

# LISN: una red para la caracterización del estado actual y pronóstico de la ionosfera en América del Sur

César E. VALLADARES<sup>1</sup>, Jaime VILLALOBOS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Scientific Research, Boston College, Chestnut Hill, Massachusetts (valladar@bc.edu)

<sup>2</sup> Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia (ionosfera@unal.edu.co)

(Recibido, 14 julio 2008; recibido en forma revisada, 29 julio 2008; aceptado, 31 julio 2008)

## RESUMEN:

Este artículo describe las características y presenta recientes mediciones realizadas por el primer observatorio distribuido, que está siendo instalado en América del Sur para estudiar la ionosfera y la alta atmósfera ecuatorial. El observatorio distribuido llamado LISN (Low-latitude Ionospheric Sensor Network) estará constituido por 70 receptores GPS con capacidad para medir parámetros de la ionosfera como el Contenido Electrónico Total (TEC), centelleos de amplitud y fase y perturbaciones ionosféricas más conocidas como TIDs (Traveling Ionospheric Disturbances). La red también incluirá 5 ionosondas y 5 magnetómetros que serán colocados a lo largo del mismo meridiano magnético. Esta red de receptores GPS y de sensores ionosféricos se extenderá de norte a sur del continente Suramericano y al oeste del meridiano de longitud  $-55^\circ$ . Los instrumentos componentes de la red se complementarán entre sí para llevar a cabo, de manera permanente, continua, y espacialmente distribuida, observaciones de la densidad ionosférica, estudiar sus movimientos, y las estructuras e inestabilidades que se desarrollan en esta región dinámicamente activa. La red LISN se complementará con un modelo físico asimilativo que permitirá efectuar una predicción actual de las mediciones ionosféricas tales como la densidad electrónica, conductividad, y desplazamientos ExB del plasma incluyendo los vientos de las partículas neutras. Este nuevo observatorio distribuido permitirá entender la variabilidad de día-a-día así como la estabilidad de la ionosfera en bajas latitudes y hacer predicciones regionales de su estado. Este artículo describe la instrumentación, presenta las primeras mediciones y discute los beneficios científicos que ofrece la red LISN.

**Palabras clave:** observatorio distribuido, contenido total de electrones, vientos termosféricos neutros, electrodinámica, técnica de asimilación.

## ABSTRACT:

This paper describes the characteristics and illustrates the early measurements of the first distributed observatory that is being installed in the South American region to study the low-latitude ionosphere and upper atmosphere. The LISN distributed observatory will be comprised of nearly 70 GPS receivers with the capability to measure Total Electron Content (TEC), amplitude and phase scintillation and Traveling Ionospheric Disturbances (TIDs). The network will include 5 ionosondes able to measure nighttime E-region densities and 5 collocated magnetometers that will be placed along the same magnetic meridian. This network of GPS receivers and ionospheric sensors span from north to south in

the South American continent and west of the 55° West meridian. They will complement each other to provide new, time continuous and spatially extended observations of the background ionosphere, its motion and the embedded structures over this large dynamic region. The LISN network is being complemented with an assimilative physics-based model that will provide a nowcast of the ionospheric electron density, conductivities, ExB plasma drifts, and neutral winds. This new distributed observatory will bring the opportunity to understand the day-to-day variability and the stability of the low-latitude ionosphere and to make forecasts on a regional basis. This paper describes the instrumentation, presents the first measurements and discusses the scientific benefits of the LISN network.

**Key words:** distributed observatory, total electron content, thermospheric winds, electrodynamics, assimilation techniques.

## 1. INTRODUCCIÓN

En bajas latitudes la ionosfera es un ambiente muy dinámico donde las líneas magnéticas son casi horizontales permitiendo que los campos eléctricos originados en las regiones E y F formen imágenes en lugares bien lejanos. En estas latitudes, la energía es transferida a la ionosfera penetrando desde los niveles bajos de la atmósfera por impacto de las mareas atmosféricas, la convección térmica, y las ondas atmosféricas planetarias y de gravedad.

Cuando existen perturbaciones magnéticas las características de la ionosfera son controladas por enormes campos eléctricos de origen magnetosférico. Otros campos eléctricos son creados localmente por el efecto dínamo que la atmósfera neutra perturbada impone en la ionosfera. Durante períodos de condiciones magnéticas tranquilas el viento neutro controla la electrodinámica de la ionosfera. Los vientos neutros que circulan en la termosfera producen corrientes creadas por la diferencia de velocidades entre los iones y electrones como respuesta a la fuerza de colisión. En la región E los iones se mueven casi paralelos al viento y a los campos eléctricos, mientras que en la región F los iones se mueven de manera perpendicular a estas fuerzas. Se generan campos eléctricos polarizados debido a la necesidad de las corrientes de fluir continuamente, es decir, tener una divergencia nula. Estos nuevos campos eléctricos redistribuyen el plasma ionosférico en dirección perpendicular al campo magnético. En la capa E, se forman campos eléctricos polarizados en respuesta a los gradientes latitudinales del viento neutro y a los cambios súbitos de la conductividad que existen al amanecer y anoecer. En la región F, aparecen campos polarizados en respuesta a acumulaciones de carga eléctrica asociadas a vientos zonales que causan un movimiento  $U \times B$  de los iones (dínamo de la región F). El desarrollo de desplazamientos zonales y verticales en la región ecuatorial ha sido también explicado en términos de los procesos dínamo en las regiones E y F (*Rishbeth* 1971a, b; *Heelis* 2004).

