



INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU
Dirección de Asuntos Académicos

**COMPENDIO DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN
REALIZADOS POR ESTUDIANTES
DURANTE EL AÑO 2008**

Volumen 10

Editor
Hernando Tavera

Lima - Perú
Enero 2009

PROLOGO

Durante el año 2008, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha recibido hasta 10 estudiantes en pasantía provenientes de diversas universidades cuyas especialidades tienen relación con los diferentes campos de investigación que se desarrollan en su seno. Es importante reconocer que la Dirección de Sismología recibió en pasantía a dos estudiantes provenientes de la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo – Francia. Terminando el periodo de capacitación, cada estudiante procede a elaborar su respectivo informe que da origen a un artículo técnico-científico a ser divulgado en el “*Compendio de Trabajo de Investigación realizado por estudiantes durante el Año 2008*”, bajo responsabilidad de la Dirección de Asuntos Académicos. Esta tarea se ha iniciado en el año 2000 y a la fecha se cuenta con nueve volúmenes que reúnen los trabajos realizados por los estudiantes en cada año.

Este año se edita el volumen 10 de dicho compendio con un total de 9 artículos elaborado por estudiantes que realizaron sus estancias en los Observatorios de Jicamarca y Mayorazgo. En general los artículos consideran temas de Alta Atmósfera, Sismología, Astronomía, Tiempo y Clima.

El comité editorial espera que el contenido de los diversos temas que se presenta en este volumen motive a los investigadores a continuar en su labor de formación de futuros profesionales en el campo de la geofísica, y a los estudiantes de ser merecedores del esfuerzo que ellos realizan.

El Editor

PRESENTACION

El volumen 10 de la serie "*Compendio de Trabajos de Investigación realizados por estudiantes durante el año 2008*", reúne los diversos trabajos técnico-científico realizados por estudiantes universitarios durante su permanencia en el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el año 2008. Como cada año, los estudiantes ingresan al IGP a través de la Dirección de Asuntos Académicos (DAA), para realizar sus estancias y tienen como procedencia las especialidades de Física, Geofísica, Geología, Meteorología e Ingeniería Electrónica de las diferentes universidades existentes en el país. Los estudiantes desarrollan un determinado tema de investigación durante un periodo de 3 meses para luego presentar sus resultados en un informe técnico-científico. Estos informes son entregados a la DAA, quien a su vez los publica a manera de artículos en el presente *Compendio*.

La tarea de divulgar el conocimiento en forma de trabajos científicos, es uno de los objetivos que el IGP esta cumpliendo con meritorio esfuerzo y obtiene como resultado la formación de nuevos profesionales con la capacidad de realizar trabajos de investigación de alto nivel. De esta manera el IGP contribuye en mejorar la capacidad científica de los profesionales en el campo de la geofísica.

En este *Compendio* se presenta 9 trabajos elaborados por estudiantes que realizaron sus estancias en los Observatorios de Jicamarca y Mayorazgo. Los temas tratados fueron Pronóstico del Tiempo y Clima, Alta Atmósfera y Sismología. Muchos de los trabajos que se presentan en este *Compendio* han sido punto de partida para que algunos estudiantes profundicen sus investigaciones e inicien la elaboración de su tesis profesional.

En general, los temas de investigación y el contenido de los artículos que se presentan en el *Compendio* son de responsabilidad del investigador que tuvo a su cargo la formación del estudiante; mientras que, el comité editorial se limito a organizar la estructura del artículo de acuerdo al formato del *Compendio*.

El Comité Editorial del Volumen 10 de estos *Compendios*, agradece al Dr. Hernan Montes (Director Técnico del IGP) por su confianza y apoyo, así como a los investigadores del IGP por aceptara revisar los trabajos, presentados en el *Compendio*. A los estudiantes por el empeño puesto en la aventura de investigar y escribir sus resultados, siendo el único camino para llegar a descubrir todo lo enigmático que nos ofrece la naturaleza.

El Editor

INDICE

Prologo Presentación Contenido

Desarrollo De Una Aplicación De Adquisición Para La Tarjeta Echotek Ge-314 Sobre La Plataforma Win32 (Windows Xp Sp3). <i>Alan R. Aguilar Sologuren</i>	9
Estudio de la Factibilidad del Mejoramiento de las Comunicaciones de Voz y Datos Vía el Electrochorro Ecuatorial Empleando Diversidad. <i>Nadia Yoza Mitsushii</i>	21
Sistema de Adquisición para Radar Basado en Receptores Digitales Desarrollado en el Radio Observatorio De Jicamarca. <i>Rita J. Abad Lima</i>	37
Uso del Método de Diferencias Finitas Aplicado al Análisis de Estabilidad de Taludes. <i>Luis M. Ocampo Quito</i>	47
Estimación Del Contacto Sismogenico En El Borde Occidental Del Perú. <i>Patricia A. Guardia Anampa</i>	65
Pronóstico de la Precipitación y las Temperaturas Extremas en la Cuenca del Río Mantaro Utilizando el Modelo MARS por Cada Mes con Tres Meses De Anticipación. <i>Karen Latinez Solomayor</i>	87
Desarrollo De Un Modelo Estadístico Para El Pronóstico de Precipitación Y Temperaturas Extremas del Aire para Huancayo. <i>Karen Latinez Solomayor</i>	114
El Cielo Diurno de la Temperatura del Aire Observada en Lircay, Huancavelica. <i>Cinthia S. Arellano Rojas</i>	131
Estudio Sísmico Y Sismotectonico De La Región Central Del Perú Desde 1980 Hasta 2008. <i>Olivia Collet y Nelly Rodrigues</i>	143

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DE ADQUISICIÓN PARA LA TARJETA ECHOTEK GC-314 SOBRE LA PLATAFORMA WIN32 (WINDOWS XP SP3)

ALAN ROBERTO AGUILAR SOLOGUREN

*Sección Electricidad y Electrónica
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú
aaguilar@iro.igp.gob.pe*

*Investigación dirigida por: Ing. Karim M. Kuyen
Radio Observatorio de Jicamarca -IGP*

RESUMEN

El presente trabajo describe el programa de adquisición, desarrollado, específicamente para la tarjeta de adquisición EchoTek GC-314; la cual, en nuestro caso trabajará sobre la plataforma de windows (XP SP3). Para lograr este propósito, se aprovechó la escalabilidad que brindan procesadores multinúcleo (en este caso un Intel Core 2 Quad) para obtener una ejecución en paralelo de las diferentes tareas de dicha aplicación; además se utilizó una extensión de tiempo real (RTX) para disminuir las latencias prolongadas que se generan en el sistema operativo WindowsXP, lo cual es perjudicial para una aplicación que debe realizar determinado número de tareas en un tiempo determinado. De este modo, se podrá adquirir datos continuamente, en los periodos establecidos, en un formato que puedan leer las aplicaciones utilizadas en el Radio Observatorio de Jicamarca.

INTRODUCCIÓN

En el Radio Observatorio de Jicamarca, se toman muestras obtenidas de los radares cada determinado número de microsegundos; por esto, sería muy difícil desarrollar una aplicación bajo WindowsXP en la cual, los tiempos medidos en microsegundos son importantes, y tener la certeza de que el sistema será confiable.

Debido a lo anterior, se ha visto la necesidad de instalar sobre Windows una extensión de tiempo real (RTX), la cual trabaja al mismo nivel que el sistema operativo; y se comporta como en un sistema de tiempo real fuerte (Hard Real-Time). De esta manera ganamos determinismo y disminuimos las latencias de ejecución; además, obtenemos

temporizadores más confiables que cuentan con una resolución medida en nano segundos.

El desarrollo de esta aplicación se basa en la implementación de dos buffers en la memoria RAM; de los cuales, uno recibirá un flujo de datos (muestras adquiridas) proveniente de la tarjeta de adquisición EchoTek GC-314, y el otro, de estar lleno de datos, se almacena en algún lugar del disco duro. Mientras esto pasa, el sistema observa el estado de los FIFO's de la tarjeta EchoTek GC-314 y de los buffers en RAM para realizar las tareas pertinentes. Estas últimas, se encargan de vaciar las FIFO's, en caso de desbordamiento, o conmutar los buffers cuando aquel que recibe datos de la EchoTek GC-314 se llena.

Primero se hará una pequeña descripción de la forma en que la aplicación almacena datos en el disco duro, luego se mostrará el proceso de adquisición y finalmente se mostrará los diagramas de flujo correspondientes a la adquisición de muestras.

DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN:

Formato para Datos Crudos:

Para almacenar los datos, éstos deben ser reordenados en una forma que pueda ser leída por los programas de visualización con los que cuenta el Radio Observatorio de Jicamarca. En las Figuras 1 y 2 a continuación, "CHx" representa una muestra adquirida por el canal "x"; "Hy", advierte que las muestras constituyen información de la misma altura, adquirida en un periodo de muestreo correspondiente a "y", por los tres canales.

La Figura 1 muestra el formato de ordenamiento de datos para un perfil (datos adquiridos durante un periodo de interpulso -IPP-); en él se puede ver que las muestras se acumulan en orden de adquisición; es decir, primero la primera muestra adquirida por el canal 1, el canal 2 y el canal 3; luego la segunda muestra adquirida por estos canales y así sucesivamente hasta alcanzar el número de muestras por perfil determinado durante la configuración de la tarjeta de adquisición. ("n" en la Figura 1).

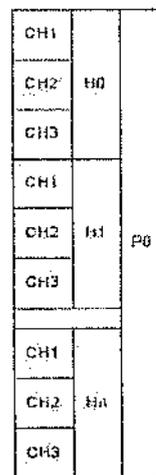


Figura 1: Trama de un Perfil.

En la Figura 2 se muestra como se ordenan los perfiles que se van adquiriendo en el tiempo, para un bloque de muestras, hasta alcanzar "m" perfiles.

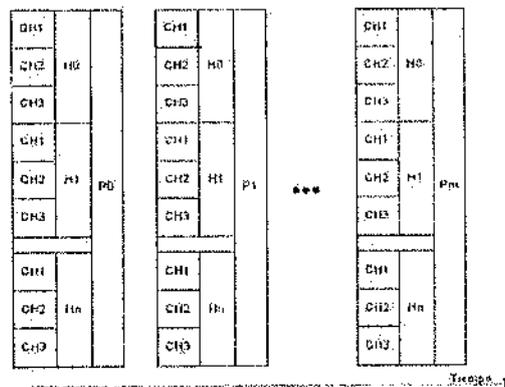


Figura 2: Tramas en el tiempo

Finalmente los bloques son dispuestos uno tras otro, en orden temporal, hasta completar el número de bloques requeridos por cada archivo para el experimento. Cada bloque es "etiquetado" con una cabecera ("Header x" en la Figura 3), que brinda información temporal y de secuencia del bloque que le sucede [1]. En la Figura 3, se muestra un ejemplo simbólico de adquisición, donde cada bloque contiene "s" perfiles y la adquisición cuenta con "q" bloques.

Esquema de adquisición:

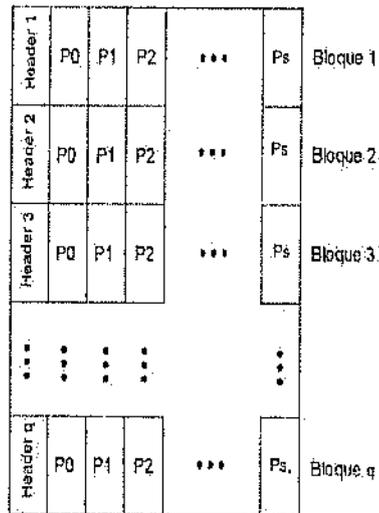


Figura 3: Formato de un archivo completo.

Cuando la Echotek GC-314 adquiere, transfiere las muestras a pequeños buffers ubicados en la RAM de la PC. Cada uno de estos buffers, está asociado a una petición de transferencia solicitada al DMA, y cada petición de transferencia está asociada con un buffer para cada canal; con esto, tenemos 3 buffers pequeños (uno por canal) luego de cada transferencia. La Figura 4 muestra, en la parte superior, la transferencia simultánea de muestras desde los tres canales, en el tiempo. Cuando la transferencia acaba, la Echotek GC-314 activa una interrupción usada para copiar estos pequeños buffers a un buffer más grande ubicado en RAM, cuya función es la de acumular muestras de forma ordenada para almacenarlas en disco duro. En total se utiliza dos de estos

buffers "grandes".

Cuando uno de los dos buffers (buffers "grandes") está lleno, el sistema avisa a una función especial (StoringBuffToFile), la cual es implementada como un "thread", para que almacene este buffer en el disco duro. Durante el almacenamiento, este "thread" incluirá las respectivas cabeceras propias del formato Jicamarca. Esta función tendrá un contador para llevar la cuenta de cuantos bloques de perfiles va almacenando; cuando este contador llegue al número requerido, se detiene el proceso y el archivo adquirido se completa.

En la parte inferior de la Figura 4, se muestran los buffers "grandes" mencionados anteriormente; además muestra dos punteros (pActiveBuff y pStoringBuff) los cuales sirven para dirigir el flujo de los datos. Uno de ellos (pActiveBuff) se utiliza para dirigir los datos (muestras adquiridas y almacenadas en los buffers pequeños asociados a las peticiones de transferencia DMA) a uno de los buffer "grandes"; el otro (pStoringBuff) se utiliza para dirigir las muestras almacenadas en uno de los dos buffers (aquel que no recibe el flujo de datos dirigido por pActiveBuff) a alguna unidad de almacenamiento (generalmente disco duro).

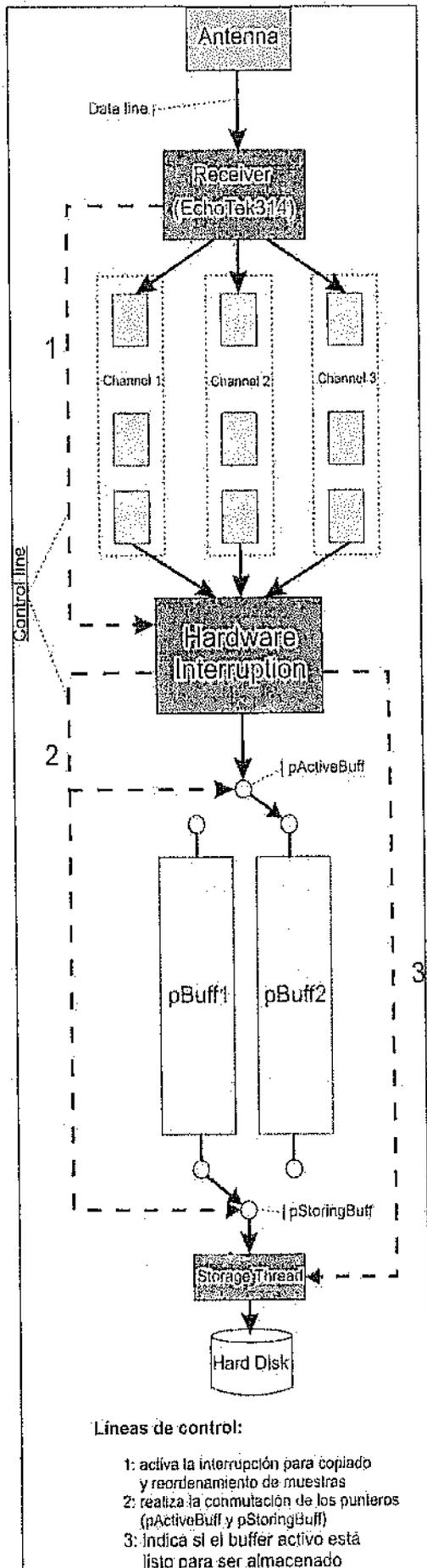


Figura 4: Esquema de adquisición

Además se han definido algunos eventos, para realizar ciertas tareas cuando algo sucede.

Cuando el buffer que recibe el flujo de datos desde la Echotek GC-314 se llena, pActiveBuff y pStoringBuff conmutan; así el buffer que está lleno podrá ser almacenado y el buffer que ha sido almacenado podrá re-utilizarse. Cuando ocurre un desbordamiento en las FIFO's de la Echotek GC-314, la adquisición se suspende, se borra el contenido de estas FIFO's, se elimina el bloque completo y finalmente la adquisición se reanuda.

Diagramas de flujo (sólo adquisición) Función PrepToAcq:

Esta función se encarga de preparar a la Echotek GC-314 y a la aplicación para iniciar la adquisición; además crea los buffers y crea las estructuras necesarias para realizar las peticiones de transferencia de datos al DMA. Inicializa los eventos de finalización de adquisición, suspensión de adquisición (este último utilizado cuando ocurre un error de desborde en alguna FIFO de la Echotek GC-314) y crea los "threads" de control de transferencia (DmaTransferDone) y almacenamiento en disco (StoreBuffToFile). Luego hace una llamada al iniciador de la adquisición. Finalmente espera, sin ocupar tiempo de procesamiento, que los "threads" creados terminen y finaliza borrando los FIFO's y

liberando la RAM utilizada.

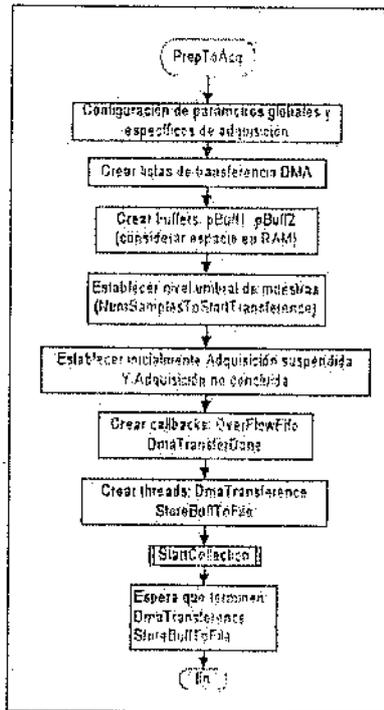


Figura 5: Función PrepToAcq

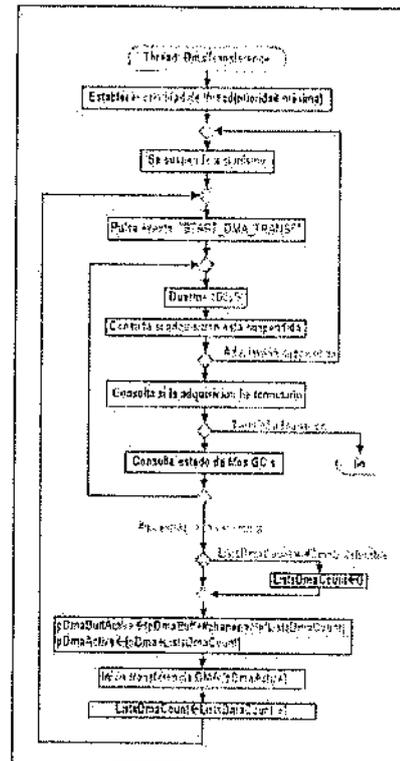


Figura 6: thread DmaTransference

Función ("thread") DmaTransference:

Al ejecutarse se establece como de "prioridad máxima" ante el sistema operativo (Windows y el subsistema de tiempo real RTX), para asegurar la ejecución continua de este "thread", dándole preponderancia sobre cualquier otro "thread" que esté ejecutándose simultáneamente. Luego se suspende a sí mismo (temporalmente) para esperar que le indiquen cuando empezar la adquisición (esta tarea la hace la función

"StartCollection"); esto se hace con la finalidad de sincronizar las tareas durante la adquisición. Luego, al ser indicado el inicio de la adquisición, se reanuda su ejecución y avisa al sistema que va a comenzar una transferencia de datos.

Después entra en un lazo en el cual verifica si la adquisición entró en un estado de suspensión o si ha terminado; luego de lo cual, verifica el estado de las FIFO's de la Echotek GC-314, para ver si ya se adquirió el nivel umbral de datos establecido para iniciar la transferencia; de ser así, inicia un transferencia de datos desde los FIFO's de la Echotek GC-314 a la PC. Este lazo establece un ciclo que se repite cada 100 us hasta que se suspenda la adquisición, hasta que se obtenga dicho nivel umbral o hasta que termine el proceso.

Si se suspende la adquisición, este "thread" se suspende a sí mismo hasta que se restablezca y se reinicie la adquisición.

Función (“thread”) StoreBuffToFile

Al igual que el anterior, este “thread” se establece a sí mismo como de “prioridad máxima”. Posteriormente espera sin ocupar tiempo de procesamiento hasta que ocurra el evento que le indica que hay un buffer listo para ser almacenado. Cuando este evento ocurre, este “thread” introduce la cabecera del formato Jicamarca para el almacenamiento de datos crudos y almacena el buffer apuntado por pStoringBuff en disco duro. Luego de ser almacenado el buffer, que contiene la información equivalente a un bloque de muestras, aumenta en uno un contador de bloques almacenados, que después compara con el número de bloques requerido para dar por terminado un archivo o no. Si la adquisición no termina se repite el lazo, tal como se ve en la *Figura 7*, y espera que el siguiente buffer se llene para iniciar un nuevo almacenamiento.

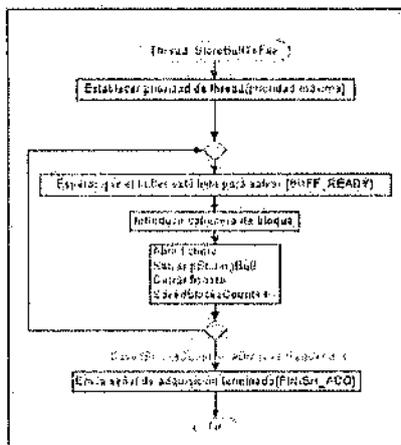


Figura 7: StoreBuffToFile

Función (interrupción)

DmaTransferDone:

Cuando el DMA termina de transferir cierto número de perfiles de la Echotek GC-314 a la PC, se genera una interrupción que ejecuta una función de servicio. Esta función copia los pequeños buffers asociados a la petición de transferencia DMA activa, a uno de los buffers “grandes” (apuntado por pActiveBuff); para lo cual reordena las muestras, de forma tal que se obtenga un formato que pueda ser leído por las aplicaciones de visualización utilizadas en el Radio Observatorio de Jicamarca. CpyIndex, es un índice (offset) el cual se suma a la dirección del buffer para obtener la dirección del siguiente espacio vacío en dicho buffer.

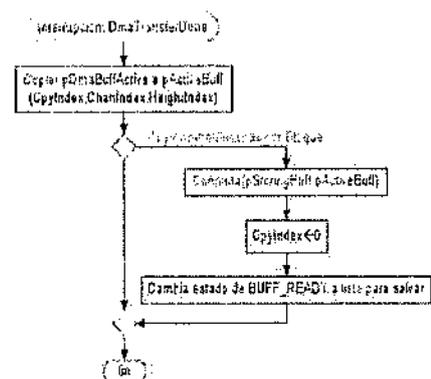


Figura 8: rutina de servicio de interrupción DmaTransferDone

La Figura 9 muestra el uso CpyIndex para acceder al buffer; pBuffx representa a cualquiera de los dos buffers “grandes” (pBuff1 o pBuff2). Cuando CpyIndex es igual al número de muestras por bloque

(lo que es lo mismo que decir que se ha copiado un bloque), se conmutan los punteros de los buffers, se reinicializa CpyIndex para hacer una nueva cuenta y se activa el evento que indica que hay un buffer listo para almacenar.

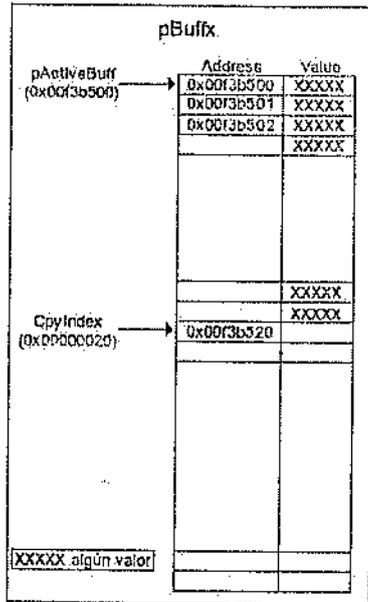


Figura 9: pBuffx: representa a uno de los buffer que acumulan datos en RAM (pBuff1/2)

Función StartCollection

Primero inicializa los punteros pStoringBuff (usado para el almacenamiento de datos en disco), pActiveBuff (usado para copiar y reordenar los datos adquiridos, desde los pequeños buffers usados por el DMA) y el índice CpyIndex que lleva la cuenta de las muestras copiadas al buffer apuntado por pActiveBuff. Luego se limpian los FIFO's de la Echotek GC-314, se cambia el estado de adquisición a "No Suspendida", con lo cual se reanuda al "thread"

DmaTransference, que se había suspendido a sí mismo y finalmente se establece el inicio de la adquisición utilizando las librerías de la Echotek GC-314. La Figura 10 muestra el diagrama de flujo de esta función.

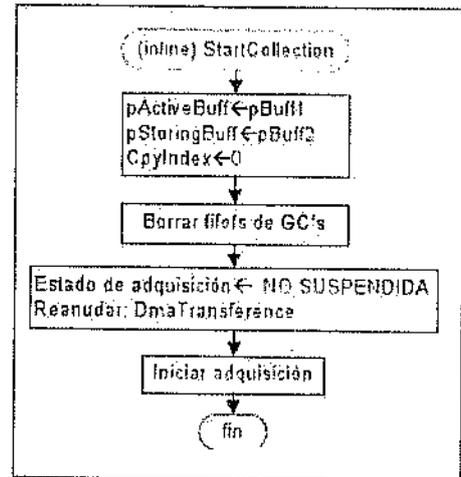


Figura 10: Función StartCollection

Función RestartCollection

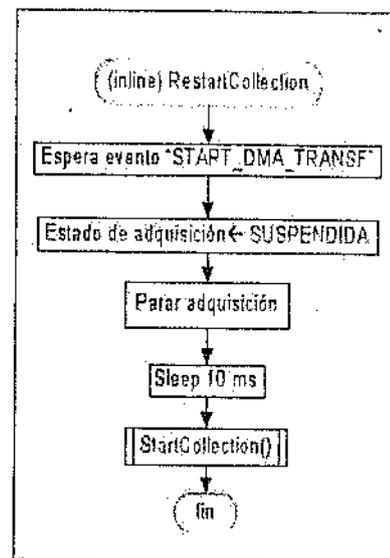


Figura 10: Función RestartCollection

Primero espera que el "thread" DmaTransference, le indique que va a iniciar una transferencia (esto se hace para que no se suspenda cuando aún esté

realizando alguna tarea) y suspende la adquisición. Luego espera 10 ms para que la interrupción `DmaTransferDone` termine (si es el caso). Finalmente reanuda la adquisición haciendo una llamada a la función `StartCollection`.

Función `OverFlowFifo` (interrupción)

Ejecuta `RestartCollection` luego de un error de desborde de alguna de las FIFO's de la Echotek GC-314, con lo cual se reinicia la adquisición. La Figura 12 muestra el diagrama de flujo de esta interrupción.

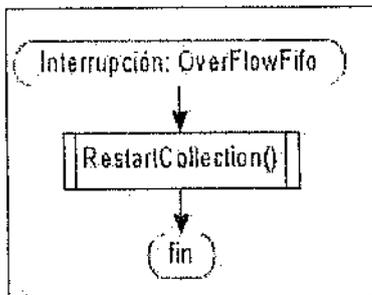


Figura 11: Rutina de servicio de interrupción.

Funcion `ResetEcho Tek`:

Libera la memoria usada por los pequeños buffers asociados a los canales y a las peticiones de transferencia; además

resetea la Echotek GC-314 luego de terminada el diagrama de flujo de esta función.

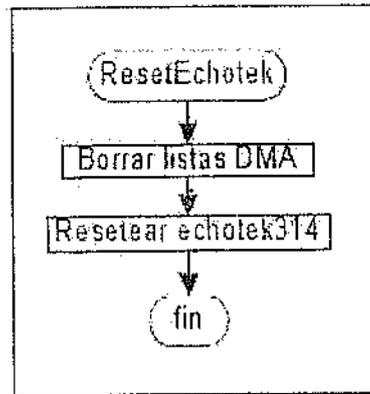


Figura 12: Función `ResetEchotek`

Tiempo Real con RTX

RTX trabaja a dos niveles, el nivel de modo usuario y el nivel del modo kernel. En modo kernel brinda soporte de tiempo real a aplicaciones de networking, para lo cual es compatible con el protocolo de internet TCP/IP; también brinda soporte para el uso del puerto USB en tiempo real y permite crear ejecutables de tiempo real (de extensión *.RTSS) para cualquier solución.

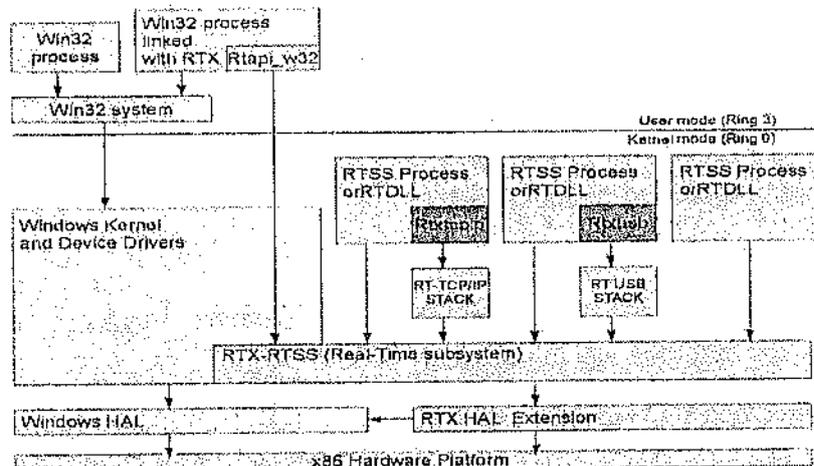


Figura 14: Arquitectura de RTX.

En modo usuario brinda las herramientas necesarias para crear aplicaciones win32 con características de tiempo real. Éstas consisten en una extensión del API de Windows llamado "Rtapi_w32". Tanto en modo usuario como en modo kernel, el acceso al hardware se hace a través del subsistema de tiempo real, el cual maneja su propio HAL (Hardware Abstraction Layer), llamado RTX HAL Extensión, tal como muestra la *Figura 14*; éste permite acceder rápidamente al hardware, en tiempo real y sin depender de Windows. La *Figura 15* muestra las latencias medidas debido a la respuesta de los temporizadores con Win32, mientras que la *Figura 16* muestra la misma información pero con RTX

(fuente: programa de prueba del sistema proporcionado por los distribuidores de RTX: "Platform Evaluator"). La *Figura 15* y la *Figura 16* están en escala logarítmica; el eje horizontal representa el valor de la latencia y el vertical el número de veces que ocurre dicha latencia; el tono más claro es el valor instantáneo y el más oscuro el acumulado. Entonces, en la *Figura 15* se nota una gran cantidad de latencias menores a 10us; sin embargo, aquellas que superan ese valor harán que la aplicación de adquisición sea inestable. Para el caso de la *Figura 16* (con RTX) las latencias son siempre menores a 10us, lo que da cierto determinismo temporal.

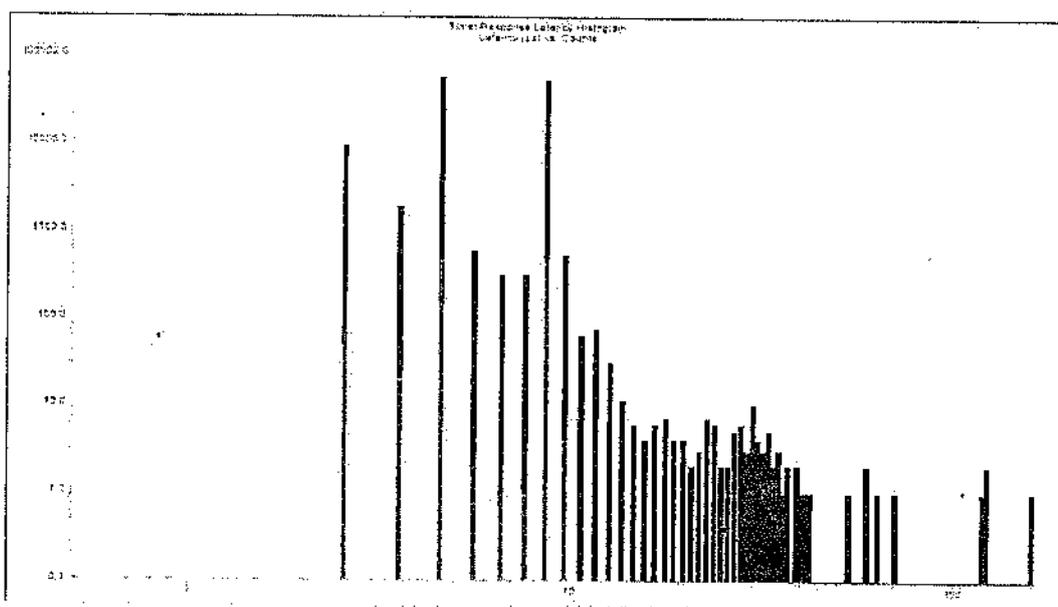


Figura 13: Latencias con win3

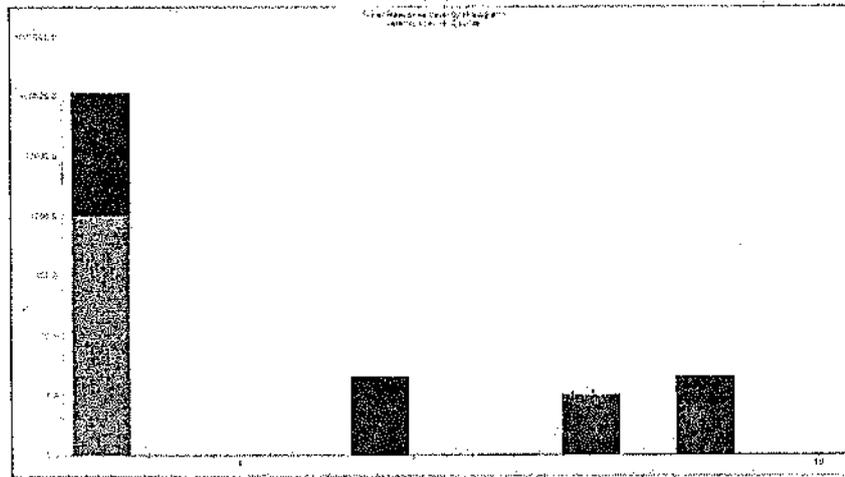


Figura 14: Latencias con RTX.

