^2 \quad .$$

Aquí, βx^0 es sólo la distancia relativa entre los orígenes de los sistemas la cual, en este caso, se anula pues $r = 0$ implica $\beta = 0$. Consecuentemente,

$$(y^1)^2 + \gamma^2(y^2)^2 = R^2 \quad .$$

Pero $\gamma^{-2} = 1 - \beta^2$ por lo que

$$r^2 + \beta^2[R^2 - (y^1)^2] = R^2 \quad ;$$

finalmente, si $\beta = \omega r$ (la velocidad angular queda como el único parámetro invariante de la transformación) se obtiene de inmediato

$$r^2\{1 + \omega^2[R^2 - (x^1\text{cos}\theta + x^2\text{sen}\theta)^2]\} = R^2 \quad . \quad (9)$$

El observador inercial, por tanto, describirá un tipo de elipse rígida rotando alrededor de x^3 cuya forma explícita es representable gráficamente haciendo $\theta = 0$ o, usando todavía las variables rotatorias auxiliares y^1, y^2 , introducidas en (4); la ecuación equivalente es

$$r^2[1 - \omega^2(y^1)^2 + \omega^2 R^2] = R^2 \quad (10)$$

(obviamente, $r = \sqrt{(y^1)^2 + (y^2)^2}$) y corresponde a la curva mostrada en la Figura 1.

La paradoja de Ehrenfest desaparece incluso pensando en que un disco giratorio podría ser observado en el sistema inercial si se empezara con alguna forma elíptica en $\{\xi\}$ pues, en tal circunstancia, sería precisamente la contracción relativista la causa de que el disco rotatorio mantuviera sus propiedades geométricas intactas.

Es interesante notar que un sistema en rotación relativista es siempre finito porque, en unidades de c (la velocidad de la luz), se debe cumplir que $\omega r \leq 1$.

En (9), haciendo $y^2 = 0$ -lo que implica $r = y^1$ -, se obtiene de inmediato $y^1 = R$ como una raíz adecuada de la ecuación cuártica resultante; pero si $y^1 = 0$, es $y^2 = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2}}$, que implica una *contracción del radio* cuyo límite es (cuando $\omega R = 1$) $y^2 = \frac{R}{\sqrt{2}}$.

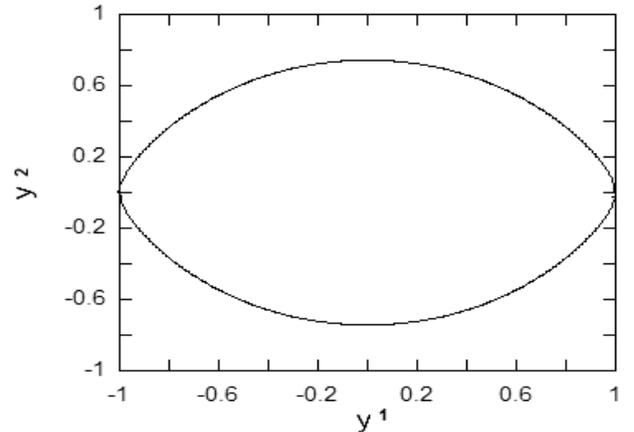


Fig. 2. Esquema del rotador relativista para $\omega = 0.9$.

4. DINÁMICA

Por ser un sistema no inercial, como se sabe, la dinámica en un sistema rotatorio está relacionada con la geometría mediante las ecuaciones de las geodésicas.

No se abordará aquí ese problema dejándolo, más bien, para una segunda parte. Sin embargo, varios detalles dinámicos interesantes pueden ser expuestos como sigue:

Aceptando que (6) permite el paso de puntos del sistema $\{\xi\}$ al $\{x\}$ mediante

$$x^\mu = R^\mu_\nu \xi^\nu \quad ,$$

con $\beta = \omega\rho$, $\rho = \sqrt{(\xi^1)^2 + (\xi^2)^2}$, $\theta = \omega\xi^0$ y derivando x^μ respecto de s dos veces (como es usual, la longitud de línea mundo, s , se emplea para parametrizar las trayectorias), se obtiene la aceleración en el sistema inercial y las correspondientes aceleraciones inerciales (excepto la de Euler pues ω es constante),

$$\ddot{x}^\mu = \ddot{R}^\mu_\nu \xi^\nu + 2\dot{R}^\mu_\nu \dot{\xi}^\nu + R^\mu_\nu \ddot{\xi}^\nu . \quad (11)$$

4.1. Ecuación General de Movimiento

El análisis hecho antes es fácilmente extensible a transformaciones alrededor de los ejes x^1 y x^2 , realizando las correcciones apropiadas tanto a la matriz de rotación como a la de empuje de Lorentz. De esta forma, se construye una matriz general de rotación relativista que sea la composición de los operadores individuales.

Entonces, las expresión explícita para la derivada de R^μ_ν a primer orden respecto del parámetro s es

$$\frac{dR^\mu_\nu}{ds} = \frac{\partial R^\mu_\nu}{\partial \rho} \dot{\rho} + \frac{\partial R^\mu_\nu}{\partial \theta} \dot{\theta} ,$$

representable, como lo demuestra el cálculo directo, por el producto matricial

$$\dot{R}^\mu_\nu = R^\mu_\rho \Omega^\rho_\nu ,$$

donde la matriz de rotación infinitesimal Ω^μ_ν es antisimétrica en la parte espacial (al igual que la matriz clásica)

$$\Omega^i_j = \gamma \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

mientras que las componentes correspondientes a la parte temporal son simétricas y de la forma

$$\Omega^i_0 = \Omega^0_i = \begin{pmatrix} 0 \\ (-\gamma\beta\omega_3 + \gamma^2\omega_2\dot{\rho}^2) \\ (-\gamma\beta\omega_1 + \gamma^2\omega_3\dot{\rho}^2) \\ (-\gamma\beta\omega_2 + \gamma^2\omega_1\dot{\rho}^2) \end{pmatrix} . \quad (13)$$

Aplicando este resultado a la derivada de segundo orden se obtiene

$$m\ddot{x} = R^\mu_\rho m(\Omega^\rho_\sigma \Omega^\sigma_\nu \xi^\nu + 2\Omega^\rho_\nu \dot{\xi}^\nu + \ddot{\xi}^\nu) . \quad (14)$$

Cada una de las componentes mostradas corresponden, por supuesto, a las tetra-fuerzas inerciales.

La fuerza de Coriolis relativista, por ejemplo, tendrá la siguiente forma:

$$2\gamma m \left[\begin{pmatrix} 0 \\ \vec{\omega} \times \dot{\xi} \end{pmatrix} + \beta A^\mu + \gamma \dot{\rho}^2 B^\mu \right] \quad (15)$$

donde las componentes de la matriz A^μ son,

$$A^0 = \dot{\xi}^1 \omega_3 + \dot{\xi}^2 \omega_1 + \dot{\xi}^3 \omega_2$$

$$A^1 = -\dot{\xi}^0 \omega_3$$

$$A^2 = -\dot{\xi}^0 \omega_1$$

$$A^3 = -\dot{\xi}^0 \omega_2$$

y, las componentes de la matriz B^μ ,

$$B^0 = \dot{\xi}^1 \omega_2 + \dot{\xi}^2 \omega_3 + \dot{\xi}^3 \omega_1$$

$$B^1 = \dot{\xi}^0 \omega_2$$

$$B^2 = \dot{\xi}^0 \omega_3$$

$$B^3 = \dot{\xi}^0 \omega_1 .$$

Es importante notar que, puesto que la magnitud asociada con \dot{r} tiene que ver con la derivada de la velocidad β respecto de s , si $\beta \rightarrow 0$, ese término desaparecerá, quedando solamente la fuerza de Coriolis clásica.

Efectuando nuevamente el producto matricial anterior, se halla que la fuerza centrífuga relativista es:

$$\gamma^2 m \left[\begin{pmatrix} 0 \\ \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\xi}) \end{pmatrix} + \beta C^\mu + \dot{\rho}^2 (\gamma^2 \dot{\rho}^2 D^\mu - \gamma E^\mu) \right] ; \quad (16)$$

siendo las componentes de la matriz C^μ

$$C^0 = \beta \xi^0 |\vec{\omega}| + \xi^1 (\omega_2^2 - \omega_1 \omega_3) + \xi^2 (\omega_3^2 - \omega_1 \omega_2) + \xi^3 (\omega_1^2 - \omega_2 \omega_3)$$

$$C^1 = \beta (\xi^1 \omega_3^2 + \xi^2 \omega_1 \omega_3 + \xi^3 \omega_2 \omega_3) + \xi^0 (\omega_1 \omega_3 - \omega_2^2)$$

$$C^2 = \beta (\xi^1 \omega_1 \omega_3 + \xi^2 \omega_1^2 + \xi^3 \omega_1 \omega_2) + \xi^0 (\omega_1 \omega_2 - \omega_3^2)$$

$$C^3 = \beta (\xi^1 \omega_2 \omega_3 + \xi^2 \omega_1 \omega_2 + \xi^3 \omega_1^2) + \xi^0 (\omega_2 \omega_3 - \omega_1^2) ,$$

las componentes de D^μ ,

$$D^0 = \xi^0 |\vec{\omega}|^2$$

$$D^1 = \xi^1 \omega_2^2 + \xi^2 \omega_2 \omega_3 + \xi^3 \omega_1 \omega_2$$

$$D^2 = \xi^1 \omega_2 \omega_3 + \xi^2 \omega_3^2 + \xi^3 \omega_1 \omega_3$$

$$D^3 = \xi^1 \omega_1 \omega_2 + \xi^2 \omega_1 \omega_3 + \xi^3 \omega_1^2$$

y, finalmente, las de E^μ ,

$$E^0 = 2\beta \xi^0 (\omega_3 \omega_2 - \omega_1 \omega_3 - \omega_1 \omega_2)$$

$$- \xi^1 (\omega_3^2 - \omega_1 \omega_2) - \xi^2 (\omega_1^2 - \omega_2 \omega_3) - \xi^3 (\omega_2^2 - \omega_1 \omega_3)$$

$$E^1 = \beta (2\xi^1 \omega_2 \omega_3 + \xi^2 (\omega_3^2 + \omega_1 \omega_2) + \xi^3 (\omega_2^2 + \omega_1 \omega_3))$$

$$+ \xi^0 (\omega_3^2 - \omega_1 \omega_2)$$

$$E^2 = \beta (\xi^1 (\omega_3^2 + \omega_1 \omega_2) + 2\xi^2 \omega_1 \omega_3 + 2\xi^3 (\omega_1^2 + \omega_2 \omega_3))$$

$$+ \xi^0 (\omega_1^2 - \omega_2 \omega_3)$$

$$E^3 = \beta (\xi^1 (\omega_2^2 + \omega_1 \omega_3) + \xi^2 (\omega_1^2 + \omega_2 \omega_3) + 2\xi^3 \omega_1 \omega_2)$$

$$+ \xi^0 (\omega_2^2 - \omega_1 \omega_3) .$$

Por otra parte, considerando únicamente partículas libres en el sistema inercial (para no

comprometer la interpretación de la inversa de R), con $\ddot{x} = 0$, la ecuación de movimiento de la partícula libre, en el sistema rotatorio, da

$$\ddot{\xi}^\nu + 2\Omega^\rho{}_\nu \dot{\xi}^\nu + \Omega^\rho{}_\sigma \Omega^\sigma{}_\nu \xi^\nu = 0 . \quad (17)$$

las fuerzas inerciales clásicas se mantienen bajo la transformación utilizada, pero queda la discusión sobre el significado de los términos correspondientes a las aceleraciones de la parte temporal, relacionados, sin duda, con la potencia desarrollada sobre de la partícula.

4.2. Dinámica en el Sistema Rotatorio Relativista

Volviendo a (8), la ecuación de movimiento particular para el sistema estudiado se obtiene rápidamente a partir de las expresiones (14) y (15). Dado que es siempre posible orientar el eje x^3 en la dirección del vector velocidad angular, la pérdida de generalidad no es importante; en este sistema, en el plano x^1 - x^2 , las componentes de velocidad angular ω_1 y ω_2 se anularán, quedando solamente la componente ω_3 que, en lo que sigue, será escrita como ω .

Así, la aceleración de Coriolis para el problema en cuestión quedará como

$$2\gamma \left[\begin{pmatrix} 0 \\ -\dot{\xi}^2 \omega \\ \dot{\xi}^1 \omega \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} \dot{\xi}^1 \omega \\ -\dot{\xi}^0 \omega \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \gamma \dot{\rho}^2 \begin{pmatrix} \dot{\xi}^2 \omega \\ 0 \\ \dot{\xi}^0 \omega \\ 0 \end{pmatrix} \right], \quad (18)$$

mientras, la aceleración centrífuga se reduce a

$$\gamma^2 \left[\begin{pmatrix} 0 \\ -\omega^2 \xi^1 \\ -\omega^2 \xi^2 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} \xi^0 \omega^2 + \xi^2 \omega^2 \\ \beta \xi^1 \omega^2 \\ -\xi^0 \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix} \right] + \dot{\rho}^2 (\gamma^2 \dot{\rho}^2 \begin{pmatrix} \xi^0 \omega^2 \\ 0 \\ \xi^2 \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix} - \gamma \begin{pmatrix} -\xi^1 \omega^2 \\ \beta \xi^2 \omega^2 + \xi^0 \omega^2 \\ \beta \xi^1 \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix}) \quad (19)$$

y corresponden, respectivamente, al segundo y tercer

término en el primer miembro de la ecuación (16).

5. CONCLUSIONES

Según lo expuesto, la paradoja de Ehrenfest se origina en la suposición de que un objeto circular en reposo, mantiene su forma cuando es sometido a velocidades angulares relativistas.

La aplicación superpuesta de los efectos conocidos de las operaciones de rotación y empuje de Lorentz, sin embargo, conduce a que tal suposición no es sustentable y, más bien, implica una deformación predecible y calculable del objeto, invalidando la conclusión final de la paradoja.

La importancia de una formulación manifiestamente covariante para la dinámica rotacional relativista es principalmente teórica, pero precede al posible desarrollo de modelos cosmológicos o de microsistemas. La aproximación a un cuerpo rígido rotatorio en relatividad especial, a pesar de ser ampliamente resistida, tiene sustento en diferentes fenómenos físicos observados en la naturaleza (v. g., efecto Sagnac). La transformación utilizada, como se ha esquematizado, permite recuperar también la formulación dinámica de rotaciones, con las obvias correcciones relativistas, las cuales desaparecen gradualmente para velocidades angulares y radios pequeños; esto es, se aproxima continuamente a su límite clásico. Esto hace a la consistencia de la teoría propuesta.

De hecho, matemáticamente al menos, cualquier sistema rotatorio puede considerarse relativista para radios suficientemente grandes e, inversamente, aún si la velocidad angular es elevada, el sistema puede considerarse clásico para radios suficientemente pequeños.

Finalmente, como se ha procedido, aunque la construcción de una transformación inversa es viable sobre la base de argumentos físicos (ec. (7)), aún no es patente que ambas son matemáticamente inversas. Es preciso no perder de vista que no se trata de una transformación entre sistemas inerciales sino, entre uno inercial y otro acelerado. Tales consideraciones y las que relacionan a la dinámica rotacional con la geometría intrínseca del sistema rotatorio (algebraicamente bastante compleja), como se dijo, serán objeto de un trabajo posterior.

REFERENCIAS

- Born M. (1909), *Ann. der Phys.* **335**, 11
 Carmelli M. (1986), *Int. Journal of Theoretical Physics.* **25**, 89
 Cavalleri G. (1973), *Lett. Nuovo Cimento* **7**, 575
 Ehrenfest P. (1909), *Phys. Zeit.* **10**, 918
 Einstein A. (1905), *Ann. der Phys.* **17**, 891
 Goldstein S. & Poole. (2001), *Classical Mechanics* (Addison Wesley)
 Jo S. G. (2012), *Chinese Journal of Physics* **50**, 1
 Rizzi G. & Ruggiero M. L. (eds.) (2004), *Relativity in Rotating Frames* (Kluwer Academic Publishers)
 Rodrigues W. (1983), *Il Nuovo Cimento* **74**, 199
 Shaokai L. (1997), *Applied Mathematics and Mechanics* **19**, 45

PUESTA EN MARCHA DE UNA NUEVA ESTACIÓN DE MONITOREO CLIMÁTICO EN LOS
ANDES CENTRALES DE BOLIVIA: LA ESTACIÓN GAW/CHACALTAYA

SET TO WORK OF A NEW CLIMATE MONITORING STATION IN THE
CENTRAL ANDES OF BOLIVIA: THE GAW/CHACALTAYA STATION

M. ANDRADE¹, F. ZARATTI¹, R. FORNO¹, R. GUTIÉRREZ¹, I. MORENO¹, F. VELARDE¹, F. ÁVILA¹, M. ROCA¹, M. F. SÁNCHEZ¹, P. LAJ², J. L. JAFFREZO², P. GINOT^{3,2}, K. SELLEGRI⁴, M. RAMONET⁵, O. LAURENT⁵, K. WEINHOLD⁶, A. WIEDENSOHLER⁶, R. KREJCI⁷, P. BONASONI⁸, P. CRISTOFANELLI⁸, D. WHITEMAN⁹, F. VIMEUX^{10,11}, A. DOMMERGUE², & O. MAGAND²

¹ Laboratorio de Física de la Atmósfera, Instituto de Investigaciones Físicas, Universidad Mayor de San Andrés

² Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE), CNRS-UJF, Grenoble, Francia

³ Observatoire des Sciences de l'Univers (OSUG), IRD–CNRS–UJF, Grenoble, Francia

⁴ Laboratoire de Météorologie Physique, CNRS–UBP, Clermont–Ferrand, Francia

⁵ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), Unité Mixte de Recherche (CEA–CNRS–UVSQ), Gif–sur–Yvette, Francia

⁶ Leibniz Institute for Tropospheric Research (TROPOS), Alemania

⁷ Department of Environmental science and analytical Chemistry (ACES), Stockholm University, Suecia

⁸ Institute of Atmospheric Sciences and Climate, CNR, Bologna, Italia

⁹ Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, Estados Unidos

¹⁰ Institut de Recherche pour le Développement, Laboratoire HydroSciences Montpellier, Unité Mixte de Recherche (IRD, CNRS, UM1, UM2), Montpellier, Francia

¹¹ Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Unité Mixte de Recherche (CEA, CNRS, UVSQ), Gif–sur–Yvette, Francia

(Recibido 9 de Febrero de 2015; aceptado 7 de Mayo de 2015)

RESUMEN

En diciembre 2011 se estableció una nueva estación regional (CHC/GAW por su nombre corto) de la red *Global Atmosphere Watch* parte de la *World Meteorological Organization* (WMO) en el Monte Chacaltaya (5400 m snm). El objetivo de ésta es monitorear la composición atmosférica de la región, principalmente gases de efecto invernadero, gases reactivos y material particulado, con el fin de estudiar el transporte de estos elementos hacia la troposfera media y hacia (y de la) la troposfera libre. Para este propósito un consorcio de instituciones europeas y americanas instaló un conjunto de instrumentos en dependencias del Laboratorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya del Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) en La Paz, Bolivia. Desde su puesta en marcha CHC/GAW ha funcionado casi continuamente hasta la fecha con pocas interrupciones casi todas relacionadas a descargas eléctricas. Los primeros resultados, correspondientes a los años 2012–2013, son reportados en el presente documento. El transporte de material particulado, producto de la quema de biomasa vegetal, es claramente visible en los datos adquiridos en ese periodo.

Asimismo, el efecto de la contaminación producida en la región metropolitana de La Paz, relativamente cercana a la estación aunque a mucha menor altura, es claramente observado en los datos diarios y promedios temporales más largos. Esos datos sugieren que la estación está en la troposfera libre, especialmente durante la noche, mientras que durante el día es muy común que la advección de aire caliente, debido al calentamiento de la superficie y el incremento de procesos turbulentos, permitan el transporte de material particulado y gases hacia Chacaltaya a través del crecimiento de la capa límite planetaria. Un comportamiento asociado a las temporadas seca y húmeda, es también evidente en los datos.

Código(s) PACS: 92.60.-e — 92.60.hf — 01.52.+r

Descriptores: Propiedades y dinámica de la atmósfera — Composición, química y transporte de constituyentes de la troposfera — Instalaciones de laboratorio nacionales e internacionales

ABSTRACT

A new regional station (CHC/GAW for short) of the *Global Atmosphere Watch*, which is part of the *World Meteorological Organization* (WMO), was set to work in December 2011 at mount Chacaltaya (5400 masl). The purpose of this station is to monitor the atmospheric composition of the region, especially the greenhouse effect gases, reactive gases and particle

material which is carried to the medium troposphere and to (or from the) free troposphere. To this purpose, a consortium of European and American institutions set up various instruments in the Cosmic Ray Laboratory (Institute of Physical Investigations, Universidad Mayor de San Andrés, UMSA, La Paz, Bolivia). From its set to work up to now the CHC/GAW has worked continuously with few interruptions, almost all of them related to lightnings. The first results corresponding to the 2012–2013 period are reported in this document. The transport of particle material (which results from the burning of vegetal biomass) is clearly visible from the data.

The effect of pollution produced in the metropolitan region of La Paz (which is near to the station but at a much less altitude) is also clearly visible in the daily data and in longer time averages. These data suggest that the station is located in the free troposphere, especially at night, while during day time the advection of hot air (due to the warming of the surface and to the increase of turbulent processes) carry particle material and gases to Chacaltaya due to the enhancement of the planet boundary layer. A behavior associated to the dry and humid seasons is also evident in the data.

Subject headings: Properties and dynamics of the atmosphere — Tropospheric composition and chemistry, constituent transport and chemistry — National and international laboratory facilities

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y monitoreo de diferentes componentes atmosféricos, tanto de origen natural como antrópico, ha concitado el interés de la comunidad científica y de tomadores de decisión en América en los últimos años. Cambios en la calidad del aire, a raíz del crecimiento demográfico e industrial así como del incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, han resaltado la importancia del monitoreo de la atmósfera en una perspectiva temporal de varias décadas a fin de establecer posibles cambios en su composición y las causas de los mismos. Sin embargo, en los Andes existen muy pocas estaciones que estudien la atmósfera de forma continua y permanente. Por ejemplo la red *Global Atmosphere Watch* de la Organización Meteorológica Mundial reporta en su sitio web <http://gaw.empa.ch/gawsis>¹ un reducido número de estaciones que se hallan **funcionando** en la región, especialmente en la zona central de los Andes.

Desde hace varios años personal del ahora Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA), dependiente del Instituto de Investigaciones Físicas (IIF) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), ha usado las instalaciones del laboratorio de Rayos Cósmicos del IIF en el Monte Chacaltaya (pico a 5380 m snm) para realizar estudios de corta duración referentes a la composición de la atmósfera en la región. Estas investigaciones estuvieron relacionadas fundamentalmente al estudio del comportamiento de algunos gases como el monóxido de carbono, (Andrade et al. (2011)) el dióxido de carbono (M.Andrade & Gutiérrez (2007)) (M.Andrade et al. (2015)). Desde el principio el potencial del lugar fue evidente: la altura del laboratorio, su cercanía al Altiplano y la Amazonía así como a la zona metropolitana de La Paz hacen que se puedan estudiar masas de aire de diferente origen. Los estudios preliminares sugirieron que el transporte de material particulado y gases hacia regiones de altura como Chacaltaya era

importante y que los posibles efectos de este transporte podrían tener, a su vez, efectos sobre los glaciares de la región.

El año 2010, un grupo de investigadores del LFA y del *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) francés, por un lado, y del *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR) italiano deciden intentar convertir a Chacaltaya en un centro de monitoreo y estudios atmosféricos. Para este propósito y con ayuda de otros centros de investigación que se plegaron a la iniciativa original, se envía un proyecto a la Organización Mundial de Meteorología (WMO por sus siglas en inglés), para instalar un laboratorio de estudios atmosféricos en Chacaltaya. El objetivo principal fue estudiar el comportamiento de gases y material particulado que llega a esta región, el transporte de estos elementos desde y hacia la tropósfera libre, así como los procesos asociados al comportamiento observado. El proyecto fue aprobado a principios del 2011 y se montó el laboratorio en diciembre de ese año. Las instalaciones fueron adecuadamente preparadas para este propósito a fin de garantizar el cuidado adecuado de los instrumentos y la adquisición correcta de los datos. En la estación se siguen estrictos protocolos de calibración y mantenimiento de los instrumentos ahí emplazados. Desde entonces el laboratorio funciona de manera ininterrumpida y más bien ha crecido en instrumentos y personal. Así mismo el número de instrumentos que permiten apoyar las medidas realizadas en Chacaltaya desde La Paz ha ido en aumento de manera continua.