Una característica importante de la velocidad vertical de los iones es un repentino incremento que se desarrolla antes de que la velocidad cambie de signo y se vuelva positiva, llamado incremento pre-reverso (PRE de su sigla en inglés) (*Woodman*, 1970). El PRE se forma debido al decaimiento nocturno de la capa E que es altamente conductora y crea un campo eléctrico polarizado en dirección oeste cerca del Terminal diurno (*Farley et al.*, 1986). Cualquier gradiente del viento termosférico

zonal también puede influir el valor del pico del PRE (Crain *et al.*, 1993) e incrementar la variabilidad diaria del PRE. En bajas latitudes la densidad del plasma presenta una característica casi-estacionaria consistente en dos bandas conteniendo plasma de densidades más altas separadas entre 12° y 20° del ecuador magnético. Las dos crestas y el valle intermedio se denominan la anomalía ecuatorial o de Appleton. La anomalía se forma debido al movimiento ascendente del plasma y su consecuente difusión a lo largo de las líneas de campo magnético debido a la fuerza de gravedad y los gradientes de presión (efecto fuente) (Hanson y Moffett, 1966). La anomalía también se puede distinguir en los perfiles latitudinales de TEC. Comienza a producirse alrededor de las 11 horas TL, durante el día se aleja del ecuador a medida que la región F ecuatorial se moviliza a mayores alturas, y alcanza su máximo desarrollo alrededor de las 20 horas TL. Después de las 21 horas TL, algunas veces las crestas de la anomalía se mueven rápidamente hacia el ecuador a medida que la ionosfera ecuatorial desciende. Este último proceso se ha observado y se llama “el efecto fuente inverso” (Sridharan *et al.*, 1993; Balan y Bailey, 1995). Las crestas de las anomalías no siempre son simétricas. Walker *et al.* (1994) indicaron que una asimetría de la amplitud de las crestas y/o del ancho puede producirse por un viento que sopla del hemisferio más caliente (verano) hacia el más frío.

Durante la noche varias condiciones ionosféricas hacen la capa F ecuatorial inherentemente sensible al mecanismo de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor (IRT). En estas condiciones, existe una capa E muy pequeña que no permite cancelar las irregularidades de la región F. El PRE eleva la región F hacia niveles más inestables. Adicionalmente, ondas gravitacionales propagando hacia el este pueden actuar como una semilla creando burbujas del plasma ionosférico. En consecuencia, no es sorprendente que se hayan identificado cerca del ecuador magnético diferentes tipos de estructuras o irregularidades. Las burbujas de plasma, también denominadas plumas (cuando se observan con un radar) o disminuciones de plasma, se originan en la parte más inferior de la región F y pueden alcanzar altitudes superiores a los 2000 km (Woodman y LaHoz, 1976). Ellas son la fuente de los mayores centelleos que se observan en la ionosfera terrestre. Las estructuras casi sinusoidales fueron llamadas “sinusoides del lado inferior” (SLI) por Valladares *et al.* (1983). Otros tipos de estructuras son los trazos tipo “bottomtype” y “bottomside” detectados en la zona inferior de la región F (Hysell y Burcham, 1998), y los ecos casi-periódicos observados en la parte inferior de la región F por Woodman y Chau (2001).

Varios investigadores han correlacionado la existencia de burbujas del plasma con condiciones específicas o un estado particular de la ionosfera en baja latitud. Farley *et al.* (1970) indicaron una asociación de F dispersa con la altitud de la región F. Fejer *et al.* (1999) indicaron una buena relación con la máxima amplitud (> 20 m/s) del PRE. Luego se sugirió que una gran anomalía ecuatorial puede usarse como un precursor de la aparición de los fenómenos de F dispersa (Raghavarao *et al.*, 1988; Sridharan *et al.*, 1994). Valladares *et al.* (2001) correlacionaron la ocurrencia de plumas de radar o fuertes centelleos en la banda UHF con la relación de cresta a valle de la anomalía. Ellos concluyeron que la aparición de plumas de radar o altos niveles de los valores de S4 en la banda L se correlacionan bien con valores de 2, o mayores, en la relación cresta/valle. Más tarde, Valladares *et al.* (2004) indicaron que una región F inestable ocurre no solamente cuando la ionosfera ecuatorial sube

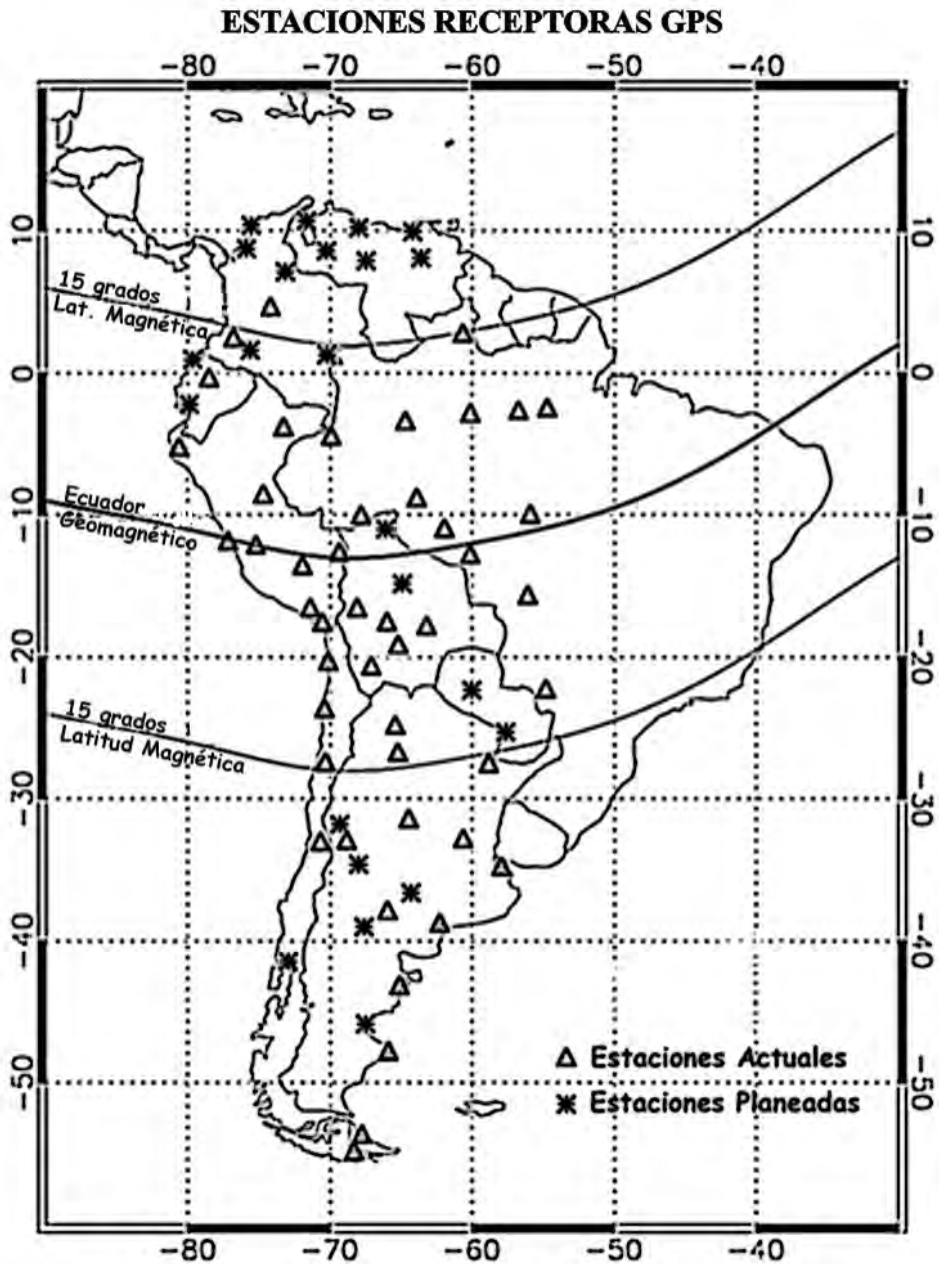
a altas latitudes, sino también cuando se presenta una gran separación latitudinal en las crestas de la anomalía. El desarrollo del primer observatorio en América del Sur es una respuesta de la comunidad de física espacial para investigar con más precisión la dinámica de la ionosfera de bajas latitudes y la alta atmósfera y para desarrollar herramientas que puedan predecir el inicio de las irregularidades del plasma.