Conclusiones:

Sobre el desarrollo de la Echotek GC-314

Para lograr una ejecución rápida de alguna tarea en una aplicación, es mejor utilizar funciones de las librerías de "C", las cuales evitan el encapsulamiento y el principio de ocultamiento de los objetos de "C++"; pero se debe tener cuidado al programar, ya que los recursos utilizados no tienen protección contra el acceso inesperado a ellos por parte de alguna entidad. Por ejemplo, si dos funciones manejan buffers en la RAM, alguna ellas podría acceder al buffer de la otra, causando un "crash" en la aplicación o incluso en el mismo sistema operativo.

Debido a las limitaciones del sistema se debe introducir ciertos límites en la adquisición; tales como número de muestras que se debe adquirir para determinado IPP a una resolución máxima de 1 μ s. Ya que de ellos depende el buen funcionamiento y la sincronización de las demás tareas.

Las FIFOs de las Echotek GC-314 aproximadamente y permiten un almacenamiento máximo de 4084 muestras de 32 bits. Por lo que no se podrán almacenar más que unos cuantos perfiles adquiridos.

Sobre el tiempo real:

El kernel de tiempo real RTX, se encuentra al mismo nivel del kernel de Windows, por eso tiene acceso directo al hardware a través de una HAL (Hardware Abstraction Layer).

Con un subsistema de tiempo real como RTX se obtiene determinismo, lo cual significa que las latencias no deben pasar cierto límite. Según IntervalZero, las funciones etiquetadas como determinísticas se ejecutarán dentro de un tiempo no mayor a 5 μ s [3].

RTX, es una implementación de tiempo real para Windows XP y recomendado en la pagina de ayuda en línea de Microsoft [4].

Extender la aplicación para que sea totalmente compatible con los formatos desarrollados en Jicamarca para el almacenamiento de datos crudos.

Extender la aplicación para que cuente con interfase gráfica durante la configuración de la tarjeta Echotek GC-314 (antes de la adquisición) y luego ejecute un proceso en modo consola durante la adquisición.

Utilizar una implementación de tiempo real como RTX, para mejorar el control de la adquisición.

Extender la aplicación para que cuente con un sistema de manejo de errores producidos antes y durante la adquisición. Por ejemplo, errores de configuración con parámetros no esperados o hasta indeseados.

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a la Ing. Karim Kuyeng y al Dr. Jorge L. Chau, por permitirme ser parte de su grupo de trabajo y asesorarme en este esfuerzo. Asimismo, a todos las demás

personas que integran el gran grupo humano que labora en el Radio Observatorio de Jicamarca, que de alguna u otra forma colaboraron gustosamente y me ayudaron a realizar esta tarea.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Beveridge, Jim y Wiener, Robert (1996).
“Multithreading Applications in Win32”. Addison-Wesley.
- [2] Reyes, Pablo (2004). “Jicamarca Raw Data Structure”. Radio Observatorio de Jicamarca.
- [3] Ardence, a Citrix Company (2007). “RTX Documentation”. (este documento es parte del producto y se instala como archivo de ayuda).
- [4] “<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms838340.aspx#hardrealtimewinxpandrtw>”

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DEL MEJORAMIENTO DE LAS COMUNICACIONES DE VOZ Y DATOS VÍA EL ELECTROCHORRO ECUATORIAL EMPLEANDO DIVERSIDAD

NADIA YOZA MITSUISHI

Facultad de Ciencias e Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú
nyoza@firo.igp.gob.pe

Investigación dirigida por: Dr. Jorge L. Chau
Radio Observatorio de Jicamarca – IGP

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar las características del Electrochorro Ecuatorial (EEJ por sus siglas en inglés) como canal de comunicaciones y mejorar la calidad de la voz y datos transmitidos a través de éste mediante el uso de la técnica de diversidad. Con esta finalidad, se estructura el trabajo en dos partes. En la primera de ellas se desarrolla un programa que simula las comunicaciones a través del EEJ, las cuales se caracterizan por presentar desvanecimientos en la potencia. Con este simulador se logró reproducir los resultados de manera comparable a los obtenidos de las pruebas de campo. Además, se obtuvieron estadísticas de la influencia de la variación de ciertos parámetros del canal EEJ en la calidad de la voz y datos transmitidos y se simuló el efecto del uso de diversidad. En la segunda parte se realizaron pruebas de campo sobre el enlace Jicamarca-Paracas. En éstas se transmitió voz y datos empleando diversidad y se realizó el procesamiento respectivo para lograr una mayor inteligibilidad en la recepción. Se concluyó que los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones (SNR, ancho espectral, ancho del canal EEJ y tasa de bits) determinan la calidad de la voz y datos recibidos. Además, se comprobó que el empleo de diversidad permite disminuir el efecto de los desvanecimientos en la señal, con lo cual se logra mejorar la calidad de las comunicaciones.

INTRODUCCIÓN

El Electrochorro Ecuatorial es una corriente de electrones que se encuentra en la ionosfera, sobre el ecuador magnético, confinada a una delgada capa a 100 km de altura. Con este recurso, disponible en el Perú y otros pocos países por los que pasa el ecuador magnético, es posible realizar enlaces de comunicaciones vía dispersión en frecuencias VHF.

El EEJ fue descubierto en el observatorio de Huancayo en el año 1922. Sin embargo, no fue sino hasta 1957, que lograron establecerse las primeras comunicaciones de radio a

través de éste [2]. A partir de ese momento, se realizaron distintos experimentos, los cuales estuvieron orientados a estudiar las condiciones de propagación y transmisión más adecuadas para la comunicación a través de este canal. Se realizaron pruebas empleando distintos tipos de modulación, tales como transmisión por onda continua (CW) [4], AM-Banda Lateral Única (BLU) y FM de banda angosta [3], de los cuales se concluyó que con el uso de este último se logra obtener una mayor inteligibilidad de la voz, pero con presencia de ruido impulsivo originado por desvanecimientos de la señal

déabajo del nivel del ruido, llamados también "cracks". En el 2005, Chocos [1] realizó experimentos de comunicaciones entre Jicamarca y Paracas con distintos tipos de modulación analógica, de los cuales se comprobó que con FM es posible alcanzar una mejor calidad de la voz recibida, pero afectada por la presencia de "cracks".

En 1975, Valladares y Woodman [5] propusieron una técnica analógica – digital de simulación de las comunicaciones a través del EEJ con el objetivo de determinar la calidad de la voz usando distintos sistemas de comunicaciones y técnicas no convencionales de recepción, sin necesidad de implementar físicamente el enlace. En estas simulaciones se empleó modulación FM de banda angosta y, al igual que en el caso de las pruebas de campo, se observaron desvanecimientos en la señal.

El efecto de los desvanecimientos descritos puede ser reducido con el empleo de la técnica de diversidad, la cual consiste en transmitir la misma información a través de dos o más caminos radioeléctricos distintos. Cada uno de ellos se ve afectado de forma

independiente por los desvanecimientos, con lo que se busca proporcionar al receptor versiones independientes de la misma señal transmitida, las cuales serán combinadas finalmente para conseguir una señal de mayor calidad que las originales.

METODOLOGÍA

Este trabajo consta de dos partes. En la primera de ellas se desarrolla un programa de simulación vía software de comunicaciones de voz y datos a través del EEJ a partir del modelo propuesto por Valladares y Woodman [5], el cual estaba basado en el uso de hardware y software. Este simulador permite estudiar los parámetros del canal EEJ, para lo cual se generan gráficos estadísticos que muestran cómo afecta la variación de éstos a la calidad de las comunicaciones. Se logra también simular el empleo de diversidad y realizar el procesamiento respectivo. En la segunda parte se realizan pruebas de campo de comunicaciones de voz y datos sobre el enlace Jicamarca-Paracas empleando la técnica de diversidad. Finalmente, se analizan y comparan los resultados obtenidos y se extraen las principales conclusiones.

SIMULADOR DE COMUNICACIONES VÍA EEJ

El diagrama de bloques del simulador se muestra en la Figura 1. Para el caso de transmisión de voz, se muestra la señal de entrada y se realiza una modulación analógica. Luego, se le modula por el canal EEJ generado. Éste se modela como un proceso aleatorio gaussiano de espectro gaussiano, por lo cual su potencia presentará una distribución de Rayleigh y su fase tendrá una distribución uniforme. Se le añade ruido y, finalmente, se realiza la demodulación analógica de la misma. La simulación de la transmisión de datos puede realizarse de dos maneras: a través de datos modulados en tonos audibles empleando un software de radioaficionados o directamente en el modulador. Para el primer caso se emplea un esquema similar al usado para voz, tras lo cual es necesario demodular los datos usando el software mencionado. En el segundo caso, se ingresan los bits directamente al modulador y, después de su demodulación, son enviados a un detector para recuperarlos.

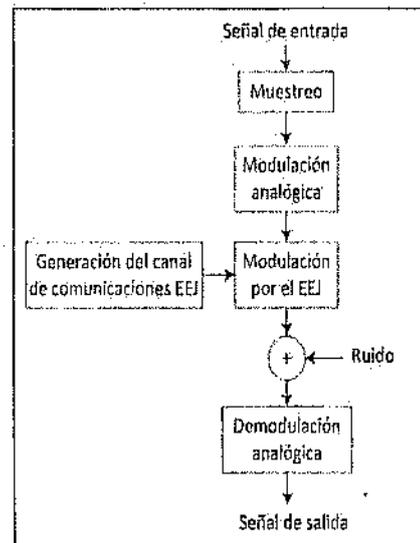


Figura 1: Diagrama de bloques del simulador (adaptado de la publicación de Valladares y Woodman [5])

Para la simulación de diversidad se considera dos o más transmisiones distintas de la misma información, lo cual equivale a modular la señal a través de dos o más EEJ distintos con la finalidad de obtener señales independientes, como se observa en la Figura 2. Ello equivale a transmitir por diferentes caminos radioeléctricos, por lo cual este modelo puede ser aplicado para simular los distintos tipos de diversidad (diversidad en tiempo, espacio, frecuencia, polarización, etc). Para el procesamiento de la señal resultante se implementa de combinador de tasa máxima (MRC por sus siglas en inglés), el cual considera la potencia de las señales recibidas como factor de ponderación de las mismas.

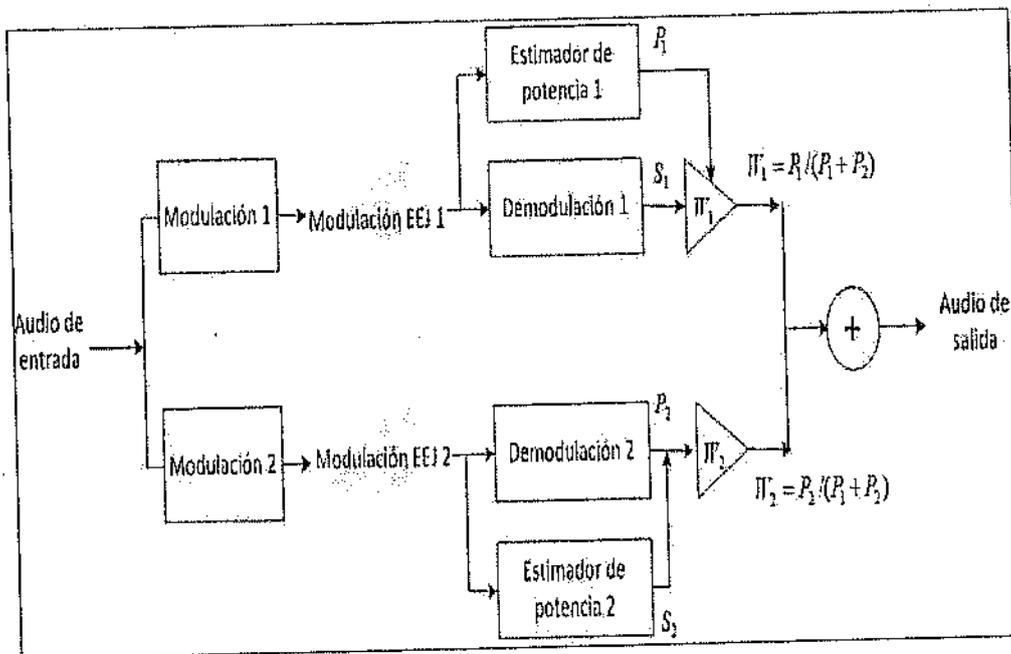


Figura 2: Diagrama de bloques de la transmisión con diversidad.

El programa simula también el espesor del EEJ (aproximadamente 15 km) mediante la generación de varias capas de EEJ con distintos parámetros, las cuales simulan las diferentes alturas que éste abarca. Debido a la dispersión de la señal en las distintas capas del EEJ, la señal sufrirá un retardo de propagación distinto al atravesar cada una de ellas. La dispersión total de la señal determina el ancho de banda analógico, el cual es de 10 KHz. El ancho de banda digital se determina de manera similar, con lo que se obtiene una velocidad máxima de 10 Kbps.

PRUEBAS DE CAMPO SOBRE EL ENLACE JICAMARCA-PARACAS

Las pruebas de campo se realizaron sobre la base del enlace Jicamarca-Paracas implementado previamente

[1]. Sobre éste se aplicó la técnica de diversidad en frecuencia para la transmisión de voz y datos a través del EEJ.

Para las comunicaciones de datos se realizó la modulación de los mismos en tonos audibles para ser transmitidos a la radio. Para ello se empleó software para radioaficionados, los cuales ofrecen muchos tipos de modulación digital, entre los que se seleccionaron distintos modos de PSK (*Phase Shift Keying*) y FSK (*Frequency Shift Keying*), en los cuales se envían los datos a través de la variación de la fase y frecuencia de la portadora, respectivamente. Además, se realizó la transmisión por radiopaquetes, que consiste en enviar los datos a través de ráfagas de paquetes que serán luego reensamblados en el destino final

Los modos digitales usados en las pruebas son los siguientes:

- PSK31 (PSK a 31 baudios)
- PSK250 (PSK a 250 baudios)
- QPSK31 (QPSK a 31 baudios)
- QPSK250 (QPSK a 250 baudios)
- MFSK32 (FSK a 32 baudios)
- MFSK64 (FSK a 64 baudios)
- Packet300 (radiopaquetes a 300 baudios)
- Packet1200 (radiopaquetes a 1200 baudios).

La configuración del enlace se muestra en la Figura 3. Se transmite la misma señal a través de dos radios operando a frecuencias distintas y se envía la suma de ambas señales. Para la recepción se emplea un receptor digital, el cual separa los canales en frecuencia y luego, mediante software, realiza el procesamiento para la aplicación de diversidad.

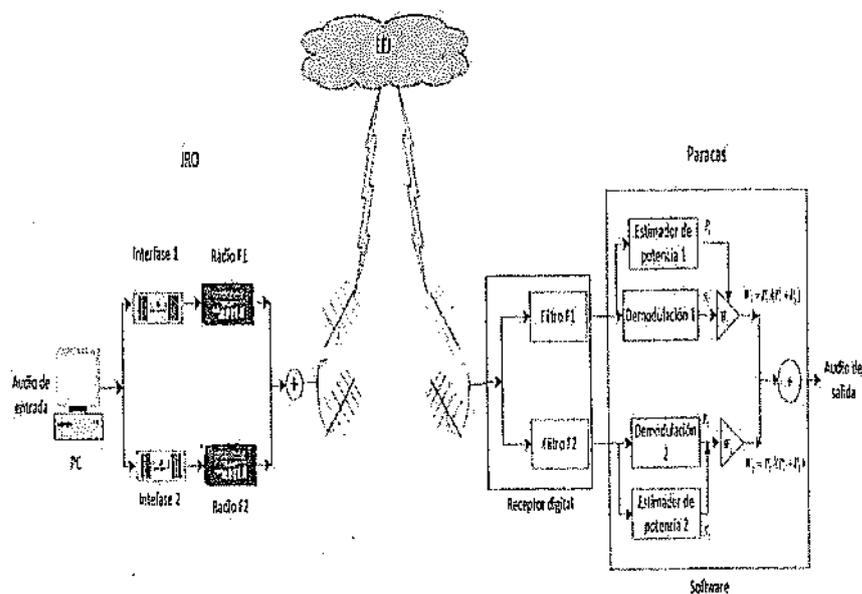


Figura 3: Diagrama de bloques de la configuración para las pruebas de campo.

RESULTADOS

Los resultados de este trabajo pueden dividirse considerando si fueron obtenidos de las simulaciones o de las pruebas de campo. Estos resultados permiten estudiar el canal EEJ y

evaluar las mejoras en la calidad de las comunicaciones usando diversidad. Para cuantificar la calidad se empleó el coeficiente de correlación en el caso de transmisión de voz y la tasa de bits

errados (BER) para el caso de datos. En la Figura 4 se muestra el audio transmitido, el cual consta de una parte de voz, seguida de silencio y un tono. La gráfica del audio recibido considerando un SNR alto y su espectrograma correspondiente se presenta en la Figura 5. Se observa la presencia de desvanecimientos, los cuales se presentan en el dominio del tiempo como ruido impulsivo y, en el espectrograma, como una distribución de la potencia en todo el espectro para

cortos instantes de tiempo.

En la gráfica de la potencia de la señal, mostrada en la Figura 6, se presentan como caídas de la potencia debajo del nivel del ruido.

La Figura 7 muestra la secuencia de bits transmitidos y la señal conformada considerando pulsos gaussianos para un SNR medio. Se presenta también la señal demodulada y la secuencia de bits recibidos. Se observa que, a pesar de los desvanecimientos, se recibe una secuencia de bits idéntica a la original.

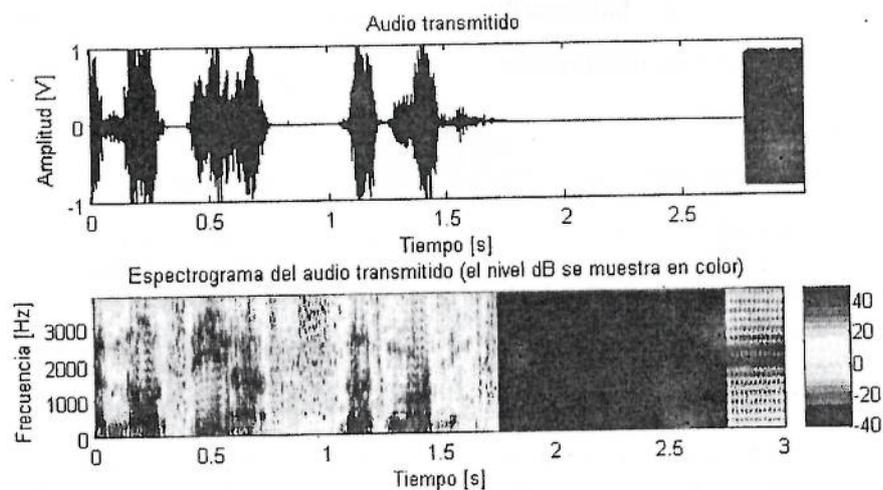


Figura 4: Simulación de transmisión de voz. Audio original transmitido

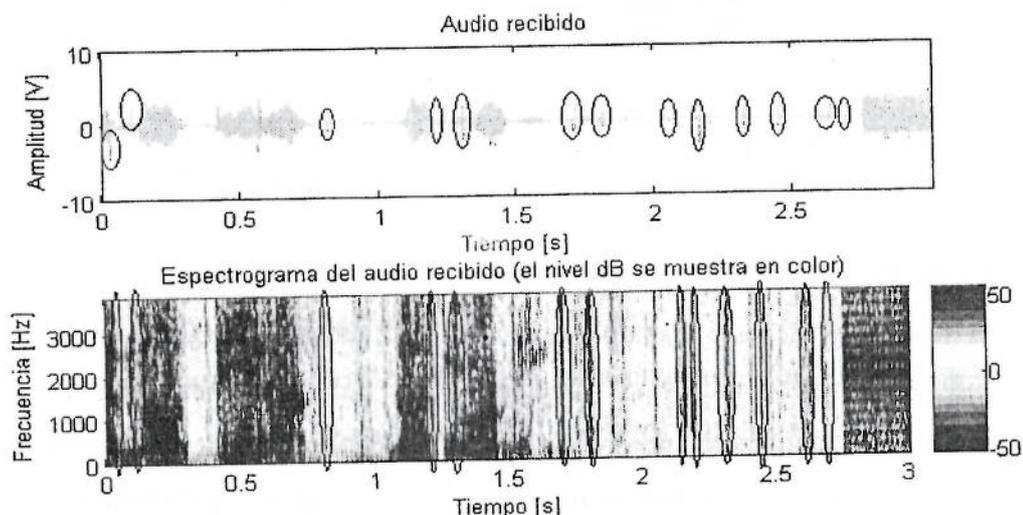


Figura 5: Simulación de transmisión de voz. Audio recibido y su espectrograma.

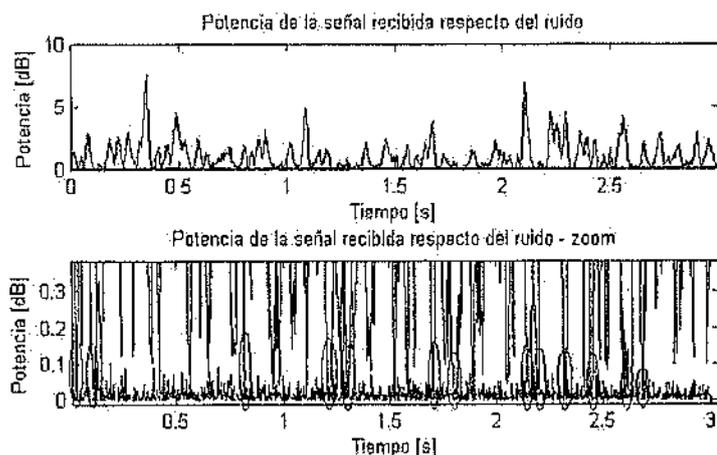


Figura 6: Simulación de transmisión de voz. Potencia de la señal recibida respecto al ruido (original y ampliado).

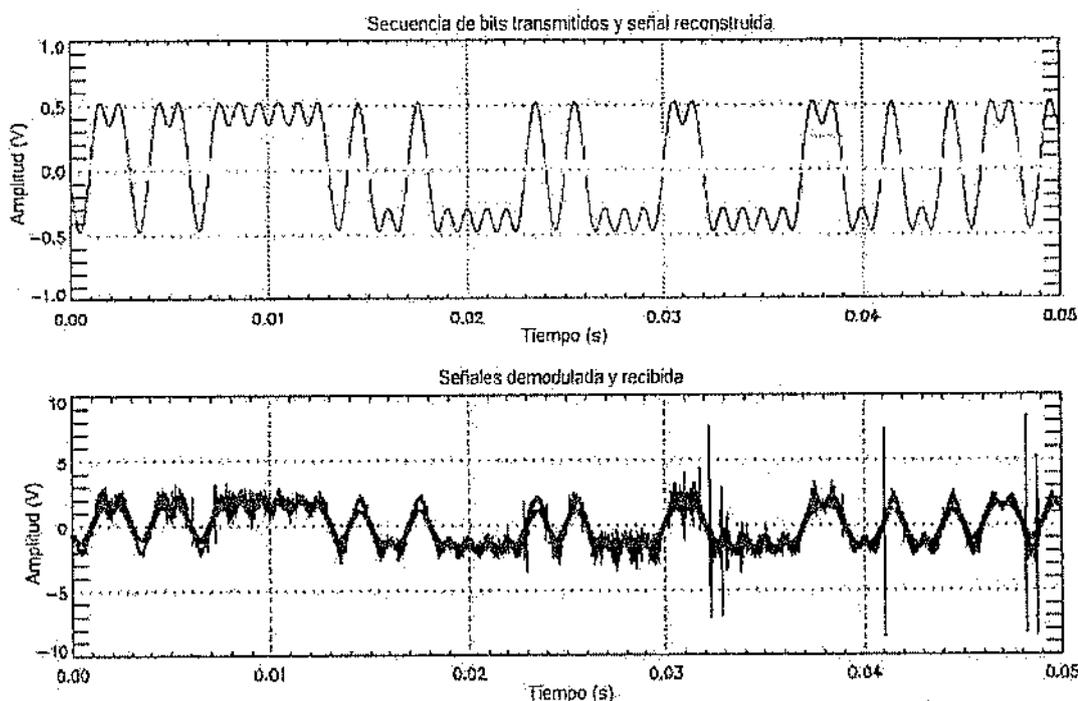


Figura 7: Secuencia de bits transmitidos, señal conformada, señal demodulada y secuencia de bits recibidos.

Las simulaciones permitieron también estudiar de manera estadística la influencia de la variación de los parámetros del canal EEJ en la calidad de las comunicaciones. Estos parámetros y los resultados obtenidos se describen a continuación:

- Relación señal a ruido.- A medida que se incrementa la

relación señal a ruido (SNR) mejora la calidad de la voz y los datos recibidos, como se aprecia en las Figuras 8 y 9.

- Ancho espectral del EEJ.- Este parámetro está asociado a movimiento turbulento de las irregularidades que produce eco, lo cual provoca variaciones

en el desplazamiento Doppler de la señal transmitida. La varianza de estos desplazamientos en frecuencia determina el ancho espectral de los ecos del EEJ, el cual se encuentra en el rango de

20 a 100 Hz. De los gráficos estadísticos presentados en la Figuras 8 y 9 se concluye que la variación del ancho espectral no influye en la calidad de la voz y datos recibidos.

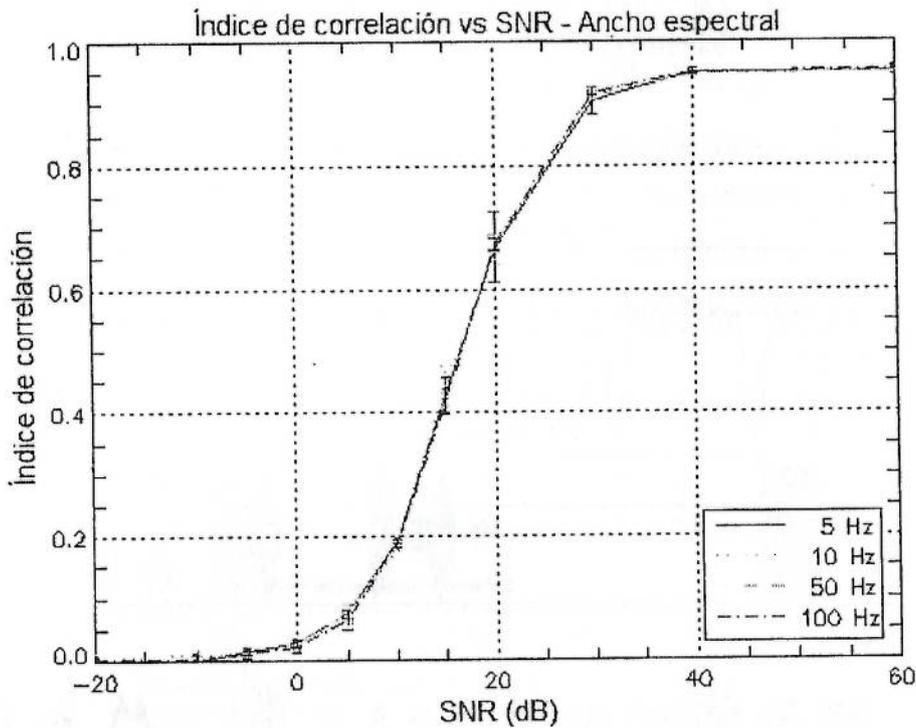


Figura 8: Simulación de transmisión de voz. Índice de correlación en función del SNR y el ancho espectral.

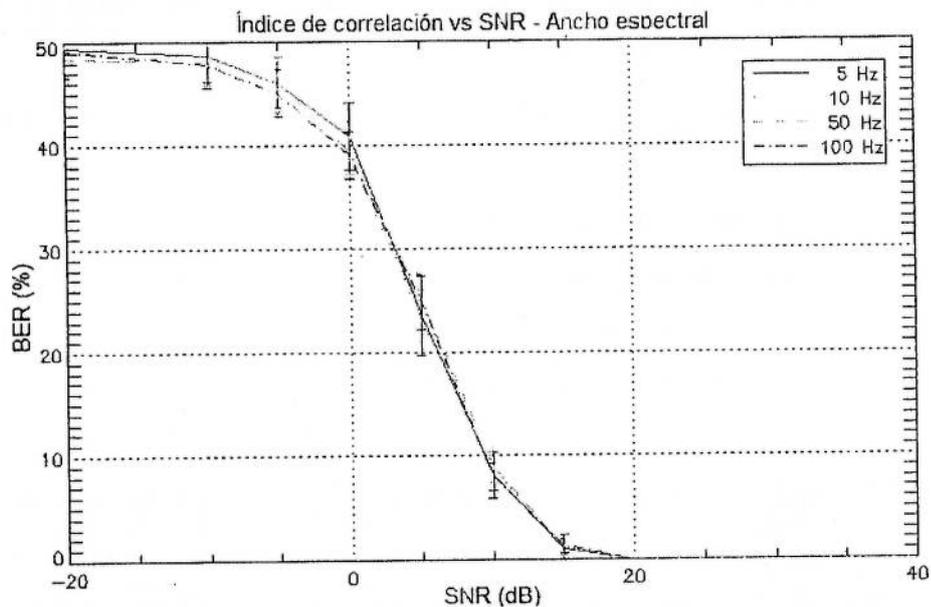


Figura 9: Simulación de transmisión de datos. BER vs SNR considerando la variación del ancho espectral para un espesor del EEJ de 15 km.

- Espesor de la capa del EEJ.- A mayor espesor del canal EEJ, mayor será el retardo que sufrirá la señal al pasar por las distintas capas del EEJ. Por lo tanto, existirá mayor dispersión de la señal, lo cual determinará una menor calidad de las comunicaciones de

voz y datos, como se observa en las Figuras 10 y 11. En esta última figura se comprueba también que el ancho de banda digital del canal es de 10 Kbps, lo cual está determinado por el espesor del EEJ.

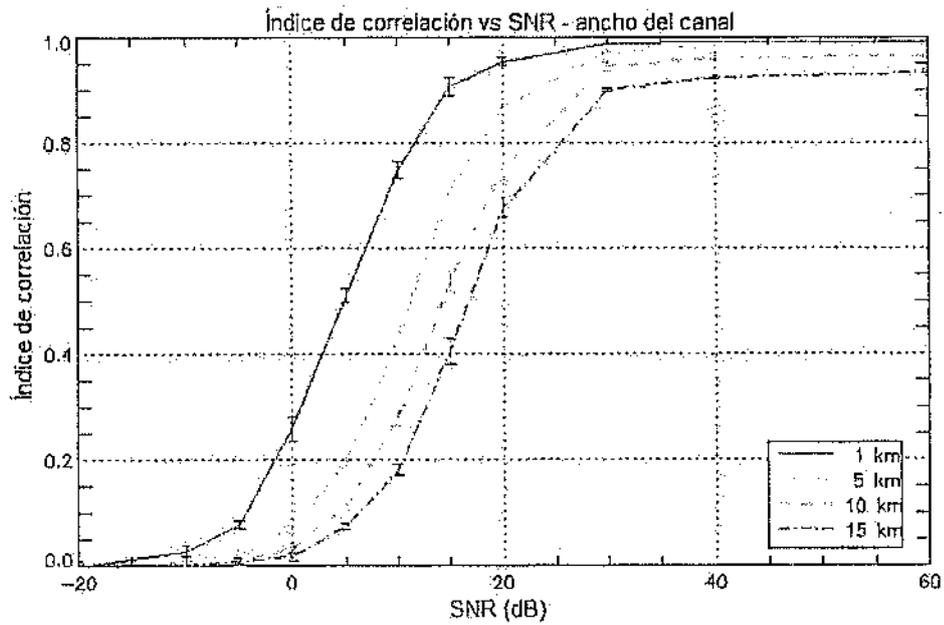


Figura 10: Simulación de transmisión de voz. Índice de correlación en función del SNR y el ancho del canal EEJ.

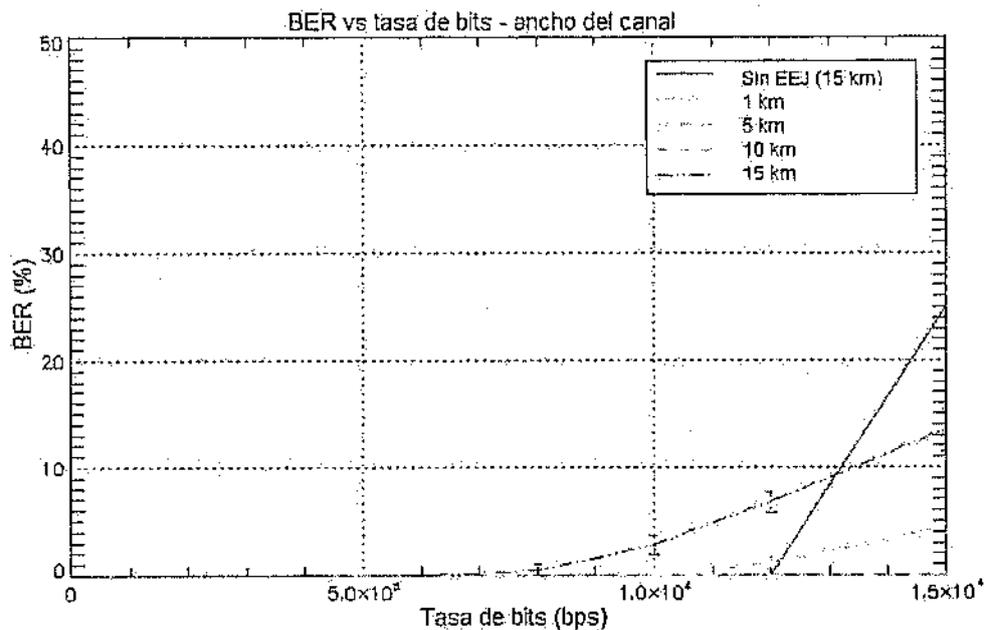


Figura 11: Simulación de transmisión de datos. BER vs tasa de bits considerando la variación del ancho del canal EEJ y un SNR de 30 dB.