El presente documento describe el trabajo que se está realizando en el laboratorio atmosférico de Chacaltaya (denominado a partir de ahora CHC/GAW), incluida una descripción del lugar, de la instrumentación existente en la actualidad más algunos resultados a la fecha y proyecciones futuras.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL LUGAR

El laboratorio Chacaltaya CHC/GAW se encuentra localizado a 5240 m snm a 16°21'1.78"S y

¹ Consultada en octubre 10, 2014

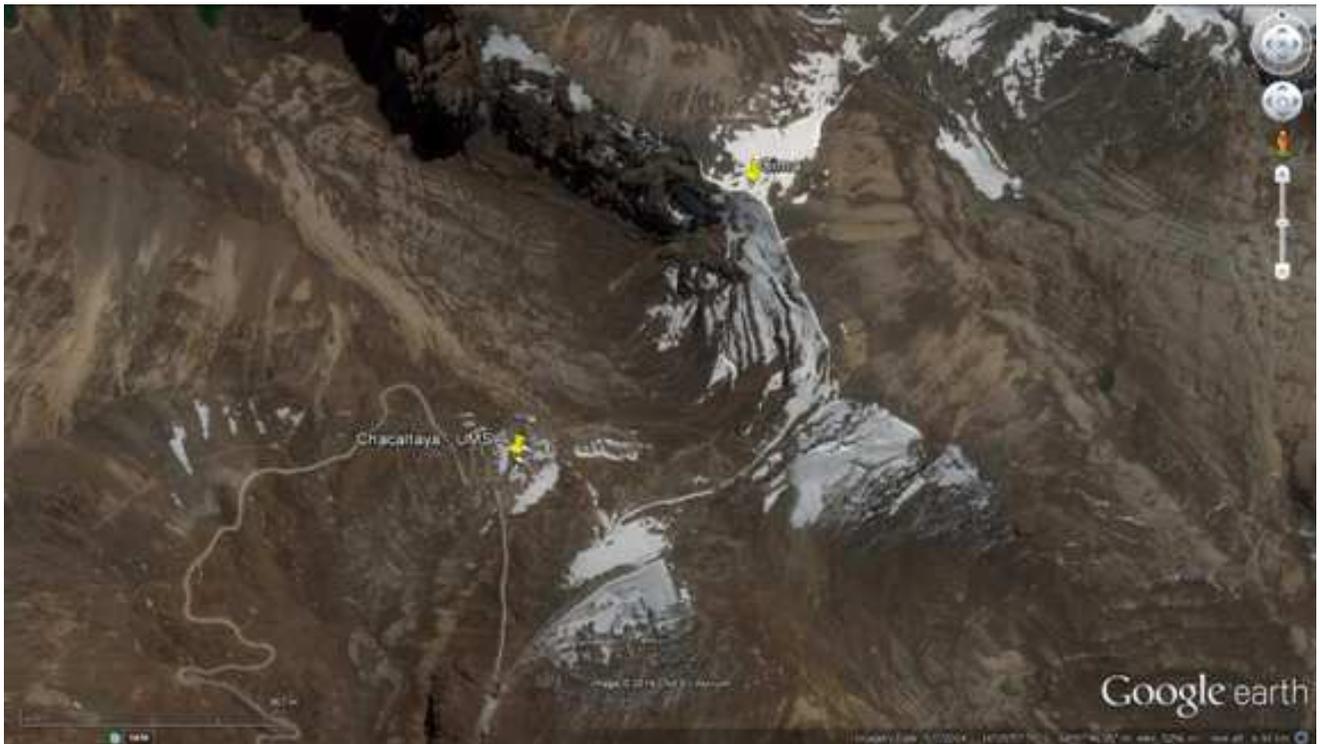


FIG. 1.— Imagen satelital obtenida de Google Earth de la región de Chacaltaya donde se ubica la estación CHC/GAW. Se marcan la ubicación de la estación así como la posición de la cumbre. El camino de acceso es claramente visible.

$68^{\circ}7'53.44''W$ en el Monte Chacaltaya. Comparte infraestructura con el laboratorio de Rayos Cósmicos del IIF–UMSA. En la cima del Monte existe una caseta (5380 m snm) a unos 500 m de GAW/CHC en dirección noreste (ver figura 1), que es utilizada para realizar algunas medidas como se describe ms adelante.

El laboratorio está orientado al este del Altiplano Central a aproximadamente 50 km del Lago Titicaca, el cuerpo de agua más grande la región, y a una distancia aproximada de 17 km al norte del conglomerado urbano La Paz–El Alto (y otras ciudades más pequeñas aledañas a éstas) que actualmente tiene una población aproximada de 1.6 millones de habitantes (INE, 2013). Las denominadas tierras bajas, Amazonía, están a unos 250 km en línea recta hacia el este de la estación en tanto que el Océano Pacífico se halla hacia el oeste a aproximadamente 350 km de distancia.

Las instalaciones son accesibles a través de un camino de tierra localizado a aproximadamente una hora y media por automóvil de las instalaciones del LFA en la ciudad de La Paz, lo que permite acceder al mismo fácilmente para fines de monitoreo, mantenimiento y descarga de información. A la fecha CHC/GAW tiene además acceso a través de Internet y cuenta con servicio de electricidad desde la red principal de electricidad a través de una línea de alta tensión mantenida por el IIF. Asimismo la infraestructura cuenta con personal de vigilancia permanente.

3. INSTRUMENTACIÓN

3.1. Chacaltaya

Al momento de la instalación inicial se emplazó un grupo de instrumentos que han funcionado, esencialmente, de manera continua hasta la fecha. La tabla 1 muestra un listado de los instrumentos/sistemas instalados a la fecha en la estación en Chacaltaya. En diciembre del 2012 se comenzó a tomar muestras isotópicas de precipitación mientras que en octubre 2013 se iniciaron las medidas isotópicas en vapor de agua a través del analizador isotópico de $\delta^{18}O$ y δD , que permite estudiar la historia convectiva e, indirectamente, la procedencia de las masas de aire (Tremoy et al. (2012)). Asimismo el equipo inicial de medida de CO_2 , basado en instrumentos LI–COR (ver tabla 1) ha sido reemplazado en mayo del 2014 por un instrumento Picarro que mide este gas y adicionalmente metano.

3.2. Cota–Cota (LFA)

A fin de complementar las medidas realizadas en Chacaltaya, un grupo de instrumentos fue instalado en las instalaciones del Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA), en el campus de la UMSA (3420 m snm, $16^{\circ}32'20.71''S$, $68^{\circ}3'58.69''W$). Algunos de estos instrumentos/sistemas estuvieron en funcionamiento antes de la fecha de la instalación de CHC pues formaban parte de estudios previos del LFA. La tabla 2 detalla los instrumentos actualmente en funcionamiento en este lugar.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan promedios a nivel estacional correspondientes a datos de los años 2012

TABLA 1
INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN CHACALTAYA.

Instrumento/Sistema	Descripción
<i>Mobility Particle Size Spectrometer</i> tipo TROPOS–SMPS.	El SMPS es un espectrómetro, tipo TROPOS–SMPS, de tamaños de partículas basado en la medición de su movilidad eléctrica, el cual incluye además un Contador de Partículas TSI modelo 3772. El rango de medida es de 10 a 500 nm. Es importante mencionar que este instrumento fue diseñado y construido por el instituto TROPOS (Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig, Germany), para que funcione en las condiciones atmosféricas de Chacaltaya, además fue calibrado usando el instrumento de referencia del WCCAP (A.Wiedensohler et al. (2012))
<i>Absorption Photometer</i> tipo MAAP (Multi angle Absorption Photometer).	El MAAP instalado en CHC/GAW es marca THERMO modelo 5012. Este instrumento mide el coeficiente de absorción de las partículas a una longitud de onda nominal de 637 nm. Para la medición, las partículas son depositadas en un filtro de cuarzo las cuales son iluminadas con un LED. Las medidas de coeficiente de absorción son relacionadas con la concentración másica de carbón negro (CN) ambiental a través de su sección eficaz σ (6.6 m ² /g). Un aspecto importante del MAAP es que mide la radiación dispersada por las partículas y usa las mismas para mejorar el producto final que es la medición del CN equivalente.
<i>Absorption Photometer</i> tipo Aethalometer AE–31.	Las muestras son recolectadas en filtros de cuarzo de manera continua, las cuales son irradiadas secuencialmente cada 5 minutos a 7 longitudes de onda: 370 nm (UV), 470 nm (azul), 520 nm (verde), 590 nm (amarillo), 660 (rojo), 880 nm (infrarrojo) y 950 nm (infrarrojo). El AE–31 mide el coeficiente de atenuación de la radiación debido a las partículas depositadas y determina la concentración másica del carbón negro a través de un factor de atenuación dado por el fabricante.
<i>Integrating Nephelometer</i> tipo Aurora 3000	Este instrumento mide tanto el coeficiente de dispersión total de las partículas como el coeficiente de retro–dispersión de las mismas a 3 longitudes de onda: 450 nm (azul), 525 nm (verde) y 635 nm (rojo). La muestra de aire a analizar es introducida en su cámara óptica y luego es iluminada de manera secuencial por los 3 LEDs. La radiación dispersada es medida por sensores colocados entre 10° y 170°.
<i>Neutral Cluster and Air Ion Spectrometer</i> (NAIS)	El NAIS permite la medición de la movilidad eléctrica tanto de partículas cargadas como de partículas neutras en el rango de 0.0013 a 3.2 cm ² V ^{–1} s ^{–1} que corresponde con el rango de tamaños de 0.8 a 42 nm; aunque las medidas para diámetros mayores a 25 nm tienen menor fiabilidad debido a limitaciones en su matriz de inversión. El NAIS tiene dos diferenciadores de movilidad eléctrica (DMA) idénticos que permite la medida simultánea de partículas cargadas positiva y negativamente.
Analizador de ozono Modelo 49i Thermo Scientific	La concentración de ozono superficial se mide en un rango de 0.05 ppb a 200 ppm por absorción de radiación ultravioleta a 254 nm. El instrumento intercala las medidas entre dos celdas para, al promediar ambos resultados, anular la deriva de la medida. Diariamente y de manera automatizada se verifica la respuesta del instrumento para el cero y una concentración conocida.
Analizador de monóxido de carbono tipo APMA–370	La concentración de monóxido de carbono (CO), en un rango de 0 a 50 ppm, se obtiene por absorción no dispersiva en el espectro infrarrojo, a 4.6 μ m (2165 cm ^{–1}). Internamente se corrige la interferencia del vapor de agua en el espectro de absorción.
Muestreador de alto volumen (<i>High–Volume Sampler</i>) marca Digitel	El muestreador de alto volumen permite tomar muestras de material particulado en filtros de cuarzo con impactadores intercambiables para la detección de partículas de diámetros aerodinámicos de 10 y 2.5 μ m (PM 10 y 2.5). Si bien el instrumento está diseñado para trabajar a un flujo nominal de 30 m ³ h ^{–1} , dadas las condiciones a 5380 msnm, este flujo se reduce, por lo que las partículas muestreadas son de menores diámetros a los nominales. Los filtros colectados se envían, en condiciones adecuadas, al Laboratorio de Glaciología y Geofísica Ambiental (LGGE, Grenoble, Francia), donde se analiza su composición química (no exhaustivamente).
Analizador de dióxido de carbono adaptado (modelo LSCE–ICOS–Kazán)	Este instrumento fue construido en el Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente (LSCE, París) en base a dos detectores Licor 6262 no dispersivos ubicados en paralelo. Permite obtener la concentración de CO ₂ por absorción en el espectro infrarrojo a 4.26 μ m. Para evitar la interferencia del vapor de agua, una trampa de agua se ubica antes de la entrada del instrumento y para evaluar la deriva del mismo, cada 2 horas se inyecta un gas de concentración conocida en el mismo. El instrumento se calibra mensualmente de manera semi–automática.
Analizador de dióxido de carbono y metano tipo Picarro UG ESP–1000	Este instrumento permite medir concentraciones traza de gases a través de espectroscopía óptica de absorción. La tecnología utilizada es el decaimiento de la absorción medida a la salida de una cavidad. La misma cuenta con tres espejos lo cual permite aumentar el camino óptico del haz de luz, aumentando así la sensibilidad de la detección (tecnología <i>cavity ring down spectroscopy</i> o CRDS). El haz de luz se genera con un laser regulable a 6057.1 cm ^{–1} para el ¹² CO ₂ , 6057.8 cm ^{–1} para el ¹² CH ₄ y a 6237.5 cm ^{–1} para el vapor de H ₂ O. El instrumento se calibra cada 15 días de manera automática.
Analizador de isótopos estables de vapor de agua tipo Picarro L2130i	El principio de operación es el mismo que el del instrumento anterior, con la diferencia de que éste está destinado a la cuantificación de los isotópicos del vapor de agua constituidos por deuterio y ¹⁸ O. La detección de HDO, H ₂ ¹⁶ O y H ₂ ¹⁸ O se realiza entre 7193.5 y 7184.0 cm ^{–1} (1.39 μ m). El instrumento se calibra cada 25 horas de operación de manera automática.
Analizador de mercurio gaseoso tipo Tekran 2537A ^a	El instrumento mide mercurio elemental. La muestra de aire pasa por una trampa de oro, en la cual se amalgama el mercurio total presente en la muestra. Luego, el Hg se desorbe a 600°C bajo una atmósfera de Ar en forma de mercurio elemental (Hg ⁰), para luego pasar a una celda de detección, donde su concentración se mide por fluorescencia a 253.7 nm.

^aPara una campaña de un año

<i>Hygroscopicity Tandem Differential Mobility Analyzer (H-TDMA)^a</i>	Este instrumento fue diseñado y construido por el Departamento de de Ciencia Ambiental Aplicada de la universidad de Estocolmo. Con este instrumento es posible medir el factor de crecimiento de las partículas y además poder calcular su higroscopicidad. Básicamente el HTDMA mide el factor de crecimiento de las partículas en dos etapas: en la primera separa de la muestra las partículas con un diámetro específico, y en la segunda se las hidrata con agua destilada y se las hace crecer. Como resultado de este crecimiento se produce una distribución de tamaños de la cual el centro indica el nuevo diámetro de las partículas y la razón entre el diámetro inicial y el diámetro indicado por el centro de la distribución nos da el factor de crecimiento y nos indica si las partículas muestreadas son higroscópicas o hidrofílicas.
Estación meteorológica automática en la cumbre	Conformada por: un anemómetro Young 5103, un barómetro Vaisala PTB110, un radiómetro Kipp & Zonen CNR1, un sensor de T-HR Campbell Scientific HMP45C, un sensor de temperatura del suelo Campbell Scientific CS-107 y un pluviómetro calefaccionado CS-385. La estación pertenece al SENAMHI pero, gracias a un acuerdo de cooperación interinstitucional, el LFA se encarga de la descarga de datos y mantenimiento general de la misma.
Estación meteorológica automática en el observatorio	La estación automática instalada en el observatorio cuenta con un sensor sónico de viento marca GILL para medir tanto la velocidad como la dirección del mismo. También cuenta con sensores de presión, temperatura y humedad de fabricación Vaisala. Los datos son adquiridos automáticamente cada minuto a través de la comunicación TCP/IP.

TABLA 2
INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN DEPENDENCIAS DEL LFA-UMSA EN COTA-COTA.

Instrumento/Sistema	Descripción
Sistema LIDAR (LIPAZ)	Es un sistema elástico y consta de un emisor y un receptor en configuración coaxial. El emisor está constituido por un láser de Nd:YAG emitiendo pulsos de 80 mJ a una longitud de onda de 532 nm (20 Hz) y un expansor de haz 5x. El receptor consta de un telescopio newtoniano ($f = 700$ mm y $\phi = 250$ mm) que colecta la señal de luz retrodispersada en la atmósfera, seguido por un sistema óptico que colima, filtra (1 nm) y enfoca los haces de luz sobre un fotomultiplicador (PMT). Este detector convierte la señal de luz retrodispersada en señal eléctrica, cuya intensidad y retraso temporal se almacena en una matriz para su posterior análisis. El proceso de adquisición de datos se realiza con la ayuda de un osciloscopio Tektronix DPO3014 controlado mediante el puerto GPIB y un programa de desarrollado en Labview. Los datos obtenidos, tres perfiles por segundo, permiten estudiar la evolución de los aerosoles presentes en la atmósfera sobre Cota-Cota en periodos de interés excepto en horas cercanas a mediodía local debido al ruido introducido por luz natural dada la altura que alcanza el Sol en nuestra latitud.
Espectrofotómetro Brewer (ozono & UV)	Es un espectrofotómetro que mide la columna total de ozono y radiación ultravioleta B espectral. El instrumento, a prueba de agua, funciona de manera automática siguiendo al Sol y también realizando medidas cenitales. El instrumento es calibrado contra el Brewer viajero cada dos o tres años.
Piranómetros UV tipo YES UV1	Miden radiación solar UV integral biológicamente efectiva entre 280 y 320 nm. El sistema es regulado térmicamente para garantizar la estabilidad de las medidas.
Fotómetro solar (CIMEL)	Es un fotómetro solar que mide radiación solar a diversas longitudes de onda entre el UV y el IR cercano. El instrumento sigue al Sol y también escanea el cielo para estimar irradiancia solar directa así como irradiancia del cielo que llega a la superficie terrestre. A partir de esas medidas el instrumento mide el espesor óptico de aerosoles (o AOD en inglés).
Impactor (MOUDI, sistema portátil)	Es un impactador en cascada que permite medir el tamaño aerodinámico de los aerosoles entre 0.18 y 18 μ m. El sistema colecta a las partículas en ocho etapas entre esos tamaños. La masa y características químicas del material particulado pueden ser analizadas posteriormente.
Analizador de dióxido de carbono tipo LI-COR 820	Es un analizador de CO ₂ que utiliza técnicas infrarrojas no-dispersivas (NDIR en inglés) para medir la concentración de este gas.
Analizador de monóxido de carbono tipo Horiba APMA-370	Ver tabla 1.

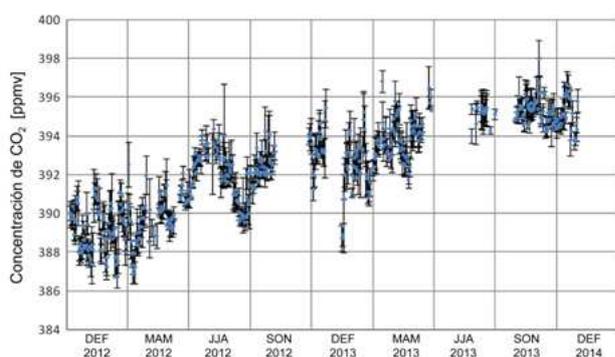


FIG. 2.— Concentración del dióxido de carbono medida en la CHC/GAW entre diciembre 2011 y enero 2014. Se muestran los promedios diarios (puntos azules) en ese periodo así como variabilidad diaria expresada por una desviación estándar de esos datos (barras).

y 2013 de las diferentes medidas realizadas en Chacaltaya. Para este primer reporte acerca de la estación Chacaltaya nos abocamos a datos trimestrales definidos de acuerdo a la tabla 3.

El énfasis en el presente trabajo está centrado en las estaciones húmeda y seca que están claramente definidas en datos meteorológicos de estaciones de la región (M.Andrade et al. (2015)). Los periodos MAM y SON son considerados de transición aunque el mes de septiembre es el mes de mayor actividad de producción de humo debido a la quema de biomasa (M.Andrade et al. (2015)).

El análisis de vientos medidos en la cumbre (5380 m asl) muestra la prevalencia de vientos del oeste en la época seca así como prevalencia de vientos del este durante la época húmeda. Estos hechos son consistentes con estudios anteriores (R.Garraud et al. (2008)). Estas observaciones junto a la ubicación de la estación meteorológica sugieren que la estación mide el comportamiento regional antes que local.

La descripción de las medidas en Chacaltaya por los varios instrumentos instalados ahí se refiere a partir de ahora a los periodos definidos en los párrafos previos a no ser que se indique lo contrario como en el caso de dióxido de carbono que claramente muestra un comportamiento no estacionario.

4.1. Dióxido de carbono

El equipo de medida usado desde diciembre 2011 hasta mayo 2014 está basado en un instrumento descrito en la tabla 1. Los datos que se usan para este trabajo corresponden a diciembre 2011 hasta diciembre 2013 y corresponden a datos horarios en ese periodo. A partir de los mismos se calcularon promedios diarios así como promedios mensuales y estacionales. La fig. 2 muestra el comportamiento de la concentración de CO_2 en CHC/GAW para el periodo analizado. Se observa claramente el incremento en la concentración en los dos años de observaciones pero también dos periodos (nov–dic 2012 y jun–jul 2013) en los cuales no se tiene datos por fallas en el instrumento. Por esta última razón es aún difícil establecer el comportamiento anual promedio del CO_2 medido en CHC. La figura 3 muestra el

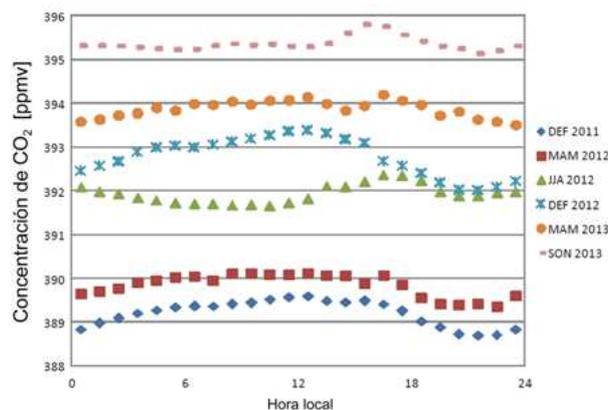


FIG. 3.— Concentración horaria promedio trimestral de dióxido de carbono medida en CHC/GAW. Un incremento claro en la concentración de este gas es visible en el gráfico.

comportamiento promedio diario en los semestres con suficiente información para el periodo de estudio. Una amplitud, diferencia en concentración de CO_2 entre el día y noche, del orden de 1 ppmv es evidente para los semestres DEF y MAM mientras la amplitud es menor en los semestres restantes. Esto contrasta con estudios realizados en el área metropolitana (M.Andrade & Gutiérrez (2007)) donde se observa un claro ciclo diurno con una amplitud del orden de 10 ppmv². Este hecho sugiere una débil influencia de la capa límite planetaria (CLP) en la concentración de CO_2 en Chacaltaya. Finalmente, un ajuste lineal a los promedios trimestrales da un incremento de 3.5 ± 0.3 ppmv/año que es un valor un poco mayor que el reportado en Mauna Loa (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>). Cabe hacer notar que estos datos son preliminares pues la intercomparación y calibración entre los dos instrumentos que miden CO_2 está en proceso.

4.2. Ozono superficial

Las concentraciones promedio de ozono superficial en Chacaltaya son de la misma magnitud que aquellas reportadas en Pico Espejo a 4765 msnm (S.Calderón et al. (2008)), aunque el promedio anual es ligeramente más elevado: 33.6 ppbv³ contra 26.6 ppbv.

En los diagramas de cajas de la figura 4 se presentan los datos de concentración de ozono en el periodo 2012–2013. Allí se observa que los valores más bajos (30.5 ± 5.8 ppbv) se dan entre diciembre y mayo durante la época húmeda en tanto que el valor más elevado (41.0 ± 6.8 ppbv) corresponde a la primavera, que coincide con la época de quemadas en la región. Este último valor es ligeramente más alto que el del trimestre JJA, 39.0 ± 6.3 ppbv, que corresponde típicamente a un periodo seco pero con un número de quemadas mucho menor a SON.