## 2. LA RED DE SENSORES IONOSFÉRICAS PARA LATITUDES BAJAS

El observatorio distribuido LISN incluirá 70 receptores GPS con capacidad para medir el contenido total de electrones, el centelleo de amplitud y fase y las perturbaciones viajeras de la ionosfera. La red LISN también tendrá 5 ionosondas modernas con capacidad para medir la capa E durante la noche y 5 magnetómetros instalados con las ionosondas a lo largo de la misma línea magnética. La red de receptores GPS cubrirá un área extendiéndose desde el norte al sur de América del Sur y al oeste del meridiano de longitud  $-55^\circ$ . Los 3 tipos de instrumentos que se utilizan en la red LISN se complementan mutuamente y proporcionarán un nuevo tipo de observaciones, continuas en el tiempo y con gran extensión espacial, de los parámetros básicos de la ionosfera, de su velocidad, y de las irregularidades que se desarrollan en la capa F. Los datos de cada instrumento serán transmitidos en tiempo casi real con una cadencia de 15 minutos a un servidor central que se encuentra en las oficinas del Instituto Geofísico del Perú en Lima. La red LISN operará como un arreglo permanente de instrumentos geofísicos en América del Sur funcionando como un observatorio distribuido. La red LISN ha sido diseñada para medir con precisión el estado caótico y complejo que ocurre en la ionosfera ecuatorial casi todos los días después del ocaso y para observar, en varios lugares simultáneamente, la electrodinámica del sistema ionosfera-termosfera (ITE), y para indagar cómo se crean las condiciones apropiadas para el inicio de turbulencia y estructuras del plasma.

La Figura 1 muestra el lugar donde los receptores GPS han sido y serán instalados. Los triángulos indican receptores GPS que están operando en América del Sur. Algunos de ellos todavía no poseen conexión Internet, como por ejemplo en los países de Argentina, Bolivia y Chile. Los asteriscos corresponden a GPS que serán colocados en los próximos 6 meses como parte del proyecto LISN. Además, se instalarán 5 ionosondas aproximadamente alineadas y uniformemente espaciadas a lo largo de la misma línea magnética que cruza el ecuador magnético en el meridiano de longitud  $-69^\circ$ . Una ionosonda será instalada en Leticia, Colombia, y otra al sur de Antofagasta, Chile, con el fin de observar las densidades en la capas E y F. Las líneas magnéticas que pasan a 100 Km de altura en estas dos estaciones continúan hasta cruzar el ecuador magnético a 250 y 270 Km respectivamente. Una tercera ionosonda será colocada cerca del ecuador magnético en Puerto Maldonado, Perú. Dos ionosondas más serán instaladas en El Leoncito, Argentina, y en Mérida, Venezuela, ambas cerca del lugar de las crestas de la anomalía.

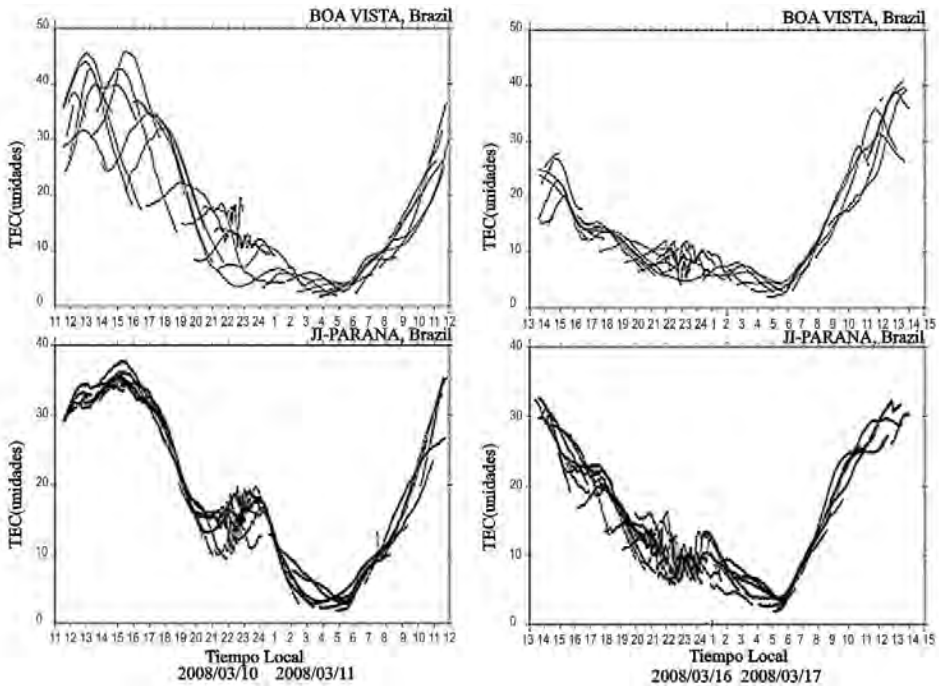
La Figura 2 muestra el valor del TEC en dos estaciones Boa Vista (latitud =  $2.8^\circ$ , longitud =  $-60.7^\circ$ ) y Ji Parana (latitud =  $-10.9^\circ$ , longitud =  $-61.9^\circ$ ) medido durante los días de 06-07 y 10-11 de Marzo de 2008. Boa Vista se encuentra cerca de la cresta de la anomalía y Ji Parana cerca del ecuador magnético. Ambas están cerca de la



