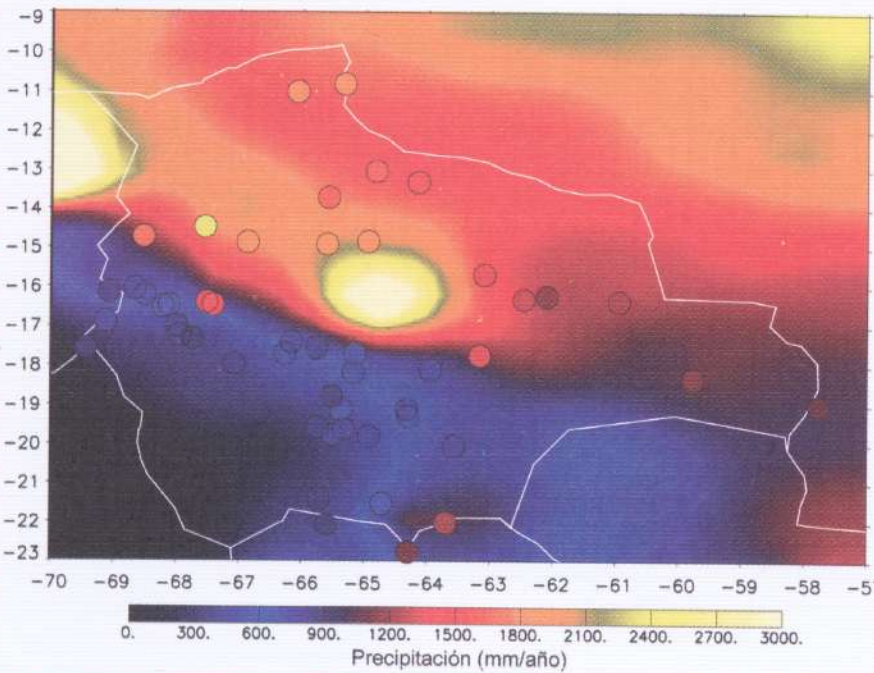


ISSN - 1562-3823

# REVISTA BOLIVIANA DE FISICA

NUMERO 16

ABRIL 2010 • LA PAZ - BOLIVIA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISICAS  
CARRERA DE FISICA - UMSA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FISICA

---

**REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA**  
Ésta es una revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física

**COMITÉ EDITORIAL**

<b>Sociedad Boliviana de Física</b>	<b>Instituto de Investigaciones Físicas</b>	<b>Carrera de Física</b>
<b>Dr. Diego Sanjinés Castedo</b> Email: sanjines@fiumsa.edu.bo	<b>Lic. Alfonso Velarde Chávez</b> Email: avelarde@fiumsa.edu.bo <b>Dr. Eduardo Palenque Vidaurre</b> Email: edyruy@latinmail.com	<b>Lic. Deterlino Urzagasti</b> Email: urza@fiumsa.edu.bo

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

---

**CONSEJO EDITORIAL**

<b>Dr. Oscar Antonio Rondón</b> Institute of Nuclear and Particle Physics University of Virginia McCormick Road, Charlottesville, VA 22901 804 924-6787, USA Email: or@virginia.edu	<b>Dr. Carlos Navia</b> Instituto de Física Universidade Federal Fluminense Av. Gen. Milton Tavares de Souza 24210-340, Niterói, RJ-Brasil Email: gfcnoj@portela.if.uff.br
<b>Dr. Juan C. Muzzio</b> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas Universidad Nacional de La Plata La Plata-Argentina Email: jmuzzio@fcaglp.fcaglp.unlp.edu.ar	<b>Dr. Renán Cabrera</b> Physics Department University of Windsor Ontario-Canada Email: rcabrera@princeton.edu
<b>Dr. Oscar Saavedra</b> Dipartimento di Fisica Generale Universita di Torino, Italia Email: saavedra@to.infn.it	<b>Dra. Silvina Solman</b> Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA) Buenos Aires, Argentina <a href="http://www.cima.fcen.uba.ar/~solman/">http://www.cima.fcen.uba.ar/~solman/</a>
<b>Dr. Jason Gallas</b> Instituto de Física Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil Email: jgallas@if.ufrgs.br	<b>Sr. Masayoshi Futami</b> United Nations Volunteers (UNV) La Paz, Bolivia Email: masayoshi.futami@60130.pnud.bo

---

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 16  
ABRIL DE 2010

## **Revista Boliviana de Física**

**ISSN 1562-3823**

**Indexada en: SciELO, Latindex, Periódica**

<http://biblioweb.dgsca.unam.mx/latindex>

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:* D. Urzagasti.

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

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

*Portada:* Precipitación en Bolivia para el periodo 1961–1990 obtenida con datos de superficie interpolados espacialmente. Los círculos muestran los valores de precipitación de las estaciones de superficie. Autores: Marcos F. Andrade F. y Luis A. Blacutt B. (más detalles en página 1 de este número).

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

IMPRESO EN BOLIVIA — PRINTED IN BOLIVIA

## CONTENIDO

### A. ARTÍCULOS

EVALUACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS PARA EL ÁREA DE BOLIVIA: COMPARACIÓN CON DATOS DE SUPERFICIE <i>Marcos F. Andrade F. &amp; Luis A. Blacutt B.</i>	1
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA UTILIZANDO MODELOS DE SIS- TEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA E IMÁGENES SATELITALES <i>Marcelo J. Lucano &amp; Iván E. Fuentes M.</i>	13
OBSERVACIÓN DE NEUTRONES SOLARES Y EFECTOS SOBRE EL CAM- PO MAGNÉTICO TERRRESTRE ASOCIADOS CON LA FULGURACIÓN SOLAR DEL 2 DE NOVIEMBRE DE 2003 <i>Chamani W. et al.</i>	22

### B. CONTRIBUCIONES Y REVISIONES

DISEÑO DE UN OSCILOSCOPIO MULTICANAL CON FPGA (PROYECTO LAGO) <i>Pedro Miranda Loza &amp; Fabricio G. Ávila Elías</i>	27
DOS PASIONES: LA FÍSICA CÓSMICA Y LAS NIEVES ANDINAS <i>Gral. Ing. José Antonio Zelaya</i>	32

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

XXI REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA <i>Sociedad Boliviana de Física</i>	35
--	----

### D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE UN PÉNDULO <i>A. R. Ticona Bustillos &amp; G. M. Ramírez Ávila</i>	41
LA OCARINA DE ZANAHORIA <i>Choque Saire M. P.</i>	43
14 <sup>VA</sup> OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA <i>R. Bustos et al.</i>	48

EVALUACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS PARA EL ÁREA DE BOLIVIA:  
COMPARACIÓN CON DATOS DE SUPERFICIE  
EVALUATION OF THE PRECIS REGIONAL CLIMATE MODEL FOR THE REGION OF BOLIVIA:  
COMPARISON WITH GROUND BASED DATA

MARCOS F. ANDRADE F. & LUIS A. BLACUTT B.

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

RESUMEN

Los posibles efectos del cambio climático sobre regiones como Bolivia son de mucho interés tanto a nivel científico como político. Los modelos numéricos del clima tanto a nivel global como regional son una importante herramienta para el estudio de tales efectos. A fin de establecer la confiabilidad de las proyecciones de la evolución futura del clima producidas por dichos modelos es necesario, sin embargo, validar las salidas de los mismos. En este trabajo se estudia el desempeño del modelo climático regional PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*) del *Hadley Centre* de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, sobre la región de Bolivia. La comparación de resultados del modelo con datos observados en superficie a nivel mensual de temperatura y precipitación en el periodo 1961–1990 muestra que ambos parámetros tienen un buen desempeño en zonas bajas (regiones con altura menor a  $500\text{ m.snm}$ ) pero que sobreestima la precipitación tanto en zonas de altura intermedia (entre  $500$  y  $3500\text{ m.snm}$ ) como en la zona andina (situada a una altura mayor a  $3500\text{ m.snm}$ ). A su vez, la comparación muestra que el modelo subestima la temperatura (media, máxima y mínima) en las regiones con altitudes mayores a  $500\text{ m.snm}$ , mientras que realiza un trabajo aceptable en las zonas bajas. Aunque la parametrización de nubes y precipitación en las zonas de los valles y andina parece ser el elemento que más podría contribuir a las diferencias observadas, es necesario un estudio más profundo para entender los mecanismos involucrados.

*Descriptor:* cambio climático — Bolivia

Código(s) PACS: 92.70.-j, 93.30.Jg

ABSTRACT

The possible effects of climate change on regions like Bolivia are of great interest both at scientific and political level. Numerical climate models, both global and regional, are an important tool for studying such effects. However, in order to establish the reliability of future climate projections provided by such models is necessary to validate its results. In this work the performance of the regional climate model PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*), developed at the Hadley Centre at the UK Met Office, is evaluated for the region of Bolivia. The comparison of temperature and precipitation of model outputs with observations taken by ground-based stations at monthly level for the period 1961–1990 shows that the model has a good performance for both parameters at the Bolivian lowlands (locations with an altitude below  $500\text{ masl}$ ) while overestimates precipitation at regions situated at intermediate heights (between  $500$  and  $3500\text{ masl}$ ) as well as at the Andean region (above  $3500\text{ masl}$ ). At the same time, the comparison shows that the model underestimates temperature (mean, maximum and minimum) at regions with altitudes above  $500\text{ masl}$ , while it makes an acceptable work at the lowlands. Even though parametrization of clouds and precipitation in regions like the Altiplano and valleys is likely to contribute to the observed biases, an in depth study of the involved mechanisms is needed.

*Subject headings:* climate change — Bolivia

1. INTRODUCCIÓN

A raíz del incremento observado de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero durante los últimos 50 años (i.e., Keeling 1960), el interés por los posibles efectos de este fenómeno sobre el clima futuro ha crecido enor-

memente. Debido a que el clima es un sistema altamente no-lineal<sup>1</sup> (Palmer & Willams 2008; Andrade 2008) las herramientas más usadas para estudiar la evolución futura del

<sup>1</sup> Para una explicación más detallada ver:  
<http://www.ideo.columbia.edu/res/pi/arch/nonlinear.shtml>

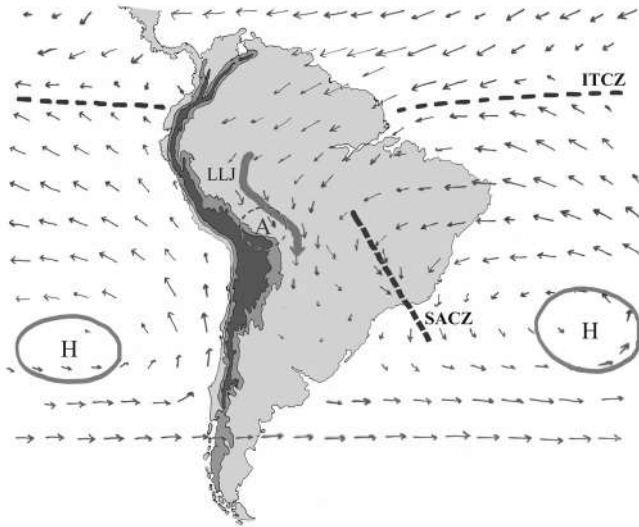


FIG. 1.— Esquema que muestra los principales controladores del clima de Bolivia.

mismo son los modelos climáticos numéricos pues estos tratan de representar al sistema climático de la manera más completa posible. Esto incluye no solamente a los elementos que componen este sistema como la atmósfera, los océanos o la biosfera, sino las relaciones entre éstos así como los complejos procesos de retroalimentación entre los diferentes componentes del sistema climático.

Dada la complejidad del sistema climático, los modelos numéricos todavía no pueden representar ciertos procesos de forma adecuada. Uno de los factores está relacionado a la resolución espacial del modelo y otro a la complejidad de ciertos procesos, como los relacionados con las nubes, por ejemplo. Debido a esto no queda más remedio que utilizar técnicas estadísticas que incorporen estos procesos a través de una representación paramétrica. A este proceso se le denomina “parametrización” y consiste básicamente en obtener valores (parámetros) que representen los procesos complejos o no resueltos a la escala en la que trabaja el modelo y permiten incorporar los efectos de los procesos físicos en las variables que el modelo resuelve (Peixoto & Ort 2002). En ese sentido la parametrización reemplaza procesos físicos por representaciones sencillas y, muchas veces empíricas, de los mismos. Por esa misma razón las parametrizaciones son típicamente las fuentes más importantes de error en los modelos (Palmer & Willams 2008).

La mayor parte de los modelos utilizados para el estudio del clima futuro son los denominados Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés). Estos modelos resuelven las ecuaciones que gobiernan a la atmósfera, el océano y otros componentes relevantes representados por el modelo, dividiendo el espacio en “cajas” o rejillas discretas (CCSP 2008). Por razones prácticas, el tamaño de estas cajas no puede ser muy pequeño pues el tiempo de cálculo crece rápidamente conforme el tamaño de la rejilla decrece (o, equivalentemente, la resolución del modelo se incrementa). Los GCMs típicamente tienen una resolución horizontal de

unos 150 a 300 km<sup>2</sup> (Vera et al. 2006) y entre 18 a 56 niveles verticales (que van desde la superficie hasta 0.1 hPa). Esta resolución es suficiente para resolver fenómenos a escala planetaria o sinóptica pero claramente no es adecuada para estudiar fenómenos a escala regional o local. Aún más, muchos fenómenos climáticos dependen decisivamente de la orografía por lo que regiones con gradientes altitudinales abruptos, como sucede en una parte importante del territorio boliviano, están inadecuadamente representadas por los GCMs. Estas debilidades llevaron de manera natural al desarrollo de los denominados Modelos Climáticos Regionales (RCM por sus siglas en inglés). Estos son modelos que operan en un dominio mucho menor que los GCMs y a una resolución mucho mayor a los mismos. A la fecha estos modelos pueden llegar a una resolución de kilómetros aunque típicamente trabajan entre 10 y 50 km de resolución horizontal. Los RCMs se relacionan con los GCMs a través de los bordes del dominio elegido pues las condiciones de borde son impuestas por los GCMs para asegurar consistencia general (global).

A pesar de los avances en la representación de los sistemas y procesos involucrados en el sistema climático, los modelos numéricos, sean estos GCMs o RCMs, deben ser evaluados a fin de establecer cuán bien representan la realidad. Este proceso, denominado comúnmente validación, se lo realiza a través de la comparación de observaciones y datos modelados en periodos largos que permitan definir la climatología de la región de estudio y estudiar características de la misma en la región de interés. La *World Meteorological Organization* (WMO) recomienda un periodo mínimo de 30 años para fines de estudiar el clima (WMO 1984). En particular, el periodo 1961–1990 fue adoptado por la WMO como el periodo de referencia estándar para la estimación de las normales climáticas. Adicionalmente, la validación busca verificar que el modelo sea capaz de reproducir eventos extremos, como periodos de sequías e inundaciones, así como otros indicadores estadísticos que describan el clima en el periodo de estudio.

El presente trabajo muestra resultados de la validación del modelo de escala regional PRECIS aplicado a la región de Bolivia. El documento se halla estructurado como sigue: una descripción del clima de Bolivia es dada en la sección 2, los datos así como el modelo usados en este trabajo son descritos en la sección 3, resultados de la comparación de los datos generados por el modelo y los datos observados son descritos en la sección 4 mientras que la discusión es descrita en la sección 5 y las conclusiones finales son expuestas en la sección 6.

## 2. CARACTERÍSTICAS Y ELEMENTOS DEL CLIMA EN BOLIVIA

El territorio boliviano se halla comprendido entre los 9°S y 23°S de latitud y 70°O y 57°O de longitud. El clima en Bolivia está fuertemente influenciado por su ubicación

<sup>2</sup> Aunque el modelo japonés JMA-GSM (Mizuta et al. 2006) ha sido perfeccionado para correr globalmente a 20 km de resolución espacial y 6 minutos de resolución temporal.

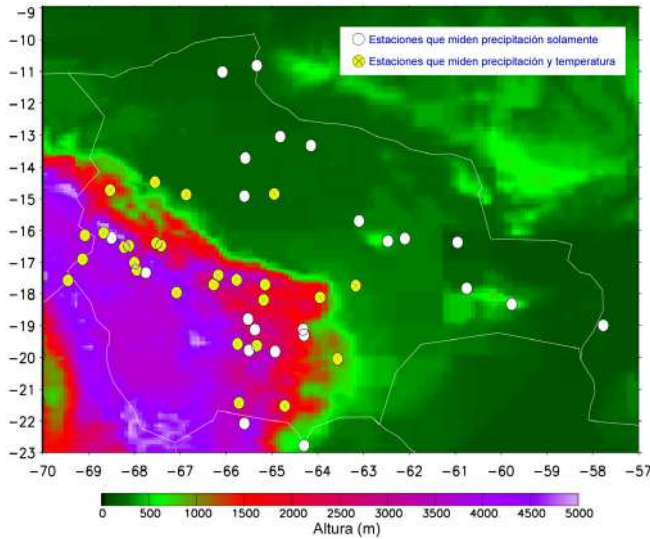


FIG. 2.— Distribución espacial de las estaciones usadas en el presente estudio (ver Tabla 1). Los colores de fondo representan la elevación de la superficie en el territorio boliviano con base a datos obtenidos en <http://www.ngdc.noaa.gov> a una resolución de 5' de grado. Los círculos indican la localización de las estaciones usadas para el periodo 1961–1990. Los círculos blancos muestran estaciones con datos de precipitación solamente mientras que los amarillos indican la existencia de datos de temperatura y precipitación (*color online*).

geográfica, su orografía y su geomorfología. Debido a su ubicación tropical los cambios en temperatura no presentan grandes variaciones temporales, asimismo las fluctuaciones en presión son pequeñas ( $\sim 10hPa$ ) comparadas con las que ocurren en medias latitudes (Saucier 2003). La orografía también juega un papel importante en el clima de Bolivia pues temperatura y precipitación dependen fuertemente de la distribución altitudinal de su territorio. Casi dos tercios de Bolivia, 60% aproximadamente, se halla en regiones con alturas menores a  $500msnm$ , 24% del territorio se encuentra entre  $500$  y  $3500msnm$  y el restante 16% por encima de esa altura en la zona Andina (ver Fig. 2). La parte baja se puede dividir en por lo menos dos regiones: una húmeda con mucha precipitación, ligada a la región amazónica y otra mucho más seca en la zona denominada Chaco alrededor de  $20^{\circ}S$ . La región de altura intermedia se caracteriza por tener un alto gradiente altitudinal que produce una alta precipitación por convección orográfica en la zona. En esta área se hallan regiones con la más alta biodiversidad del planeta (Ibish 2008). Las zonas altas, en contraste, son regiones con baja precipitación y bajas temperaturas.

La precipitación en Bolivia depende fuertemente del transporte de humedad desde el área amazónica y/o atlántica (Marengo et al. 2004). Este transporte es máximo durante la época de lluvias, típicamente entre Diciembre y Marzo, y se inhibe casi por completo en época seca. Durante la época de lluvias, el denominado monzón sudamericano (SAMS, *South American Monsoon System* por sus siglas en inglés) controla ese transporte de humedad. Esta última es generada hacia la atmósfera gracias a la intensa actividad convectiva en la zona central–oeste del Brasil y posteriormente transportada hacia Bolivia por los vientos alisios (Marengo et al. 2004). Debido a que la cordillera de los Andes actúa como una formidable

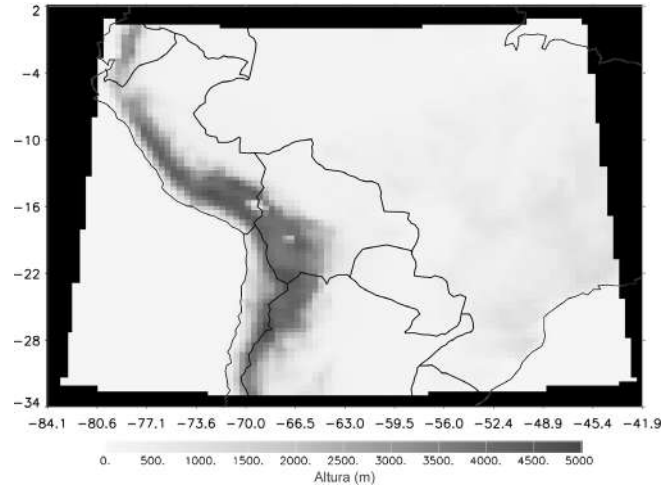


FIG. 3.— Dominio usado para la corrida descrita en el presente trabajo. La altura de la superficie, tal como es representada por el modelo, es también graficada.

barrera debido a su altura y gran gradiente altitudinal (ver Fig. 3), el viento proveniente del este o bien se desvía hacia el sur o es forzado a elevarse hacia los valles y la zona andina dejando en el camino la humedad transportada en forma de lluvia (Marengo et al. 2002). Este comportamiento está modulado por características de escala sinóptica como la llamada “Alta de Bolivia”, que es un anti–cyclón estacionario ubicado a una altura aproximada de  $200hPa$  cuya posición varía dependiendo de la emisión de calor latente en el Amazonas (Lenters & Cook 1997); una región de baja presión de origen térmico en la región del Chaco; y, principalmente, por el comportamiento de la corriente en chorro de bajo nivel de Sudamérica (SALLJ, *South American Low Level Jet* por sus siglas en inglés) al este de los Andes. El SALLJ es una corriente de vientos en niveles que oscilan entre  $925$  y  $850hPa$  y que transportan humedad hacia el sureste (Vera et al. 2006) y que tiene un marcado comportamiento estacional siendo más prominente durante el verano austral y más débil en el invierno correspondiente (Marengo et al. 2002). El SALLJ alimenta la cuenca de La Plata al proveer gran cantidad de humedad a esa región. Interesantemente muy poco de esa humedad se precipita en la zona del Chaco boliviano (Marengo et al. 2004). La Fig. 1 muestra esquemáticamente varios de los elementos que influyen el clima en Bolivia.

En el caso del Altiplano, las épocas seca y lluviosa son muy marcadas. En verano, debido al calentamiento de la superficie altiplánica, se inician procesos convectivos de gran intensidad que dan origen a tormentas eléctricas de moderada y elevada intensidad (Garreaud 1999). Se estima que más del 80% de la precipitación total del año que ocurre en el Altiplano se da entre diciembre y marzo (Vuille 1999). En invierno, por el contrario, existe intenso flujo de aire seco desde el occidente de manera casi permanente que inhibe la precipitación casi por completo (Garreaud 1999).

Aunque todas las características sinópticas mencionadas antes están presentes la mayor parte del año, la intensidad relativa de las mismas varía a lo largo de este periodo permitiendo producción y transporte de humedad de una región a

TABLA I  
LISTA DE ESTACIONES USADAS PARA EL PERIODO DE ESTUDIO. LAS CRUCES INDICAN LA EXISTENCIA DE DATOS  
DE PRECIPITACIÓN Y/O TEMPERATURA.

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Precip.	Temp.
AIQUILE	-18.20	-65.18	2250	x	x
APOLO (AASANA)	-14.73	-68.53	1406	x	x
ARANI	-17.57	-65.77	2740	x	x
ASCENCION DE GUARAYOS	-15.70	-63.10	246	x	
AYO-AYO	-17.01	-68.00	3956	x	x
BELEN	-16.07	-68.67	3820	x	x
BERMEJO	-22.77	-64.30	385	x	
CALAMARCA	-16.90	-16.13	3954	x	x
CAMIRI	-20.05	-63.57	810	x	x
CAPINOTA	-17.72	-66.27	2400	x	x
CHARAÑA	-17.58	-69.45	4057	x	x
CHINOLI	-19.63	-65.33	3450	x	x
CHULUMANI	-16.40	-67.52	1750	x	x
COCHABAMBA	-17.42	-66.17	2560	x	x
CONCEPCION	-16.25	-62.10	497	x	x
COPACABANA	-16.15	-69.08	3815	x	x
EL ALTO	-16.52	-68.22	4071	x	x
GUAYARAMERIN	-10.82	-65.33	130	x	
IRUPANA	-16.47	-67.42	1885	x	x
LA PAZ (Centro)	-16.48	-68.12	3635	x	x
LA PAZ (San Calixto)	-16.48	-68.12	3658	x	x
MAGDALENA	-13.33	-64.15	141	x	
MAIRANA	-18.12	-63.95	1300	x	x
ORURO	-17.97	-67.08	3701	x	x
PADILLA	-19.30	-64.30	2102	x	
PATACAMAYA	-17.25	-67.95	3789	x	x
PEÑAS	-16.23	-68.50	3986	x	
POTOSI	-19.58	-65.75	3950	x	x
PUERTO SUAREZ	-19.00	-57.77	133	x	
PUNA	-19.78	-65.50	3280	x	
QUILA-QUILA	-19.13	-65.37	3526	x	
RAVELO	-18.80	-65.52	3205	x	
RIBERALTA	-11.02	-66.08	135	x	
ROBORE	-18.33	-59.77	300	x	
RURRENABAQUE	-14.48	-67.55	202	x	x
SANTA ANA	-13.72	-65.58	144	x	
SANTA CRUZ	-17.75	-63.17	413	x	x
SAN BORJA	-14.87	-66.87	194	x	x
SAN IGNACIO DE MOXOS	-14.92	-65.60	160	x	
SAN IGNACIO DE VELASCO	-16.37	-60.95	413	x	
SAN JAVIER	-16.33	-62.47	534	x	
SAN JOAQUIN	-13.05	-64.82	139	x	
SAN JOSE	-17.83	-60.75	280	x	
SICA-SICA	-17.33	-67.75	3820	x	
TARIJA	-21.53	-64.72	1875	x	x
TOTORA	-17.72	-65.15	2906	x	x
TRINIDAD	-14.85	-64.95	157	x	x
TUPIZA	-21.43	-65.72	2952	x	x
TURUCHIPA	-19.82	-64.93	3360	x	
VILLAZON	-22.08	-65.60	3443	x	
VILLA SERRANO	-19.12	-64.32	2108	x	
YACUIBA	-22.02	-63.70	643	x	x

otra o inhibiendo la misma. Adicionalmente, eventos como El Niño y La Niña, que son las fases positivas (calientes) y negativas (frías) de un fenómeno conocido como *El Niño Southern Oscillation* (ENSO, por sus siglas en inglés) modifican drásticamente el comportamiento climático en muchas regiones del territorio boliviano (Garreaud & Aceituno 2001, Ronchail et al. 2005).

### 3. DATOS Y MODELO

#### 3.1. Observaciones de superficie

Para el presente estudio se utilizaron datos mensuales de 52 estaciones en el periodo 1961–1990. Las variables medidas en estas estaciones fueron temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación acumulada

TABLA 2  
 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIDA USADA EN EL PRESENTE TRABAJO.

Condiciones de borde (Modelo Global)	Resolución espacial	Rango de latitudes	Rango de longitudes	Periodo
HadAM3P	50km	33.6°S – 2°N	41.88°W – 84.12°W	1961–1990

mensual. Los datos fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. La distribución espacial de las estaciones utilizadas se muestra en la Fig. 2, donde además se incluye la elevación de superficie. La Tabla 1 presenta información relacionada a las estaciones usadas en el presente trabajo. Las 52 estaciones utilizadas tenían datos de precipitación acumulada mensual en tanto que solamente 30 tenían registro de temperatura. En todos los casos se exigió que hubiera por lo menos el equivalente a 10 años de datos aunque los mismos no formaran series continuas de tiempo. Como se observa en la Fig. 2 es evidente que la falta de estaciones impide cubrir de manera adecuada la topografía de Bolivia. Existen pocas estaciones en las zonas bajas, aunque en este caso el hecho que el terreno sea relativamente plano alivia en algo la baja densidad de estaciones. La mayor densidad de estaciones se encuentra en los valles y en la zona altiplánica aunque con preferencia en la zona cercana a la Cordillera Oriental. Se tuvo acceso a muy pocos datos, para el periodo de estudio, en la zona de la Cordillera Occidental.

Aunque para el estudio también se tuvieron acceso a datos de otras fuentes se decidió usar solamente los datos provistos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) boliviano debido a que se encontraron diferencias, algunas de ellas significativas, entre las diferentes fuentes de datos. En todo caso, independientemente de cual sea la fuente de datos, el proveedor primario de los datos es SENAMHI por lo que el análisis de las diferencias encontradas es un tópico que merece ser investigado en otro trabajo.

Adicionalmente, se usaron datos interpolados a  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  lat-lon de temperatura media y precipitación obtenidos del *Center for Climatic Research, University of Delaware* (Legates and Willmont 1990a, 1990b). Aunque este tipo de datos permite tener una cobertura espacial y temporal muy buena del territorio objeto de estudio debe tenerse en cuenta que en aquellas regiones donde no existan datos obtenidos por estaciones de tierra los valores son típicamente interpolados y/o generados de forma sintética (Garreaud et al. 2008) por lo que se debe tener especial cuidado con la interpretación de estos datos en dichas regiones. Por esta razón en el presente trabajo se usan los datos interpolados para un análisis referencial y cualitativo solamente.

### 3.2. El modelo climático regional PRECIS

El modelo PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*) forma parte de la versión del modelo de circulación regional británico HadRM3P (Jones et al. 2004). HadRM3P tiene 19 niveles verticales y dos posibles resoluciones horizontales, 25 y 50km. Las condiciones de borde pueden ser elegidas de varias posibles opciones dependiendo el periodo en el cual se necesitan las simulaciones. Para el

caso del periodo 1961–1990 existen resultados no solamente obtenidos de GCMs sino también de fuentes observacionales como los reanálisis europeo y estadounidense. La versión del modelo con la que se trabajó fue la 1.7. Como todo modelo climático las características de la resolución de las ecuaciones de desenvolvimiento atmosférico suelen dividirse en dos partes, una denominada “dinámica” y otra denominada “física”. En cuanto a la dinámica del modelo, éste es hidrostático, es decir no considera de manera explícita los procesos convectivos que generan nubes y por lo tanto no determina de manera directa la precipitación. En cuanto a la física del modelo, se recurren a parametrizaciones. Este proceso se logra utilizando funciones determinísticas simples. Para los procesos como la formación de nubes y precipitación se utilizan parametrizaciones de acuerdo a Gregory y Morris (1996). La radiación sigue el esquema desarrollado por Edwards y Slingo (1996) y modificado por Cusack et al., (1999). Estos esquemas son fijos independientemente de las características geográficas sobre las que se corre el modelo. Para fines de la solución de las ecuaciones, los años son de 360 días y cada mes consta de 30 días.

Las ecuaciones del modelo son “dirigidas” por un modelo de escala global, las condiciones de borde lateral son incorporadas al modelo mediante el método de relajación newtoniana (Davis & Turner 1977) en la que se estima que los primeros 400km cercanos al borde del dominio consisten en la zona de amortiguamiento que no debe ser considerada en el análisis debido a que ésa es la zona en la que el modelo global se acopla con el modelo regional. De acuerdo a las recomendaciones de los desarrolladores del modelo, el contorno sobre el cual se definen los bordes laterales no debería cortar cadenas montañosas y debería tener un área del orden de  $5000 \times 5000 \text{ km}^2$  (Jones et al. 2004). La primera recomendación, sin embargo, es prácticamente imposible de cumplir en nuestro caso debido a las características geomorfológicas de la región de estudio. La segunda recomendación está relacionada al hecho que un dominio muy pequeño podría restringir en exceso la circulación generada por el RCM mientras que un dominio muy grande podría generar patrones de circulación tan diferentes a los generados por el GCM que perturbaría la circulación general modelada por este último (Jones et al. 1995; Rojas & Seth 2003). Por esta razón, se realizaron experimentos preliminares variando el tamaño del dominio para tratar de determinar el tamaño óptimo. Estas corridas experimentales fueron efectuadas para tres años (1960–1962) y con dominios que variaban en 800km tanto en latitud como en longitud partiendo de un área que englobaba a Bolivia (unos  $1300 \times 1200 \text{ km}^2$ ) hasta un área del orden de  $5000 \times 5000 \text{ km}^2$ . Los resultados de estos experimentos mostraron diferencias entre los distintos dominios. Aunque las diferencias entre un dominio y el siguiente más grande

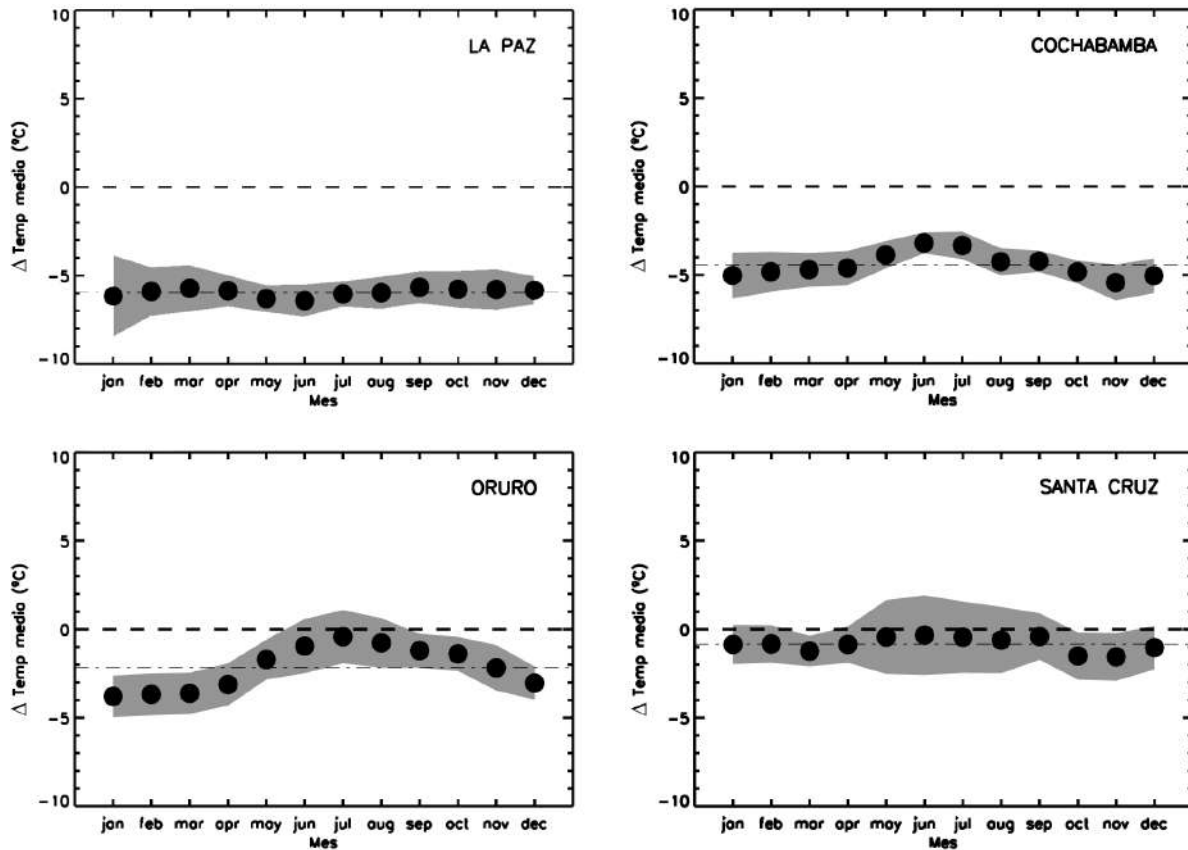


FIG. 4.— Temperatura media mensual promedio para el periodo 1961–1990 para estaciones seleccionadas. Los puntos llenos indican el promedio de la diferencia entre datos modelados y observados en tanto que la región sombreada indica la variabilidad ( $\pm\sigma$ ) de esa diferencia en el periodo de estudio. La línea punteada delgada indica el valor promedio anual para el periodo de estudio mientras que la línea discontinua gruesa indica el valor referencial para cuando la diferencia modelo menos observaciones sea cero.

se hacían, en promedio, más pequeñas, al agrandar el dominio no se observó una clara convergencia de los resultados ni para la precipitación ni para la temperatura.