Estadísticamente, los datos que exceden el valor máximo (o son menores al mínimo) se definen como

² Partes por millón de volumen

³ Partes por billón (10^9) de volumen. Equivale a la fracción molar nmol/mol.

TABLA 3
DEFINICIÓN DE LOS TRIMESTRES USADOS EN ESTE DOCUMENTO.

Meses	Acrónimo	Tipo de estación	Observaciones
Diciembre, enero y febrero	DEF	Húmeda	Máxima precipitación típicamente en enero
Marzo, abril y mayo	MAM	Transición húmeda a seca	Marzo todavía tiene una alta precipitación en la región
Junio, julio y agosto	JJA	Seca	Climatológicamente el mes más seco en la región corresponde a julio.
Septiembre, octubre y noviembre	SON	Transición seca a húmeda	Septiembre podría ser clasificado como un mes seco en base a algunas variables

valores atípicos. Sin embargo, un análisis preliminar de nuestros datos sugiere que el gran número de valores por encima del valor máximo se debe a la formación de ozono *in situ* (o transporte lento) gracias a la existencia de condiciones meteorológicas favorables (baja velocidad del viento y días despejados) en combinación con la presencia de precursores. Los precursores necesarios para la formación fotoquímica de ozono incluyen óxidos de nitrógeno de las emisiones de motores de combustión, por lo que la influencia de contaminación urbana en Chacaltaya resultaría una condición necesaria en ausencia de chaqueos (trimestre MAM).

En lo que respecta a los valores por debajo del valor mínimo, estos parecen estar relacionados con transporte de masas de aire con menos precursores, es decir aire limpio, o bien condiciones propicias para la eliminación de ozono *in situ*.

El incremento del valor mínimo entre junio y noviembre parece estar relacionado con un aumento regional de la concentración de ozono, probablemente debido a la quema de biomasa generalizada (chaqueos), como se evidencia en el análisis químico del material particulado.

4.3. Análisis químico de partículas PM_{10}

De las muestras obtenidas en la cumbre (ver descripción en tabla 1) se obtienen concentraciones para varios elementos como levoglucosan, carbono elemental y orgánico, potasio (en su forma soluble, K^+) y otros iones. Las muestras se toman en filtros de cuarzo tanto de día (entre las 9 am y 7 pm) como de noche (de 7 pm a 9 am del día siguiente) de manera intercalada durante 3 a 5 días. De estos compuestos se discuten dos en este trabajo: el K^+ y el levoglucosan. Ambos son empleados como trazadores de quema de biomasa, siendo el primero un trazador inorgánico y el segundo un marcador orgánico producido exclusivamente por la descomposición térmica de la celulosa.

La figura 5 muestra las concentraciones obtenidas por semestre para las temporadas extendidas de lluvias (de noviembre a abril, 29 muestras) y seca (de mayo a octubre, 35 muestras). Si bien el K^+ se encuentra más concentrado en la temporada seca (12.97 ng/m^3 de día y 8.55 ng/m^3 de noche) que en a la temporada húmeda (5.87 ng/m^3 de día y 6.15 ng/m^3 de (7.98 ng/m^3 de día y 4.14 ng/m^3 de noche en época seca respecto a 0.90 ng/m^3 de día y 1.12 ng/m^3

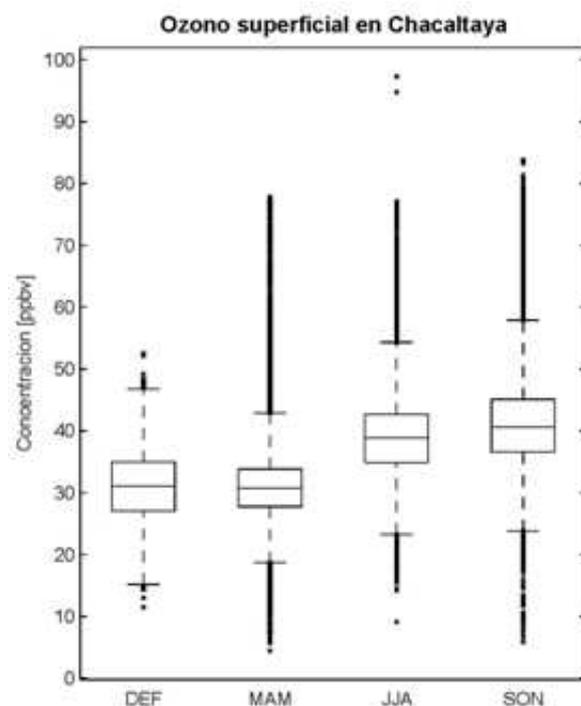


FIG. 4.— Diagramas de cajas para la concentración de ozono superficial en Chacaltaya, por trimestre. La línea horizontal dentro de la caja corresponde a la mediana de los valores. El límite inferior de la caja corresponde al primer cuartil (25%) y el superior al tercer cuartil (75%). Las líneas punteadas hacia ambos lados indican el rango entre los valores máximo y mínimo, definidos como la media ± 2.7 veces la desviación estándar, respectivamente. Las cruces fuera de este rango corresponden a valores atípicos (vea el texto para más explicaciones). Datos del 1/1/2012 al 31/12/2013.

de noche en época de lluvias). Este marcado comportamiento se debe a la influencia regional del material particulado emitido en temporada de chaqueos.

Respecto a las diferencias entre el día y la noche durante la temporada noche), este contraste resulta más evidente en el caso del levoglucosan seca (5b y 5d), en el día cuando se detecta una mayor concentración de ambos trazadores respecto a la noche, lo cual podría dar cuenta de emisiones de fuentes más cercanas, transportadas por la CLP (ver sección 4.5).

Finalmente, las concentraciones nocturnas de K^+ y levoglucosan medidas en CHC/GAW, asociadas al comportamiento de la CLP, sugieren que estos valores corresponden a los valores encontrados en la tropósfera libre de la región.

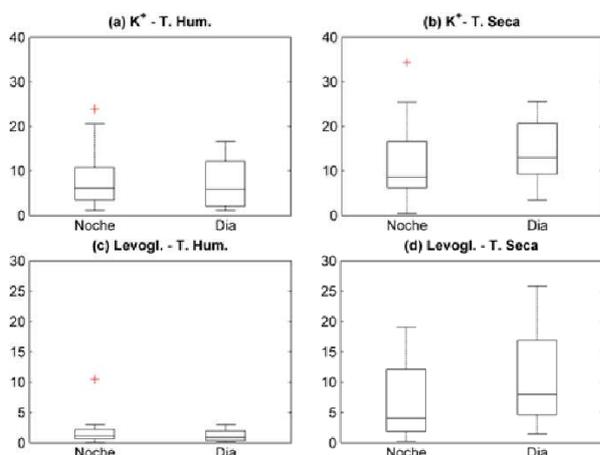


FIG. 5.— Diagramas de cajas (idem que fig.4) para las concentraciones de potasio (K^+) y levoglucosan medidas en GAW/CHC para el periodo 2012–2013. Las medidas están divididas en época seca (MJJASO) y húmeda (NDEFMA). Adicionalmente las mismas se clasifican en noche y día por el tipo de muestreo. Los valores reportados de potasio no han sido corregidos por el posible aporte marino. En todos los casos los promedios medidos están por encima del límite de detección. Para transformar las concentraciones a condiciones estándar (1 atm, 25°C), multiplicarlas por 0.575.

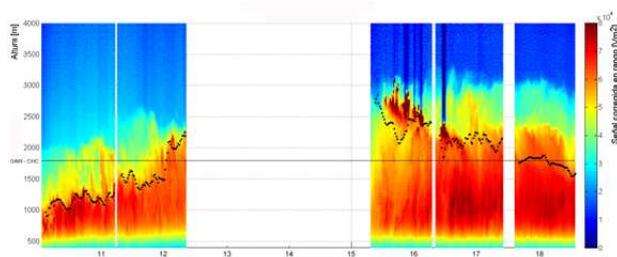


FIG. 6.— Evolución de la capa límite del día 14 de septiembre de 2012 sobre Cota–Cota obtenida con el lidar LIPAZ del LFA. La línea punteada muestra el nivel estimado de la capa límite planetaria obtenido con ayuda del algoritmo de wavelets. Se observa que la altura de la capa límite, para este día en particular, sobrepasa algunas horas el nivel al que se encuentra la estación GAW–CHC (línea negra horizontal continua a 1780 m sobre Cota–Cota).

4.4. LIDAR

Los datos de este instrumento, localizado en Cota–Cota, permiten estimar el comportamiento de la CLP en la región. En este caso, sin embargo, no se tienen datos cada día por razones logísticas y presupuestarias. La figura 6 muestra los resultados obtenidos para el 14 de septiembre de 2012. La línea punteada que se muestra en la imagen, generada mediante la aplicación de la técnica del algoritmo de wavelets (M. Brooks (2003)), muestra la altura de la CLP para diferentes horas del día. Se puede observar que a las 10 de la mañana hora local (14:00 UTC) la altura de la CLP se encuentra a los 1200 metros sobre el nivel de la estación de Cota Cota y que existe una capa residual que se extiende hasta casi los 2000 metros. La actividad convectiva generada por el incremento de la radiación solar se manifiesta en un rápido incremento en la altura de la capa límite,

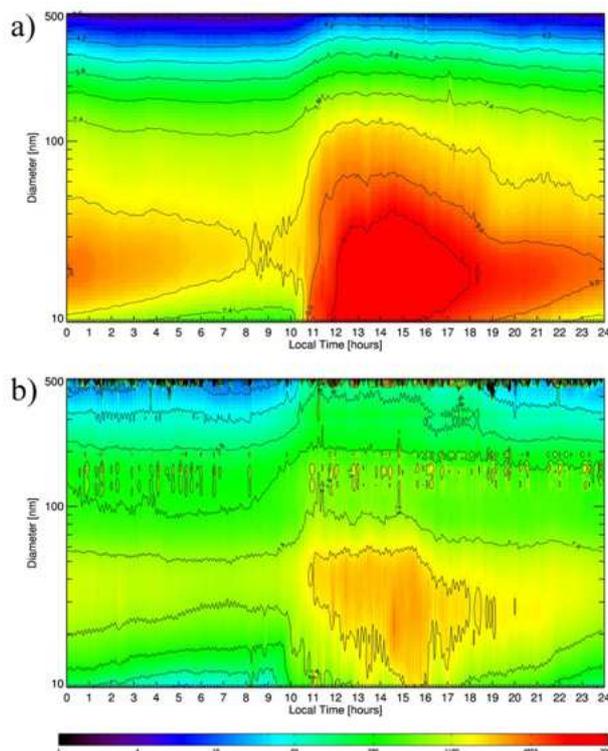


FIG. 7.— Evolución temporal diaria promedio de la distribución de tamaño de partículas que llegan a CHC/GAW en el rango 50–500 nm para a) la época seca (JJA) y b) la época húmeda (DEF). Los colores indican la concentración de partículas mientras que líneas indican valores de número de partículas ($\times 10^{-3}$).

llegando a sobrepasar los 2000 metros alrededor del medio día. La imagen también nos indica la existencia de nubes alrededor de las 15:30 horas (arriba de 4 km, y por tanto no visibles en la imagen) y que la altura de la CLP y las intrusiones de aire limpio proveniente de la tropósfera libre disminuyen por la tarde al disminuir el calentamiento producto de la radiación solar. La región blanca indica que la altura del Sol en ese periodo del día introduce mucho ruido a la señal, debido a la radiación solar, haciendo imposible obtener buenos datos en ese lapso.

La línea negra horizontal de la misma figura, ubicada a 1780 metros sobre la superficie de Cota–Cota y por tanto a 5240 m snm, señala la altura a la cual se encuentra la estación GAW/ CHC. Esto sugiere que la misma podría encontrarse dentro de la capa límite en ciertos momentos del día, especialmente entre las 11 y 16 hora local, y que aerosoles generados en las ciudades de La Paz y El Alto llegan a la estación bajo las condiciones meteorológicas adecuadas. Es importante mencionar, sin embargo, que el comportamiento de la capa límite descrito para este día no ocurre todos los días y que en diferentes ocasiones la altura máxima de la capa límite sobre Cota–Cota no llega a la altura de la estación GAW/CHC. Esto no quiere decir necesariamente que la estación quede en la tropósfera libre pues la altura de la superficie también juega un papel importante al momento de formar la CLP. Este hecho se estudiará más cuidadosamente más adelante.

4.5. Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

En base a las medidas tomadas desde enero del 2012 hasta diciembre 2013 se caracterizó la variabilidad estacional y diurna de la distribución de tamaños en el rango de 10 a 500 nm en la estación Chacaltaya. Se observa que la concentración de partículas en Chacaltaya no es constante sino que presenta una dependencia con el tamaño de las partículas. Ahora bien, si se toman partículas de un diámetro dado se puede apreciar que al transcurrir el día la concentración de partículas presenta una dependencia temporal (figuras 7a y 7b). Esta dependencia de la concentración de partículas tanto con el diámetro como con el tiempo se la observó en otros estudios realizados en estaciones con similares características atmosféricas a las de Chacaltaya (K.Sellegrí et al. (2010)). Si las medidas se separan en época seca (JJA) y época húmeda (DEF) claramente se observa que la distribución de tamaños son diferentes en ambas épocas (figura 7a y 7b).

Al observar la distribución de tamaños en época seca se puede apreciar que la mayor concentración de aerosoles se registra en horas con sol entre las 10 y 18 horas. En este periodo, las concentraciones de aerosoles en los modos Nucleación (de 10 a 30 nm) y Aitken (30 a 100 nm) son mayores en comparación con el modo Acumulación (100 a 500 nm). Dentro de este periodo del día la alta carga de aerosoles comienza, en promedio, entre las 10 y 11 horas incrementando primero la carga de aerosoles en el modo Nucleación, luego éstos van creciendo y aumentando gradualmente la carga de aerosoles del modo Aitken. Desde aproximadamente las 19 horas la carga de aerosoles en el modo Nucleación va disminuyendo hasta registrarse los mínimos a tempranas horas del día. El comportamiento es similar en los modos Aitken y Acumulación. Estudios realizados en otros lugares (por ejemplo en la estación francesa Puy de Dôme) indican que, de igual manera, se observa que la distribución de tamaños varía en el transcurso del día (H.Venac et al. (2009)).

Similarmente, se observa que en época húmeda entre las 10 y 18 horas se registran las mayores concentraciones diarias de aerosoles, pero en menor magnitud comparada con la época seca. Un aspecto importante es que el incremento de la carga de aerosoles empieza en el modo Aitken y no en el modo Nucleación como en la época seca (figura 7b). Este hecho puede estar relacionado con las diferentes condiciones meteorológicas de la estación tales como alta humedad relativa y mayor cantidad de precipitación. Por otro lado, esta diferencia también puede indicar que existe una diferente fuente de aerosoles en esta época del año.

Algo que llama la atención es que a pesar de las muy diferentes condiciones meteorológicas entre época seca y húmeda, el incremento en la concentración de partículas en la estación GAW/CHC ocurre entre las 10 y 11 am (hora local) en ambos periodos. Esto parece estar relacionado con el arribo de pre-

cursores y material particulado a la estación proveniente del área metropolitana de La Paz.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Datos obtenidos por diferentes instrumentos operando en CHC/GAW muestran dos cosas de manera clara: a) Existe un marcado incremento de la concentración de aerosoles entre las 10 y 11 am (hora local) y un descenso lento hasta los valores iniciales alrededor de la media noche. b) A nivel estacional existe un claro incremento de material particulado y marcadores de quema de biomasa vegetal en época seca respecto de lo medido en época húmeda.

Datos obtenidos por el sistema lidar en el LFA sugieren que el marcado incremento en la concentración de partículas medido en Chacaltaya (promedio diario) es producto del comportamiento diario de la capa límite. Esto es, Chacaltaya se encontraría en la troposfera libre entre medianoche y 10 am, y dentro de la capa límite entre 11 am y medianoche aproximadamente. Esto implicaría que la contaminación producida por el conglomerado urbano llega a CHC/GAW prácticamente cada día entre las 10 y 11 am. Aunque los datos diarios sugieren que esto ocurre frecuentemente, los mismos datos también sugieren que se necesitan condiciones meteorológicas adecuadas para que dicho material (gases y material particulado) arribe a Chacaltaya. Se requieren estudios más profundos para establecer con claridad los mecanismos involucrados.

Por otro lado, la alta concentración de ozono y de marcadores de quema de biomasa vegetal durante la época seca, quemadas que se producen fundamentalmente en tierras bajas tanto de Bolivia como de países aledaños (Carmona-Moreno et al. (2005)), da cuenta de la representatividad de este sitio a nivel regional. Las medidas de largo plazo corroboran el hecho que humo y gases producto de estas quemadas (o productos secundarios) llegan a Chacaltaya a pesar de la altura de la estación tal como reportan (M.Andrade et al. (2011)).

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

El hecho que la estación GAW/CHC se encuentre parte del tiempo en la troposfera libre pero que a la vez haya una clara señal producida por el área metropolitana cercana hace de este sitio un lugar muy interesante para monitoreo a diferentes escalas de tiempo o campañas intensivas. Los datos indican que la estación mide gases y partículas transportados por masas de aire de origen cercano y también de regiones lejanas. Esto permite estudiar eventos de escala local y regional. Adicionalmente, dada la altura de CHC/GAW, es posible que eventos de transporte de gases y material particulado desde y hacia la troposfera puedan ser estudiados a detalle con la instrumentación existente y/o futura. Resultados a detalle de estos primeros dos años de medidas (2012–2013) son reportados en otros artículos.

REFERENCIAS

- Andrade M., Mamani R., Velarde F., Biggeman D., Zaratti F. & Forno R. (2011), *Revista Boliviana de Física* **20**, 42
- Wiedensohler A. et al. (2012), *Atmospheric Measurement Technologies* **5**, 657
- Carmona-Moreno C., Belward A., Malingreau J.-P., Hartley A., Garcia-Alegre M., Antonovskiy M., Buchshtaber V. & Pivovarov V. (2005), *Global Change Biology* **11**, 1537
- Venac H., Sellegri K., Villani P., Picard D. & Laj P. (2009), *Atmospheric Chemistry and Physics* **9**, 1465
- Sellegri K., Laj P., Venzac H., Boulon J., Picard D., Villani P., Bonasoni P., Marinoni A., Cristofanelli P. & Vuillermoz E. (2010), *Chemical Physics* **10**, 10679
- Andrade M., Gutiérrez R., Forno R., & Velarde F. (2011), *Monitoreo de Monóxido de Carbono en la Atmósfera de la ciudad de La Paz y Chacaltaya, Informe técnico del proyecto "Monitoreo de monóxido de carbono en la atmósfera de La Paz y el aporte de fuentes por quema de materia vegetal"*, DIPGIS, Universidad Mayor de San Andrés.
- Andrade M. et al. (2015), *First Results from a High altitude (5240m asl) GAW Station in the Central Andes: Chacaltaya (CHC)*, Bolivia.(En preparación)
- Andrade M. & Gutiérrez R. (2007), *Potenciamiento de la red de monitoreo de Dióxido de Carbono en el Valle de La Paz*, Informe Técnico, Laboratorio de Física de la Atmósfera, Universidad Mayor de San Andrés.
- Brooks M. (2003), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **20**, 1092
- Garreaud R., Vuille M., Compagnucci R. & Marengo J. (2008), *PALAEO3 Special Issue (LOTRED South America)* **281**, 180
- Calderón S., Iglesias M., Ramoni E., Hoffmann J., Carrillo P., Kreiji R., Hochschild R., Gross B. & Jochen G. (2008), *Revista de Ciencia e Ingeniería* **29**, 97
- Tremoy G., Vimeux F., Mayaki S., Souley I., Cattani O., Risi C., Favreau G. & Oi M. (2012), *Geophysical Research Letters* **39**, L08805

CONDICIONAMIENTOS A LA SISMICIDAD EN BOLIVIA

CONDITIONS FOR SEISMICITY IN BOLIVIA

EDGAR LIBORIO RICARDI YARVI

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

Una revisión de la literatura relacionada con la sismicidad en la región de los Andes centrales (principalmente) nos permite concluir que los movimientos telúricos denominados "terremotos" son de mayor magnitud en el lado occidental del arco volcánico actual (en la cordillera occidental del territorio boliviano). En el lado oriental de este arco volcánico, y en general a lo largo de toda la cordillera de los Andes, los terremotos son de menor magnitud.

La sismicidad en territorio boliviano se reduce a un promedio de 3.5 grados de magnitud. Eventualmente se alcanza magnitudes mayores a los 5 grados (de foco superficial) y en casos excepcionales los terremotos son de gran intensidad (por ejemplo el de Aiquile en 1998), los que ocurren por acomodamiento de bloques (con foco de profundidad intermedia) o bien por deslizamiento de masas rocosas, como el terremoto de Consata–Mapiri en 1947. Un caso excepcional de terremoto de gran magnitud fue el que ocurrió entre las provincias Iturrealde–Ballivián (Beni) en 1994 y alcanzó 8.6 grados de magnitud; éste fue reconocido mundialmente como de foco de gran profundidad (630 Km), lo que resultó en una baja intensidad en superficie.

Bolivia está bien definida como un territorio de sismicidad intermedia, que está confirmada por las estimaciones de las observaciones geológico–estructurales, e inclusive por las estimaciones realizadas a partir de mediciones con redes de GPS.

Descriptor: Sismicidad — Regiones geográficas: Sudamérica — Terremotos

Código(s) PACS: 91.30.Dk — 93.30.Jg — 91.30.P-

ABSTRACT

A review of the literature about the seismicity in the central Andes region (mainly) allows us to conclude that the telluric movements known as earthquakes have greater magnitudes in the western side of the volcanic arc (western cordillera in Bolivian territory) while in the eastern side of this volcanic arc, and in general along the whole Andes cordillera, the earthquakes have lesser magnitudes.

Seismicity in the Bolivian territory has an average magnitude of 3.5 degrees, eventually reaching magnitudes greater than 5 degrees (with superficial focus); high intensity earthquakes are exceptional (as the one in Aiquile, 1998) and occur by accommodation of blocks (deep focus) or by the slipping of rock masses, as the Consata-Mapiri earthquake in 1947. An exceptional earthquake with a magnitude of 8.6 degrees occurred in 1994 in the Iturrealde-Ballivián province (Beni) with deep focus (630 km) resulting in a low surface intensity.

Bolivian territory is well defined as having an intermediate seismicity which is confirmed by geological and structural observations, as well as by estimations drawn from GPS networks measurements.

Subject headings: Seismicity — Geographical regions: South America — Earthquakes.

1. GENERALIDADES

La fuente de los terremotos son los focos o hipocentros, que son zonas de la corteza terrestre donde sistemáticamente se va ejerciendo grandes esfuerzos que son resistidos por las masas rocosas, deformándolas y acumulando energía de naturaleza elástica. Cuando el material ya no puede resistir

estos esfuerzos entonces se produce la fractura del mismo, con la aparición de superficies de deslizamiento entre las partes (fallas geológicas), generalmente visibles en la superficie de la Tierra. Así, se libera una parte de la energía acumulada en forma de ondas sísmicas que pueden viajar a grandes distancias del foco. Las dimensiones de las superficies de ruptura (fallas) y la distancia del desliza-

miento entre éstas definen la magnitud del evento telúrico. La magnitud, caracterizada según la escala de Richter, es una medida intrínseca del foco y se la determina con base a ciertas características de los registros sísmicos de observatorios localizados a diferentes distancias. Una de las formas usuales de calcular esta magnitud es $M_W = 2/3 \log M_0 - 1.07$, donde: $M_0 = \mu SD$ es el momento sísmico (que representa la energía liberada por el terremoto), S es el área de ruptura, D es el deslizamiento entre los bloques y μ es el módulo de cizalla entre las rocas. Cuando se observa las ondas superficiales, la magnitud del terremoto se calcula como $M_S = \log(A/T) + 1.66 \log D + 3.3$, donde: D es la distancia foco-estación, A es la amplitud del movimiento del suelo y T es el periodo de la onda.