**Figura 1.-** Mapa geográfico de los lugares donde los receptores GPS han sido instalados (triángulo) y otros que serán instalados en el futuro (asterisco).

misma línea magnética. La Figura 2 muestra la variabilidad diurna del TEC en función de la hora local de todas las señales GPS que son visibles desde estas 2 estaciones. Cada uno de los 4 paneles muestra también rápidos decrementos del TEC o fluctuaciones que ocurren después de la 19 TL con un período de menos de 1 hora. Estas variaciones de TEC están relacionadas con burbujas del plasma; sin embargo las características de estas fluctuaciones son diferentes en estos 2 días. El 11 de Marzo, los decrementos de TEC tienen amplitudes pequeñas y duran entre las 21 y las 24 horas TL. El 7 de marzo, los decrementos poseen profundidades más grandes y son vistas durante un período más largo (19 – 02 horas). Otra característica importante es la presencia de un crecimiento del TEC nocturno en Ji Parana (parte inferior izquierda) entre las 20 y 01, hora local, en Marzo 11. Este incremento del TEC está ausente el 7 de Marzo. Este tipo de crecimiento del TEC que aparece durante la noche en estaciones cercanas al ecuador magnético ha sido observado con cierta frecuencia (25%) pero no ha sido explicado ni modelado efectivamente.

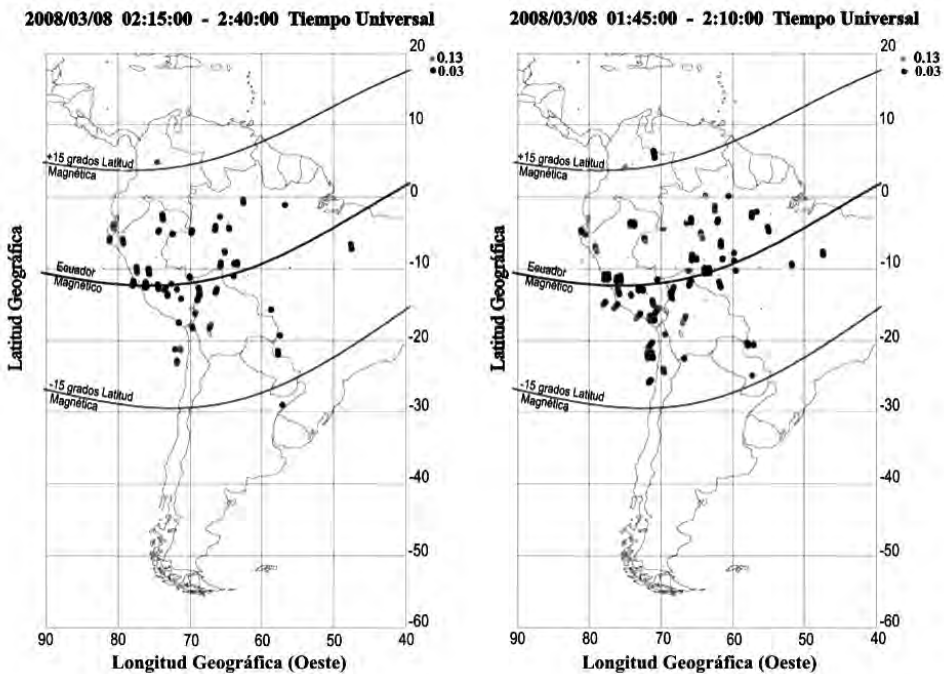
Los perfiles de TEC grabados en Boa Vista muestran características que varían dramáticamente en estos 2 días. El 11 de Marzo, el valor de TEC es superior a 20 TECus hasta las 21 horas TL, pero el día 7 disminuye por debajo de 20 TECus más temprano. En efecto, el valor de TEC es aproximadamente 15 unidades a las 16 horas. Es posible que el crecimiento nocturno del TEC y el desvanecimiento de las fluctuaciones de TEC y del respectivo centelleo, observados en Ji Parana, estén pro-



**Figura 2.-** Valores de TEC medidos el 7 y 11 de Marzo de 2008 en las estaciones de Boa Vista y Ji Parana, ambas en Brasil.

ducidos por el desarrollo del efecto fuente inverso, que ocurrió el 11 de Marzo pero no el día 7. Como se ha indicado anteriormente, el efecto fuente inverso consiste en un desplazamiento del plasma a lo largo del campo magnético pero en sentido contrario, desde altas latitudes hacia el ecuador magnético. Este efecto es producido por el desplazamiento del plasma cerca del ecuador magnético hacia alturas más bajas que, comúnmente, ocurre después de 20 horas TL. Este desplazamiento del plasma produce densidades mas altas lejos del ecuador que generan un fuerza de presión que supera la fuerza de gravedad originando el desplazamiento del plasma hacia el ecuador (Valladares *et al.*, 2004). Este mecanismo sólo puede ser estudiado usando varios instrumentos funcionando en diferentes lugares a lo largo de la misma línea magnética formando un observatorio distribuido. El observatorio LISN tendrá la capacidad para encontrar los mecanismos causantes de la variabilidad diaria de la ionosfera.