Los resultados de los experimentos preliminares sugieren la necesidad de un estudio más detallado respecto al tamaño óptimo del dominio pero el mismo está fuera del alcance del presente trabajo. Por esta razón se optó por seguir las recomendaciones usuales para este modelo (Jones et al. 2004) y se definió trabajar con un dominio de  $5000 \times 4400 \text{ km}^2$ . Dado el tamaño del dominio se decidió utilizar una resolución de  $50 \text{ km}$  principalmente por limitaciones de recursos computacionales. La Fig. 3 muestra el dominio usado además de la topografía manejada por el modelo. Además, se eligió usar el modelo global HadAM3P desarrollado por el *Hadley Centre* (Pope et al. 2000) como condición de contorno principalmente por razones de consistencia con otros trabajos realizados en Sudamérica (por ejemplo, Marengo et al. 2009; Soares & Marengo 2008). La Tabla 2 resume las principales características de la corrida usada en este artículo.

#### 4. VALIDACIÓN DE LAS SALIDAS DEL MODELO

A fin de realizar la validación del modelo se corrigieron las salidas de temperatura del mismo tomando en cuenta la diferencia entre la altura de las retículas del modelo y la altura de cada estación. Para esta corrección se usó un gradiente térmico de  $5^\circ\text{C}/\text{km}$  basado en los datos observados. Estos va-

lores corregidos, junto a los de precipitación, fueron interpolados espacialmente para una comparación “uno a uno” con los datos obtenidos en superficie para cada mes del periodo 1961–1990. Las diferencias entre datos del modelo, interpolados espacialmente a través de una interpolación bilineal simple<sup>3</sup>, y las observaciones fueron entonces calculadas para cada variable y estación. Las series temporales resultantes muestran que en tierras bajas la diferencia promedio entre valores modelados y observados de temperatura media es relativamente pequeña, del orden de  $1^\circ\text{C}$ , aunque con variaciones individuales de hasta  $5^\circ\text{C}$ . No se observa una dependencia estacional evidente. En tierras altas, sin embargo, se observan diferencias marcadas entre valores modelados y observados, mostrando, en algunos casos, una evidente dependencia estacional. En las regiones intermedias, típicamente valles, las diferencias promedio entre modelo y observaciones son notoriamente más grandes alcanzando valores de hasta  $8^\circ\text{C}$  con una fuerte variabilidad alrededor del valor medio pero sin mostrar, la mayor parte de las veces, una fuerte dependencia estacional. Un comportamiento similar se observa para las temperaturas mínimas y máximas medias mensuales.

Las Figs. 4, 5 y 6 muestran los valores promedio mensuales de las diferencias entre valores modelados y observados para el periodo 1961–1990 para la temperatura media, tem-

<sup>3</sup> NUMERICAL RECIPES IN C: THE ART OF SCIENTIFIC COMPUTING, Copyright (C) 1988–1992 by Cambridge University Press.

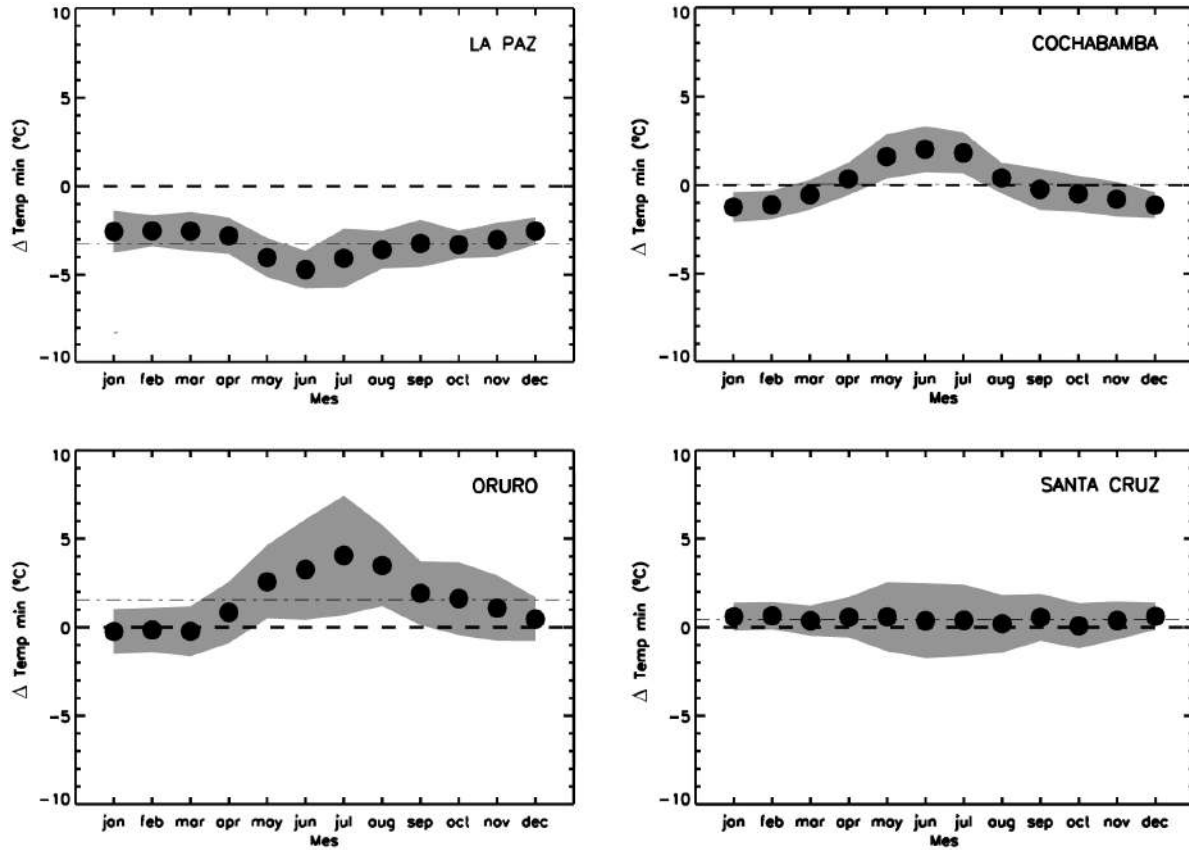


FIG. 5.— Lo mismo que para la Fig. 4 pero para la temperatura mínima media mensual.

peratura media mínima y la temperatura media máxima, respectivamente. Los gráficos muestran estas diferencias para cada mes del año. La línea punteada delgada indica el valor medio anual mientras que la línea punteada gruesa indica el valor referencial cuando la diferencia es cero. Si el modelo reprodujera las observaciones perfectamente, todos los puntos en estos gráficos estarían sobre la línea punteada gruesa y tendrían variabilidad nula alrededor de la misma (todas las diferencias serían igual a cero). A fin de ilustrar el comportamiento de la diferencia “modelo menos observaciones” se seleccionaron estaciones representativas en las regiones Altiplano, valles y tierras bajas para ilustrar el comportamiento típico observado en estaciones localizadas en estas regiones. En el caso de las temperaturas medias mensuales se observa (Fig. 4) que el modelo reproduce razonablemente bien el ciclo estacional en la mayor parte de las estaciones (pues la pendiente de la diferencia es cercana a cero) pero existen diferencias sistemáticas importantes especialmente en la zona andina y la de los valles, donde las diferencias medias llegan hasta  $7^{\circ}\text{C}$ , mostrando que el modelo subestima la temperatura media en prácticamente todas las estaciones. Sin embargo, existen algunas estaciones, Oruro por ejemplo, donde la diferencia modelo menos observaciones exhibe una clara dependencia estacional a lo largo del año. En tierras bajas, por otro lado, la diferencia observada en las distintas estaciones es muy cercana a cero, como se muestra para el caso de Santa Cruz.

Para la temperatura mensual promedio mínima (Fig. 5) se observa un comportamiento similar a la temperatura media con una ligera tendencia a mostrar mayor dependencia estacional como se puede ver en el caso de Cochabamba y Oruro. Una vez más esta diferencia es cercana a cero para las estaciones localizadas en tierras bajas mientras que se observa que el modelo subestima la temperatura mínima en zonas por encima de  $500\text{msnm}$ .

En el caso de la temperatura mensual promedio máxima la dependencia de la diferencia estacional de los valores modelados con los observados es relativamente pequeña (Fig. 6), pero la diferencia promedio anual es más grande que en el caso de la temperatura mínima y media. Una vez más la diferencia mensual promedio más grande ocurre en la región de los valles mientras que el modelo muestra un acuerdo bueno con las observaciones en tierras bajas.

En el caso de la precipitación (Fig. 7), los datos muestran un sesgo mucho más marcado entre valores modelados y valores observados para lugares de altura y/o con pendiente elevada (como la región de los valles, por ejemplo). En este caso, el modelo no sólo sobreestima la precipitación en prácticamente todas las estaciones de la zona sino que la diferencia entre valores modelados y observados muestra una marcada dependencia estacional. La variabilidad en el periodo de estudio es también bastante grande tal como lo evidencia la Fig. 7. Como era de esperarse, dicha variabilidad es mayor durante la época de lluvias. Interesantemente, las

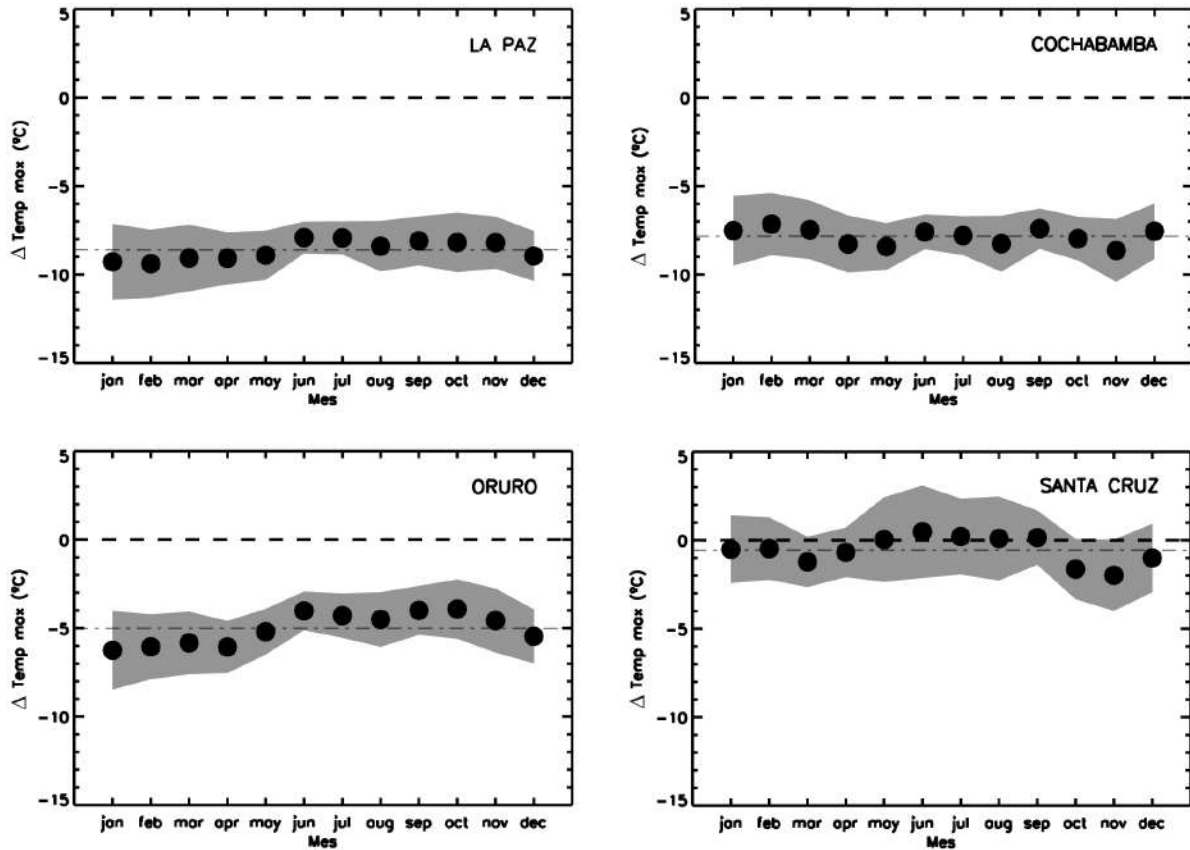


FIG. 6.— Lo mismo que para la Fig. 4 pero para la temperatura máxima media mensual.

estaciones de tierras bajas muestran un acuerdo (estadístico) muy bueno entre lo predicho por el modelo y las observaciones. En este caso, sin embargo, es importante tomar en cuenta que a pesar que las diferencias absolutas en invierno no parecen ser grandes, la precipitación en esta temporada del año es baja en prácticamente todas las regiones de Bolivia.

La Fig. 8 muestra las diferencias promedio anuales para las cuatro variables en estudio para las distintas estaciones donde hay datos. Las diferencias, expresadas a través de círculos de colores, corresponden a las estaciones usadas en el análisis. Cuanto más cercanos estos valores a cero, mejor el desempeño del modelo climático. Esto sin embargo podría llevar a falsas conclusiones pues no expresa posibles dependencias estacionales, como en la mayoría de las estaciones de altura. El gráfico muestra que de manera sistemática, y para las cuatro variables estudiadas, los valores entregados por el modelo se hallan cercanos a los valores observados en las zonas bajas. Un análisis estación por estación muestra que el modelo también reproduce bien el comportamiento estacional en esta área. Esto sugiere que el modelo realiza un buen trabajo en dicha región. Sin embargo, en lugares donde el gradiente altitudinal es grande o en estaciones situadas en lugares planos pero a gran altitud, como son las estaciones del Altiplano boliviano, la diferencia entre los valores modelados y medidos es relativamente grande. El modelo subestima sistemáticamente la temperatura tanto media como mínima y máxima. Esta diferencia no parece ser, sin

embargo, dependiente de la altura. La Tabla 3 sintetiza cuantitativamente lo expresado al mostrar, por región, los valores medios de las diferencias de cada variable estudiada, la correspondiente desviación estándar y la raíz cuadrática media. En prácticamente todos los casos estos parámetros estadísticos son más pequeños para las zonas bajas que para los valles y zonas altas indicando un mejor desempeño del modelo en aquella región.

Dada la evidente falta de información en grandes regiones del territorio objeto de estudio se usaron datos interpolados espacialmente (ver sección 3.1) para tener una mejor idea del comportamiento del modelo. Es necesario, sin embargo, tener presente que la falta de estaciones en varias de las regiones de este territorio podrían hacer que los valores en dichas áreas sean solamente producto de la interpolación y por tanto podrían no representar adecuadamente el comportamiento de la temperatura o precipitación en dichas regiones. Por esa razón, las comparaciones que a continuación se presentan tienen por objeto proveer una estimación cualitativa del comportamiento espacial promedio del modelo respecto a las estimaciones basadas en observaciones en el periodo 1961–1990.

Las Figs. 9a y 9b muestran, respectivamente, las climatologías de la temperatura media mensual y precipitación acumulada anual obtenidas de los datos interpolados. Para fines de claridad se han interpolado espacialmente a una malla más fina aún dichos resultados y sobrepuesto los valores

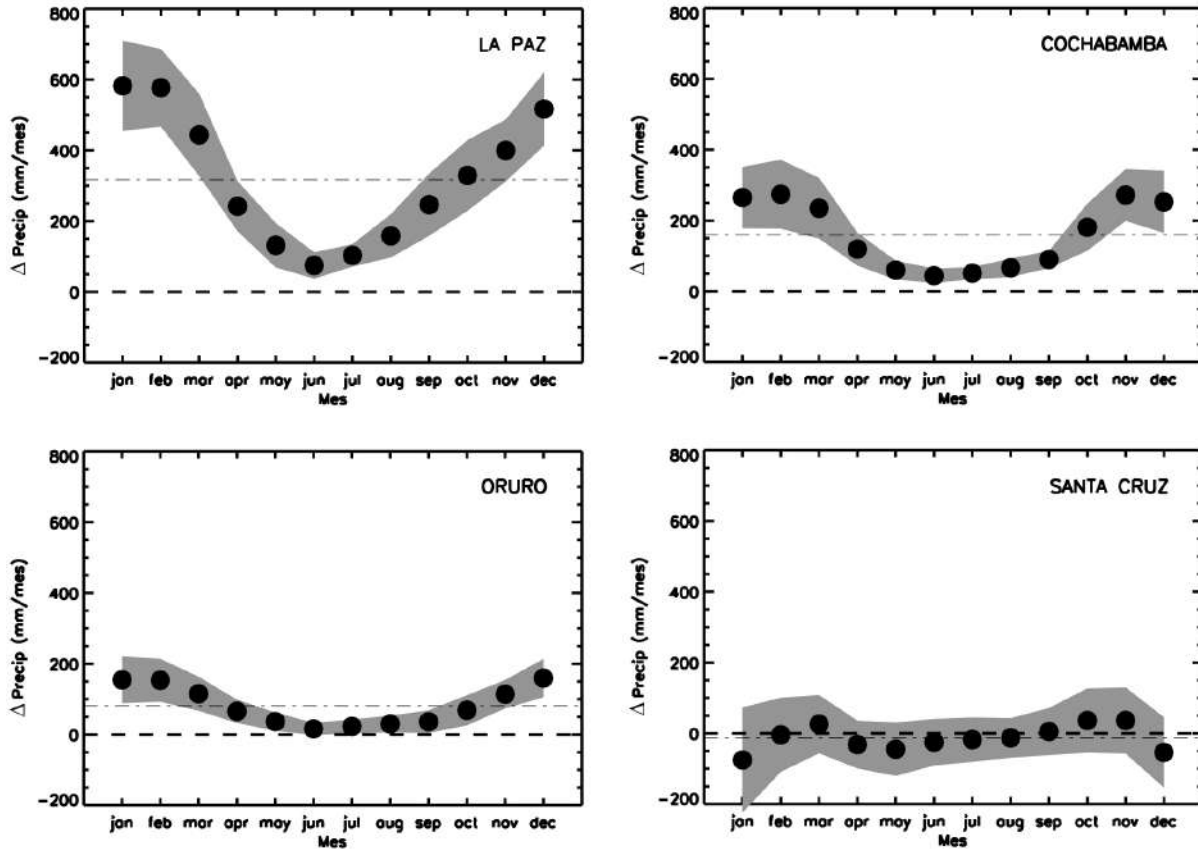


FIG. 7.— Precipitación acumulada mensual para el periodo de estudio. Se muestran sólo algunas estaciones seleccionadas de las tres regiones mencionadas en el texto. Símbolos y área sombreada tienen el mismo significado que en la Fig. 4.

promedio para el periodo 1961–1990 obtenidos de las observaciones de estaciones de superficie (representados por los círculos). Las figuras muestran una correspondencia razonable entre datos medidos y datos interpolados tanto para temperatura como para precipitación. Los rasgos más relevantes mostrados por los datos interpolados coinciden con características reportadas por el SENAMHI boliviano (Carrasco 2009, comunicación personal), por ejemplo el máximo de precipitación en la zona central de Bolivia. Las Figs. 9c y 9d muestran los valores climatológicos de temperatura y precipitación, respectivamente, pero obtenidos por PRECIS. En estos gráficos también se presentan los valores provenientes de las estaciones de superficie y se mantienen las escalas de colores como en 9a y 9b a fin de facilitar la comparación con los valores “observados”. Los gráficos muestran que los datos modelados de temperatura reproducen cualitativamente bien los datos observados pues las zonas frías y calientes están adecuadamente representadas en términos espaciales. Por el contrario, en el caso de la precipitación se observa que el modelo produce excesiva precipitación en toda la zona de fuerte gradiente altitudinal y falla en reproducir el máximo observado de precipitación centrado aproximadamente en  $64^{\circ}O$  y  $16^{\circ}S$ . Para poder comparar de mejor manera estas diferencias se calcularon los valores “modelo menos observaciones” (Figs. 8e y 8f). Estas diferencias indican que las temperaturas (Fig. 8e) están en general razonablemente modeladas (comparadas con los datos interpolados)

aunque en gran parte del territorio boliviano se observa subestimación de las mismas. Por otro lado, aunque el modelo reproduce razonablemente bien la distribución espacial de la precipitación, en el sentido que reproduce adecuadamente el hecho que exista mayor precipitación en zonas bajas que en zonas altas, muestra una fuerte sobreestimación en la región de los valles. A pesar de eso, en una parte importante del área de interés la diferencia entre modelo y observaciones es menor a  $500\text{mm/año}$  (en valor absoluto).

### 5. DISCUSIÓN

La comparación de datos de superficie con las salidas del modelo muestra que éste realiza un buen trabajo en zonas bajas al reproducir razonablemente bien valores mensuales de temperatura media, mínima y máxima, así como la precipitación acumulada mensual. Por el contrario, en lugares donde la pendiente es elevada o la altura de superficie es alta el modelo subestima de manera sistemática la temperatura y sobreestima la precipitación. La variable que es mejor estimada por el modelo es la temperatura mínima mientras que la temperatura máxima es la que más pobre desempeño tiene en el grupo de las temperaturas. En el caso de la precipitación, se observa un aceptable desempeño del modelo en la región de tierras bajas. En esta zona, la mayor parte de los valores modelados se hallan dispersos alrededor de los valores observados. En la región de valles, por el contrario, se observa una marcada sobreestimación de la precipitación a casi

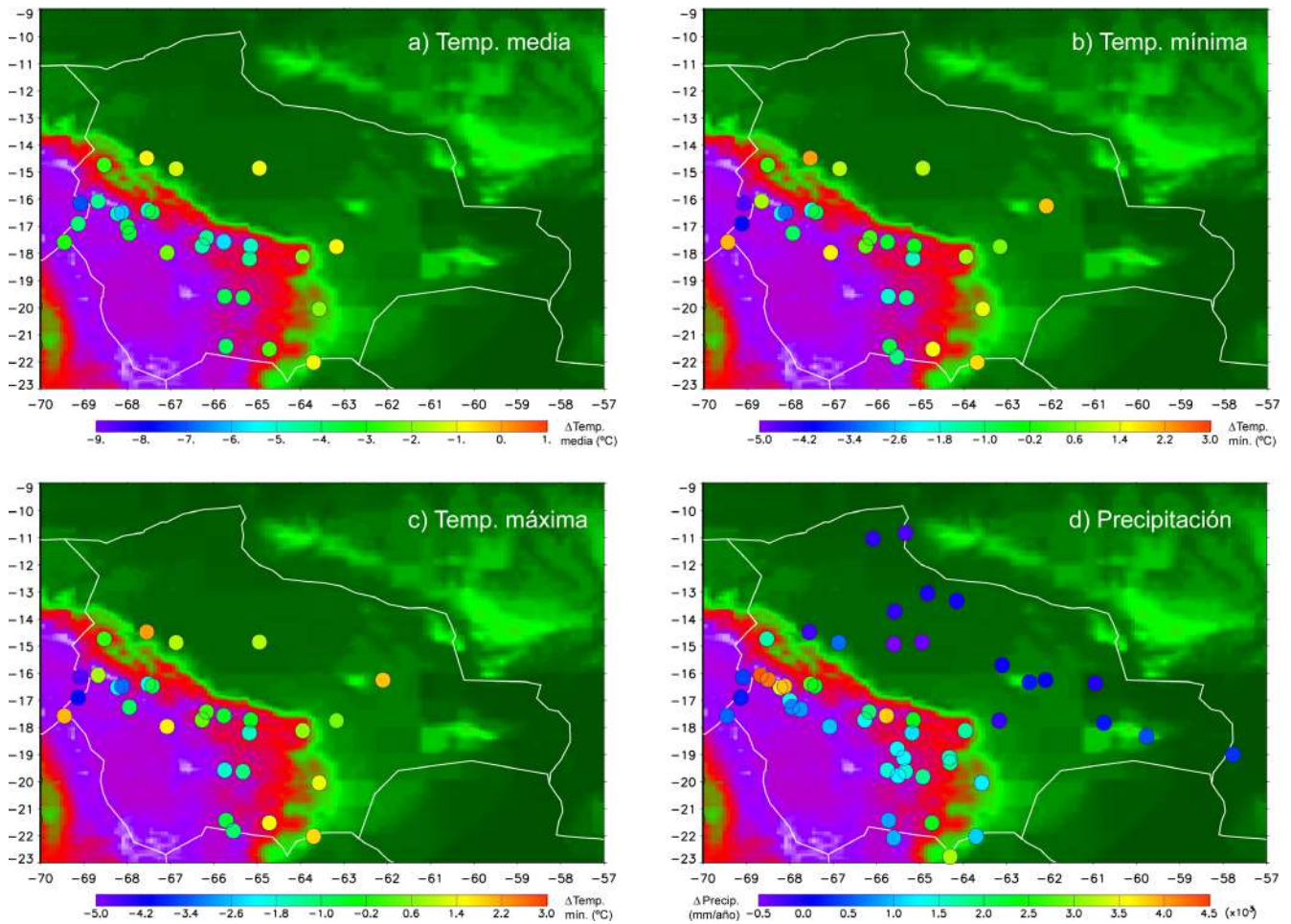


FIG. 8.— Valores anuales promedio, para el caso de las temperaturas (a,b y c), y acumulados anualmente (d), para el caso de la precipitación, de las diferencias “modelo menos observaciones”. Los colores de fondo representan la variación de altura del terreno respecto a nivel del mar. Los círculos de colores muestran las diferencias de las variables meteorológicas estudiadas para las diferentes estaciones usadas en el presente estudio. Nótese las distintas escalas en todos los gráficos (*color online*).

cualquier altura. Del mismo modo, en la región altiplánica se observa una elevada sobreestimación de la precipitación. A pesar de este hecho, el modelo es capaz de reproducir el ciclo estacional produciendo mucha más lluvia en la estación húmeda que en la época seca como se espera. El buen comportamiento mostrado por el modelo en tierras bajas, sin embargo, debe ser analizado con cuidado. Una comparación a escala continental (Marengo et al. 2009) muestra que el modelo subestima la precipitación en regiones al este y noreste de la región de estudio en el presente trabajo. Esto podría indicar que el buen acuerdo entre modelo y observaciones en las regiones bajas podría, al menos en parte, deberse a que esta región se encuentra en la zona de transición entre sub y sobreestimación. Es necesario un estudio más profundo que permita entender las causas de estos sesgos para asegurar que el modelo realiza un buen trabajo por las causas correctas.

El modelado de los parámetros meteorológicos sobre Bolivia no es trivial. En primer lugar porque este país se encuentra en la región tropical, segundo porque su territorio posee elevados gradientes altitudinales y tercero porque no existe la suficiente cantidad de información de superficie o de niveles de altura que permitan afinar adecuadamente los procesos parametrizados en el modelo y/o validar los resultados

de los mismos. En nuestro caso, si bien el modelo realiza un trabajo aceptable en cuanto al parámetro de temperatura, produce desviaciones importantes respecto a los valores observados en el caso de la precipitación, especialmente en regiones con fuerte gradiente altitudinal. La causa de estas diferencias podría deberse, al menos en parte, al hecho de que el modelo utiliza un sólo esquema de parametrización para la convección para todo el dominio (Jones et al., 2004). Los procesos convectivos son diferentes en zonas bajas comparados a los sistemas en tierras altas, siendo los sistemas convectivos de mesoescala los mayores aportantes a la lluvia en las tierras bajas (Halverson et al. 2002; Lang & Barros 2004). Como la parametrización es única para una región con orografía tan variada, es difícil que el modelo represente adecuadamente ambos procesos simultáneamente. De hecho el estudio de las parametrizaciones para el Altiplano es un tópico pendiente de investigación. Adicionalmente, la pobre resolución de la orografía de la región (a una resolución de 50 km es posible tener variaciones de 1800 m de altura entre puntos de retícula adyacentes) podría también contribuir a los sesgos observados. Comparaciones hechas entre corridas realizadas a 25 y 50 km de resolución con PRECIS (Seiler 2009) muestran, sin embargo, diferencias relativamente menores entre

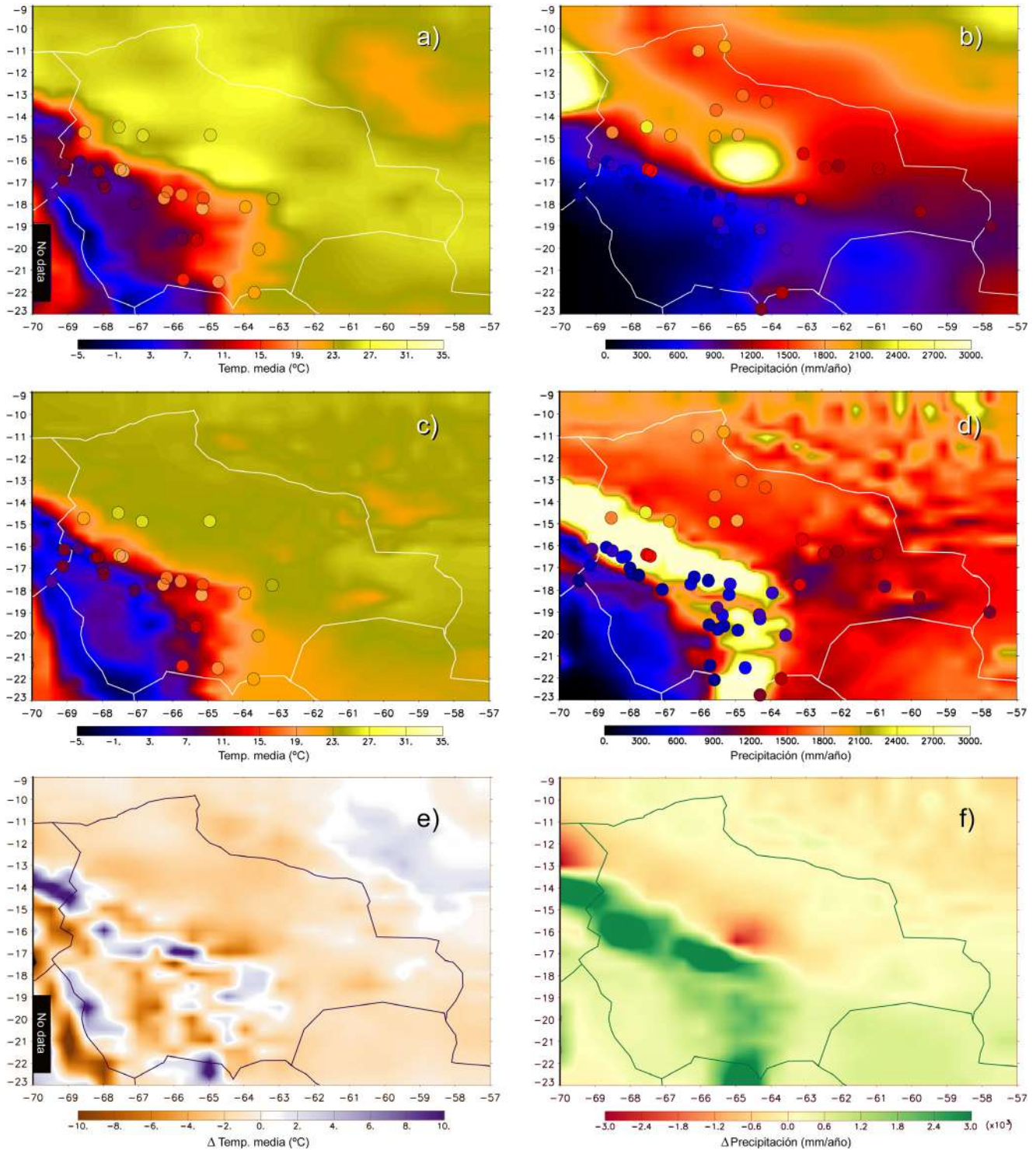


FIG. 9.— Comparación de los resultados entregados por el modelo con datos de superficie interpolados espacialmente. Estos valores, a una resolución original del orden de 50km, fueron interpolados a una malla mucho más fina para fines de claridad. Las figuras (a) y (b) muestran la climatología de los datos observados para el periodo 1961–1990, mientras las figuras (c) y (d) muestran los valores climatológicos de los datos modelados para el mismo periodo. Las figuras (e) y (f) muestran la diferencia de (c)–(a) y (d)–(b), respectivamente. Los círculos muestran los valores climatológicos de las observaciones obtenidas de las estaciones de superficie (*color online*).

los resultados de ambas corridas. En todo caso, resultados de otros modelos también muestran sobreestimación de la precipitación sobre zonas de fuertes gradientes altitudinales (Solman et al. 2007).