- Tasa de bits.- A mayor tasa de bits, es decir, a mayor velocidad de transmisión para datos, se espera una menor calidad de los datos recibidos, como se aprecia en la Figura 12. A mayor velocidad de

transmisión, el tiempo de duración de los bits disminuye, por lo cual, si se produce desvanecimientos, éstos podrían ocasionar que bits completos se pierdan y se degrade la calidad del mensaje recibido.

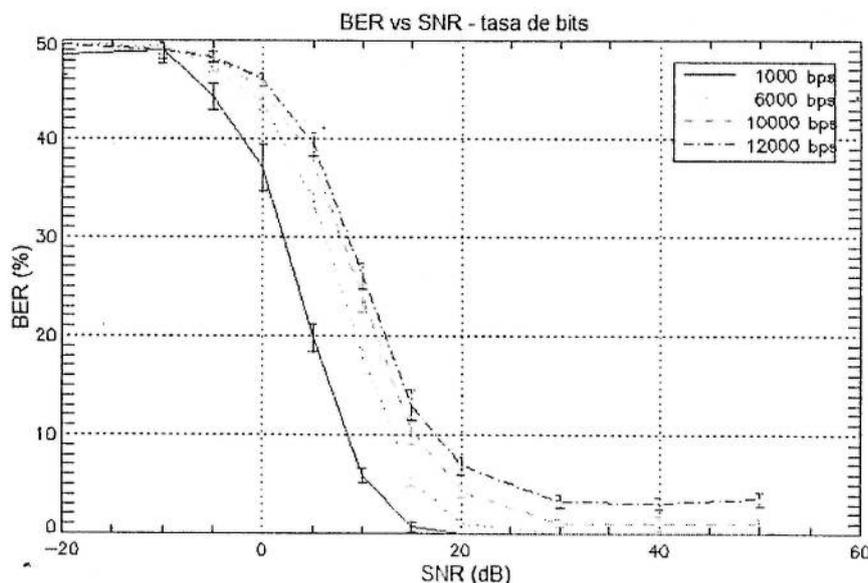


Figura 12: Transmisión de datos. BER vs SNR considerando la variación de la tasa de bits.

Además, tanto las simulaciones como las pruebas de campo permitieron comprobar el mejoramiento de la calidad de la voz y los datos transmitidos mediante el empleo de técnicas de diversidad.

Como ejemplo de diversidad para el caso de voz, en la figura 13 se muestra la voz original transmitida y su espectrograma. En la Figura 14 se

presentan las gráficas del audio recibido de las pruebas de campo y su espectrograma correspondiente, tanto para la transmisión sin diversidad como con el uso de ella, en las que se observa la presencia de desvanecimientos. De la comparación de dichas gráficas, se observa que el efecto de estos desvanecimientos disminuye con el uso de diversidad.

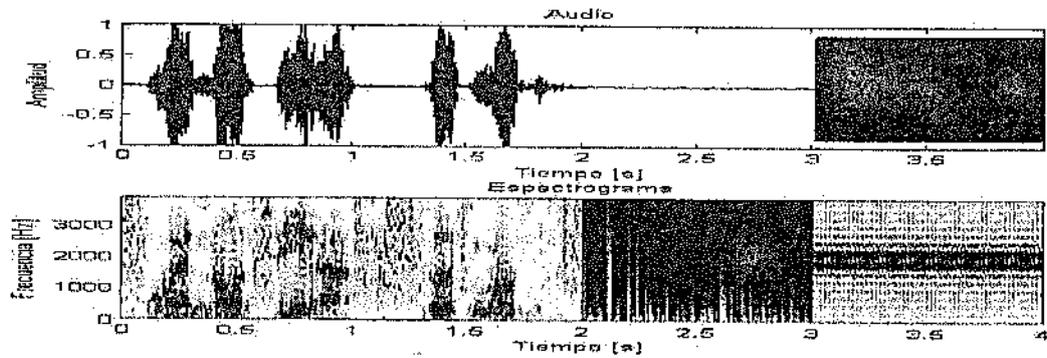


Figura 13: Pruebas de campo. Audio original transmitido y su espectrograma.

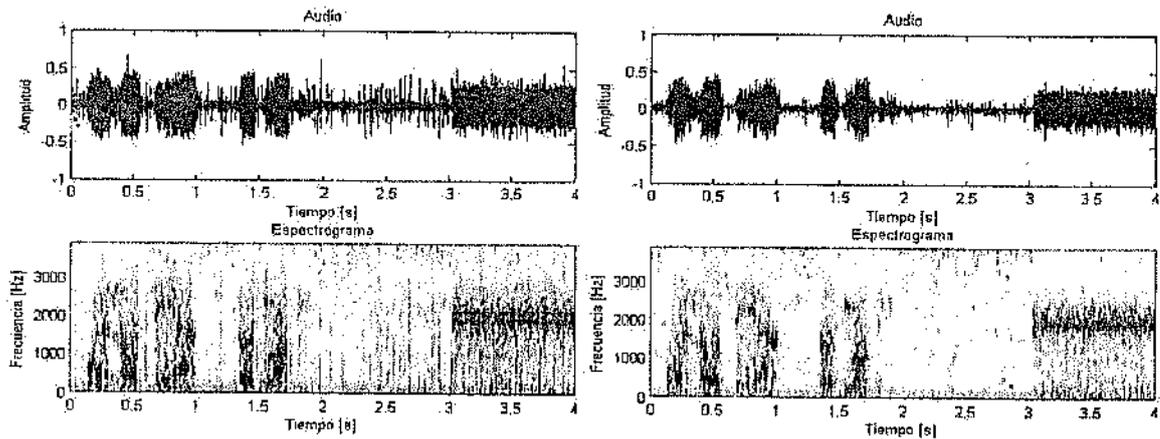


Figura 14: Pruebas de campo. Audio recibido y su espectrograma considerando un SNR medio para los casos sin diversidad (izquierda) y con diversidad (derecha)

Para el caso de la transmisión de datos en las pruebas de campo, la mejora en la comunicación aplicando diversidad es aún mayor. Como ejemplo, se presenta el mensaje transmitido mostrado en la Tabla 1. Considerando una transmisión sin diversidad para condiciones de SNR bajo y empleando la modulación PSK250, se recibe un mensaje poco inteligible. Después de aplicar diversidad, se obtiene un mensaje más

entendible, el cual presenta escasos caracteres errados. Por otra parte, para un SNR medio y sin emplear diversidad se obtiene un mensaje con pocos caracteres errados. Con el uso de diversidad se logra recibir correctamente todos los caracteres. De esta manera se comprueba la gran mejora que ofrece el empleo de diversidad en las comunicaciones de datos

<p>Mensaje Transmitido</p>		<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones vía EEJ. Esta es una comunicación punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersión. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p>	
<p>Mensaje Recibido</p>		<p>Sin diversidad</p>	<p>Con diversidad</p>
	<p>SNR Bajo</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones vía EEJ. Esta es una comunicación punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersión. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones vía EEJ. Esta es una comunicación punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersión. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p>
<p>SNR Medio</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones vía EEJ. Esta es una comunicación punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersión. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p>	<p>@Mensaje de prueba para comunicaciones vía EEJ. Esta es una comunicación punto a punto utilizando al Electrochorro Ecuatorial como medio de dispersión. Mensaje 1. Mensaje 2. Mensaje 3. Mensaje 4. Mensaje 6. Mensaje 7. Mensaje 8. Mensaje 9. Mensaje 10. Hola mundo.@</p>	

Tabla 1: Pruebas de campo. Mensaje transmitido y mensajes recibidos para valores de SNR bajo y medio considerando el uso de diversidad.

El mejoramiento de la calidad de las comunicaciones empleando diversidad puede ser cuantificado y presentado en

gráficas estadísticas. Las Figuras 15 y 16 muestran la variación de dicha calidad para diversidad con distintos números de realizaciones para los caso de voz y datos, respectivamente. En

ambas gráficas se observa que la calidad mejora considerablemente con el uso de solo dos realizaciones, a partir de las cuales la mejora es solo incremental.

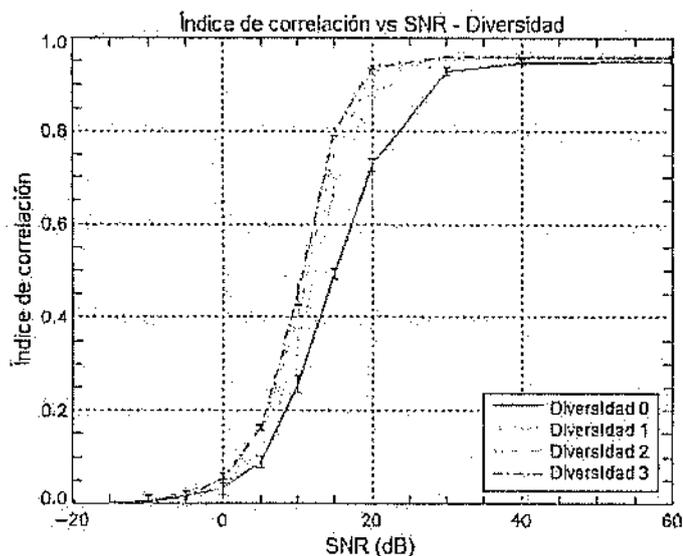


Figura 15: Simulación de la transmisión de voz. Coeficiente de correlación en función de la diversidad y del SNR.

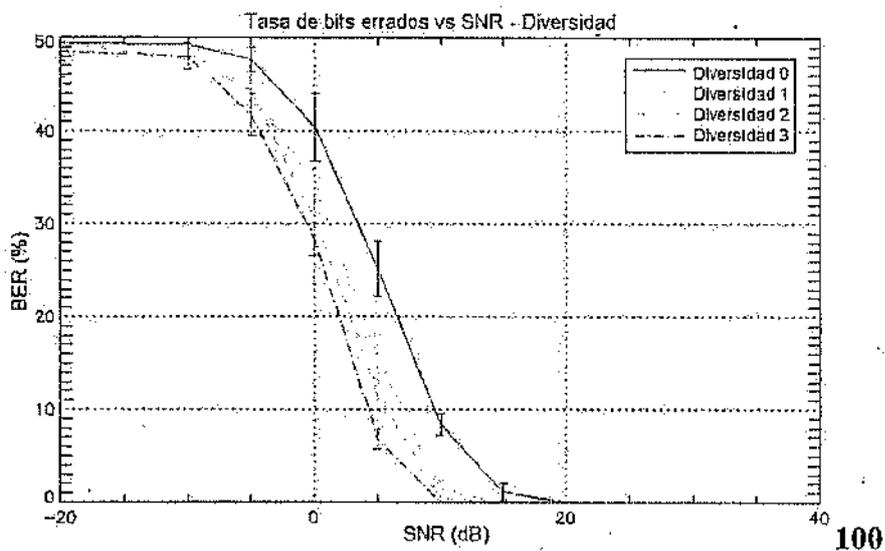


Figura 16: Simulación de la transmisión de datos. BER vs SNR considerando distinto número de realizaciones para la simulación de diversidad para una tasa de 2000 bps.

CONCLUSIONES

De este trabajo se pueden derivar las siguientes conclusiones principales:

gráficas estadísticas. Las Figuras 15 y 16 muestran la variación de dicha calidad para diversidad con distintos números de realizaciones para los caso de voz y datos, respectivamente. En

ambas gráficas se observa que la calidad mejora considerablemente con el uso de solo dos realizaciones, a partir de las cuales la mejora es solo incremental.

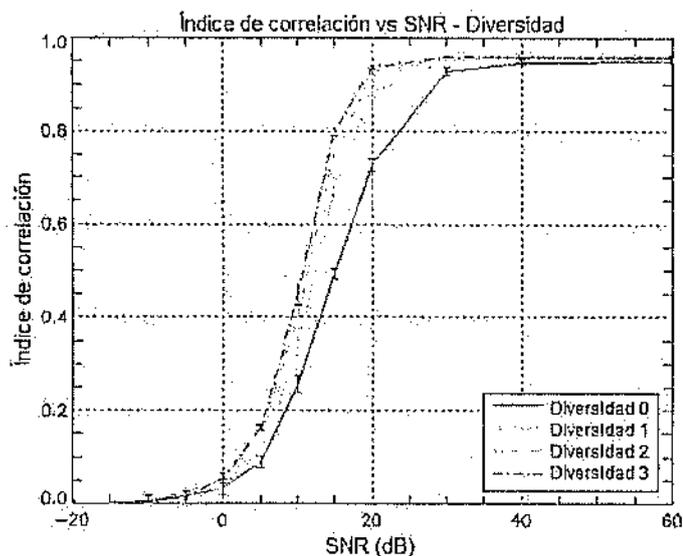


Figura 15: Simulación de la transmisión de voz. Coeficiente de correlación en función de la diversidad y del SNR.

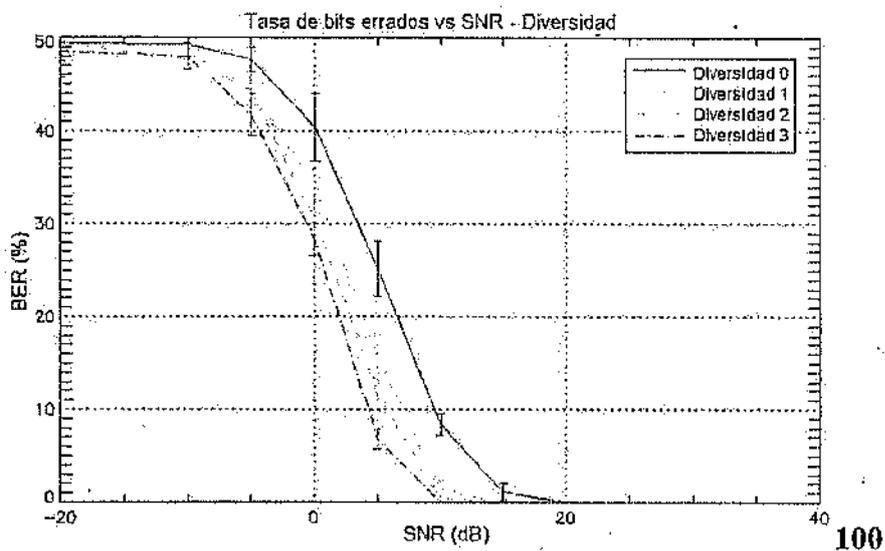


Figura 16: Simulación de la transmisión de datos. BER vs SNR considerando distinto número de realizaciones para la simulación de diversidad para una tasa de 2000 bps.

CONCLUSIONES

De este trabajo se pueden derivar las siguientes conclusiones principales:

- El simulador resultó satisfactorio, ya que permitió reproducir los resultados de voz de manera comparable a lo obtenido para las pruebas de campo. Se percibió también el efecto de los desvanecimientos en la voz recibida.
- A través de la simulación de la transmisión de datos se logró hallar el ancho de banda digital del canal EEJ, el cual es de 10 Kbps. En la práctica, este valor dependerá de las condiciones del EEJ.
- Los parámetros del EEJ y del sistema de comunicaciones (SNR, ancho espectral, ancho del canal EEJ y tasa de bits) determinan la calidad de la voz y datos recibidos.
- El empleo de diversidad permite disminuir el efecto de los desvanecimientos, por lo cual se mejora la calidad de la voz transmitida vía el EEJ. Esta mejora es aun más significativa en el caso de datos.

AGRADECIMIENTOS

Mi especial agradecimiento al Dr. Jorge L. Chau, por sus enseñanzas, paciencia y constante apoyo y por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación. Igualmente, mi gratitud hacia el Programa de Apoyo a la Iniciación en la Investigación de la PUCP y a todo el personal del Radio Observatorio de Jicamarca por compartir sus experiencias y conocimientos, así como por su amistad y calidez.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chocos, J. (2005). "Diseño y establecimiento de un enlace de radiocomunicaciones VHF punto a punto vía el Electrochorro Ecuatorial". Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [2] Cohen R., K. Bowles (1963). "Ionospheric VHF scattering near the magnetic Equator during the International Geophysical Year. Journal of Research of the National Bureau of Standards". Vol 67D. No.5
- [3] Heraud, J. (1972). "Estudios de propagación utilizando el fenómeno de dispersión en el Electrochorro Ecuatorial". Informe Preliminar No. 1, Instituto Geofísico del Perú.

- [4] Romero C. A., A. Giesecke, O. Pérez (1968). "Propagación de ondas de radio en VHF por dispersión en el Electrochorro Ecuatorial". Informe Preliminar, Instituto Geofísico del Perú.
- [5] Valladares, C., R. Woodman (1975). "Simulación digital-analógica por computadora de comunicaciones vía el Electrochorro Ecuatorial". III CONIMERA.

SISTEMA DE ADQUISICIÓN PARA RADAR BASADO EN RECEPTORES DIGITALES DESARROLLADO EN EL RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA

RITA JAKELYN ABAD LIMA
Facultad de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de San Marcos
jakelyn.abad@gmail.com

Investigación dirigida por: Ing. José Daniel Alcántara Zapata
Radio Observatorio de Jicamarca – IGP

RESUMEN

El estudio de la alta atmósfera, y la búsqueda de ampliar los conocimientos sobre ésta, ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías o métodos de adquisición de datos, y por ende el desarrollo del presente trabajo, que consiste en el diseño e implementación de un sistema de recepción para radar basado en receptores digitales comerciales AD6620.

Parte del proyecto se desarrolló utilizando electrónica digital en alta frecuencia, además la unidad de control se realizó en un FPGA. El funcionamiento del equipo comienza con la recepción de la señal que proviene de la antena, la cual es luego se digitalizada y, finalmente, procesada. La sincronización del equipo se realiza con el controlador de radar para lograr transferir sólo los datos deseados hacia una computadora, en donde son almacenados. En la fase inicial se utilizaron tarjetas de evaluación del fabricante de los receptores digitales (Analog Devices) y, en la segunda fase desarrollo todas las tarjetas fueron diseñadas y ensambladas en el Radio Observatorio de Jicamarca.

INTRODUCCIÓN

El Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) desde siempre a utilizado los sistemas de adquisición, en un inicio los compraban en el mercado internacional, luego se noto que tenían muchas limitaciones puesto que no había sido diseñado para el propósito de ser utilizado en radares, debido a que se necesitaba un sistema más flexible se decide desarrollar en el ROJ sistemas de adquisición, y en la actualidad se trata de lograr un sistema que se adapte en lo posible a los requerimiento de un radar de este tipo.

El presente trabajo utiliza como núcleo principal receptores digitales AD6620, los cuales son circuitos integrados DSP para aplicaciones comerciales. Con estos receptores se puede realizar operaciones digitales que anteriormente se hacían de forma analógica, así como demodulación en cuadratura, filtrado y decimación.

Los datos digitales son enviados a una unidad de control que cuenta con un FPGA como núcleo principal, se utiliza el FPGA para recibir los datos de los receptores, por medio de una lógica de multiplexado, y luego sincroniza los datos con el controlador de radar y los envía a la PC por medio de una tarjeta

de adquisición de National Instruments NI-6534.

A continuación se muestra el desarrollo realizado para este sistema de adquisición de un radar, comenzando por una introducción al funcionamiento del AD6620 y, luego mostrando los circuitos de cada bloque que lo componen. Dado que se trabaja con un FPGA, la descripción lógica se realizó en VHDL.

DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN BASADO EN RECEPTORES DIGITALES

El sistema desarrollado consiste principalmente en la realización de un sistema de adquisición para radar basado en receptores digitales. La

realización del proyecto, se dividió en partes independientes, es decir, una etapa no depende del modo de funcionamiento interno de la anterior, sólo de las señales de salida de ésta. Tomando en consideración el funcionamiento global del sistema de adquisición de radar se dividió en:

- 1. Bloque de adquisición.**
- 2. Bloque multiplexor.**
- 3. Bloque de control.**

En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del equipo, con las señales de control principales y se observa el flujo de datos en líneas en negrita. Además, todo el sistema se encuentra sincronizado por un reloj maestro que proviene del controlador de radar y es de 32MHz.

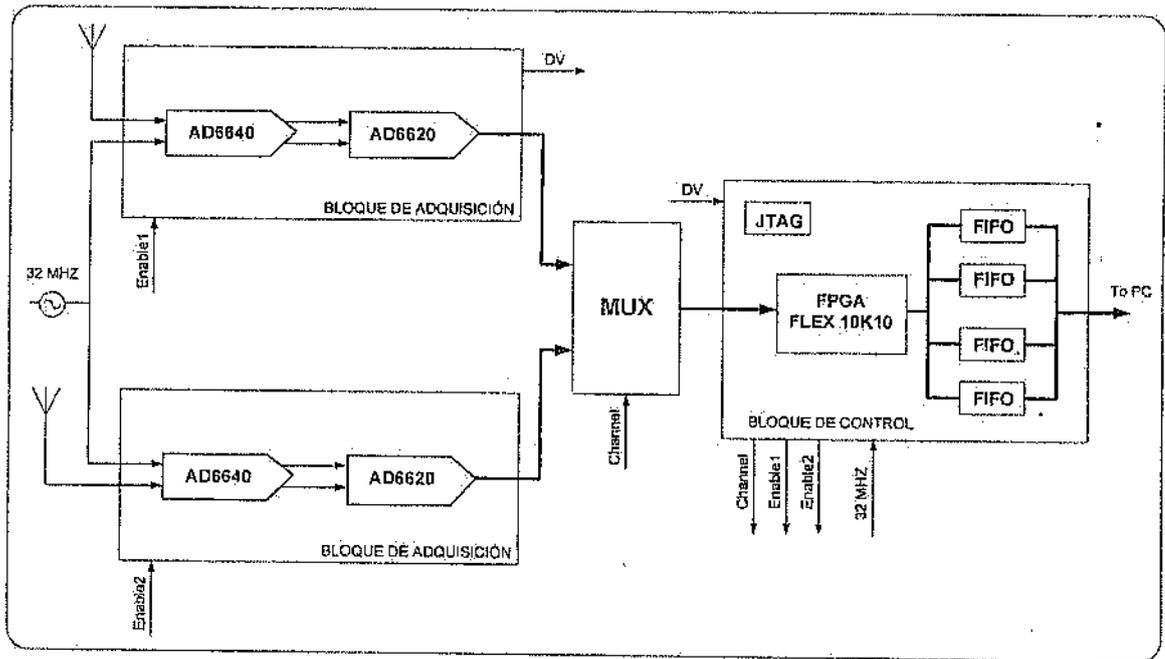


Figura 1: Diagrama de bloques del equipo.

Bloque de Adquisición

Este bloque consta de dos partes principales, el ADC AD6640 y el Receptor Digital AD6620, cada cual con sus buffers e interfaces de entrada y salida para la adaptación de las señales tanto analógicas como digitales. Su diagrama de bloques se muestra en la Figura 2.

La tarjeta de adquisición desarrollada en Jicamarca utilizó el mismo diseño de la tarjeta de evaluación del AD6640. Para el caso del AD6620, se eliminan algunas etapas como: el buffer de entrada, ya que este está incluido en el AD6640EB; la FIFO, ya que este no es utilizado durante la adquisición; los

jumpers, ya que estos permiten distintos modos de trabajo, pero en nuestra aplicación sólo se utiliza un modo.

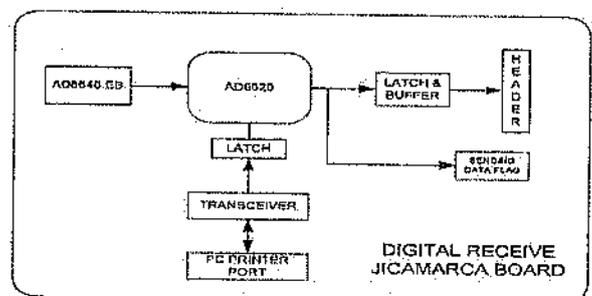


Figura 2: Diagrama de bloque de tarjeta receptor digital desarrollada en Jicamarca.

Se le agregó al diseño dos bloques nuevos: el primero es un conjunto de registros previos al header para proteger las salidas del AD6620, se utilizó integrados 74AC574 los cuales operan a 5V, para trabajar las señales recibidas

del receptor a nivel TTL (el receptor trabaja a 3.3V), ya que la electrónica que sigue a esta tarjeta trabaja con esos niveles. El segundo es un LED, que sirve como aviso (Bloque Sending-Flag) visible de que la tarjeta está enviando datos; para ello sigue la lógica de encender cuando exista un dato listo (señal DV='1' ó IQ='1'). Esta señal es muy útil cuando se realizan pruebas en el montaje de la tarjeta.

Bloque multiplexor de señal.

Este multiplexor recibe las señales de las dos tarjetas de adquisición y permite que compartan un solo bus de datos de salida, el uso del bus se da en el momento que se tenga un dato listo (DV='1'), sin prioridad entre tarjetas, asumiendo que los datos estarán listos en tiempos distintos para cada tarjeta (Se vera con más detalle en la lógica de control).

Para hacer el diseño de la tarjeta multiplexora, primero se analizó los requerimientos que esta tenía y los problemas que hasta el momento presentaba: al trabajar las señales a 5V se observa una mayor distorsión de la

señales a la entrada de la tarjeta multiplexora y en las que tiene un bajo duty cycle (como DV e IQ), se observan sobre impulsos de hasta 8V. Todo circuito secuencial debe inicialmente sincronizar todas sus señales de entrada, antes de realizar cualquier lógica combinacional para evitar problemas con los retrasos que estos generan; todas las señales que se conectan a la tarjeta de control deben pasar por el mismo bus (Header de 50 pines), para lo cual se debe evitar la distorsión que se puedan generar entre señales como llevar la señal de reloj por el bus de datos.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques de la tarjeta multiplexora, donde las señales inicialmente son registradas, menos las que habilitan a los buffers, porque esto hubiese implicado el uso de un arreglo más, ya que las señales de datos pasan por resistencias de bajo valor (entre 50 a 300 ohmios) antes de ingresar a los buffers.

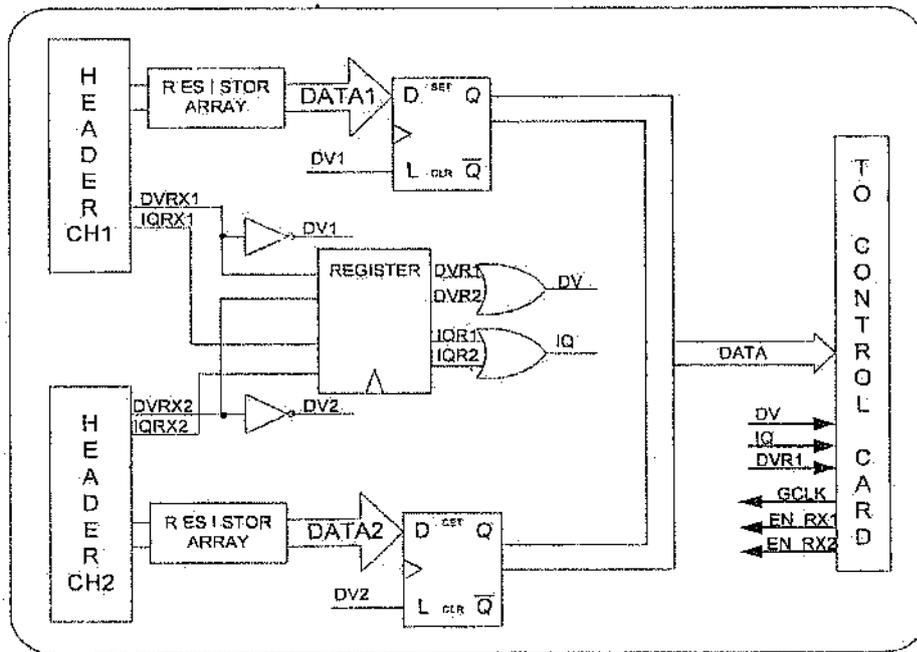


Figura 3: Diagrama de bloques de MUX REX-2X.

Bloque de control.

Esta etapa recibe señales de dos lados; el primero las señales del multiplexor de canales que provienen de los receptores digitales, y señales del controlador de radar (SYNCHRO, WINDOW y GCLK). La función principal de esta tarjeta es permitir el paso de los datos, cuando ocurre la ventana del controlador de radar, estos datos son enviados por un interfaz paralelo a una tarjeta de National Instruments (NI-6534), la cual se encuentra en una computadora y es la encargada de almacenar los datos por

medio de un software de control.

En la Figura 4, se muestra el diagrama de bloques de esta tarjeta. Todo el control lo realiza un FPGA FLEX10K10LC84 del fabricante ALTERA. El diagrama de bloques muestra de manera resumida el circuito, ya que no se han colocado algunas señales que se utilizan y algunas que pasan por inversores antes de entrar o salir del FPGA.

Las señales que recibe del Controlador de Radar son: La ventana de muestreo "window", el sincronismo "synchro" y el reloj general de 32MHz.

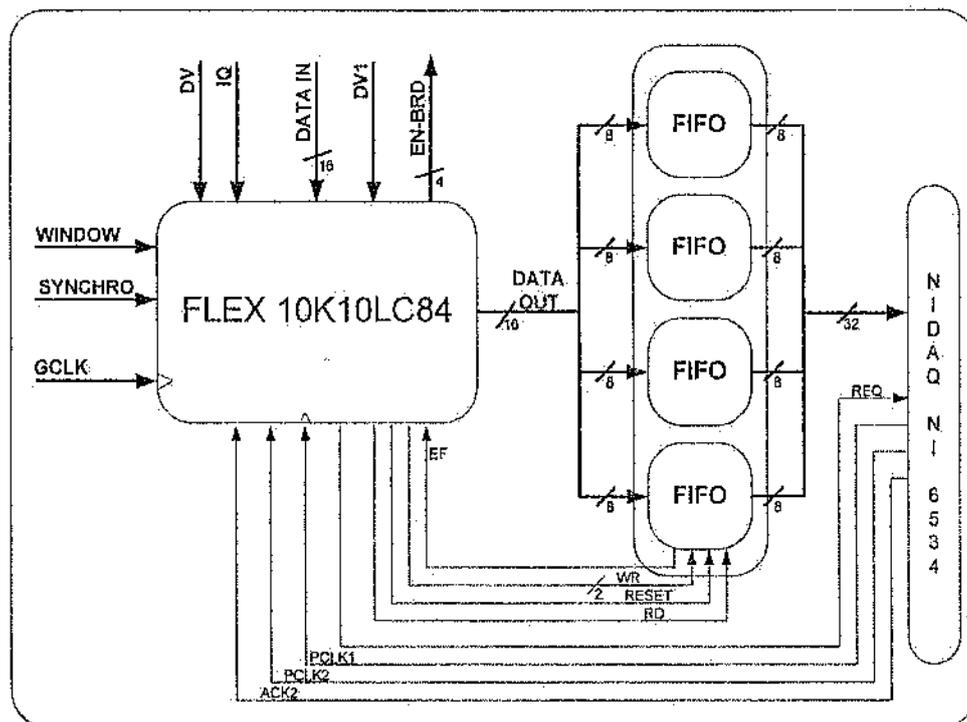


Figura 4: Diagrama de bloques de la tarjeta de control.

Las señales que recibe de la tarjeta multiplexora son: los datos de los receptores digitales "Data_In", la señal DV e IQ, la señal DV del primer canal "DV1" y envía la señal de habilitación "EN-BRD" para los receptores digitales. De las cuatro FIFOs dos se utilizan para almacenar los datos "I" y dos para "Q", para eso la señal QUE habilita escritura de la FIFO ocupa 2 bits; cuando se reinicia el sistema el FPGA reinicia a las FIFOs con la señal de "RESET"; la

señal de lectura "RD", activa la lectura de todas las FIFOs al mismo tiempo para enviar los datos "I" Y "Q" en paralelo. Otra función de la FIFO, es la de almacenar datos cuando se tiene que esperar que termine la ventana para poder leerlos (normalmente dentro de la ventana se puede realizar la escritura y lectura en las FIFOs) como es el caso de experimentos de 8MHz a la salida de los receptores.

RESULTADOS

Las pruebas realizadas en el presente proyecto, evalúan tasas máximas de transferencia, rango dinámico y nivel de ruido para diferentes experimentos:

Transferencia Máxima

Al trabajar con un reloj de 32MHz, en los receptores digitales se logra una máxima tasa de muestreo de salida de 8MHz (debido a que el mínimo decimado en el AD6620 es de 4). Además para un experimento de 8MHz sólo se puede utilizar un canal y esto se debe a que la transferencia entre las FIFOS y la NIDAQ se realiza a 10MHz (toma dos ciclos de reloj leer un dato).

Para un experimento de 8MHz, no se pueden vaciar datos de las FIFOS mientras se encuentra la ventana (en experimentos de menor tasa, se puede leer y escribir dentro de la ventana). Por lo tanto, para estos experimentos la ventana debe ser menor al 50% del IPP, para permitir que lo que se almacena en las FIFOS sea vaciado cuando la ventana este inactiva.

También se debe tener en cuenta que para este experimento la cantidad de datos que se puede almacenar por ventana debe ser menor a la capacidad de las FIFOS que es de 64Kdatos.

Pruebas de rango dinámico

Para hacer estas pruebas se utilizó un generador de señales a dos frecuencias: una para la frecuencia del Radar de Jicamarca y otra para el Radar de SOUSY desintonizados en 1KHz para observar una onda senoidal en el software ACQUIRE panel control. Para la Tabla 1, el experimento utilizado es "Ionosfera 450Km" cuya tasa de muestreo a la salida es de 20KHz, el nivel de señal inyectado en la entrada se controla desde el generador de señales.