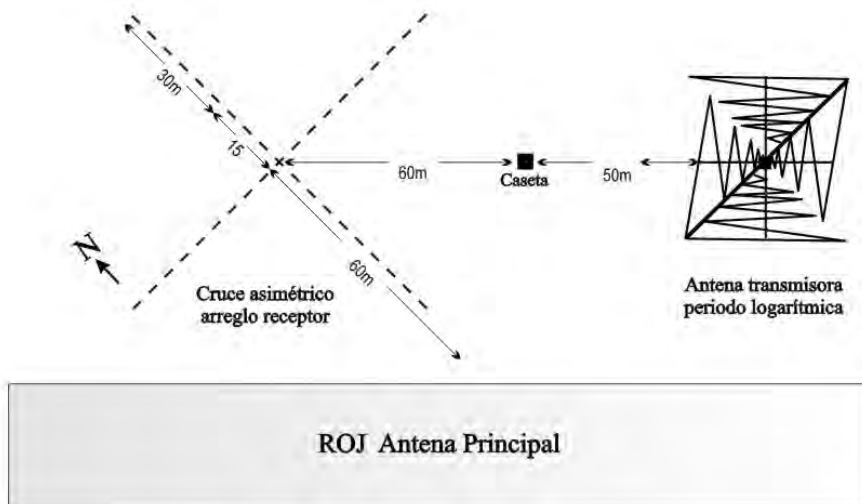
La figura 3 presenta los índices de centelleo medidos en la región Oeste de América del Sur. Ambos paneles muestran los valores de S4 obtenidos durante 25 minutos, correspondiente a los períodos 01h45m–02h10m y 02h15m–02h40m TU del 8 de Marzo de 2008. Estas figuras indican que la amplitud del centelleo y el número de eventos en el primer gráfico están restringido a las longitudes que se extienden entre 55° y 63° Oeste. Este gráfico también señala que en la región



**Figura 3.-** Valores del índice S4 medidos por 30 receptores GPS que operaban en América del Sur el 8 de Marzo de 2008. El valor S4 se calculó usando el nivel de S/R medido por los GPS y substrayendo el nivel de S4 producido por el ruido del receptor.

cercana a  $60^\circ$  Oeste, el centelleo empieza horas después de haber aparecido a  $75^\circ$  Oeste, es decir 2-3 horas después de la puesta del Sol. Los receptores GPS instalados por la red LISN en América del Sur cubrirán casi todo el continente cuando se termine la instalación y se proporcione conexión Internet a los 70 receptores de la red LISN. En bajas latitudes, el centelleo intenso está asociado con la presencia de las burbujas del plasma que consisten en pronunciadas y rápidas disminuciones de la densidad del plasma que se extienden por miles de kilómetros a lo largo de la línea magnética. Estas disminuciones del plasma pueden también ser detectadas en los valores de TEC obtenidos en tiempo real por todas las estaciones. El proyecto LISN tiene como unas de sus metas producir gráficos que cubran grandes regiones mostrando la presencia de las disminuciones del plasma, (burbujas) en un formato similar a los gráficos de centelleo mostrados en la Figure 3. Las disminuciones del plasma pueden tener variaciones del orden de decenas de unidades de TEC que pueden generar errores de posición del orden de varios metros. Adicionalmente, si el centelleo es observado simultáneamente en diferentes canales, entonces se puede producir pérdida en la señal, incluso en la banda de frecuencias L1.

El observatorio LISN contará también con 5 ionosondas completamente digitales que serán instaladas a lo largo de la misma línea magnética que cruza el ecuador magnético cerca del meridiano  $69^\circ$  Oeste. Uno de los propósitos importantes de las ionosondas LISN es medir la densidad en las capas E y E esporádica ( $E_s$ ) durante la noche en ambos extremos de la línea magnética cuando ésta se vuelve inestable. Las ionosondas también proporcionarán medidas continuas de la densidad de plasma ionosférico en la capa F para su empleo en técnicas de asimilación de datos y/o métodos de modelización inversa.

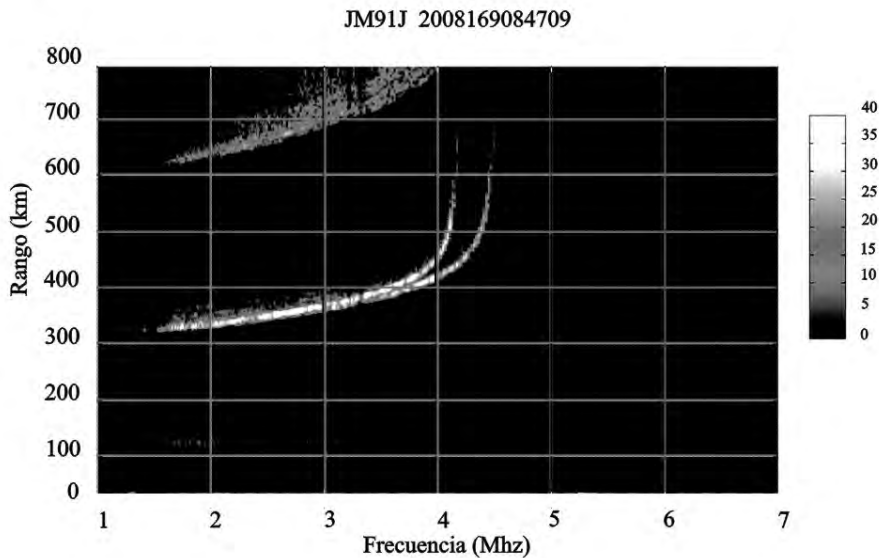


**Figura 4.-** Diagrama esquemático de la antena transmisora (lado derecho) y del conjunto de 8 antenas receptoras (lado izquierdo).