Otro parámetro que se utiliza para caracterizar los efectos de un terremoto es la intensidad. Esta cantidad se mide por el efecto que provoca la energía sísmica en cada lugar por el que pasa sobre la superficie de la Tierra. La intensidad es alta cerca del foco del terremoto y disminuye a medida que aumenta la distancia del foco. Aunque la intensidad es una cantidad física, su estimación numérica (escala de Mercalli) es relativamente subjetiva pues depende de las características de las rocas sobre las cuales se realiza la evaluación. En este caso lo que interesa es la medida del daño ocasionado por el terremoto, dependiendo de cuánto se haya modificado la geología de la zona, las construcciones civiles y las pérdidas humanas y económicas.

Acerca de los focos (o hipocentros) de los terremotos diremos que éstos, dependiendo de su profundidad, se clasifican en: superficiales, intermedios y profundos. Los focos de los terremotos vinculados a fallas geológicas (planas y con distintas inclinaciones) que no se extienden a grandes profundidades, en el mejor de los casos alcanzan distancias comparables al espesor de la corteza terrestre (aproximadamente 30 km). En el caso de los terremotos con focos superficiales, el límite máximo de profundidad es de 60 km. Los terremotos con focos de profundidad intermedia, generalmente están vinculados a superficies de contacto entre capas que se encuentran a profundidades iguales al espesor de la corteza, donde una de ellas se sumerge por debajo de la otra, o bien la corteza está en contacto con material del manto. Estos focos se localizan hasta los 300 km de profundidad. Por otra parte, los terremotos de foco profundo se producen en los bordes de la lámina en sumersión que está en contacto con el material del manto a grandes profundidades (cientos de km); allí este borde se desmorona adentro del manto liberando energía sísmica en forma de ondas.

2. CONTEXTO DEL ESTUDIO DE SISMICIDAD EN LOS ANDES CENTRALES

Para obtener una idea del contexto en el que se estudia la sismicidad en territorio boliviano, revisemos primero los datos de sismicidad en los países vecinos de interés.

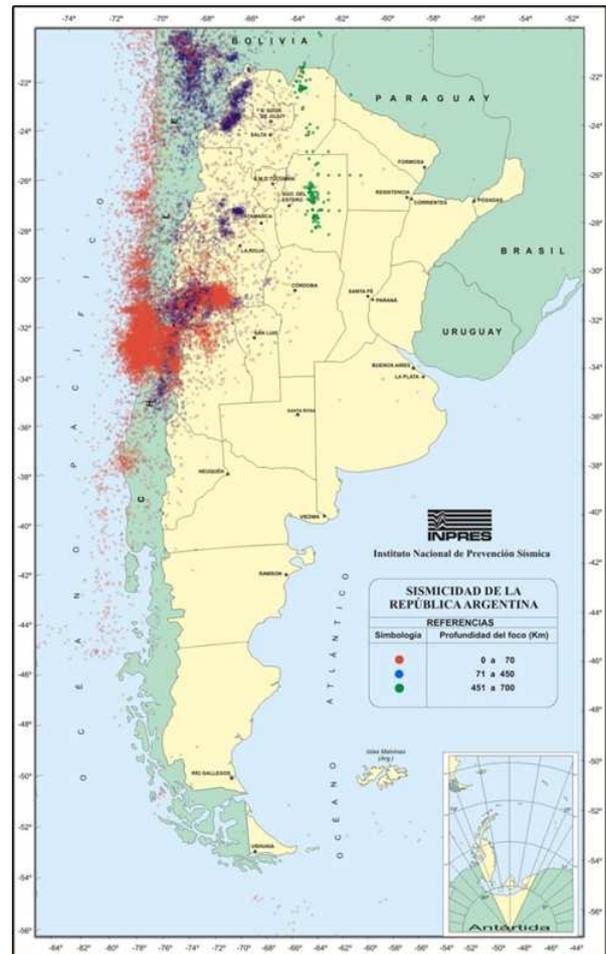


FIG. 1.— Mapa histórico de sismicidad en Argentina.

2.1. Sismicidad en Argentina

Nos referiremos a dos fuentes de datos: Historia de los Terremotos en la República Argentina (Tabla 1) y el Mapa de Sismicidad de la República Argentina (Fig. 1) acompañado por Corte transversal del macizo andino a la altura de la latitud de Salta (Fig. 2).

Un análisis de la información que proporciona la Tabla 1 conduce a las siguientes anotaciones:

1. No se reporta la profundidad del foco de los terremotos; consideramos entonces los de mayor potencia como superficiales y los demás con focos en profundidades intermedias.
2. Las zonas más activas ocurren en el siguiente orden: (a) San Juan, Mendoza, La Rioja, (b) Tucumán, Salta, Jujuy, (c) Catamarca, Santiago del Estero, Córdoba.
3. Los órdenes de magnitud de los terremotos por provincias son:
 - (a) San Juan, $5.8 < M < 8.0$;
 - (b) Mendoza, $5.4 < M < 7.0$;
 - (c) Catamarca, $5.0 < M < 6.4$;
 - (d) Salta oeste, $6.0 < M < 7.0$;

TABLA 1
HISTORIA DE LOS TERREMOTOS EN ARGENTINA

Lugar	Fecha	Magnitud	Profundidad Foco
Salta, oeste	13-09-1692	7	
Mendoza	22-04-1780	7	
Santiago del Estero	04-07-1817	7	
Salta, oeste	18-10-1844	6.5	
Mendoza	20-03-1861	7	
Jujuy	14-01-1863	6.4	
Salta, Oran, este	09-10-1871	6.4	
Tierra del Fuego	01-02-1889	7.3	
Mendoza, Cahueta	19-08-1880	5.5	
Salta, oeste	23-09-1887		
Buenos Aires	05-06-1888	5.5	
Catamarca	21-03-1892	6.0	
San Juan	27-10-1894		8.0
Catamarca	05-02-1898	6.4	
Yacuiba, Salta, Bolivia	23-03-1899	6.4	
La Rioja	12-04-1899	6.4	
Mendoza	12-08-1903	6.0	
Tucumán	17-10-1906	6.0	
Tucumán	11-08-1097	5.5	
Tierra del Fuego	19-10-1907		
Salta, este	05-02-1908	6.0	
Córdoba	22-09-1908	6.5	
Salta, este	01-02-1909		
Tucumán	06-10-1913	5.5	
Mendoza	27-07-1917	6.5	
Mendoza	17-12-1920	6.0	
Salta, Oran, este	14-10-1925		
Mendoza	14-04-1927		7.1
Mendoza	23-05-1929	5.7	
Mendoza	30-05-1929		6.8
Salta, oeste	23-09-1930	6.5	
Salta, oeste	24-12-1930	6.0	
Tucumán	03-04-1931	6.3	
Tucumán	12-02-1933	5.5	
Córdoba	11-06-1934	6.0	
San Luis	22-05-1936	6.0	
Mendoza	22-11-1936	6.0	
San Juan	03-07-1941	6.2	
Mendoza	05-06-1942		
San Juan	15-01-1944		7.4
Mendoza	19-01-1944	5.5	
Córdoba	16-01-1947	5.7	
Corrientes, este	21-01-1948	5.5	
Salta, oeste	25-08-1948		7.0
Tierra del Fuego	17-12-1949		7.8
Estrecho de Magallanes	30-01-1950		7.0
San Juan	11-06-1952		7.2
Córdoba	22-05-1955		6.9
La Rioja	24-10-1957	6.0	
Salta, este	12-05-1959	5.0	
Catamarca	21-10-1966	5.0	
Salta, Tartagal, este	30-10-1966	4.8	
San Juan	10-11-1966	5.9	
Mendoza	25-04-1967	5.4	

Chaco	25-04-1968	5.0	
Salta, oeste	11-06-1970		6.8
Jujuy	08-06-1972	5.4	
San Juan	26-09-1972		5.8
Salta, Jujuy	19-11-1973		5.9
Jujuy	01-07-1974	5.0	
Salta, Oran, este	17-08-1974	5.0	
La Rioja	07-06-1977	5.1	
San Juan	23-11-1977		7.4
San Juan	06-12-1977		5.9
San Juan	17-01-1978		5.8
Tucumán	09-05-1981	5.0	
Mendoza	26-01-1985		6.0
Catamarca	24-06-1989	5.4	
Tucumán	29-02-1992	5.2	
San Juan	08-06-1993		6.5
San Juan	30-10-1993		5.9
Jujuy	16-12-1993	5.0	
Santiago del Estero	17-06-1997	5.5	
La Rioja	28-05-2002		6.0
Islas Orcadas	04-08-2003		7.3
Catamarca	07-09-2004		6.4
Mendoza	05-08-2006		5.7

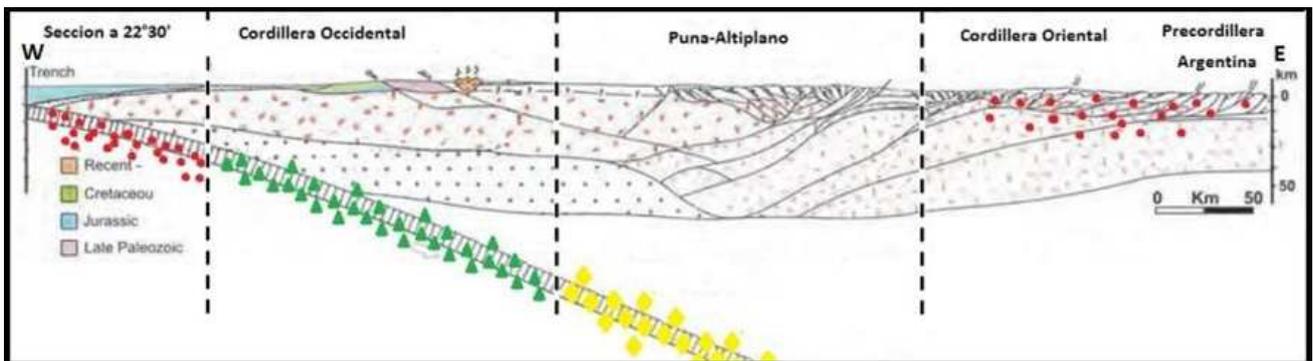


FIG. 2.— Corte transversal del macizo de los Andes a la altura de la latitud de Salta ($22^{\circ}30' S$). Se ilustra la actividad sísmica en el lado oriental del Macizo Andino, de carácter superficial y de pequeña a mediana magnitud debido al tipo de tectonismo que se produce en ella (solapamiento de estructuras).

(e) Salta este, $4.0 < M < 6.5$ (vecino al subandino boliviano).

4. Los terremotos en la República Argentina jamás superaron los 8 grados de magnitud.
5. Las fallas vinculadas a terremotos son: (a) Salta (1692, 1844, 1948), (b) San Juan (1894, 1944, 1977), (c) Mendoza (1792, 1861, 1985).
6. Se observa una única cordillera en La Rioja (30° Sur).
7. Los terremotos de foco profundo se dan en las provincias de Salta y Santiago del Estero; éstos son escasos y de baja intensidad en la superficie.

2.2. Sismicidad en Chile

Nos referiremos a dos fuentes de datos: Historia de la sismicidad en la República de Chile (Tabla 2) y el Mapa de Sismicidad de la República Argentina (Fig. 3).

Un análisis de la información que proporciona la Tabla 2 conduce a las siguientes anotaciones:

1. Los sismos (y temblores) en Chile son aquellos movimientos telúricos que causan daños menores y escasas víctimas pues tienen magnitud e intensidad pequeñas. Posiblemente se trate de terremotos superficiales o bien terremotos de profundidad intermedia con mayor magnitud.
2. La mayoría de los sismos que se reportan en la Tabla 2 no han sido medidos por instrumentos confiables, ya sea porque aún no existían o, como ocurrió muchas veces, porque los sismógrafos colapsaron con el movimiento, por lo que se recurrió a estimaciones según las crónicas (que suelen exagerar los hechos) o a registros realizados en lugares alejados de los epicentros. En muchísimos casos la magnitud del evento fue asignada por servicios sismológicos extranjeros (generalmente de EE.UU.).
3. Son más numerosos los registros de sismos ocurridos en la parte centro-norte del país, especialmente en Copiapó.
4. Arica ha sufrido terremotos con maremotos considerables durante todos los siglos, pero recientemente disminuyó la frecuencia de estos eventos.
5. En Punta Arenas sólo se registró dos eventos, de los cuales uno fue importante (año 1949, tres víctimas).
6. La mayoría de los terremotos en Chile superó los 8 grados en la escala Richter; algunos se consideran los más grandes jamás registrados en el mundo como el de Valdivia (año 1960, 9.5 grados de magnitud), Concepción (1965), Maule (2010) e Iquique (2014).

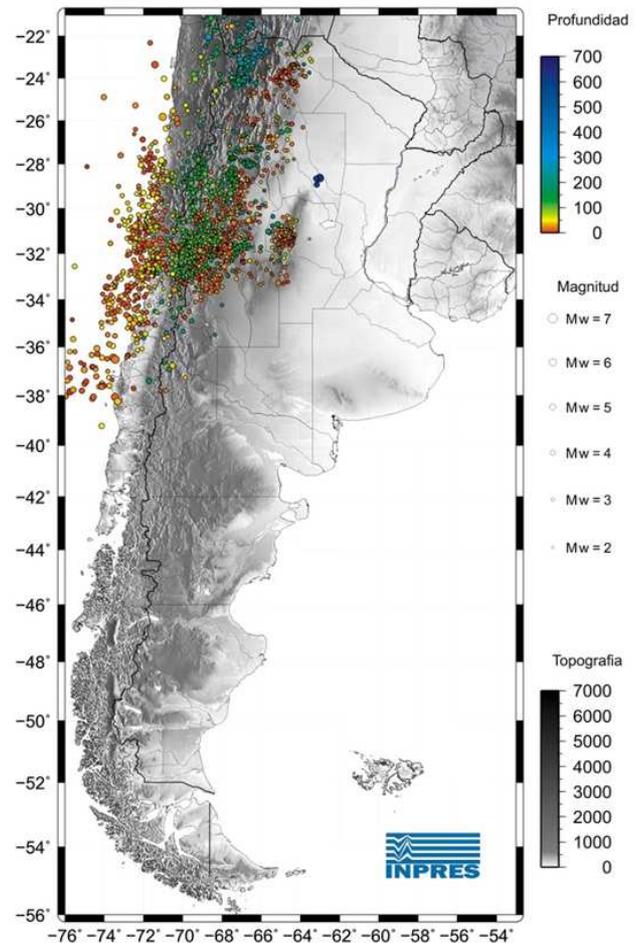


FIG. 3.— Mapa actualizado de Sismicidad en la República Argentina (INPRES). Este mapa incluye información de la sismicidad en la República de Chile, que fundamentalmente se concentra en su zona central (32° S).

7. Estadísticamente parece haber más sismos en los meses de mayo y diciembre (14 en cada mes) y menos sismos en los meses de julio, agosto y septiembre (5 en cada mes).

3. SISMICIDAD EN BOLIVIA

La información tomada de la prensa escrita (Tabla 3) contiene un registro histórico de la sismicidad en Bolivia mientras que en la Tabla 4 se tiene el registro de la sismicidad reciente cuya fuente es el Observatorio Sismológico de San Calixto. En la Fig. 4 se muestra un mapa de la sismicidad en la región centro-norte de la Cordillera de los Andes sudamericana. En la Fig. 5 se muestra la distribución de estaciones sismológicas estrenada recientemente en Bolivia (2012).

Un análisis de la información que proporcionan las Tablas 3 y 4 conduce a las siguientes anotaciones:

1. La mayoría de los sismos reportados en las Tabla 3 no han sido determinados científicamente por instrumentos confiables, ya sea porque aún no existían o porque no se disponía de una adecuada disposición de

TABLA 2
SISMOS Y TERREMOTOS EN CHILE

SIGLO XVI	Terremoto de Concepción, Terremoto de Valdivia,	8 de Febrero de 1570 (Tsunami Mayor) 16 de Diciembre de 1575 (Tsunami Mayor)
SIGLO XVII	Terremoto de La Serena, Terremoto de Arica, Terremoto de Arica, Terremoto de Coquimbo, Temblor de Santiago, Terremoto del Terremoto de Arica, Terremoto de Concepción, Terremoto de Arica, Terremoto de Santiago,	17 de Junio de 1604 24 de Noviembre de 1604 (Tsunami Mayor) 16 de Diciembre de 1615 (Tsunami) 1639 6 de Septiembre de 1643 13 de Mayo de 1647 31 de Marzo de 1650 15 de Marzo de 1657 (Tsunami Mayor) 10 de Marzo de 1681 Julio de 1690 (temblor)
SIGLO XVIII	Sismo del Terremoto del Terremoto de Valdivia, Terremoto del Temblor de Temblor de Terremoto de Copiapó,	24 de Mayo de 1722 8 de Julio de 1730 (Tsunami Mayor) 24 de Diciembre de 1737 (Tsunami) 23 de Mayo de 1751 (Tsunami) Octubre de 1786 11 de Febrero de 1787 30 de Marzo de 1796
SIGLO XIX	Sismo en La Serena, Terremoto de Copiapó, Terremoto de Copiapó, Terremoto del Temblor en Valparaíso, Sismo en Isla Lemu, Temblor en Arica, Temblor en Huasco, Temblor en Arica, Terremoto del Terremoto de Valdivia, Sismo en La Serena, Sismo en Copiapó, Sismo en La Ligua y Petorca, Sismo en la Serena, Terremoto de Terremoto en Santiago, Terremoto del Terremoto de Terremoto de Copiapó, Sismo de Copiapó, Terremoto del Temblor en Calama, Terremoto del Sismo del Terremoto del Terremoto de Illapel, Terremoto del Sismo en Tarapacá, Sismo en Punta Arenas, Terremoto en Illapel, Sismo en Copiapó, Sismo en Concepción,	1 de Enero de 1801 3, 4 y 11 de Abril de 1819 (Tsunami Mayor) 5 de Noviembre de 1822 (Tsunami) 19 de Noviembre de 1822 26 de Septiembre de 1829 1829 9 de Noviembre de 1831 25 de Abril de 1833 18 de Septiembre de 1833 20 de Febrero de 1835 (Tsunami Mayor) 7 de Noviembre de 1837 (Tsunami) 17 de Diciembre de 1843 19 de Enero de 1847 8 de Marzo de 1847 8 de Octubre de 1847 18 de Noviembre de 1849 (Tsunami) 6 de Diciembre de 1850 2 de Abril de 1851 26 de Mayo de 1851 5 de Octubre de 1859 (Tsunami) 12 de Enero de 1864 13 de Agosto de 1868 (Tsunami Mayor) 22 de Abril de 1870 25 de Mayo de 1871 (Tsunami) 5 de Octubre de 1871 7 de Julio de 1873 11 de Noviembre de 1876 9 de Mayo de 1877 (Tsunami Mayor) 23 de Enero de 1878 2 de Febrero de 1879 15 de Agosto de 1880 19 de Septiembre de 1890 23 de Junio de 1898

SIGLO XX

Sismo en el Norte Chico,	19 de Marzo de 1904
Sismo en Rancagua,	26 de Octubre de 1905
Terremoto del	16 de Agosto de 1906 (Tsunami)
Sismo en el Norte,	24 de Diciembre de 1906
Sismo en Valdivia,	13 de Noviembre de 1907
Sismo en Santiago,	28 de Abril de 1909
Sismo en Copiapó,	7 de Junio de 1909
Sismo en Iquique,	15 de Septiembre de 1911
Sismo en Taltal,	27 de Mayo de 1913
Sismo en Talca y Curicó,	29 de Enero de 1914
Sismo en Tarapacá,	7 de Junio de 1915
Sismo en Antofagasta,	25 de Agosto de 1916
Sismo en el Norte,	21 de Mayo de 1918
Terremoto del	4 de Diciembre de 1918 (Tsunami)
Sismo en Chiloé,	8 de Marzo de 1919
Sismo en Talca y Curicó,	5 de Junio de 1919
Sismo del	26 de Julio de 1920
Sismo del	20 de Agosto de 1920
Sismo del	28 de Octubre de 1920
Sismo en Concepción,	29 de Octubre de 1922
Terremoto del	10 de Noviembre de 1922
Sismo en Copiapó,	4 de Mayo de 1923
Sismo en Copiapó,	28 de Enero de 1924
Sismo en el Norte,	15 de Mayo de 1925
Sismo en la Zona Central,	14 de Abril de 1927
Terremoto del	1 de Diciembre de 1928 (Tsunami)
Sismo en el Norte,	19 de Octubre de 1929
Sismo en Quillota,	29 de Agosto de 1930
Sismo en Quillota,	17 de Octubre de 1930
Sismo en Iquique,	22 de Febrero de 1933
Sismo del	4 de Diciembre de 1934
Sismo en Taltal,	13 de Julio de 1936
Terremoto de	24 de Enero de 1939
Sismo en Copiapó,	Abril de 1939
Sismo del	29 de Junio de 1942
Sismo de	6 de Abril de 1943 (Tsunami)
Sismo en Santiago,	13 de Septiembre de 1945
Maremoto,	1 de Abril de 1946
Sismo en Copiapó,	2 de Agosto de 1946
Sismo en Arica,	10 de Mayo de 1948
Sismo en Angol,	19 de Abril de 1949
Sismo en Punta Arenas,	12 de Diciembre de 1949
Sismo en Antofagasta,	9 de Diciembre de 1950
Maremoto,	4 de Noviembre de 1952
Sismo en Chillán y Con-	6 de Mayo de 1953
cepción,	
Sismo en La Ligua,	4 de Septiembre de 1953
Sismo en Calama,	6 de Diciembre de 1953
Sismo en el Norte Chico,	19 de Abril de 1955
Terremoto de Las Melosas,	4 de Septiembre de 1958
Sismo en el Norte,	13 de Junio de 1959
Terremotos del	21 y 22 de Mayo de 1960 en Valdivia y en otras ciu- dades del sur de Chile (Tsunami Mayor)
Sismo en Concepción,	18 de Octubre de 1961
Terremoto del	28 de Marzo de 1965
Sismo en Taltal,	28 de Diciembre de 1966
Sismo en el Norte Chico,	26 de Septiembre de 1967
Sismo en Tocopilla,	20 de Diciembre de 1967
Sismo en el Norte,	28 de Noviembre de 1970
Sismo en Taltal,	17 de Junio de 1971
Terremoto del	8 de Julio de 1971 (Tsunami)
Sismo en el Norte Chico,	13 de Marzo de 1975
Sismo en las provincias de	10 de Mayo de 1975
Arauco, Malleco y Cautín,	

	Sismo en Pozo Almonte,	29 de Noviembre de 1976
	Sismo en Copiapó,	3 de Agosto de 1978
	Sismo en las II y III regiones,	4 de Octubre de 1983
	Terremoto del	3 de Marzo de 1985
	Sismo en Bajo Lago Rapel,	8 de Abril de 1985 (Tsunami)
	Sismo en la I región,	8 de Agosto de 1987 (Tsunami)
	Sismo en el Norte,	Febrero de 1988
	Sismo en Antofagasta,	30 de Julio de 1995 (Tsunami)
SIGLO XXI		
	Sismo en el Norte,	13 de Junio de 2005
	Sismo en Aisén,	21 de Abril de 2007 (Tsunamis)

TABLA 3
SISMOS Y TERREMOTOS EN BOLIVIA

Lugar	Fecha	Magnitud	Profundidad Foco
Potosí	1581		
	1661		
	1851		
Sucre	10–1650	La Catedral fue destruida	
Santa Cruz	1845		
Villa Tunari	1871		
Yacuiba	1887		
	1899		
	23–03–1899	6.3	profundo
Sipe Sipe, Cbba.	23–07–1909		
Aiquile, Cbba.	25–10–1925		
	01–09–1958		
	22–02–1976		
Cochabamba	25–12–1942		
	18–02–1943		
	19–10–1959		
	12–05–1972		
Ivirgatzama, Cbba.	23–07–1981		
	09–05–1986		
Sucre	27–03–1948	La ciudad fue destruida	
Consata, Mapiri	24–02–1947	6.4	superficial
Postrer Valle, SC.	26–06–1997		
Iturrealde, Ballivián	09–06–1994	8.6	630 Km.
Comujo, Oruro	06–10–1995	5.3	
Aiquile, Cbba.	22–05–1998	6.5	15 Km.
Coipasa, Oruro	04–04–2001	4.6	
Registros de los últimos sismos y terremotos en Bolivia.			
Sud Chichas, Potosí	2012	5.1	
Chaco, Tarija	09–02–2012	4.0	
Quijarro, Potosí	13–03–2012	4.6	
NorLipez, Potosí	01–04–2012	4.9	
Quijarro, Potosí	27–04–2012	4.8	
Punata, Cbba.	2012	3.8	
Capinota, Cbba.	13–05–2012	3.8	
Sur Lipez, Potosí	16–05–2012	3.5	
Provincia Cordillera	01–04–2013		
Cotoca, Santa Cruz	15–11–2013		
Santa Cruz, 113 Km sur	09–04–2014	5.2	40 Km.

instrumentos y de la tecnología apropiada para el procesamiento de datos para sismógrafos localizados en medio del macizo de los Andes centrales; asimismo no se tenía un modelo aceptable del terreno sobre el cual están asentados los observatorios, por lo que se recurrió a estimaciones según las crónicas (que suelen exagerar los hechos) o a registros realizados en lugares alejados de los epicentros. En la mayoría de los casos la magnitud de los terremotos fue asignada por servicios sismológicos extranjeros (generalmente de EE.UU.).