La Tabla 2, muestra los resultados para el experimento "Júpiter 2006" cuya tasa de muestreo a la salida es de 2MHz. Se puede observar que el nivel de ruido para este experimento es mayor, debido al mayor ancho de banda que cuenta el filtro del AD6620.

MEDIDA	TARJETA 1	TARJETA 2
Ruido de 50Ω a 49.92MHz	6 bits excitados	6 bits excitados
Señal Mínima a 49.92MHz	-100dBm	-103dBm
Señal Máxima a 49.92MHz	-30.92dBm	-30.8dBm
Rango Dinámico a 49.92MHz	69.08dB	72.2dB
Ruido de 50Ω a 53.5MHz	6 bits excitados	6 bits excitados
Señal Mínima a 53.5MHz	-95dBm	-100dBm
Señal Máxima a 53.5MHz	-30.9dBm	-30.78dBm
Rango Dinámico a 53.5MHz	64.1dB	69.22dBm

Tabla 1: Pruebas para experimento Ionosfera 450Km.

MEDIDA	TARJETA REX2X-001	TARJETA REX2X-002
Ruido de 50Ω a 49.92MHz	9 bits excitados	9 bits excitados
Señal Mínima a 49.92MHz	-70dBm	-70dBm
Señal Máxima a 49.92MHz	-19.96dBm	-19.96dBm
Rango Dinámico a 49.92MHz	50.04dB	50.04dB
Ruido de 50Ω a 53.5MHz	8 bits excitados	8 bits excitados
Señal Mínima a 53.5MHz	-95dBm	-100dBm
Señal Máxima a 53.5MHz	-30.9dBm	-30.78dBm
Rango Dinámico a 53.5MHz	64.1dB	69.22dBm

Tabla 2: Pruebas para experimento Júpiter 2006.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] National Instruments Corporate, NI 653X User Manual for Traditional NI-DAQ, U.S.A. 1997.
- [2] Volnei A. Pedroni, Circuit Design with VHDL, 4ta. Edición. Cambridge, Massachusetts. London, England. MIT Press, 2004.
- [3] Analog Devices, 67 MSPS Digital Receive Signal Processor AD6620, U.S.A. 2001.
www.analog.com.
- [4] Analog Devices, 12-Bit 65 MSPS IF Sampling A/D Converter AD6640, U.S.A. 2003.
www.analog.com
- [5] Analog Devices, AD6620 Evaluation Board Manual, www.analog.com
- [6] Altera, Flex 10K Embedded Programmable Logic Device Family, January 2003 versión 4.2.
<http://www.altera.com/literature/ds/dsf10k.pdf>
- [7] Informe Técnico Del Módulo Dds Multifrecuencia.
Informe interno del ROJ.
- [8] Informe Técnico Del Controlador De Radar.
Informe interno del ROJ.

USO DEL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS APLICADO AL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

LUIS MIGUEL OCAMPO QUITO

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica
Universidad Nacional de Cajamarca
miky571@hotmail.com

*Investigación dirigida por: MSc. Juan Carlos Gómez Avalos
Área de procesos internos de la tierra*

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta una breve introducción al método de diferencias finitas, el cual consiste en aproximar la solución de ecuaciones diferenciales sobre un número de puntos discretos o nodos.

Para el desarrollo del presente trabajo se tomó como ejemplo el análisis del deslizamiento de Oselitzenbach en Austria, cuya simulación numérica fue posible con el programa FLAC3D (análisis Lagrangiano continuo en 3D) obteniendo valores críticos del esfuerzo cortante entre 37 y 38 kN/m², desarrollados en la superficie de falla; el desplazamiento máximo (4,6 cm) y una confiabilidad en la representación de la realidad de 93%.

Aplicaciones del método de diferencias finitas en el Perú, usando FLO-2D, se hace a la simulación de flujos de lodo para determinar el nivel de inundación.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son movimientos de tierra que producen cambios en la superficie del terreno. La formación de estos fenómenos depende principalmente de los siguientes factores:

- Propiedades mecánicas de la roca
- La pendiente del talud
- Sobrecargas en la superficie del terreno
- Saturación de agua
- Cambios en el contenido de humedad, etc.

Hallar la solución real del sistema es prácticamente imposible por la gran cantidad de incógnitas y ecuaciones

que se requieren resolver. Pero con el uso de métodos numéricos es posible obtener resultados que se aproximen a la solución real.

Los métodos numéricos son una rama de las matemáticas que consisten en crear algoritmos que permitan resolver problemas de inestabilidad de taludes, en los que estén involucradas parámetros, como: desplazamientos, esfuerzos y deformaciones.

El presente trabajo muestra una breve introducción al método de diferencias finitas cuyos y un ejemplo de aplicación en el deslizamiento de Oselitzenbach - Austria usando el FLAC3D (análisis Lagrangiano

continuo en 3D) codificado en diferencias finitas.

MARCO TEÓRICO

En este apartado se describe de forma sucinta los fundamentos en que se basan los siguientes temas: modelamiento, modelo geológico, modelo geomecánico y modelo matemático, a fin de tener conceptos claros en el desarrollo del presente trabajo.

Modelamiento

Un modelo es una simplificación de la realidad física que permite comprender el comportamiento o el mecanismo de un evento natural, como la falla de un talud.

En el análisis de estabilidad el proceso de modelamiento comprende el desarrollo de tres campos: El modelo geológico que incluye la litología, unidades estructurales e hidrología. La caracterización geomecánica, en el que se cuantifican las propiedades mecánicas de la roca o suelo. Y el modelo numérico, con el que obtiene una visión del comportamiento mecánico del deslizamiento.

La metodología para el análisis de estabilidad de deslizamientos implica el desarrollo de estos 3 campos siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 1.

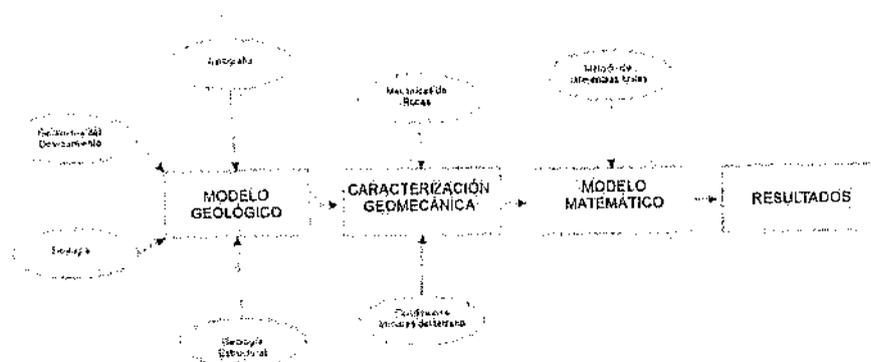


Figura 1: Esquema del proceso de modelamiento para el análisis de estabilidad de un deslizamiento (Ledesma y Hurlimann, 2001) modificado para el presente trabajo

Modelo geológico

El modelo geológico de un macizo rocoso es la representación simplificada de los factores de tipo geológico que lo definen y que

permiten hacer una suposición del mecanismo involucrado con el movimiento. Algunos de los factores geológicos a tener en cuenta en el análisis de deslizamientos son los siguientes:

- Litología y grado meteorización.
- Unidades estructurales: orientación y distribución de fracturas y discontinuidades.
- Flujo de agua en el macizo rocoso, porosidad, permeabilidad, etc.

El proceso que se sigue para llegar a definir el modelo consta de una fase preliminar de recolección de datos topográficos, litología, geología estructural, etc. Luego se construye un Modelo Digital del Terreno (MDT), transformando de base topográfica (escala 1/5000 o mayor) a una estructura digital de datos que representará la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Este MDT constituirá la base sobre la cual se irán superponiendo diferentes aspectos temáticos.

Caracterización Geomecánica

La caracterización geomecánica tiene por objeto cuantificar los parámetros que componen el modelo geológico. Generalmente las propiedades mecánicas del macizo rocoso son determinadas por ensayos de corte directo, triaxiales, etc.

Estas propiedades, asumiendo el comportamiento elasto-plástico con

criterio de rotura de Mohr-Coulomb, son:

La resistencia al corte

Es la resistencia interna por unidad de área que la masa de roca ofrece para resistir la falla a lo largo de cualquier plano (EF en la Figura 2a) dentro de el (Braja, 2001). Según la teoría de Mohr, el material falla debido a una combinación crítica del esfuerzo normal y el cortante sobre un plano de falla.

La resistencia al corte viene expresada en la siguiente forma lineal:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

donde τ = resistencia al corte
 σ = Esfuerzo normal
 ϕ = ángulo de fricción
 c = cohesión

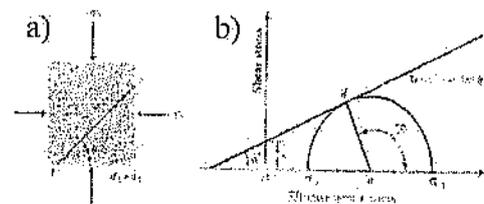


Figura 2: a) Inclinación del plano de falla. b) Círculo de Mohr y envolvente de falla. (Braja, 2001)

Los círculos de Mohr son determinados a partir de los esfuerzos σ_1 y σ_3 que representan el estado tensional del macizo rocoso y son determinados mediante ensayos triaxiales (Figura 2b).

El módulo de elasticidad

Es el cociente entre el esfuerzo y la deformación expresado como:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

donde: $\Delta\sigma$ = incremento de tensión
 $\Delta\varepsilon$ = incremento de deformación.

Otra forma de definir el modulo de deformación es mediante la pendiente del tramo más recto de curva tensión deformación (Figura 3).

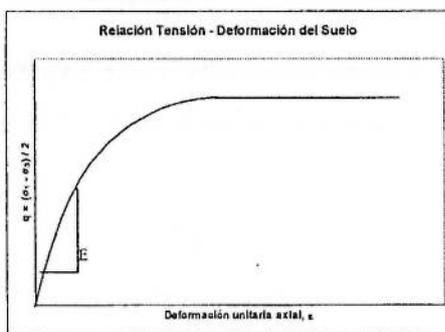


Figura 3: Relación tensión - deformación bajo el efecto de la presión de confinamiento σ_3 (Ramírez, 1994)

El módulo de Poisson

se define como:

$$\nu = \frac{E}{E_d} \quad (3)$$

donde:

E : Módulo de deformación axial

E_d : Módulo de deformación diametral

En la caracterización geomecánica también de se evalúan las tensiones iniciales en el macizo rocoso que incluyen las componentes de las tensiones gravitacionales, debido al peso de de la roca, la presión lateral de

tierra, etc. Estas tensiones se determinan mediante ensayos in situ, como: células triaxiales, extensómetros, etc.

Modelo Matemático

Este modelo integra a la caracterización geomecánica y se obtiene como resultado de las formulaciones matemáticas utilizadas, una visión del comportamiento del macizo rocoso sometido a diferentes estados de carga. Algunas metodologías empleadas para la evaluación de la estabilidad de taludes son:

a. Métodos de equilibrio límite

Este método evalúa el talud en su estado de falla, esto implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de una superficie de ruptura con la resistencia cortante del macizo rocoso. En estos métodos el análisis de estabilidad de un talud se evalúa en términos de un factor de seguridad:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (4)$$

donde: FS = Factor de seguridad

τ_f = Resistencia cortante del macizo rocoso

τ_d = Esfuerzo cortante desarrollado en la superficie de falla

b. Métodos numéricos – Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas consiste en encontrar una función (f) que satisfaga la ecuación:

$$\gamma \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) = -Q \quad (5)$$

donde: γ : peso específico

f : Función incógnita

t : Tiempo

Sujeta a las siguientes condiciones de borde:

$$f(0) = \bar{f}_0, \quad f(L_x) = \bar{f}_{L_x} \quad (6)$$

Para resolver la ecuación (5) por el método de diferencias finitas, se empieza por discretizar la variable x ; es decir, se construye una malla de $(L+1)$ puntos o nodos uniformemente espaciados (Figura 4), Tal que:

- o $x_{i+1} - x_i = \Delta x$, para $x_i (i = 1, 2, \dots, L)$ en el rango $0 \leq x \leq L_x$

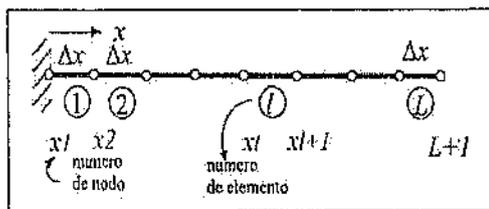


Figura 4: Discretización de un dominio unidimensional por diferencias finitas (Tassi y Engelberger, 2003).

El siguiente paso consiste en la aproximación por diferencias finitas a la segunda derivada en el punto $f(x_{i+1})$ (ecuación 7):

La aproximación a la $\partial^2 f / \partial x^2$:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \approx \frac{f_{i+1,m} - 2f_{i,m} + f_{i-1,m}}{\Delta x^2} \quad (7)$$

Reemplazando (7) en la ecuación (5)

$$\rho \left(\frac{f_{i+1,m} - 2f_{i,m} + f_{i-1,m}}{\Delta x^2} \right) = -Q \quad (8)$$

La ecuación (7) se traslada para cada nodo de la malla (para, $i = 0, 1, 2, \dots, L_x$); obteniendo un sistema de ecuaciones de $(L-1)$ ecuaciones lineales con $(L-1)$ incógnitas f_1, f_2, \dots, f_{L-1} .

$$\begin{aligned} -f_2 - 2f_1 &= \frac{Q_1(\Delta x^2)}{\rho} + \bar{f}_0 \\ -f_3 + 2f_2 - f_1 &= \frac{Q_2(\Delta x^2)}{\rho} \\ -f_4 + 2f_3 - f_2 &= \frac{Q_3(\Delta x^2)}{\rho} \\ &\vdots \\ -f_{L-1} - 2f_{L-2} - f_{L-3} &= \frac{Q_{L-2}(\Delta x^2)}{\rho} \\ 2f_{L-1} - f_{L-2} &= \frac{Q_{L-1}(\Delta x^2)}{\rho} + \bar{f}_{L_x} \end{aligned} \quad (9)$$

Este conjunto de ecuaciones puede ser expresarse en forma matricial:

$$fK = F \quad (10)$$

donde:

$$K = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ & & & \ddots & \ddots & 0 \\ & & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, el problema original de determinar una función incógnita f_x puede ser resuelto a partir de una

ecuación matricial para el conjunto discreto de nodos f_1, f_2, \dots, f_{i-1} .

El método de diferencias finitas da valores de la función $f_{i,j}$ en los nodos de la malla, pero no da resultados acerca de los valores de función entre estos puntos. Por lo tanto, aproximamos la ecuación de gobierno (ecuación 5) sobre un número discreto de puntos y no a través de la región (Tassi y Engelberger, 2003).

c. **FLAC 3D (Análisis Lagrangiano continuo en 3 dimensiones)**

Este es un programa que permite realizar un análisis de tensión – deformación en masas de roca sometidas a distintos estados de carga. Utiliza el método de diferencias finitas y se encuentra dentro de los software más aceptados a nivel mundial para el análisis tensión-deformación en medios continuos.

Los pasos para resolver un problema de taludes con el FLAC 3D son:

Generación de la malla

Definición y generación de malla de diferencias finitas en base a figuras geométricas predefinidas (primitivas). Como las tensiones se transmiten a través de los nodos, se debe cumplir con el criterio de continuidad

geométrica a través de los bordes y aristas de tal forma que los planos de contacto entre primitivas coincidan exactamente en los nodos.

Definición de las condiciones de borde

Son los valores de las variables que se prescriben en los bordes de la malla, los cuales son:

- Reales, como por ejemplo, la superficie del terreno.
- Artificiales, limitación del tamaño del modelo y del número de primitivas.

Definición de las condiciones iniciales

FLAC 3D permite la asignación del estado tensional inicial del terreno (esfuerzos y desplazamientos) en el modelo numérico, y por consiguiente, su influencia en el resultado final.

Elección del modelo constitutivo y asignación de propiedades y simulación numérica

FLAC 3D permite escoger, según el comportamiento de la roca, el modelo constitutivo más conveniente: modelo elástico, elasto-plástico, etc. La presente monografía considera el modelo elásto – plástico con criterio de rotura de Mohr-Coulomb, teniendo en

cuenta las propiedades mostradas en el Tabla 1, con sus respectivas unidades.

Longitud	m	m	m	Cm
Densidad	kg/m ³	10 ³ kg/m ³	10 ⁶ kg/m ³	10 ⁶ g/cm ³
Fuerza	N	kN	MN	Mdynes
Tensión	Pa	kPa	MPa	Bar
Acercación de gravedad	m/seg ²	m/seg ²	m/seg ²	cm/seg ²

Tabla 1: Propiedades mecánicas en el sistema internacional usadas en el FLAC3D.

Interpretación de resultados

FLAC3D es un programa que "aproxima" a una solución mecánica de los problemas en estudio. Dicha aproximación debe ser evaluada a partir de criterios prácticos como:

- La influencia de la geología con la inestabilidad del talud.
- Control de deformaciones y velocidad de deformación, en la malla

d. Otros programas de diferencias finitas

FLO2D (Modelo bi-dimensional para simulación de flujos)

Este permite simular el flujo de fluidos no confinados, como huaycos, sobre topografías complejas, como áreas urbanizadas, terrazas y conos de deyección. El modelo utiliza el impulso dinámico de la ecuación de onda en diferencias finitas para predecir la

dinámica de inundación de un flujo de lodos.

Los pasos para simular el flujo de lodos con FLO 2D son:

Datos de entrada

Se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal y valores de la rugosidad del canal y la planicie de inundación.

Definición de las condiciones de borde

Hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y la topografía a detalle del cono de deyección.

Asignación de propiedades y simulación numérica

FLO 2D permite definir los siguientes parámetros reológicos: Viscosidad y esfuerzo de cedencia.

Resultados

Los resultados son presentados en un mapa de peligros que representa el desborde o inundación provocado por el flujo de lodo.

GiD (Pre y postprocesador personal)

GiD es un programa gráfico utilizado para la definición, resolución y visualización de todos los datos relacionados con una simulación numérica. Estos datos incluyen la definición de la geometría a estudiar,

los materiales que la componen, las condiciones iniciales, fuerzas aplicadas y la metodología de resolución. El programa está diseñado para simular problemas de mecánica de rocas y/o suelos, estructurales, dinámica de fluidos, etc. usando diferencias finitas, elementos finitos o elementos de contorno.

El proceso de resolución consiste en:

- Definir la geometría del problema.
- Definir las propiedades y las condiciones iniciales.
- Generación de la malla.
- Simulación numérica.
- Interpretación de resultados

PROCESO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

La deformación de un macizo rocoso se modeliza mediante una formulación Lagrangiana de las ecuaciones de momentos constitutivas de los elementos de la estructura. Dicha formulación es dependiente del tiempo. Las ecuaciones de momentos de la estructura se pueden expresar según:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \gamma &= \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (12)$$

donde:

γ : Peso específico

g : aceleración de la gravedad

σ_x , σ_y , σ_z : son las tensiones en las direcciones x , y , z

Esta formulación Lagrangiana de las ecuaciones de momentos requiere que la masa de cada zona elemental se mantenga constante, mientras que cambian el volumen, forma y posición de los elementos de la malla.

La integración de la ecuación (15) proporciona las tasas de deformación normal y cortante en los nodos de la malla. Los incrementos de deformación se calculan a partir de:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

(13)

y los incrementos del módulo de rigidez

$$G_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \quad G_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \quad G_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\quad (14)$$

A la hora de realizar el cálculo, las magnitudes vectoriales, como posición y velocidad, se definen en los nodos de la malla. Y las magnitudes escalares, como el peso específico, se definen en

el centroide de cada elemento de la malla.

El análisis comienza con la aplicación de una fuerza externa a un contorno de la malla o dado por las tensiones iniciales del problema. Siguen una serie de ciclos de deformación hasta que el sistema alcanza el equilibrio estático.

La deformación y el estado tensional se calculan por ecuaciones en diferencias finitas aplicadas a la malla definida (ecuación 5). El movimiento del talud comienza por el desequilibrio de fuerzas creado por la fuerza externa. Esta fuerza se utiliza para acelerar los nodos. La aceleración se integra dos veces obteniendo la velocidad y las coordenadas de los nodos de la malla.

En cada ciclo de deformación se recorre toda la malla para actualizar las velocidades y las coordenadas de los nodos sobre la base de un sistema conocido de cargas y tensiones calculadas en el ciclo precedente.

Calculados los incrementos de deformación y del módulo de rigidez en todos los nodos, se recorre la malla para calcular los incrementos de deformación en cada zona y a partir de estas deformaciones se calculan las tensiones (ecuación 15),

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$G_{xz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xz}$$

$$G_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$$

$$G_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz}$$

(15)

Y se repite el ciclo completo para el siguiente ciclo de deformación hasta que el sistema alcanza el equilibrio.

APLICACIÓN DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN OSELITZENBACH-AUSTRIA

La zona norte de los "Alpes Carnicos" en la parte meridional de Austria de la provincia de Carintia se ve afectada por constantes deslizamientos.

El riesgo está en la destrucción de la carretera NaBfeld (cruce de los Alpes a Italia), así como en las villas de Tropolach y Watsching.

Los Alpes Carnices, se ubican entre la frontera entre Austria (provincia de Carintia) y el norte de Italia. Son una cadena montañosa de dirección E-O de hasta 2700msnm (Figura 5). El principal valle (Gailtal 600msnm) en el norte del país es paralelo a estas cadenas, donde los más pequeños afluentes cortan transversalmente a las montañas a través de estructuras

formando valles e estrechos y empinados.



Figura 5: Plano de ubicación de la provincia de Carintia.

El área de estudio consta de rocas sedimentarias que contienen capas de arcilla, esquistos, areniscas y calizas. La secuencia estratigráfica comienza con rocas metamórficas del Paleozoico inferior, cubierto por areniscas (Permico-Devonico) intensamente plegados y fracturados.

Estas secuencias se encuentran, en parte cubiertas, por secuencias del Triásico. En el valle principal, el Galtal, se ubica un lineamiento llamado "lineamiento Periadriático" de dirección E-O. También se observan fallamientos secundarios paralelos a este lineamiento (Figura 06).

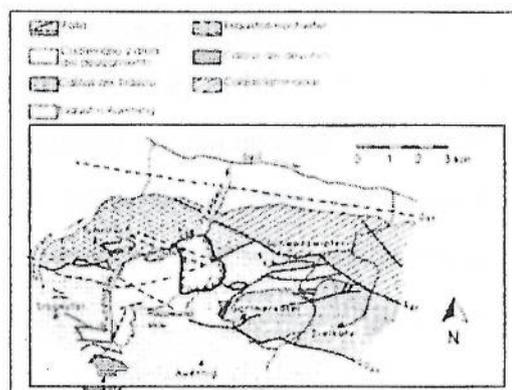


Figura 6: Esquema de la geología local y estructural de Oselitzenbach (Tentschert & Peh, 2004).

Identificación del deslizamiento:

El deslizamiento de Oselitzenbach corresponde a la reactivación de un deslizamiento antiguo por los procesos de erosión del torrente de Oselitzenbach en la base del deslizamiento

El talud esta constituido por calizas del pérmico entre los 1300 y 1700msnm

con una pendiente de 40° y movimientos de 5cm/mes. Cubre una superficie de $3\,000\,000\text{m}^2$ y el volumen estimado es de $150\,000\,000\text{m}^3$ (Figura 7)

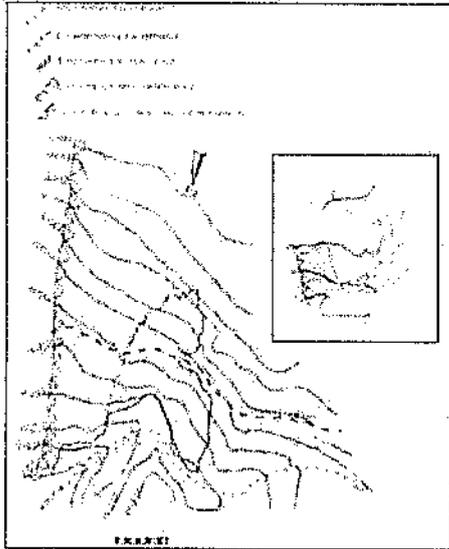


Figura 7: Escarpa principal y límites del deslizamiento (Tentschert & Preh, 2004).

- La capa más baja constituida por caliza, fresca, no muestra ningún desplazamiento hasta el momento.
- La capa intermedia (15-30m de espesor), constituida por roca moderadamente meteorizada, muestra pequeños desplazamientos, pero no es tan fracturada como la capa superior.
- La capa superior (10-15m de espesor) está muy fracturada y esta constituido por roca intensamente meteorizada, por lo tanto tiene una baja cohesión. Este hecho es el principal motivo de los constantes desplazamientos.

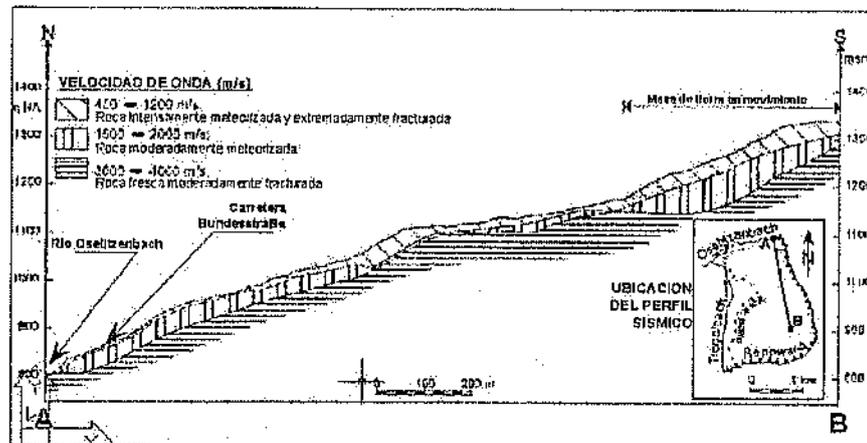


Figura 8: Perfil sísmico de la ladera (Tentschert & Preh, 2004).

El talud está constituido por rocas calcáreas. A partir de un perfil de refracción sísmica se identificaron tres capas con diferentes grados de meteorización (Figura 8).

En base a la sección de refracción sísmica se puede determinar la profundidad de la masa en movimiento cuya superficie de rotura está definida por el contacto entre la capa inferior (roca fresca) y la capa intermedia.

El cuerpo principal del deslizamiento lo constituyen las capas superior e intermedia con 15m y 30m de espesor respectivamente. La densidad promedio es 25kN/m^3 . El modelo constitutivo seleccionado para el presente trabajo fue el de Mohr-Coulomb asumiendo, en base a las características mecánicas del material, las propiedades indicadas en el siguiente Cuadro.

Capas	E(GPa)	ν	$\phi(^{\circ})$	c(kPa)
Capa superior	2.5	0.2	18	14
Capa media	3.7	0.2	25	20
Capa inferior	3.7	0.2	40	20

Proceso de simulación numérica:

El modelo numérico se realizó con el FLAC3D (Análisis Lagrangiano continuo, siglas en español).

El análisis empieza introduciendo un modelo digital del terreno en el cual se van ubicando y diferenciando las tres unidades litológicas que componen el macizo rocoso.

El siguiente paso es la discretización del terreno, construyendo una malla, en tres dimensiones, de elementos finitos en base a figuras geométricas predefinidas (Figura 9).

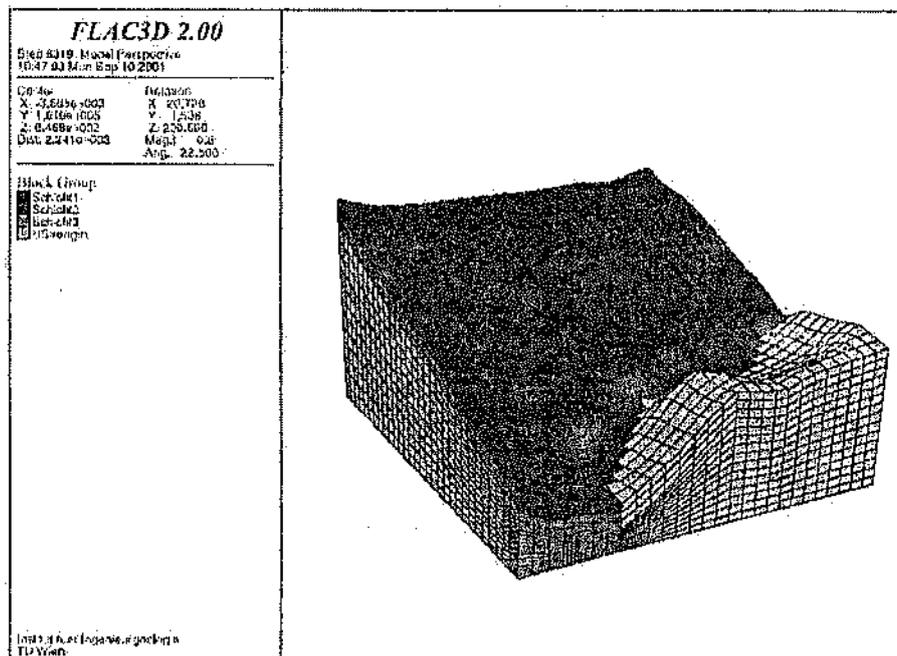


Figura 9: Discretización del terreno, en base a una malla en 3D. Cada tonalidad corresponde a los tres tipos de capas de material, con diferentes propiedades mecánicas (Ledesma, 2001)

Una vez construida la malla se define la posición y coordenadas de cada uno de los nodos. Así como las dimensiones de los elementos, en este proceso los planos de contacto entre los elementos deben coincidir exactamente en los nodos de tal forma que exista continuidad geométrica.

El siguiente paso consiste en definir las tensiones iniciales del terreno que sólo incluyen a las tensiones gravitacionales, debido al peso de la roca.

A continuación se asigna el modelo constitutivo correspondiente. Para el presente trabajo se usó el modelo de Mohr-Coulomb y las propiedades

mecánicas mostradas anteriormente.

Finalmente FLAC3D hace la simulación numérica aproximando los valores de esfuerzos normales y cortantes, deformación y velocidad, sobre el conjunto de puntos discretos (nodos).

La Figura 10 representa un típico resultado de la simulación numérica. Cada contorno representa un intervalo de esfuerzo cortante. Nótese que en el intervalo 37.00 a 38.46Nw/m², se tienen valores críticos del esfuerzo cortante, por ser la zona correspondiente a la superficie de rotura.

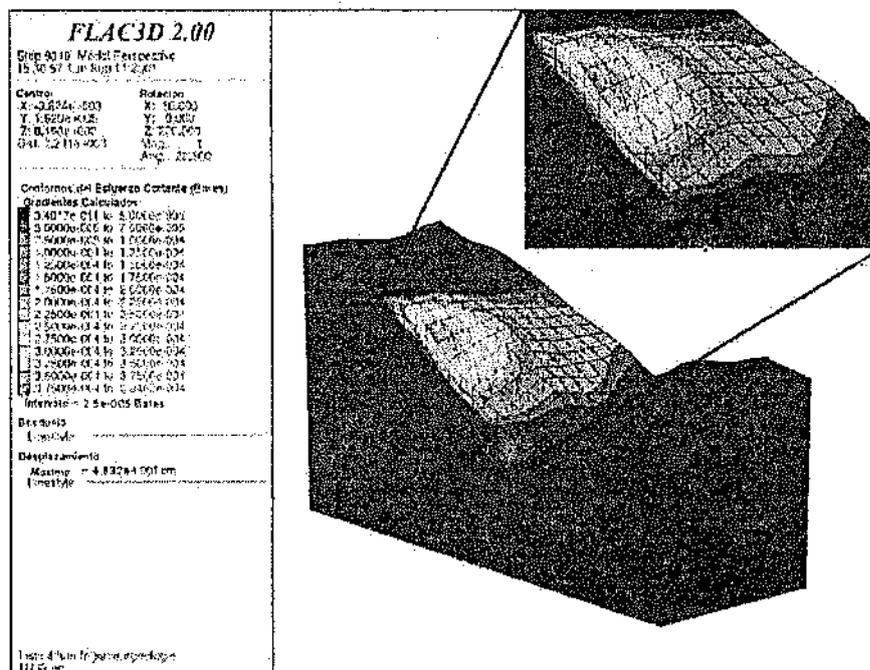


Figura 10: Presentación de los resultados en intervalos de esfuerzo cortante y vectores de desplazamiento usando el programa FLAC3D (Ledezma, 2001).

Interpretación de resultados:

Para la capa superior, constituida por roca intensamente fracturada y meteorizada con 14kN/m^2 de cohesión, la resistencia a la compresión simple

(q_u) varía entre $50\text{-}100\text{kN/m}^2$ (Ramírez, 1994).

Del tramo más crítico, zona correspondiente a la superficie de falla, el esfuerzo cortante τ está entre 37.00kN/m^2 - 38.46kN/m^2 . Aplicando el criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$\tau = 14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + \sigma_n \text{tg} 18^\circ$$

obtenemos el *esfuerzo normal* promedio (σ_n) de 73.86kN/m^2 .

Este último valor representa la resistencia pico a la compresión simple de la capa superior (Figura 8). Lo que significa que a esfuerzos iguales o mayores a este el talud falla.

Finalmente de la simulación se obtuvo el desplazamiento máximo 4.632cm . Las mediciones en campo indican movimientos de 5cm/mes . Por lo tanto la representación de la realidad es de 92.64% .

OTROS ESTUDIOS

Básicamente en todos los análisis de estabilidad de taludes, el modelamiento es similar, aunque el análisis y la solución son dependientes del lugar.

Como ejemplos de aplicación se tienen los realizados Ceppo Morrelli en **Piombino-Italia**, en el que el análisis numérico se ha desarrollado con el método de elementos finitos. Otro ejemplo de aplicación, también en Italia, es el de Encampanada cuyas simulaciones numéricas no sólo sirvió para el análisis de estabilidad sino también para reconstruir el proceso geomorfológico ocurrido en dicho lugar (Ledezma, 2001).