La Figura 4 muestra la distribución de las antenas transmisoras y receptoras que están siendo usadas por la primera ionosonda LISN que ha sido instalada en el observatorio de Jicamarca. Una antena periodo-logarítmica de cuatro torres fue construida en Jicamarca con una respuesta casi lineal en función de la frecuencia transmitida. También existen planes para añadir un dipolo plegado para mejorar la ganancia de la antena en el rango de frecuencias cercanas a 900 kHz. La ionosonda consiste de un radar de altas frecuencias en el rango de 0.1 – 30 MHz con todas las funciones de síntesis de frecuencias, formación de pulsos de transmisión, ancho de banda, y recepción de los ecos definidos en programas computacionales. Los 8 receptores digitales proporcionan una detección perfecta de los 2 componentes en cuadratura (I, Q), y características idénticas entre los receptores sin acoplamiento. Las antenas receptoras constan de 8 dipolos, 4 dispuestos en la dirección norte-sur y 4 distribuidos en la dirección este-oeste. El espaciamiento entre las antenas receptoras es variable lo que sirve para optimizar el cálculo y mejorar la precisión de la medida de los gradientes horizontales de la ionosfera. Combinando las señales medidas por el arreglo de antenas receptoras, se estima con más precisión la dirección de arribo y la polarización de las señales reflejadas. El cálculo final da la densidad de electrones y los gradientes de la ionosfera en 3 dimensiones.

En el momento de escribir este artículo, una de las ionosondas LISN está siendo probada en el radio observatorio de Jicamarca con el fin de determinar las condiciones óptimas que permitan cumplir con las metas del proyecto LISN. Uno de los objetivos es medir la capa E y capas E esporádicas que se han observado conteniendo densidades tan bajas como  $10^4$  electrones/cm<sup>3</sup>. Para cumplir con este cometido el barrido en frecuencia empezará a 900 kHz. Esta frecuencia se sitúa en la mitad de

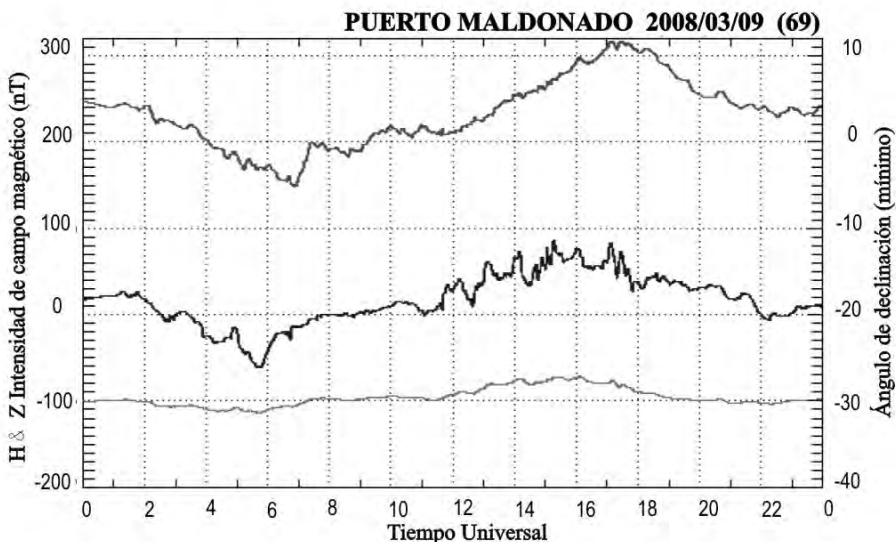


**Figura 5.-** Ionograma medido en el Observatorio de Jicamarca usando la primera ionosonda LISN. La nueva ionosonda fue diseñada y construida por Terence Bullett y Robert Livingston.

la banda designada para radios AM, lo que implica evitar la transmisión cuando se encuentre una estación local. Igualmente se está probando la respuesta en frecuencia de la antena transmisora a estas bajas frecuencias y se está intentando mejorar la estadística de la señal recibida usando códigos de fase. Igualmente se están probando otro tipo de antenas transmisoras. La Figura 5 muestra un ionograma medido en Jicamarca a las 01h27m38s del 18 de Junio de 2008 utilizando la primera de las ionosondas LISN. Esta es una de las primeras mediciones que han sido realizadas con el nuevo sistema en Jicamarca. Es importante mencionar que en este observatorio, debido a su situación próxima al ecuador magnético, los ecos de la capa E están generalmente acompañados con una fuerte dispersión causada por las irregularidades que se forman por la presencia del electrochorro ecuatorial. En alturas mayores de 300 km se puede observar los ecos provenientes de los modos ordinario (O) y extraordinario (X). Una dispersión bien pequeña es visible entre las frecuencias 1.5 y 3 MHz. Estas frecuencias indican el inicio de la F dispersa que ocurrió durante esta noche. Los ecos en alturas por encima de 600 km corresponden al primer rebote de la ionosfera.

### 3. EL MAGNETÓMETRO LISN

El prototipo de un nuevo magnetómetro que mide los tres componentes del campo magnético ha sido diseñado por Oscar Veliz del observatorio de Jicamarca con el fin de contar con un instrumento económico y eficiente que pueda ser usado



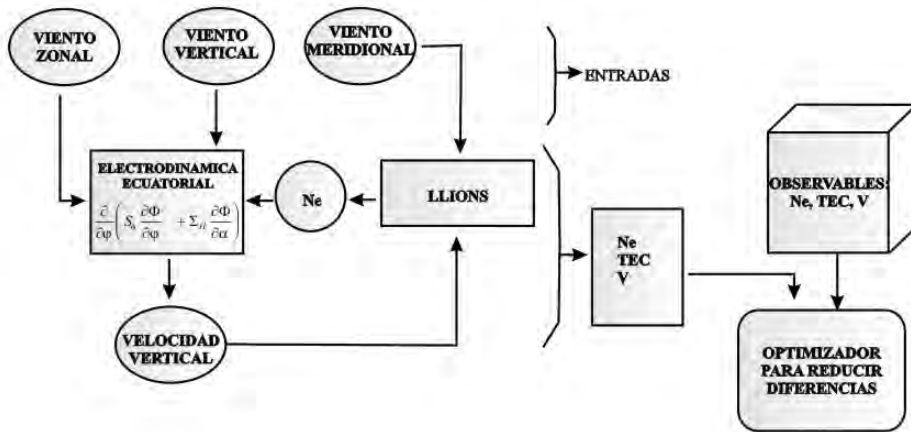
**Figura 6.-** Componentes del campo magnético medido en Puerto Maldonado el 9 de Marzo de 2008. La curva superior indica la variación de la componente D en minutos de arco. Las curvas intermedia e inferior corresponden a los valores H y Z medidos en nT.