- Según los últimos registros, la mayoría de los movimientos telúricos que se produjeron en territorio boliviano no superan los 4 grados de magnitud en la escala de Richter (con un promedio de 3.5 grados); éstos son temblores que no son percibidas por las personas.
- Los únicos movimientos telúricos de gran magnitud registrados en Bolivia que pueden ser considerados como verdaderos terremotos son: (a) el de Consata–Mapiri (1947) del tipo superficial, (b) el de Iturralde–Ballivián (1994) que fue el mayor magnitud con una marca de 8.6 grados en la escala de Richter, con foco profundo y baja intensidad, (c) el de Aiquile (1998) del tipo superficial y de intensidad alta.
- Bolivia se considera como un país de actividad sísmica moderada.
- Las zonas más activas en Bolivia son Cochabamba y Potosí.
- Los movimientos telúricos estarían vinculados a las siguientes fallas tectónicas principales: (a) Falla de Cochabamba con convergencia al noreste (del tipo de caída gravitacional de gran magnitud). (b) Falla Potosí–Oruro–La Paz y falla Uyuni–Khenayani con convergencia hacia el oeste (del tipo de plegamiento con ruptura); falla de San Vicente con convergencia al este (del tipo de plegamiento con ruptura). (c) Falla de Potosí–Chuquisaca–Cochabamba; falla Aiquile–Tupiza con convergencia hacia el este (del tipo plegamiento con caída gravitacional); falla Camargo–Tojo con convergencia hacia el oeste (del tipo de caída gravitacional de gran magnitud). (c) Fallas del Subandino: falla de San Simón con convergencia hacia el oeste (del tipo solapamiento) y falla Mandeyapeuca con convergencia hacia el oeste (del tipo corrimiento con solapamiento).

De manera general se puede concluir que el mayor número de terremotos se producen en: (a) Arica, Iquique y Antofagasta en el norte de Chile; (b) Copiapó, Concepción y Valdivia en la zona central de Chile; (c) Punta Arenas en el extremo austral de Chile. Sucede aproximadamente lo mismo en el lado

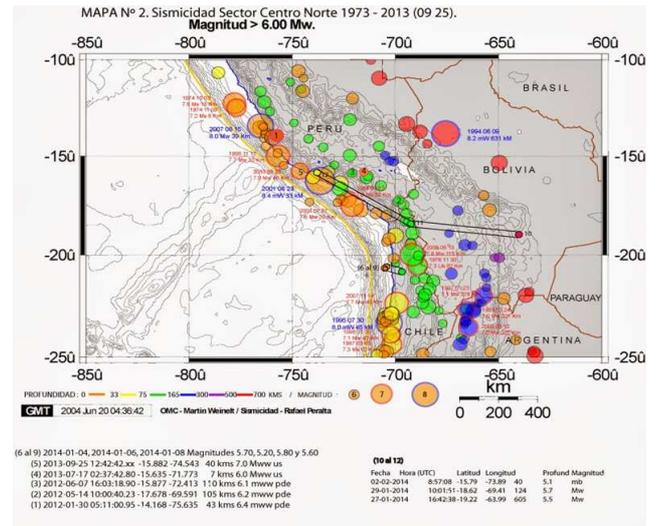


FIG. 4.— Mapa de sismicidad en la región centro-norte de la Cordillera de los Andes sudamericanos. En esta se ilustra parte de la sismicidad en Bolivia, escaso número de terremotos de foco de profundidad intermedia, casi nulo número de terremotos de gran profundidad, gran magnitud, baja intensidad en superficie. No están reflejados los terremotos de foco superficial. También se puede observar la presencia de terremotos de gran magnitud y gran intensidad, de focos superficiales vinculados a la costa occidental del continente.



FIG. 5.— Distribución de estaciones sismológicas instaladas por el Observatorio San Calixto (2012).

oriental del arco volcánico andino, en la cordillera de los Andes y en la cordillera occidental en Bolivia. Las estadísticas indican que la época de mayor número de terremotos es el verano austral.

4. ACTIVIDAD SÍSMICA EN BOLIVIA

En Bolivia ocurren principalmente solo dos tipos de terremotos: los de foco superficial y los de foco profundo (como lo confirman los registros obtenidos hasta ahora), lo que se debe su ubicación relativamente alejada del sitio donde se genera la actividad

TABLA 4
SISMOS Y TERREMOTOS RECIENTES EN BOLIVIA

Fecha	Hora Local	Profundidad	Magnitud	Departamento	Consultar
14/05/2014	03:38	Intermedia	3.7	Prov. Sud Lipez, Potosí.	Ver
11/05/2014	19:54	Intermedio	4.4	Prov. Poopó, Oruro.	Ver
05/05/2014	09:38	Intermedia	4.8	Prov. Daniel Campos, Potosí.	Ver
30/04/2014	07:04	Intermedio	3.6	Prov. Juan Manuel Pando, La Paz.	Ver
29/04/2014	19:26	Intermedio	3.7	Prov. NorLipez, Potosí	Ver
27/04/2014	01:14	Intermedia	3.8	Prov. Enrique Baldivieso, Potosí.	Ver
18/04/2014	23:47	Superficial	4.4	Prov. Cordillera, Santa Cruz.	Ver
01/04/2014	19:46	Superficial	8.2	Costa Iquique, Chile.	Ver
22/03/2014	08:58	Superficial	6.2	Costa de Iquique Chile	Ver
16/03/2014	17:16	Superficial	6.7	Costa de Iquique, Chile.	Ver
04/03/2014	00:54	Intermedio	3.9	Prov. Quijarro, Potosí.	Ver
02/03/2014	15:48	Intermedio	3.6	Prov. NorLipez, Potosí.	Ver
02/03/2014	12:28	Intermedio	4.5	Prov. Sud Carangas, Oruro.	Ver
17/02/2014	22:23	Intermedio	3.9	Prov. Sud Lipez, Potosí.	Ver
15/02/2014	06:12	Intermedio	3.7	Prov. Ladislao Cabrera, Oruro.	Ver
10/02/2014	22:23	Intermedio	3.8	Prov. NorLipez, Potosí.	Ver
08/02/2014	00:38	Superficial	3.2	Prov. Tapacari, Cochabamba.	Ver
27/01/2014	12:42	Profundo	5,4 (NEIC)	Prov. Tomina, Chuquisaca.	Ver
15/01/2014	14:12	Intermedio	3.8	Prov. Sud Carangas, Oruro.	Ver
16/12/2013	13:25	Intermedia	3.5	Prov. Quijarro, Potosí.	Ver
07/12/2013	19:14	Intermedia	4.5	Prov. NorLipez, Potosí.	Ver
03/12/2013	04:19	Intermedio	3.7	Prov. Ladislao Cabrera, Oruro.	Ver
02/12/2013	17:41	Intermedia	3.8	Prov. Sud Lipez, Potosí.	Ver
25/11/2013	11:56	Intermedio	3.7	Prov. Baldiviezo, Potosí.	Ver
24/11/2013	23:04	Intermedio	3.5	Prov. Sud Lipez, Potosí.	Ver
09/11/2013	13:20	Superficial	4.5	Prov. Capinota, Cochabamba.	Ver
05/11/2013	06:06	Intermedio	4.6	Prov. Sajama, Oruro.	Ver
21/10/2013	15:54	Superficial	4.7	Prov. Cordillera , Santa Cruz.	Ver
15/10/2013	17:59	Superficial	4.0	Prov. Cordillera , Santa Cruz.	Ver
15/10/2013	16:15	Superficial	5.0	Prov. Cordillera , Santa Cruz.	Ver
15/10/2013	16:12	Superficial	5.0	Prov. Cordillera, Santa Cruz.	Ver
12/10/2013	21:06	Intermedia	4.7	Prov. Quijarro, Potosí.	Ver
09/10/2013	23:32	Intermedio	5.1	Prov. NorLipez, Potosí.	Ver
09/10/2013	16:57	Intermedio	4.3	Prov. Sud Lipez, Potosí	Ver
09/10/2013	13:03	Intermedio	5.3	Prov. Sud Lipez, Potosí.	Ver

sísmica en el borde continental; aquí colisionan la masa andina (considerada como parte de la continental) con la corteza oceánica que se sumerge por debajo de la continental, a más de 250 km del arco volcánico o cordillera occidental.

Los sismos superficiales se desarrollan en las partes someras y medias de la corteza, por acomodamiento de partes, por fenómenos volcánicos o por plegamientos y grandes deslizamientos. Los sismos de foco profundo se producen debido a procesos de desprendimiento de los extremos de la placa oceánica subduciente a más de 400 km de profundidad. El primer tipo de sismos (superficiales) se caracterizan por magnitudes de 3.5 grados, que corresponden a casos de plegamientos con reacomodamientos; los sismos de foco de profundidad intermedia no superan los 6.4 grados. Hasta ahora no se ha registrado en territorio boliviano algún terremoto que supere los 6.5 grados de magnitud de características superficiales.

Es posible que se generen terremotos de más de 8 grados de magnitud en territorio boliviano (como ya ocurrió) pero serán de foco profundo, aproximadamente a 500 km, debido a cambios de fase de minerales de olivino a espinela en zonas relativamente

frías y viejas de la zona de subducción, pero por su gran profundidad no ocasionarán daños en la superficie, donde la intensidad sería relativamente baja.

5. GEODINÁMICA

Los Andes centrales generalmente se describen por sus zonas fisiográficas (cordillera occidental, altiplano, cordillera oriental, zona interandina, subandino y llanura oriental). En nuestro caso consideraremos dominios tectónicos y magmáticos (tomando en cuenta los conocimientos hasta ahora adquiridos). A partir de la fosa oceánica (trench) observamos: la cuña occidental (CUOC), constituida por la cordillera de la costa (CC); el valle longitudinal (VL) y el pre-andino (PA); el bloque andino (BA) constituido por: la cordillera occidental (COC, arco volcánico), la cuña altiplánica vertical (CAV), la faja de Huarina (FHU) y la cordillera oriental (COR); la cuña oriental (CUOR) constituida por: la zona interandina (ZIA) el subandino (SUA) y la llanura oriental (LLAOR). El conjunto puede ser denominado macizo andino (MAN) (Wigger 1994) y se puede concebir como conformado por: la CUOC, un cuerpo longitudinal de sección triangular con una cara haciendo un ángulo de 20° con la horizontal

(extensión de la superficie del mar por debajo de la superficie continental) con una segunda cara paralela a la superficie que separa la masa continental de la lamina subducente de Nazca, y una cara basal (vertical), lo que corresponde a un área de 1500 km². El BA, un cuerpo prismático de 600 km de longitud y de sección rectangular de 10500 km². Seguidos por la CUOR, un cuerpo de forma aproximadamente triangular, una línea base horizontal de 230 km y una altura en occidente de 14 km que se desvanece en el oriente, de 1600 km² de sección y más de 400 km de longitud. Cada una de estas componentes tiene propiedades físicas particulares. Por el oeste se observa la convergencia de la placa oceánica basáltica de Nazca que colisiona con la CUOC considerada como parte de la masa continental. Al otro lado del MAN se presenta la interacción de esta enorme masa, particularmente de la CUOR, con la placa continental suramericana (el Escudo Brasileño). En el borde continental occidental toma lugar una interacción de masas con subducción de una de ellas por debajo de la otra con características de una verdadera máquina de molienda. La energía impresa a la masa continental genera que el borde acumule energía mecánica elástica acompañada con movimientos verticales para luego liberarse en forma de terremotos produciendo expansión de masas, caídas gravitacionales y la erosión del borde, produciendo fallas principalmente normales, algunas inversas y de corrimiento (Reutter 1994). Los terremotos generados de esta manera son superficiales de gran magnitud, caracterizados con valores mayores a 8 grados, de efectos superficiales catastróficos, de gran intensidad como los que se registraron en el norte, Iquique (2014) y en la zona central, Copiapó, Concepción (2013), Maule (2010) y Valdivia de 9.5 grados (1960) en Chile. En (Moscoso 2011) se estudia en detalle las características estructurales de la CUOC del terremoto con tsunamis de la región del Maule, 2010, con una magnitud de 8.8 grados. Podemos definir zonas asísmicas y sísmicas en las que se observa interacción de rocas de altos valores de V_p (6-7 km/s²).

El terremoto se produce en el contacto de la Placa de Nazca con el tope continental, que hace un gran ángulo de subducción a 20 Km de profundidad debajo de la costa. Las condiciones mecánicas en los Andes centrales se asemejan a este caso con algunas diferencias, particularmente el ancho de la cuña, con estructura más compleja que incluye la cordillera de la costa (COCO), el valle longitudinal (VALO) y la precordillera (PRCO). En el lado oriental del MAN central, más propiamente donde la CUOR, interactúa con el escudo brasileño, se observa un mecanismo de interacción con características diferentes a la del lado occidental. Sobre la capa infra yacente, el escudo brasileño, las masas andinas sufren un proceso de plegamiento con cabalgamiento y corrimiento. Este mecanismo tectónico no genera movimiento de masa tipo caídas gravitacionales (horsts, grabens), con movimientos bruscos. Estas deformaciones se producen suavemente (Jacobshagen & Giese 1996),

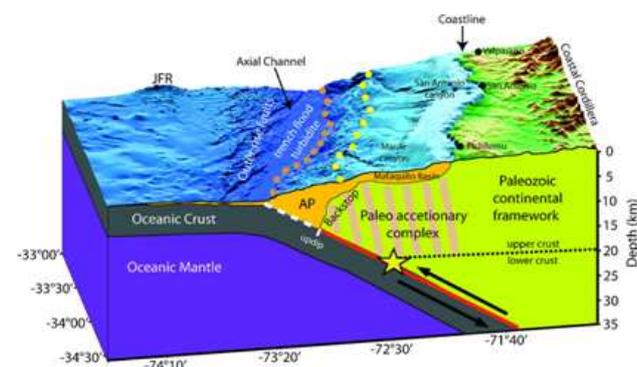


FIG. 6.— Interpretación sísmica y batimétrica del área de estudio, AP significa prisma de acreción. Línea roja gruesa es la zona sísmica estimada, la línea blanca segmentada es la zona asísmica. La estrella denota el hipocentro estimado del terremoto del Maule con magnitud 8.8 grados proyectado sobre el perfil de estudio. Los puntos anaranjados sobre la batimetría indican el frente de deformación y los puntos amarillos la proyección del frente del tope trasero.

aunque con velocidades diferenciadas.

En la faja subandina se reconocen dos niveles de despegue de movimiento de las masas de bajo ángulo de inclinación (2-3°). También se reconocen tres niveles estructurales: el inferior de Cinco Picachos y la Pava, el intermedio del Aguarague y el superior de la cuenca de Tarija, y el terciario subandino. Las fallas principales son de elevada inclinación, cortan la sección desde el nivel de despegue hacia arriba con una convergencia hacia el este y una inclinación hacia el oeste. El nivel estructural intermedio tiene un comportamiento plástico que en realidad está constituido por pequeñas y numerosas fallas y zonas de² cizalla. Los posibles planos de movimiento se dan entre materiales: (A) de baja y alta velocidad, los sedimentos del subandino y el material del escudo brasileño (2-6 km/s²), respectivamente, en el caso de los corrimientos y (B) entre sedimentos de baja velocidad (2-4 km/s²), en el caso de las fallas, dentro de los 10 a 0 km de espesor de la capa superior. Los procesos tectónicos de formación del subandino se traducen en un acortamiento de masa que generan serranías acompañados de movimientos telúricos de menor magnitud, consecuentemente de menor intensidad. Hasta ahora no se ha informado que los mismos superen los 6 grados de magnitud. La velocidad de movimiento de la placa oceánica de Nazca se caracteriza por vectores de convergencia (Klotz 2006); dicha velocidad está diferenciada por franjas: la de mayor valor se extiende entre Arica y Antofagasta con 65 mm/a; otra que se extiende entre Copiapó y Valparaíso caracterizada por un valor mucho mayor a 70 mm/a; luego se tiene la franja entre Valparaíso y Concepción con 30 mm/a; otra franja notable es la que pasa por Valdivia con 20 mm/a y va reduciéndose hacia el sur donde se registra valores iguales y menores a 18 mm/a. En los puntos de colisión de las placas se registran velocidades que van de 9 a 12 mm/a en dirección horizontal hacia el este, tomando la placa continental como inmóvil. En el lado oriental del MAN en Bolivia se

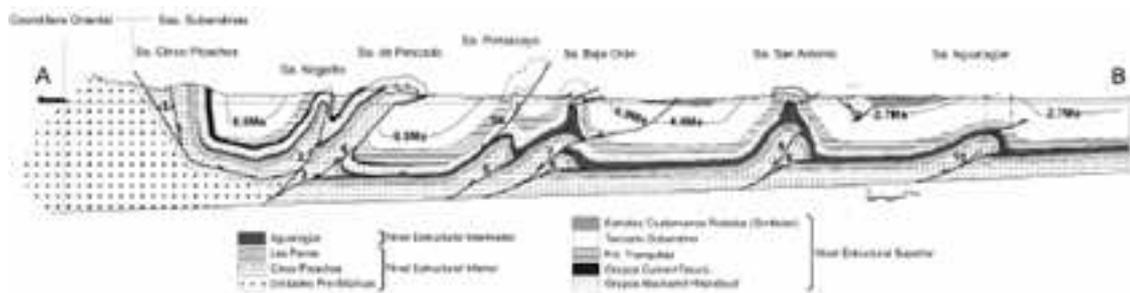


FIG. 7.— Sección estructural balanceada de la faja plegada y corrida subandina. 1. Cabalgamiento trasero "Backthrust" de Cinco Picos. 2. Corrimiento Nogalito: en secuencia, con reactivación fuera de secuencia. 3. Corrimiento del Pescado: en secuencia. 4. Corrimiento del Pescado: fuera de secuencia. 5. Corrimiento Pintascayo: en secuencia con reactivación fuera de secuencia. 6. Corrimiento de la Sierra Baja de Orán: en secuencia. 7. Corrimiento² de la Sierra Baja de Orán: fuera de secuencia. 8. Corrimiento de San Antonio: en secuencia. 9. Corrimiento San Antonio: fuera de secuencia. 10. Corrimiento Aguarage: en secuencia (con escasa reactivación fuera de secuencia). Las líneas de tiempo mostradas dentro de los sedimentos terciarios están basadas en estratigrafía de polaridad magnética y dataciones absolutas de niveles de tobas, y representan los límites locales entre las secuencias pre- y de crecimiento. No posee exageración vertical.

registrar velocidades sismo-geológicas que van de 1.5 a 4 mm/a (B. Brooks 2011), aproximadamente. Valores calculados en base a datos tomados con sistemas GPS diferenciales acusarían un movimiento 9-13 mm/a de la CUOR. Se estima un valor promedio de acortamiento de largo periodo, para 25 Ma. de 8-14 mm/a. Suponiendo un acortamiento entre 7-10 mm/a, nos acercaríamos a los valores calculados en base a criterios de la geología estructural. Se verifica una reducción de la velocidad del MAN de 10 a 2 mm/a en distancias entre 25 a 100 km representado una fuerte variación de la energía total inicial. Es interesante preguntar a dónde va a parar esta energía? En (Brooks 2011) se propone un modelo de mecanismo focal considerando una base de despegue hipotético situada a 10 km de profundidad en posición casi horizontal, basado en una isoterma de 300° C que sería suficiente para producir resquebrajamiento de las rocas en ese lugar, de 100 km de ancho en la parte oriental del subandino, limitada por la falla de Mandeyapeca, la que estaría permaneciendo en silencio sísmico. Sugiriendo que la ruptura de toda esta superficie, con un deslizamiento de tan solo 10 m entre ellas, podría producir un terremoto de magnitud 8.7-8.9 grados, de consecuencias realmente catastróficas (con características semejantes a las que ocurren en el occidente), calculándose un tiempo de acumulación de energía entre 150 a 1000 años. No se informa sobre la sismicidad del suelo subandino, ni se hace mención al rol que actualmente estarían cumpliendo las fallas reconocidas, al comportamiento casi plástico de gran parte del material que compone este bloque y otros detalles, que de alguna manera vienen reportados en los trabajos de otros autores. El valor de 9 a 13 mm/a de velocidad de movimiento de la CUOR hacia el este, reportado en (Brooks 2011), con una velocidad de acortamiento menor desconocido puede corresponder a la época de mayor velocidad de plegamiento y corrimiento del bloque subandino que ocurrió a finales del Mioceno.

6. LA ENERGÍA PROPORCIONADA POR LA PLACA DE NAZCA SE DIVIDE

La información hasta ahora obtenida indica que la energía que supone la presión ejercida por la placa oceánica de Nazca sobre la placa continental no se traslada en su totalidad hacia la zona de interacción del macizo andino con el escudo brasileño. Esta energía se divide y se disipa en el camino provocando diversos tipos de fenómenos geológicos, como ser: (a) acortamiento horizontal y elevación de masas por plegamiento, cabalgamiento (es decir, engrosamiento de masa andina por levantamiento), reacomodamiento de bloques, fundición de rocas, producción de cámaras magmáticas crustales (F. Schilling 2006); (b) corrimiento de todas estas masas hacia el este, en trabamamiento y compresión elástica de bloques y su relajamiento en forma de terremotos in situ y vulcanismo, deslizamientos y otros. En (E. Klosko et al. 2002) se indica que gran parte (70%) de la velocidad de movimiento de la placa de Nazca es retenida en la CUOC liberándose en forma de terremotos, el resto se reparte entre el BA y la CUOR (asignando, aproximadamente a 15% a cada uno), que se libera provocando deslizamiento sísmico y asísmico en el BA y la CUOR, respectivamente. En latitudes de la parte central de Chile, el macizo andino (MAN) se reduce a una única cordillera, concebida de idéntica manera a la anterior con la diferencia de la presencia de un paralelepípedo central de menores dimensiones. Entonces podemos observar una cuña occidental (CUOC), con actividad sísmica intensa, un bloque andino (BA), paralelepípedo de varios cientos de km de longitud en dirección norte-sur por 150 km de ancho en dirección este-oeste, como base por 10 km de altura, 1500 km² de sección transversal, a la que en su parte oriental le acompaña una cuña oriental (CUOR) que es una serie de serranías que terminan a longitudes del oeste de la provincia de Córdoba, cuyas dimensiones comparada con la que se observa en el norte, a latitudes de Bolivia, son bastante menores. En esta región del lado occidental (CUOC) los terremotos tiene gran magnitud (por encima de 8 grados), mientras que en lado oriental (CUOR) las magnitudes de los terremotos están siempre por debajo de este valor referencial,

pero que de todas maneras tienen características de catastróficas en intensidad. Por el hecho de que el territorio de la República de Chile ocupa precisamente el borde continental activo, donde la placa oceánica de Nazca se sumerge debajo de la masa continental sudamericana, se observa que en ella se desarrollan terremotos de foco superficial a intermedio y nunca terremotos de foco profundo de acuerdo a los conocimientos hasta ahora acumulados. Los observatorios sismológicos instalados en este territorio sólo registraran terremotos locales superficiales de baja magnitud y de foco intermedio de mediana magnitud, las de profundidad intermedia y superficial de gran magnitud los colapsan, a menos que estén situadas a grandes distancias de los epicentros de los mismos. En territorio argentino por estar situada al otro lado del arco volcánico y alejado de la fuente principal de los terremotos, se producen con preferencia terremotos de foco superficial a intermedio, se registran terremotos de foco profundo muy raras veces en su parte norte-central, de los cuales hasta ahora se ha informado muy poco. Los observatorios sismológicos localizados en territorio continental argentino están en buenas condiciones para registrar y contribuir al estudio de los terremotos que se pro-

duzcan en el borde continental activo sudamericano.