Otros trabajos de análisis de estabilidad, usando FLAC 3D, aplicados al análisis de taludes en minas a cielo abierto como en la mina Chuquicamata en **Chile** permitió simular matemáticamente el movimiento del talud e identificar el mecanismo de rotura (Núñez, 2004)

En Perú el INGEMMET hace modelos numéricos aplicados a flujos de lodo usando un modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D, con el que se simula el movimiento de un flujo de lodo sobre la superficie del terreno, ejemplos de aplicación se tienen en la quebrada de Paihua **Matucana-Lima** y en la quebrada Shapy-**Cuzco**.

DISCUSIÓN

En el caso mostrado, el análisis de estabilidad de Oselitzenbach, el

método de diferencias finitas fue aplicado para simular el mecanismo de rotura y determinar los parámetros críticos de la ladera inestable, con una representatividad del 93%. Para esto se uso el programa *FLAC3D* que permite hacer un análisis de tensión-deformación en medios continuos sometido a cargas estáticas.

Las aplicaciones del método de diferencias finitas en el Perú se ha hecho para el análisis dinámico de flujos, como: avenida de lodos, flujo de lodos y flujo de detritos (Castillo, 2007). Este análisis es hecho con el programa *FLO-2D*, que permite simular la descarga de un flujo en un canal (por ejemplo una quebrada) y determinar el nivel de inundación o desborde provocado por dicho flujo con una representatividad mayor de 90% (García, 2004).

Pero a pesar de estar codificados en diferencias finitas la aplicación específica de cada uno de estos programas de modelamiento, *FLAC 3D* y *FLO-2D*, dependerá en gran medida de que el fenómeno a estudiar sea de Tensión-deformación o de dinámica de fluidos respectivamente.

GID, a diferencia de los anteriores, es un programa que no está diseñado para un tipo de análisis; es decir, no conoce

ningún material o condición hasta que no se defina el tipo de problema. Esto permite resolver problemas de Tensión-deformación o de dinámica de fluidos.

Independientemente, del programa a utilizar. La confiabilidad del método de diferencias finitas dependerá de:

- Asegurarse que los factores geológicos a considerar sean los más apropiados para representar la realidad que se quiera entender, y
- El análisis logre reproducir razonablemente la realidad observada.

CONCLUSIONES

- Los resultados del método de diferencias finitas son aproximaciones al valor real mediante un número discreto de nodos. Los resultados obtenidos son magnitudes vectoriales: velocidades, desplazamientos, esfuerzos que son definidos en los nodos de la malla.
- El proceso de simulación numérica consiste en la aplicación de una carga sobre un contorno del dominio, dado por las tensiones iniciales. Siguen una serie de ciclos de deformación hasta que el sistema alcanza el equilibrio estático.

- o La importancia matemática en el análisis de estabilidad de taludes muestra aproximaciones al valor real que no sólo depende del desarrollo de algoritmos matemáticos; sino, también requiere de la construcción de un modelo geológico y una caracterización geomecánica lo más representativas del macizo rocoso.
- o Los resultados obtenidos muestran que el método de diferencias finitas es confiable y reproduce en más de 90% la realidad. Sin embargo, son aproximaciones que deben ser evaluados a partir de criterios geológicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la dirección de Asuntos Académicos del Instituto Geofísico del Perú y a mi asesor MsC. Juan Carlos Gómez por permitirme capacitarme Profesionalmente en el Área de Procesos Internos de la Tierra

BIBLIOGRAFÍA

- Braja M. Das (1972) "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica". California State University, Sacramento. Editado por Pedro de la Garza R. (México DF)
- Castillo Leonardo, Fidel Lionel & Jackson Lionel (2007) "Modelado de flujos de lodo usando FLO-2D en la quebrada Paihua: Impacto en la ciudad de Matucana, Lima" XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú.
- García R., Rodriguez J. (2004) "Hazard zone Delineation for Urbanized Alluvial Fans". ASCE World Water & Environmental Resources Congress – Arid land symposium, Salt Lake City, Utah. URL: <http://www.flo-2d.com/v2004/papers/hazardsMethods.pdf>.
- Ledesma A. y Marcel Hurlimann (2001) "Impact of landslides en the mountain enviroment: Identification and mitigation of risk" Guidelines on the use of numerical methods for the prediction of failure.
- Nunes Anna, Gavilanes Hernán y Fontoura Sergio (2004) "ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES MINEROS POR MÉTODOS NUMÉRICOS". IV Seminario de Engenharia de Fundacoes Especiais e Geotecnia. Sau Paulo – Brazil.

Pirulli M. (2003) "Rock avalanche run out prediction: combined application of two numerical methods". Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy. P. 903-908.

URL:

<http://www.saimm.co.za/events/0309isrm/downloads/0903-Pirulli.pdf>

Ramírez P. y de la Cuadra L. (1994) "Mecánica de rocas aplicada a la minería". Editado por el Instituto geológico y minero de España. 362p.

Tassi P. Ay Engelberger C.R. (2003) "Introducción al método de diferencias finitas". Universidad Tecnológica regional – Facultad región Santa Fe.

URL:

<http://elasticidad.esmartstudent.com>

Tentschert E. & Preh A. (2004) "Impact of large landslides in the mountain Environment: Identification and mitigation of risk". Reppwand-Oselitzenbanch landslide-IMIRILAD.

ESTIMACIÓN DEL CONTACTO SISMOGENICO EN EL BORDE OCCIDENTAL DEL PERÚ

PATRICIA ALEJANDRA GUARDIA ANAMPA

*Facultad de Geología, Geofísica y Minas de la
Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.
Patyale84@hotmail.com*

*Investigación dirigida por: Dr. Hernando Tavera
Director de Sismología-CNDG*

INTRODUCCIÓN

El Perú, es uno de los países de mayor actividad sísmica en el mundo, la misma que está relacionada principalmente con el proceso de subducción de la placa oceánica (Nazca) bajo la placa continental (Sudamericana). Este proceso genera una constante acumulación de energía que se libera en forma de terremotos, en tanto esto ha motivado a muchos investigadores a realizar diversos estudios para conocer la geometría de la subducción, así como zonificar las áreas de mayor deformación superficial en el interior del continente.

El cálculo de los parámetros hipocentrales de terremotos ocurridos en el Perú, han mostrado que estos ocurren a diferentes profundidades, teniendo como máximo la profundidad de 700 Km. Esta característica ha permitido clasificar a los sismos de acuerdo a la

profundidad de sus focos en ($h \leq 60$ km), intermedios ($60 < h \leq 350$ km) y profundos ($h > 350$ km).

En el presente estudio, se realiza un descripción de la deriva continental, la tectónica de placas, los procesos de subducción, y se estima la geometría de superficie del contacto sismogénico a partir de la distribución y de los sismos en profundidad. Considerando que los sismos de magnitud se producen por el proceso de fricción de las placas, es importante conocer las dimensiones del área de máximo acoplamiento sísmico. En estudios realizados por Comte et al (1998) se indica que la profundidad máxima de dicha superficie en Chile es del orden de 60 Km.; mientras que, para el Perú no ha sido posible determinar dicho parámetro debido principalmente a la falta de datos de redes sísmicas locales. En este estudio se estima la

profundidad máxima de la superficie de acoplamiento de las placas en el borde occidental del Perú a partir del análisis de la frecuencia sísmica en función de la profundidad de los focos sísmicos. Los resultados a obtenerse en este estudio son preliminares y serán completados con otros procedimientos en un estudio más amplio.

LA DERIVA CONTINENTAL

Se conoce como Deriva Continental al proceso por el cual las placas que tienen a los continentes han venido desplazando durante millones de años (Figura 1) debido a que continuamente emerge material del manto que rompe la corteza oceánica y se crea fuerzas que expanden el fondo marino y empujan a las zonas ocupadas por los continentes (las placas continentales) y, en consecuencia, cambian de posición.

En el año 1924, el astrónomo y meteorólogo alemán, Alfred L. Wegener (1880 - 1930) postuló que, hace 300 millones de años, existía un gran supercontinente al que llamo Pangea.

Con el transcurrir del tiempo, este supercontinente se fragmentó en placas continentales. Los fragmentos comenzaron a dispersarse hasta llegar a la actual disposición de los continentes y masa oceánicas.

La teoría propuesta por Wegener se denomina Deriva Continental, y en un principio fue desacreditada por todos los geólogos de su tiempo. Esta teoría considera los siguientes aspectos:

Antes del comienzo de la era paleozoica las placas estaban unidas formando un único continente, la Pangea-I.

Luego, la Pangea-I se fragmentó y dio lugar a cuatro grandes bloques, y a una serie de masas continentales menores.

Estas placas, sometidas a la deriva continental formaron, al final de la era Paleozoica, un nuevo supercontinente, la Pangea II. En este se distinguían claramente dos sectores Gondwana y Laurasia. Gondwana estaba integrada por América del Sur, Australia, India, Nueva Zelanda, África, Madagascar, y la Antártica; Laurasia estaba integrada por Eurasia y América del Norte.

Durante la era Mesozoica, Pangea II comenzó a fraccionarse nuevamente

hasta llegar a adquirir el aspecto actual de los continentes.

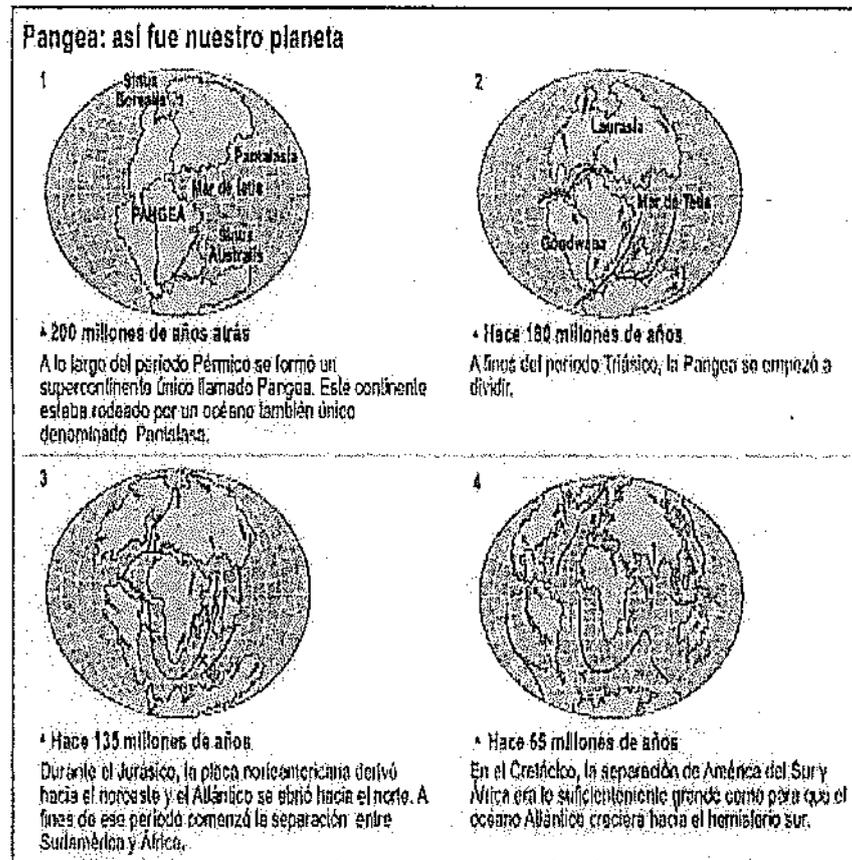


Figura 1: Evolución de los continentes desde principios la era secundaria, hace unos 200 millones de años, hasta la actualidad.

Actualmente, casi nadie duda de la validez de esta teoría, debido a que se descubrió la existencia de corrientes de convección en el interior del manto que permiten el ascenso vertical de la masa fluida que constituye la parte superior del manto (capa intermedia de la tierra), y que provoca el movimiento de las placas incluso en nuestros días.

Básicamente Alfred Wegener sustentó la hipótesis de la deriva continental. Con las siguientes pruebas:

Pruebas paleontológicas: Se hallaron fósiles de un mismo helecho de hoja caduca en Sudamérica, Sudáfrica, Antártida, India y Australia. Así como fósiles del reptil Lystrosaurus en Sudáfrica, India y Antártida, y fósiles de

Mesosauros en Brasil y Sudáfrica. Esto indicaba que tanto esta fauna (Figura 2), como la flora pertenecían a unas mismas zonas comunes que se irían distanciando con el paso del tiempo, claro esta, con el deslizamiento de los continentes.

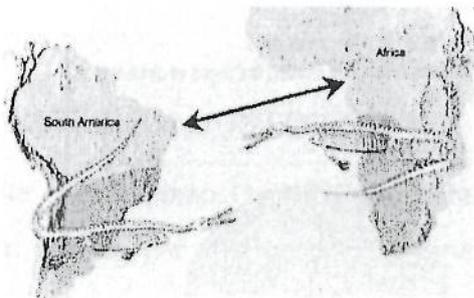


Figura.2: Distribución del mesosaurus (260 m.a.)

Pruebas Paleomagnéticas: Se pudo saber cual era la posición de los continentes con respecto a los polos, atendiendo al magnetismo procedente de la composición de sus rocas. De esta forma, observando los trazados magnéticos se llegó a la conclusión de que hubo con anterioridad una conglomeración de los continentes actuales.

Pruebas geológicas: Por un lado, el ajuste de los bordes de la plataforma continental entre los continentes africano y sudamericano (Figura 3), esto es que encajaban el uno con el otro. Por otro lado, la continuación de

las cadenas montañosas en el continente sudamericano y en el africano, hoy en día separadas por el Océano Atlántico. Y por último, la continuación de las cadenas montañosas europeas y norteamericanas actualmente separadas por el océano Atlántico.

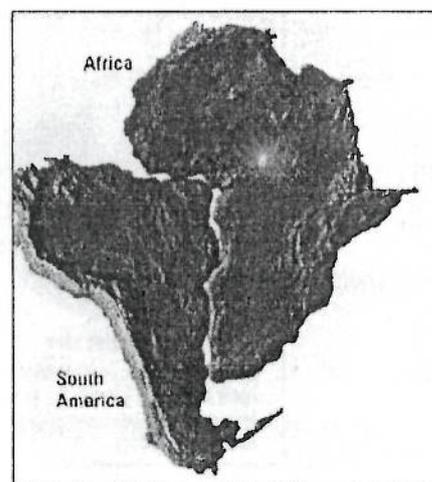


Figura 3: Pruebas geológicas.

Pruebas Paleoclimáticas: Este tipo de pruebas representaban para Wegener una de las más importantes debido a sus conocimientos sobre meteorología. El científico alemán descubrió que existían zonas en la tierra cuyos climas actuales no coincidían con los que tuvieron en el pasado (Figura 4). Existen lugares hoy que tienen un clima tropical o

subtropical, pero que estaban cubiertas de hielo hace 300 millones de años. La presencia de un mismo modelo erosivo en distintos continentes, da pie a pensar que todos ellos permanecieron unidos en el pasado ya que poseían el mismo clima. Por ejemplo, los mismos depósitos morrénicos en Sudáfrica, Sudamérica, India y Australia.



Figura 4: Pruebas paleoclimáticas.

LA TECTÓNICA DE PLACAS

La palabra tectónica viene del griego $\tau\epsilon\kappa\tau\omicron\nu\iota\kappa\omicron\varsigma$ que significa "perteneciente a la construcción o la estructura" y se refiere al estudio de los procesos que dan forma a los grandes rasgos de la corteza terrestre mediante la creación de continentes y océanos, de montañas y trincheras marinas. Las

placas son trozos (más o menos rígidos) de la parte más superficial de la tierra que se mueven unos con respecto a otros, las interacciones entre estas placas dan lugar a los procesos tectónicos.

Durante miles de millones de años se ha ido sucediendo un lento pero continuo desplazamiento de las placas que forman la corteza del planeta Tierra, originando la llamada "tectónica de placas", una teoría que complementa y explica la deriva continental. Los continentes se unen entre sí o se fragmentan, los océanos se abren, se levantan montañas, modifica el clima, influyendo todo esto, de forma muy importante en la evolución y desarrollo de los seres vivos. Se crea nueva corteza en los fondos marinos, se destruye la corteza en las trincheras oceánicas y se producen colisiones entre continentes que modifican el relieve.

Aunque la teoría de la tectónica de placas fue formalmente establecida en los años 1960 y en los 1970, en realidad esta es producto de más de dos siglos de observaciones geológicas y geofísicas. Por ejemplo, en el siglo XIX se observó que existieron numerosas cuencas sedimentarias en el pasado de la Tierra, con espesores estratigráficos de hasta

diez veces los observados en el interior de los continentes, y que estas fueron deformadas posteriormente por procesos desconocidos originando cordilleras montañosas. A estas cuencas se les denominó geosinclinal y al proceso de deformación orogénesis.

Otro descubrimiento del siglo XIX fue la documentación de una cadena montañosa o "dorsal" en medio del Océano Atlántico que observaciones posteriores mostraron que se extendía formando una red continua por todos los océanos. Un avance significativo en el problema de la formación de los geosinclinales y sus orogenias ocurrió entre 1908 y 1912 cuando Alfred Wegener propuso que las masas continentales estaban en movimiento y que estas se habían fragmentado de un supercontinente que denominó Pangea.

La teoría de la Tectónica de placas explicó finalmente que todos estos fenómenos (deriva continental, formación de cordilleras continentales y submarinas) son manifestaciones de

procesos de liberación del calor original de la Tierra adquirido durante su formación. Estos procesos fragmentan la litosfera en placas, hacen que se separen, deriven y deformen la superficie terrestre. La teoría de la tectónica de placas no ofrece solución a todas las incógnitas con respecto a la Tierra. Si bien en su forma actual explica bastante bien el panorama global. Estas incógnitas representan un reto y motivación para los geofísicos.

Actualmente, se diferencian siete grandes placas tectónicas y unas siete pequeñas como las siguientes (Figura 5).

Placas tectónicas grandes	Placas tectónicas pequeñas
1. Placa Euroasiática 2. Placa Africana 3. Placa Indoaustraliana 4. Placa Norteamericana 5. Placa Sudamericana 6. Placa Pacífica 7. Placa Antártica	1. Placa del Caribe 2. Placa de Nazca 3. Placa de Cocos 4. Placa de Juan de Fuca 5. Placa Filipina 6. Placa de Scotia 7. Placa Arábica

Tabla 1: Placas tectónicas grandes y pequeñas.

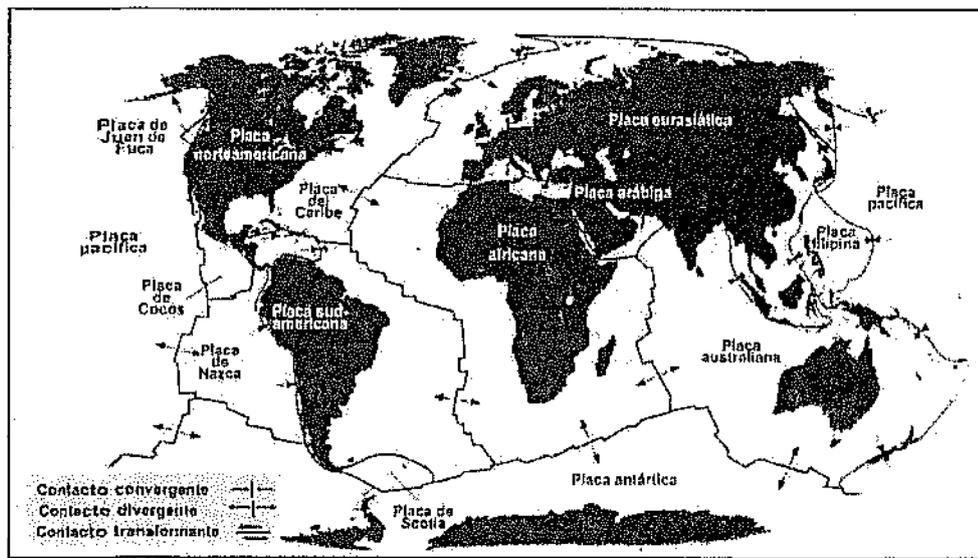


Figura 5: Principales placas tectónicas.

Según su constitución se diferencian dos tipos de placas litosféricas:

Placas oceánicas. Son placas cubiertas íntegramente por corteza oceánica, delgada y de composición básica. Aparecerán sumergidas en toda su extensión, salvo por la presencia de edificios volcánicos intra-placa, de los que más altos aparecen emergidos, o por arcos de islas en alguno de sus bordes. Los ejemplos más notables se encuentran en el Pacífico: las placas Pacífica, Nazca, Cocos y Filipina.

Placas mixtas. Son placas cubiertas en parte por corteza continental y en parte

por corteza oceánica. La mayoría de las placas tienen este carácter. Para que una placa fuera íntegramente continental tendría que carecer de bordes de tipo divergente (dorsales) en su contorno. En teoría esto es posible en fases de convergencia y colisión de fragmentos continentales, y de hecho pueden interpretarse así algunas sub-placas de las que forman los continentes. (como ejemplos de placas mixtas se pueden mencionar la placa Sudamericana y Euroasiática).

Solo existe una placa que pueda llamarse continental, y es la microplaca Iraní, que carece totalmente de bordes divergentes (dorsales).

Todas las placas tectónicas, tienen como "vecina" a otra y dependiendo el movimiento una con respecto a la otra y es aquí donde se presenta la mayor actividad tectónica (sismos, formación de montañas, actividad volcánica), ya que es donde se produce la interacción entre placas. Hay tres clases de límites de placas:

Límites Convergentes (compresión).- Es el límite donde se unen las placas cuando se chocan, formando una zona de subducción (Figura 6) (la placa oceánica se hunde bajo de la placa continental). Según el tipo de placa, se dividen en continental-continental, continental-oceánico y oceánico-oceánico.

Límites Divergentes (tensión).- son límites en los que las placas se separan unas de otras y, por lo tanto, emerge magma desde regiones más profundas (Figura 6) (por ejemplo, la dorsal mesoatlántica formada por la separación de las placas de Eurasia y Norteamérica y las de África y Sudamérica).

Límite de Transformación (movimiento strike-slip).- son límites donde los bordes de las placas se deslizan una con respecto a la otra a lo largo de una falla de transformación (Figura 6).

En determinadas circunstancias, se forman zonas de límite o borde, donde se unen tres o más placas formando una combinación de los tres tipos de límites.

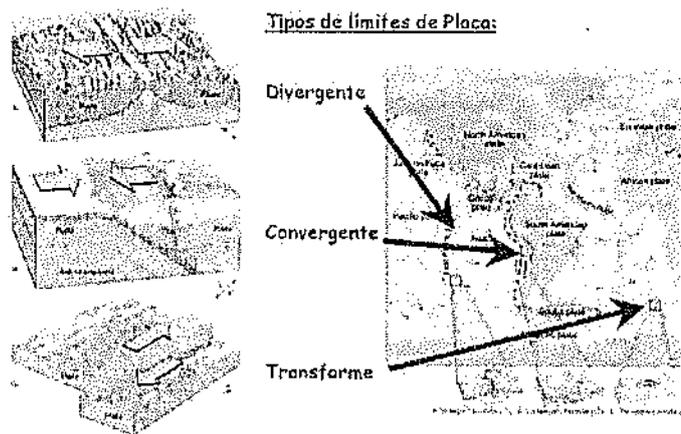


Figura 6: Límites de las placas tectónicas.

PROCESO DE SUBDUCCIÓN

La subducción de placas es un proceso que describe el hundimiento de una placa litosférica bajo otra en un límite de placas convergente, según la teoría de Tectónica de placas. Generalmente, es la litosfera oceánica, de mayor peso específico, la que subduce bajo la litosfera continental (Figura 4.2) de menor peso debido a su mayor grosor cortical. Un ejemplo muy estudiado es la subducción de la Placa de Nazca bajo la Cordillera Andina (placa Sudamericana).

El lento movimiento, hacia las capas más profundas de la tierra, de la placa oceánica provoca un aumento lento de las temperaturas en las rocas del antiguo fondo del mar hasta más de 1.000 grados Celsius y a una profundidad de 100 kilómetros aproximadamente las rocas de la placa oceánica se funden parcialmente. Durante la subducción se observa además un aumento relativo rápido de la presión. En una zona de

subducción, la corteza terrestre así derrotada asciende nuevamente hacia la superficie en donde ayuda a formar volcanes e islas. La formación de algunos volcanes, montañas, islas y fosas oceánicas están conectadas con el proceso de subducción, deriva continental y orogénesis.

La subducción ocurre principalmente en la costa oeste de América del Sur (Chile, Perú, Ecuador, Colombia), Japón, Aleutianas, Java y partes del Mar Mediterráneo (Figura 7). Provocando eventos sísmicos de gran magnitud.

Las zonas de subducción constituyen una parte muy importante dentro de la dinámica de los materiales terrestres. Los materiales subducidos han cambiado posiblemente las propiedades del manto, y permitido que la convección se mantenga. Sismológicamente las zonas de subducción son caracterizadas por las zonas de Benioff.

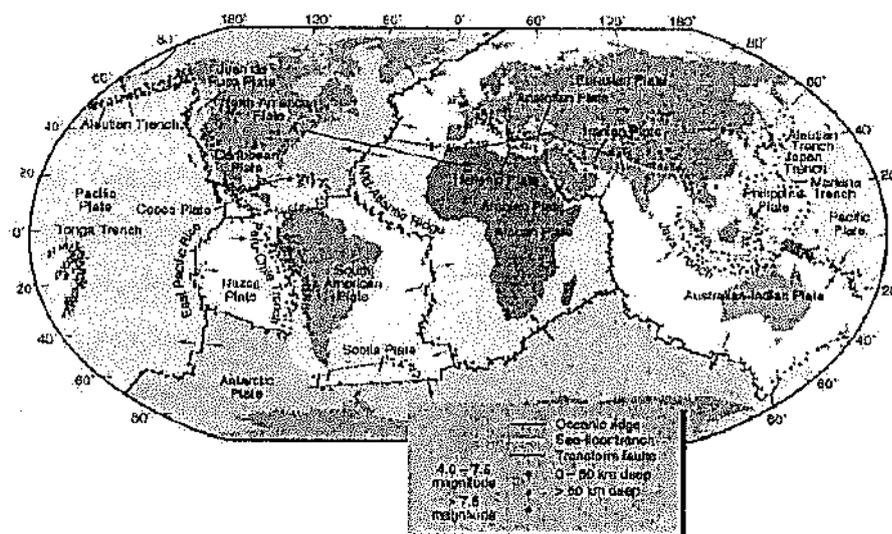


Figura 7: Distribución de las zonas de convergencia tal como se puede definir a partir de la posición de los terremotos de foco profundo (puntos verdes y rojos).

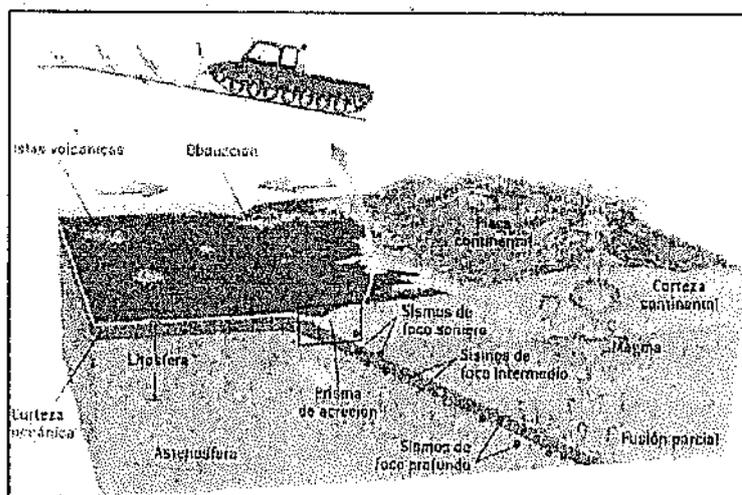


Figura 8: Zona de subducción y procesos asociados.

Los principales tipos de contactos (subducción) entre placas son:

Subducción (océano-océano)

Origina la formación de arco isla volcánica. Esta modalidad se produce, por ejemplo, a lo largo de toda el límite occidental de la placa Pacífica,

configurando la aparición de numerosos arcos islas, que dominan toda esa costa (Aleutianas, Filipinas, Japón, etc.). A veces se puede formar una pequeña dorsal tras el arco isla (extensión tras arco). Aquí el contacto de placas se encuentra alejado del continente (Figura

9), pero el proceso forma los arcos de isla.

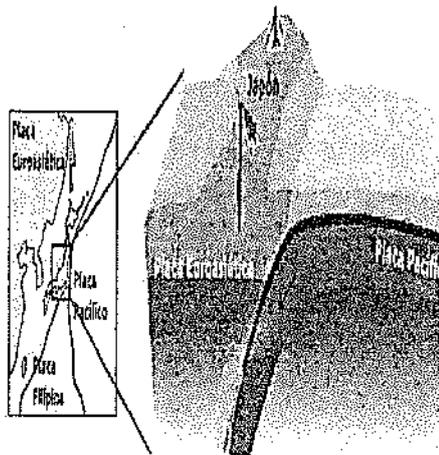


Figura 9: Subducción océano-océano.

Subducción (océano-continente)

La corteza oceánica se introduce bajo la litosfera de la otra placa de forma mucho más pronunciada puesto que es más profunda. Se origina toda una cordillera paralela al límite (orógeno de subducción) donde las máximas alturas coinciden por lo general con edificios volcánicos. Así, una zona de este tipo es el límite de la placa Pacífica con la sudamericana (Figura 10). Aquí el contacto entre placas se da muy cercano al continente.

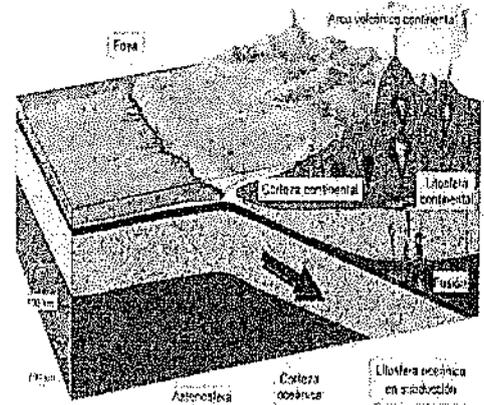


Figura 10: Subducción océano-continente.

Subducción (continente-continente)

Como las litosferas continentales son menos densas que el manto ninguno de ellas se hunde, por lo cual pliegan los sedimentos acumulados entre ellas y forman inmensas cordilleras (Figura 11). Un ejemplo de esto es la cordillera del Himalaya que ha formado la India al chocar contra el borde sur del antiguo continente asiático.

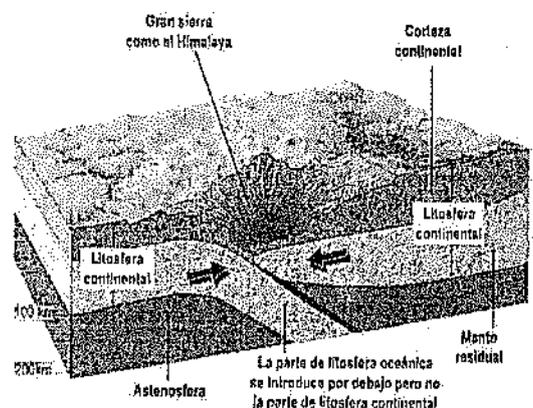


Figura 11: Subducción continente-continente.

Subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana

El borde Occidental de Sudamérica es una de las regiones sísmicas de mayor actividad del mundo, debido al proceso de subducción de la placa de Nazca (litosfera oceánica) bajo la Sudamericana (litosfera continental). Este proceso origina sismos a diferentes niveles de profundidad y con magnitudes tan elevadas que pueden llegar a producir grandes catástrofes con cuantiosos daños materiales y pérdidas de vidas humanas.

Los primeros estudios realizados para conocer la geometría de las placas subducentes fueron realizados por Wadati y Benioff (1935), los mismos que propusieron que la geometría de la placa dentro del proceso de subducción, tendría su origen, en la presencia de una gigantesca falla de penetración entre dos cuerpos rígidos. Esta hipótesis es muy cercana a la que actualmente define a una zona de subducción y es conocida como zona de Wadati-Benioff.

La geometría de la placa de Nazca bajo la Sudamericana ha sido ampliamente analizada y evaluada por diversos

autores a partir de la distribución de la sismicidad mundial (Barazangi y Isacks, 1976; Hasegawa y Sacks, 1981; Grange, 1984; Cooper et al, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Fuenzalida et al, 1992; Taboada et al; 1998; Tavera y Buforn, 1998; Madariaga, 1998, Bernal, 2002, etc). Utilizando datos extraídos del National Earthquake Information Center (NEIC) o de redes regionales. En general, todos estos estudios sugieren la presencia de una placa de Nazca con una geometría muy heterogénea y caracterizada principalmente, por presentar diferentes modos de subducción por debajo del continente: una subducción normal y otra subhorizontal.

Como se menciona, la placa de Nazca subduce por debajo de continente de manera subhorizontal y normal. Actualmente, en los Andes centrales el ángulo de subducción es marcadamente variable; así, la subducción de tipo subhorizontal el ángulo de inclinación de la placa es alrededor de 10° (región Norte y Centro) hasta una profundidad de 120 Km con ausencia de vulcanismo activo (Figura 12a); y en la de tipo normal, el ángulo va entre 20° y 30°

(región Sur), continua hasta un
profundidad de 250 Km. con volcanismo

activo (Figura 12b), (Barazangi y Isaacks,
1976).