en América del Sur o en otros lugares con condiciones climáticas parecidas. El nuevo magnetómetro ha sido calibrado para operar con éxito en climas cálidos y húmedos como generalmente se encuentra en la región Amazónica, o fríos y secos como predomina en el lado oeste de los Andes. Los magnetómetros LISN tienen una alta sensibilidad y una resolución del campo de 0.1 nT. El diseño electrónico y la construcción del sistema (circuitos impresos de múltiples capas) aseguran una estabilidad mecánica y térmica de larga duración. El sistema también incluye una interfase robusta con la posibilidad de enviar datos vía Internet cada 5 minutos. La Figura 6 muestra los 3 componentes del campo magnético medidos en Puerto Maldonado el 9 de Marzo del 2008. El campo magnético presenta la variación típica diurna que en este día no fue tan diferente de las variaciones observadas en Ancón que está situado 850 km al Oeste. El magnetómetro de Puerto Maldonado ha operado continuamente durante 4 meses enviando los datos a nuestro servidor en Lima. Los gráficos diarios del campo magnético pueden obtenerse en la página Web de LISN. La construcción de los 4 otros magnetómetros ha sido terminada conjuntamente con las pruebas de los mismos. Estos equipos serán instalados a lo largo del meridiano LISN (69° Oeste).

#### 4. ASIMILACIÓN DE DATOS

El alto número de sensores disponibles ahora y otros que pronto estarán instalados en América del Sur presenta un nuevo desafío en la síntesis de la información, asimilación de los resultados, y comparación de los datos experimentales con las predicciones de los modelos físicos. El propósito de la asimilación es usar toda la información que está disponible y determinar tan exactamente como sea posible el estado de la ionosfera ecuatorial. La información puede ser directa, como la densidad y vientos medidos con satélites, o indirecta como el TEC medido con receptores GPS y los perfiles de rango-frecuencia registrados con ionosondas. Otra fuente de información consiste en los principios físicos que gobiernan la dinámica de los procesos a medir. Todos estos tipos de informaciones pueden ser introducidos en un modelo de asimilación. Una de las técnicas más importantes en asimilación de datos son los filtros Kalman (*Kalman*, 1960), empleados frecuentemente en meteorología y oceanografía, no solamente para asimilar y combinar datos de diferente sensores, sino también para formar la base de un programa numérico para predecir el clima.

El diagrama de flujo de la Figura 7 muestra los algoritmos de procesamiento y la secuencia en que serán requeridos para realizar el modelado inverso y la estimación de los parámetros de control o entrada del sistema ionosfera-termosfera. Los parámetros de entrada al método de inversión consistirán de un conjunto de valores de los 3 componentes de los vientos neutros. La variación de estos valores será escogida de acuerdo a valores típicos de los vientos medidos con cohetes, satélites o interferómetros de tipo Fabry-Perot. El modelo LLIONS produce valores de la densidad numérica en 3 dimensiones y la composición de iones en cualquier sector longitudinal desde 90 hasta 4000 km de altura (*Anderson* 1971, 1973). LLIONS realiza este cometido resolviendo las ecuaciones de continuidad



**Figura 7.-** Diagrama de flujo para hacer un modelado inverso de las observaciones LISN. Esta técnica numérica determinará el estado de la ionosfera y la magnitud de los parámetros de control ionosféricos.

y de movimiento a lo largo de una línea magnética en un marco de referencia que es transportado perpendicularmente al campo magnético. Este modelo tiene en cuenta la difusión a lo largo del campo magnético, los vientos termosféricos, los cambios en la composición de los neutros, la producción de iones debida a la radiación solar en las bandas UV y EUV, la iluminación de las estrellas, los rayos X, la conducción térmica, y las reacciones químicas entre iones y neutros. Las entradas al modelo LLIONS son la distribución de las partículas neutras, el viento meridional y la velocidad vertical del plasma. El modelo LLIONS será inicializado usando los valores de la velocidad vertical iónica dados por el modelo empírico de *Fejer y Scherliess (1999)*, y un conjunto de valores del viento meridional para obtener una representación global – en 3 dimensiones – de la densidad del plasma. Estos perfiles de la densidad del plasma se utilizarán para calcular cantidades promediadas a lo largo del campo magnético que son necesarias para resolver la ecuación de la electrodinámica en la ionosfera ecuatorial. Estas operaciones están representadas en el lazo de la parte inferior izquierda. Diferentes conjuntos de perfiles de vientos zonales y verticales para todas las latitudes y longitudes usadas en el sistema constituyen entradas adicionales a la ecuación de la electrodinámica. La salida más importante de esta ecuación es la velocidad vertical del plasma que será después utilizada para iterar y controlar el modelo LLIONS. El ciclo LLIONS-electrodinámica será repetido secuencialmente hasta completar un día entero de simulaciones usando 288 iteraciones de 5 minutos cada una. Se planea la simulación de unas 10x10x10 combinaciones de los vientos neutros para completar el proceso de simulación inversa. La fase final de este proceso consiste en un proceso de minimización del error entre los resultados de las simulaciones y las mediciones. Este método nos permite seleccionar la especificación más óptima de los parámetros controladores de la ionosfera ecuatorial.