7. CONCLUSIONES

El análisis de la información disponible hasta ahora nos conduce a las siguientes conclusiones: La energía se disipa con la distancia a la fuente, en este caso la fuente es la fosa oceánica en el pacífico donde se produce la colisión de dos placas, de las cuales una ejerce mayor presión sobre la otra; las fuerzas actúan lateralmente (horizontalmente) y con mayor valor absoluto hacia el este. Las presiones ya no obedecen al simple principio de Pascal de los fluidos, sino más bien están involucrados principios de la conservación de la energía general (energía mecánica que se transforma en otro tipo de energías) disminuyendo las fuerzas mecánicas del continuo con movimiento de masas por canales con presencia de fuerzas gravitacionales, fuerzas de rozamiento y cambios de forma de energía. Por estas razones no es posible esperar terremotos de gran magnitud al otro lado del macizo andino en la región de contacto con el escudo brasileño, siendo éste el caso de la sismicidad en territorio de Bolivia.

REFERENCIAS

- Brooks B. (2011), *Nature geoscience letters* **4**, 380
 Klosko E. et al. (2002), *American Geophysical Union* **30**, 123
 Schilling F. (2006), *Partial melting in the Central Andean Crust: A review of Geophysical, Petrophysical and Petrologic Evidence* (Springer-Verlag, Berlin)
 Jacobshagen V. & Giese P. (1996), *Int. Geol. Cong.* **1**, 310
 Klotz J. (2006), *Long term signals in the present-day deformation field of the central Andes and constraints on the viscosity of the Earth's upper mantle* (Springer-Verlag, Berlin)
 Reutter K. (1994), *Tectonic of the Southern Central Andes: Structure and evolution of an active continental margin* (Springer-Verlag, Berlin)
 Wigger P. (1994), *Variation in the crustal structure of the Southern Central Andes deduced from Seismic Refraction investigations, Tectonic of the Southern Central Andes* (Springer-Verlag, Berlin)

18^{va} OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA
8^{va} OLIMPIADA BOLIVIANA DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

4ta ETAPA: FINAL NACIONAL: TARIJA, DEL 14 AL 17 DE AGOSTO DE 2013

RALJEVIC M.^{1,2}, SUBIETA V.^{1,2}, MUÑOZ R.², QUISPE C.^{1,2}, MAMANI E.^{1,2}, QUISPE L.^{1,2}, BALDERRAMA M.^{1,2}, VARGAS M.^{1,2}, AGUILAR J. C.³, DE LA TORRE M.³, RODRIGUEZ F.⁴, GUAYGUA T.⁵, CASTELO J. J.⁵, JEMIO C.⁵, ANDRADE M.⁶, GUZMÁN R.⁶, MAMANI R.⁷, FUENTES W.⁷, VALDEZ S.⁸, JUSTINIANO I.⁹, JAILLITA J.⁹, PAYLLO J. P.¹⁰, CABRERA J.¹¹, VARGAS C.¹², CORAITE O.¹³, QUIROZ Z.¹⁴, ORTEGA L.¹⁵, MALLCU A.¹⁶, MARTINEZ L.¹⁷, TAQUICHIRI M.¹⁸, ZALLES R.¹⁹, ORTEGA M.²⁰, BUSTOS R.^{1,2,3}

¹ Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI)

² Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), *Carrera de la Física, Planetario Max Schreier*, La Paz

³ Asociación Boliviana para el Avance de la Ciencia (ABAC)

⁴ Universidad Mayor, Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca (UMRPSFXCH),
Facultad de Tecnología - Carrera de Ingeniería de Sistemas, Sucre

⁵ Universidad Técnica de Oruro (UTO), *Facultad Nacional de Ingeniería (FNI)*, Oruro

⁶ Universidad Mayor de San Simón (UMSS), *Facultad de Ciencia y Tecnología*, Cochabamba

⁷ Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), *Carrera de Física*, Potosí

⁸ Colegio Cardenal Cushing, Santa Cruz de la Sierra

⁹ Colegio María Auxiliadora, Cobija, Pando

¹⁰ Colegio Natush Bush, Yacuiba, Tarija

¹¹ Colegio Amor de Dios, La Paz

¹² Colegio Buenas Nuevas, Sucre

¹³ Colegio La Salle, Oruro

¹⁴ Instituto Americano, La Paz

¹⁵ Colegio Felipe Palazón, Tarija

¹⁶ CORIMEX LTDA., La Paz

¹⁷ Universidad Privada de Santa Cruz (UPSA), Santa Cruz de la Sierra

¹⁸ Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), Tarija

¹⁹ Observatorio Astronómico Nacional (OAN), Tarija &

²⁰ Asociación Boliviana para el Mejoramiento de la Enseñanza de las Ciencias (AMEC), Beni

RESUMEN

La 18^{va} Olimpiada Boliviana de Física (18^{va} OBF) y la 8^{va} Olimpiada Boliviana de Astronomía y Astrofísica (8^{va} OBAA) se llevaron a cabo con éxito en 4 etapas de la gestión 2013: *1ra ETAPA: exámenes internos de selección en cada UNIDAD EDUCATIVA, 2da ETAPA, DISTRITAL: exámenes simultáneos en cada uno de los 277 distritos de todo el país, 11 de Mayo de 2013, 3ra ETAPA: DEPARTAMENTAL: exámenes que se tomaron a l@s mejores estudiantes de la 2da etapa, 15 de Junio de 2013 y 4ta ETAPA: NACIONAL: donde participaron solo 3 categorías: 3º, 4º y 5º de secundaria. Se llevó a cabo del 14 al 17 de Agosto de 2013 en la ciudad capital de Tarija con la participación de 9 equipos por categoría por cada olimpiada.*

Ambas olimpiadas (OBF – OBAA) se acoplaron, por tercer año consecutivo, al proyecto impulsado por el Ministerio de Educación del Estado Plurinacional de Bolivia, titulado: *Olimpiada Científica Estudiantil Plurinacional Boliviana (OCEPB)*, donde, se invitó a que participen 6 áreas de las ciencias puras y naturales: Astronomía y Astrofísica, Biología, Física, Informática, Matemática y Química.

La organización del evento contó también con la participación de los siguientes organismos e instituciones: Comité Olímpico Boliviano de Astronomía y Astrofísica, Comité Olímpico Boliviano de Física, Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI), la Asociación Boliviana para el Avance de la Ciencia (ABAC), la Dirección Departamental de Cochabamba; las Carreras de Física de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), y la Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), los departamentos de Física de la Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra (UPSA), la Universidad Técnica de Oruro (UTO), la Universidad Mayor, Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca (UMRPSFXCh), la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS) y la Asociación para el Mejoramiento de la enseñanza de las Ciencias (AMEC).

Es siempre recomendable dar el incentivo a toda la juventud Boliviana mediante la motivación y la sana competencia en el evento nacional e invitar a que participen todas las categorías. Con ello se logra un entrenamiento continuo y sostenido, no solo para la siguiente inmediata gestión, sino con varios años de anticipación; dicha receta es sin duda la mejor

manera de incrementar el conocimiento en la juventud boliviana y lograr representaciones más competitivas a nivel internacional; no se debería escatimar recursos en la educación de las siguientes generaciones por que sin lugar a dudas es una inversión fundamental para avanzar hacia una óptima investigación científica y tecnológica en el país.

L@s ganador@s de las categorías: 5^o, 4^o, 3^o, 2^o, 1^o de Secundaria y 6^o de Primaria, forman los equipos Bolivianos preseleccionados postulantes a futuros eventos olímpicos: Latinoamericanos, Iberoamericanos e Internacionales a llevarse a cabo las siguientes gestiones 2014, 2015, 2016, 2017 y 2018 respectivamente. Cada año debe realizarse nuevamente la selección de los equipos mediante exámenes y en las concentraciones preparadas por el Comité Académico de cada área.

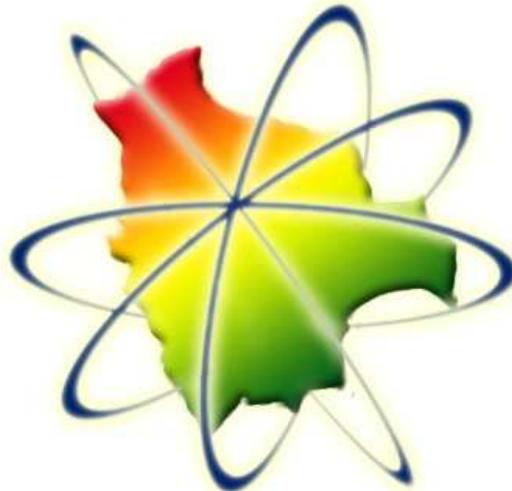
Los ganadores de la categoría de 6^o de Secundaria, tienen como principal premio, el ingreso libre y directo a cualquiera de las carreras de Ciencias y/o Ingeniería de las universidades comprometidas con las olimpiadas.

¡Felicidades! a tod@s l@s jóvenes participantes y ganador@s de las distintas etapas y categorías así como también a sus respectiv@s maestr@s de todas las Unidades Educativas fiscales, particulares y de convenio de todo el país que se animaron a participar en el apasionante mundo de la Física, la Astronomía y Astrofísica, porque están dando un digno ejemplo a seguir por otros establecimientos, profesor@s, estudiantes contemporáneos y por todas las generaciones venideras.

A continuación, se presentan las preguntas de los exámenes del **evento nacional** en las categorías de 3^o, 4^o y 5^o, de la 18^{va} OBF; también se presentan las soluciones en la parte final, como material de entrenamiento para el lector.

Página WEB: <http://www.fiumsa.edu.bo/olimpiada/>

OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA



OLIMPIADA BOLIVIANA DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Código(s) PACS: 01.50.Rt — 01.10.Hx

Descriptor: Competencias de física — Actividades organizacionales de física

3^{ro} DE SECUNDARIA

PARTE TEÓRICA

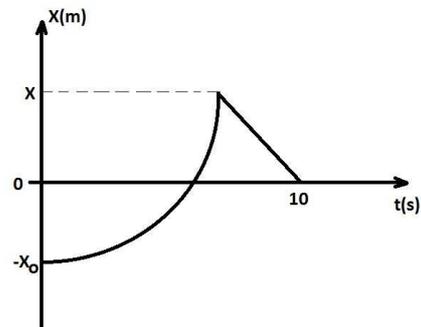
Instrucciones: Encierre en un círculo el inciso que considere correcto y realice todos los cálculos auxiliares al reverso de la hoja.

1. PARTE CONCEPTUAL (SUBRAYE LA RESPUESTA CORRECTA)

- (10 %) Después de que una pelota es lanzada hacia arriba y está en el aire, su velocidad:
 - Aumenta?
 - Disminuye?
 - Aumenta y luego disminuye?
 - Disminuye y luego aumenta?
 - Permanece constante?
- (10%) Si el vector B se adiciona al vector A, ¿Bajo qué condiciones el vector resultante A+B tiene magnitud A+B?:
 - A y B son paralelos y en la misma dirección.
 - A y B son paralelos y en direcciones opuestas.
 - A y B son perpendiculares.
 - Ninguno de los anteriores.
- (10%) Si al menos un componente de un vector es un número positivo, el vector no puede:
 - Tener ningún componente que sea negativo.
 - Ser cero.
 - Tener tres dimensiones.
 - Ninguna de las anteriores.
- (10%) Una pasajera, observadora A, en un auto que corre a una velocidad horizontal constante de magnitud 60 mi/h, sirve una taza de café para el cansado conductor. El observador B está de pie al lado del camino y observa por la ventana del auto el proceso de servir el café, cuando el auto pasa. ¿Qué observador(es) ve una trayectoria parabólica para el café cuando se mueve en el aire?:
 - A.
 - B.
 - A y B.
 - Ni A ni B.

2. PARTE PRÁCTICA. (JUSTIFIQUE SU RESPUESTA E INCLUYA DESARROLLO DEL MISMO)

- (20%) Le han pedido programar un brazo robot de una línea de ensamble que se mueve en el plano XY. Si el primer desplazamiento es \vec{A} ; el segundo es \vec{B} , de magnitud 6.40 cm y dirección 63° medida en el sentido del eje +X al eje -Y. La resultante $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ también debe tener una magnitud de 6.40 cm pero en una dirección de 22.0° medida en el sentido del eje +X al +Y.
 - Dibuje el diagrama de la suma de estos vectores, aproximadamente a escala.
 - obtenga las componentes de \vec{A} .
 - obtenga la magnitud y dirección de \vec{A}
- (20%) El gráfico de la figura representa el movimiento de una partícula en línea recta. Si para todo el recorrido la rapidez media y la velocidad media son de 20m/s y 10 m/s respectivamente. Determine los valores de X y X_0



- $X = 50, X_0 = -150$
 - $X = 50, X_0 = -100$
 - $X = 200, X_0 = -150$
 - $X = 100, X_0 = -100$
 - $X = 200, X_0 = -100$
- (20%) Un balón de acero se suelta desde la azotea de un edificio. Un observador que está, esta frente a una ventana de 1.22 [m] de altura nota que el balón tarda $1/8$ [s] para caer desde la parte superior hasta la parte inferior de la ventana. El balón sigue cayendo, efectúa un choque completamente elástico (sin pérdida de energía) en el pavimento horizontal, y vuelve a aparecer por la parte inferior de la ventana 2.20 [s] después de que pasó por ese sitio de bajada. ¿Qué altura tiene el edificio? (el balón tendrá la misma velocidad en un punto de subida que la que tenía de bajada después de un choque completamente elástico).

GUÍA DE LABORATORIO

La parte experimental de Física está compuesta de la práctica de laboratorio que esta descrita en esta guía.

Los alumnos deben elaborar el reporte correspondiente a la parte experimental. Es importante que el reporte sea elaborado siguiendo las reglas descritas más adelante en esta guía.

ELABORACIÓN DE REPORTE O INFORME

Lea atentamente las siguientes normas:

1.- El reporte deberá ser hecho de manera individual y entregada en el tiempo y calidad establecido.

2.- El reporte debe tener la siguiente estructura:

a) Título de la práctica. **ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE ELEMENTOS ESFÉRICOS DENTRO DE DOS FLUIDOS DIFERENTES.**

b) Objetivos de la práctica. Verificar la relación existente entre la velocidad promedio y la velocidad instantánea del evento observado. Investigar cómo varía la velocidad de este elemento sometido a estas condiciones.

Mencione los objetivos perseguidos en la práctica
 Qué cantidades físicas deben ser determinadas
 Qué leyes físicas deben ser verificadas
 Qué fenómenos debe ser estudiado

c) Material utilizado.

- Soporte universal grande
- Tubo de vidrio que contiene dos fluidos
- Regla con graduación milimétrica
- 20 Perdigones de acero
- Cronómetro
- Papel milimetrado
- Marcador para vidrio

OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

Verificar la relación existente entre la velocidad promedio y la velocidad instantánea del evento observado.

Investigar cómo varía la velocidad de este elemento sometido a estas condiciones.

El estudiante debe verificar los perdigones de acero y desde la parte superior con mucha delicadeza y cuidado debe depositar el elemento cuidadosamente sobre la superficie del primer líquido y debe hacer las observaciones, mediciones pertinentes, necesarias y suficientes a efecto de cumplir con el objetivo de la práctica.

d) Esquema experimental.

Haga un dibujo esquemático de la práctica. No

olvide identificar los elementos principales de su esquema.

e) Procedimiento experimental.

Describa de forma concisa el procedimiento realizado durante la práctica y también durante el procesamiento de los datos. Use los elementos correctos.

Describa cómo fue montada la práctica.

No olvide hacer las observaciones especiales que afectaron sus mediciones.

f) Recolección y procesamiento de los datos.

Las fórmulas deben acompañarse de una explicación concisa sobre su origen físico.

Ponga sus datos y cálculos en tablas para que sean fácilmente verificadas. Las tablas deben contener siempre títulos descriptivos, los símbolos y las unidades de las cantidades medidas o calculadas, todo en el sistema internacional SI.

Los gráficos también deben tener títulos descriptivos. No olvide especificar las cantidades y unidades representadas por los ejes correspondientes. Nunca coloque en los ejes los valores medidos de las cantidades, sino valores igualmente espaciados para ayudar a la lectura de los puntos. Use siempre la escala adecuada para los ejes.

Cuando tenga que ajustar una recta o curva sobre los puntos medidos, no lo haga a mano alzada.

g) Resultados y conclusiones.

Describa sus resultados y conclusiones obtenidas, y haga un análisis de estos resultados, sin olvidar considerar las posibles fuentes de errores y las aproximaciones con respecto al caso ideal. Recuerde que todas sus conclusiones deben estar basadas en los datos experimentales, caso contrario no deben ser consideradas como producto de su actividad experimental.

3.- Las preguntas propuestas en la guía de prácticas tienen por objetivo estimular al alumno a pensar en algunos detalles relevantes, desde el punto de vista físico, para el experimento. Ellas deben ser respondidas en los puntos pertinentes de cada reporte. Recuerde que los tópicos importantes que no sean abordados en los reportes podrán implicar una calificación más baja.

4.- Sugerimos enfáticamente que los alumnos lean los objetivos correspondientes a cada parte antes de realizar la misma. Este hábito facilitará su observación específica de los elementos necesarios y la comprensión de sus resultados.

5.- Al finalizar el reporte, relea su trabajo y revise si su exposición obedece a una línea lógica y el texto reproduce claramente el trabajo realizado. En el caso de que sus resultados hayan conducido a

errores muy grandes, verifique si se manipularon correctamente los instrumentos de medición y las unidades involucradas en el problema.

1. ¿Cuál de las velocidades promedio estimada da la aproximación más cercana a la velocidad instantánea del desplazamiento del perdigón?

2. Usando sus datos, ¿puede estimar un valor aún más preciso para la velocidad instantánea en la transición de los fluidos?

3. Al intentar determinar la velocidad instantánea, ¿qué factores influyen en la precisión de las mediciones? Discuta cómo cada factor influye en el resultado.

4. ¿Puede imaginar uno o más modos de medir la velocidad instantánea? ¿es la velocidad instantánea una cantidad que debe ser siempre estimada a partir de mediciones de la velocidad promedio?

5. Calcule la velocidad final e inicial del perdigón al sortear cada fluido y en la zona de transición del cambio de fluidos.

6. Construya un gráfico de velocidad versus distancia, con la distancia sobre el eje horizontal de todo el trayecto del perdigón. (Debe elegir un solo tamaño y que sea representativo del evento)

4^{to} DE SECUNDARIA

PARTE TEÓRICA

3. PARTE CONCEPTUAL (SUBRAYE LA RESPUESTA CORRECTA)

1. (10 %) Dos proyectiles son lanzados con la misma magnitud de velocidad inicial, uno con un ángulo α con respecto al nivel del suelo y el otro a $90 - \alpha$. Ambos proyectiles llegarán al suelo a la misma distancia desde el punto de lanzamiento. Ambos proyectiles:

- (a) El primero cae unos segundos antes?
- (b) Estarán en el aire durante el mismo tiempo?
- (c) El segundo cae unos segundos antes?
- (d) Tardan tiempos diferentes?
- (e) Ninguno de los anteriores?

2. (10%) ¿Para cuál de los siguientes vectores es la magnitud del vector igual a uno de los componentes del vector?:

(a) $\vec{A} = 2i + 5j$

(b) $\vec{B} = -3j$

(c) $\vec{A} = +5k$

(d) Ninguno de los anteriores

3. (10%) Si al menos un componente de un vector es un número positivo, el vector no puede:

- (a) Tener ningún componente que sea negativo.
- (b) Ser cero.
- (c) Tener tres dimensiones.
- (d) Ninguna de las anteriores.

4. (10%) Dos pulsos se mueven en direcciones opuestas en una cuerda y son idénticos en forma, excepto que uno tiene desplazamientos positivos de los elementos de la cuerda y el otro tiene desplazamientos negativos. En el momento en que los dos pulsos se traslapan por completo en la cuerda:

- (a) La energía asociada con los pulsos ha desaparecido.
- (b) La cuerda no se mueve
- (c) La cuerda forma una línea recta
- (d) Los pulsos han desaparecido y no reaparecerán

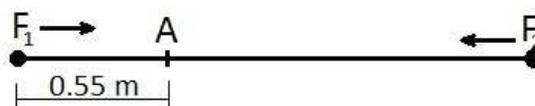
4. PARTE PRÁCTICA. (JUSTIFIQUE SU RESPUESTA E INCLUYA DESARROLLO DEL MISMO)

5. (20%) Se dispara un proyectil desde el piso ($x_0 = 0$, $y_0 = 0$) de modo que supera una valla de altura H , situada a una distancia horizontal D del punto de lanzamiento. El ángulo de disparo, α , medido respecto a la horizontal, para que el proyectil alcance su altura máxima al llegar a la valla y pase rasante a ella, debe cumplir:

a) $\tan \alpha = \frac{2H}{D}$ b) $\sin \alpha = \frac{H}{D}$ c) $\cos \alpha = \frac{H}{D}$

d) $\tan \alpha = \frac{H}{2D}$ e) $\cos \alpha = \frac{D}{H}$ f) $\tan \alpha = \frac{2D}{H}$

6. (20%) En un punto A de una cuerda de 2m de longitud, se superponen dos ondas, armónicas procedentes de dos fuentes F_1 y F_2 , en fase, situadas en los extremos de la cuerda. Sabiendo que ambas ondas se propagan con una velocidad de 40 m/s como indica la figura, con una frecuencia de 100 Hz cada una y con igual amplitud de 0,20 m, determinar la ecuación de movimiento oscilatorio que adquiere el punto A, que se halla a 0,55 m de F_1 .



7. (20%) Calcular el valor de a para los vectores: $\vec{A} = 3i + 4j + 5k$ y $\vec{B} = ai - 2j$ formen un ángulo de 45° .

- a) 1.5 b) $\frac{5}{3}$ c) $-\frac{3}{2}$
 d) 0 e) -1.5 f) ninguno

GUÍA DE LABORATORIO

MEDIDA DE LA ABERTURA RECTANGULAR DE DIFRACCIÓN A PARTIR DE LA LONGITUD DE ONDA DE UN LASER

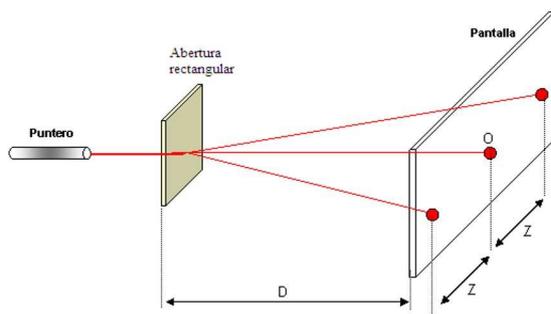
1. Objetivo de la práctica

- Observar la imagen de difracción producida por una abertura rectangular de difracción, cuando se ilumina con luz monocromática.
- Medir el ancho de la abertura de la rendija de difracción.

2. Material

- Gancho para soporte del puntero.
- Puntero.
- Pantalla (papel milimetrado).
- Abertura rectangular (formada por cada uno con gilette).
- Gancho para soporte de la abertura.
- Cinta masquin para armar la abertura.
- Cinta métrica.

3. Montaje experimental



4. Realización

4.1.- Primero debe formar una abertura rectangular con los gilette que se tiene, con ayuda del masquin.

4.2.- Acople la abertura rectangular perpendicular a la luz y la pantalla a una distancia D , lo suficientemente alejada como para que la distancia entre el máximo principal O y el máximo

de primer orden, situado a la izquierda y a la derecha del centro de la pantalla, distancia Z , sea fácilmente medible con una regla. Cuanto mayor sea esta distancia, mejor será la medida.