Por último es bueno mencionar que en el contexto del cambio climático se espera que ocurran cambios en las distribu-

ciones de precipitación así como incremento o decremento de eventos extremos (IPCC 2007). Por eso la capacidad del modelo de reproducir eventos que afectan al territorio boliviano como inundaciones, sequías y heladas, por ejemplo, debe ser evaluada. Una inadecuada parametrización o una pobre representación de la orografía regional no explican

TABLA 3  
RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO PARA TODAS LAS ESTACIONES DENTRO DE  
CADA UNA DE LAS REGIONES DEFINIDAS EN EL TEXTO.

	Temp. Media (°C)			Temp. Mínima (°C)			Temp. Máxima (°C)			Precipitación (mm/mes)		
	Media	Desv. Est.	RCM <sup>a</sup>	Media	Desv. Est.	RCM <sup>a</sup>	Media	Desv. Est.	RCM <sup>a</sup>	Media	Desv. Est.	RCM <sup>a</sup>
Tierras bajas	-1.01	1.17	1.03	1.25	1.31	1.41	-1.60	1.65	1.70	14.6	80.6	67.7
Valles	-3.70	1.35	3.92	-0.26	1.70	1.16	-5.71	1.95	6.05	136.6	67.5	144.0
Zonas altas	-4.49	1.23	4.72	-1.68	1.68	2.87	-6.94	1.77	7.19	161.7	56.4	204.7

<sup>a</sup>Raíz Cuadrática Media.

completamente las diferencias observadas. Por esa razón, un análisis de variables de altura como vientos, transporte de humedad asociado y otros parámetros que permitan evaluar cuan bien reproduce el modelo las características regionales que controlan el clima en Bolivia es también recomendable. Un estudio más profundo podría permitir mejorar el desempeño del modelo sobre Bolivia.

## 6. CONCLUSIONES FINALES

La comparación de resultados del modelo con datos observados en superficie a nivel mensual de temperatura y precipitación en el periodo 1961–1990 indica que el modelo tiene un buen desempeño en zonas bajas (menos de 500 *msnm*). Sin embargo, en zonas de altura intermedia (entre 500 y 3500 *msnm*) y zonas altas (altura mayor a 3500 *msnm*) el modelo subestima, en algunos casos fuertemente, tanto temperatura media y temperatura máxima. La temperatura mínima también es subestimada en estas regiones pero en menor manera que las otras dos variables de temperatura. En todo caso, la temperatura mínima es la variable mejor modelada por

PRECIS para Bolivia. Con respecto a la precipitación se observa una sobreestimación para las regiones con altura mayor a 500 *m* pero un comportamiento aceptable para alturas menores. La sobreestimación más fuerte se da en la región con el gradiente altitudinal más grande. Estos resultados son corroborados a través de una comparación de los datos entregados por el modelo contra datos de superficie interpolados espacialmente. En este caso se observa claramente que las mayores diferencias se producen en las regiones de gran gradiente altitudinal. En las otras regiones, tierras bajas y parte del altiplano, las diferencias son relativamente menores.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contó con el apoyo de *Conservation International*, oficina regional Bolivia, y la colaboración del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) a través del climatólogo Gualberto Carrasco. Agradecemos también a los dos revisores por sus comentarios y sugerencias que permitieron hacer mucho más claro este manuscrito.

## REFERENCIAS

- Andrade, M. F. 2008, RBF, 14, 42
- CCSP. 2008, Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [Bader D.C., C. Covey, W.J. Gutowski Jr., I.M. Held, K.E. Kunkel, R.L. Miller, R.T. Tokmakian and M.H. Zhang (Authors)] (Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D.C., USA, 124 pp)
- Cusack, S. and Edwards, J. M. & Crowther, J. M. 1999, *J. Geophys. Res.*, 104, n. D2, 2051
- Davies, H. C. & Turner, R. E. 1977, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 103, 225
- Edwards, J. M. & Slingo, A. 1996, *J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 689
- Garreaud, R. D. 1999, *Mon. Wea. Rev.*, 127, 901
- Garreaud, R. D. & Aceituno, P. 2001, *J. Climate*, 14, 2779
- Garreaud, R. D. et al. 2008, Present-day South American climate, *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, doi:10.1016/j.palaeo.2007.10.032
- Gregory, D. & Morris, D. 1996, *Clim. Dyn.*, 12, n. 9, 641
- Halverson, J. B., Rickenbach, T., Roy, B., Pierce, H., & Williams, E. 2002, *Monthly Weather Review*, 130, 1493
- Ibisch, P. L., Beck, S. G., Gerkmann, B., & Carretero, A. 2008, Ecorregiones y ecosistemas. Pp. 47-88. en: Biodiversidad: La riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación (P. L. Ibisch & G. Mérida, Eds.) (Ministerio de Desarrollo Sostenible. Editorial FAN. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. IUCN)
- IPCC. 2007, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds.) (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp)
- Jones, R. G., Murphy, J. M., & Noguer, M. 1995, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 1413
- Jones, R. G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G. J., & Mitchell, J. F. B. 2004, Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS (Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp)
- Keeling, C. D. 1960, *Tellus*, 12, 200
- Lang, J. L. & Barros, A. P. 2004, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 829
- Legates, D. R. & Willmott, C. 1990a, *Int. J. Climatol.*, 10, 111
- . 1990b, *Theor. Appl. Climatol.*, 41, 11
- Lenters, J. D. & Cook, K. H. 1997, *J. Atmos. Sci.*, 54, 656
- Marengo, J. A., Douglas, M. W., & Silva Dias, P. L. 2002, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8079, doi:10.1029/2001JD001188
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. 2009, *International Journal of Climatology*, 29, 2241
- Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C., & Nicolini, M. 2004, *J. of Climate*, 17, 2261
- Mizuta, R. et al. 2006, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 165
- Organization, W. M. 1984, *Technical Regulations, Vol. I (WMO Publication No. 49. Geneva, Switzerland)*
- Palmer, T. N. & Williams, P. D. 2008, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, 2421
- Peixoto & Ort. 1992, *Physics of Climate (Springer-Verlag)*
- Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R., & Stratton, R. A. 2000, *Climate Dynamics*, 16, 123
- Rojas, M. & Seth, A. 2003, *Journal of Climate*, 16, 2454
- Ronchail, J. et al. 2005, *Journal of Hydrology*, 302, 223
- Saucier, W. J. 2003, *Principles of Meteorological Analysis (Dover Phoenix Editions)*
- Seiler. 2009, [http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS\\_Christian\\_Seiler\\_FAN\\_Bolivia\\_v1.2.pdf](http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS_Christian_Seiler_FAN_Bolivia_v1.2.pdf)
- Soares, W. & Marengo, J. A. 2008, Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario (DOI:10.1002/joc.1800)
- Solman, S. A., Nuñez, M. N., et al. 2007, *Clim. Dyn.*, 30, 533
- Vera, C. et al. 2006, *J. Climate*, 19, 4977
- Vuille, M. 1999, *International Journal of Climatology*, 19, 1579

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA  
UTILIZANDO MODELOS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA E IMÁGENES SATELITALES  
EVALUATION OF THE GLOBAL SOLAR RADIATION POTENTIAL IN THE DEPARTMENT OF COCHABAMBA  
(BOLIVIA) USING MODELS OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND SATELLITE IMAGES

MARCELO J. LUCANO<sup>†</sup> & IVÁN E. FUENTES M.<sup>†</sup>

Departamento de Física  
Universidad Mayor de San Simón  
Cochabamba – Bolivia

RESUMEN

En este trabajo se estimaron los valores de la radiación solar global por medio de modelos de Sistemas de Información Geográfica e imágenes satelitales obtenidos a través de la metodología SSE de la NASA para un periodo de registros de 22 años. Con estos valores de radiación, se obtuvo la distribución temporal y espacial de la radiación solar para el Departamento de Cochabamba mediante un proceso de interpolación que utiliza el paquete de análisis geoestadístico ILWIS, considerando datos de una rejilla conformada por 16 casillas que abarcan el departamento; se utilizó el método de superficie móvil con distancia inversa, exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico. Se observó que los niveles de radiación más bajos corresponden a los meses de mayo a julio (invierno) y los niveles de radiación más altos corresponden a los meses de octubre a diciembre (primavera y verano). Asimismo, se observó que la parte noreste de Cochabamba presenta los valores más bajos de media anual de radiación global, entre  $4.2 - 4.5 kWh/m^2$  al día, ya que ésta es una zona de baja altitud sobre el nivel del mar y se caracteriza por su clima tropical y alta humedad, generando una mayor dispersión de la radiación solar, en tanto que en la zona suroeste la radiación solar aumenta, ya que en ésta se localiza la Cordillera Oriental Central con un clima seco cuyos valores varían entre  $5.76.3 kWh/m^2$  al día. También se distinguen siete regiones de niveles de radiación que van aumentando de noreste a suroeste, tal como se observó en estudios anteriores. Los valores de radiación obtenidos mediante la interpolación fueron validados con datos medidos en superficie con un error porcentual medio anual del 10 %.

*Descriptor:* radiación solar — tecnología con base satelital

Código(s) PACS: 92.60.Vb, 07.87.+v

ABSTRACT

Using Geographic Information Systems and satellite imaging, this study estimates the global solar radiation values using models generated from data recorded over a period of 22 years and applying NASA's SSE methodology. Using these radiation values and the geostatistical analysis software ILWIS the time and space distribution of solar radiation for the Department of Cochabamba was obtained. The analysis involved data from a grid made up of 16 squares that make up Cochabamba and used the method of moving surface with inverse distance, weight exponent 1, spherical distance and parabolic second order. It is observed that the lowest levels of radiation corresponded with the months May to July (winter) and the highest radiation levels with the period October to December (summer). In addition, it was noted that the northeast region of the Cochabamba showed the lowest annual radiation values ( $4.2 - 4.5 kWh/m^2$  per day). This is due to the fact that the region is closer to sea level and characterised by a tropical and humid climate which leads to a greater dispersion of solar radiation. In the southwest region of Cochabamba which forms part of the Central Eastern Mountain Range and has a dry climate, the solar radiation is higher ( $5.7 - 6.3 kWh/m^2$  per day). The study identifies seven regions of radiation levels with increasing radiation from northeast to southwest which agree with previous studies. The radiation values obtained through interpolation were validated with surface measurements with an average annual error of 10%.

*Subject headings:* solar radiation — satellite related technology

<sup>†</sup>Email: cclimaticos@fcyt.umss.edu.bo.

## 1. INTRODUCCIÓN

A medida que la demanda de energía renovable crece, así lo hace la necesidad de fuentes de datos más precisos de estas energías. Sin embargo, en Bolivia, así como en muchos otros países, relativamente pocas estaciones meteorológicas colectan datos de radiación solar requeridas para conocer el potencial y el desempeño de sistemas de energía solar y en particular de sistemas fotovoltaicos. Asimismo, las tecnologías de energía renovable están siendo usadas alrededor del mundo para suplir el uso de energía eléctrica y para desempeñar trabajo mecánico tal como: bombeo de agua, suministro de combustible para transporte, provisión de requerimientos de calentamiento y enfriamiento para el diseño de edificios, etc.

Las fuentes de energía renovable, particularmente para tecnologías solares, son fuertemente dependientes de las condiciones y fenómenos climatológicos y están también afectadas por procesos microclimáticos. Debido a la ausencia de una red meteorológica de monitoreo densa y extensa, se deben utilizar modelos numéricos, conocimiento empírico de las características microclimáticas y observaciones indirectas derivadas del análisis y observaciones de datos provenientes de sensores remotos localizados en satélites para desarrollar un conocimiento de las características geoespaciales así como de la extensión de estos recursos.

Ya que una red de estaciones para caracterizar el régimen de radiación solar en todo el país resultaría muy costosa, se han utilizado métodos indirectos para estimarla, tales como mediciones de insolación o nubosidad; pero aún la red de estaciones heliográficas y meteorológicas tiene grandes zonas con una cobertura deficiente, particularmente en regiones donde la radiación solar tiene un régimen muy diferenciado, como las regiones montañosas y los llanos. Desde la aparición de los satélites meteorológicos se abrió una nueva perspectiva para estimar parámetros de radiación y se han realizado estudios encaminados a ello. En los últimos 30 años la literatura especializada reporta diversos métodos de cálculo de la radiación solar, con distintos grados de complejidad.

En este trabajo, con base en la implementación de técnicas de interpolación, se estiman los niveles de radiación solar en el Departamento de Cochabamba a partir de datos de irradiación solar obtenidos de imágenes satelitales procesadas con la metodología SSE (*Surface Meteorology and Solar Energy*) de la NASA.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Estimación de la radiación solar a partir de imágenes satelitales

Desde que se hicieron disponibles las imágenes de satélite de alta resolución en formato digital, comenzaron a aparecer estudios sobre la estimación de la radiación solar a partir de éstas. La gran ventaja de los métodos de estimación de radiación basados en imágenes satelitales es precisamente su resolución espacial. Con ellas es posible generar mapas de radiación solar con una resolución muy detallada (de 2 a 10  $km^2$ ) sobre regiones específicas. Esto los convierte en una

fuerza de información muy adecuada, por ejemplo, para ser integrada en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El trabajo de Gautier et al. (1980) da una pauta de la metodología general seguida hasta la actualidad. En el trabajo mencionado se incorpora un modelo de cálculo de cierta complejidad, que requiere información del contenido de agua precipitable y al mismo tiempo incorpora el efecto de la nubosidad aplicando una relación lineal simple entre la brillantez de la nube en la imagen de satélite y su factor de absorción. El método se aplica a imágenes de alta resolución (1 – 2  $km/pixel$ ) y puede calcular la distribución de la radiación sobre grandes áreas.

Mosser & Raschke (1984) utilizan las imágenes del METEOSAT, cuyas características son algo diferentes de las del GOES y aplican una normalización de los valores de píxel llevándolos de su valor original al intervalo definido por los valores máximo y mínimo observados para cada píxel de la imagen en dependencia de la hora y la época del año. A partir de mediciones terrestres se calcula una relación entre los valores de píxel normalizados y el cociente entre la radiación incidente y la radiación máxima (ante cielo despejado), esta relación depende además del ángulo cenital del sol y también presenta un estudio acerca del efecto que tiene el número de imágenes empleadas a lo largo del día sobre la exactitud de las sumas diarias calculadas.

Según Rigollier et al. (2002) en la serie de métodos publicados en los años 90 como HELIOSAT, se aplica un modelo normalizado tanto para los valores de píxel ante cielo despejado como para los de zonas nubladas. Se aplica una relación lineal al índice normalizado de los valores para las zonas nubladas, para obtener el índice de transparencia de la nubosidad. De esta manera se calcula la radiación tanto para las áreas de cielo despejado como para cielo nublado. Este método fue inicialmente publicado como HELIOSAT 1. En la segunda versión, HELIOSAT 2 se toma en cuenta el estado óptico de la atmósfera y se introduce un método de calibración de imágenes que permitiría trabajar con distintos sensores.

Pérez et al. (2002a) presentan un método de cálculo que estima los valores de radiación ante cielo despejado mediante el uso de un modelo simplificado y a continuación determinan un índice de nubosidad tomado a partir de las imágenes visibles, mediante el cual se modifican los valores calculados para obtener los valores definitivos de radiación. El modelo GL 1.0 del Centro de Prevención del Tiempo y Estudios Climáticos y del INPE en Brasil parte de una ecuación simplificada de transferencia radiactiva en las zonas de entre 400 – 700  $nm$  y 700 – 4000  $nm$ . Se toma como hipótesis que en este rango espectral casi no hay absorción en la atmósfera, por lo tanto el término de absorción por aerosoles se puede despreciar, de manera que la radiación se puede obtener conociendo el valor de la radiación extraterrestre. Hoyos et al. (2000) utilizan un método que emplea el mismo modelo de transferencia (GL 1.0) del INPE, las diferencias fundamentales consisten en una implementación acabada que facilita su utilización para puntos seleccionados de la imagen. Es-

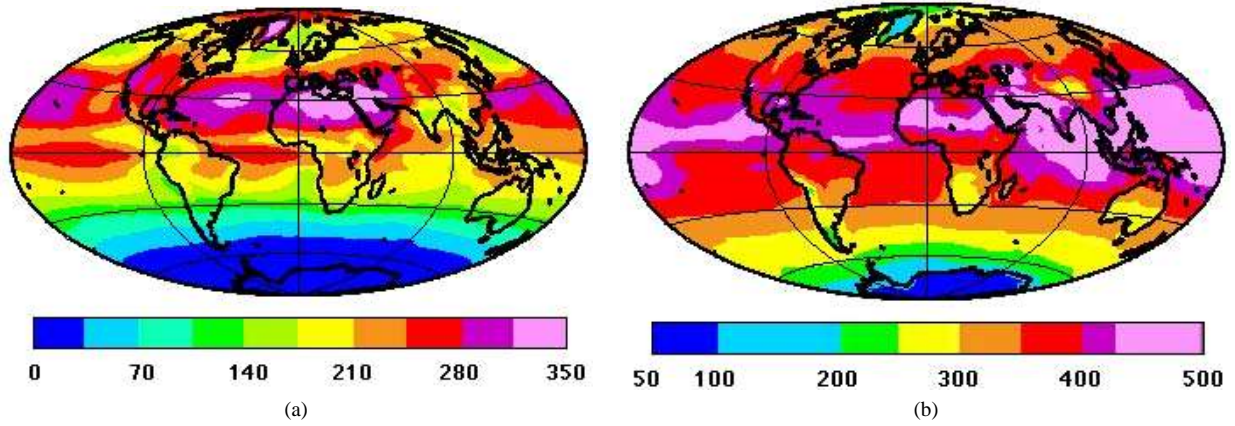


FIG. 1.— (a) Distribución geográfica de la radiación de onda corta (SW) en un periodo de 8 años para el mes de julio ( $W/m^2$ ). (b) Distribución geográfica de la radiación de onda larga (LW) en un periodo de 8 años para el mes de julio ( $W/m^2$ ) (color online; Darnell et al. —).

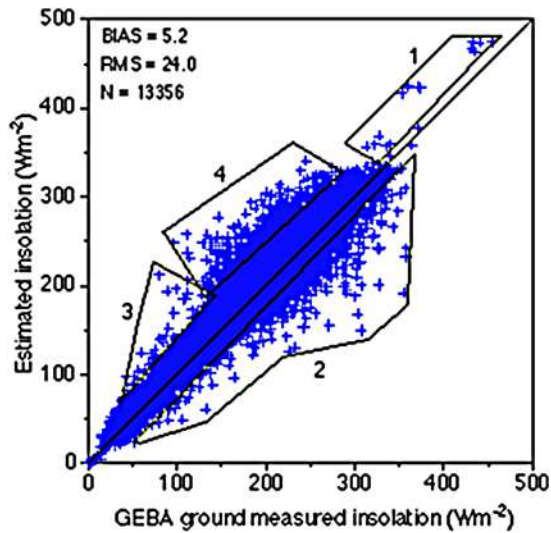


FIG. 2.— Comparación de los valores de radiación del archivo GEBA y los valores obtenidos del análisis de imágenes satelitales (Darnell et al. —).

tos dos métodos no contemplan el efecto de la nubosidad ni permiten el cálculo para áreas grandes.

Como cualquier estimación a partir de modelos, aquellas basadas en datos de satélite tienen una exactitud limitada. Convencionalmente se considera un error cuadrático medio entre 15 y 20 % para estas estimaciones, cuando se las compara con mediciones llevadas a cabo por estaciones localizadas en sitios específicos (ver por ejemplo, Beyer et al. 1996). Hay estudios que ubican este error en un valor menor. Por ejemplo, Zelenka et al. (1999) llevaron a cabo un estudio en el que llegan a la conclusión de que el error real de los métodos para obtener irradiancias a partir de datos de satélite es de alrededor del 12%. El resto del error es atribuido por los autores al hecho de que a través de las imágenes satélites se estiman promedios sobre grandes áreas de varios kilómetros cuadrados. Cuando se compara estos valores con mediciones en estaciones específicas, de manera natural ocurre un error cuadrático medio de alrededor del 15%, ya que los valores medidos por una estación no proveen un promedio de la región sino una medición en un punto con un clima específico.

A pesar de las ventajas que presenta la estimación de la irradiancia solar a partir de información satelital, no se debe menospreciar la importancia de una red terrestre que provea información de un número grande de puntos de monitoreo bien distribuidos sobre un territorio dado. Para que los métodos satelitales den resultados más precisos, es necesario calibrarlos (sintonizarlos) con datos de superficie, lo cual requiere de una buena cobertura de una red terrestre constituida por estaciones situadas estratégicamente.

En Bolivia no se tiene referencia sobre algún trabajo que utilice la metodología de las imágenes satelitales para estimar los niveles de radiación solar, sin embargo, se han realizado varios estudios de la distribución de la radiación solar, basados fundamentalmente en la dependencia de ésta con otras variables que se miden en un número grande de estaciones, como el número de horas con brillo solar, aplicando fórmulas empíricas de tipo Ångström (Birhuett 1993; PROPER-Bolivia et al. 1998).

### 2.2. Estimación de la radiación solar a partir de imágenes satelitales aplicando la metodología SSE de la NASA

El proyecto ESE (Earth Science Enterprise) de la NASA ha proporcionado un sistema de satélites de investigación para proveer datos importantes para el estudio del clima y procesos climáticos. Estos datos incluyen estimaciones en un periodo largo de tiempo de cantidades meteorológicas y energía solar en la superficie de la tierra. La base de datos basados en imágenes satelitales ha mostrado ser lo suficientemente precisa para proporcionar datos de radiación solar confiables en regiones en las cuales las mediciones en superficies son muy dispersas o no existen (Whitlock et al. 2001; Pérez et al. 2002b).

Como resultado del proyecto ESE surge el banco de datos de radiación SSE de la NASA (NASA-LARC —) que reúne un conjunto de datos que engloban parámetros meteorológicos usados para diseñar sistemas de energías renovables. No está diseñado como un sustituto a las mediciones en superficie, sino como un estimado de datos de radiación para lugares en los que no existen redes de monitoreo densas (ej. áreas rurales). Debido a la resolución de las imágenes

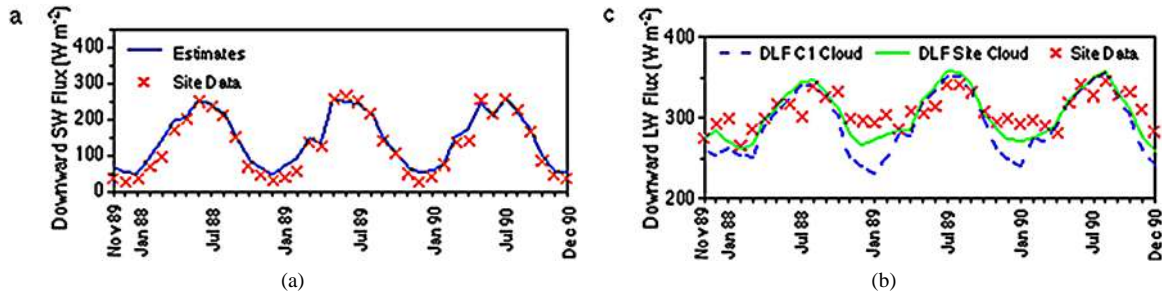


FIG. 3.— Comparación entre los valores de radiación medidos en superficie y valores estimados a partir de imágenes satelitales para la estación de Payerne, Suiza: (a) onda corta SW y (b) onda larga. (color online; Darnell et al. —).

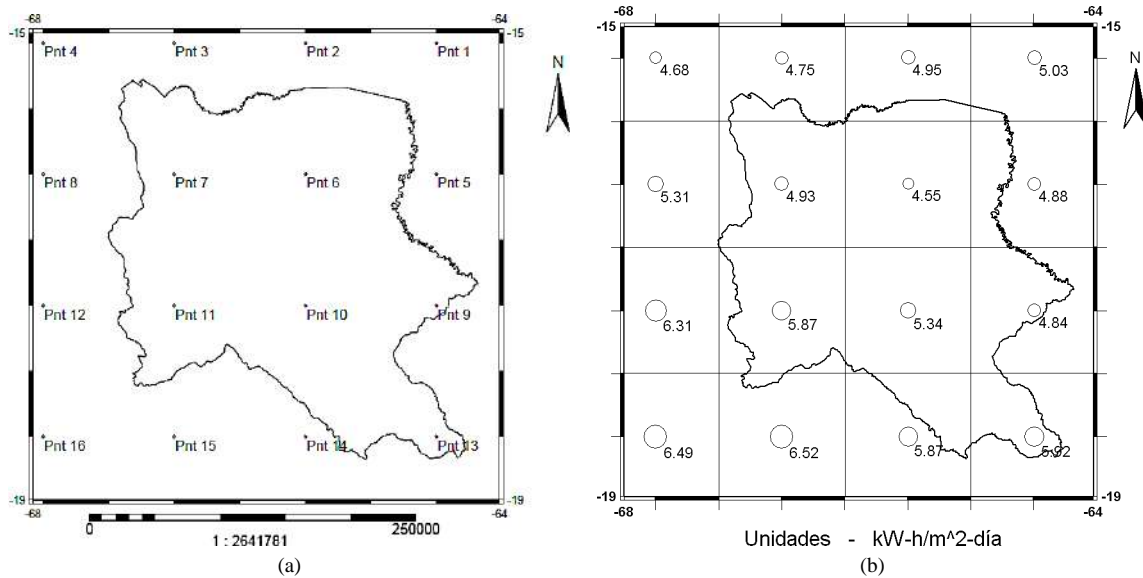


FIG. 4.— (a) Distribución geográfica de los puntos en el centro de las grillas en el Departamento de Cochabamba. (b) Radiación media anual asignada a los puntos de referencia en unidades de  $kWh/m^2$  al día.

satelitales da un promedio de las condiciones de la región cubierta con una resolución de  $1^\circ \times 1^\circ$  en latitud y longitud y el periodo de análisis del banco de datos es de julio de 1983 hasta noviembre de 2008 (22 años) con las imágenes obtenidas de alrededor de 200 satélites. Estos valores estimados son suficientemente precisos para realizar estudios preliminares.

El sitio Web de la NASA habilita al usuario para la descarga de datos de radiación solar mensual y anual para cualquier localización en la Tierra. El banco de datos de la NASA se ha convertido en un paradigma para la fuente de información de radiación solar, debido a la alta calidad del modelamiento utilizado para generar el banco de datos, al hecho de que la metodología SSE es validada con numerosas estaciones en superficie y al hecho de que abarca una escala global y cubre un extenso periodo de tiempo. Sin embargo, el banco de datos es aún limitado por una pérdida de resolución y no validación en áreas donde no existen datos en superficie. Los procedimientos utilizados para generar el banco de datos SSE también encuentran problemas en áreas en las que se tienen interfaces oceánicas y áreas cubiertas con nieve.

Los valores estimados de radiación solar son resultado del análisis de un periodo de 46 meses de la radiación de onda corta (SW) y onda larga (LW) procesados a través del algoritmo de Pinker-Laszlo (Pinker & Laszlo 1992; Pin-

ker et al. 1995; Darnell et al. —) dentro del programa NASA/GEWEX/SRB. Las variables de entrada son las irradiancias, la cantidad de nubes provenientes del programa ISCCP (*International Satellite and Cloud Climatology Programme*), el vapor de agua del programa GEOS-1 (Goddard Earth Observation Systems) con datos en intervalos de 3 horas y datos de ozono obtenidos del sensor TOMS. Los valores de aerosoles y profundidad óptica de las nubes son utilizados como parámetros de afinamiento en los casos de cielo con y sin nubes. El error cuadrático medio (RMS) estimado para valores mensuales es de alrededor del 16% con una incertidumbre del 1% comparado a los datos obtenidos con mediciones en superficie según el Centro Mundial de Datos de Radiación (WRDC).

Las Figuras 1a y 1b muestran la distribución geográfica de la radiación promedio de onda corta y onda larga, respectivamente, en un periodo de 8 años para el mes de julio. La distribución de la radiación SW es primordialmente zonal, modulada por la distribución de las nubes. Los valores máximos se encuentran en el Ártico, Groenlandia y las regiones subtropicales del Hemisferio Norte. Los valores máximos de la radiación LW se localizan sobre amplias regiones en los trópicos con un decrecimiento gradual hacia los polos. Los valores más altos ocurren sobre áreas que exhiben tempera-

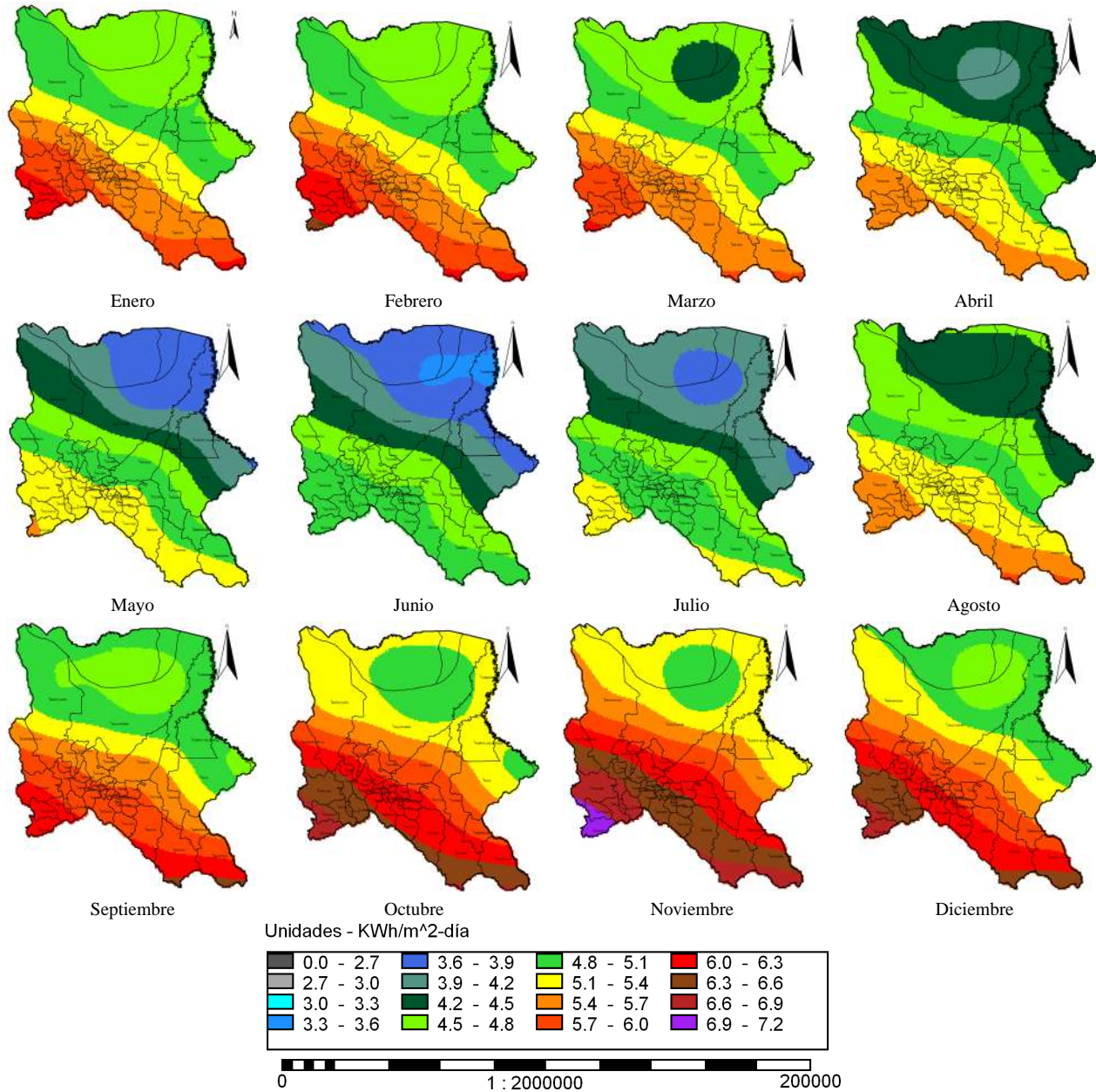


FIG. 5.— Distribución mensual de la radiación solar global en el Departamento de Cochabamba (*color online*).

turas superficiales elevadas tal como los desiertos subtropicales y áreas con abundancia de nubes y vapor de agua.

La Fig. 2 muestra un diagrama de dispersión de los datos de radiación mensuales del Archivo del Balance de Energía Global (GEBA) del Instituto Federal de Tecnología de Suiza y los correspondientes valores de radiación estimados a partir del análisis de imágenes satelitales. Se observa que gran parte de los puntos muestran una correlación lineal, en cuanto que los puntos fuera del grupo pertenecen a regiones con alta densidad de agua o con hielo superficial.

Las Figs. 3a y 3b muestra una comparación entre los valores de radiación SW y LW respectivamente de medidas en superficie y los valores estimados a partir de imágenes satelitales para la estación ubicada en Payerne, Suiza.

### 3. METODOLOGÍA

Debido a la resolución de las imágenes satelitales, se obtiene un valor promedio de radiación para un área comprendida entre 1° de latitud y 1° de longitud. El Departamento de Cochabamba se encuentra entre los 64° – 68° de longitud oeste y 15° – 19° de latitud sur abarcando un total de 16 grillas, por lo que el valor de radiación promedio corresponde al centro de la grilla considerada. Con este criterio, se asignaron para el centro de las 16 grillas el valor correspondiente de radiación solar de la base de datos SSE, estos datos tabulados se muestran en la Tabla 1.

Con base a la Tabla 1, se obtuvo la distribución geográfica de los puntos centrales de las grillas en la región de estudio (Fig. 4).