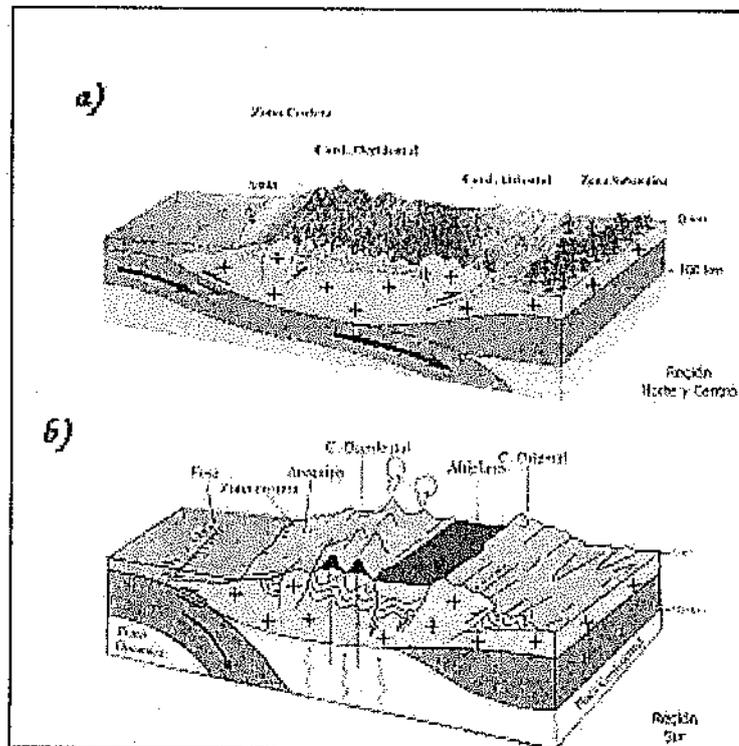


Figura 12: Tipos de Subducción para el Perú a) Subducción horizontal y b) Subducción normal (Mattauer 1978).

ESTIMACIÓN DEL CONTACTO SISMOGÉNICO EN PERÚ

La tectónica de la región andina está controlada principalmente por el desplazamiento de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, generando sobre el plano de fricción de ambas placas, un número ilimitado de sismos de diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. Estos sismos constituyen

la principal fuente sismogénica presente en Perú debido a que da origen a los sismos de magnitud elevada de manera muy frecuente, los mismos que han producido un alto grado de destrucción y mortalidad en las ciudades ubicadas en el borde Oeste de Perú.

La ocurrencia menos frecuente de sismos destructores se produce en el interior del continente, siendo esta la segunda fuente

sismogénica caracterizada por generar sismos de magnitud menor, pero al ser más superficiales, son tan dañinos como los debidos al proceso de fricción de placas. Las características de la sismicidad en Perú, han sido ampliamente analizadas y descritas por diversos autores, ya sea para configurar el proceso de subducción o definir zonas sismogénicas (Stauder, 1975; Suarez et al, 1982; Schneider y Sacks, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 2001); sin embargo, estos estudios han sido realizados en su mayoría utilizando datos telesísmicos para áreas o regiones específicas y ningún de ellos indican o sabe las dimensiones de la superficie de contacto de placas.

La finalidad de este estudio, es estimar la profundidad máxima de la superficie de acoplamiento sísmico en el borde occidental del Perú, haciendo uso del catalogo sísmico del Perú y evaluaciones de la frecuencia sísmica en función de la profundidad de los focos sísmicos.

Datos y Metodología

La base de datos utilizada en este estudio ha sido extraída del catalogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y considera sismos ocurridos durante el periodo de 1982 a 2008. Básicamente se ha considerado los sismos que ocurren entre la línea de la fosa y va hasta una distancia de 300 Km. en dirección Este sobre el continente. De esta manera se considera el total de la sismicidad asociada al proceso de fricción de placas. La metodología seguida consiste en analizar la data del catalogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP); con el cual se construyen perfiles sísmicos perpendiculares a la línea de costa a fin de visualizar la tendencia de los sismos en profundidad. Se ha construido 15 perfiles y luego se ha realizado curvas de frecuencia sísmica Vs profundidad de los focos sísmicos con la data sísmica contenida en cada perfil sísmico. En la Figura 13 se muestra la distribución de las áreas consideradas para cada perfil sísmico.

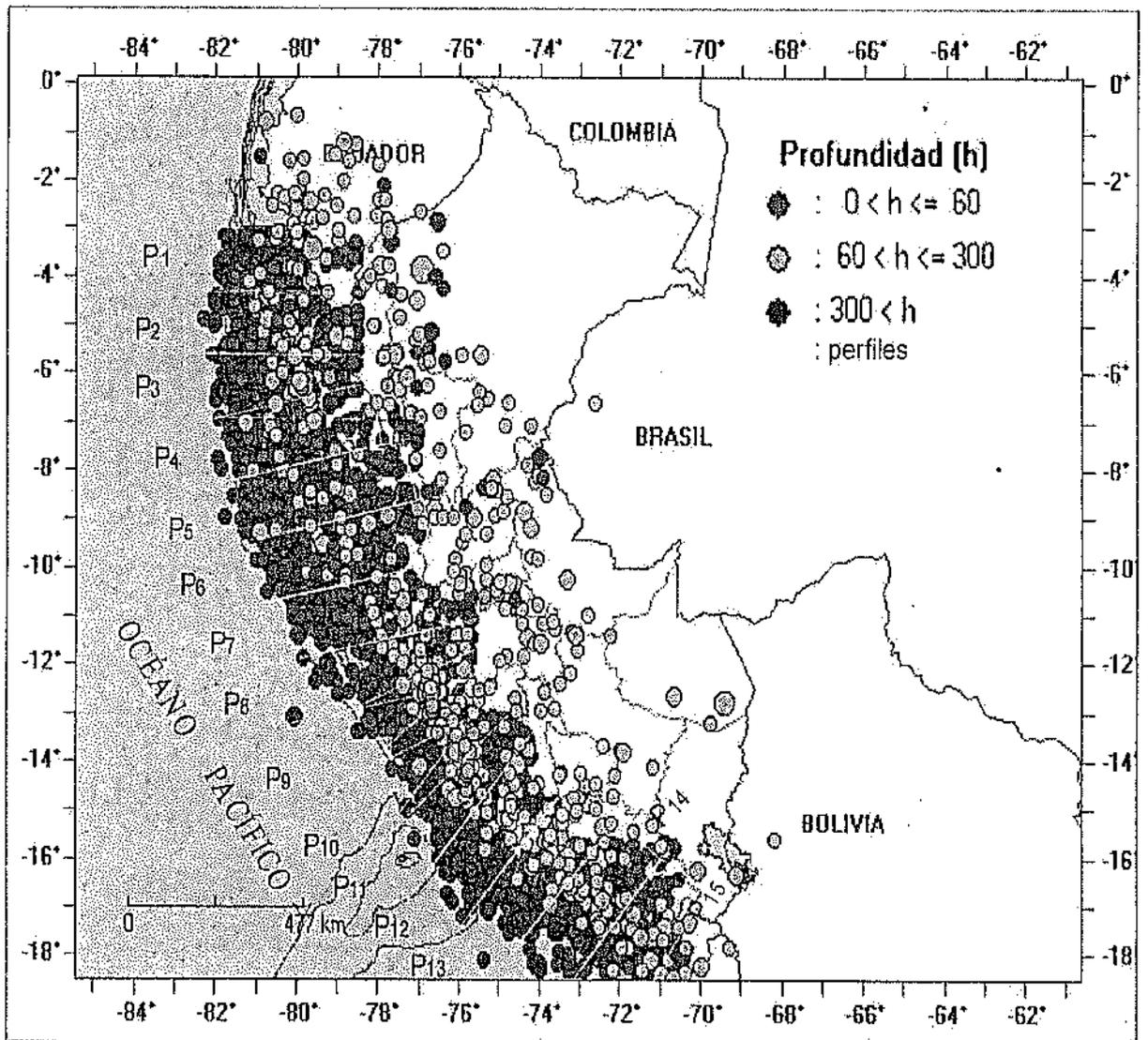


Figura 13: Trazo de perfiles perpendiculares a la línea de la costa.

La idea es identificar entre que niveles de profundidad se tiene mayor frecuencia de sismos, considerando que si existe acoplamiento de placas, la fricción es máxima y por ende se espera se produzca un gran numero de sismos. Al lograr identificar los niveles mínimos

y máximos al cual ocurre el mayor número de sismos, se puede asumir que se conoce la zona de contacto sismogénico. Por ejemplo, en la Figura 14 se presenta la curva de frecuencia para el perfil 7 en el cual el numero máximo de sismos se encuentra entre los

niveles de 20 y 60 Km., lo cual indicaría que la superficie de acoplamiento de

placas de desarrollaría dentro de estos márgenes de profundidad.

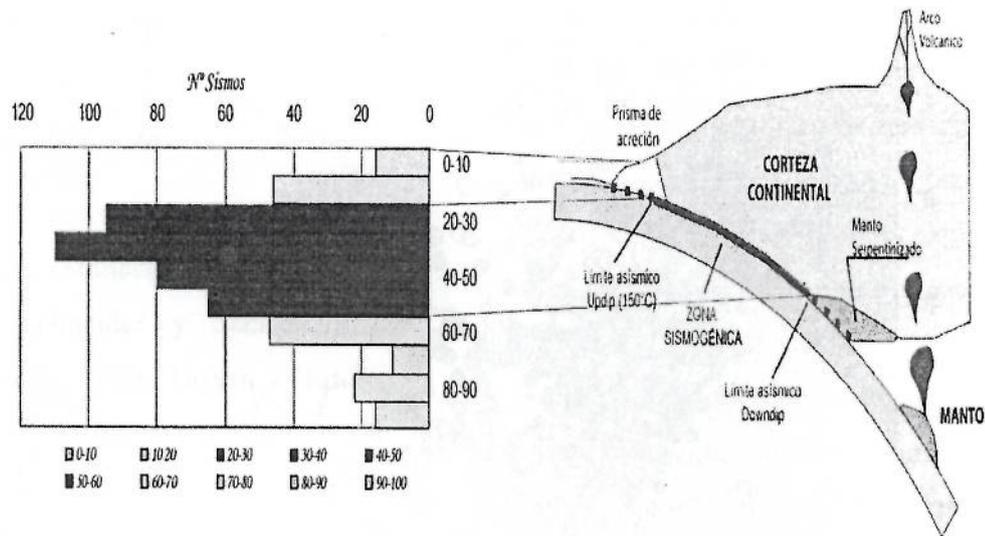


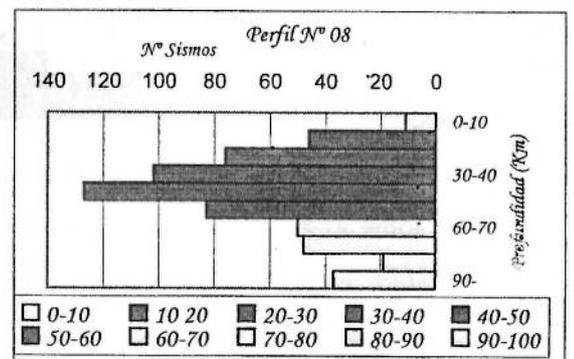
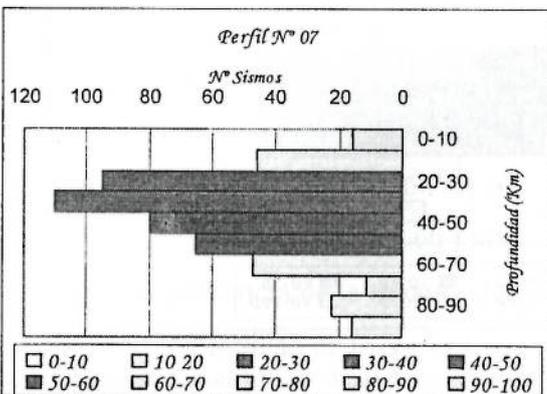
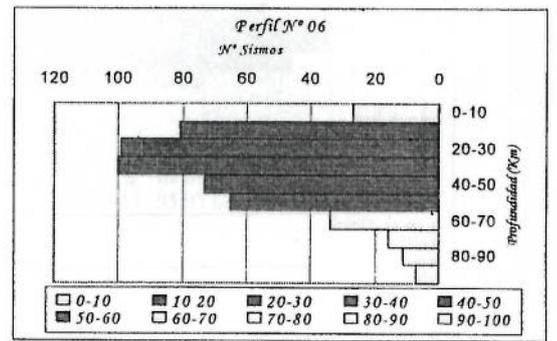
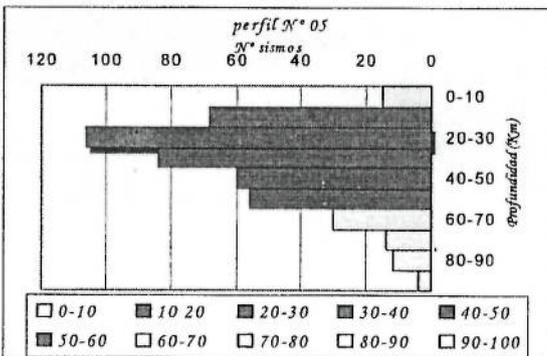
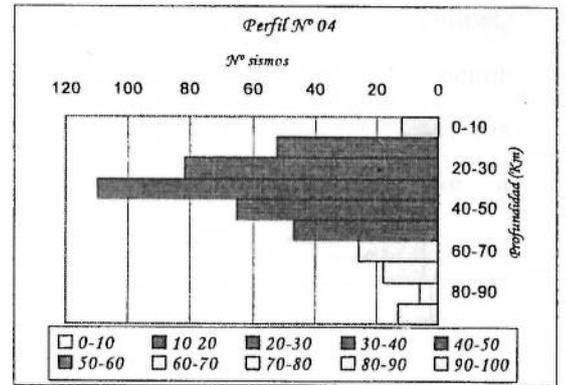
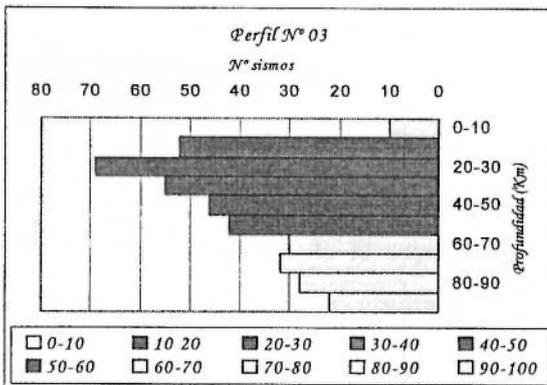
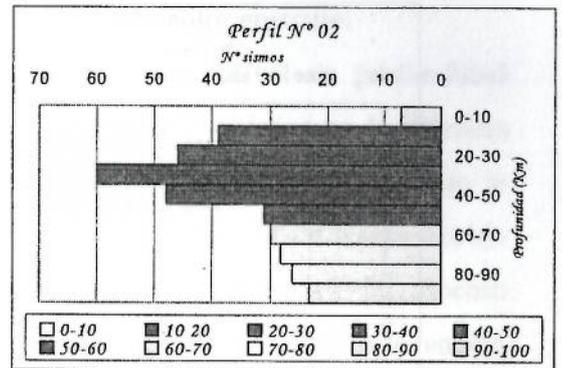
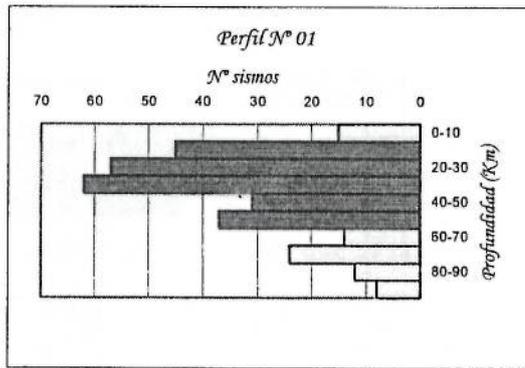
Figura 14: Contacto sismogénico en la zona de subducción (derecha) en relación a la frecuencia sísmica VS profundidad de foco (izquierda).

Resultados

En la Figura 5.3 se presenta las graficas de frecuencia sísmica Vs profundidad de los focos sísmicos para el resto de perfiles sísmicos. Para los perfiles del 1 al 9 y del 13 al 15, el mayor numero de eventos se encuentra entre 10 y 60 Km.; mientras que, para los perfiles 10, 11 y 12 entre 10 a 50 Km. de profundidad.

En general se observa que la superficie de acoplamiento sísmico tiene profundidades de hasta 60 Km., solamente frente a la Dorsal de Nazca (perfiles 11 y 12) la profundidad es de 10 a 50 Km. y para la fractura de Mendaña (perfil 7) de 20 a 50 Km.

Estimación del Contacto Sismogénico en el Borde Occidental del Perú



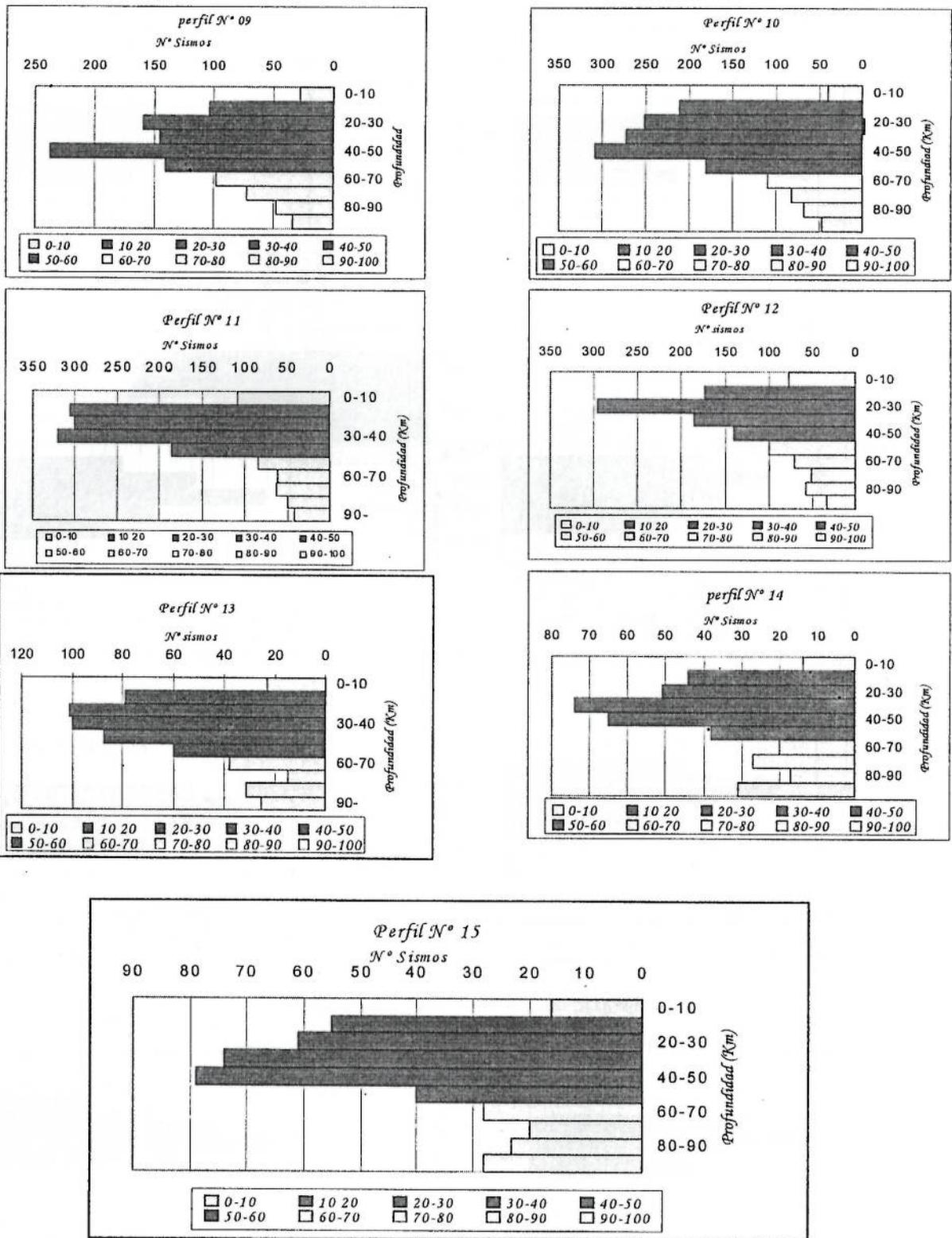


Figura 15: Continuación de Gráficos de frecuencia sísmica VS profundidad de foco. El número de cada perfil corresponde a la Figura.13.

Contacto Sismogénico

Después de identificar los niveles de profundidad máximos y mínimos en las cuales ocurren el mayor número de sismos, se puede asumir que se conoce la profundidad máxima de la superficie de acoplamiento sísmico. En la Figura 16 se presenta el esquema propuesto por Bernal y Tavera (2001) para la geometría de la placa de Nazca en Perú y en ella se indica la ubicación de los 15 perfiles sísmicos para los cuales se ha definido la profundidad de la superficie de acoplamiento sísmico representada

por el área de color amarillo.

La variación del nivel de profundidad del contacto sismogénico en los perfiles 11 y 12 (10 a 50 km) coincide con la ubicación de la Dorsal de Nazca debido posiblemente a que dentro del proceso de subducción, de la dorsal ha levantado a la placa continental creando una plataforma entre Pisco a Nazca (Hampel, 2002). Como en esta zona existe menor distancia entre la costa y la fosa, los eventos sísmicos se producirían a profundidades intermedias.

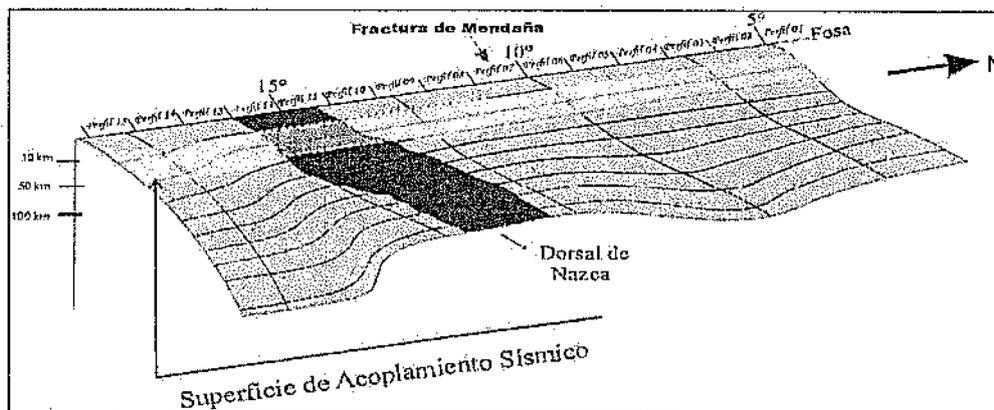


Figura 16: Zona de acoplamiento sísmico a lo largo de la zona de subducción.

En el caso del perfil 7, la variación en la superficie de acoplamiento (20 a 60 km) se debería a la presencia de la fractura de Mendaña (discontinuidad de la corteza

Oceánica localizada en el extremo NO de la región central). En la actualidad, esta fractura tiene una orientación NE-SO y un ancho de 80Km. aproximadamente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se sabe, el territorio peruano está ubicado en una de las regiones de mayor índice de actividad sísmica, ya que forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico en donde se libera más del 85% del total de energía en forma de terremotos y erupciones volcánicas. Esta sismicidad se debe a que en el borde Oeste de América del Sur se produce la colisión de las placas de Nazca (oceánica) y Sudamericana (continental), la primera se introduce debajo de la segunda dando origen al proceso de subducción, el mismo que se constituye como la principal fuente generadora de terremotos en el Perú.

Los sismos ocurridos en el Perú están directamente asociados al proceso de subducción de la placa de Nazca (oceánica) bajo la Sudamericana (continental), a la vez se encuentran influenciados por la Fractura de Mendaña, la Dorsal de Nazca y el proceso de deformación cortical que ocurre en el continente. Estos procesos ocurren a diferentes intervalos de profundidad y han dado lugar a la formación de la cordillera de los Andes.

El análisis de la frecuencia sísmica Vs la profundidad focal de los sismos, ha permitido deducir que la superficie de acoplamiento de las placas de Nazca y Sudamericana en el borde Occidental de Perú alcanza profundidades de 60 km a lo largo de todo el proceso de subducción. Sin embargo, en el área donde se encuentra la Dorsal de Nazca la superficie de contacto tendría profundidades de hasta 50km; mientras que, en la Fractura de Mendaña, la superficie de acoplamiento se iniciaría a una profundidad de 20km extendiéndose hasta los 60 Km respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento de manera muy especial al Dr. Hernando Tavera, Director de Sismología - CNDG por sus enseñanzas, consejos, sobre todo por su paciencia durante mi estancia pre-profesional y para realizar el presente estudio. Asimismo, mi agradecimiento a todo el personal del área de sismología por su ayuda desinteresada en la elaboración del presente informe. Finalmente, mi agradecimiento al Instituto Geofísico del Perú, por haberme brindado la oportunidad, de realizarme profesionalmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernal, I. (2002). Aproximación a un modelo detallado de la Sismicidad en el Perú y características de la energía sísmica liberada, Tesis de Ingeniero Geofísico, UNSA, 169pp.
- Heras, H. (2002). Análisis de la distribución del valor de "b" en la zona de subducción del Perú. Tesis de Ingeniero Geofísico, UNSA, 115pp.
- Perfettini, H.(2007). Los diversos mecanismos de ruptura propuestos para el sismo de Pisco: Revisión y Análisis. En H. Tavera (Ed.) El terremoto de Pisco (Perú) 15 agosto 2007 (7.9 Mw) Vol. Especial, IGP .
- Bernal, I. Tavera, H. Antayhua, Y. (2002). Zonas sismogénicas en el Perú: volúmenes de deformación, gráficos polares y zonificación preliminar, Bol. Sec. Geológica del Perú, Vol.93, p. 31-44.
- Tavera H. Bernal I. (2005) Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas en el borde oeste del Perú, Bol. Sec. Geológica del Perú, Vol. 06, p. 89-102.
<http://khatati.igp.gob.pe/Webs/cns06/pisco2007/articulo07.pdf>
- <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/proy1.pd>
- http://khatati.igp.gob.pe/cns/servicios/biblioteca_cndg/rev2001_pdf/clima_raquel.PDF
- http://www.ceresis.org/intensidades/historia_sismica.htm
- <http://www.ineter.gob.ni/geofisica/boletinn/2001/anual/index2001.htm>
- <http://www.ineter.gob.ni/geofisica/boletinn/2001/anual/sismos-sentidos2001.htm>
- http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/vilcapoma_II/ca_p2.pdf

PRONÓSTICO DE LA PRECIPITACIÓN Y LAS TEMPERATURAS EXTREMAS EN EL VALLE DEL RÍO MANTARO UTILIZANDO EL MODELO MARS CON TRES MESES DE ANTICIPACIÓN

KAREN LATÍNEZ SOTOMAYOR

Facultad de Economía y Planificación
Especialidad de Estadística e Informática
Universidad Nacional Agraria La Molina
klatinez@gmail.com

Investigación dirigida por: Lic. Raúl Chávez
Dra. Yamina Silva
Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima.

RESUMEN

Muchas actividades agrícolas dependen significativamente de la precipitación y la temperatura, es el caso de la cuenca del río Mantaro, Junín - Perú. La precipitación y la temperatura son factores que afectan la producción y productividad de los cultivos. Asimismo se tiene conocimiento que la cuenca del río Mantaro está expuesta a una alta variabilidad climática debido a su ubicación y características geográficas. Por otro lado, a pesar que se cuentan con estudios del clima de la región, aun no han sido desarrollados modelos de pronósticos del clima para las condiciones locales del valle del río Mantaro, sobre todo para ser utilizados en la agricultura. Por lo que en el presente trabajo de investigación se plantea desarrollar un modelo de pronóstico de temperaturas extremas y precipitación utilizando el modelo MARS.

Una vez que los datos fueron revisados y se eliminaron los valores atípicos extremos se procedió a su análisis con la técnica: Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). Las variables explicativas que se utilizan en este estudio son variables globales provenientes de información secundaria, es recomendable que para próximos estudios se revisen estas variables. El estudio se hizo, tomando las variables explicativas con desfase de tres meses ($\text{lag} = 3$).

El MARS es un método de regresión no paramétrica que no hace ninguna suposición sobre la relación funcional entre las variables dependientes y las variables explicativas. Para el uso del modelo MARS, las series se dividieron en 12 subconjuntos cada uno correspondiente a un mes, para eliminar la variabilidad de mes a mes. Así se calcularon 12 modelos para cada serie de precipitación y temperaturas extremas. En total, para las siete series en estudio se calcularon 84 ecuaciones. Como el número de observaciones en cada serie no sobrepasa los 40, por lo que el número de funciones base no se preestableció en cada corrida, se dejó como default en la sentencia al correr el modelo en R. Se calcularon modelos con dos y tres interacciones, eligiéndose entre los dos el que se consideró mejor, comparando los estadísticos calculados como la validación cruzada generalizada (GCV), el coeficiente de determinación (RSQ) y la Correlación (COR).

INTRODUCCIÓN

Para los agricultores es esencial conocer como se va a desarrollar el año, cuál será la cantidad de precipitación y el valor de la temperatura ambiental, porque según estos conocimientos ellos deciden cuando empezar a sembrar sus cultivos o cuanto hay que esperar para sembrarlos. Actualmente, estos conocimientos son empíricos, llevados por las costumbres

ancestrales. Mediante la observación del medio que los rodea, ellos pueden saber si se aventura un “año bueno” o un “año malo”.

Además, en las zonas andinas del Perú, la agricultura y otras actividades agrícolas dependen principalmente de la precipitación y la temperatura del aire, este es el caso de la cuenca del río Mantaro, Junín - Perú. La precipitación y

la temperatura son factores que afectan a la producción y la productividad de los cultivos. Si el agricultor siembra y no hay precipitación, parte o la totalidad de la producción se puede perder generando pérdidas para una población con índices de pobreza y pobreza extrema del 49.9% y 16.5% respectivamente. La incertidumbre con respecto al tiempo es una de las principales causas del mal rendimiento y pérdidas de cultivo. Adicionalmente, la cuenca del río Mantaro está expuesta a una alta variabilidad climática debido a su ubicación y características geográficas. En consecuencia, es importante elaborar pronósticos climáticos oportunos, confiables y válidos para toda o parte de la cuenca, que permitan a los agricultores tomar decisiones en el mediano plazo (entre estaciones, anuales) para el próximo planeamiento agrícola de la cuenca.

En la presente investigación se presenta un modelo de regresión no paramétrico conocido como la Regresión Multivariada Adaptativa usando Splines (*Multivariate Adaptive Regression Splines*: MARS). El MARS es un método de regresión no paramétrico que

no hace ninguna suposición sobre la relación funcional entre las variables dependientes e independientes y que los $\varepsilon_i = N(0, \sigma^2)$, que son requisitos indispensables para utilizar una Regresión Lineal Múltiple. El MARS construye esta relación basándose en una serie de coeficientes asociados a las funciones base que son totalmente determinadas a partir de la regresión de los datos. El lector puede imaginar que el algoritmo que desarrolla el MARS opera como múltiples pedazos de regresiones lineales

Los datos analizados provienen de las estaciones meteorológicas: Huayao, Jauja, Santa Ana y Viques. Asimismo, se utilizó información secundaria sobre las variables explicativas obtenidas de instituciones extranjeras a través de Internet, se debe destacar que la cantidad de información local es limitante para algunas zonas de la cuenca. Además, la información que se obtenga es solamente aplicable a la cuenca del río Mantaro y alrededores, no siendo utilizable para otras zonas del Perú. Las variables explicativas se utilizan con *lag* igual a tres, es decir tres meses de desfase.

DATOS Y METODOLOGÍA

Descripción de la zona de estudio

La Cuenca Hidrográfica del río Mantaro está ubicada en la sierra central del Perú, abarca 23 provincias y se encuentra circunscrita dentro del territorio de los departamentos de Pasco, Junín, Huancavelica y Ayacucho, constituyendo el principal tributario para unirse con el río Apurímac y formar el río Ene. La cuenca se encuentra ubicada entre los paralelos 10°34'30'' y 13°35'30'' de latitud sur y entre los meridianos 73°55'00'' y 76°40'30'' de

longitud oeste. Tiene un área total de 34550,08 km².

Datos Locales

Los datos de las variables respuesta analizados provienen de observaciones meteorológicas realizadas en un periodo de tiempo. En el Cuadro 1 se presenta información acerca de las estaciones utilizadas como variable respuesta y el periodo de cada una de ellas para el análisis de precipitación (pp). Así mismo en el Cuadro 2 se presentan para las temperaturas máxima (tx) y mínima (tm).

Estaciones Meteorológicas	Longitud	Latitud	Altura	Período de datos
Huayao	75.30° Oeste	12.00° Sur	3350 msnm	1960 - 2008
Jauja	75.50° Oeste	11.80° Sur	3410 msnm	1960 - 2004
Santa Ana	75.22° Oeste	12.00° Sur	3295 msnm	1992 - 2002
Viques	75.23° Oeste	12.17° Sur	3184 msnm	1963 - 2008

Cuadro 1: Estaciones utilizadas en el análisis de precipitación.

Estaciones Meteorológicas	Longitud	Latitud	Altura	Período de datos
Huayao	75.30° Oeste	12.00° Sur	3350 msnm	1952 - 2008
Jauja	75.50° Oeste	11.75° Sur	3410 msnm	1960 - 2002
Santa Ana	75.22° Oeste	12.00° Sur	3295 msnm	1992 - 2002

Cuadro 2: Estaciones utilizadas en el análisis de temperaturas.

Datos Globales

Se utilizaron como variables predictoras un conjunto de índices globales: índices de TSM (Temperatura Superficial del

Mar) en el Pacífico ecuatorial en las regiones conocidas como: Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4 que provienen del Earth System Research Laboratory (ESRL); presión atmosférica a nivel del

mar en Darwin y Tahití y el Índice de Oscilación del Sur (SOI), y otras variables que se describen en el Cuadro 3. Todos estos datos provienen del Climate Prediction Center (CPC) de la NOAA. La recolección de las variables predictoras se hizo a través de Internet,

accediendo a través de sus respectivos portales. Se utilizaron en total 17 variables predictoras (Cuadro 3) correspondientes al mismo periodo de análisis.