4.3.- Con la cinta métrica debe medir la distancia de la red a la pantalla (D [m]).

4.4.- Mida sobre la pantalla la distancia Z entre el punto O y un punto difractado a la derecha y a la izquierda. (Z [m]). Vaya alejando la pantalla de la red de difracción, aumentando la distancia D de 10 en 10 cm y midiendo en cada caso el valor correspondiente de Z .

4.5.- La posición de un máximo de primer orden Z respecto del máximo principal O , situado en el centro de la pantalla viene dado por la ecuación:

$$d = \frac{\lambda}{Z} D \quad (1)$$

4.6.- Representando los valores de $Z = f(D)$ debe obtenerse una recta. Igualando su pendiente:

$$d_i = \lambda \frac{D_i}{Z_i}$$

con λ se puede calcular la longitud de onda de la luz.

4.7.- Teoría de error.

Calcule el valor promedio de \bar{d}_i con la ecuación:

$$\bar{d}_i = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (2)$$

Obtenga la desviación típica con la ecuación:

$$\sigma_{n-1} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n (\bar{d}_i - d_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

Calcule el error del Valor promedio con la ecuación:

$$\Delta d = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

El resultado de la serie de mediciones se expresa como

$$d = \bar{d} \pm \Delta d \quad (5)$$

Cuya interpretación consiste en: El valor verdadero d se hallará en el intervalo de confianza

$$\bar{d} - \Delta d \leq d \leq \bar{d} + \Delta d \quad (6)$$

Obtenga el error relativo con la ecuación

$$E_R = \frac{\sigma_{n-1}}{\bar{d}} \quad (7)$$

Y por último obtenga el error porcentual

$$E\% = E_R \times 100 \quad (8)$$

5. Tareas

5.1.- Obtener 10 mediciones de las distancias Z y D .

5.2.- Realizar la teoría de error de los datos obtenidos y obtener el error porcentual.

5.3.- Realizar una gráfica con los datos obtenidos de (Z , D).

6. Realización

Tomar los datos de separación de rendija y las distancias Z y D .

N	$d[mm]$	$Z[cm]$	$D[cm]$
1			
2			
3			
4			

Luego para distintas distancias de separación.

N	$Z[cm]$	$D[cm]$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

7. Conclusiones y Observaciones

8. Cuestionario

8.1.- Explique qué tipo de errores tuvo en la práctica.

8.2.- ¿Qué parámetros se debería modificar para evitar los errores nombrados?

8.3.- ¿Usted cree que se podría obtener el espesor de un cabello con el mismo procedimiento efectuado en la práctica?

5^{to} DE SECUNDARIA

Parte conceptual y Teórica (40 %)

Instrucciones: Encierre en un círculo su respuesta correcta. (debe justificar cada una de sus respuestas)

- (5%) ¿Si un automóvil viaja por una pista circular con rapidez constante:
 - Su aceleración es cero ya que su velocidad es constante.
 - Su aceleración es distinta de cero y siempre dirigida hacia el centro.
 - Su aceleración es constante y distinta de cero.
 - Su aceleración es tangente a la curva.
 - Tanto (c) como (d) son correctas.
- (5%) ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera, con respecto a un cuerpo que sube por un plano inclinado rugoso con velocidad constante?
 - El trabajo realizado por el peso del cuerpo es positivo.
 - El trabajo hecho por la fuerza normal sobre el cuerpo es positivo.
 - El trabajo efectuado por la fuerza de rozamiento sobre el cuerpo es negativo.
 - Todas las anteriores son verdaderas.
 - Todas las anteriores son falsas.
- (5%) Si un choque es perfectamente elástico, se cumple:
 - El principio de conservación de la energía cinética?
 - El principio de conservación de la energía?
 - El principio de conservación de la energía y el principio de conservación de la cantidad de movimiento?
 - El principio de conservación de la cantidad de movimiento?
 - Ninguna de las anteriores?

4. (5%) Un fluido tiene comportamiento ideal cuando:

- (a) Su densidad y viscosidad son constantes?.
- (b) Carece de fuerzas de rozamiento?.
- (c) Su viscosidad es nula y es incompresible?
- (d) Su densidad es constante y su viscosidad variable.
- (e) Ninguna de las anteriores.

5. (5%) Se tienen dos tubos del mismo material de largo L y $2L$ a la misma temperatura. Para que ambos tubos se dilaten la misma cantidad se puede:

- (a) Someter a ambos tubos a la misma variación de temperatura.
- (b) Someter al tubo más largo al doble de variación de temperatura que el más corto.
- (c) Someter al tubo más largo a la mitad de la variación de temperatura que el más corto.
- (d) Unir a ambos tubos por sus extremos.
- (e) Al tubo largo someterlo a una temperatura T cualquiera y al más corto a una temperatura $T/2$.

6. (5%) Se tiene dos cuerpos del mismo material de masas m_1 y m_2 . Experimentalmente se determina que si ambos reciben la misma cantidad de calor, el primero aumenta su temperatura en 2°C y el segundo cuerpo su temperatura sube en 5°C . De acuerdo a la información entregada la razón entre $m_2 : m_1$ es:

- (a) 1:3
- (b) 2:5
- (c) 2:3
- (d) 5:3
- (e) 5:2

7. (5%) Si la eficiencia de una máquina de calor es del 50 % significa que:

- (a) Toma 100 J de la fuente de baja temperatura y la transforma en 50 J de trabajo
- (b) Toma 100 J de la fuente de alta temperatura y la transforma en 50 J de trabajo
- (c) Toma 50 J de la fuente de alta temperatura y la transforma en 50 J de trabajo
- (d) Toma 100 J de trabajo y los transforma en 50 J de calor a la temperatura baja
- (e) Toma 100 J de trabajo y los transforma en 50 J de calor a la temperatura alta

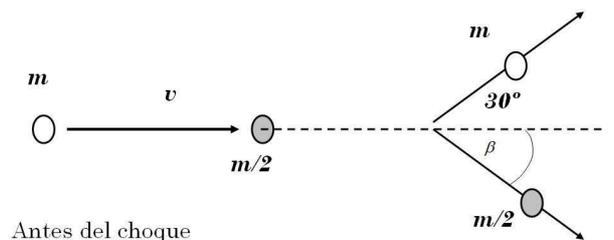
8. (5%) Como mejoraríamos la eficiencia de una máquina de Carnot que solo puede operar en un rango de temperaturas entre 298°K y 400°K :

- (a) Cambiando el fluido de trabajo.
- (b) Aumentando la temperatura baja y disminuyendo la temperatura alta.
- (c) Disminuyendo la temperatura baja y aumentando la temperatura alta.
- (d) Aumentando ambas temperaturas.
- (e) Disminuyendo ambas temperaturas.

Parte Práctica (60 %)

Instrucciones: Utilice las hojas que se adjunta para la solución de sus problemas.

1. (20 %) Una bola de masa m , que se mueve a la velocidad v de 10 m/s choca elásticamente con otra bola en reposo, cuya masa es $m/2$, y es despedida por ella, formando un ángulo de 30° con la dirección inicial de su movimiento (ver figura). Con que velocidad se moverán las bolas después del choque?



Antes del choque

Después del choque

Figura 1.

2. (20 %) Un recipiente A termoaislado contiene 5 kg de agua a la temperatura de 60°C , otro recipiente B, también termoaislado, contiene 1 kg de agua a 20°C . Del recipiente A se transfiere una masa de agua m al recipiente B y se espera a que se alcance el equilibrio térmico. Luego se transfiere del recipiente B al recipiente A la misma cantidad m de agua y cuando se alcanza el equilibrio térmico el recipiente A está a la temperatura de 59°C .

- (a) Determinar m y la temperatura del recipiente B.
- (b) Dibujar una gráfica que indique la temperatura del recipiente B en función de la masa m transferida.

3. (20 %) Un motor de combustión que funciona con un gas ideal biatómico, comienza su ciclo a una temperatura de 27°C y una presión de 1 atmósfera. El factor de compresión del motor es $\epsilon = 9,5$ y el cociente del calor específico a presión constante y a volumen constante es $\gamma = 1,4$. El funcionamiento del motor se muestra en la siguiente figura.

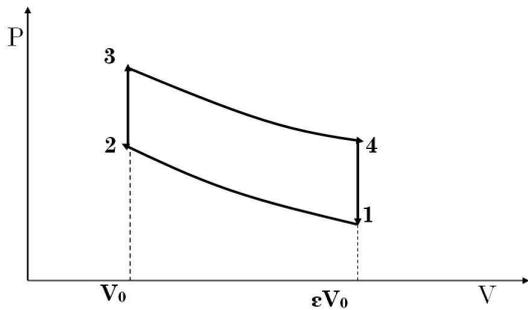


Figura 2.-

Entre 1 y 2 existe un proceso adiabático, entre 2 y 3 la mezcla se calienta a volumen constante de modo que la presión se duplica. El pistón es empujado hacia abajo según la adiabática 3-4, produciéndose una expansión hasta ϵV_0 , luego la válvula de expansión se abre y se vuelve a las condiciones iniciales.

a) Calcular la presión y la temperatura en los puntos 1, 2,3 y 4. b) El rendimiento del ciclo.

GUÍA DE LABORATORIO

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE UN SÓLIDO

(a) OBJETIVOS Determinar la densidad de un cuerpo sólido con densidad mayor al agua aplicando el principio de Arquímedes y la ley de Hooke.

(b) FUNDAMENTO TEORICO

Ley de Hooke

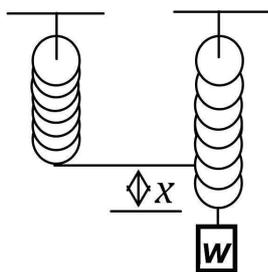


Figura 1.

La ley de Hooke es una relación empírica y un caso especial de una relación más general, relativa a la deformación de los cuerpos elásticos. Rige el comportamiento de resortes y otros cuerpos elásticos, siempre que su deformación no sea demasiado grande. La ley de Hooke es válida hasta casi el límite elástico de muchos materiales comunes.

Si restringimos al caso de una tracción o un empuje, el alargamiento que sufre un

resorte cuando se cuelga un peso de su extremo inferior se lo determina a partir de ley de Hooke.

$$F = Kx \tag{9}$$

Donde:

K = Constante de proporcionalidad llamada también constante elástica

x = Desplazamiento medido a partir de la posición de equilibrio.

EMPUJE HIDROSTÁTICO

Resulta evidente que cada vez que un cuerpo se sumerge en un líquido es empujado de alguna manera por el fluido. A veces esa fuerza es capaz de sacarlo a flote y otras sólo logra provocar una aparente pérdida de peso.

Tomemos el caso del cubo: la fuerza es el peso de la columna de agua ubicada por arriba de la cara superior (de altura h_1). Análogamente, F_2 corresponde al peso de la columna que va hasta la cara inferior del cubo (h_2). El empuje resulta ser la diferencia de peso entre estas dos columnas, es decir el peso de una columna de líquido idéntica en volumen al cubo sumergido. Concluimos entonces que el módulo del empuje es igual al peso del líquido desplazado por el cuerpo sumergido.

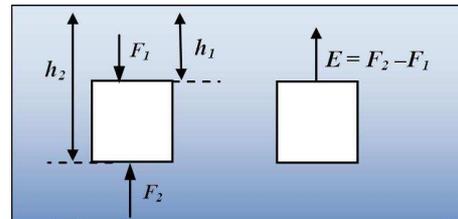


Figura 2.

Con un ejercicio de abstracción podremos generalizar este concepto para un cuerpo cualquiera. Concentremos nuestra atención en una porción de agua en reposo dentro de una pileta llena. ¿Por qué nuestra porción de agua no cae al fondo de la pileta bajo la acción de su propio peso? Evidentemente su entorno la está sosteniendo ejerciéndole una fuerza equilibrante hacia arriba igual a su propio peso (el empuje).

$$E = \rho \cdot g \cdot V_S \tag{10}$$

Donde:

ρ = Densidad del líquido en el cual está sumergido el cuerpo

g = Aceleración de la gravedad

V_S = Volumen sumergido del cuerpo.

(c) MATERIAL NECESARIO

- Resorte helicoidal.
- Varilla de 60 cm con base en forma de T.
- 5 piezas del material a ensayar.
- Regla métrica, con corredera y soporte.
- Jarra.
- Agua.
- Termómetro

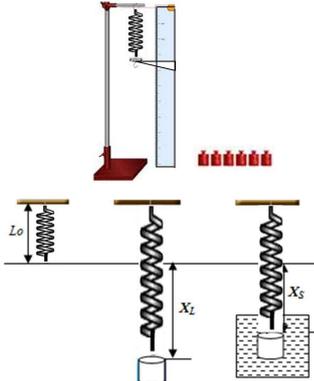


Figura 3.

(d) PROCEDIMIENTO

- Armar el equipo como indica la Figura N° 3.
- Colgar del resorte el peso N° 1 y esperar que el cuerpo se quede en equilibrio, con la regla con corredera medir la deformación del mismo (XL).
- Sumergir el peso N°1 completamente en el agua del recipiente (el cuerpo no debe chocar al fondo) y esperar que el cuerpo se quede en equilibrio, para luego con la regla con corredera medir la deformación del mismo (XS).
- Repetir el procedimiento con el peso N° 2, N° 3, N° 4, N° 5, N° 6, N° 7, N° 8, N° 9 y N° 10

- Medir la temperatura del agua en el recipiente con el termómetro

(e) DATOS (5 %)

Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_L(cm)$										
$X_L(cm)$										

Tabla 1

(f) CALCULOS

- Asumir la densidad del agua el siguiente valor:

Densidad del agua: $\rho_L = 999kg/m^3 \pm 1kg/M^3$

- Graficar X_L vs. X_S (10 %)
- Determinación de la relación ($X_S/X_L = a$) (15 %)

N°	X_S (cm)	X_L (cm)	X_L^2 (cm ²)	X_S^2 (cm ²)	$X_S X_L$ (cm ²)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
n	$\sum X_S$	$\sum X_L$	$\sum X_L^2$	$\sum X_S^2$	$\sum X_S X_L$
.					

Tabla 2.

$$a = \frac{n \sum (X_S \cdot X_L) - (\sum X_L) \cdot (\sum X_S)}{n \sum (X_L^2) - (\sum X_L)^2} \quad (11)$$

- Determinación del error de a o la relación (XS/ XL) (10

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n-2} (\sum (X_S^2) - \frac{1}{n} (\sum X_S)^2) a (\sum (X_L^2) - \frac{1}{n} (\sum X_L)^2)} \quad (12)$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{n}{n(\sum X_L^2) - (\sum X_L)^2}} \quad (13)$$

$$E_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

- Determinación de de la densidad del solido: (10 %)
Aplicando el principio de Arquímedes y combinando con la ley de Hooke se

llega a demostrar que la densidad del sólido viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho_S = \frac{\rho_L}{1 - \frac{X_S}{X_L}} = \frac{\rho_L}{1 - a} \quad (15)$$

- Determinación del error de la ρ_S : (5 %)

$$E_\rho = \rho_S \left(\frac{E_\rho}{\rho_L} + \frac{E_a}{a} \right) \quad (16)$$

vii. Determinación del valor verdadero de ρ_S : (5 %)

$$\rho_S =$$

viii. Determinación del error porcentual de la ρ_S (5 %)

$$E_P =$$

ix. **Cuestionario (35 %)**

1.- (5 %)¿El empuje sobre el sólido en la práctica es afectado por la variación de temperatura del líquido en el cual está sumergido?

2.- (5 %)¿Qué nos indica el error porcentual calculado en la práctica?

3.- (5 %)¿Cómo podemos reducir los errores cometidos en la práctica?

4.- (5 %) ¿Qué otro método puede aplicar para la determinación de la densidad de un sólido sin usar la balanza?

5.- (15 %) Demostrar la ecuación de (7) a partir de los datos obtenidos en la práctica.

SOLUCIONES**3^{ro} DE SECUNDARIA****PARTE CONCEPTUAL**

1.R.- D) Disminuye y luego aumenta?

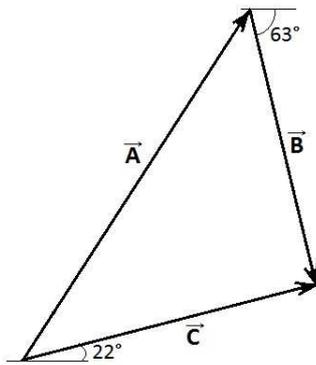
2.R.- A) A y B son paralelos y en la misma dirección.

3.R.- B) Ser cero.

4.R.- C) A y B.

PARTE PRÁCTICA

5.R.- Parte A)



Parte B)

$$\vec{A} + \vec{B} = \vec{C} \implies \vec{A} = \vec{C} - \vec{B}$$

$$\vec{C} = 6.4 \cos 22i + 6.4 \sin 22j$$

$$\vec{B} = 6.4 \cos 63i + 6.4 \sin 63j$$

De donde:

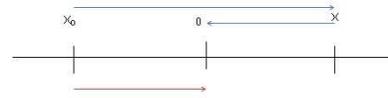
$$\vec{A} = 3.01i - 8.06j$$

$$A = \sqrt{(3.01)^2 + (8.06)^2}$$

$$A = 8.06 \quad y \quad \alpha = 69.6^\circ$$

6.R.- Observando el gráfico que la partícula a $t=0$ parte del punto $-X_0$ y se mueve en dirección positiva hasta

el punto X, luego regresa (invierte la dirección de movimiento) y se detiene en el origen a los 10 segundos



$$\text{Rapidez Media} = \frac{X_0 + X + X}{10} = \frac{X_0 + 2X}{10} = 20$$

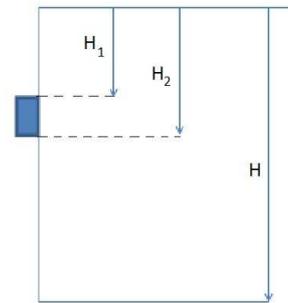
$$X_0 + 2X = 200$$

$$\text{Velocidad Media} = \frac{X_0}{10} = \frac{X_0}{10} = 10$$

Entonces:

$$X_0 = 100 \quad y \quad X = 50$$

7.R.- Por definición tenemos:



$$h = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (I)$$

$$h_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 \quad (17)$$

$$h_2 = \frac{1}{2} a t_2^2 \quad (18)$$

Por dato:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{8} s = 0.125 s \quad (a)$$

$$h_2 - h_1 = 1.22 m$$

De (1) y (2)

$$h_2 - h_1 = 4.9 (t_2^2 - t_1^2)$$

$$1.22 m = 4.9 (t_2 + t_1) (0.125)$$

$$t_2 + t_1 = 1.9918s \quad (b)$$

De (a) y (b) se tiene:

$$t_2 = 1.0584, \quad t_1 = 0.9334$$

Por condición del problema que el balón es visto después de 2.2 segundos esto significa que baja en un segundo y sube en otro, por tanto el tiempo de bajada desde la azotea será:

$$t = t_2 + t_b$$

$$t = 2.1584s$$

Reemplazando en (I)

$$h = 22.8508m$$

GUÍA DE LABORATORIO

Esquema experimental.

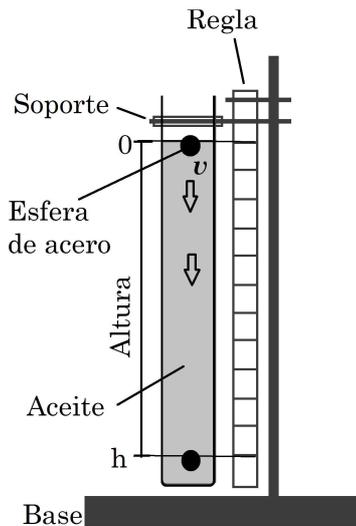


FIGURA 1. Esquema del experimento

Procedimiento experimental.

Lo primero que se debe realizar, es la determinación de las densidades de las esferas, y del fluido. Se debe medir la masa y los radios de las esferas, la masa se mide directamente con una balanza y el radio se mide con un vernier. Para medir el volumen del fluido utilizamos un vaso precipitado con graduación de $0,1cm^3$, y medimos la masa del fluido.

Una vez obtenidos los valores de las densidades de los fluidos, definimos un punto inicial y un punto final en el tubo

que contiene el fluido, y para mayor comodidad en la toma de datos, procedemos a poner marcas en el tubo a una cierta distancia y así poder tomar los tiempos en los que tardan en bajar las esferas con el cronómetro.

Debido a que el tubo no fue muy grande, la máxima distancia de desplazamiento de las esferas es de $40cm$.

Recolección y procesamiento de los datos.

El volumen de las esferas se determina usando el radio de las esferas con la siguiente fórmula:

$$V_{esfera} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

La densidad para el fluido y las esferas, esta dado por:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Los valores de las densidades que encontramos son:

MAGNITUD	VALOR
$m_{esfera}(g)$	1,038
$m_{aceite}(g)$	923
$r_{esfera}(cm)$	0,3
$V_{aceite}(cm^3)$	1000
$\rho_{esfera}(g/cm^3)$	9,063
$\rho_{aceite}(g/cm^3)$	0,923

TABLA 1. Valores medidos para la determinación de las densidades del fluido y las esferas.

La velocidad media de una partícula es el cociente del cambio neto de la posición entre el tiempo total transcurrido durante ese cambio, y está dada por:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Para hallar la velocidad media de las esferas en el fluido, medimos el tiempo que tarda la esfera en recorrer $40cm$ de fluido. Las velocidades medias de las 20 esferas se muestran en la siguiente tabla:

N	t	$v = 0.4/t [m/s]$
1	1,33	0,30
2	1,33	0,30
3	1,30	0,31
4	1,30	0,31
5	1,30	0,31
6	1,25	0,32
7	1,30	0,31
8	1,30	0,31
9	1,18	0,34
10	1,30	0,31
11	1,30	0,31
12	1,30	0,31
13	1,28	0,31
14	1,28	0,31
15	1,30	0,31
16	1,30	0,31
17	1,30	0,31
18	1,30	0,31
19	1,28	0,31
20	1,29	0,31

TABLA 2. Velocidad promedio de las 20 esferas

La velocidad instantánea es la velocidad que tiene la partícula en cada punto y en cada instante de su trayectoria, y esta dada por:

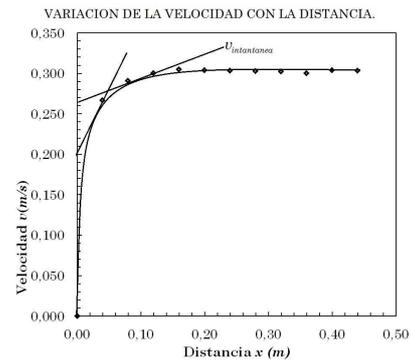
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Para hallar la velocidad en cada punto, tomamos los tiempos en cada 4cm de la trayectoria, y los datos que tenemos son:

t	$x(m)$	$V_{instantanea} = x/t [m/s]$
0,000	0,00	0,000
0,150	0,04	0,267
0,275	0,08	0,291
0,400	0,12	0,300
0,525	0,16	0,305
0,658	0,20	0,304
0,792	0,24	0,303
0,925	0,28	0,303
1,058	0,32	0,302
1,200	0,36	0,300
1,317	0,40	0,304
1,450	0,44	0,303

TABLA 3. Tabla de las velocidades para la observación de la variación de la velocidad con la distancia.

Para observar la variación de la velocidad con la distancia, para esto realizamos la siguiente gráfica.



Gráfica 2. Muestra la variación de la velocidad con la distancia, donde las rectas tangentes a la curva muestran las velocidades instantáneas en los puntos.

Resultados y conclusiones.

Desplazando las 20 esferas en el fluido, se determinó la velocidad media de las esferas, donde se encontró un valor medio de $\bar{v} = 0,31 m/s$.

También se pudo observar que la velocidad instantánea cambiaba en los primeros 12 cm, después de los 12 cm, la esfera sigue un movimiento constante, esto debido a la ley de Stokes que dice que un cuerpo que se mueve en un fluido con una determinada viscosidad, se ve sometido a dos fuerzas, la gravitatoria y la de arrastre. En el momento que ambas se igualan su aceleración se vuelve nula y su velocidad constante.