## 6. CONCLUSIONES

La instalación del observatorio LISN está progresando rápidamente. En el momento de escribir este artículo se cuenta con 35 receptores GPS, 1 magnetómetro y una ionosonda instalados y enviando datos al Servidor central en Lima, Perú. La primera ionosonda fue instalada en el observatorio de Jicamarca en Junio de 2008 con el fin de realizar una serie de pruebas, ayudar a desarrollar los programas de operación más óptimos, y comparar las mediciones del nuevo sistema con las densidades tomadas con el radar incoherente. También se está estudiando la respuesta en frecuencia de la antena transmisora y su adaptabilidad para operar en frecuencias tan bajas como 900 kHz. Otra de las tareas a desarrollar en Jicamarca consiste en determinar la mejor configuración y la distancia óptima entre los dipolos receptores con el fin de maximizar la capacidad de la ionosonda para medir el lugar originario de los ecos y los gradientes del plasma ionosférico. En la página WEB de LISN (<http://jro.igp.gob.pe/lisn/>) se pueden encontrar varios tipos de gráficos que muestran resultados en tiempo real del TEC medido en más de 30 estaciones GPS y de varios magnetómetros. Es importante recalcar que la red LISN junto con la asimilación de datos proporcionará una caracterización en tiempo real de la densidad del plasma ionosférico, las conductividades a lo largo del campo magnético, la velocidad del plasma y el valor del viento meridional. Uno de los propósitos del proyecto LISN, es usar datos del radar de Jicamarca para validar los resultados de la asimilación y luego extender la asimilación incorporando valores de la densidad y velocidad medidos en Jicamarca. El objetivo principal del observatorio LISN es obtener nuevas y más completas mediciones que son necesarias para resolver varias incógnitas científicas relacionadas con (1) la importancia de las capas E esporádicas para favorecer o inhibir el desarrollo de la F dispersa, (2) la detección y el papel de las ondas de gravedad atmosféricas para iniciar la inestabilidad que origina las burbujas del plasma, y (3) determinar las causas de la abrupta variabilidad en longitud que existe en la estadística de las burbujas del plasma en América del Sur.

## 7. RECONOCIMIENTOS

Nos es grato resaltar la ayuda recibida del Dr. Ronald F. Woodman, quien sugirió instalar dos ionosondas, una en cada uno de los finales de la línea magnética. Agradecemos a todos los participantes del equipo LISN, muy en especialmente a Jorge Chau, Claudio Brunini, Eurico de Paula, Jorge Araya, José Luis Albornos, Marta Mosert y Elizabeth Silvestre. El trabajo realizado en Boston College tuvo el soporte financiero de NSF con el contrato ATM0521487.

## 8. REFERENCIAS

ANDERSON D. N. (1971). Daily variation of the ionospheric F2 equatorial anomaly in the American and Asian sectors, cooperative thesis, 24pp. 1-144, *Natl. Cent. Atmos. Res.*, Boulder, Colo.

- ANDERSON D. N. (1973). A theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly, I, Theory, *Planet. Space Sci.*, 21, 409.
- BALAN, N., and G. J. BAILEY. (1995). Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer, *J. Geophys. Res.*, 100, 21,421.
- CRAIN, D.J., R.A. HEELIS, G.J. BAILEY, and A.D. RICHMOND. (1993). Low-latitude plasma drifts from a simulation of the global atmospheric dynamo, *J. Geophys. Res.*, 98, 6039.
- FARLEY, D. T., B. B. BALSLEY, R. F. WOODMAN, and J. P. McCLURE. (1970). Equatorial spread F: Implications of VHF radar observations, *J. Geophys. Res.*, 75, 7199.
- FARLEY, D.T., E. BONNELLI, B.G. FEJER, and M.F. LARSEN. (1986). The pre-reversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 91, 13723.
- FEJER, B.G., L. SCHERLISS, and E.R. DE PAULA. (1999). Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F, *J. Geophys. Res.*, 104, 19859-19869.
- HANSON, W. B., and R. J. MOFFETT. (1966). Ionization transport effects in the equatorial F region *J. Geophys. Res.*, 71, 5559.
- HEELIS, R. A. (2004). Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: A tutorial, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 66, 825-838.
- HYSELL, D. L., and J. D. BURCHAM. (1998). JULIA radar studies of equatorial spread F, *J. Geophys. Res.*, 103, 29155.
- KALMAN, R.E., A new approach to linear filtering and prediction problems. (1960). *J. Basic Eng.*, 82D, 35.
- RAGHAVARAO, R., M. NAGESHWARARAO, J. HANUMATH SASTRI, G. D. VYAS, and M. SRIRAMARAO. (1988). Role of equatorial ionization anomaly in the initiation of equatorial spread-F, *J. Geophys. Res.*, 93, 5959.
- RISHBETH, H. (1971a). The F layer dynamo, *Planet. Space Sci.*, 19, 263-267.
- RISHBETH, H. (1971b). Polarization fields produced by winds in the equatorial F region, *Planet. Space Sci.*, 19, 357.
- SRIDHARAN, R., R. SEKAR, and S. GURUBARAN. (1993). Two-dimensional high-resolution imaging of the equatorial plasma fountain, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 55, 1661.
- SRIDHARAN, R., D. PALLAMRAJU, R. RAGHAVARAO, and P. V. S. RAMARAO. (1994). Precursor to equatorial spread-F in OI 630.0 nm dayglow, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2797.
- VALLADARES, C.E., W.B. HANSON, J.P. McCLURE, and B.L. CRAGIN. (1983). Bottomside sinusoidal irregularities in the equatorial F region, *J. Geophys. Res.*, 88, 8025.
- VALLADARES C.E., S. BASU, K. GROVES, M.P. HAGAN, D. HYSELL, A. MAZZALA, R. SHEEHAN. (2001). Measurements of equatorial spread-F ionospheric conditions using a latitudinal chain of GPS receivers, *J. Geophys. Res.*, 106(A12), 29133-29152.
- VALLADARES C.E., J. VILLALOBOS, M.P. HAGAN, and R. SHEEHAN. (2004). Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers, *Ann. of Geophys.*, 22, 3155 - 3175.

- WALKER, G. O., J. H. K. MA, and E. GOLTON. (1994). The equatorial ionospheric anomaly in electron content from solar minimum for South East Asia, *Ann. Geophys.*, 12, 195.
- WOODMAN, R.F. (1970). Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator, *J. Geophys. Res.*, 75, 6249.
- WOODMAN, R.F., and C. LAHOZ. (1976). Radar observations of F region equatorial irregularities, *J. Geophys. Res.*, 81, 5447.
- WOODMAN, R.F., and J.L. CHAU. (2001). Equatorial quasiperiodic echoes from field-aligned irregularities observed over Jicamarca, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 207.