TABLA I  
DATOS DE RADIACIÓN SOLAR MENSUAL Y ANUAL OBTENIDOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA EN kWh/m<sup>2</sup>al día.

No	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste(°)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Pnt 1	15.5	64.5	5.03	4.99	4.84	4.71	4.05	3.96	4.44	4.79	5.25	5.52	5.54	5.15	4.86
Pnt 2	15.5	65.5	4.95	4.84	4.78	4.58	3.91	3.77	4.19	4.78	5.24	5.55	5.47	5.08	4.76
Pnt 3	15.5	66.5	4.75	4.7	4.58	4.37	3.79	3.56	3.84	4.51	4.95	5.25	5.22	4.98	4.54
Pnt 4	15.5	67.5	4.68	4.76	4.57	4.36	4.07	3.92	3.95	4.41	4.69	5.07	5.05	4.93	4.54
Pnt 5	16.5	64.5	4.88	4.9	4.69	4.37	3.71	3.54	3.98	4.51	5.03	5.31	5.37	4.95	4.60
Pnt 6	16.5	65.5	4.55	4.57	4.38	4.09	3.73	3.61	3.81	4.3	4.63	4.84	4.92	4.67	4.34
Pnt 7	16.5	66.5	4.93	4.96	4.83	4.51	4.38	4.18	4.2	4.55	4.83	5.2	5.4	5.27	4.77
Pnt 8	16.5	67.5	5.31	5.47	5.3	5.01	4.95	4.65	4.71	5.01	5.55	5.78	6.04	5.78	5.30
Pnt 9	17.5	64.5	4.84	4.83	4.74	4.43	4.15	3.97	3.98	4.45	4.88	5.16	5.33	5.07	4.65
Pnt 10	17.5	65.5	5.34	5.39	5.38	5.22	5.05	4.75	4.82	5.15	5.64	5.93	6.16	5.77	5.38
Pnt 11	17.5	66.5	5.87	5.99	5.76	5.44	5.25	4.93	5.08	5.41	5.92	6.41	6.67	6.38	5.76
Pnt 12	17.5	67.5	6.31	6.42	6.06	5.8	5.56	5.24	5.41	5.82	6.47	6.93	7.16	6.89	6.17
Pnt 13	18.5	64.5	5.92	5.92	5.65	5.47	5.2	4.94	5.09	5.6	6.21	6.45	6.64	6.33	5.79
Pnt 14	18.5	65.5	5.87	6.04	5.73	5.64	5.41	5.03	5.3	5.73	6.3	6.6	6.8	6.39	5.90
Pnt 15	18.5	66.5	6.52	6.59	6.19	5.75	5.38	4.95	5.16	5.6	6.35	6.96	7.31	7.04	6.15
Pnt 16	18.5	67.5	6.49	6.61	6.09	5.77	5.44	5.09	5.27	5.77	6.57	7.13	7.45	7.11	6.23

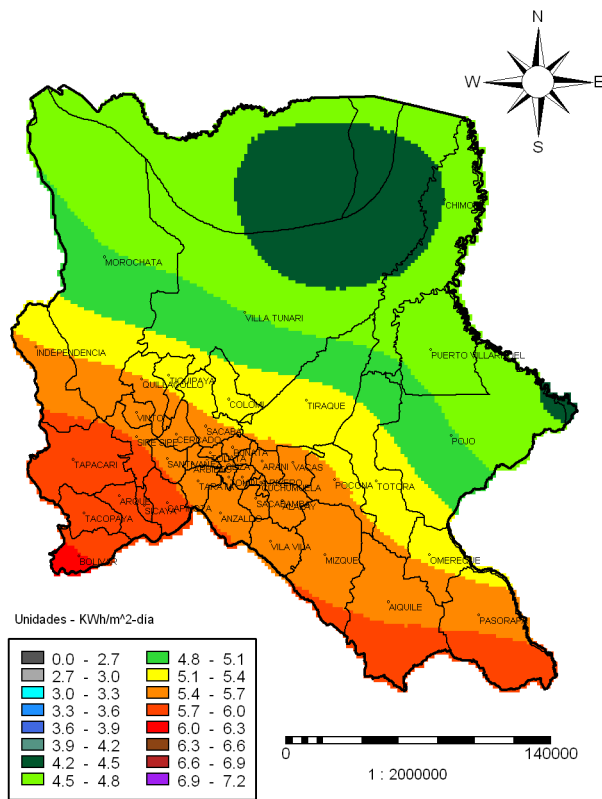


FIG. 6.— Distribución anual de la radiación solar global en el Departamento de Cochabamba (color online).

4. RESULTADOS

Con respecto al método de interpolación empleado para obtener los valores estimados de los niveles de radiación en el Departamento de Cochabamba se usó una metodología implementada en un estudio preliminar sobre los métodos de interpolación más eficaces para determinar los niveles de radiación solar (Mubiru et al. 2007; Lucano & Fuentes 2008) y se concluyó que el método: superficie móvil distancia inversa con exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico es el método más adecuado para interpolar

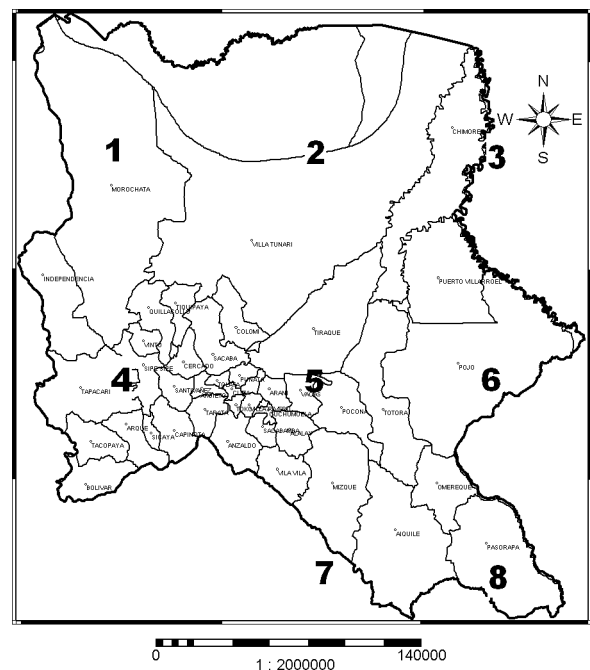


FIG. 7.— Área de estudio dividida en ocho subáreas.

datos satelitales. Una vez establecido el método más apropiado éste se utilizó para interpolar los valores de radiación solar global promedio mensuales para cada uno de los meses del año y el promedio anual.

La Fig. 5 muestra la distribución de radiación solar global en Cochabamba para los doce meses del año.

Se observa de la Fig. 5 que los niveles de radiación más bajos corresponden a los meses de mayo, junio y julio, que pertenecen a la estación de invierno, y los niveles de radiación más altos corresponden a los meses de octubre, noviembre y diciembre, que corresponden a las estaciones de primavera y verano.

La Fig. 6 muestra la distribución de radiación solar global anual para el Departamento de Cochabamba.

Se observa de la Fig. 6 que la parte noreste del Departamento

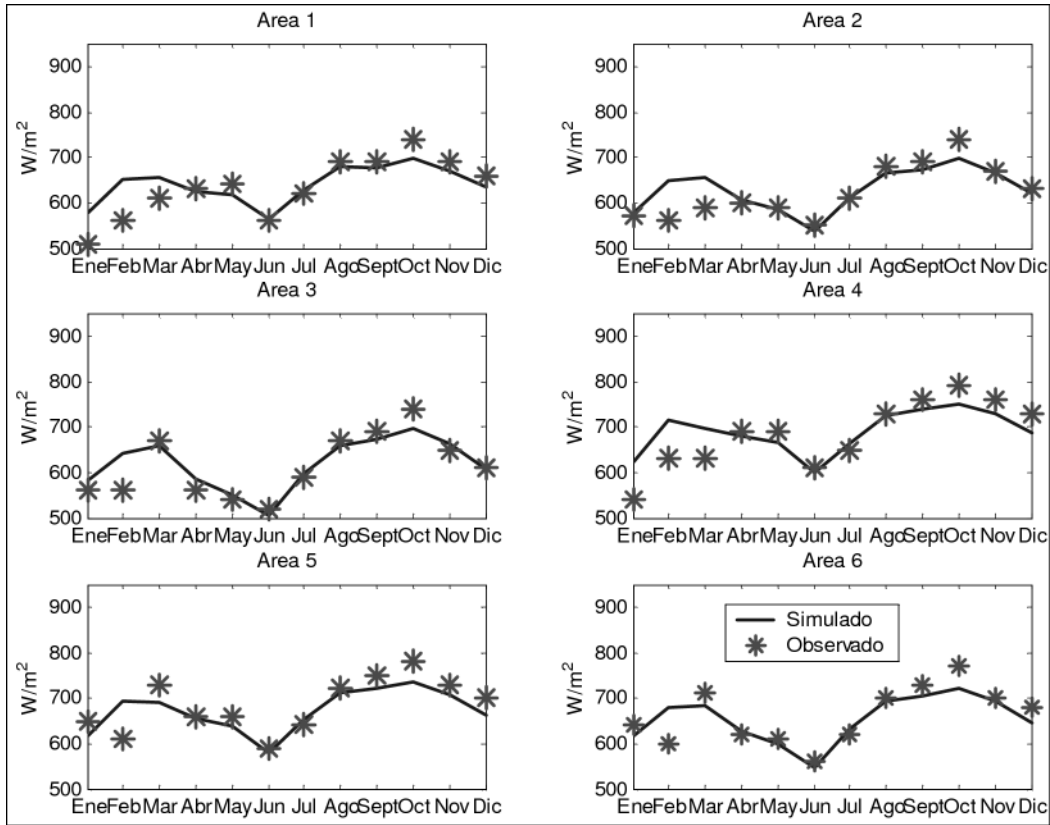


FIG. 8.— Comparación de los valores simulados (metodología SSE) y medidos experimentalmente de intensidad de radiación solar global para el Departamento de Cochabamba.

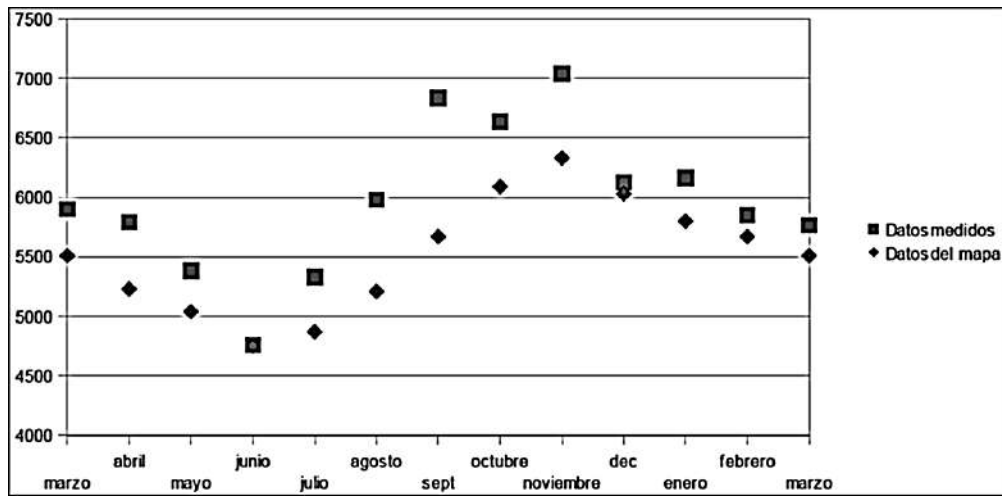


FIG. 9.— Comparación de datos de radiación solar interpolados (mapa) y medidos en superficie para la estación de monitoreo en la UMSS.

mento de Cochabamba presenta los valores más bajos de media anual de radiación global, entre  $4,2$  y  $4,5 kWh/m^2$  al día, debido a que ésta región es una zona de baja altitud sobre el nivel del mar y se caracteriza por su clima tropical y alta humedad generando una mayor dispersión de la radiación solar. En la zona suroeste la radiación solar aumenta ya que en esta región se localiza la Cordillera Oriental Central con un clima seco con valores entre  $5,7$  y  $6,3 kWh/m^2$  al día. Asimismo, se distinguen seis regiones de niveles de radiación que van aumentando de noreste a suroeste, tendencia igualmente ob-

servada en el estudio realizado por Birhuett (1993) para la obtención de los mapas de radiación solar para Bolivia.

4.1. Validación de los valores de radiación interpolados

Para la validación de los datos interpolados se realizó un estudio comparativo y de validación entre los valores de radiación medidos experimentalmente y aquellos estimados por la NASA para el Departamento de Cochabamba (para el área entre  $64^\circ - 67^\circ$  de longitud y  $16^\circ - 19^\circ$  de latitud) empleando un programa elaborado en MATLAB. La Fig. 7

TABLA 2  
COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE RADIACIÓN GLOBAL INTERPOLADOS (MAPA) Y MEDIDOS EN SUPERFICIE  
PARA EL MISMO PUNTO DE VALIDACIÓN ( $Wh/m^2$  al día).

MES	Estación UMSS Experimental	Estación UMSS Mapa Satelital	Aiquile SENAMHI	Aiquile Mapa Satelital	Independencia SENAMHI	Independencia Mapa Satelital
Enero	6163	5580	—	5600	—	5800
Febrero	5854	5670	—	5700	—	5920
Marzo	5764	5510	6257	5500	5820	5680
Abril	5792	5230	5650	5340	4146	5370
Mayo	5382	5040	5293	5120	4290	5210
Junio	4759	4750	4880	4800	4345	4900
Julio	5331	4870	5201	4960	4462	5020
Agosto	5981	5210	—	5380	—	5360
Septiembre	6834	5670	—	5910	—	5870
Octubre	6636	6090	—	6200	—	6320
Noviembre	7040	6330	—	6410	—	6570
Diciembre	6127	6030	—	6040	—	6310
Error Medio Anual (%)	—	7.64	—	5.42	—	15.73

muestra la división del área de estudio (Departamento de Cochabamba) en ocho subáreas en las que se compararon los datos.

Los datos experimentales fueron proporcionados por la red SENAMHI y la Fig. 8 muestra la comparación de estos con los datos simulados a través de las imágenes satelitales para un periodo de un año.

Se observa que la variación temporal de los valores de radiación tanto simulados como experimentales siguen el mismo comportamiento, hecho que fue observado en la estación de Suiza (Fig. 3) en un trabajo similar (Darnell et al. —), excepto en los meses de enero a marzo, esto debido a que la cantidad de nubes presentes en esos meses afecta el análisis de las imágenes adquiridas.

Además de la validación en las ocho sub-áreas, los valores de radiación solar global de los mapas obtenidos por el método de interpolación se contrastaron con datos medidos en superficie en un periodo de un año en dos estaciones remotas de la red SENAMHI: Aiquile (Latitud: 18.1833S, longitud: 65.1833W) e Independencia (Latitud: 17.3117S, longitud: 66.8481W); asimismo, se compararon los valores simulados con los obtenidos con un Piranómetro Kipp & Zonen Clase 2 instalado en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias y Tecnología (latitud: 17.3928S, longitud: 66.1351W) en el mismo periodo de un año (marzo 2008 – marzo 2009). La comparación entre los datos interpolados y experimentales para el mismo punto de validación y el correspondiente error se muestran en la Tabla 2.

La Fig. 9 muestra la variación anual de los datos de radiación mensual correspondientes al punto de monitoreo de la UMSS.

Se observa que los valores medidos en superficie son mayores que aquellos obtenidos en el mapa solar en el caso de las estaciones de la UMSS y Aiquile en cuanto que lo contrario sucede en el caso de la estación de Independencia. El error medio anual porcentual de todas las estaciones de monitoreo es de 10%.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se han utilizado los datos de radiación solar de la NASA obtenidos utilizando la metodología SSE (NASA-LARC —) para estimar los valores de radiación solar global mensual y anual para el Departamento de Cochabamba. Se utilizaron los datos obtenidos a partir del análisis de imágenes satelitales para estimar la distribución de la radiación solar global, asimismo se realizó un proceso de validación con datos medidos de tres estaciones en superficie (UMSS, Aiquile e Independencia) obteniéndose un error medio porcentual de 10%.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa en la Fig. 6 siete regiones con marcada diferencia de niveles de radiación solar anual: la región con mayor cantidad de radiación corresponde a la zona de la Cordillera Oriental en la que los valores de radiación oscilan entre  $5,4 - 7,2 kWh/m^2$  al día, la zona del trópico central con valores entre  $4,2 - 4,5 kWh/m^2$  al día y la zona restante del trópico con niveles de radiación entre  $4,5 - 5,4 kWh/m^2$  al día.

El periodo de registros analizados es de 22 años (Tabla 1). La variación mensual y espacial de los niveles de radiación se obtuvo utilizando el paquete de análisis geoestadístico ILWIS y aplicando el método de superficie móvil con distancia inversa, exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico. La aplicación del método de interpolación y los valores estimados muestran que en la estación de invierno (mayo – julio) se registra la menor cantidad de radiación solar, mientras que en las estaciones de primavera y verano (octubre – diciembre) se registra la mayor cantidad de radiación solar.

Por otro lado, las diferencias que eventualmente pueden ser encontradas entre los valores estimados y medidos en superficie pueden ser debidas al hecho de que los valores medidos en superficie corresponden a la localización del punto de monitoreo con características geográficas y climatológicas particulares, en cuanto que los datos obtenidos por los satélites abarcan extensiones entre  $1^\circ \times 1^\circ$ , que represen-

tan una media de condiciones climáticas diferentes.

El método de cálculo de la radiación solar global a partir de imágenes satelitales desarrollado ha obtenido resultados comparables a otros revisados en la bibliografía (Myers 2003; Lefevre & Diabaté 2007). Es recomendable que en lo sucesivo los valores estimados por métodos indirectos se comparen con datos registrados en un mayor número de estaciones meteorológicas para asegurar una cobertura geográfica suficiente del departamento.

Asimismo, es importante incorporar las bases de datos de radiación ya sea medidas en superficie u obtenidas a través de métodos indirectos a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que ofrezcan a aquellos que requieren de estos datos

las herramientas diversas relacionadas con el recurso solar. Esto para la evaluación de los niveles de radiación solar para cualquier localización geográfica del país, a partir de modelos bien calibrados respecto a estos datos.

También se deben incluir herramientas que permitan estimar el rendimiento de diferentes dispositivos y/o sistemas que utilizan el recurso solar. Este tipo de herramientas ya se han desarrollado en otros países (<http://xn-energiasolarespaa-uxb.net>) y constituyen un factor decisivo para el impulso a las energías renovables. En particular, estas herramientas permiten la evaluación con un grado mucho mayor de certidumbre de la viabilidad económica de proyectos de energía solar, facilitando el proceso de su financiación.

#### REFERENCIAS

- Beyer, H. G., Costanzo, C., & Heinemann, D. 1996, *Solar Energy*, 56, 207
- Birhuett, E. 1993, *Revista E&D No. 3 PROPER Cochabamba*, Bolivia
- Darnell, W. L. et al. —, *Surface Radiation Budget: A Long-term Global Dataset of Shortwave and Longwave Fluxes*  
[http://www.agu.org/eos\\_elec/95206e.html](http://www.agu.org/eos_elec/95206e.html)
- Gautier, C., Diak, G., & Masse, S. 1980, *Journal of Applied Meteorology*, 19 No. 8, 1005
- Hoyos, D., Cadena, C., & Suárez, H. 2000, *Revista Averma*, 4 No. 8,  
<http://g.unsa.edu.ar/asades/actas2000/08-23.html>  
<http://www.ascr.cestm.albany.edu/perez/strength.html>
- Lefevre, M. & Diabaté, W. L. 2007, *Solar Energy*, 81, 240
- Lucano, M. J. & Fuentes, I. E. 2008, *Revista Científica Facultad de Ciencias y Tecnología*, 8
- Mosser, W. & Raschke, E. 1984, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 166
- Mubiru, J. et al. 2007, *Theor. Appl. Climatol.*, 88, 259
- Myers, D. R. 2003, *Solar Radiation Modeling and Measurements for Renewable Energy Applications: Data and Model Quality* (International Expert Conference on Mathematical Modeling of Solar Radiation and Daylight Edinburgh, Scotland, September 15–16 )
- NASA-LARC. —, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>
- Pérez, R., Incichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., & Vignola, F. 2002a, *Solar Energy*, 73, No. 5, 307
- Pérez, R., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., Incichen, P., George, R., & Vignola, F. 2002b, *Proc. SOLAR 2002, Sunrise on the Reliable Energy Economy*, Amer. Solar Energy Soc.
- Pinker, R. T. & Laszlo, I. 1992, *J. Appl. Meteorol.*, 31, 194
- Pinker, R. T., Laszlo, I., Whitlock, C. H., & Charlock, T. P. 1995, *Eos*, 76, 145
- PROPER-Bolivia et al. 1998, *Mapa de distribución de la Energía Solar en Bolivia*, Vice-Ministerio de Energía e Hidrocarburos. Programa para la Difusión de Energías Renovables PROPER Bolivia – GTZ – ESMAP – Banco Mundial
- Rigollier, C., Lefèvre, M., Cros, S., & Wald, L. 2002, *Heliosat 2: An improved method for the mapping of the solar radiation from METEOSAT imagery* (Proceedings of the 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. <http://www.eumetsat.de/en/index.html>)
- Whitlock, C. H., Brown, D. E., Chandler, W. S., DiPasquale, R. C., Gupta, S. K., Wilber, A. C., Ritchey, N. A., Kratz, D. P., & Stackhouse, P. W. 2001, *J. of Solar Energy Engineering, Amer. Soc. Mech. Engr.*, 23, 211
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., & Renné, D. 1999, *Theoretical and Applied Climatology*, 62, 199

OBSERVACIÓN DE NEUTRONES SOLARES Y EFECTOS SOBRE EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE  
ASOCIADOS CON LA FULGURACIÓN SOLAR DEL 2 DE NOVIEMBRE DE 2003  
OBSERVATION OF SOLAR NEUTRONS AND THE EFFECTS ON THE EARTH'S MAGNETIC FIELD ASSOCIATED  
WITH THE SOLAR FLARE OF THE 2nd NOVEMBER 2003

CHAMANI W.<sup>1</sup>, TICONA R.<sup>2</sup> Y RICALDI E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Física

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
La Paz – Bolivia

RESUMEN

El 2 de noviembre de 2003 a las 17:03:00 (GMT) se produjo una fulguración solar que fue verificada por el satélite GOES y se registró por el Monitor de Neutrones (NM-64) a las 17:17:24 (GMT) del laboratorio de Física Cósmica en el monte Chacaltaya. En particular, se observó que la fulguración produjo la variación del campo geomagnético local (F); se produjeron variaciones de la intensidad de la componente horizontal (H), de la declinación (D) y de la componente vertical (Z). Se observaron los registros de los incrementos con respecto a los valores promedio (registrados diariamente) de dichas componentes estimados en  $71 nT$ , 10 grados y  $19 nT$  respectivamente en el Observatorio Geomagnético de Patacamaya, así como el incremento del campo neto F estimado en  $66 nT$  registrado por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios. Las duraciones de la señal de neutrones y de la señal magnética fueron aproximadamente de 40 y 54 minutos respectivamente, lo que muestra que la fulguración fue intensa y la emisión de neutrones fue de larga duración.

*Descriptors:* fulguración solar — neutrones solares — crochets magnéticos

Código(s) PACS: 96.60.Rd, 96.60.Vg

ABSTRACT

On the 2nd November 2003 at 17:03:00 (GMT) there was a solar flare recorded by the GOES satellite. The event was also registered at 17:17:24 (GMT) by the Neutron Monitor (NM-64) of the Cosmic Physics Laboratory located at Mount Chacaltaya in Bolivia. The flare produced changes in the intensity of the local geomagnetic field (F) affecting all three vector components —horizontal component (H), declination (D) and the vertical component (Z). Records of the increase in relation to average values of the aforementioned components were observed at  $71 nT$ , 10 degrees and  $19 nT$  at the Geomagnetic Observatory at Patacamaya (Bolivian Altiplano) and the net increase of the F field estimated at  $66 nT$  registered by the Geomagnetic Observatory at Villa Remedios. The duration of the neutron and magnetic signals were between 40 and 54 minutes approximately. This demonstrates that the flare was intense and that the emission of neutrons took place over a long period of time.

*Subject headings:* solar flares — solar neutrons — magnetic crochet

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y la observación de las fulguraciones solares y los efectos que produce sobre el campo geomagnético han merecido la atención de muchos científicos sobre todo a partir de las observaciones de Carrington y Hodgson en 1859, cuando encontraron una interrelación entre un crochet magnético y una fulguración solar. Las fulguraciones son los eventos más violentos y energéticos en el sistema solar, los cuales están físicamente relacionados con las manchas solares; pueden acelerar iones a altas energías. Estos eventos se producen cuando la energía magnética acumulada en la atmósfera solar, cercana a una mancha, es repentinamente li-

berada. Seguidamente, generan ondas electromagnéticas a lo ancho de todo el espectro, desde ondas de radio hasta frecuencias de rayos gamma, que son producidas por emisión sincrónica en el campo magnético solar de la corona. Mientras los rayos X (RX) son generados en la atmósfera solar mediante el fenómeno del Bremsstrahlung, los neutrones son producidos por la interacción de iones acelerados con la atmósfera solar. Este tipo de eventos pueden ser observados por distintos métodos como: 1) la observación de la emisión con espectro-Heliógrafos, 2) la observación del flujo de rayos X con satélites y también pueden ser reconocidos y observados indirectamente sobre los efectos que producen en el campo geomagnético, ya que ocasionan variacio-

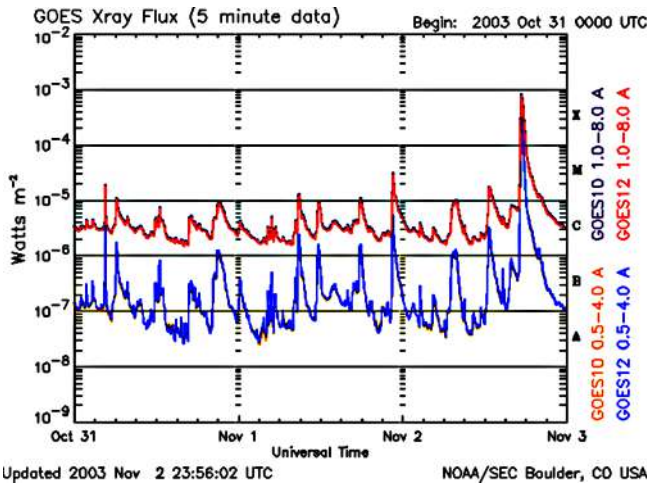


FIG. 1.— Incremento del flujo de rayos X detectado por el satélite GOES entre el 1 y el 3 de Noviembre. El tiempo de inicio de la fulguración X8.3 fué a las 17:03 UT. La línea roja expresa el flujo de rayos X en el rango de longitud de onda de 1.0 – 8.0Å y la azul para el rango de 0.5 – 4Å (color online).

nes y perturbaciones en sus tres componentes: la horizontal (H), la vertical (Z) y la de declinación (D), debido a que un frente de partículas cargadas provenientes de la fulguración chocan con la magnetósfera de la Tierra, produciendo su deformación y compresión, seguidas de tormentas magnéticas en la atmósfera terrestre con un retraso de hasta algunos días. Otro de los efectos que producen son los crochets magnéticos que son variaciones magnéticas rápidas debidas a una desviación del sistema de corriente ionosférica, donde la variación geomagnética en el hemisferio iluminado por el sol se intensifica por un corto tiempo; el efecto es más grande cerca del punto subsolar (zenit). Por otro lado, los neutrones solares producidos son inmunes a los campos magnéticos, lo que hace posible que puedan alcanzar la superficie de la Tierra y por lo tanto nos permitan estudiar los mecanismos por los cuales han sido acelerados. Debido al interés por estudiar y observar este tipo de fenómenos que produce el sol, en este trabajo presentamos resultados preliminares del evento de una fulguración solar producida el 2 de noviembre de 2003 y reportamos los efectos que ha tenido sobre el campo magnético de la Tierra. Se observa una correlación del evento entre los datos del experimento del Monitor de Neutrones 12NM-64 de Chacaltaya y dos observatorios geomagnéticos, ubicados en Patacamaya y en Villa Remedios, de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).

## 2. LA PROPAGACIÓN DE LOS NEUTRONES SOLARES

Los neutrones producidos en una fulguración solar no son afectados por el campo magnético del sol ni por el campo magnético terrestre; pero dependiendo de su energía logran alcanzar la superficie de la Tierra antes de que decaigan durante su viaje. Por ello la probabilidad de sobrevivencia,  $P(E)$ , de un neutrón es:

$$P(E) = \exp\left(\frac{-t}{\gamma\tau}\right). \quad (1)$$

Donde  $t$  es su tiempo de vuelo entre el Sol y la Tierra,  $\gamma$  es el factor de Lorentz y  $\tau = 886s$ , el tiempo de vida del neutrón.

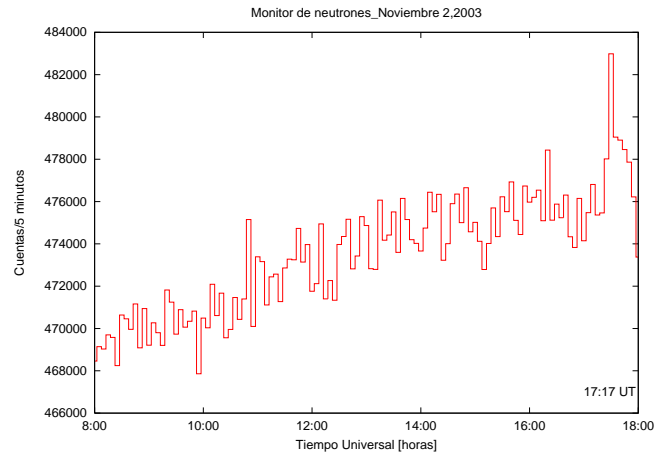


FIG. 2.— El conteaje registrado cada 5 minutos por el Monitor de Neutrones (12-NM64) localizado en el monte Chacaltaya, Bolivia el 2 de Noviembre de 2003. Los datos después de las 18:00 UT no fueron registrados debido a un corte de electricidad. El tiempo (inicio de la fulguración) registrado fue a horas 17:17:24 UT el cual correlaciona con el tiempo registrado por el satélite GOES. Se observa que la emisión neutrónica solar intensa máxima fue a horas 17:30:01 UT.

## 3. MÉTODO DEL TIEMPO DE VUELO

Los neutrones solares no pueden viajar a la velocidad de la luz debido a que tienen masa. El tiempo de su llegada a la Tierra es más largo para neutrones de bajas energías y si existe un amplio rango de energía de los neutrones producidos al mismo tiempo en el Sol, entonces existe también un amplio rango de tiempos de llegada. El tiempo de retraso  $\Delta t$ , está dado por:

$$\Delta t = \frac{R}{c\beta} - \frac{R}{c} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (3)$$

Donde  $R$  es la distancia entre el Sol y la Tierra ( $1UA = 1.496 \times 10^{11}m$ ),  $c$  es la velocidad de la luz y  $v$  la velocidad del neutrón. Combinando la ecuación (2) con la (3) se obtiene:

$$\beta = \frac{1}{c\Delta t/R + 1} \quad (4)$$

Entonces la energía cinética del neutrón  $T_n$  es:

$$T_n = (\gamma - 1)M_n, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (5)$$

Donde  $M_n$  es la energía de la masa en reposo del neutrón ( $940MeV$ ).

## 4. ARREGLO EXPERIMENTAL

### 4.1. Monitor de Neutrones NM-64

El monitor de neutrones es un instrumento para monitorear la intensidad de los rayos cósmicos galácticos y solares. Consiste principalmente de tres partes: el reflector, el productor y el contador. El monitor MN-64 usa polietileno como reflector. El rol del reflector es el de rechazar los neutrones de bajas energías producidos en la atmósfera y en las sustancias cercanas al monitor de neutrones. El plomo que rodea al reflector es usado como productor. Un contador de  $BF_3$

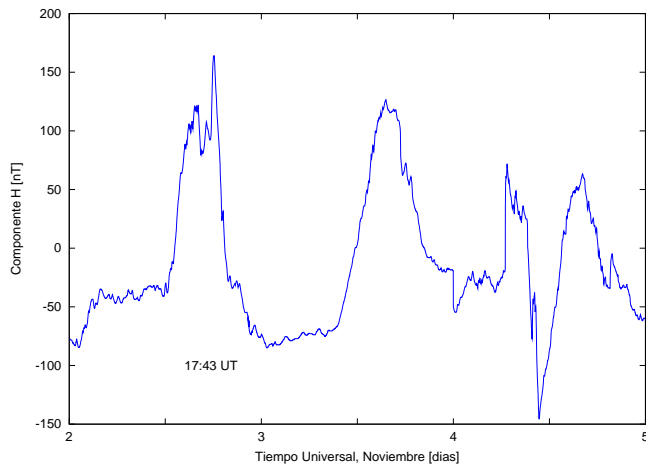


FIG. 3.— Incremento de la componente horizontal H del campo magnético de la Tierra, el tiempo de inicio fue a horas 17:43 UT. La intensidad de campo magnético del crochet fue aproximadamente  $71 nT$ . La tormenta magnética se identifica como un cambio abrupto de la componente H al tercer día después de la fulguración.

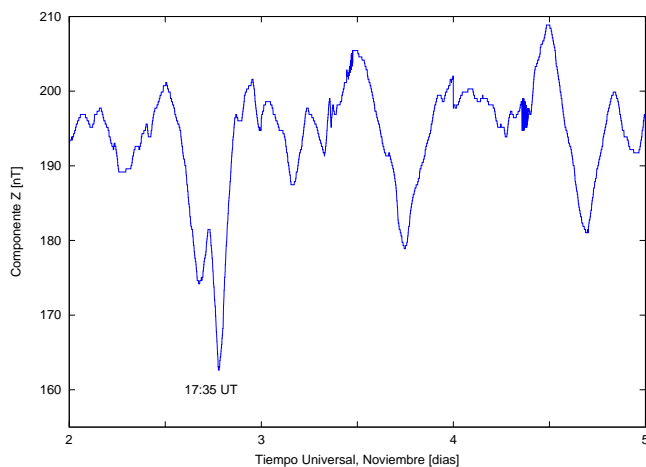


FIG. 4.— Decremento de la componente vertical Z del campo magnético de la Tierra que se inicia a horas 17:35 UT. La intensidad de dicha componente fue de  $19 nT$ .

está localizado dentro del productor. El moderador interno es usado para desacelerar neutrones hasta energías térmicas, el cual está localizado entre el contador y el productor.