Se pudo verificar que las magnitudes de la velocidad media y la velocidad instantánea no son exactamente iguales, ya que ambas son cantidades relacionadas, pero no equivalentes.

CUESTIONARIO

R1: Se verifica en el gráfico, ya que la pendiente que se logre graficar para cada fluido es diferente, trazando una paralela con esa pendiente a la curva correspondiente se puede obtener la velocidad instantánea. (20 puntos)

R2: como el tramo es muy pequeño se puede tomar la velocidad final del tramo anterior y la inicial del siguiente iguales, estará en la tabla de valores anotados. (10 puntos)

R3: Los factores importantes son los tamaños de los tramos controlados, la velocidad de reacción sobre el cronometro, las características de los fluido, la temper-

atura. (10 puntos)

R4: Para este caso experimental es la única. (10 puntos)

R5: Deben tomar el tiempo del inicio del movimiento, hasta la distancia al cambio de fluido, tienen la velocidad en el champoo hay variaciones cuando el equipo no esta vertical y la esfera se desliza en contacto con la pared del tubo de vidrio. Para el caso del fluido inferior tomar la distancia desde la zona de separación hasta el final del tubo. (20 puntos)

R6: El resultado será el gráfico que describe el viaje del perdigón desde la parte superior atravesando al primer fluido con una pendiente y que a la mitad del tubo un cambio de pendiente, marcando en el cambio de pendiente una pequeña zona de transición, posiblemente despreciable debido a la escala elegida. (30 puntos)

4^{to} DE SECUNDARIA

PARTE CONCEPTUAL

1.R.- d) Tardan tiempos diferentes?

2.R.- c) $\vec{A} = +5k$

3.R.- b) Ser cero.

4.R.- c) La cuerda forma una línea recta

PARTE PRÁCTICA

5.R.- Para

$$D = V_0 \cos \alpha t \quad (19)$$

$$H = V_0 \sin \alpha t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (20)$$

$$V_{fy} = V_0 \sin \alpha - g t \quad (21)$$

Como en el punto más alto $V_{fy} = 0$, despejamos de (3) t y obtenemos

$$t = \frac{V_0 \sin \alpha}{g} \quad (22)$$

Reemplazando (4) en (1) y (2) se tiene

$$H = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad (23)$$

$$D = \frac{V_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} \quad (24)$$

Despejando V_0^2 de (6) y reemplazando en (5) se tiene:

$$\tan \alpha = \frac{2H}{D}$$

6.R.- Primero calculamos

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{40[m/s]}{100[s^{-1}]} = 0.4[m]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{6.28}{0.4[m]} = 15.71[m^{-1}]$$

$$\omega = 2\pi f = 6.28 * 100[s^{-1}] = 628[s^{-1}]$$

$$A' = 2A = 2 * 0.20[m] = 0.40[m]$$

Como la ecuación de onda general

$$\Psi(t, x) = A' \cos \omega t \sin kx$$

Reemplazando valores tenemos:

$$\Psi(t, x) = 0.40[m] \cos 628[s^{-1}]t \sin 17.71[m^{-1}]x$$

Para $x=0.55$ m, se tiene:

$$\Psi(t, 0.55m) = 0.40[m] \cos (628[s^{-1}]t);$$

$$\sin (15.71[m^{-1}]0.55[m])$$

$$\Psi(t, 0.55m) = 0.40[m] \cos (628[s^{-1}]t) \sin (8.64)$$

$$\Psi(t, 0.55m) = 0.40[m] \cos (628[s^{-1}]t) 0.707$$

Finalmente se tiene:

$$\Psi(t) = 0.28[m] \cos (628[s^{-1}]t)$$

7.R.- Por definición tenemos:

$$\vec{A} \bullet \vec{B} = A * B \cos \alpha$$

$$\vec{A} \bullet \vec{B} = (3i + 4j + 5k) \bullet (ai - 2j)$$

$$\vec{A} \bullet \vec{B} = 3a - 8$$

$$A = \sqrt{3^2 + 4^2 + 5^2} = \sqrt{50}$$

$$B = \sqrt{a^2 + 2^2} = \sqrt{a^2 + 4}$$

Reemplazando en la ecuación principal tenemos:

$$\cos 45 = \frac{\vec{A} \bullet \vec{B}}{A * B}$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{3a - 8}{\sqrt{50}\sqrt{a^2 + 4}}$$

Reduciendo términos se obtiene:

$$64a^2 + 192a + 144 = 0$$

Del cual se obtiene:

$$a = -\frac{3}{2}$$

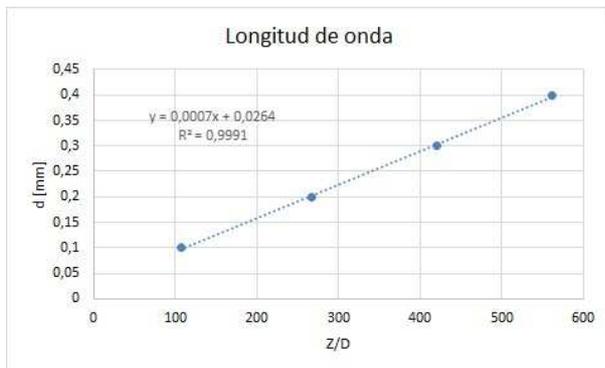
GUÍA DE LABORATORIO

6 Realización

Para el primer caso que es calcular la longitud de onda del laser, con una rendija variable tomamos datos de la separacion de rendija y ademas los datos de Zy D para cada separación.

N	d[mm]	Z[cm]	D[cm]
1	0,1	7,85	421
2	0,2	3,15	421
3	0,3	2,00	421
4	0,4	1,50	421

Con la ecuación (1) realizamos la regresión lineal para estos datos, obteniendo la recta:



de la regresión obtenemos el valor del coeficiente b, el cual es el valor de la longitud de onda:

$$b = 0,0006591 \text{ mm}$$

Por comparación:

$$\lambda = 659,1 \text{ nm}$$

Teniendo el valor de la longitud de onda ya podemos tomar una distancia cualesquiera de la rendija y procedemos a tomar los datos de Z para diferentes distancias D:

N	Z[cm]	D[cm]
1	27,3	60
2	31,6	70
3	35,4	80
4	41,2	90
5	45,1	100
6	50,4	110
7	53,8	120
8	58,7	130
9	64,1	140
10	67,2	150

Con estos datos podemos calcular la distancia de separación con la ecuación (1), obtenemos valores para d:

N	d[mm]	$d_i[\mu\text{m}]$	$(\bar{d} - d_i)^2$
1	0,001448571	1,4486	7,207E-05
2	0,001460032	1,4600	8,827E-06
3	0,001489492	1,4895	1,002E-03
4	0,001439782	1,4398	2,986E-04
5	0,001461419	1,4614	1,900E-05
6	0,001438512	1,4385	3,733E-04
7	0,001470112	1,4701	1,703E-04
8	0,001459676	1,4597	6,842E-06
9	0,001439532	1,4395	3,073E-04
10	0,001471205	1,4712	1,788E-04
	Sumatorias	14,5783	0,00247

Usando los datos de la tabla, con la ec. (2) obtenemos el promedio de d:

$$\bar{d} = \frac{14,5783}{10} = 1,4578\mu\text{m}$$

Con la ec. (3) y (4) el error:

$$\sigma_{n-1} = \pm \sqrt{\frac{0,00247}{9}} = 0,01657\mu\text{m}$$

$$\Delta d = \frac{0,01657}{\sqrt{10}} = 0,0052\mu\text{m}$$

Por tanto la distancia de separación de la rendija será:

$$d = (1,457 \pm 0,005)\mu\text{m}$$

De las ec.(7) y (8):

$$E_R = \frac{0,01657}{1,4578} = 0,01137$$

$$E\% = 0,01137 * 100 = 1,14\%$$

7 Conclusiones y Observaciones

En el presente laboratorio se observó el comportamiento del fenómeno de difracción de la luz, el cual se comporta como indica la teoría. Finalmente se puede ver una aplicación para determinar distancias muy pequeñas en nuestro caso la separación de dos guilletes.

8 Cuestionario

R. 8.1.- No se presentaron muchos errores ya que el error es del 1% aproximadamente, la mala calibración de los instrumentos agravaría el error y también el mal manejo de estos.

R. 8.2.- Deberíamos tener instrumentos muy bien calibrados, además de contar con una precisión de dichos instrumentos mayor ya que nuestra cinta métrica estaba graduada con milímetros.

R. 8.3.- Si se puede, considerando el mismo tratamiento para los datos esa vez lo que se debería calcular es la distancia entre rejillas ya que el sistema formado por los guilletes más el caballo en medio es una rejilla doble.

5^{to} DE SECUNDARIA

Parte teórica

(a) (b)

(b) (c)

(c) (c)

(d) (c)

(e) (c) Justificación:

Para el tubo más corto: $\Delta L_1 = L\alpha\Delta T$ (1)

Para el tubo más largo: $\Delta L_2 = 2L\alpha\Delta T$ (2)

Para que $\Delta L_1 = \Delta L_2$; ΔT de la ecuación (2) debe ser dividida entre 2.

(f) (b) Justificación:

Como los dos cuerpos son del mismo material, sus calores específicos son los mismos, por otra parte ambos reciben la misma cantidad de calor, por lo tanto:

$$Q = m_1c\Delta T = m_1c(2) \quad (1)$$

$$Q = m_2c\Delta T = m_2c(5) \quad (2)$$

Dividiendo (2) entre (1), se encuentra $m_2/m_1 = 2/5$.

(g) (b) Justificación:

Por definición el rendimiento es:
 $R = \frac{W_N}{Q_H} \times 100$

Para que R sea del 50 %; $Q_H = 100J$ y $W_N = 50J$

(h) (c) Justificación:

La eficiencia para un motor de Carnot viene dado por:

$$E = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Para aumentar E, debe disminuir T_C y aumentar T_H .

parte práctica

(a) Solución:

Como se trata de un choque elástico, se puede aplicar el principio de conservación de la cantidad de movimiento y el principio de conservación de la energía:

Principio de conservación de la cantidad

de movimiento:

En la dirección x:

$$mv = mv_1 \cos 30^\circ + (m/2)v_2 \cos \beta$$

$$v = v_1 \cos 30^\circ + (1/2)v_2 \cos \beta \quad (25)$$

En la dirección y:

$$0 = mv_1 \sin 30^\circ - (m/2)v_2 \sin \beta$$

$$v_1 = v_2 \sin \beta \quad (26)$$

Principio de conservación de la energía:

$$\frac{1}{2}mv = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$v^2 = v_1^2 + \frac{1}{2}v_2^2 \quad (27)$$

Despejando el $\sin \beta$ de la ecuación (2) y elevando al cuadrado miembro a miembro tenemos:

$$\sin \beta = \frac{v_1}{v_2}; \quad \sin^2 \beta = \frac{v_1^2}{v_2^2} \quad (28)$$

Despejando v_2 de la ecuación (3), tenemos:

$$v_2^2 = 2(v^2 - v_1^2); \quad v_2 = \sqrt{2(v^2 - v_1^2)} \quad (29)$$

A partir de la siguiente relación trigonométrica:

$$\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1 \Rightarrow \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} \quad (30)$$

Combinando la ecuación (4) y (5) con (6):

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v^2}} = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{2(v^2 - v_1^2)}} \quad (31)$$

Ahora sustituimos las ecuaciones (5) y (7) en la ecuación (1):

$$v = v_1 \cos 30^\circ + (1/2)\sqrt{2(v^2 - v_1^2)}\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{2(v^2 - v_1^2)}};$$

efectuando operaciones:

$$\begin{aligned} 2v &= 2v_1 \cos 30^\circ + \sqrt{2(v^2 - v_1^2)} - v_1^2 \\ &= 2v_1 \cos 30^\circ + \sqrt{2v^2 - 3v_1^2} \end{aligned}$$

$$(2v - 2v_1 \cos 30^\circ)^2 = 2v^2 - 3v_1^2$$

$$4v^2 - 8vv_1 \cos 30^\circ + 4v_1^2 \cos^2 30^\circ = 2v^2 - 3v_1^2$$

$4v^2 - 8vv_1 \cos 30^\circ + 3v_1^2 = 2v^2 - 3v_1^2$; ordenando la ecuación de segundo grado: $6v_1^2 - 8vv_1 \cos 30^\circ + 2v^2 = 0$; dividiendo entre 2 y resolviendo la ecuación de segundo grado:

$$3v_1^2(4v \cos 30^\circ)v_1 + v^2 = 0$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{4v \cos 30^\circ \pm \sqrt{(-4v \cos 30^\circ)^2 - 4 \cdot 3 \cdot v^2}}{2 \cdot 3} \\ &= \frac{4v \cos 30^\circ \pm \sqrt{12v^2 - 12v^2}}{6} \\ &= \frac{4v \cos 30^\circ}{6} \end{aligned}$$

$$v_1 = \frac{4 \cdot 10 \cos 30^\circ}{6} = 5,77 \text{ m/s}; \text{ A partir de}$$

la ecuación (5): $v_2 = \sqrt{v^2 - v_1^2} = 11,55 \text{ m/s}$

(b) Solución:

a)

- Como los recipientes son termoaislados, se cumple el principio de conservación de la energía:

- Calor que cede el agua caliente, (tanque A) = Calor que gana el agua fría, (tanque B):

- Calor que transfiere la masa m de agua del tanque A al agua del tanque B:

$$\begin{aligned} m_{CH_2O}(60 - T_e) &= (1 \text{ kg})c_{H_2O}(T_e - 20) \\ m(60 - T_e) &= (T_e - 20) \end{aligned} \quad (32)$$

Cuando la masa m del tanque B, recibe calor del agua del tanque A:

$$\begin{aligned} (5 - m)c_{H_2O}(60 - 59) &= mc_{H_2O}(59 - T_e) \\ (5 - m) &= m(59 - T_e) \end{aligned} \quad (33)$$

Despejando m de la ecuación (8):

$$m = \frac{(T_e - 20)}{(60 - T_e)} \quad (34)$$

Sustituyendo (10) en (9), tenemos:

$$5 - \frac{T_e - 20}{60 - T_e} = \frac{T_e - 20}{60 - T_e}(59 - T_e) \quad (35)$$

$$\frac{300 - 5T_e - T_e + 20}{60 - T_e} = \frac{59 - T_e - T_e^2 - 1180 + 20T_e}{60 - T_e} \quad (36)$$

$300 - 6T_e + 20 = 79T_e - T_e^2 - 1180$; ordenando la ecuación de segundo grado:

$T_e^2 - 85T_e + 1500 = 0$; aplicando la fórmula:

$$T_e = \frac{85 \pm \sqrt{(-85)^2 - 4 \cdot 1 \cdot 1500}}{2} = \frac{85 \pm 35}{2}$$

$$(T_e)_1 = 60^\circ C \quad (\text{Solución incorrecta})$$

$$(T_e)_2 = 25^\circ C \quad (\text{Solución correcta})$$

La masa m determinamos de la Ecuación (10)

$$m = \frac{(T_e - 20)}{(60 - T_e)} = \frac{25 - 20}{60 - 25} = \frac{1}{7} \text{ kg} = 0,143 \text{ kg}$$

b) Para graficar el comportamiento de la temperatura del tanque B en función de la masa m , trabajemos con la ecuación (8), haciendo $T_e = T_B$:

$m(60 - T_B) = (T_B - 20)$; despejando T_B , tenemos:

$$T_B = \frac{60m + 20}{m + 1}; \text{ dando valores a } m, \text{ se obtiene la siguiente gráfica:}$$

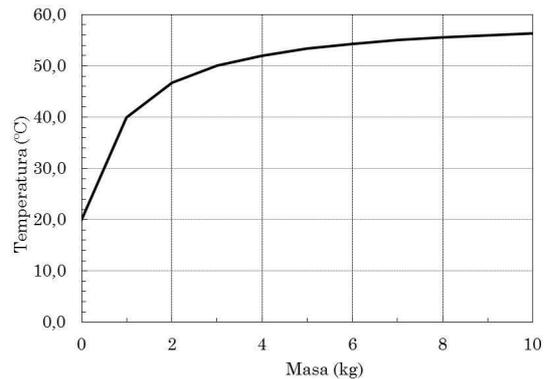


Figura 3.

(c) Solución:

a)

Para el estado 1 se dispone de la siguiente información:

$$P_1 = 1 \text{ atm}; \quad T_1 = 27^\circ C = 300^\circ K; \quad V_1 = 9,5V_0$$

El proceso 1-2 es adiabático, por lo tanto utilizamos la siguiente ecuación:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$1 \cdot (9,5V_0)^\gamma = P_2(V_0)^\gamma \Rightarrow P_2 = 23,38atm$$

Aplicando la ecuación de estado para gases ideales:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{1 \cdot 9,5V_0}{300} = \frac{23,38 \cdot V_0}{T_2}$$

$$\Rightarrow T_2 = 738,32 \text{ } \circ K$$

En el Estado 3, $P_3 = 2P_2 = 46,76atm$
Aplicando nuevamente la ecuación de estado a los puntos 2 y 3, tenemos:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} = \frac{2P_2 V_3}{T_3}$$

$$\Rightarrow T_3 = 2T_2 = 1476,64^\circ K$$

Para los estados 3 y 4 tenemos otra adiabática:

$$P_3 V_3^\gamma = P_4 V_4^\gamma$$

$$46,76 \cdot V_0^\gamma = P_4 (9,5)^\gamma (V_0)^\gamma \Rightarrow P_4 = 2atm$$

A partir de la ecuación de estado:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_4 V_4}{T_4}$$

$$\frac{1 \cdot 9,5V_0}{300} = \frac{2 \cdot 9,5V_0}{T_4} \Rightarrow T_4 = 600^\circ K$$

b)
El rendimiento del ciclo, se calcula dividiendo el trabajo neto entre el calor absorbido:

$$R = \frac{W_N}{Q_H}$$

En los procesos 2-3 y 4-1, el volumen permanece constante y por lo tanto el trabajo es nulo.

El trabajo neto será: $W_N = W_{12} + W_{34}$
Los procesos 1-2 y 3-4 son adiabáticos y $Q = 0$. A partir de la primera ley:

$$Q = \Delta U + W = 0 \Rightarrow W = -\Delta$$

$$W_{12} = -nC_V(T_2 - T_1)$$

$$W_{34} = -nC_V(T_4 - T_3)$$

$$W_N = -nC_V(T_2 - T_1 + T_4 - T_3)$$

$$= -nC_V(738,32 - 300 + 600 - 1476,64)$$

$$= 438,32nC_V$$

$$Q_H = Q_{23} = nC_V(T_3 - T_2)$$

$$= nC_V(1476,64 - 738,32)$$

$$= 738,32nC_V$$

$$R = \frac{438,32nC_V}{738,32nC_V} \times 100 = 59,37\%$$

GUÍA DE LABORATORIO

Sol. 5 .- DATOS.

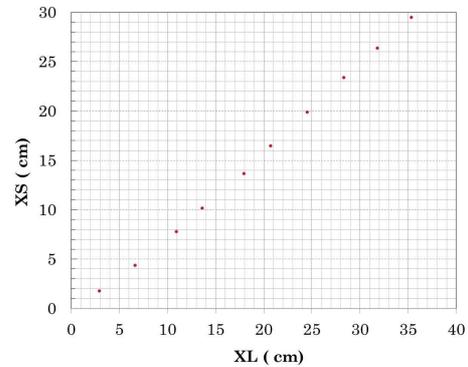
Sol. 6.- CÁLCULOS.

(a) Asumir la densidad del agua

Nº	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Error (kg/m³)
1	20	998,08	±1

Densidad del agua: $\delta_L = 998,62(kg/m^3)$

(b) Graficar $X_L V_S X_S(10\%)$



(c) Determinación de la relación $(X_L/X_S) = a$ (15%)

Nº	X_S (cm)	X_L (cm)	X_L^2 (cm²)	X_S^2 (cm²)	$X_S X_L$ (cm²)
1	1,8	2,9	8,41	3,24	5,22
2	4,4	6,6	43,56	19,36	29,04
3	7,8	10,9	118,81	60,84	85,02
4	10,2	13,6	184,96	104,04	138,72
5	13,7	17,9	320,41	187,69	245,23
6	16,5	20,7	428,49	272,25	341,55
7	19,9	24,5	600,25	396,01	487,55
8	23,4	28,3	800,89	547,56	662,22
9	26,4	31,8	1011,24	696,96	839,52
10	29,5	35,3	1246,09	870,25	1041,35
n	$\sum X_S$	$\sum X_L$	$\sum X_L^2$	$\sum X_S^2$	$\sum X_S X_L$
	153,6	192,5	4763,11	3158,2	3875,42

$$a = 0,8687$$

(d) $\sigma_r = 3,87cm, \sigma_a = 0,031cm, E_a = 0,010cm$

(e)

$$\delta_S = \frac{\delta_L}{1 - \frac{X_S}{X_L}} = \frac{\delta_L}{1 - a} = 7604,48kg/m^3$$

(f) $E_{\delta_S} = 95,15kg/m^3$

(g) $\delta_S = 7604,48kg/m^3 \pm 95,15kg/m^3$

Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_L(cm)$	2,9	6,6	10,9	13,6	17,9	20,7	24,5	28,3	31,8	35,3
$X_L(cm)$	1,8	4,4	7,8	10,2	13,7	16,5	19,9	23,4	26,4	29,5

Temperatura del agua: 18°C

(h) $E_p = 1,25\%$

1.Resp. Por definición el empuje = peso del fluido desalojado $=\delta_L g V$, como la densidad de los líquidos varia con los cambios de temperatura, se puede afirmar que el empuje también es afectado por los cambios de temperatura.

2.Resp. Nos indica la precisión de los datos tomados, expresado en porcentaje, (El error relativo expresado como porcentaje)

3.Resp. Para disminuir los errores cometidos en la práctica, debemos utilizar instrumentos bien calibrados y precisos, tener mucho cuidado en la obtención de los datos, utilizar adecuadamente los instrumentos de medición y aplicar un buen método de cálculo de los errores.

4.Resp. El método volumétrico.

Para demostrar la ecuación (7) nos basaremos en la Figura N°3. Como el sistema está en equilibrio, efectuaremos una sumatoria de fuerzas en la dirección vertical, aplicando la Ley de Hooke y el Principio de Arquímedes.

Cuando el resorte esta estirado libremente (en el aire), las fuerzas que actúan son:

$$F - mg = 0$$

$$F = mg = -KX_L \quad (1)$$

Cuando el cuerpo se sumerge en agua, las fuerzas que actúan son:

$$\begin{aligned} F + E &= mg \\ -KX_S + \delta_L g V_S &= mg \\ -KX_S + \delta_L g \left(\frac{m}{\delta_S}\right) &= mg \\ -KX_S + \delta_L \left(\frac{mg}{\delta_S}\right) &= mg \quad (2) \end{aligned}$$

Sustituyendo la ecuación (1) en la ecuación (2):

$$\begin{aligned} -KX_S + \left(\frac{\delta_L}{\delta_S}\right)(-KX_L) &= -KX_L \\ X_S + \left(\frac{\delta_L}{\delta_S}\right)X_L &= X_L \end{aligned}$$

Dividiendo entre X_L , tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{X_S}{X_L} + \left(\frac{\delta_L}{\delta_S}\right)\left(\frac{X_L}{X_L}\right) &= \frac{X_L}{X_L} \\ \frac{X_S}{X_L} + \left(\frac{\delta_L}{\delta_S}\right) &= 1 \\ \Rightarrow \delta_S &= \frac{\delta_L}{1 - \frac{X_S}{X_L}} = \frac{\delta_L}{1 - a} \quad L.Q.D. \end{aligned}$$

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

COMITÉ EDITORIAL

Sociedad Boliviana de Física

Dr. Diego Sanjinés Castedo

Email: sanjines@fiumssa.edu.bo

Instituto de Investigaciones Físicas

Lic. Alfonso Velarde Chávez

Email: avelarde@fiumsaa.edu.bo

Dr. Eduardo Palenque Vidaurre

Email: edyruy@yahoo.es

M. Sc. Franz Suxo

Email: znarf@correo.nu

Carrera de Física

Dr. Armando R. Ticona Bustillos

Email: aticona@fiumsaa.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.