Variable	Abreviatura	Se utilizan en el modelado de	
		pp	tm y tx
Oscilación Decadal del Pacífico	PDO	Sí	Sí
Oscilación del Atlántico Norte	NAO	Sí	Sí
Patrón del Atlántico Este	EA	Sí	Sí
Índice del Pacífico Oeste	WP	Sí	Sí
Índice del Pacífico Norteamericano	PNA	Sí	Sí
Patrón del Atlántico Este / Oeste de Rusia	EA/WR	Sí	No
Patrón de Escandinavia	SCA	Sí	No
Índice de TSM en el Extremo Oriental del Pacífico (Región Niño 1+2)	N12	Sí	Sí
Índice de TSM Oriental del Pacífico (Región Niño 3)	N3	Sí	Sí
Índice de TSM Occidental del Pacífico (Región Niño 4)	N4	Sí	Sí
Índice de TSM en el Pacífico Central Oriental (Región Niño 3.4)	N34	Sí	Sí
Presión a nivel del mar en Darwin	D	Sí	Sí
Presión a nivel del mar en Tahití	T	Sí	Sí
Índice de TSM en el Caribe	CAR	Sí	Sí
Índice del Atlántico Tropical Norte	TNA	Sí	Sí
Índice del Atlántico Tropical Sur	TSA	Sí	Sí
Índice de Oscilación del Sur	SOI	Sí	Sí

Cuadro 3: Variables Globales. Nombre, abreviatura y uso.

MÉTODOS

Regresión Multivariada Adaptativa Spline. MARS

La Regresión Multivariada Adaptativa Spline (Multivariate Adaptive Regression Spline, MARS) fue desarrollada por Friedman (1991), con el fin de ajustar modelos con relaciones aditivas y posibles interacciones. Esta técnica está inspirada en la regresión con particionamiento recursivo (Friedman, 1977).

MARS es un método de regresión no paramétrica que no hace ninguna suposición sobre la relación funcional entre las variables dependientes e independientes así como los supuestos que requiere la Regresión Lineal Múltiple. Por esto, MARS construye esta relación basándose en una serie de coeficientes asociadas a las funciones base que son totalmente determinadas a partir de la regresión de los datos. Puede pensarse que el algoritmo para desarrollar el MARS opera como múltiples pedazos de regresiones lineales.

El modelo MARS

El modelo MARS se construye utilizando las llamadas funciones base, y junto con los parámetros del modelo (estimados a través de mínimos cuadrados) se combinan para producir las predicciones dadas por los inputs. Este modelo es visto como una función de las variables predictoras X y sus posibles interacciones. La ecuación general del modelo MARS (Friedman, 1991) se expresa así:

$$\hat{f}(x) = a_0 + \sum_{m=1}^M a_m \prod_{k=1}^{K_m} \left[s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km}) \right]_+$$

donde la sumatoria es sobre las M funciones base definidas en el modelo.

Luego:

1. (a_0) es el intercepto de la función
2. (a_m) son los coeficientes de las funciones base, que ponderan al producto de las funciones base
3. $\left[s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km}) \right]_+$ es una función base, siendo $s_{km} = \pm 1$,
4. $x_{v(k,m)}$ son los valores de la variable explicativa en la m -

ésima función base y el k -ésimo nodo.

5. $\prod_{k=1}^{K_m} [s_{km} \cdot (X_{v(k,m)} - t_{km})]_+$, es el producto de las funciones base.

Se puede pensar en este modelo como "la selección de" una suma ponderada de funciones base del conjunto de funciones de base que abarcan todos los valores de cada predicción.

El algoritmo MARS hará las búsquedas sobre el espacio de todos los valores de las variables independientes y dependientes, así como las interacciones entre las variables independientes.

Durante esta investigación, un número cada vez mayor de funciones base se añaden al modelo, para aprovechar al máximo el criterio de bondad de ajuste. Como resultado de estas operaciones, MARS determina automáticamente las variables independientes más influyentes para el modelo, así como las más importantes interacciones entre ellos.

Modelo de selección y poda

En general, los modelos no paramétricos son adaptables y pueden exhibir un alto grado de flexibilidad que en última instancia podría resultar sobreestimado si

no se toman medidas para contrarrestar. Aunque tales modelos pueden lograr un error igual a cero en los datos ajustados, tienen la tendencia a predecir mal si se presentan nuevas observaciones. MARS, al igual que la mayoría de los métodos de este tipo, tienden a sobreestimar a los pronósticos. Para combatir este problema, MARS utiliza una técnica de la poda para limitar la complejidad del modelo, reduciendo el número de sus funciones de base.

Como en Friedman y Silverman (1989) y Friedman (1988) se usa una forma modificada del criterio original de validación cruzada generalizada propuesto por Craven y Wahba (1979). El criterio del GCV es el promedio cuadrado residual del ajuste de los datos (numerador) y una penalidad (denominador inverso) que cuenta para el incremento de la variancia asociada con el incremento de la complejidad del modelo (número de funciones base M), se expresa:

$$LOF(\hat{f}_M) = GCV(M) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{f}_M(x_i)]^2 / \left[1 - \frac{C(M)}{N} \right]^2$$

Los valores de los parámetros de las funciones base (número de factores K_m , variables $v(k,m)$, ubicación de los nodos t_{km} y el signo s_{km}) asociados con el modelo MARS donde se determinó de forma independiente el valor de la variable respuesta (y_1, \dots, y_N), luego sólo los coeficientes (a_0, \dots, a_M) son ajustados a los datos.

RESULTADOS

APLICACIÓN DEL MODELO

MARS

Se tienen tres series de tiempo que corresponden a precipitación total mensual, temperatura mínima promedio mensual y temperatura máxima promedio mensual, la estación de Viques solo tiene datos de precipitación. Estas variables, fueron particionadas en 12 grupos cada una; dichos grupos concuerdan con los 12 meses del año.

El modelo MARS para esta aplicación queda definido como:

$$Y_{ij} = \alpha_{ij} + \sum_{m=1}^{M_j} \beta_{m_j} \prod_{k=1}^K \left[S_{km} \left(x_{v(k,m)} - t_{km} \right) \right]_{+},$$

$i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3$

donde

1. Y_{ij} es la j -ésima variable respuesta de la i -ésima estación meteorológica.
2. α_{ij} es el término constante del modelo.
3. β_{m_j} es el coeficiente de la m -ésima función base de la j -ésima variable respuesta en la i -ésima estación meteorológica.
4. $x_{v(k,m)}$ es la v -ésima variable explicativa que se encuentra en la m -ésima función base en el k -ésimo nodo de la j -ésima variable respuesta en la i -ésima estación meteorológica.
5. t_{km} es el valor del k -ésimo nodo en la m -ésima función base de la j -ésima variable respuesta en la i -ésima estación meteorológica.
6. S_{km} es el valor ± 1 .
7. La suma es representa, la suma de las M_j funciones base calculadas para la j -ésima variable respuesta de la i -ésima estación meteorológica.

Luego teniendo los datos organizados y sin valores atípicos extremos, se procede a calcular el modelo MARS para cada

grupo. Estos modelos se calcularon hasta con dos y tres interacciones de las variables independientes. Es decir, que al generar los coeficientes del modelo, éstos tendrían funciones base asociadas que estarían conformadas por una sola variable o la combinación de dos o tres variables, según sea el caso. Cuando se calcula un modelo hasta con dos interacciones, es llamado un modelo MARS de grado dos. Éste modelo, además de contener funciones base de una sola variable, contiene funciones base que son la combinación de dos variables. Asimismo, cuando se calcula un modelo de hasta tres interacciones, es llamado un modelo MARS de grado tres. Éste modelo, tiene funciones base de una sola variable, funciones base que son la combinación de dos variables y además funciones base que son la combinación de tres variables. Los resultados se analizaron con el software R versión 2.7.1, utilizando la librería mda.

La selección del mejor modelo se basa en el mejor conjunto de índices que tenga, en este análisis se utiliza índices como:

GCV (generalized cross-validation: validación cruzada generalizada), RSQ (R-Squared of the model: coeficiente de determinación del modelo), ECM (mean squared error: error cuadrático medio) y COR (correlation: correlación). El mejor modelo, es aquél que tenga un GCV y un ECM menor que el otro además de un RSQ y un COR mayor que el otro.

ANÁLISIS DE LOS DATOS CON MARS

Estación de Huayao

Precipitación

Los modelos de precipitación que fueron seleccionados en su mayoría son de grado dos, a excepción de los modelos para los meses de Octubre y Noviembre que son de grado tres (Cuadro 4).

En el Cuadro 5 se encuentran las variables que intervienen en cada uno de los modelos. Esta selección de variables es determinada por el algoritmo MARS. El modelo que presenta la menor cantidad de variables es para el mes de Noviembre con sólo dos variables en el modelo y son EA y PNA.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCY	1515.68	1515.68	1519.84	1547.36	1188.03	1188.03	586.49	609.41	162.00	162.00	22.89	22.89
RSQ	0.38	0.38	0.52	0.43	0.60	0.60	0.68	0.66	0.52	0.52	0.71	0.71
ECM	1104.52	1104.52	954.98	1127.61	534.47	534.47	263.70	274.16	86.74	86.74	14.20	14.20
COR	0.62	0.62	0.72	0.65	0.77	0.77	0.82	0.82	0.72	0.72	0.84	0.84

MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCY	30.03	30.03	104.30	104.30	492.81	492.81	804.82	776.73	966.34	836.47	828.76	828.76
RSQ	0.65	0.65	0.68	0.68	0.51	0.51	0.39	0.41	0.00	0.34	0.33	0.33
ECM	13.51	13.51	54.82	54.82	309.65	309.65	505.70	488.06	919.78	609.56	603.95	603.95
COR	0.81	0.81	0.83	0.83	0.72	0.72	0.62	0.64	0.24	0.58	0.58	0.58

Cuadro 4: Resumen de los Indices de los modelos de precipitación de Huayao, la primera columna pertenece a los modelos de grados dos y los valores en negritas a modelo de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	PDO, CAR, EA
Febrero	EAWR, PDO, SOI, PNA, SCA
Marzo	WP, N4, NAO, TSA, PDO
Abril	N12, TNA, D, SCA, PDO
Mayo	N3, NAO, SOI, EAWR
Junio	N4, SCA, TNA, D

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Julio	NAO, EA, PNA
Agosto	NAO, N4, EA, N12, N3
Septiembre	N4, D, TSA
Octubre	PDO, SCA, NAO
Noviembre	EA, PNA
Diciembre	N3, D, PNA, TSA

Cuadro 5: Variables que intervienen en los modelos MARS de precipitación para Huayao.

Temperatura Mínima

Los modelos de temperatura mínima que se seleccionaron son en su mayoría de grado dos, con excepción para los meses de Enero, Julio, Agosto y menos variables en su modelo es Mayo, con las Septiembre que son de grado tres, ya que presentan mejores indicadores (Cuadro 6).

En la Cuadro N°7, se indica qué

variables intervienen en cada modelo de temperatura mínima que han sido seleccionadas por el algoritmo del modelo MARS. El mes que tiene menos variables en su modelo es Mayo, con las variables N3 y CAR, y el mes que tiene mayor cantidad de variables es Octubre, con la presencia de 8 de las 15 variables utilizadas en el análisis que son SOI, N34, PDO, EA, N12, WP, D, N4.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCV	0.431	0.319	0.395	0.337	0.584	0.584	0.604	0.604	1.327	1.348	1.276	1.276
RSQ	0.437	0.680	0.708	0.704	0.677	0.677	0.655	0.655	0.142	0.128	0.662	0.662
ECM	0.295	0.168	0.129	0.130	0.191	0.191	0.317	0.317	1.144	1.162	0.579	0.579
COR	0.661	0.824	0.841	0.839	0.823	0.823	0.809	0.809	0.376	0.358	0.814	0.814

MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCV	1.355	1.020	1.064	1.027	0.831	0.719	0.795	0.793	0.824	0.824	0.759	0.759
RSQ	0.624	0.758	0.318	0.812	0.207	0.522	0.678	0.554	0.601	0.601	0.549	0.549
ECM	0.615	0.395	0.819	0.226	0.716	0.432	0.260	0.360	0.374	0.374	0.344	0.344
COR	0.790	0.871	0.563	0.901	0.455	0.722	0.824	0.744	0.775	0.775	0.741	0.741

Cuadro 6: Resumen de los índices de los modelos de Temp. Mínima de Huayao, la primera columna pertenece a los modelos de grados dos y los valores en negritas a modelos de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	NAO, PDO, PNA, TSA, N3
Febrero	PDO, N12, TNA, EA, CAR
Marzo	TSA, WP, PNA, N12, CAR
Abril	CAR, TSA, TNA, WP
Mayo	N3, CAR
Junio	NAO, TNA, N34, CAR

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Julio	N34, TNA, WP, EA, N4, SOI
Agosto	SOI, N34, PDO, EA, N12, WP, D, N4
Septiembre	CAR, WP, PNA, D, TSA
Octubre	N34, PDO, N3, N4, TNA, TSA, PNA, CAR
Noviembre	N34, PNA, N3, N4, WP, TNA
Diciembre	N34, PDO, PNA, TSA, CAR, SOI

Cuadro 7: Variables que intervienen en los modelos MARS de Temp. Mínima de Huayao.

Temperatura Máxima

Los modelos de temperatura máxima que se han seleccionado son en su mayoría de grado dos, salvo Marzo, Mayo, Junio y Agosto donde los modelos de grado tres resultaron seleccionados. En el caso del mes de Octubre no se pudo trazar un modelo, esto se debe que no se puede trazar alguna relación funcional entre la variable dependiente y alguna de las

variables independientes (Cuadro 8).

En la Cuadro 9, se encuentran las variables que intervienen en cada modelo. En el mes de Octubre el algoritmo MARS no encuentra alguna variable apropiada por lo que queda como una constante igual a 20.30mm. En el mes de Enero sólo está presente una variable la cual es N3.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCV	1.031	1.031	0.772	0.827	0.598	0.667	0.362	0.362	0.549	0.544	0.356	0.272
RSQ	0.278	0.278	0.609	0.531	0.510	0.627	0.711	0.711	0.512	0.623	0.381	0.800
ECM	0.889	0.889	0.595	0.713	0.460	0.350	0.248	0.248	0.423	0.327	0.274	0.089
COR	0.527	0.527	0.780	0.729	0.714	0.792	0.843	0.843	0.716	0.789	0.617	0.894

MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCV	0.345	0.335	0.484	0.450	0.482	0.482	0.918	0.918	1.085	1.174	1.062	1.062
RSQ	0.777	0.518	0.470	0.566	0.632	0.632	0.000	0.000	0.570	0.300	0.405	0.405
ECM	0.093	0.202	0.331	0.271	0.290	0.290	0.881	0.881	0.492	0.802	0.725	0.725
COR	0.881	0.719	0.685	0.752	0.795	0.795	0.000	0.000	0.755	0.548	0.636	0.636

Cuadro 8: Resumen de los índices de los modelos de Temp. Máxima de Huayao, la primera columna pertenece a los modelos de grados dos y los valores en negritas a modelos de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	N3
Febrero	N3, N34, PNA, EA
Marzo	N3, N34, N4, TNA, PDO
Abril	N4, N34, EA
Mayo	N12, N34, NAO, PNA, CAR
Junio	N4, PDO, N12, T, TNA, WP, CAR

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Julio	N34, PDO, SOI, N12, NAO, TNA
Agosto	TSA, PDO, CAR, NAO
Septiembre	PNA, T, TNA, SOI
Octubre	-
Noviembre	WP, SOI, N12, N4, NAO, WP, TSA
Diciembre	N12, TSA, PNA

Cuadro 9: Variables que intervienen en los modelos MARS de Temp. Máxima de Huayao

Estación de Jauja

Precipitación

Los modelos de precipitación en Jauja seleccionados son en su mayoría de grado dos, con excepción de los modelos para los meses de Junio y Julio que son de grado tres (Cuadro 10).

En el Cuadro 11, se muestran las variables que han sido seleccionadas por el algoritmo del modelo MARS para la estimación de los modelos de cada mes. Los meses de Enero, Noviembre y Diciembre muestran un

guión ya que para esos meses no se pudo encontrar un modelo adecuado en donde intervenga al menos una variable independiente, dejándose como Constantes 125.29 mm, 72.06 mm y 99.16 mm respectivamente. Luego, en el mes de Septiembre sólo se incluyen dos variables, N3 y WP. El mes con mayor cantidad de variables en su modelo es el mes de Junio con 7 variables que son: PNA, N3, N34, PDO, PNA, EAWR, TSA.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCV	1833.76	1833.76	1039.28	1039.28	2417.84	1962.40	633.28	633.28	47.68	47.68	11.56	9.43
RSQ	0.00	0.00	0.65	0.65	0.56	0.49	0.54	0.54	0.38	0.38	0.70	0.86
ECM	1735.98	1735.98	513.19	513.19	1193.91	1377.55	375.73	375.73	31.92	31.92	4.81	2.21
COR	0.27	0.27	0.80	0.80	0.75	0.70	0.73	0.73	0.61	0.61	0.83	0.93

MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCV	21.26	19.45	58.76	58.02	444.34	444.34	396.60	396.60	1132.58	1132.58	1345.26	1345.26
RSQ	0.36	0.62	0.88	0.88	0.17	0.17	0.42	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
ECM	14.04	8.38	15.60	15.40	362.14	362.14	268.98	268.98	1072.18	1072.18	1273.53	1273.53
COR	0.60	0.79	0.94	0.94	0.41	0.41	0.65	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 10: Resumen de los índices de los modelos de Precipitación de Jauja, la primera columna pertenece a los modelos de grado dos y los valores en negritas a modelos de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	-
Febrero	TSA, EA, CAR, SOI
Marzo	PDO, WP, SCA
Abril	N12, N34, SCA
Mayo	TNA, EA, TSA
Junio	PNA, N3, N34, PDO, PNA, EAWR, TSA

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Julio	NAO, PNA, EAWR, CAR, TSA
Agosto	SOI, N3, EA, PNA, EAWR, CAR
Septiembre	N3, WP
Octubre	NAO, PDO
Noviembre	-
Diciembre	-

Cuadro 11: Variables que intervienen en los modelos MARS de precipitación de Jauja.

Téperatura Mínima

La mayoría de los modelos seleccionados para la temperatura mínima en Jauja son de grado dos a excepción de los modelos para los meses de Agosto y Septiembre, que son de grado tres (Cuadro 12).

En el Cuadro 13 se encuentran las variables que intervienen en los modelos.

El lector puede verificar que en los meses de Febrero y Abril la variable que interviene en el modelo es N12, siendo estos meses los que tienen la menor cantidad de variables. El mes con la mayor cantidad de variables en su modelo es Agosto con 6 variables que son: PDO, N4, N12, TNA, T, CAR.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCV	0.913	0.913	0.667	0.667	0.535	0.535	0.948	0.948	1.875	1.875	2.954	2.954
RSQ	0.757	0.757	0.148	0.148	0.389	0.389	0.423	0.423	0.309	0.309	0.166	0.166
ECM	0.345	0.345	0.537	0.537	0.363	0.363	0.768	0.768	1.272	1.272	2.407	2.407
COR	0.870	0.870	0.385	0.385	0.624	0.624	0.650	0.650	0.556	0.556	0.407	0.407
MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCV	2.504	2.538	2.138	1.799	1.690	1.585	1.248	1.248	1.178	1.203	1.262	1.262
RSQ	0.559	0.553	0.463	0.629	0.373	0.604	0.599	0.599	0.468	0.359	0.591	0.591
ECM	1.698	1.721	1.225	0.846	1.146	0.725	0.587	0.587	0.809	0.974	0.578	0.578
COR	0.748	0.744	0.680	0.793	0.611	0.777	0.774	0.774	0.684	0.599	0.769	0.769

Cuadro 12: Resumen de los índices de los modelos de Temp. Mínima de Jauja, la primera columna pertenece a los modelos de grados dos y los valores en negritas a modelos de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo	Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	N4, TSA, SOI, PDO, D	Julio	SOI, TNA
Febrero	N12	Agosto	PDO, N4, N12, TNA, T, CAR
Marzo	N4, N34	Septiembre	CAR, WP, PNA, PDO, D
Abril	N12	Octubre	N4, PDO, EA, T
Mayo	N3, NAO	Noviembre	PNA, PDO
Junio	PDO, NAO	Diciembre	N34, WP, TNA, EA, TSA

Cuadro 13: Variables que intervienen en los modelos MARS de Temp. Mínima de Jauja

Temperatura Máxima

La mayoría de los modelos para la temperatura máxima en Jauja son de grado dos, a excepción de los modelos para los meses de Abril y Octubre que son de grado tres (Cuadro 14).

En la Cuadro 15 se muestran las variables que intervienen en los modelos.

El mes que tiene la menor cantidad de variables en su modelo es Julio, con la presencia de la variable TNA. Y el mes con la mayor cantidad de variables es Abril, con 6 variables en su modelo que son: N4, NAO, SOI, PNA, TNA, TSA.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCV	1.014	1.014	1.052	1.052	1.204	1.387	0.684	0.670	0.512	0.512	0.472	0.472
RSQ	0.430	0.430	0.598	0.598	0.493	0.304	0.660	0.824	0.521	0.521	0.867	0.867
ECM	0.704	0.704	0.731	0.731	0.703	0.963	0.399	0.207	0.351	0.351	0.118	0.118
COR	0.656	0.656	0.774	0.774	0.702	0.552	0.812	0.908	0.722	0.722	0.931	0.931

MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCV	0.849	0.849	0.944	0.983	0.554	0.554	1.088	1.072	1.166	1.166	0.958	0.958
RSQ	0.248	0.248	0.561	0.228	0.610	0.610	0.623	0.696	0.168	0.168	0.401	0.401
ECM	0.687	0.687	0.455	0.801	0.323	0.323	0.537	0.432	0.955	0.955	0.665	0.665
COR	0.498	0.498	0.749	0.477	0.781	0.781	0.789	0.834	0.410	0.410	0.633	0.633

Cuadro 14: Resumen de los índices de los modelos de Temp. Mínima de Jauja, la primera columna pertenece a los modelos de grados dos y los valores en negritas a modelos de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	N3, TSA
Febrero	N3, NAO, TSA
Marzo	N34, NAO, D, PNA, SOI
Abril	N4, NAO, SOI, PNA, TNA, TSA
Mayo	N34, TSA
Junio	PNA, TSA, N3, T, TNA

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Julio	TNA
Agosto	TNA, SOI, N4, EA
Septiembre	TNA, N12, PNA
Octubre	N12, N4, WP, SOI
Noviembre	PNA, TSA
Diciembre	N34, TSA

Cuadro 15: Variables que intervienen en los modelos MARS de Temp. Máxima de Jauja

Estación de Viques

Los modelos seleccionados para la precipitación en Viques, en su mayoría son de grado 2 a excepción de Agosto y Octubre, que obtuvieron mejores resultados con modelos de grado tres (Cuadro 16).

En la Cuadro 17 se muestran las variables que están presentes en los modelos. Los meses de Enero y Marzo son constantes iguales a 80.07 mm y 77.04 mm, respectivamente. El mes donde sólo está presente una variable es Noviembre con la presencia de CAR.

MODELO	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
GCV	4894.77	4894.77	5768.60	5768.60	5534.69	5534.69	206.38	206.38	10.86	10.86	3.83	4.52
RSQ	0.00	0.00	0.54	0.54	0.00	0.00	0.71	0.71	0.47	0.47	0.87	0.85
ECM	4593.62	4593.62	3808.18	3808.18	5213.91	5213.91	75.03	75.03	8.55	8.55	0.96	1.13
COR	-0.07	-0.07	0.74	0.74	-0.77	-0.77	0.84	0.84	0.68	0.68	0.94	0.92

MODELO	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
GCV	1.66	1.66	11.51	11.07	294.14	294.14	1801.50	1432.15	1635.72	1635.72	1333.61	1609.34
RSQ	0.94	0.94	0.58	0.68	0.82	0.62	0.00	0.53	0.32	0.32	0.54	0.32
ECM	0.90	0.90	5.91	4.44	165.45	165.45	1697.09	805.59	1307.15	1307.15	853.51	1255.73
COR	0.97	0.97	0.76	0.83	0.78	0.78	0.00	0.73	0.56	0.56	0.73	0.57

Cuadro 16: Resumen de los índices de los modelos de Precipitación de Viques, la primera columna pertenece a los modelos de grados dos y los valores en negritas a modelos de grado tres.

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Enero	-
Febrero	SCA, EAWR
Marzo	-
Abril	N12, TSA, EA, SOI
Mayo	N34, NAO
Junio	TNA, TSA, N3, NAO

Mes	Variables que intervienen en el modelo
Julio	N4, WP, SCA
Agosto	N4, N34, PDO, PNA, EA
Septiembre	D, PDO, PNA
Octubre	CAR, EAWR, N4, SCA, SOI
Noviembre	CAR
Diciembre	PDO, PNA, CAR, TNA

Cuadro 17: Variables que intervienen en los modelos MARS de Precipitación de Viques.

Validación del modelo MARS

Estacion de Huayao

Precipitación

El ECM asociado a los pronósticos es 2069.6 mm², el RECM es 45.5 mm, el EAM es 28.9 mm, el EAMN es 22.6 y la correlación es 0.6. También presenta un sesgo promedio de 10.0 mm (Cuadro 18). Esta presente un altogrado de

error en los pronósticos -13.61 mm en Agosto de 2004, además de dos picos positivos iguales a 258.16 mm en Enero de 2004 y otro de 191.31 mm en Agosto de 2008 (ver Figura 1). En general el modelo logra representar la estacionalidad, sin embargo en la mayoría de los casos se sobreestima los picos o los presenta desfasados en el tiempo.

ECM (mm ²)	RECM (mm)	EAM	EAMN	BIAS (mm)	COR
2069.6	45.5	28.9	22.6	10.0	0.6

Cuadro 18: Evaluación del pronóstico de Precipitación Huayao Utilizando MARS.

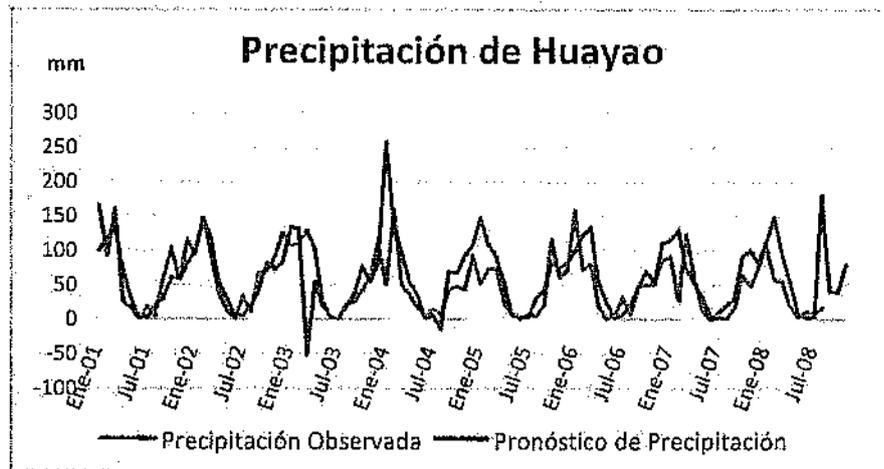


Figura 1: Precipitación Huayao. Valores observados y los valores pronóstico.

Temperatura Mínima

El ECM observado en los modelos de temperatura mínima es 2.8 °C, el RECM es 1.7 °C, el EAM es 1.1 °C, el EAMN es 0.1 y la correlación es 0.8. Presenta un sesgo promedio de -0.1 °C (Cuadro N°19). La Figura 2 muestra las series de temperatura mínima observada y los valores pronosticadas. En el gráfico se

puede observar que las series son muy similares en forma, como indica la correlación antes mencionada. En el último año la serie pronosticada tiene dos picos uno de 13.05 °C en Noviembre de 2007 y 8.68 °C en Junio de 2008 (Figura 2). Estos picos pueden ser causados por algún valor inusual de las variables independientes.

ECM (°C ²)	RECM (°C)	EAM	EAMN	BIAS (°C)	COR
2.8	1.7	1.1	0.1	-0.1	0.8

Cuadro 19: Evaluación de pronóstico de temperatura mínima en Huayao utilizando MARS.

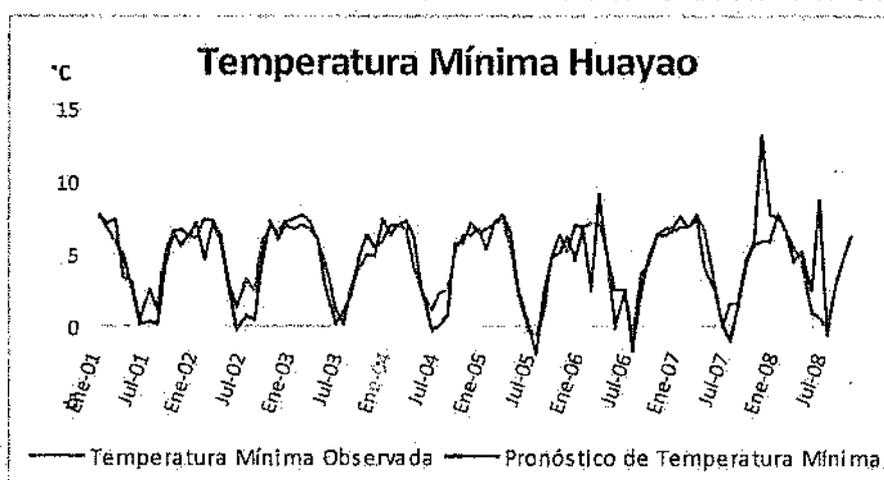


Figura 2: Temp. Mínima Huayao. Valores observados y valores pronosticados con MARS.

Temperatura Máxima

El ECM asociado a las predicciones de temperatura máxima es $6.5 \text{ }^{\circ}\text{C}^2$, el RECM es $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, el EAM es $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, el EAMN es 0.1 y su correlación es 0.2 . El sesgo promedio que se obtiene es $-0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cuadro 20). Se observa que el ECM es relativamente bajo, pero la correlación es bastante pequeña, esto se debe al valor inusual calculado de $-1.96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en Diciembre de 2007 (Figura 3). Ya que al eliminar ese valor inusual, los valores del ECM, RECM, EAM, EAMN y la correlación cambian a $1.1 \text{ }^{\circ}\text{C}^2$, $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.0 y 0.5 respectivamente. El sesgo

disminuye a $-0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Alguno o algunos de los valores de las variables independientes deben presentar valores inusuales que influyen en el resultado. El valor eliminado no será removido del estudio, sólo se calculó para demostrar la diferencia que existe al no tener un cálculo con un valor inusual. Estos cálculos inusuales nuevamente podrían deberse a cambio en los valores de las variables independientes. En la Figura 4 se muestra la serie excluyendo al valor atípico encontrado antes, se observa que los errores no son tan altos como cuando esta presente este valor.

	ECM ($^{\circ}\text{C}^2$)	RECM ($^{\circ}\text{C}$)	EAM	EAMN	BIAS ($^{\circ}\text{C}$)	COR
Todos los pronósticos	6.5	2.5	1.0	0.1	-0.7	0.2
Sin el valor inusual	1.1	1.0	0.8	0.0	-0.5	0.5

Cuadro 20: Evaluación de pronósticos de Temperatura Máxima Huayao utilizando MARS.

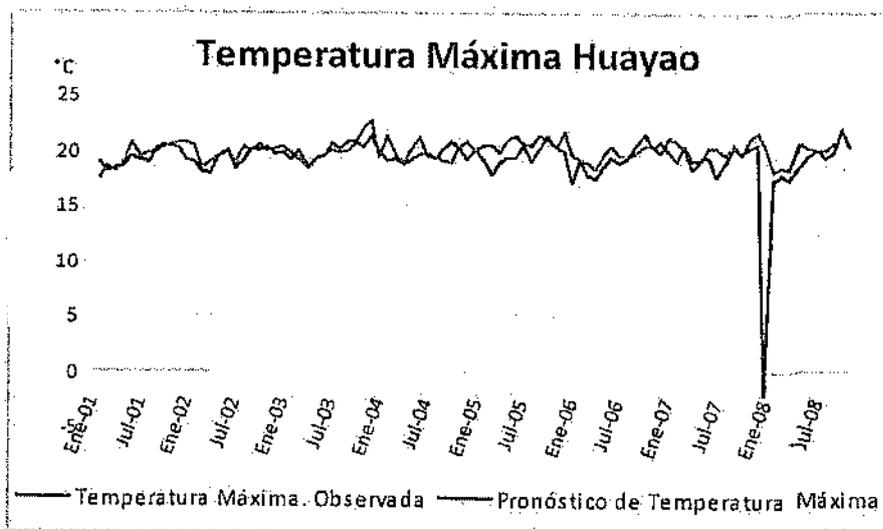


Figura 3: Temp. Máxima Huayao. Valores observados y valores pronóstico con MARS.

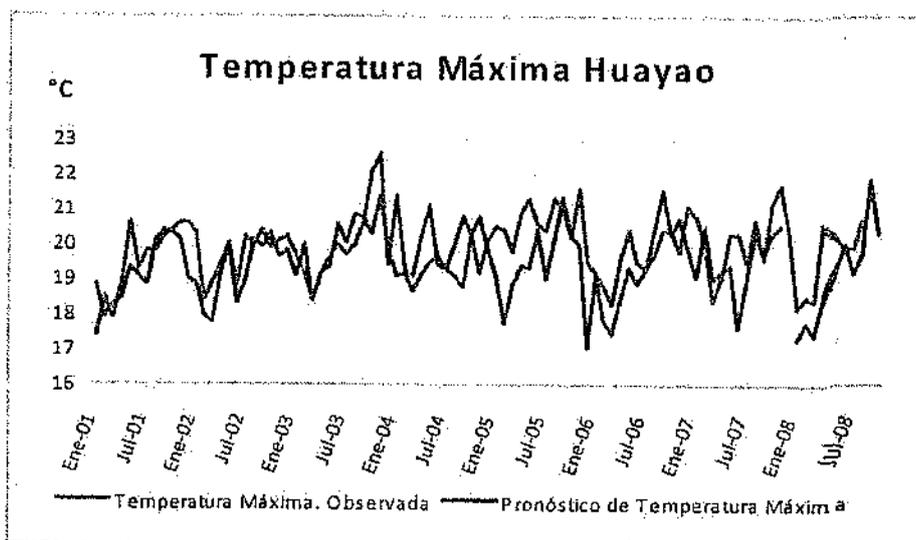


Figura 4: Temp. Máxima Huayao. Valores observados y valores pronóstico con MARS eliminando el valor inusual.