#### 4.2. Observatorio Geomagnético de Patacamaya

En este laboratorio se cuenta con un arreglo óptico-mecánico (Variógrafos La Cour), un teodolito magnético y un magnetómetro de protones. El variógrafo toma los datos de las variaciones diarias de los elementos H, D, Z del campo magnético terrestre, siendo la más sensible la componente H en latitudes muy cercanas al ecuador y menos sensible la componente Z.

#### 4.3. Observatorio Geomagnético de Villa Remedios

Este laboratorio cuenta con un arreglo de bobinas que trabajan a modo *Flux Gate*, modelo FGE, de tres componentes X, Y, Z y F, proveniente de un magnetómetro fijo Overhauser. Los datos son registrados por un *Data Logger*. Los registros de este observatorio son rígidamente y están sujetos a un mínimo

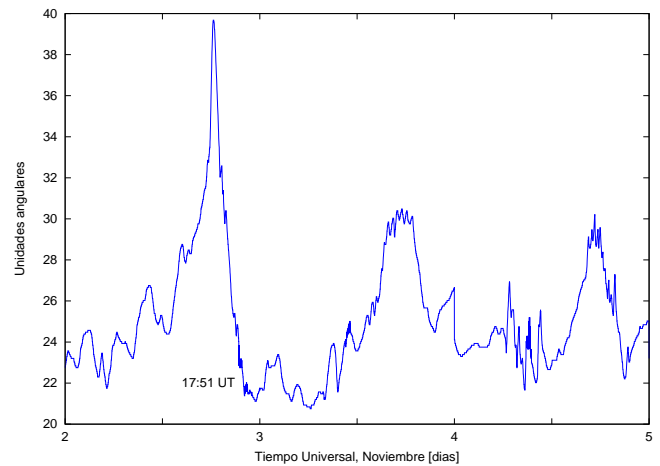


FIG. 5.— Incremento de la componente de declinación D del campo magnético de la Tierra registrada a horas 17:51. La intensidad de dicha componente fue de 10 grados.

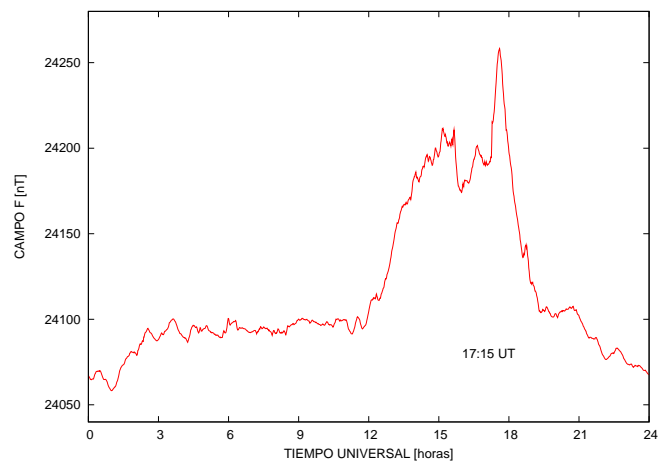


FIG. 6.— Variación del campo magnético neto F que se inicia a horas 17:16 UT. La intensidad del campo neto F fue de aproximadamente  $66 nT$ .

de fuentes de error, siendo la variación de la temperatura del recinto del registro la más significativa.

### 5. REGISTROS Y OBSERVACIONES

Una fulguración solar intensa ocurrió el 2 de noviembre de 2003. La emisión del flujo de rayos X blandos observados por el satélite GOES (Fig. 1), comenzó a incrementarse a las 17:03 UT, alcanzó su máximo a las 17:25 UT y decayó a la mitad de su valor máximo a las 17:39 UT. El pico del flujo de RX fue clasificado como X8.3. La mancha solar corresponde a la región 10486, ubicada en las coordenadas  $S14^\circ, W56^\circ$ . En la misma región se produjo el evento solar de neutrones el 28 de Octubre de 2003. La Fig. 2 muestra el conteo registrado cada 5 minutos por el Monitor de Neutrones NM-64. La emisión neutrónica comenzó a incrementarse a las 17:17:24 UT, la señal intensa alcanzó su máximo a las 17:30:01 UT, el que correlaciona con el tiempo registrado por el GOES. La duración del evento fue de aproximadamente de 40 minutos. Las Figs. 4, 5 y 6 muestran el efecto que produce la fulguración solar sobre el campo magnético de la Tierra. Se producen variaciones respecto de los valores,

registrados diariamente, de las componentes horizontal (H), vertical (Z) y de declinación (D) del campo geomagnético por el Observatorio Geomagnético de Patacamaya. La Fig. 7 muestra la variación del campo geomagnético neto (F) registrado por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios. La Fig. 4 muestra una anomalía notable (crochet) en la componente H del campo, que alcanzó su máximo a las 18:04 UT con una intensidad de  $71 nT$ . A partir de los datos que se leen de este registro, la duración de la señal magnética fue de 54 minutos, por otro lado, la nube de plasma solar llegó aproximadamente un día y medio después de la fulguración. La tormenta magnética se identifica como un cambio abrupto de la componente H al tercer día después de la fulguración, en este mismo lapso de tiempo ocurre la fase de compresión y deformación de la magnetósfera terrestre. La Fig. 5 muestra el decremento de la intensidad de la componente vertical Z del campo estimada en  $19 nT$  que se inició a horas 17:35 UT. Por el contrario, en este caso se observa un incremento de la componente de declinación D del campo estimado en 10 grados, que es el ángulo formado entre el polo norte geográfico y la componente H del campo.

#### 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la fulguración solar fue intensa, de larga duración y de emisión de neutrones parecida al evento registrado el 7 de septiembre de 2005 (Ricaldi 2007). Además se ha visto que el efecto que ha producido ha sido el cambio drástico de la in-

tensidad del campo geomagnético ocasionando los llamados crochets magnéticos o anomalías magnéticas que producen la variación diaria solar (Sq), el cual se manifestó significativamente en el incremento de la componente H, lo cual es de esperarse para latitudes bajas como la de Chacaltaya, cercanas al ecuador magnético. En el instante que ocurrió la fulguración solar, el Sol estaba situado casi en el cenit sobre el observatorio de Chacaltaya ( $292.0^{\circ}E$ ,  $16.2^{\circ}S$ ,  $5250 m.s.n.m.$ ), por lo tanto se encontró en una muy buena posición para la observación de los neutrones solares. El rango de energías de los neutrones solares obtenido mediante el método del tiempo de vuelo estuvo entre 50 y  $194 MeV$ , con velocidades relativistas entre  $0.31 c$  y  $0.56 c$ . Por otro lado, se han estimado los incrementos y decrementos del campo neto F, las componentes D y Z del mismo en  $66 nT$ , 10 grados y  $19 nT$ , respectivamente. Se ha visto que la tormenta geomagnética se produce al tercer día después de la fulguración, la cual desprendió una nube de plasma que tardó 1d 12h y 46 minutos en llegar a la Tierra, lo hizo a una velocidad de casi  $1133 km/s$  y tuvo una extensión de  $13.7 \times 10^6 km$ . Este evento produjo la disminución en la intensidad del campo magnético neto F de la Tierra por un intervalo de tiempo de 3 horas 21 minutos en el observatorio geomagnético de Villa Remedios. Por último, los resultados presentados son preliminares ya que falta observar el registro del evento por el Detector de Neutrones Solares y así poder confirmar o rechazar alguna correlación con los datos del Monitor de Neutrones.

#### REFERENCIAS

- Space Environment Center–N.O.A.A. 2010, <http://www.sec.noaa.gov/today.html.xray>
- Rastogi, R. G. et al. 1999, *Phys Earth Planets Space*, 51, 947
- Ricaldi, E. 2007, Observación simultánea de neutrones solares en asociación con una fulguración solar del 7 de septiembre de 2005 (IIF–UMSA)
- Ticona, R. 2004, El Monitor de Neutrones (IIF–UMSA)
- Watanabe, K. 2005, Solar Neutron Events Associated with Solar Flares (PhD Thesis)
- Zirin, H. 1965, Solar Flares: Observations, Chapter 6 of Stellar and Solar Magnetic Fields (IAU Symposium No 22)

DISEÑO DE UN OSCILOSCOPIO MULTICANAL CON FPGA (PROYECTO LAGO)  
THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FPGA MULTI CHANNEL OSCILOSCOPE (LAGO PROJECT)

PEDRO MIRANDA LOZA<sup>1</sup> & FABRICIO G. ÁVILA ELÍAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Físicas–UMSA

<sup>2</sup> Carrera de Electrónica, Facultad de Ingeniería–UMSA

RESUMEN

Se diseñaron dos instrumentos basados en FPGA (*Field Programmable Gate Array*) para el proyecto LAGO (*Large Aperture GRB Observatory*) que facilitan la observación de señales eléctricas producidas por variaciones de rayos gamma de alta energía. Estos instrumentos son: osciloscopio de almacenamiento digital básico de alta velocidad con el que se puede observar las variaciones de las señales eléctricas en el tiempo, analizador multicanal que aporta datos cuantitativos acerca de la frecuencia con que las señales eléctricas alcanzan determinados niveles de voltaje. Ambos instrumentos se implementaron en *hardware* digital (re)programable de alta velocidad, utilizando Lenguaje de Descripción de Hardware (HDL). El despliegue y almacenamiento de los datos se realiza por un ordenador que facilita el acceso a funciones de control de los instrumentos. Para esto se desarrolló un *software* propio en visual C++. Se ha verificado el funcionamiento del diseño final conectado a un detector real en el Laboratorio de Física Cósmica en el monte Chacaltaya.

*Descriptores:* sistemas computacionales — instrumentos para rayos gamma

Código(s) PACS: 07.05.Bx, 07.85. –m

ABSTRACT

Two instruments based on FPGA (*Field Programmable Gate Array*) were designed and constructed for the LAGO (*Large Aperture GRB Observatory*) project. The instruments allow the observation of electric signals produced by variations in high energy gamma rays. The instruments developed were: a high velocity basic digital storage oscilloscope which enables the observation of variations in electrical signals over time, a multi channel analyzer that supports quantitative data and picks up on the frequency at which electrical signals reach certain voltages. Both instruments operate with *Language Description Hardware*, a high velocity digital and reprogrammable hardware. The collection and storage of data is performed using a computer that facilitates access to the instruments' control functions. For this purpose original software was developed in C++. The design and function of the instruments were tested by connecting them to a real detector at the Cosmic Physics Laboratory at Chacaltaya, Bolivia.

*Subject headings:* computer systems — gamma ray instruments

1. INTRODUCCIÓN

En los experimentos de física de partículas, las herramientas de adquisición y tratamiento de datos están en constante evolución. Son varios los factores que favorecen esto, desde el aumento de la frecuencia de trabajo de los conversores análogo–digitales hasta la disponibilidad de realizar prototipos basados en FPGA (*Field Programmable Gate Array*), haciendo posible realizar un circuito integrado a medida, sin los riesgos económicos asociados a las otras opciones tecnológicas. Aunque existen módulos especializados, disponibles comercialmente, éstos son de un costo mucho mayor al desarrollo de sistemas específicos.

El diseño de instrumentos de nueva generación con FPGA, está destinado a su utilización en el proyecto LAGO (*Large*

*Aperture GRB Observatory*)<sup>1</sup>, el cual está implementado para la observación de las variaciones de rayos gamma, *Gamma Ray Burst (GRB)*, de alta energía. (Laboratorio de Física Cósmica–Chacaltaya)<sup>2</sup>.

Las señales analógicas producidas por los detectores de rayos cósmicos de alta energía, tienen características especiales tales como: la duración del pulso, el valor máximo de éste, el tiempo promedio entre pulsos; siendo posible estudiar éstas señales mediante un *Osciloscopio* de alta velocidad. También es de interés el número de pulsos que se han producido en un

<sup>1</sup> Proyecto LAGO,

<http://particulas.cnea.gov.ar/experiments/lago>.

<sup>2</sup> Proyecto LAGO–Bolivia,

<http://www.fiumsa.edu.bo/iif/lago/informes>.

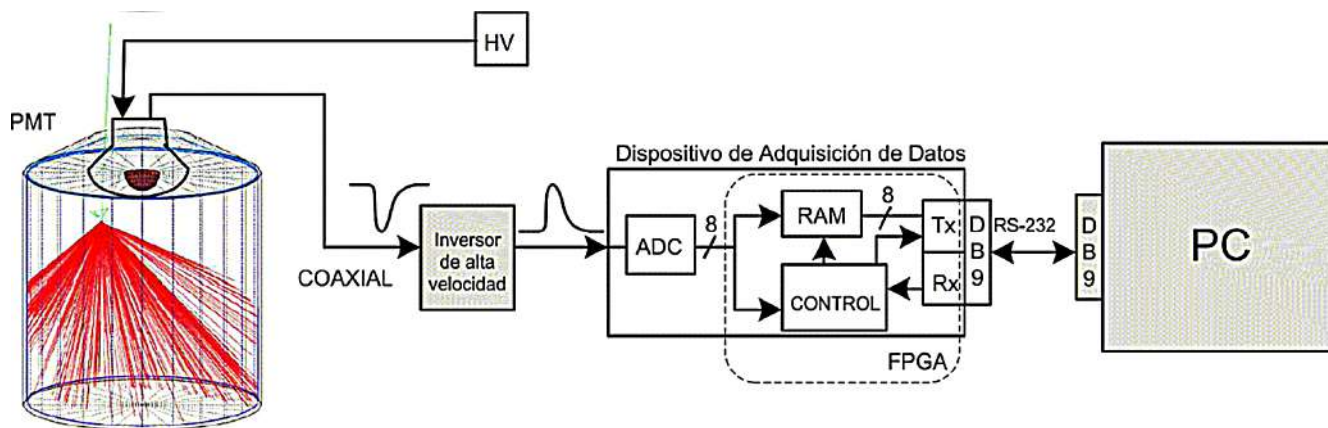


FIG. 1.— Diagrama general de conexiones.

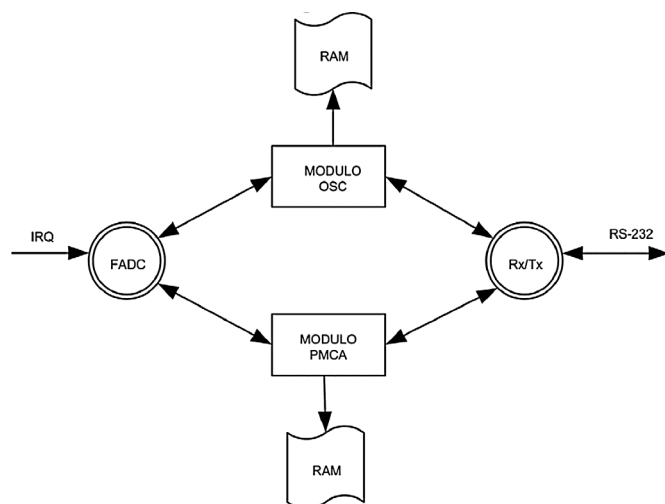


FIG. 2.— Diagrama funcional del diseño general.

intervalo de tiempo; esta tarea es realizada por un *Analizador Multicanal*, el cual tiene el propósito de contar dichos pulsos, además de clasificarlos por amplitudes.

Los detectores de Rayos Cósmicos (RC) del proyecto LAGO entregan una señal eléctrica de corta duración y amplitud proporcional a la energía de la partícula. Para este efecto el detector está formado por las siguientes partes: Detector Cherenkov con agua (*Water Cherenkov Detector-WCD*), fotomultiplicador (PMT) y alimentación de alto voltaje (HV).

Una de las principales características de la tecnología FPGA es la (re)programación del *hardware* digital por el usuario. Por lo que luego es posible diseñar nuevos instrumentos con una inversión mínima. Esto permite que un solo circuito digital en PCB (*Tarjeta de Circuito Impreso*) pueda desempeñar diferentes funciones según lo requiera la ocasión. Por ejemplo, en la implementación de los instrumentos descritos más arriba, podría programarse el hardware como sólo Osciloscopio, o como Osciloscopio y Analizador Multicanal.

La velocidad en la captación y el proceso de datos, hacen del FPGA un dispositivo ideal para el experimento realizado; en vez de realizar la codificación de algoritmos en un micro-

procesador, éstos se mapean directamente en hardware. Esta última característica permite ejecutar instrucciones en paralelo; logrando así que dos instrumentos, Osciloscopio y Analizador Multicanal, procesen datos al mismo tiempo.

El costo económico estimado en la implementación del prototipo, comparado con el costo de una solución comercial es cinco veces menor. Por ello el Instituto de Investigaciones Físicas de la U.M.S.A. creyó que este proyecto se justificaría por su menor costo y aporte a la investigación en física cósmica.

Se elaboraron las GUI's (*Graphic User Interface*) en el ordenador para la visualización de las señales detectadas por los instrumentos. Además de proveer las funciones gráficas, el ordenador provee la mayoría de las funciones de control.

## 2. HARDWARE

En la Fig. 1 se muestra el diagrama general de conexiones entre el Detector, el Inversor de Alta Velocidad, el Dispositivo de Adquisición de Datos y el PC. El Inversor de Alta Velocidad es utilizado para invertir el pulso negativo generado por el Detector, está construido con elementos discretos y tiene un ancho de banda de  $300\text{MHz}$  con una impedancia de entrada de  $1\text{M}\Omega$ .

La señal (negativa) proveniente del Detector (fotomultiplicador), es conducida a través de cable coaxial hasta el Inversor de Alta Velocidad, luego la señal (positiva) de salida del inversor es introducida al Dispositivo de Adquisición de Datos, éste digitaliza las señales analógicas y transmite los datos al PC, a través de una interfaz serial RS-232 con conectores DB9. Para la interfaz serial, es utilizado un cable de nueve hilos no cruzado (tipo módem).

El Dispositivo de Adquisición de Datos está conformado por una tarjeta de digitalización que contiene un conversor análogo-digital de 100 MSPS (*ADC08100-National Instruments*), y una tarjeta de desarrollo con el FPGA ACEX EP1K10TC100 (*Altera*).

Los bloques de la Fig. 1 a implementarse en el FPGA son: la memoria RAM donde se guardarán las muestras, la lógica de control y los módulos de recepción y transmisión de datos del puerto serial.

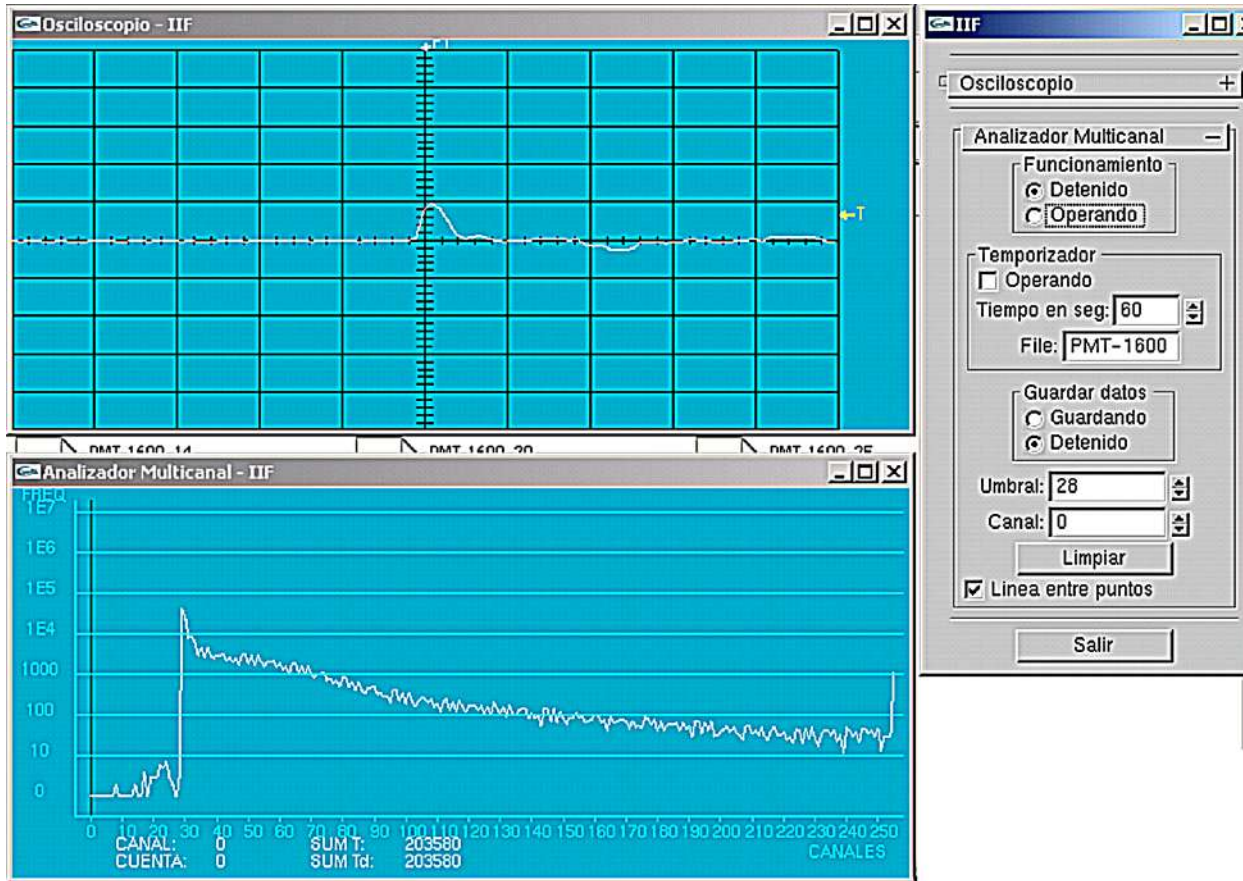


FIG. 3.— Ventanas de la interfaz gráfica.

### 3. SOFTWARE

#### 3.1. Diseño general

Tomando en cuenta la capacidad de los FPGAs de ejecutar instrucciones en paralelo, se han implementado el Osciloscopio de Almacenamiento Digital y el Analizador Multicanal en un mismo diseño escrito en lenguaje de descripción de *hardware* (HDL). Ya que los dos instrumentos ejecutan conjuntos de procesos por separado, y estos procesos acceden a recursos compartidos, se ha visto de gran utilidad describir el diseño mediante diagramas de acceso, éstos son diagramas de interconexión funcionales para diseños concurrentes. En la Fig. 2 se tiene la representación funcional del diseño general, donde los componentes activos o procesos son presentados como círculos y los componentes pasivos como rectángulos, las flechas representan derechos de acceso o conexiones.

Los módulos OSC y PMCA corresponden a los dos instrumentos, Osciloscopio y Analizador Multicanal de Pulsos, respectivamente. Ambos módulos agrupan procesos y realizan el control de bancos de memoria RAM propios. También se puede observar que los procesos representados por dos círculos concéntricos son procesos que responden requerimientos de interrupción (IRQ), que deben entenderse desde el punto de vista del dispositivo: éste se encuentra realizando un proceso y a partir de un evento se pone en marcha otro proceso.

Ambos módulos utilizan recursos comunes, el mismo canal de comunicación con el ordenador (puerto serial) para enviar datos y recibir comandos, y los datos entregados por el convertor analógico digital; éste se encuentra configurado en modo libre, entregando el resultado de una conversión cada  $10\text{ns}$ .

El proceso FADC realiza un seguimiento continuo de la señal digital de entrada, una vez que esta señal cumple ciertas condiciones, éste proceso avisa al módulo OSC que comience la grabación de los datos digitales en posiciones consecutivas de la memoria RAM. Una vez que se han grabado todas las posiciones de la memoria disponibles, el módulo OSC accede al proceso  $Rx/Tx$ , y envía el contenido total de la memoria RAM al ordenador a través de la interfaz serial.

De manera similar ocurre el funcionamiento del módulo PMCA, el proceso FADC identifica el máximo (digital) de un pulso, con este dato accede al módulo PMCA, éste a su vez actualiza la cuenta del respectivo canal (en la memoria del espectro) y devuelve el control al proceso FADC. Si el módulo PMCA recibe el comando *enviar* todos los datos de la memoria de espectro al ordenador, se detiene el proceso de actualización del PMCA, se accede al proceso  $Rx/Tx$  y se envía el contenido total de la memoria de espectro al ordenador a través de la interfaz serial.

Las opciones implementadas para el instrumento Osciloscopio son las siguientes: velocidad de muestreo, nivel de dis-

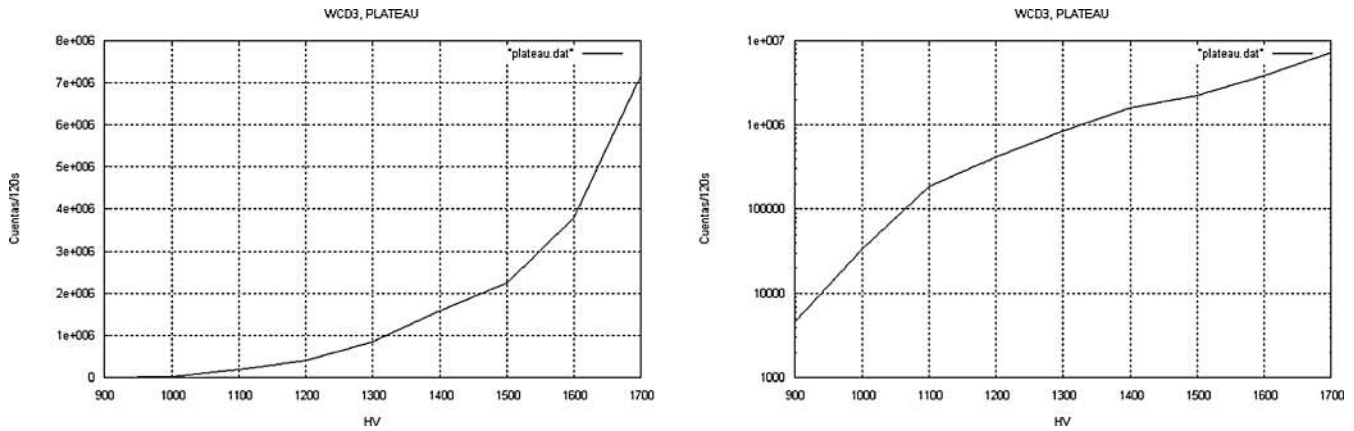


FIG. 4.— Curva de *plateau* para PMT 9353KB.

paro, pendiente de disparo, predisparo y autodisparo. Las opciones implementadas para el instrumento Analizador Multicanal son: nivel de discriminación o umbral, control de inicio/fin, borrado de toda la memoria de espectro, envío de datos al ordenador.

### 3.2. Interfaz gráfica

El software escrito en visual C++ realiza las siguientes funciones:

- Acceso al puerto de comunicación serial del ordenador para adquirir los datos.
- Proceso y despliegue gráfico de los datos capturados por el instrumento.
- Operación de las funciones del instrumento a través de una interfaz gráfica de usuario.

El acceso al puerto serial se realizó a través de funciones de API de *windows*, que facilitó el manejo de *buffers* de datos de envío y recepción y la modificación de los parámetros de transmisión. Teniendo en cuenta la gran utilidad de visualizar los datos capturados por el instrumento, el despliegue de gráficos se realizó utilizando librerías *OpenGL*<sup>3</sup>, que facilitan la representación de datos y su animación en dos dimensiones, logrando de esta manera una representación adecuada para los instrumentos Osciloscopio y Analizador Multicanal.

Un ejemplo del despliegue de datos en la interfaz gráfica se puede observar en la Fig. 3. En la parte superior está la ventana correspondiente al instrumento Osciloscopio con un pulso generado por el detector de Rayos Cósmicos, en la parte inferior está la ventana del Analizador Multicanal de pulsos con un espectro característico de Rayos Cósmicos y en la parte derecha está el menú de opciones de los instrumentos.

## 4. RESULTADOS

Una vez efectuadas varias pruebas con un generador de funciones, se verificó que la interfaz gráfica en la PC muestra correctamente los datos captados por el instrumento Osciloscopio. Los controles proveídos en el diseño hacen posible que se puedan observar señales en el rango de frecuencias de 1 *KHz* hasta 50 *MHz*; el límite superior es dado por el

teorema de Nyquist ya que el ADC utilizado trabaja a una frecuencia de 100 *MHz*. Aunque en la práctica, para obtener una forma de onda más detallada es necesario tener por lo menos nueve muestras, en vez de dos muestras por periodo. Esto hace que la máxima frecuencia, presente en la señal a analizar debe ser de  $\frac{1}{4}$  la frecuencia de muestreo. Los pulsos producidos por un PMT tienen una frecuencia aproximada de 40 *MHz*, estos pulsos son detectados por el instrumento Osciloscopio (dos o tres muestras por pulso) y registrados en un archivo para posterior análisis.

Se aplicó el instrumento Analizador Multicanal de pulsos a la determinación de la curva de *plateau* para un fotomultiplicador 9353KB de *Electron Tubes*<sup>4</sup>. El fotomultiplicador se encuentra instalado conjuntamente a un centelleador de agua, denominado WCD3, en el Laboratorio de Física Cósmica, en el monte Chacaltaya.

Se polarizó con alto voltaje (HV) el fotomultiplicador y se realizó el conteo de pulsos durante un tiempo fijo. Se polarizó el PMT de 900 a 1700 *V*, en intervalos de 100 *V*.

Los resultados de la aplicación se observan en la Fig. 4 en escala lineal y logarítmica. En esta última se puede apreciar mejor la región en la que un aumento del alto voltaje causa una menor diferencia entre las cuentas. Entre 1100 *V* y 1400 *V* está un segmento con menor pendiente; por lo tanto en ese segmento, a diferencia de otros, las cuentas no aumentarán significativamente conforme vaya aumentando el alto voltaje. Según la Fig. 4, el valor sugerido para polarizar el PMT es de 1200 *V*, y éste es el valor<sup>5</sup> elegido para la operación de WCD3 en Chacaltaya.

Además de las cuentas totales de pulsos, también se dispone del espectro de picos, correspondiente a cada alto voltaje aplicado al PMT de WCD3. Se han comparado estos espectros con las mediciones independientes realizadas por el proyecto LAGO para WCD3, y se ha verificado que los espectros son similares para cada alto voltaje.

Los instrumentos descritos han sido diseñados para su uso específico en la observación de señales eléctricas rápidas, producidas por rayos cósmicos, en general de alta energía,

<sup>4</sup> *Electron Tubes Enterprises Ltd.*, <http://www.electrontubes.com>.

<sup>5</sup> Este valor fue elegido después de varias pruebas con equipos especializados instalados en Chacaltaya.

<sup>3</sup> *OpenGL User Interface Library*, <http://glui.sourceforge.net>.

del proyecto LAGO, pero éstos también tienen un uso general. En el caso del Osciloscopio, puede utilizarse como un instrumento de laboratorio de nivel universitario, para la observación de señales periódicas y no periódicas, dada su alta tasa de conversión (100 MSPS). En el caso del Analizador

Multicanal, éste es muy útil en análisis de espectroscopía nuclear, en el cual la distribución de probabilidad de la radiación detectada está en función de su energía. El Analizador Multicanal también puede utilizarse en aplicaciones en las que se requiera el conteo de pulsos.

#### REFERENCIAS

Rivera, B. H. 2007, Implementación y Calibración de un Prototipo de Detector Cherenkov de Chubascos Atmosféricos (Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés)

DOS PASIONES: LA FÍSICA CÓSMICA Y LAS NIEVES ANDINAS  
TWO PASSIONS: COSMIC PHYSICS AND ANDEAN SNOWY PEAKS

GRAL. ING. JOSÉ ANTONIO ZELAYA  
Academia Nacional de Ciencias de Bolivia

RESUMEN

De la historia del Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya. El Ing. José Antonio Zelaya rememora su experiencia como investigador en el laboratorio en la época inicial cuando el Dr. Ismael Escobar, fundador del Laboratorio, era su Director.

*Descriptor:* historia de la ciencia — observatorios — rayos cósmicos

Código(s) PACS: 01.65.+g, 95.45.+i, 95.85.Ry

ABSTRACT

A history of the Cosmic Physics Laboratory at Chacaltaya. José Antonio Zelaya reminisces about his experiences as a researcher at the Laboratory during its beginnings when Dr. Ismael Escobar, founder of the Laboratory, was Director.

*Subject headings:* history of science — observatories — cosmic rays

*“La vida atrae la vida, nada ocurre por azar”*

Javier Sierra.

La atracción de las nieves andinas y por el esquí, inspiraron al Profesor universitario Dr. Ismael Escobar, para promover las investigaciones de Física Cósmica en el nevado de Chacaltaya. Su entusiasmo consiguió despertar el interés del rectorado de la UMSA, y también el interés de otras universidades del exterior. Su plan inicial fue instalar una estación meteorológica y poco a poco las instalaciones. A partir de las primeras habitaciones fueron agregándose otras para recibir las expediciones extranjeras que solicitaban llegar a este laboratorio que poco a poco fue adquiriendo fama internacional.

Cuando en 1964, el Ing. Ramón Schulczewski iniciaba otro experimento internacional sobre estudios de la ionósfera, llegó la primera antena parabólica a Bolivia, fui invitado para orientar astronómicamente mediante un azimut geodésico. En dos noches, utilizando la estrella polar del Sur, la Sigma Octantis, logramos cumplir con el pedido. Nos pidieron la cuenta por el trabajo realizado y mi respuesta fue que se trataba de una colaboración a la UMSA, donde ya dictaba la cátedra de astronomía geodésica. Cuando pasaron algunos años recibí un llamado telefónico para visitar al Director del “Laboratorio de Física Cósmica” Dr. Escobar. En muy breves palabras me invitó para integrar la planta de investigadores del Laboratorio. Por mi grado militar de Mayor, le dije que tendría que solicitarse siguiendo el conducto regular mediante una nota al Comandante del Ejército. Así lo hizo y a la semana me volvió a llamar y me dio la nota de respuesta del Comando del Ejército, negando mi participación. Recuerdo sus palabras: “No entiendo, cómo una institución como el Ejército se niega conseguir el prestigio de partici-

par en la investigación científica en el ya famoso Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya, otra institución militar se sentiría halagada por esta invitación – Deje que yo aplique mis métodos.” Yo levanté los hombros, dando así mi consentimiento para que ponga en práctica su idea. Llamé a su secretaria y pidió hablar con el Dr. Paz Estenssoro, Presidente de la República, a los pocos minutos escuché la conversación y me dijo “esperaremos la respuesta”, unos minutos más y evidentemente recibió la respuesta. Y, volviéndose me dijo, “bienvenido Mayor como Investigador asociado, en comisión del Ejército cumpliendo las leyes de oficiales en comisión.” Esta anécdota, explica la capacidad emprendedora del Dr. Escobar. Cuando llegué por primera vez a Chacaltaya se me asignó una habitación en el segundo piso donde ya estaban instalados varios equipos de investigación; dormí en el piso porque no habían catres. Al comedor llegábamos en tres turnos, donde se reunían americanos, japoneses e investigadores bolivianos. Durante un año realicé en el nevado, a 5.420 metros de altura, las investigaciones sobre las “Nubes de libración en las constelaciones opuestas a la trayectoria de la Luna para evitar interferencias en las placas de emulsión en la cámara con telescopio incluido. El Dr. Stevenson, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, me dio las instrucciones para las operaciones en la obtención de las placas con exposiciones hasta de 10 minutos escogiendo una estrella de seguimiento, en los mapas estelares en los lugares aproximados a los puntos de libración de la Luna. En dos noches de trabajo obtuvimos 8 placas, las que procesamos en la cámara oscura del laboratorio. Satisfecho con mi trabajo, el Dr Stevenson, me dejó que realizara solo todo el proceso, sin importarme la fatigosa ascensión al nevado, ni el frío (23° bajo cero) y los fuertes vientos que había que soportar. La

cúpula plateada que adornaba la cumbre de la pista de esquí, presentó un inconveniente, reflejaba el brillo de algunas estrellas en la sensible emulsión cuando el obturador estaba abierto. Recibí una carta para que detectara el inconveniente y, al comprobar que se trataba de la cúpula, avisé al Dr. Escobar y cuando me preguntó la solución le dije que había que construir otro mojón de soporte para la cámara a la intemperie algo alejada de la cúpula. Muy rápidamente se realizó el traslado y las placas obtenidas ya no presentaban interferencias, pero la falta de protección aumentaba la incomodidad del frío y el viento. Cuando la motivación del trabajo llegó a despertar mi curiosidad personal, aumenté las exposiciones hasta 20 minutos y luego hasta 30 minutos. Las placas así obtenidas me mostraron la inmensidad del misterioso cosmos. El motivo principal de la investigación era descubrir las rocas en suspensión o equilibrio gravitacional llamadas las rocas de Kordalewsky —un astrónomo polaco que escribió su teoría de las nubes de libración en las que se encontraban rocas de hasta 200m de longitud—, provenientes de las colisiones de meteoros o meteoritos en la superficie lunar, las mismas que dejaron las huellas como cráteres volcánicos. La teoría agregaba que de las altas montañas estas rocas incluso se las podría ver a simple vista. Cuando cumplí la fecha de mi compromiso fui preguntado por carta si había visto las rocas a simple vista, mi respuesta fue clara, siguiendo el dictado que me enseñaron en la EMI. La ciencia es la búsqueda de la verdad. Y dije, “no, no he visto”. Al poco tiempo el hombre llegó a la Luna. Recibí una nota de agradecimiento por mi trabajo, indicándome que en una reunión de científicos en

el Servicio Geológico, había ocupado el segundo lugar entre los trabajos científicos más sacrificados que se hacían en el mundo, el primer lugar lo ocupó un investigador de los peces ciegos en Laponia donde se cavaron pozos en el hielo y los investigadores zambullían para agarrar los peces con las manos y subirlos a superficie.

Durante mi estadía en Chacaltaya logré la donación de 20 catres del Ministerio de Defensa, fui nuevamente invitado para colaborar en la investigación del ozono en superficie, en el manejo de los telescopios para la detección de mesones pesados en interior mina y en el procesamiento de datos meteorológicos y paralelamente, mientras trabajaba en las noches, durante el día colaboré como guía para atender la gran cantidad de turistas que visitaban las instalaciones incomodando muchas veces la atención de los investigadores. El Dr. Escobar agradeció mis servicios y se despidió cuando fue distinguido para ocupar un cargo en el exterior. Guardo para él los más gratos recuerdos del mismo modo para los colegas extranjeros y bolivianos con los que tuve la oportunidad de iniciar una permanente amistad.

Los trabajos realizados en Chacaltaya fueron tomados en cuenta para ocupar la silla de Astronomía en la Academia de Ciencias, que había dejado vacante el padre De Cotte del observatorio del Colegio San Calixto. Con el tiempo, ocupé la dirección del Instituto de Investigaciones Físicas de la UMSA y logré que la sección de Construcciones de la Universidad aprobara los planos arquitectónicos para un nuevo laboratorio en Chacaltaya. Estos planos deben estar en los archivos correspondientes.

XXI REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA  
DEL 26 AL 31 DE OCTUBRE DE 2009  
COCHABAMBA–BOLIVIA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

RESUMEN

Se presenta la relación de ponencias de la XXI Reunión Nacional de Física realizada en Cochabamba entre el 26 y el 31 de Octubre de 2009.

*Subject headings:* physics workshops

*Título:*

**EVALUACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS PARA EL ÁREA DE BOLIVIA: COMPARACIÓN CON ESTACIONES DE SUPERFICIE**

*Autor:*

Marcos Froilán Andrade Flores

*Resumen:*

Los posibles efectos del cambio climático sobre regiones como Bolivia son de mucho interés tanto a nivel científico como político. Una de las herramientas más importantes para estudiar estos efectos son los modelos numéricos del clima. A fin de establecer la confiabilidad de las proyecciones de la evolución del clima futuro producidas por dichos modelos es necesario, sin embargo, validar las salidas de los mismos. En este trabajo se estudia el comportamiento del modelo climático regional PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies) del Hadley Centre de la Oficina Meteorológica Inglesa, sobre la región de Bolivia. La comparación de resultados del modelo con datos observados en superficie a nivel mensual de temperatura y precipitación en el periodo 1961-1990 muestran que el modelo tiene un buen desempeño en zonas bajas (menos de 500 m snm) pero que sobreestima precipitación tanto en zonas de altura intermedia (entre 500 y 3500 m snm) como en la zona andina (situada a una altura mayor a 3500 m snm). A su vez la comparación muestra que el modelo subestima la temperatura (media, máxima y mínima) en la mismas dos regiones mientras que realiza un trabajo aceptable en las zonas bajas. Aunque la parametrización de nubes y precipitación en las zonas de los valles y andina parece ser el elemento que más podría contribuir a las diferencias observadas es necesario un estudio más profundo para entender los mecanismos involucrados.

*Título:*

**HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS Y EL PROCESO DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE EN AULA PARA LA MATERIA DE FÍSICA**

*Autor:*

Milka Mónica Torrico Troche

*Resumen:*

La Física como ciencia es indispensable en la formación de los futuros profesionales de Ciencias e Ingenierías, considerando como población los estudiantes que cursan los primeros semestres de las carreras de Ciencias e Ingenierías de las Universidades pública y privadas de la provincia Cercado del Departamento de Cochabamba, las estadísticas nos muestran muchas deficiencias en la respuesta de los estudiantes hacia la materia de Física Básica, promoviendo un análisis de la situación que se centra en el proceso de enseñanza en aula, identificando a través de encuestas a docentes y estudiantes involucrados en el proceso, tres problemas, que son: (i) deficiencia de material bibliográfico adecuado; (ii) falta de visualización del fenómeno físico en los estudiantes; (iii) deficiencia en la comunicación docente – estudiante. De esta manera el presente trabajo tiene por objetivo: diseñar una guía metodológica que involucren el uso de nuevas herramientas tecnológicas, para mejorar el proceso de enseñanza aprendizaje en aula en la asignatura de Física Básica de las carreras de Ciencias e Ingenierías, tomando en cuenta los diferentes métodos didáctico y recursos didácticos, donde se incorpora el uso de herramientas computacionales en función a su aplicabilidad con el campo de la Física. Una vez definidos los métodos y recursos se planifica el desarrollo de las clases, estructurando las actividades, material, contenido, herramientas y recursos en un PLAN DE CLASES, que se constituye en una guía para el docente. El Plan de Clases lo elabora cada docente definiendo el rumbo que tomara la clase, de esta manera la introducción de las nuevas herramientas tecnológicas promueve interés

en el estudiante que esta habituado a la nueva tecnología y la gama de alternativas computacionales permite que el docente se convierta en investigador en el proceso de enseñanza, recuérdese que enseñar es un arte donde el artista es el docente. Finalmente se muestra como ejemplo parte de la aplicación de la guía metodológica propuesta a la materia de Física II, tema Estática de Fluidos.

*Título:*

**MAPA DE RADIACIÓN SOLAR PARA BOLIVIA**

*Autor:*

Marcelo Javier Lucano

*Resumen:*

En este trabajo se estimaron los valores de la radiación solar global a través de modelos de Sistemas de Información Geográfica e imágenes satelitales obtenidos a través de la metodología SSE de la NASA para un periodo de registros de 22 años. Con estos valores de radiación, se obtuvo la distribución temporal y espacial de la radiación solar para Bolivia mediante un proceso de interpolación utilizando el paquete de análisis geoestadístico ILWIS, considerando datos de 182 grillas de  $1^\circ \times 1^\circ$  que abarcan la zona de estudio y utilizando el método de superficie móvil con distancia inversa, exponente de peso 2, distancia esférica y segundo grado parabólico. Se observó que los niveles de radiación más bajos corresponden a los meses de mayo a julio que pertenecen a la estación de invierno y los niveles de radiación más altos corresponden a los meses de octubre a diciembre que pertenecen a las estaciones de primavera y verano. Asimismo, se observó que la parte noreste de Bolivia, a partir de la Cordillera Oriental presenta los valores más bajos de media anual de radiación global, entre  $3.9 - 5.1 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ , en tanto que, en la zona suroeste la radiación solar aumenta con valores entre  $5.1 - 7.2 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ .

*Título:*

**LA TEORÍA DE LA ORGANIZATIVIDAD: ‘EL FINAL DE LA TERMODINÁMICA CLÁSICA Y EL COMIENZO DE LA ORGANIZATIVIDAD’ (UNA TEORÍA QUE EXPLICA LA COMPLEJIDAD)**

*Autor:*

Andrés Trepp del Carpio

*Resumen:*

La complejidad es una cualidad abstracta de ciertos sistemas de la naturaleza y del mundo humano cultural, de la que hoy sólo se conoce sus características

generales y sobre la que no existe aún un concepto universal o una ciencia unificadora que valga para todos los ámbitos donde ella aparece. En el presente trabajo, el autor concibe una base teórica firme sobre la cual construye una teoría que explica el fenómeno de la complejidad de una manera coherente como un planteamiento científico inédito.

*Título:*

**BÚSQUEDA DE ANTIMATERIA EN EL UNIVERSO**

*Autor:*

Kenny Choque Talavera

*Resumen:*

El modelo estándar de la física de partículas establece que tanto partículas como antipartículas fueron creadas simultáneamente en cantidades iguales. Según el modelo estándar del Big Bang, el Universo fue creado en un tiempo primordial. Es natural pensar que en el inicio del Universo, materia y antimateria fueron creadas en cantidades iguales. Sin embargo, las observaciones astronómicas muestran que el Universo observable está constituido por materia. La aparente asimetría entre materia y antimateria es un enigma fundamental de la física de partículas y también de la astronomía. Si la antimateria existe en algún lugar del Universo, la búsqueda de señales de rayos gamma provenientes de su aniquilación, o aun, de rayos cósmicos de antipartículas, serían indicadores de la existencia de dominios de antimateria.

*Título:*

**¿ES LA HORCA DEL INCA UN OBSERVATORIO ASTRONÓMICO?**

*Autor:*

Gonzalo Pereira Quiroga

*Resumen:*

A propósito de la conmemoración del Año Internacional de la Astronomía, algunos estamentos medios del Gobierno de Bolivia, se han enfrascado en tramitar la declaratoria de “Patrimonio Astronómico de la Humanidad” ante la UNESCO, al monumento arqueológico de la Horca del Inca, situado en la localidad de Copacabana. Uno de sus principales argumentos para obtener la declaratoria de patrimonio astronómico es una serie de trabajos arqueoastronómicos y de datación atribuidos al Laboratorio de Física Cósmica de la Universidad Mayor de San Andrés. La ponencia que proponemos presentar es el resultado de un análisis de

los trabajos, tanto arqueológicos como astronómicos, que se emplean para apoyar la propuesta: La Horca del Inca es un Observatorio Astronómico.

**Título:**

**PRUEBAS DE ALINEALIDAD POR DATOS SUBROGADOS**

**Autor:**

V. Miguel Peñafiel N.

**Resumen:**

Se analiza un registro de las tres componentes del campo geomagnético (Patacamaya) mediante datos subrogados de Fourier y subrogados restringidos para decidir sobre sus características de linealidad. Se compara los resultados obtenidos con los correspondientes coeficientes maximales de Liapunov.

**Título:**

**MÉTODO DE DEPROYECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE BRAZOS DE GALAXIAS ESPIRALES**

**Autor:**

Deterlino Urzagasti

**Resumen:**

Se desarrolla un método para la deproyección de imágenes de discos de galaxias espirales sin barra y la obtención de su estructura de brazos mediante el modelo de espirales logarítmicas. El método se basa en la obtención de los puntos de máximos y mínimos locales de las fluctuaciones de la intensidad en las imágenes galácticas a través de un proceso de suavizado con el filtro de Savitzky-Golay. Estos puntos luego sirven para determinar los ángulos de inclinación y de posición del disco galáctico así como el *pitch angle* de sus brazos espirales. El método se aplicó a varias galaxias espirales, encontrándose un buen acuerdo con otros resultados de la literatura.

**Título:**

**ANÁLISIS DE PATRONES EN FRACTALES**

**Autor:**

Flavio Ghezzi

**Resumen:**

Se discute la dimensión fractal de sistemas determinísticos y no-determinísticos haciendo énfasis en la relación entre la dimensión fractal y diferentes parámetros físicos. Finalmente, se discute la invariancia de escala de sistemas coloidales.

**Título:**

**AUTOSIMILARIDADES EN EL ESPACIO DE PARÁMETROS PARA EL CIRCUITO DE CHUA**

**Autores:**

Marcelo Ramírez Ávila, Jason Gallas

**Resumen:**

Se muestran autosimilaridades en el espacio de parámetros del circuito de Chua, considerando tanto una función lineal por partes, así como una función cúbica. También se muestra el isomorfismo entre los planos de fase para ambas no-linealidades.

**Título:**

**ASPECTOS TEÓRICOS DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD**

**Autor:**

Luis Pánfilo Yapu Quispe

**Resumen:**

Se describe la estructura del grupo de Lorentz que permite relacionar la teoría especial de la relatividad con otras áreas de la física moderna. Para ilustrar esta descripción se deducirán algunas fórmulas "clásicas".

**Título:**

**OSCILACIONES DE BLOCH EN UN CIRCUITO CUÁNTICO INDUCTIVO ACOPLADO A LAS VIBRACIONES DE UNA RED**

**Autor:**

Marcelo Calcina Nogales

**Resumen:**

Se acopla un circuito puramente inductivo con carga discreta a los modos vibracionales de una red unidimensionales (fonones). Los modos vibracionales deforman el anillo y por lo tanto se modifica su inductancia (sistema electromecánico-cuántico). Cuando este anillo se conecta a una fuerza electromotriz de valor  $\epsilon_0$ , el periodo usual de la corriente ( $q_e \epsilon_0/V$ ) se ve afectado por un armónico con periodo igual al doble de su valor original ( $2q_e \epsilon_0/V$ ). Este fenómeno es equivalente al de las oscilaciones de Bloch en un cristal en el cual el electrón experimenta una frecuencia de oscilación  $aF/V$ . En nuestro caso, la carga eléctrica fundamental  $q_e$  juega el rol de la constante de red.

*Título:*

**LOS COMETAS METEOROLÓGICOS**

*Autores:*

Grupo Astronáutico Boliviano

*Resumen:*

Se estudiaron dos tipos de cometas de papel (delta y rombo) y su desempeño bajos las condiciones atmosféricas de La Paz, con el fin de diseñar cometas capaces de elevar un equipo de medición atmosférica. La gran preferencia de usar cometas en lugar de globos aerostáticos se basa en la facilidad de recuperar los instrumentos de medición así como en la economía para construirlos. Comprobamos que el método de unir varios cometas es adecuado poder elevar una carga de prueba y alcanzar una altura mayor sin perder estabilidad. Lo primero que se hace es elevar un cometa piloto que cuando está estable jala a un segundo cometa que lleva la carga de prueba, y así se siguen uniendo varios cometas hasta alcanzar alturas ideales de unos 250m.

---

*Título:*

**PROYECTO “LAGO”**

*Autor:*

Alfonso Velarde Chávez

*Resumen:*

Se describe la instalación y puesta en marcha de la estación LAGO-Bolivia.

---

*Título:*

**“SISTEMATIZANDO” LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA**

*Autor:*

Marco Antonio Córdova Olivares

*Resumen:*

Por mi experiencia a lo largo de mi formación académica, he visto “desvanecerse” trabajos de investigación tanto de docentes como de estudiantes, ya que caen en “saco roto”. Ello se debe a que no existe una política institucional ni gubernamental que pueda “agarrar” estos trabajos de investigación. En este sentido, propongo un método que facilita la digitalización y el control de todos los trabajos de investigación científica, tanto a nivel personal como institucional, enfocando mi propia experiencia sobre la construcción de mi trabajo de tesis.

---

*Título:*

**DOSIMETRÍA DE NEUTRONES – MONITOR DE NEUTRONES**

*Autor:*

Rolando Ticona Peralta

---

*Título:*

**ESTUDIO DE LA SINCRONIZACIÓN DE PÉNDULOS ACOPLADOS MEDIANTE SIMULACIONES COMPUTACIONALES**

*Autores:*

Armando Reynaldo Ticona Bustillos, Marcelo Gonzalo Ramírez Ávila

*Resumen:*

Usando un modelo discreto de péndulo amortiguado, estudiamos las condiciones de sincronización para dos péndulos acoplados. En primer lugar analizamos las cuencas de atracción estudiando la razón entre los periodos de los dos péndulos ( $T_2/T_1$ ) para diferentes condiciones iniciales, es decir, diferentes ángulos desde los cuales los péndulos inician su movimiento, considerando para ésto diferentes relaciones de largo, masa, acoplamiento entre péndulos y disipación. A partir de estos resultados podemos caracterizar las lenguas de Arnold, analizando nuevamente el comportamiento de la relación entre periodos en función a las condiciones iniciales de uno de los péndulos y los diferentes valores de masa, largo, acoplamiento y disipación. En estos gráficos podemos identificar sincronización 1 : 1 así como sincronizaciones de otros órdenes ( $m : n$ ) y también regiones cuasi periódicas, las cuales podrían conducirnos también a regiones caóticas en trabajos futuros; además se tienen todas las condiciones para ampliar este trabajo a más de dos péndulos.

---

*Título:*

**CAMAS SOLARES**

*Autores:*

Emiliana Juaniquina, Fernando Velarde, Flavio Ghezzi, Armando Ticona

*Resumen:*

Se realiza la caracterización del espectro de emisión electromagnética de una lámpara fluorescente usada en camas solares, para esto usamos un espectro fotómetro, que nos permite analizar el espectro desde aproximadamente 180nm, hasta aproximadamente 880nm, dividiendo este intervalo en 3500 canales. Debido a que el espectro fotómetro adquiere

los datos mediante una fibra óptica, las limitaciones de ésta no nos permiten analizar todo el espectro, dejándonos sólo información entre las bandas UVB y el visible. Las lámparas usadas en estas camas solares deberían tener una emisión rica en la banda del UVA, lo que permitiría el bronceado; y el resto de emisión debería estar en el visible. Nuestros resultados muestran un contenido pequeño de UVB en la emisión de

dichas lámparas, lo cual representa un peligro debido a lo nocivo de este tipo de radiación, por lo cual se recomienda un uso muy cuidadoso y supervisado de dichos instrumentos cosmetológicos.

---

## DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE UN PÉNDULO DETERMINATION OF A PENDULUM'S DISSIPATION COEFFICIENT

A. R. TICONA BUSTILLOS & G. M. RAMÍREZ ÁVILA

Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
La Paz – Bolivia

### RESUMEN

Usando un sensor de posición se toman datos de las oscilaciones de un péndulo amortiguado. Analizando las características del péndulo se determina su coeficiente de disipación.

*Descriptors:* procedimientos de laboratorio — dinámica de la partícula

Código(s) PACS: 06.30.Bp, 45.40.f

### ABSTRACT

Using a position gauge we register data from the oscillations of a damped pendulum. We analyze the pendulums characteristics and determine its dissipation coefficient.

*Subject headings:* laboratory procedures — dynamics of the particle

### 1. INTRODUCCIÓN

El movimiento armónico simple (MAS) encuentra aplicaciones en muchas ramas de la física; sin embargo, la primera dificultad con la que se tropieza al comparar sus resultados con oscilaciones reales, es la disipación de energía mecánica debida a la interacción de estos sistemas con el medio viscoso que los rodea. Esto hace que los sistemas reales sólo obedezcan por un tiempo relativamente corto los resultados de las soluciones del MAS.

El problema de introducir el término de disipación (que puede ser función de la velocidad, de la masa y forma del objeto, así como de la viscosidad del medio) en las ecuaciones está en que éstas ya no son sencillas pues pierden su carácter lineal y por tanto, la solución de las mismas no es inmediata y se deben recurrir a aproximaciones o directamente a la resolución numérica de las ecuaciones.

En este trabajo, se presenta un ejemplo de cómo medir directamente este coeficiente mediante las oscilaciones de un péndulo cuya lenteja puede ser considerada como un objeto puntual, utilizando un sensor de movimiento que nos da la posición de la lenteja del péndulo en función del tiempo. Este trabajo surge como parte de la investigación realizada en el estudio de péndulos acoplados (Ticona Bustillos & Ramirez Avila 2008).

### 2. PÉNDULO CON DISIPACIÓN

Se considera un péndulo con masa puntual, como se muestra en la Fig. 1. Las fuerzas que actúan sobre este objeto son el peso y la fuerza de disipación por parte del aire. Aplicando la segunda ley de Newton en la dirección del movimiento, se tiene:

$$-mg \sin \theta - bv = ma \quad (1)$$

Pero la aceleración se puede expresar en función del desplazamiento angular como:

$$a = l \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

Además, considerando desplazamientos angulares pequeños para los cuales se cumple  $\sin \theta \approx \theta$ , la ecuación se reduce a:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{g}{l} \theta - \frac{b}{ml} \frac{d\theta}{dt}, \quad (3)$$

que tiene una solución conocida y detallada en libros de física general (Halliday & Krane 1998; Serway 1997; Tipler 1995) dada por:

$$\theta = \theta_M e^{-\frac{b}{2ml} t} \cos(\omega t + \phi) \quad (4)$$

donde  $\theta_M$  es la amplitud,  $\phi$  es el ángulo de fase y  $\omega$  la frecuencia angular dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l} - \left(\frac{b}{2ml}\right)^2} \quad (5)$$

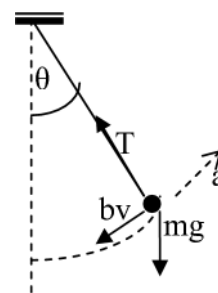


FIG. 1.— Diagrama de fuerzas y aceleración para el péndulo con disipación.

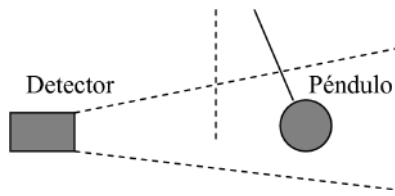


FIG. 2.— Sistema de detección de posición del péndulo.

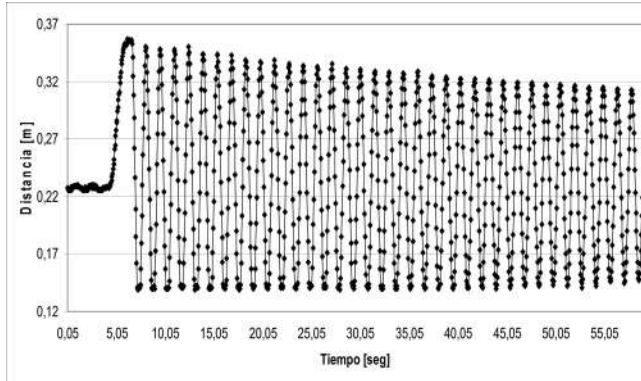


FIG. 3.— Distancia en función del tiempo para el péndulo.

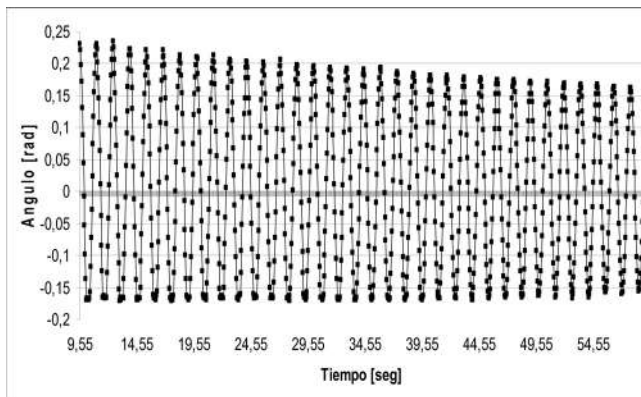


FIG. 4.— Ángulo del péndulo en función del tiempo.

La frecuencia angular es menor a la del péndulo sin amortiguamiento, debido a la interacción con el medio viscoso.

### 3. MEDIDA DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN

Utilizamos un sensor de posición PASCO, el cual toma datos de la distancia de un objeto a partir de un nivel de referencia, como se muestra en la Fig. 2. Estos datos son enviados a una computadora.

Se utilizó un péndulo de  $53.0\text{ cm}$  de largo y  $150.0\text{ g}$  de masa. La aceleración debida a la gravedad en la ciudad de La Paz se considera igual a  $9.775\text{ m/s}^2$ . Los datos obtenidos se muestran en la Fig. 3. En estos datos, se puede observar

que las distancias muy cercanas al detector no son obtenidas correctamente debido a la propia sensibilidad del detector; además, existen algunos casos en los que el péndulo no es detectado cuando está en la máxima distancia, dándonos el dato de la pared que está a mayor distancia.

Como se conoce el largo del péndulo, se pueden transformar estos datos a ángulos con lo que se obtiene el gráfico de la Fig. 4, donde sólo se consideran los datos a partir del movimiento del péndulo; en estos datos también se realizó un desplazamiento desde el nivel de referencia mostrado en la Fig. 3.

En la ecuación (4) se pueden considerar solamente los máximos de las oscilaciones, es decir, los puntos en los cuales el coseno es igual a la unidad. En ese caso sólo nos quedamos con la parte exponencial del comportamiento.

De igual manera, esto puede ser realizado con los datos obtenidos con el detector, tanto en las distancias mínimas como en las máximas. Como mencionamos antes, las distancias menores tienen un problema debido al detector, por lo cual sólo consideramos las distancias máximas en cada oscilación. De esta manera, se puede obtener el ajuste exponencial mostrado en la Fig. 5.

Para obtener la Fig. 5, algunos de los puntos han sido eliminados, ya que quedaban fuera de la línea de ajuste, debido a las circunstancias ya explicadas.

A partir de este ajuste podemos determinar que el valor del coeficiente de disipación es igual a  $0,013\text{ kg/s}$ .

### 4. CONCLUSIONES

Este método nos brinda una forma muy sencilla de calcular el coeficiente de disipación de un objeto relativamente pequeño, sin tomar en cuenta medidas de los factores geométricos ni la viscosidad del fluido.

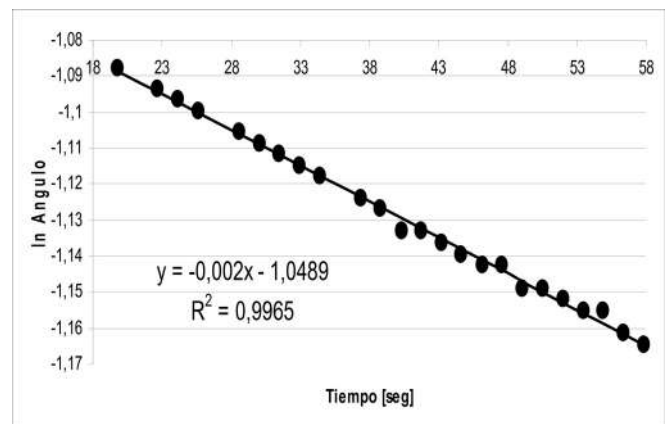


FIG. 5.— Ajuste exponencial del ángulo en función del tiempo.

### REFERENCIAS

Halliday, R. & Krane. 1998, Física, vol. 1, cuarta ed. (CECSA)  
Serway, R. 1997, Física, vol. 1, cuarta ed. (McGraw-Hill)

Ticona Bustillos, A. R. & Ramirez Avila, G. M. 2008, RBF, 14, 121  
Tipler. 1995, Física (Reverté)

## LA OCARINA DE ZANAHORIA A CARROT OCARINA

CHOQUE SAIRE M. P.  
Laboratorio de Física 121  
Universidad Mayor de San Andres

### RESUMEN

En los instrumentos prehispánicos aerófonos el sonido es producido por la vibración de una columna de aire como es el caso de la quena, la zampoña y la tarkha. Se suele olvidar, sin embargo, a otros instrumentos pertenecientes a esta misma familia, como es el caso de la ocarina, cuya afinación y fabricación es dificultosa. Este instrumento musical es de tamaño reducido, su sonido es agudo ( $523 - 1046\text{kHz}$ ) y se la encuentra en múltiples diseños. Su construcción es ardua debido a que habitualmente las ocarinas están hechas de cerámica o madera, con un centro hueco y orificios con áreas iguales o desiguales que son cubiertas para producir diferentes notas; esta dificultad se puede remediar usando un material dócil. Este material tiene que ser de forma alargada, cilíndrica y de consistencia maciza para evitar una deformación posterior; además, tal material debe permitir labrar el instrumento cómodamente. Entre las posibles opciones disponibles se eligió a una zanahoria (aunque parezca inusual) pues reúne todos los requisitos para la construcción de la ocarina; el único inconveniente es su sensibilidad al paso del tiempo ya que su volumen se puede reducir por la deshidratación.

*Descriptors:* instrumentos musicales — propiedades acústicas de sólidos

Código(s) PACS: 43.75.+a, 62.65.+k

### ABSTRACT

In pre Colonial wind instruments sound is produced through the vibration of an air column such as in the Quena, Zampoña and Tarka. A less well known wind instrument of the same family is the Ocarina whose fabrication and tuning are particularly difficult. The Ocarina is a small wind instrument with a high pitch ( $523 - 1046\text{kHz}$ ) and is found in many forms and designs. The instrument is arduous to make given that it is usually crafted from materials such as ceramic or wood and is composed of a hollow centre and finger holes of varying or equal diameter. This difficulty can be remedied by using a more pliable and yet durable material that can be formed into an elongated, and cylindrical form. Looking into the possible available alternative materials the carrot was chosen. The carrot met all the requirements although the material shrinks over time due to dehydration.

*Subject headings:* musical instruments — acoustical properties of solids

### 1. INTRODUCCIÓN

La ocarina se remonta a la América prehispánica, a culturas como la aymara y la quechua que utilizaban este instrumento musical acompañados de quenás, zampoñas y otros instrumentos. Se usa en países como Perú, Bolivia, Venezuela, norte de Chile, norte de Argentina y toda Mesoamérica.

Cabe recalcar que aunque existe teoría que se refiere al origen de este instrumento en Europa, se trata de otro instrumento de similares características ya que la Ocarina Sud-Americana tiene orígenes de cientos de años atrás.

La podemos encontrar en modelos sencillos, dobles o triples y con diferente número de orificios, como muestra la Fig. 1. Su tono depende de la relación entre el volumen del aire y el área del agujero destapado. Por ejemplo, en una ocarina de cuatro agujeros de áreas iguales, cubriendo todos los



FIG. 1.— Los tipos de ocarinas dependen del tamaño y del número de agujeros que posee.



FIG. 2.— Ocarina artesanal hecha de arcilla usada para el modelado matemático.

orificios previamente para luego pasar a quitar el dedo de uno de ellos, se obtiene la nota Sol, independientemente de qué agujero se destape. Si el área descubierta es igual, la nota producida es la misma.

## 2. ESCALA PENTATÓNICA

En nuestro sistema musical occidental, es conveniente utilizar sólo unas frecuencias concretas, a las cuales se las llama notas.

Las frecuencias de las notas se dividen en porciones llamadas “octavas”, y cada octava se divide en 12 porciones llamadas notas. Cada nota de una octava tiene exactamente la mitad de frecuencia que la misma nota en la octava superior.

Con el oído humano solamente se pueden captar notas que sean superiores a  $18Hz$  y por debajo de los  $20kHz$  (muy aproximadamente). Es así que sólo podemos oír unas diez octavas como mucho, con doce notas cada una. Por debajo de  $18Hz$  se llaman infrasonidos y por encima, ultrasonidos. El margen auditivo de las personas varía según la edad y otros factores. Los animales tienen un margen auditivo diferente; así, es muy conocido el hecho que los perros pueden sentir frecuencias mucho más altas, dentro del margen de los ultrasonidos.

Para que nuestra ocarina produzca sonidos agradables al oído humano es necesario ajustarla a una escala musical pentatónica porque es la escala más simple e intuitiva. La pentafonía —sistema musical en que se usa la escala pentatónica— se usa en la generalidad de los sistemas musicales tradicionales por ser usados por los músicos antiguos.

Nuestro oído humano tiene una “construcción” tal, que los sonidos cuyas frecuencias están en la proporción simple ( $2/1$ ,  $3/2$ ,  $4/3$ , etc.), suenan juntos de una manera agradable. Por ejemplo, la nota Do en su quinta octava tiene aproximadamente una frecuencia de  $1046.5Hz$  y junto a un Sol en la misma octava de frecuencia  $1567.9Hz$  suena agradable porque están a una proporción de  $3:2$ , respectivamente. Esta proporción es la combinación de sonidos más pura y se la suele llamar quinta justa.

En un sistema musical pentafónico se necesita una nota base que es la nota más grave que puede producir nuestro instrumento y una configuración de frecuencias de las notas;

TABLA 1  
SISTEMA MUSICAL PARA LA OCARINA.

	Frecuencia (Hz) <sup>a</sup>	Nota	Octava
1 Nota	689.1	Fa	4
2 Nota	775.2	Sol	4
3 Nota	918.8	La#	4
4 Nota	1033.6	Do	5
5 Nota	1162.8	Re	5
6 Nota	1378.2	Fa	5

<sup>a</sup>Las frecuencias no son exactamente las frecuencias originales de la nota; pero son las frecuencias exactas que posee la ocarina propuesta.

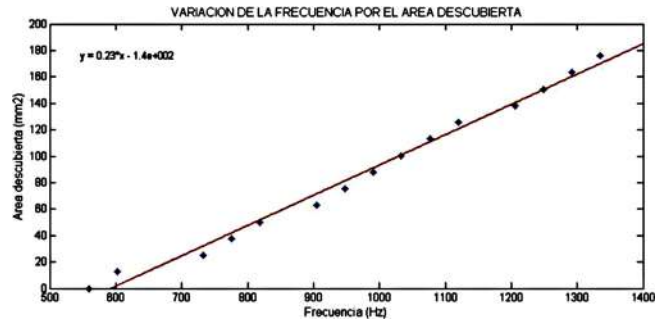


FIG. 3.— Relación lineal que existe entre el área descubierta y la frecuencia.

esta configuración es:

$$\begin{aligned} \text{Tono, } 9/8 & \quad \text{Tono, } (3/2)(8/9) = 4/3 & \quad \text{Tono, } \\ 3/2 & \quad \text{Tono, } (3/2)(9/8) = 27/16 & \quad \text{Tono, } \\ (3/2)^2(8/9) & = 2 & \quad \text{Tono} \end{aligned}$$

La ocarina propuesta consta de una escala pentatónica, de cinco notas, con una nota base en Do sostenido (Do#). Y obedeciendo las reglas de esta escala su sistema musical tiene que ser como indica la Tabla 1.

## 3. MODELO MATEMÁTICO PARA EL NÚMERO DE ORIFICIOS DE LA OCARINA

Los orificios de la ocarina son la parte más importante en el diseño de la ocarina ya que aportan la variedad tonal propuesta en la Tabla 1.

Así que tuvimos que diseñar un modelo que pueda relacionar el área del orificio con la frecuencia que deseamos obtener, recordando que la nota depende de la suma de orificios destapados.

Primeramente se tomó una ocarina artesanal (Fig. 2) hecha de arcilla que constaba de seis orificios de  $4mm$  de diámetro cada uno y se aumentó nueve orificios más; teniendo un total de quince orificios. La posición de los orificios fue relevante porque no perturbó en gran magnitud a las frecuencias obtenidas.

Luego se procedió a tomar la frecuencia del total de orificios descubiertos con ayuda del software *Analysis Center 2010*. Su diseño nos da la facilidad de poder obtener la frecuencia con el micrófono en tiempo real.

Las frecuencias que se obtuvieron en relación con el área destapada (Tabla 2) nos dan una idea de que existe una relación lineal. Esta relación se puede observar en la Fig. 3.

TABLA 2  
DATOS OBTENIDOS PARA EL MODELADO MATEMÁTICO.

Orificios destapados	Área total descubierta ( $mm^2$ )	Frecuencia ( $Hz$ )
0	0	559.9
1	12.56	602.0
2	25.13	732.1
3	37.69	775.2
4	50.25	818.3
5	62.81	904.4
6	75.37	947.5
7	87.93	990.5
8	100.49	1033.0
9	113.05	1076.7
10	125.61	1119.7
11	138.17	1205.9
12	150.73	1248.9
13	163.29	1292.1
14	175.85	1335.1

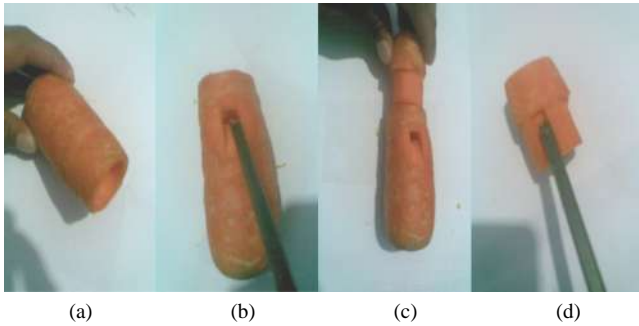


FIG. 4.— Pasos realizados para la construcción de la ocarina. Las primeras dos fotos muestran la parte resonadora y la boquilla. Las dos últimas fotos muestran la parte que permite el flujo del aire.

Así que procedemos hacer el ajuste de curvas (1): Usando la regresión lineal observamos que  $y$  es el área y  $x$  es la frecuencia. Con todo esto podemos concluir que nuestro modelo está hecho y es:

$$A = 0.22F - 135.6, \quad (1)$$

donde  $A$  es el área del orificio y  $F$  es la frecuencia deseada.

O, en función del diámetro  $D$  del orificio, la cual emplearemos más adelante para la construcción de la ocarina de zanahoria:

$$D = 2\sqrt{(0.22F - 135.6)/\pi}. \quad (2)$$

#### 4. CONSTRUCCIÓN DE LA OCARINA DE ZANAHORIA

En la construcción se necesitaron dos zanahorias lo más uniformes posible y de mayor volumen para poder evitar posibles fisuras al afollar. Y los pasos fueron los siguientes:

- Tomamos la primera zanahoria y la cortamos por la parte delgada, después con un taladro ahuecamos la zanahoria por la porción central. Esta sirve para la parte resonante de la ocarina (Fig. 4a).
- Hacemos un pequeño orificio cuadrangular en forma descendente en la parte central de su superficie con ayuda de un cincel y un estilete pequeño (Fig. 4b).
- Agarramos la segunda zanahoria y la cortamos de tal

TABLA 3  
DIÁMETROS DE LOS ORIFICIOS QUE TIENE LA OCARINA.

Nota	Fa	Sol	La#	Do	Re	Fa
Diámetro(mm)	0	6.7	6.3	5.7	6.0	7.8

manera que pueda ingresar en la primera zanahoria (Fig. 4c).

- Cortamos en la parte que se inserta en la primera zanahoria un canal cuadrangular que permite el flujo de aire (Fig. 4d).

Cuando pasamos al último paso, el tallado de los orificios, tenemos que hacer uso del modelo (2) y la Tabla 1.

Reemplazamos la frecuencia de la segunda nota (porque la primera la obtenemos sin necesidad de orificios) en (2) y obtenemos el diámetro del primer orificio, es decir, con  $F = 775.2$  se obtiene  $D = 6.7 mm$ .

Para el segundo orificio debemos modificar (2) porque si lo usáramos directamente obtendríamos el área necesaria más el área del primer orificio obteniendo datos que no nos sirven de manera inmediata. Es por ello que usaremos:

$$D = 2\sqrt{0.22(F - F_0)/\pi}, \quad (3)$$

Donde  $F$  es la frecuencia requerida y  $F_0$  es la frecuencia de la nota previa. Con este proceso obtenemos los diámetros requeridos para las frecuencias de las notas deseadas (Tabla 3).

Se puede deducir que esta escala tiene una tendencia a orificio de  $6 mm$ . Lamentablemente estas medidas no se pueden conseguir a cabalidad porque se necesitaría algún instrumento que pueda perforar con una exactitud de micrómetros

#### 5. PRUEBA DE SONIDO Y ANÁLISIS ESPECTRAL

Ya construida la ocarina ahora pasamos a analizar su afinación, es decir, con un análisis espectral observamos los picos más altos de frecuencia frente a su amplitud. Estos picos obtenidos gracias a las herramientas del software MATLAB 7.4.0 como la transformada rápida de Fourier (FFT) nos dicen su acercamiento a la nota musical que esperamos obtener.

Inicialmente de manera un tanto obvia podemos asegurar que las notas más graves, de manera específica las tres primeras notas (Fa, Sol y La#) suenan mejor afinadas que las últimas tres (Do, Re y Fa), posiblemente por la variación en la octava a que corresponden. Pero más específicamente se puede ver por las gráficas obtenidas que se muestran en la Figs. 5 a 10, que las dos primeras notas tienen una mayor precisión respecto al tono.

La frecuencia de la primera nota Fa de la cuarta octava (nuestra nota base) tuvo un rango de frecuencia entre  $660 Hz$  y  $680 Hz$ , se acercó bastante al resultado esperado, exactamente unos  $9.1 Hz$  de diferencia (Fig. 5).

En la segunda nota Sol (Fig. 6) se esperó que diera  $775.2 Hz$  y obtuvimos un rango entre  $760 Hz$  y  $780 Hz$ . El resultado requerido se encuentra dentro de nuestro rango. Sin embargo, se observa que el rango va en aumento.

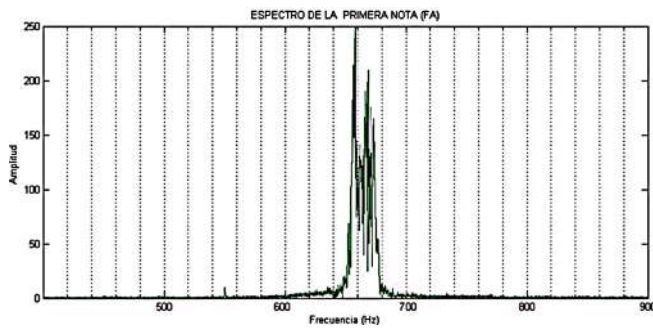


FIG. 5.— Esta gráfica corresponde a la frecuencia de la primera nota Fa.

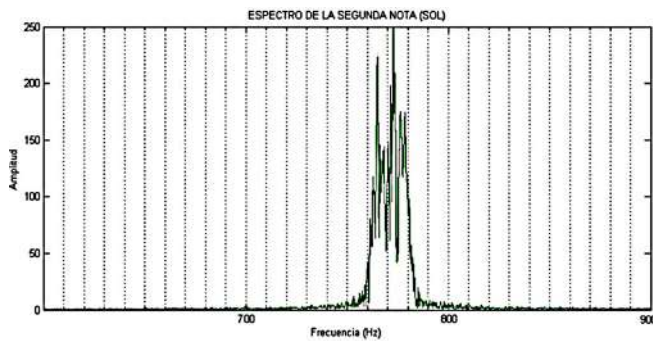


FIG. 6.— Esta gráfica corresponde a la frecuencia de la segunda nota Sol.

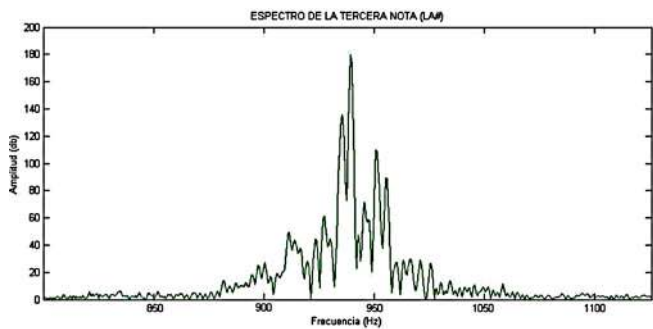


FIG. 7.— Esta gráfica corresponde a la frecuencia de la tercera nota La sostenido.

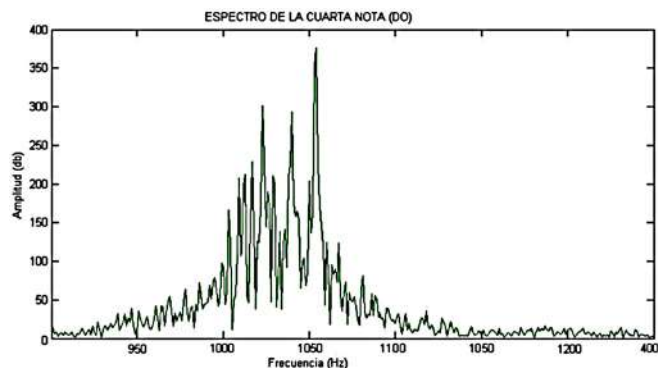


FIG. 8.— Esta gráfica corresponde a la frecuencia de la cuarta nota Do.

Los resultados de las notas La sostenido y Do tienen una similitud bastante interesante: Para la nota La sostenido calculamos una frecuencia de  $918.8\text{Hz}$ , y en la Fig. 7 vemos

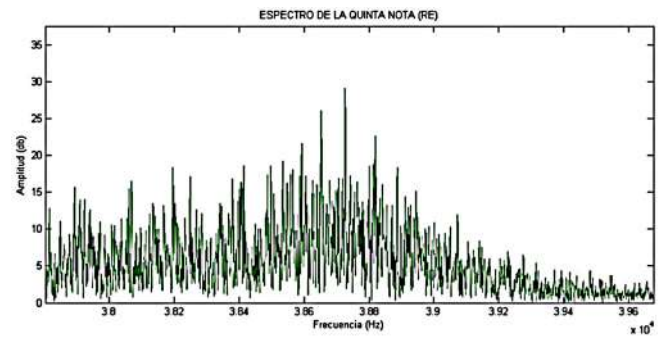


FIG. 9.— Esta gráfica corresponde a la frecuencia de la quinta nota Re.

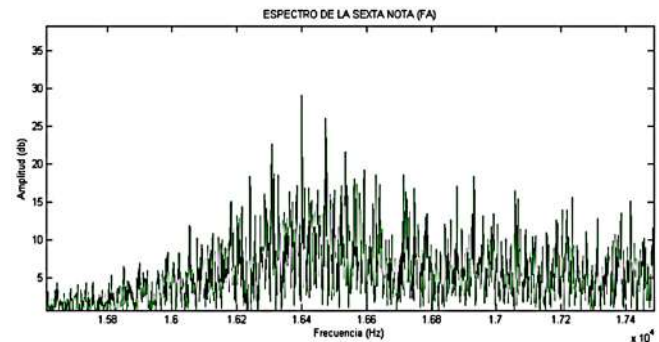


FIG. 10.— Esta gráfica corresponde a la frecuencia de la sexta nota Fa.

que la mayor amplitud se encuentra entre  $900\text{Hz}$  y  $950\text{Hz}$ ; en la cuarta nota Do se calculó una frecuencia de  $1033.6\text{Hz}$  y como se muestra en la Fig. 8 se observa una mayor amplitud entre  $1000\text{Hz}$  y  $1050\text{Hz}$ . Las Figs. 7 y 8 muestran un intervalo de mayor amplitud, de  $50\text{Hz}$  y la frecuencia calculada está dentro de los rangos.

Cuando las notas de nuestra ocarina subieron a una quinta octava el sonido de las notas Re y Fa simplemente ya no se escuchó y esto se puede ver en la gran dispersión de las Figs. 9 y 10.

## 6. CONCLUSIONES

La ocarina, y en especial esta ocarina hecha de un vegetal muy común, tiene una cierta ventaja en la construcción pero una seria desventaja de duración puesto que mientras el tiempo se prolongue su sonido irá decayendo en claridad ya que la boquilla se deshidrata cada vez más perdiendo el corte en el flujo que hace el sonido. Otro problema con este instrumento es que, como explicamos en su construcción, la zanahoria que dirige el flujo del aire tiene que caber exactamente sin dejar que escape el aire del resonador, y por el mismo problema de la deshidratación este va perdiendo volumen y cada vez deja escapar más aire, cambiando las notas y el tono del instrumento.

Pero al estar éste fresco, esto es, aproximadamente unos dos días después de la inmediata construcción, puede darnos sonidos muy claros, variados y afinados de la manera que se requiera. Si usamos notas que pertenezcan a la cuarta o tercera octava obtendremos sonidos mucho más claros porque el instrumento hecho de zanahoria no alcanza frecuencias tan altas demandadas para la quinta octava en adelante.

Y se puede decir que este es el instrumento más sencillo, de bajo costo y sorprendente, porque al no depender de la resonancia, es decir, siendo su forma relevante a la hora de la construcción, se puede formar de materiales orgánicos

—aunque parezca humorístico— como pepinos manzanas o hasta muy difícilmente de huevo, porque estos tienen un gran volumen y una gran versatilidad al momento de su construcción.

#### REFERENCIAS

Halliday, R. & Krane. 1998, Física, vol. 1, cuarta ed. (CECSA)

## 14<sup>VA</sup> OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA EXAMEN NACIONAL

6<sup>TO</sup>, 7<sup>MO</sup>, 8<sup>VO</sup> DE PRIMARIA, 1<sup>RO</sup>, 2<sup>DO</sup>, 3<sup>RO</sup> DE SECUNDARIA

YACUIBA, TARIJA, DEL 27 DE NOVIEMBRE AL 1 DE DICIEMBRE DE 2009

BUSTOS R.<sup>1</sup>, TAVERA W.<sup>1</sup>, CENTENO E.<sup>2</sup>, BRAÑEZ A.<sup>2</sup>, MAYTA R.<sup>2</sup>, ESPINOZA W.<sup>2</sup>, RAMIREZ M.<sup>2</sup>, SUBIERA V.<sup>2</sup>, SANJINÉS D.<sup>2</sup>, GUTIERREZ V.H.<sup>3</sup>, GUAYGUA T.<sup>4</sup>, JEMIO C.<sup>4</sup>, ANDRADE M.<sup>5</sup>, GUZMÁN R.<sup>5</sup>, MAMANI R.<sup>6</sup>, CHAVARRIA V.<sup>7</sup>, JUSTINIANO I.<sup>8</sup>, PAYLLO J. P.<sup>9</sup>, ENRIQUEZ J.<sup>10</sup>, QUIROGA I.<sup>11</sup>, VARGAS C.<sup>12</sup>, CORAITE O.<sup>13</sup>, QUIROZ Z.<sup>14</sup>, PORTOCARRERO H.<sup>15</sup>, CONDORI V.H.<sup>16\*</sup>, APAZA R.<sup>17</sup>, CONDORI H.<sup>18\*</sup>, POMA O.<sup>19\*</sup>

<sup>1</sup> Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) <sup>2</sup> Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Carrera de Física, La Paz <sup>3</sup> Universidad Mayor, Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca (UMRPSFXCH), Facultad de Tecnología, Carrera de Ingeniería de Sistemas, Sucre <sup>4</sup> Universidad Técnica de Oruro (UTO), Facultad Nacional de Ingeniería (FNI), Oruro <sup>5</sup> Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Facultad de Ciencia y Tecnología, Cochabamba <sup>6</sup> Universidad Autónoma Tomas Frías (UATF), Carrera de Física, Potosí <sup>7</sup> Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra (UPSA), Santa Cruz de la Sierra <sup>8</sup> Colegio María Auxiliadora, Cobija, Pando <sup>9</sup> Colegio 12 de Agosto, Yacuiba, Tarija, <sup>10</sup> Colegio Maryknoll, Cochabamba <sup>11</sup> Servicios, Ciencia y Tecnología, Cochabamba <sup>12</sup> Colegio Buenas Nuevas, Sucre <sup>13</sup> Colegio La Salle, Oruro <sup>14</sup> Instituto Americano, La Paz <sup>15</sup> Colegio San Ignacio, La Paz <sup>16</sup> Colegio Basil Miller, El Alto, La Paz <sup>17</sup> Unidad Educativa del Sur, El Alto, La Paz <sup>18</sup> Estudiante, FI, UMSA, La Paz <sup>19</sup> Estudiante de Beca Patiño, Suiza \*Ex Olímpico

### RESUMEN

14<sup>va</sup> Olimpiada Boliviana de Física (14<sup>va</sup> OBF) se llevó a cabo simultáneamente y con éxito del 27 de Noviembre al 1 de Diciembre de 2009 en la ciudad de Yacuiba – Tarija, en los ambientes del Colegio Paz Estenssoro.

La organización del evento contó con la participación de los siguientes organismos e instituciones: COMITÉ OLÍMPICO BOLIVIANO DE FÍSICA, PREFECTURA DE YACUIBA, SOBOFI, la Asociación de profesores de Física, Química, Biología y Matemática, agrupados en AMEC (Asociación para el Mejoramiento de la Enseñanza de las Ciencias), la Dirección distrital de Yacuiba; SEDUCA – Yacuiba y el Gobierno Municipal de Yacuiba.

Se contó con la presencia de diez delegaciones: Beni, Chuquisaca, Cochabamba, La Paz, Oruro, Pando, Potosí, Santa Cruz de la Sierra, Tarija y Yacuiba. En esta olimpiada se evaluaron las categorías de 6<sup>to</sup>, 7<sup>mo</sup>, 8<sup>vo</sup> de Primaria, 1<sup>ro</sup>, 2<sup>do</sup>, 3<sup>ro</sup> de Secundaria. La categoría de 4<sup>to</sup> de Secundaria no participó en Yacuiba, ellos participaron en las dos etapas previas de clasificación para la 14<sup>va</sup> OBF y los ganadores de esta categoría tienen como principal premio el ingreso libre y directo a las universidades comprometidas con el proyecto.

En Yacuiba se concentraron cerca de trescientas personas entre estudiantes, profesores y madres y padres de familia que acompañaron a sus hijos, quienes compartieron sus experiencias, costumbres, y culturas.

El evento se realizó con la presencia de dos importantes físicos bolivianos, el Dr. Wilfredo Tavera, Presidente de la SOBOFI y el M. Sc. Mirko Raljevic, quienes compartieron sus conocimientos a través de conferencias para los estudiantes olímpicos, profesores asistentes y público en general, así como también formaron parte del comité evaluador. Se demostraron conceptos físicos, en coordinación con estudiantes universitarios, en la actividad titulada *La Magia de la Física* (proyecto desarrollado por los universitarios Willy Espinoza Ch., Ariel Brañez T. y Edwin Centeno M. de la Carrera de Física de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales (UMSA), La Paz).

Las categorías de 6<sup>to</sup>, 7<sup>mo</sup>, 8<sup>vo</sup> de Primaria se evaluaron en la modalidad de Examen Teórico y las categorías de 1<sup>ro</sup>, 2<sup>do</sup>, 3<sup>ro</sup> de Secundaria tuvieron dos modalidades de evaluación: Teórica y Experimental.

**OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA**



**OLIMPIADA BOLIVIANA DE  
ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA**

*Descriptor:* Olimpiadas de Física

*Subject headings:* Physics Olympiads

GANADORES DE LA 14<sup>VA</sup> OBF6<sup>TO</sup> DE PRIMARIA

Nombre	Departamento	PREMIO
Galia Cornejo Urquieta	La Paz	ORO
Gustavo Martinez	Oruro	PLATA
Sergio Velasquez	La Paz	BRONCE
Florencia Montes	Tarija	HONOR

1<sup>RO</sup> DE SECUNDARIA

Nombre	Departamento	PREMIO
Juan Pablo Angulo	La Paz	ORO
Cesar Tapia	Oruro	PLATA
Evair Alvarez	La Paz	BRONCE
Carlos Guerra	Santa Cruz	HONOR

7<sup>MO</sup> DE PRIMARIA

Nombre	Departamento	PREMIO
Giovanni Alvarez	La Paz	ORO
Paola Lopez	Tarija	PLATA
Marian Molina	La Paz	BRONCE
Adrian Sierra	Tarija	HONOR

2<sup>DO</sup> DE SECUNDARIA

Nombre	Departamento	PREMIO
Jorge Cueto	La Paz	ORO
Emily Lapaca	Oruro	PLATA
Vicente Rodriguez	Cochabamba	BRONCE
Vivian Coaquira	anta Cruz	HONOR

8<sup>VO</sup> DE PRIMARIA

Nombre	Departamento	PREMIO
Sebastian Navarro	Tarija	ORO
Valeria Cordero	La Paz	PLATA
Alvaro Lopez	Cochabamba	BRONCE
Renato Flores	Oruro	HONOR

3<sup>RO</sup> DE SECUNDARIA

Nombre	Departamento	PREMIO
Daniel Caba	Tarija	ORO
Sergio Valderrama	Tarija	PLATA
Jose I. Stambuk R.	Cochabamba	BRONCE
Mario Iporre	Cochabamba	HONOR

14<sup>VA</sup> OBF EXAMEN DE SEXTO DE PRIMARIA

1. (4 pts) ¿Qué es el punto de ebullición ?

Sol. *Es la temperatura a la cual se produce el cambio de estado de líquido a gas, este cambio se lleva a cabo bajo la superficie del líquido. El gas que se produce bajo la superficie forma burbujas que suben a la superficie y escapan.*

2. (4 pts) ¿Por qué en la ciudad de La Paz el punto de ebullición será diferente al punto de ebullición que se tiene en la ciudad de Yacuiba?

Sol. *La presión del vapor dentro de las burbujas de un líquido en ebullición debe ser lo bastante grande para vencer la presión del agua que las rodea. La presión del agua aplasta las burbujas que se forman, a menos que la presión del vapor sea suficientemente grande. A temperaturas inferiores al punto de ebullición, la presión del vapor no es suficiente; así pues, las burbujas no se forman sino hasta que se alcanza el punto de ebullición. Conforme aumenta la presión atmosférica las moléculas de vapor han de moverse más rápidamente a fin de ejercer dentro de la burbuja una presión suficiente para vencer la presión atmosférica. Así pues, si la presión que se ejerce sobre la superficie de un líquido aumenta, el punto de ebullición del líquido se eleva e inversamente, si la presión disminuye (como ocurre a alturas mayores, por ejemplo la ciudad de La Paz), el punto de ebullición disminuye. Así la ebullición no sólo depende la temperatura, sino también de la presión. La ciudad de Yacuiba se encuentra a menor altura sobre el nivel del mar que la ciudad de La Paz, por tanto la presión atmosférica es mayor y entonces el punto de ebullición también será mayor.*

3. (4 pts) ¿De cuáles de las siguientes características:

- A) Masa del líquido.
- B) Compuestos o elementos que conforman el líquido.
- C) Volumen del líquido. depende el punto de ebullición?

Sol. *Sólo depende de los elementos que conforman el líquido, y no de la cantidad de líquido por ejemplo el agua hierve a 100°C, ya sean 3 litros de agua o 50 litros de agua, en cambio por ejemplo el alcohol etílico hierve a 78°C. Rpta B.*

4. (3 pts) ¿Cuál es mayor el punto de ebullición o el de congelación?

Sol. *El punto de ebullición.*

5. (4 pts) ¿Cuál es la diferencia entre átomos y moléculas?

Sol. *Las moléculas están constituidas por combinaciones de átomos.*

6. (4 pts) ¿Cómo es la masa del núcleo en comparación con la masa del átomo?

Sol. *Casi iguales, porque casi toda la masa de un átomo se halla concentrada en su núcleo.*

7. (4 pts) ¿Cómo es el tamaño del núcleo en comparación con el tamaño de todo el átomo?

Sol. *El núcleo sólo ocupa unas cuantas milmillonésimas del volumen del átomo.*

8. (4 pts) ¿Cómo es la carga eléctrica del electrón en relación a la del protón?

Sol. *Tienen la misma magnitud pero son de distinto signo, la carga del protón es positiva y la del electrón negativa.*

9. (4 pts) ¿Cómo es la carga eléctrica del neutrón en relación a la del protón?

Sol. *El neutrón no tiene carga eléctrica.*

10. (9 pts) Asocie los estados de la materia con las características que presentan.

Sólido	Resp. B y D	A. Volumen indefinido
Líquido	Resp. B y C	B. Volumen definido
Gaseoso	Resp. A y C	C. Forma indefinida
		D. Forma definida

11. (8 pts) ¿Cuánto pesan 2 kilogramos?

Sol. *El peso es la fuerza con la que la tierra atrae a los objetos cercanos a su superficie, y está definido como la masa por la aceleración de la gravedad:  $\text{Peso} = 2\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2 = 19.6 \text{ Newtons}$ .*

12. (6 pts) Se tiene una cascada de agua de 7m de altura que corre a una velocidad de 2m/s en su punto más alto, ¿qué tipo de energía tienen las moléculas en este punto? Y ¿por qué?

Sol. *En este punto al tener altura tienen energía potencial gravitatoria. Como las partículas también tienen velocidad entonces tienen energía cinética.*

13. (12 pts) Se tienen dos máquinas, la máquina A realiza el doble de trabajo que la máquina B, pero en el doble de tiempo. ¿Cuál máquina tiene más potencia? Justifique su respuesta.

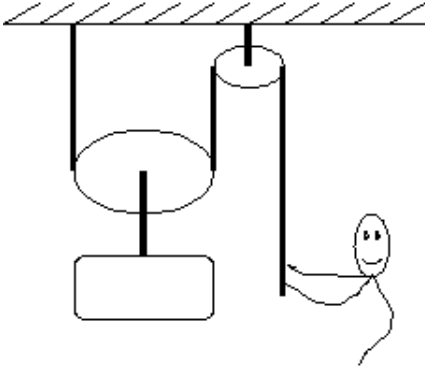
Sol. La potencia es el ritmo con que se realiza trabajo, es decir, la cantidad de trabajo realizada por unidad de tiempo:

$$P = \frac{\text{Trabajo}}{\text{tiempo}}. \text{ La potencia de la maquina A ser\'a:}$$

$$P_{\text{maqA}} = \frac{W_A}{t_A} = \frac{2W_B}{2t_B} = \frac{W_B}{t_B} = P_{\text{maqB}}.$$

Por tanto ambas tienen la misma potencia.

14. (12 pts) Si usted quiere multiplicar su fuerza por dos para levantar una carga, dibuje un sistema con poleas que le ayude a cumplir su objetivo.



Sol.

15. (12 pts) Se tienen dos esferas de hierro una de 1Kg y una de 3Kg.
- ¿Cuál tiene mayor densidad
  - ¿Cuál tiene mayor volumen?
  - ¿Cuál tiene mayor peso?

Sol. a) Ambas tienen la misma densidad porque ambas son de hierro.  
 b) La esfera de 3kg tendrá mayor volumen, porque la densidad de ambas es la misma, por tanto, podemos afirmar que la que tenga mayor masa ocupará mayor volumen.  
 c) El peso es una cantidad directamente proporcional a la masa por tanto la más masiva (la de 3kg) tendrá más peso.

16. (6 pts) Si quiere que se equilibre el subibaja colocando en los puntos A y B a dos niños uno más gordito que el otro. ¿Dónde deberá ir el niño gordito y donde el flaquito? ¿Por qué?



Sol. El gordito deberá ir en A y el flaquito en B, esto porque el brazo (distancia entre el punto donde se aplica la fuerza y punto de apoyo) de B es más largo, por tanto el torque ejercido respecto al punto de apoyo es mayor que al de A, que tiene un brazo menor. Como el torque también es proporcional a la fuerza ejercida, en este caso el peso de los niños, para compensar este desequilibrio debido a que los brazos son de distinta longitud se debe aplicar en el brazo menor mayor fuerza.

14<sup>VA</sup> OBF EXAMEN DE SÉPTIMO DE PRIMARIA

1. (5 pts) Señalar la diferencia que existe entre refracción y reflexión.

Sol. En el fenómeno de la reflexión, una onda incide sobre la frontera entre dos medios y rebota, regresando al primer medio.

En el fenómeno de la refracción, una onda incide sobre la frontera entre dos medios y cambia de dirección al penetrar en el segundo medio.

2. (5 pts) En la tabla periódica un elemento A con más electrones que uno B estará ubicado a la derecha o a la izquierda de B.

Sol. A la derecha, pues el número de electrones va aumentando de uno en uno al avanzar de izquierda a derecha.

3. (5 pts) ¿Una fila o una columna de elementos en la tabla periódica tendrá propiedades químicas y físicas similares?

Sol. Los elementos de una columna tienen propiedades químicas y físicas similares.

4. (5 pts) ¿Cuál es la diferencia entre dos filas o renglones de la tabla periódica?

Sol. El número de capas electrónicas.

5. (10 pts) Si el número atómico del oxígeno es 8 y el número atómico del potasio es 19:

a) ¿Cuál tiene mayor número de electrones?

b) ¿Cuál tiene mayor número de protones?

Sol. El número atómico es igual al número de protones del núcleo y de manera equivalente al número de electrones que rodean al núcleo en un átomo neutro. Por tanto, el potasio tiene mayor número de electrones y también de protones

6. (10 pts) ¿Cuáles son las unidades de Volumen y densidad en los sistemas cgs y MKS?

Sol. En el sistema cgs  $[V]=\text{cm}^3$ ,  $[\text{densidad}]=\text{g}/\text{cm}^3$ . En el sistema MKS  $[V]=\text{m}^3$ ,  $[\text{densidad}]=\text{Kg}/\text{m}^3$ .

7. (20 pts) Diez centímetros cúbicos de un material A tienen una masa de  $3.5 \times 10$  gramos y un material B de  $1m^3$  tiene una masa de  $10500Kg$ . ¿Cuál material es el más denso? Y ¿cuántas veces más denso es?

Sol.  $\rho_A = \frac{m_A}{V_A} = \frac{35g}{10cm^3} = 3.5g/cm^3$   
 $\rho_B = \frac{m_B}{V_B} = \frac{10500Kg}{1m^3} = \frac{10.5 \times 10^6g}{10^8cm^3} = 0.105g/cm^3$   
 $\frac{\rho_A}{\rho_B} = 33.3 \text{ veces}$   
 La densidad del material A es mayor en 33.3 veces a la del material B.

8. (20 pts) Se tiene material incompresible suficiente para construir un cubo de  $12cm$  de lado con esta misma cantidad de material se quiere construir una esfera ¿de qué diámetro resultará ésta?

Sol.

$$V_{cubo} = l^3 \quad \text{y} \quad V_{esfera} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Como el volumen del material permanece constante sólo se modifica la forma. Tendremos:

$$l^3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}}l$$

$$d = 2r = 2\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}}l = 14.9cm$$

9. (20 pts) Una persona escucha el sonido de los truenos de una tormenta después de 5 segundos de haber visto los relámpagos. ¿A qué distancia de la persona se encuentra la tormenta, si la velocidad del sonido es  $340m/s$ ?

Sol. Cuando algo viaja con velocidad constante, la velocidad es la distancia recorrida entre el tiempo:  $v = \frac{d}{t}$

Entonces la distancia recorrida es:  $d = vt$   
 Como el sonido tarda 5 segundos en viajar y su velocidad es  $340m/s$ , se tiene:

$$d = 340[m/s] \times 5[s] = 1700[m]$$

14<sup>VA</sup> OBF EXAMEN DE OCTAVO DE PRIMARIA

1. (6pts) ¿Cuáles son las cuatro fuerzas que existen en la naturaleza? Escríbalas en orden desde la más fuerte hasta la más débil.

Sol. Fuerza nuclear fuerte, fuerza nuclear débil, fuerza electromagnética, fuerza gravitacional.

2. (4pts) ¿Cómo se puede incrementar la rapidez de una partícula? ¿Cuál es la causa de la aceleración?

Sol. Según la segunda ley de Newton para que exista un cambio en la velocidad de una partícula debe haber una fuerza neta actuando sobre ella.

3. (4pts) ¿Qué se puede concluir si una partícula viaja siempre con velocidad constante?

Sol. Si no cambia su velocidad, es decir tiene aceleración nula, según la primera ley de Newton es porque no existe una fuerza externa neta actuando sobre ella.

4. (6pts) Si al acariciar un gato con tus manos le sacas electrones al gato. ¿Adquieres una carga positiva o negativa? Y el gato ¿qué carga adquiere?

Sol. El gato al quedar con menos electrones equivale a que quede cargado positivamente y la persona que tiene mayor número de electrones que protones quedará cargada negativamente.

5. (10pts) Indique una similitud y una diferencia entre la fuerza gravitacional y la fuerza eléctrica entre cargas estáticas.

Sol. Similitud: Ambas fuerzas son inversamente proporcionales a la distancia al cuadrado

Diferencia: La fuerza eléctrica puede ser de atracción o repulsión según el signo de las cargas; en cambio, la fuerza gravitacional sólo es de atracción.

6. (18pts) Dos moscas dan un giro y vuelven al punto de partida. La primera da el giro describiendo un círculo de 2 metros de diámetro en 10 segundos y la segunda describe un círculo de 0.5 metros de diámetro en 2.5 segundos.

a) ¿Cuál tuvo mayor desplazamiento?

b) ¿Cuál tiene mayor rapidez?

c) ¿Cuál recorrió mayor distancia?

Justifique sus respuestas.

Sol. a) Ambas tuvieron el mismo desplazamiento igual a cero porque no hubo cambio de posición neto.

b) Ambas tienen la misma rapidez, puesto que si la rapidez es constante, ésta es igual a la distancia recorrida, (en este caso el perímetro de una circunferencia, el producto de  $\pi$  por el diámetro) entre el tiempo. Realizando este cálculo se obtiene la misma velocidad:

$$R_1 = \frac{\pi l_1}{t_1} = \frac{\pi 2[m]}{10[s]} = \frac{\pi}{5}[m/s]$$

$$R_2 = \frac{\pi l_2}{t_2} = \frac{\pi \frac{1}{2}[m]}{\frac{5}{2}[s]} = \frac{\pi}{5}[m/s]$$

c) La que recorrió mayor distancia fue la primera mosca porque el diámetro de la circunferencia es mayor a la de la segunda

mosca, y el perímetro de una circunferencia es proporcional al diámetro de la misma.

7. (18pts) Se tienen dos esferas de la misma masa, una de hierro cuya densidad es  $7.8\text{g/cm}^3$  y una de aluminio cuya densidad es de  $2.7\text{g/cm}^3$ .

- ¿Cuál tiene mayor densidad?
- ¿Cuál tiene mayor volumen?
- ¿Cuál tiene mayor peso? Justifique sus respuestas

Sol. a) La de hierro

b) La de aluminio, pues si ambas tienen la misma masa como el aluminio es menos denso se debe requerir un volumen mayor para igualar a la masa de la esfera de hierro.

c) Como ambas tienen la misma masa y el peso es proporcional a la masa, entonces ambas tienen el mismo peso.

8. (12pts) Una partícula A recorre el doble de distancia que una partícula B en el triple de tiempo. ¿Qué partícula tiene mayor velocidad media? Justifique su respuesta

Sol. Como la velocidad es la razón de la distancia recorrida y el tiempo empleado para ello, tenemos:

$$v_A = \frac{d_A}{t_A} = \frac{2d_B}{3t_B} = \frac{2}{3} \frac{d_B}{t_B} = \frac{2}{3} v_B$$

por tanto la velocidad de A es sólo dos tercios la velocidad de B o la velocidad de B es una vez y media veces la velocidad de A, por tanto la velocidad de B es mayor a la de A.

9. (22pts) Si un electrón ubicado a una cierta distancia de una partícula cargada experimenta una fuerza de atracción de cierta magnitud

- ¿Cómo será la magnitud de la fuerza respecto a este valor si la distancia se reduce a la mitad?
- ¿La partícula cargada en este caso es positiva o negativa?

Sol. a) La fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia de separación al cuadrado, es decir que si la distancia disminuye la fuerza aumenta. Como la proporción es cuadrática al disminuir la distancia a la mitad la fuerza no aumenta simplemente al doble, sino como 2 al cuadrado, esto quiere decir que la fuerza resultante es cuatro veces mayor que la inicial.

b) Como el electrón de carga negativa es atraído hacia la partícula, esta deberá ser necesariamente de carga positiva.

1. (12 pts) ¿Qué ángulo deben formar dos vectores para que el módulo de su resta de un valor:

- Mínimo?
- Máximo?
- Igual al de su suma?

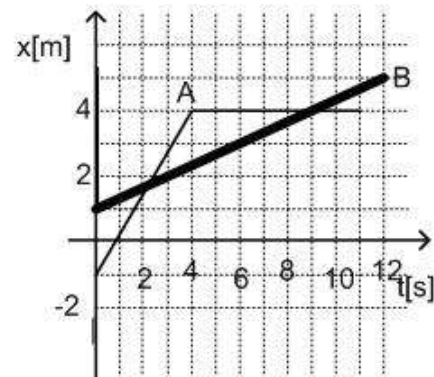
Sol. a) El módulo de la resta es mínimo si los vectores están paralelos, es decir, forman  $0^\circ$ .  
b) El módulo de la resta es máximo si los vectores están formando un ángulo de  $180^\circ$ .  
c) El módulo de la resta es igual al módulo de la suma si los vectores están ortogonales, es decir, formando  $90^\circ$ .

2. (10 pts) Indique cuál magnitud es vectorial y cuál escalar:

Sol.

- Tiempo escalar
- Masa escalar
- Peso vectorial, pues es una fuerza que tiene dirección siempre vertical hacia abajo
- Longitud escalar
- Desplazamiento vectorial

3. (25 pts) Según el gráfico de posición de las partículas A y B en función del tiempo. Indique:



- ¿Cuál de las partículas parte más cerca del origen?
- ¿Cuál partícula tiene mayor velocidad entre los 0 y 4s?
- ¿Cuánto tiempo tarda la partícula A en alcanzar a la partícula B desde que parten?
- Después de que la partícula A rebasa a la partícula B, ¿estas vuelven a encontrarse? ¿Donde? Y ¿cuándo?
- ¿Qué ocurre entre los 4 y 11 segundos con la partícula A?

- Sol. a) Ambas parten a un metro del origen, la diferencia es que una por detrás del origen y la otra por delante de éste.  
 b) La partícula A tiene mayor velocidad, pues nótese que la pendiente es mayor, es decir el ritmo con el que cambia de posición es mayor.  
 c) 2 segundos.  
 d) Si vuelven a encontrarse a los 9 segundos y a los 4 metros.  
 e) Permanece en reposo.

4. (9 pts) La dilatación de los materiales

- ¿Depende o no del material?
- ¿Es inversa o directamente proporcional a la longitud del cuerpo?
- ¿Es inversa o directamente proporcional al cambio de temperatura?

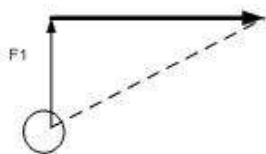
- Sol. a) Si depende del material, por ejemplo el vidrio pirex es muy difícil de dilatarlo, por eso se lo usa para construir recipientes que soporten mucho calor.  
 b) Es directamente proporcional a la longitud del cuerpo.  
 c) Es directamente proporcional al cambio de temperatura.

5. (6 pts) Defina calor y temperatura.

- Sol. La temperatura de un cuerpo es proporcional a la energía interna del cuerpo, es decir, a cuanto movimiento tienen sus moléculas internamente, ya sea movimiento de vibración o rotación o traslación.  
 El calor es la cantidad de energía que se transfiere entre dos cuerpos, gracias a que tienen distintas temperaturas

6. (6 pts) Se requiere que dos fuerzas tirando de un cuerpo, lo muevan a lo largo de la dirección que se indica en la figura con línea punteada. Dibuje la segunda fuerza con la que conseguiría este objetivo.

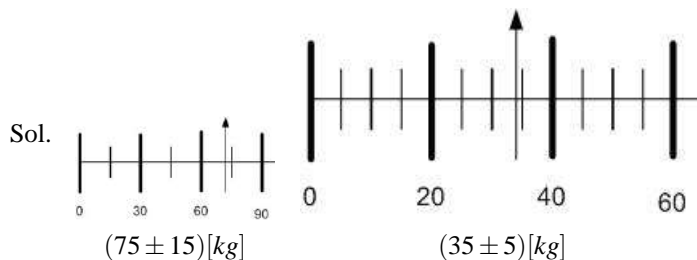
Sol.



7. (7 pts) Un estudiante midió la longitud de su lápiz y obtuvo  $(90 \pm 5) \text{ mm}$ . Como segunda tarea midió la longitud del aula y obtuvo  $(9030 \pm 5) \text{ mm}$ . En ambas tareas ¿se merece la misma nota? Justifique su respuesta en base al error relativo.

- Sol. En ambos casos el error absoluto es el mismo pero el error relativo no: El error relativo en la primera tarea es de 6% y en el segundo caso de 0.06%. Por tanto se merece mejor nota en la segunda tarea.

8. (10 pts) Anote los resultados que indica la balanza en Kg. con su respectivo error. No haga una estimación en la escala, sólo basesé en la apreciación que permite ésta.

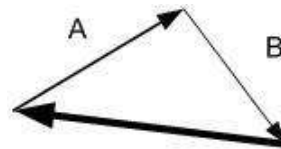


9. (6 pts) Si se proporciona la misma cantidad de energía a dos sustancias y en una se alcanza mayor incremento en su temperatura, ¿significa que su capacidad calorífica es mayor o menor?

- Sol. La sustancia que alcanza mayor incremento de temperatura tiene menor capacidad calorífica, es más fácil aumentarle su temperatura.

10. (9 pts) Si sobre una partícula se aplican dos fuerzas A y B ¿cómo tendría que ser una tercera fuerza C?, para que la partícula permanezca en reposo. Grafique la fuerza C.

Sol.



14<sup>VA</sup> OBF EXAMEN DE SEGUNDO DE SECUNDARIA

1. (5 pts) Explique la diferencia y dé ejemplos de ondas transversales y longitudinales.

- Sol. En una onda transversal la vibración ocurre en la dirección perpendicular a la dirección de propagación. Un ejemplo es la cuerda de una guitarra. En una onda longitudinal la vibración ocurre en la dirección de propagación en vez de la dirección perpendicular a ésta. El sonido es un ejemplo de onda longitudinal.

2. (5 pts) Un paracaidista al cual no se le abre el paracaídas cae bajo la acción únicamente de la gravedad al mismo tiempo que en el plano horizontal describe circunferencias de 5m de diámetro. Si simplemente cayera en línea recta, ¿tardaría menos tiempo? Explique su respuesta.

Sol. La causa de la caída es la aceleración de la gravedad en el eje vertical. El valor de la gravedad es constante y no cambia; ya sea que el paracaidista caiga en línea recta o describiendo círculos en el plano horizontal al mismo tiempo, por tanto, el tiempo que le toma caer en ambos casos es el mismo. Lo que ocurra en un plano perpendicular a la vertical no influye en su caída. Ésto también se conoce como independencia de los movimientos en los distintos ejes perpendiculares.

3. (9 pts) ¿Qué ángulo deben formar dos vectores de modo que su resta de un valor:

- Mínimo?
- Máximo?
- Igual al de su suma?

Sol. a) El módulo de la resta es mínimo si los vectores están paralelos es decir forman  $0^\circ$ .

b) El módulo de la resta es máximo si los vectores están formando un ángulo de  $180^\circ$ .

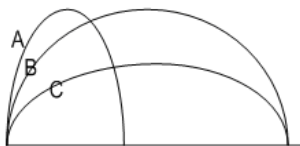
c) El módulo de la resta es igual al módulo de la suma si los vectores están ortogonales, es decir, formando  $90^\circ$ .

4. (5 pts) Explique que es la reflexión y la refracción de ondas.

Sol. En el fenómeno de la reflexión, una onda incide sobre la frontera entre dos medios y rebota, regresando al primer medio. En el fenómeno de la refracción, una onda incide sobre la frontera entre dos medios y cambia de dirección al penetrar en el segundo medio.

5. (16 pts) Un futbolista patea la pelota tres veces (A, B y C) como se ve en la figura

- ¿En cuál de ellas la pelota tiene mayor tiempo de vuelo?
- ¿En qué tiro la componente de la velocidad vertical inicial es mayor?
- ¿En qué tiro la componente de la velocidad horizontal inicial es mayor?
- ¿En qué tiro se obtuvo mayor alcance horizontal?



Sol. a) En A y B porque la altura de ambos es la misma y mayor que la de C. Por tanto, como el tiempo de vuelo es proporcional a la altura máxima, será para estas dos trayectorias,

A y B, que se alcanza el mayor tiempo de vuelo.

b) La velocidad vertical inicial es proporcional a la altura máxima alcanzada. Como en los tiros A y B se tiene la misma altura máxima alcanzada y mayor a la de C, entonces será en A y B que se tiene la velocidad vertical inicial máxima.

c) En los tiros A y B se tiene el mismo tiempo de vuelo porque la altura máxima es la misma. Pero en el tiro B se tiene mayor alcance horizontal, por lo tanto en B la componente horizontal de la velocidad será mayor que la de A. Por otra parte, en los tiros B y C se tiene el mismo alcance pese a que B tiene mayor tiempo de vuelo que C para llegar al mismo alcance, por tanto, C tendrá mayor velocidad horizontal que B. Como la velocidad horizontal de B es mayor que A y la velocidad horizontal de C es mayor a la de B, entonces C tendrá la mayor velocidad horizontal.

d) En B y C se obtendrá el mayor alcance horizontal.

6. (8 pts) ¿Cuál es la diferencia entre los siguientes resultados de una misma medición:

A = 20.00mm, B = 2cm.

Sol. Ambos resultados son iguales, pero en B se da una sola cifra significativa, mientras que en A para el mismo resultado se dan 4 cifras significativas, es decir que es mucho más preciso, su incertidumbre de 0.01mm es mucho menor a la de B que es 1cm.

7. (10 pts) Si sobre una partícula se aplican dos fuerzas A y B de 4N cada una y formando un ángulo de noventa grados entre sí. ¿Cómo tendría que ser una tercera fuerza C en módulo y dirección para que la partícula permanezca en reposo?

Sol. Si queremos que la partícula permanezca en reposo, de la segunda ley de Newton tenemos que no debería haber actuando sobre ella una fuerza neta, por tanto la suma de las fuerzas A, B y C debería ser cero:

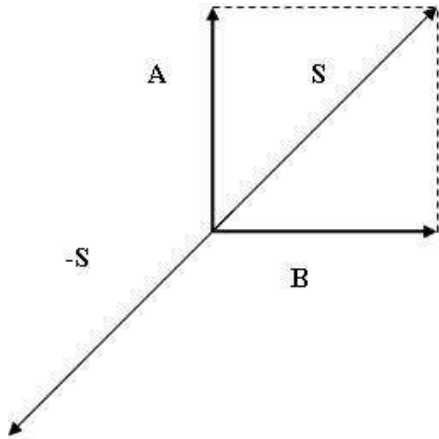
$A + B + C = 0$ , obteniendo  $C = -(A + B) = -S$ . Por lo tanto, la tercera fuerza C deberá ser opuesta a la suma de A y B.

Como las fuerzas A y B tienen el mismo módulo y forman  $90^\circ$  entre sí, su suma es un vector formando  $45^\circ$  con cualquiera de ellos (véase el gráfico) y de módulo (según el Teorema de Pitágoras):

$$|C| = \sqrt{|A|^2 + |B|^2}$$

$$|C| = \sqrt{4^2 + 4^2} = 4\sqrt{2}$$

Por tanto el vector C tendrá de módulo  $4\sqrt{2}$  y formará un ángulo de  $135^\circ$  con A y con B.



8. (15 pts) Si una onda vibra tres veces por segundo y su longitud de onda es de 2m,

a) ¿Cuál es su frecuencia?

Resp. La frecuencia de la onda es de 2Hz.

b) ¿Cuál es su periodo?

Resp. El período es el inverso de la frecuencia por tanto es medio segundo.

c) ¿Cuál es su rapidez?

Resp. La rapidez es: frecuencia multiplicada por la longitud de onda =  $2\text{Hz} \times 1.5\text{m} = 3\text{m/s}$ .

9. (15 pts) Se mide el tiempo de un mismo fenómeno varias veces obteniéndose los siguientes resultados:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tiempo [s]	32.2	30.0	34.4	33.6	34.0	30.8	31.2	31.4	33.8

¿Cuál será el resultado de todas estas mediciones?

Sol. El promedio del tiempo es 32.4[s].

La desviación cuadrática media es

$$1.6107[s].$$

$$\frac{\sigma}{3} = 0.5[s].$$

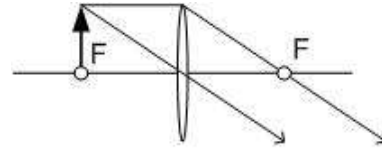
El resultado será:  $(32.4 \pm 0.5)[s]$ .

10. (12 pts) ¿Dónde debe colocarse un objeto a fin de que la imagen producida por una lente convergente

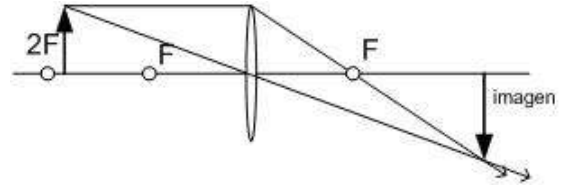
a) esté en el infinito?

b) Esté invertida y aumentada?

Resp. a. El objeto debe estar entre una y dos distancias focales de la lente.



Resp. b. El objeto debe estar a una distancia de la lente igual a la distancia focal (o sea en el punto focal).



14<sup>VA</sup> OBF EXAMEN DE TERCERO DE SECUNDARIA

1. (5 pts) ¿Dónde resulta más fácil flotar, en un lago o en el mar? ¿Por qué? Recuerde que el agua de mar es salada.

Sol. La fuerza de flotación según el principio de Arquímedes es igual al peso del líquido desplazado. Al ser la densidad del agua salada mayor a la del agua dulce de un lago, el peso del líquido desplazado del agua de mar será mayor a la del agua de un lago, por tanto es más fácil flotar en el mar.

2. (5 pts) ¿Cuánto vale, en el movimiento rectilíneo uniformemente variado, la aceleración centrípeta? ¿Por qué?

Sol. La aceleración centrípeta indica el cambio en dirección de la velocidad, y no el cambio en módulo, es decir, que cuanto más brusco sea el cambio en la trayectoria de una partícula mayor será la aceleración centrípeta. En el movimiento rectilíneo no existe cambio en la dirección de la velocidad por tanto la aceleración centrípeta es nula.

3. (5 pts) Se tienen dos máquinas, la maquina A realiza el doble de trabajo que la maquina B, pero en el doble de tiempo. ¿Cuál máquina tiene más potencia? Justifique su respuesta.

Sol. La potencia es el ritmo con que se realiza trabajo, es decir, la cantidad de trabajo realizada por unidad de tiempo:

$$P = \frac{\text{Trabajo}}{\text{tiempo}}. \text{ La potencia de la maquina A será:}$$

$$P_{\text{maqA}} = \frac{W_A}{t_A} = \frac{2W_B}{2t_B} = \frac{W_B}{t_B} = P_{\text{maqB}}.$$

Por tanto ambas tienen la misma potencia.

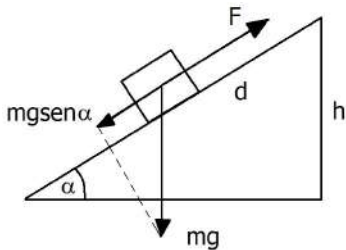
4. (5 pts) Cuando se debe levantar un cuerpo una altura h se usa muchas veces una rampa, ¿cuál es la ventaja de usar una rampa?; ¿será menor el trabajo necesario para levantar el cuerpo?

Sol. El trabajo realizado por una fuerza constante es el producto de la fuerza aplicada por la distancia que

se desplazó el cuerpo. Cuando el cuerpo es levantado en una trayectoria vertical la fuerza mínima necesaria debe ser por lo menos igual al peso del cuerpo  $mg$  y la distancia que se desplaza será la altura  $h$  por tanto el trabajo mínimo necesario para levantar un cuerpo, en trayectoria vertical, sin usar una rampa, es  $mgh$ .

Cuando se utiliza una rampa la fuerza mínima necesaria será el peso reducido por el factor  $\sin \alpha$ , es decir que la fuerza necesaria es menor al caso anterior (véase el gráfico), pero en compensación la distancia necesaria  $d$ , será mayor pues por trigonometría es:  $d = h/\sin \alpha$ .

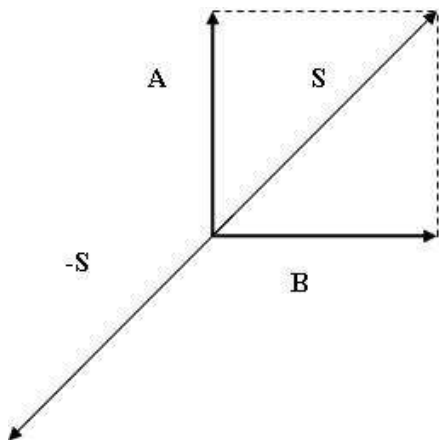
El trabajo necesario será entonces  $W = \text{Fuerza} \times \text{distancia}$



$$W = mgsen\alpha \times \frac{h}{sen\alpha} = mgh$$

Finalmente concluimos que el trabajo necesario en ambos casos, levantando el cuerpo directamente, o levantándolo mediante la rampa, es el mismo. A veces se prefiere usar una rampa porque la fuerza necesaria es menor, pero la distancia a recorrer será mayor.

5. (5 pts) Si sobre una partícula se aplican dos fuerzas A y B de 4N cada una y ortogonales entre sí. ¿Cómo tendría que ser una tercera fuerza C en módulo y dirección para que la partícula permanezca en reposo?



- Sol. Si queremos que la partícula permanezca en reposo, de la segunda ley de Newton tenemos que no debería haber actuando sobre ella una fuerza neta, por tanto la suma de las fuerzas A, B y C debería ser cero:

$A + B + C = 0$ , obteniendo  $C = -(A + B) = -S$ . Por lo tanto, la tercera fuerza C deberá ser opuesta a la suma de A y B.

Como las fuerzas A y B tienen el mismo módulo y forman  $90^\circ$  entre sí, su suma es un vector formando  $45^\circ$  con cualquiera de ellos (véase el gráfico) y de módulo (según el Teorema de Pitágoras):

$$|C| = \sqrt{|A|^2 + |B|^2}$$

$$|C| = \sqrt{4^2 + 4^2} = 4\sqrt{2}$$

Por tanto, el vector C tendrá de módulo  $4\sqrt{2}$  y formará un ángulo de  $135^\circ$  con A y con B.

6. (5 pts) El río Beni cerca a la localidad de Rurrenabaque tiene un sector llamado Estrecho del Bala, porque el río se ve forzado por dos cerros a cruzar por un lugar estrecho a gran velocidad. Explique con ecuaciones a que se debe este fenómeno.

- Sol. Si consideramos un tubo por el que pasa un flujo continuo de agua. La cantidad de agua que pasa por una sección cualquiera del tubo es siempre igual, y esto es válido ya sea que el tubo se haga más ancho o más estrecho. Debido a que el flujo es continuo, la rapidez del agua se reducirá en los tramos anchos y aumentará en los tramos angostos. Esta conservación de la masa por unidad de tiempo, se expresa mediante la ecuación de continuidad, que dice que el producto del área o sección por donde fluye el líquido y la velocidad de éste es constante,  $Av = \text{constante}$ :

$$A_1v_1 = A_2v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2}v_1$$

Es decir que la velocidad del fluido en un lugar donde el área por donde circula es menor es igual a la velocidad inicial por un factor que es la proporción entre las áreas, es decir, si el área disminuye este factor será mayor a uno y la velocidad será mayor.

7. (5 pts) Explique usando la ecuación de Bernoulli la fuerza ascensional que hace que el avión despegue.

- Sol. La ecuación de Bernoulli es consecuencia de la conservación de la energía. En un flujo estacionario de fluido hay tres tipos de energía: la energía cinética, debida al movimiento, la energía térmica, debida a la presión y la energía potencial gravitacional debida a la elevación. En un flujo estacionario, al que ni se añade ni se resta energía, la suma de estas formas de energía permanece constante. Si la elevación del fluido en movimiento no cambia, un aumento en la rapidez implica una disminución en la presión y viceversa. El principio de Bernoulli permite explicar el vuelo de las aves y de los aviones. La forma y la orientación de las alas hacen que el aire pase un poco más

a prisa sobre la superficie superior que bajo la superficie inferior del ala. La presión en la parte superior del ala es menor que la presión bajo la superficie inferior. La diferencia entre estas presiones produce una fuerza total dirigida hacia arriba, llamada fuerza ascensional.

8. (5 pts) ¿Es el error de la suma de dos medidas más grande que el de la resta de dos medidas? Explique el por qué.

Sol. Tanto el error de la suma de dos medidas como el de la resta de dos medidas es la suma de los errores de las medidas en ambos casos, porque siempre se toma el caso más pesimista, es decir el error más grande.

9. (5 pts) Según la ley de inercia o primera ley de Newton un objeto libre de fuerzas que actúan sobre él tiende a permanecer con velocidad constante, entonces por qué cuando un estudiante lanza sobre la cancha de fútbol su mochila esta se detiene.

Sol. Es que se detiene o desacelera porque no se trata de un cuerpo libre de fuerzas, pues sobre él esta actuando la fuerza de fricción entre la mochila y el piso.

10. (20 pts) Para determinar la velocidad y posición inicial de una partícula que se mueve con velocidad constante, un grupo de estudiantes tomó datos de la posición de ésta a distintos tiempos y obtuvo:

Tiempo [s]	1	2	3	4	5	6
Posición [m]	12.1	21.9	32.0	42.1	51.8	62.1

Realizando un ajuste lineal, usando su calculadora, halle la velocidad y posición inicial de la partícula. (No es necesario que halle los errores de éstas).

- Sol. Si la partícula se mueve con movimiento rectilíneo uniforme, la ecuación que describe su movimiento es:  $x = x_0 + vt$ , donde  $x$  es la posición para cualquier instante  $t$ ,  $x_0$  es la posición inicial,  $v$  es la velocidad constante y  $t$  es el tiempo.

Esta ecuación es lineal, por tanto podemos realizar un ajuste lineal tomando como variable independiente el tiempo y como variable dependiente la posición, entonces el valor de la pendiente del ajuste será la velocidad y la ordenada en el origen será la posición inicial.

Realizando el ajuste en calculadora se obtiene:  $v = 9.99[m/s]$  y la posición inicial  $x_0 = 2.0[m]$

11. (15 pts) En las pequeñas lagunas al pie de los glaciares en nuestra cordillera, se ven pequeños trozos de hielo flotando. ¿Qué porcentaje en volumen del trozo total queda sumergido? Resuelva el problema usando el principio de Arquímedes y considerando que la densidad del hielo es  $0.92g/cm^3$  y la densidad del agua de los lagos es de  $1.00g/cm^3$ .

Sol. Las fuerzas que actúan sobre los trozos de hielo son el peso del hielo y la fuerza de flotación o empuje, el cual, según el Principio de Arquímedes es igual al peso del líquido desplazado. Como el hielo no se mueve en el eje vertical, en este eje la sumatoria de fuerzas es cero por tanto el peso del hielo se iguala a la fuerza de flotación:

$$Peso = Empuje$$

$$m_{hielo}g = m_{liq-desplazado}g$$

$$\rho_{hielo}V_{hielo} = \rho_{agua}V_{sumergido}$$

$$\frac{V_{sumergido}}{V_{hielo}} = \frac{\rho_{hielo}}{\rho_{agua}} \frac{0.92}{1} = 92\%$$

12. (20 pts) Una volqueta viaja en el Altiplano cargada de arena, bajo la lluvia. Por conservación del momentum, si las gotas de lluvia se quedan en la carrocería junto con la arena aumentando su masa, entonces ¿disminuye su velocidad? Explique.

¿Qué ocurre si la volqueta tiene un orificio y viaja perdiendo arena? Al disminuir su masa por conservación del momentum ¿aumenta su velocidad? Analice y explique ambos casos.

- Sol. En el primer caso, la volqueta se desliza sobre un eje horizontal, por tanto, tiene momentum inicial en este eje, las gotas de lluvia tienen momentum pero sólo en el eje vertical, en el eje horizontal su momentum es cero. Por conservación del momentum en el eje horizontal,

$$P_{inicial} = P_{final}$$

$$m_{volqueta}v_{volqueta-inicial} = (m_{volqueta} + m_{lluvia})v_{final}$$

$$v_{final} = v_{volqueta-inicial} \frac{m_{volqueta}}{m_{volqueta} + m_{lluvia}}$$

Nótese que la velocidad final es la inicial multiplicada por un factor menor a uno (numerador menor al denominador), por tanto, la velocidad final es menor a la inicial, disminuye su velocidad.

En el segundo caso, cuando la volqueta pierde arena por un orificio, disminuye la masa de la volqueta pero esta arena perdida lleva consigo también velocidad en el eje  $x$ , por tanto, la velocidad final de la volqueta no cambia:

$$P_{inicial} = P_{final}$$

$$m_{volqueta-inicial}v_{volqueta-inicial} =$$

$$(m_{volqueta} - m_{arena})v_{volqueta} + m_{arena}v_{arena}$$

Como la  $v_{arena} = v_{volqueta}$ , se cancelan los dos últimos términos del segundo miembro quedando que la velocidad inicial de la volqueta es igual a la velocidad final, por tanto, la volqueta al perder arena por un orificio mientras se mueve no se acelera, permanece con velocidad constante.

---

# REVISTA BOLIVIANA 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@latinmail.com

### Carrera de Física

**Lic. Deterlino Urzagasti**

Email: urza@fiumsa.edu.bo

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

---

### Objetivos

La Revista Boliviana de Física (RBF) es el órgano oficial de la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y se publica anualmente 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.

La RBF publica artículos, revisiones y colaboraciones en lengua castellana. Se reciben también artículos escritos en inglés, los que son traducidos al castellano por los editores para su publicación.

### 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  $\LaTeX$  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. En cualquier caso, las figuras deberán ser enviadas preferentemente en formato *postscript* (extensiones .ps o .eps).

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

## CONTENIDO

### A. ARTÍCULOS

EVALUACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS PARA EL ÁREA DE BOLIVIA: COMPARACIÓN CON DATOS DE SUPERFICIE <i>Marcos F. Andrade F. &amp; Luis A. Blacutt B.</i>	1
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA UTILIZANDO MODELOS DE SIS- TEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA E IMÁGENES SATELITALES <i>Marcelo J. Lucano &amp; Iván E. Fuentes M.</i>	13
OBSERVACIÓN DE NEUTRONES SOLARES Y EFECTOS SOBRE EL CAM- PO MAGNÉTICO TERRESTRE ASOCIADOS CON LA FULGURACIÓN SOLAR DEL 2 DE NOVIEMBRE DE 2003 <i>Chamani W. et al.</i>	22

### B. CONTRIBUCIONES Y REVISIONES

DISEÑO DE UN OSCILOSCOPIO MULTICANAL CON FPGA (PROYECTO LAGO) <i>Pedro Miranda Loza &amp; Fabricio G. Ávila Elías</i>	27
DOS PASIONES: LA FÍSICA CÓSMICA Y LAS NIEVES ANDINAS <i>Gral. Ing. José Antonio Zelaya</i>	32

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

XXI REUNIÓN NACIONAL DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA <i>Sociedad Boliviana de Física</i>	35
--	----

### D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE UN PÉNDULO <i>A. R. Ticona Bustillos &amp; G. M. Ramírez Ávila</i>	41
LA OCARINA DE ZANAHORIA <i>Choque Saire M. P.</i>	43
14 <sup>VA</sup> OLIMPIADA BOLIVIANA DE FÍSICA <i>R. Bustos et al.</i>	48