Estación Jauja

Precipitación

El ECM es 1277.7 mm², el RECM es 35.7 mm, el EAM es 21.8 mm, el AMN es 64.6 y la correlación es 0.7. El sesgo promedio es 3.0 mm (Cuadro 21). El

error es grande, este error se debe a los dos picos negativos de -61.64 mm y -84.51 mm que corresponden a Julio del 2002 y Febrero del 2005 respectivamente. Estos picos influyen también en la correlación. Ver Figura 5.

ECM (mm ²)	RECM (mm)	EAM	EAMN	BIAS (mm)	COR
1277.7	35.7	21.8	64.6	3.0	0.7

Cuadro 21: Evaluación de pronósticos de Precipitación para Jauja utilizando MARS.

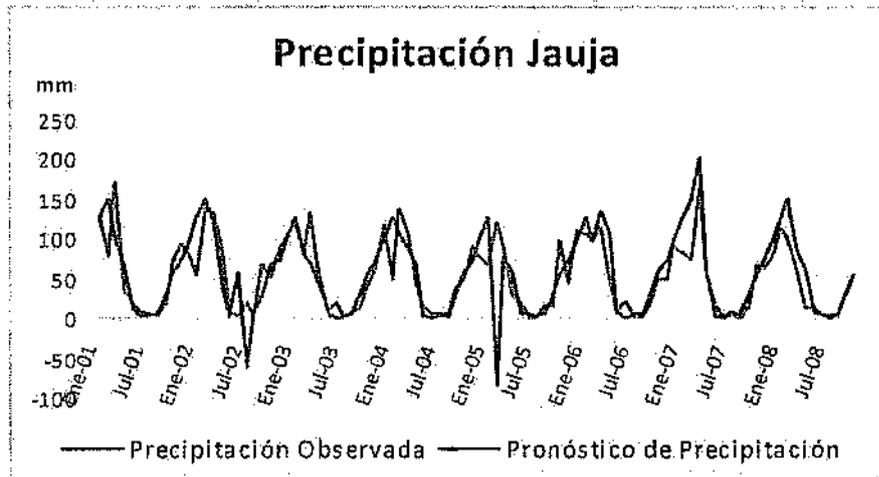


Figura 5: Precipitación Jauja. Valores observados y valores pronóstico con MARS.

Temperatura Mínima

El ECM es 1.6 °C², el RECM es 1.2 °C, el EAM es 0.9 °C, el EAMN es 0.3 y la correlación es 0.9. El sesgo promedio es -0.2 °C (Cuadro 22). El error es pequeño y la correlación alta, dado que no hay

ningún pico inusual. En la Figura 6 se muestra la gráfica de las series, y la serie pronóstico es muy similar a la serie observada. Esto concuerda con la correlación alta y positiva que se había calculado.

ECM (°C ²)	RECM (°C)	EAM	EAMN	BIAS (°C)	COR
1.6	1.2	0.9	0.3	-0.2	0.91

Cuadro 22: Evaluación de pronósticos de Temperatura Mínima Jauja utilizando MARS.

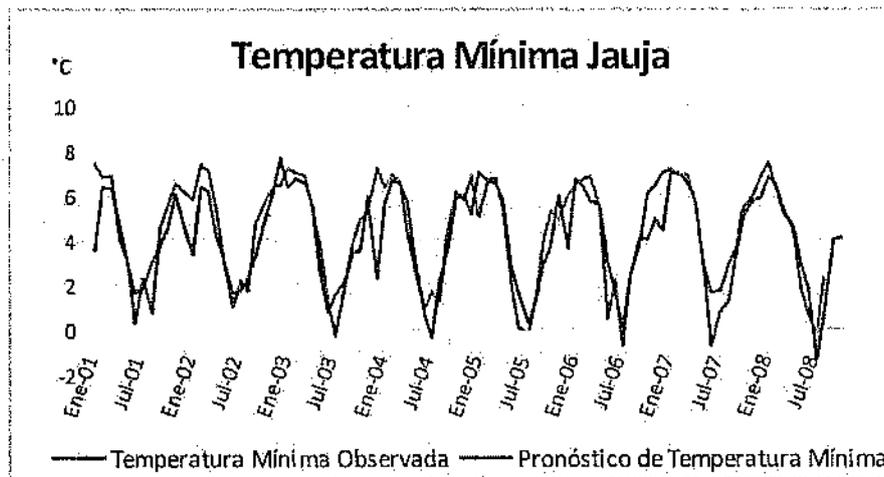


Figura 6: Temperatura Mínima Jauja. Valores observados y valores pronóstico con MARS.

Temperatura Máxima

El ECM es $1.7 \text{ }^{\circ}\text{C}^2$, el RECM es $1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, el EAM es 1.1, el EAMN es 0.1 y la correlación es 0.5. El sesgo promedio es 0.8 (Cuadro 23). El error presente en la serie pronóstico es relativamente bajo, del mismo modo que la correlación es baja. Esta correlación baja se debe a que por espacios de tiempo la serie pronóstico sobreestima a la observada.

En la Figura 7, se muestra la gráfica de las series observada y pronóstico, se observa que la serie pronóstico casi en la mayor parte del tiempo está sobre la serie observada. Con excepciones como en Enero de 2003 que se estima $17.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y el valor observado es $20.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$; más de tres grados de diferencia, en este caso el pronóstico es inferior al observado.

ECM ($^{\circ}\text{C}^2$)	RECM ($^{\circ}\text{C}$)	EAM	EAMN	BIAS ($^{\circ}\text{C}$)	COR
1.7	1.3	1.1	0.1	0.8	0.5

Cuadro 23: Evaluación de pronósticos de Temperatura Máxima Jauja utilizando MARS.

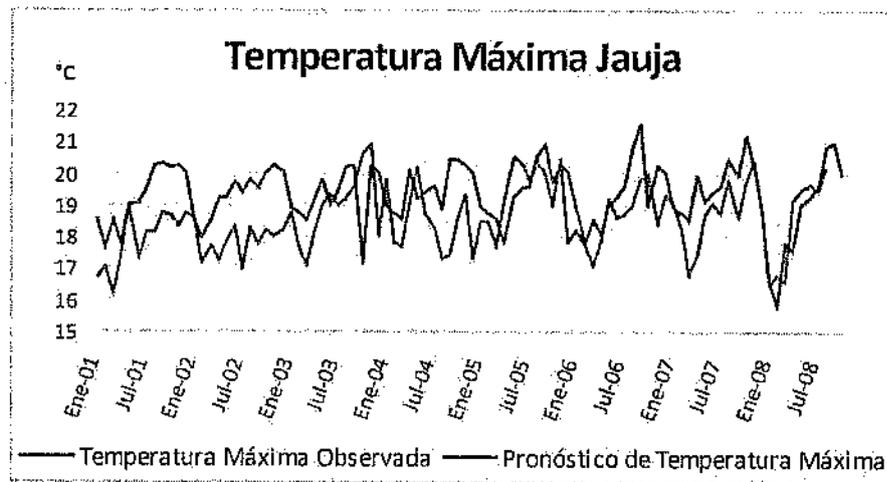


Figura 7: Temperatura Máxima Jauja. Valores observados y valores pronóstico con MARS.

Estación Viques

El ECM es 1308.3 mm², el RECM es 36.2 mm, el EAM es 24.2 mm, el EAMN es 376.8 y la correlación es 0.7. El sesgo promedio es -10.1 mm (Cuadro 24). El error es relativamente bajo y la correlación media alta. No existen picos inusuales. En la Figura 8 se muestra la gráfica

de las series observada y pronóstico, que son bastante similares. En algunos puntos la serie pronóstico sobreestima a la observada como en el caso del periodo Enero – Marzo de 2002 y 2005, sin embargo entre Agosto de 2002 – Marzo de 2003 y Julio de 2005 – Marzo de 2006 la serie pronóstico subestima a la observada.

ECM (mm ²)	RECM (mm)	EAM	EAMN	BIAS (mm)	COR
1308.3	36.2	24.2	376.8	-10.1	0.7

Cuadro 24: Evaluación de pronósticos de Precipitación Viques utilizando MARS.

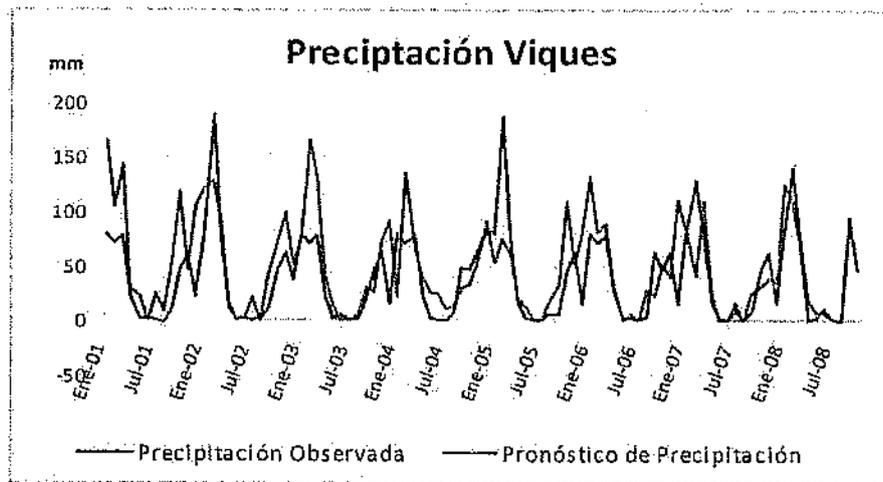


Figura 8: Precipitación Viques, Valores observados y valores pronóstico con MARS.

CONCLUSIONES

Los modelos con interacciones de dos variables son los que tuvieron más incidencia de mejores índices. Por lo que un análisis más profundo de los datos observados, verificando su calidad y veracidad sería aconsejable.

Los modelos de tres interacciones en algunos casos resultaron con mejores índices que los modelos con dos interacciones pero en menor incidencia. En algunas ocasiones ninguna de las interacciones resultó para el modelo, dejándose como una constante, como en el caso del mes de Octubre de la Temperatura Máxima de Huayao; Enero, Noviembre, y Diciembre de la Precipitación en Jauja; y Enero de la Precipitación en Viques.

En el análisis de temperatura máxima de Huayao se tiene un valor pronóstico fuera de lo esperado, un valor para temperatura máxima de -1.96 °C, en el mes de Diciembre de 2007. Es posible que este resultado este influenciado por algún valor atípico de alguna de las variables explicativas utilizadas en la estimación del modelo de temperatura máxima de Diciembre. Es por este valor atípico que los valores de los estadísticos indican que ese modelo no es bueno. Pero si uno se fija en los estadísticos cuando no se toma en cuenta ese valor, los valores de estos muestran que el error es pequeño y se tiene una mejor correlación. En las otras series no se tiene mayores problemas con los valores pronosticados.

El modelo MARS calcula los pronósticos con una aproximación bastante aceptable, ya que en cada uno de los modelos para la precipitación de las diferentes estaciones el sesgo promedio varía entre 3 mm/mes y 10 mm/mes. En cuanto a las temperaturas mínima y máxima en las estaciones, el sesgo promedio calculado es de ± 0.5 °C/mes aproximadamente,

Estimar el error para cada una de las series es muy importante por lo que las estimaciones del error se presentan a continuación. Los errores estimados para la estación de Huayao son: en precipitación se presentan errores de hasta 206.9 mm/mes, en temperatura mínima se tiene hasta 8.2 °C/mes y en temperatura máxima hasta 3.2 °C/mes. Luego los errores estimados para Jauja son: en precipitación, hasta 206.7 mm/mes; en temperatura mínima, hasta 4.9 °C/mes y en temperatura máxima hasta 3.4 °C/mes. Finalmente para la precipitación en Viques se tiene errores de hasta 111.7 mm/mes.

En la estación de Huayao para los meses de Septiembre y Octubre se espera que la precipitación sea menor que el promedio, 40.9 mm y 40.5 mm,

respectivamente y en Noviembre la precipitación será mayor al promedio, 79.7 mm (precipitación promedio Septiembre es 44.9 mm, Octubre es 68.6 mm y Noviembre es 69.6 mm). En el caso de la temperatura mínima, Septiembre se prevé que sea igual al promedio (4.6 °C) y Octubre se espera que sea más cálido que el promedio, 6.2 °C (promedio Octubre 5.7 °C), y que Noviembre sea más frío, 5.8 °C (promedio Noviembre, 5.9 °C). Y en el caso de la temperatura máxima, se espera que sea un año más frío en cuanto a temperatura máxima, sin embargo en mayo y junio se tiene temperaturas iguales al promedio.

En la estación de Jauja se espera que la precipitación sea menor o igual al promedio para los tres meses, Septiembre, Octubre y Noviembre, 24.9 mm, 54 mm y 72.1 mm (promedios mensuales 30.1 mm, 56.9 mm y 72.1 mm). El pronóstico de temperatura mínima se espera que para los dos primeros meses sea más frío que el promedio, 4 °C y 4.1 °C (promedios respectivos, 4.2 °C y 5.4 °C), en cambio por el mes de Noviembre se espera un aumento de temperatura respecto al

promedio, 6 °C, siendo el promedio 5.6 °C. En el caso de la temperatura máxima, se espera que la temperatura sea mayor o igual al promedio, 21 °C, 20 °C y 20.3 °C, respectivamente (promedios 19.9 °C, 20 °C y 20.1 °C).

En el caso de la precipitación de Viques, se espera que las precipitaciones observadas para los siguientes meses de Septiembre, Octubre y Noviembre sean mayores que el promedio, 92.5 °C, 47 °C y 62.2 °C, respectivamente (promedios 19.7 °C, 41.4 °C y 42.6 °C).

RECOMENDACIONES

Para próximos estudios se puede agregar variables explicativas como la humedad atmosférica, radiación solar, etc. que estén directamente relacionadas con la zona de estudio.

Asimismo, realizar un análisis exhaustivo de las variables explicativas utilizadas en este análisis para verificar si no tienes datos atípicos que puedan llevar a mayores errores.

Además, se podría conseguir datos de otras estaciones de la cuenca del río Mantaro para aumentar el alcance de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Craven and Wahba, G. 1979. "Smoothing noisy data with spline functions: estimating the correct degree of smoothing by the methods of generalized cross-validation". *Numerische Mathematik*, 31: pp. 377--403.
- Friedman, J.H. 1977. "A Recursive Partitioning Decision Rule for Nonparametric Classifications"; *IEEE. Transactions on Computers*, pp. 404-509.
- Friedman, J.H. 1988. Fitting functions to noisy data in high dimensions. In *computer Science and Statistics: Proceeding of the 20th Symposium* (E. Wegman, D. Gantzz, and J. Miller, eds.). Amer. Statist. Assoc., Washington, D.C., pp. 13-43.
- Friedman, J.H. 1991. Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, Vol. 19, No. 1 (Mar., 1991), pp. 1-67
- Friedman, J.H. & Silverman, B.W. 1989. Flexible parsimonious smoothing and additive modeling. *Technometrics*, vol. 31, pp. 3-39.

- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Blank, W.C. 1999. Análisis multivariante. Quinta edición. Prentice hall. Iberia. Madrid, España. 832 pp.
- IGP - Instituto Geofísico del Perú. 2005. Atlas Climático de precipitación y temperatura del aire en la Cuenca del Río Mantaro, Volumen I. CONAM. 107 pp.
- IGP – Instituto Geofísico del Perú. 2005. Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático, Volumen II. CONAM. 90 pp.
- IGP – Instituto Geofísico del Perú. 2005. Vulnerabilidad Actual y Futura ante el Cambio Climático y Medidas de Adaptación en la Cuenca del Río Mantaro, Volumen III. CONAM. 104 pp.
- Latínez, K. 2008. Pronóstico de Precipitación y Temperaturas Extremas del Aire con Meses de Anticipación Usando el Modelo MARS. IGP – Instituto Geofísico del Perú. 13 pp.
- Menacho Casimiro, E.E. 1993. Pronóstico de Temperatura y precipitación y elaboración de calendarios agrícolas para Huayao – Huancayo, UNALM, Lima.

ANEXOS

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	112.1	149.2	97.1	54.6	9.2	2.0	2.8	181.3	40.9	40.5	79.70
Observado	107.6	58.0	55.0	19.9	3.8	11.8	6.4	17.2			

Anexo 1: Pronósticos de precipitación de Huayao para el 2008 usando MARS.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	7.54	6.59	4.44	5.16	2.50	8.68	-0.60	2.59	4.62	6.16	5.81
Observado	7.7	6.5	5.4	4.5	1.0	0.5	-0.1	2.7			

Anexo 2: Pronósticos de temperatura mínima de Huayao para el 2008 usando MARS.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	17.3	17.8	17.4	18.4	19.3	20.0	19.2	21.8	20.3	21.5	
Observado	18.2	18.5	18.4	20.6	20.2	19.9	19.9	20.7			

Anexo 3: Pronósticos de temperatura máxima de Huayao para el 2008 usando MARS.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	125.3	149.8	87.8	61.4	8.4	5.5	2.3	4.5	24.9	54.0	72.06
Observado	112.7	100.1	62.8	12.2	13.3	6.4	0.6	4.2			

Anexo N°4: Pronósticos de precipitación de Jauja para el 2008 usando MARS

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	7.5	6.3	5.2	4.7	3.0	1.7	-1.3	0.7	4.0	4.1	6.03
Observado	6.8	6.5	5.5	4.3	1.7	0.5	-0.2	2.3			

Anexo 5: Pronósticos de temperatura mínima de Jauja para el 2008 usando MARS.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	16.6	15.8	17.8	17.6	19.0	19.3	19.6	20.8	21.0	20.0	20.26
Observado	16.5	16.7	16.6	19.1	19.4	19.7	19.5	20.2			

Anexo 6: Pronósticos de temperatura máxima de Jauja para el 2008 usando MARS.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Pronóstico	80.1	138.9	77.0	18.6	6.8	6.9	0.2	0.2	92.5	47.0	62.23
Observado	123.8	109.2	69.1	0.0	2.1	9.6	0.0	0.0			

Anexo 7: Pronósticos de precipitación de Viques para el 2008 usando MARS.

DESARROLLO DE UN MODELO ESTADÍSTICO PARA EL PRONÓSTICO DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURAS EXTREMAS DEL AIRE PARA HUANCAYO

KAREN LATÍNEZ SOTOMAYOR

Facultad de Economía y Planificación
Especialidad de Estadística e Informática
Universidad Nacional Agraria La Molina
klatinez@gmail.com

Investigación dirigida por: Lic. Raúl Chávez
Dra. Yamina Silva
Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima

Resumen

El pronóstico de precipitación y temperaturas extremas del aire en la región del valle del Mantaro (departamento de Junín), es de suma importancia para la agricultura ya que muchos de los productos obtenidos en el valle son destinados hacia la ciudad de Lima, habiendo también productos destinados a la exportación. Por otro lado, el 79% de la agricultura en la cuenca del Mantaro se desarrolla en secano, es decir depende directamente de las lluvias que se producen en esa región (IGP, 2005), ya que el sistema de riego que existe es bastante limitado.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo estadístico para el pronóstico de temperaturas del aire y precipitación con algunos meses de anticipación. Se plantea la aplicación del modelo MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) tomando como predictandos a la precipitación y temperaturas extremas del aire (datos tomados de la estación de Huayao ubicada en el valle del Mantaro) y como predictores a los Índices climáticos de Temperatura Superficial del Mar (TSM), presión a nivel del Mar (SLP), entre otros. Los pronósticos se realizan hasta con 6 meses de anticipación, tomando los datos mensuales desde 1960 hasta 1993 para entrenar al modelo, y desde 1994 al 2002 para validar el pronóstico.

El modelo MARS permite un ajuste adecuado, para los valores pronosticados de las variables Precipitación (pp), Temperatura Mínima (tm) y Temperatura Máxima (tx), a excepción de algunos periodos entre los años 1994 y 1996, todos los pronósticos son bastante similares a los valores observados.

Introducción

La temporada de lluvias inicia en el mes de setiembre y se prolonga hasta el mes de abril del siguiente año, *teniendo un pico máximo en el mes de febrero* (IGP, 2005). Para los agricultores de la zona es muy importante conocer con algunos meses de anticipación si la próxima temporada de lluvias va a estar por encima o debajo de lo normal, además de conocer si habrán algunos periodos fríos o cálidos dentro de la estación de

lluvias que coincide con el año agrícola.

De tener esta información, ellos podrían decidir el tipo de producto a sembrar y cuando sembrar, de esta manera podrían disminuir el riesgo de alteraciones en los cultivos por efectos del clima.

Dentro del campo de la estadística se cuentan con una serie de herramientas que se pueden utilizar para modelar y elaborar pronósticos. Los más utilizados en la meteorología son los modelos de series de tiempo, modelos Box Tid-well,

entre otros; estas técnicas se conocen como técnicas paramétricas. Para utilizar cada una de estas técnicas se necesita cumplir supuestos específicos, y generalmente los supuestos no se cumplen, y cuando esto sucede, la técnica queda invalidada y los resultados no son confiables. Para sobrellevar esto la estadística tiene técnicas que no necesitan que se cumplan los supuestos, se les llaman técnicas No Paramétricas, entre ellas se encuentra una técnica llamada MARS (Multivariate Adaptive Regression Spline), que utiliza una variable predictando y varias variables predictoras, evitando alguna suposición sobre la relación funcional entre estas variables, como lo hace el Análisis de Regresión Lineal Multivariado, que hace suposición a una relación lineal entre éstas. En este trabajo se usa el modelo MARS usando como predictores algunos índices globales (temperatura de superficie de mar, presión al nivel de superficie, etc.) y como predictandos la precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima de la estación de Huayao, ubicada en el departamento de Junín. Desarrollaremos tres modelos, uno por cada predictando, e identificaremos la importancia de los

predictores en cada modelo. Para asegurar el buen modelamiento. Los datos utilizados son a nivel mensual desde 1960 al 2002, de los cuales tomaremos los últimos nueve años para validar el modelo.

Datos y Metodología

Datos

Se utiliza como predictando, las series históricas mensuales de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima de la estación de Huayao ubicada en observatorio del instituto Geofísico del Perú a 3350 msnm en Huancayo. La información corresponde al periodo desde 1960 al 2002.

Los predictores son los índices globales de TSM en el Pacífico ecuatorial, conocidos como regiones: Niño1+2 (N1+2), Niño 3 (N3), Niño 4 (N4) y Niño 3.4 (N3+4), estos datos provienen del *Earth System Research Laboratory* (ESRL). Presión atmosférica a nivel del mar en Darwin y Tahití y el Índice de Oscilación del Sur (SOI), estos datos provienen de *Climate Prediction Center* (CPC) de la NOAA entre otros. Se utilizaron 30 variables predictoras correspondientes al mismo periodo de

<p>PDO: Oscilación Decadal del Pacífico</p> <p>EA: Patrón del Atlántico Este</p> <p>PNA: Índice del Pacífico Norte Americano</p> <p>SCA: Patrón de Escandinavia</p> <p>N3: Índice de TSM en el Oriental del Pacífico (Región Niño 3)</p> <p>N34: Índice de TSM en el Pacífico Central-Oriental (Región Niño 3.4)</p> <p>TAHITI: Presión a Nivel del Mar en Tahití</p> <p>TNA: Índice del Atlántico Tropical Norte</p> <p>SOI: Índice de Oscilación del Sur</p>	<p>NAO: Oscilación del Atlántico Norte</p> <p>WP: Índice del Pacífico Oeste</p> <p>EA/WR: Patrón del Atlántico Este /Oeste de Rusia</p> <p>N12: Índice de TSM en el Extremo Oriental del Pacífico (Región Niño 1+2)</p> <p>N4: Índice de TSM en el Occidental del Pacífico (Región Niño 4)</p> <p>DARWIN: Presión a Nivel del Mar en Darwin</p> <p>CAR: Índice de TSM en el Caribe</p> <p>TSA: Índice del Atlántico Tropical Sur y las anomalías de todas las variables predictoras, a excepción de SOI.</p>
---	--

Tabla 1: Índices utilizados como variables predictoras.

Marco Teórico. Descripción del Modelo

Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) es una aplicación de las técnicas popularizadas por Friedman (1991) para la solución de problemas de tipo de regresión, con el principal propósito de predecir los valores de una variable dependiente (predictando) de un conjunto de variables independientes (predictores).

MARS es un procedimiento de una regresión no paramétrica que no hace ninguna suposición sobre la relación

funcional entre las variables independientes y dependientes. En lugar de ello, MARS construye esta relación basándose en una serie de coeficientes y de las denominadas funciones base que son totalmente determinadas a partir de la regresión de los datos. Puede pensarse que el algoritmo MARS opera como múltiples pedazos de regresiones lineales.

Funciones Base

Concretamente, MARS utiliza funciones de dos lados truncados como base para funciones lineales o no lineales de expansión, que se aproxima a las

relaciones entre las variables dependientes e independientes.

El Modelo MARS

La ecuación general del modelo MARS (ver Hastie and Tibshirani, 2001) se expresa así:

$$y = f(X) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m h_m(X)$$

donde $\sum_{m=1}^M$ es la suma sobre los M términos no constantes en el modelo.

En resumen, y es una estimación que se obtiene como una función de las variables independientes X inclusive interacciones (nuevas variables creadas a partir de la multiplicación de variables independientes); esta función consta del intercepto (β_0) y ponderado (por β_m) suma de una o más funciones base $h_m(X)$.

MARS hace búsquedas sobre el dominio (cada predictor) de todos los valores del predictando, así como las interacciones entre estas variables independientes. Durante estas búsquedas, MARS

determina automáticamente las variables independientes y las interacciones más importantes para el modelo.

El Algoritmo MARS

Este algoritmo se aplica de la siguiente manera:

1. Se entrena el modelo más simple tomando una sola función base constante.
2. Busca en la base espacial de las funciones, para cada variable y para todos los posibles nudos, y agrega las que maximizan en cierto grado la bondad de ajuste (minimizar el error de predicción).
3. El paso 2 se aplica recursivamente hasta que un modelo pre-determinado de máxima complejidad se deriva.
4. Por último, en la última etapa, un procedimiento de poda se aplica cuando esas funciones base son removidas, son las que menos contribuyen a la bondad de ajuste general.

Adaptación del Modelo MARS

El algoritmo MARS construye modelos basándose en funciones de dos lados

truncados de los predictores (x) de la forma:

$$(x-t)_+ = \begin{cases} x-t, & x > t \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Estos sirven como funciones base para funciones lineales o no lineales de expansión que se aproximan a algunas funciones subyacentes a $f(x)$

El modelo MARS para la variable dependiente y , y M términos pueden ser sumados en la siguiente ecuación:

$$y = f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m h_{km}(X_{v(k,m)})$$

donde $X_{v(k,m)}$ es el predictor en el k -ésimo y m -ésimo producto. Por orden de las interacciones $k=1$, el modelo es aditivo y $k=2$ para el modelo con interacciones por pares.

Durante la selección hacia adelante paso a paso "*forward stepwise*", una serie de funciones base se añaden al modelo de acuerdo a un máximo pre-determinado que debe ser considerablemente mayor que el óptimo (mejor ajuste de mínimos cuadrados).

Después de implementar la "selección hacia adelante paso a paso" de las funciones base, un procedimiento "selección hacia atrás" es aplicado en el modelo, éste es podado removiendo aquellas funciones base que están asociadas con el menor incremento de la bondad de ajuste. Una función del error de los mínimos cuadrados (inversa de la bondad de ajuste) se calcula. El llamado **error de validación cruzado generalizado**, es medido a partir de la bondad de ajuste de las estimaciones, toma en cuenta no sólo el error residual sino también la complejidad del modelo. Esta dado por:

$$GCV = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{\left(1 - \frac{C}{N}\right)^2} \quad \text{con} \\ C = 1 + cd$$

Donde N es el número de casos del conjunto de datos, d es el grado de libertad, que es igual al número de funciones base independientes. La cantidad c es la penalidad por añadir una función base. Los experimentos muestran que el mejor valor para C se puede encontrar en algún punto entre $2 < d < 3$ (ver Hastie and Tibshirani, 2001).

RESULTADOS

Los pronósticos para cada una de las variables (precipitación, temperatura mínima, y temperatura máxima), se realizan usando retrasos en los predictores, es decir, se estima el predicando con uno, dos y hasta seis meses de anticipación. Adicionalmente, los modelos se probaron sin interacciones, con dos y tres interacciones de variables independientes.

Se elige como mejor modelo a aquel que tiene menor valor de GCV, mayor valor de correlación lineal y el menor error cuadrático medio (ECM), y finalmente se muestran las variables independientes más importantes en el modelo elegido. Los gráficos de series de tiempo mostrados corresponden a la observación y estimación del modelo desde enero de 1994 hasta diciembre del 2002.

PRECIPITACIÓN

Dentro de todos los modelos encontrados para la variable Precipitación, el modelo con interacciones de grado 2 con un mes de anticipación (MI, grado 2) es el que muestra los mejores indicadores (Ver Tabla 2). Luego se comparó el pronóstico con los datos desde 1994 hasta 2002, en el cual se observa que el modelo reproduce bastante bien el ciclo anual, sin embargo en algunos años el modelo tiende a sobre estimar los picos en el periodo de máximas lluvias (Ver Figura 2). Se obtuvieron muy buenos resultados, para los nueve años siguientes. Las variables más importantes del modelo seleccionado son la presión a nivel del mar en Darwin y la TSM en el Pacífico oriental (región Niño 3) así como las anomalías de la TSM en esta misma región (Tabla 2a).
Tabla 2. Cuadro resumen de los indicadores de los modelos estudiados para Precipitación (pp).

Meses de anticipación	Interacciones	GCV	Coef. correl.	ECM
M1	Sin Inter.	919.549	0.833	818.797
	Grado 2	902.501	0.844	770.566
	Grado 3	908.356	0.843	775.565
M2	Sin Inter.	947.351	0.825	852.339
	Grado 2	992.049	0.822	869.640
	Grado 3	975.883	0.830	833.221
M3	Sin Inter.	987.595	0.823	861.209
	Grado 2	977.732	0.827	845.908
	Grado 3	971.458	0.823	862.773
M4	Sin Inter.	988.692	0.817	889.534
	Grado 2	958.692	0.833	818.543
	Grado 3	917.410	0.839	793.719
M5	Sin Inter.	1044.680	0.799	969.278
	Grado 2	1035.648	0.810	919.781
	Grado 3	977.012	0.822	867.705
M6	Sin Inter.	1053.731	0.799	967.750
	Grado 2	1000.733	0.817	888.773
	Grado 3	980.917	0.824	859.881

Tabla 2: Cuadro resumen de los indicadores de los modelos estudiados por Precipitación (pp).

M1) Modelo con un mes de anticipación, M2) con dos meses, M3) con tres meses, M4) con cuatro meses, M5) con cinco meses y M6) con seis meses. Sin Inter. :

Sin interacciones, Grado 2: modelos con Interacciones de hasta dos variables, Grado 3: modelos con interacciones de hasta tres variables.

Variable	Costo de Omisión	Importancia %	
DARWIN	1811.601	100.000	
N3	1401.126	75.278	
AN3	1153.612	55.262	
APNA	1016.586	40.092	
N12	1005.796	38.646	
N34	1005.796	38.646	
AD	980.160	34.970	
CAR	913.964	22.893	
ANAO	878.381	12.184	
PDO	864.319	0.000	

Variables ordenadas de mayor a menor importancia. Se excluyeron aquellas variables que tenían importancia 0%

Tabla 2a : Importancia de las variables para el modelo de precipitación.

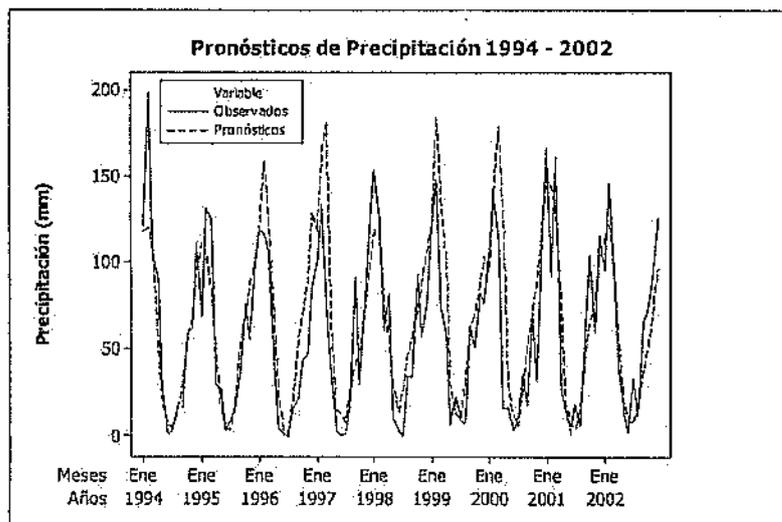


Figura 2: Comparación de pronósticos de precipitación con valores observados.

TEMPERATURA MÍNIMA

Luego de analizar todos los modelos que se trabajaron para la temperatura mínima se obtuvo, que el mejor modelo es el de dos meses de anticipación con interacciones de hasta tres variables (M2, grado 3). Utilizando el principio de parsimonia, elegiremos el modelo con los mismos meses de anticipación pero con interacciones de hasta dos variables (M2, grado 2), debido a que las magnitudes de los índices no varían en más de una centésima (Ver Tabla 3). Las

variables más importantes para este modelo son las TSM y su anomalía en la región Niño 3 y en la región Niño 1+2. (ver Tabla 3a). Comparando los pronósticos con los datos observados para el período 1994 – 2002 (Figura 3), se puede ver que el modelo está generando temperaturas bastante bajas para algunos años, el cual es mucho más significativo para los años 1994-1996. En cuanto al extremo superior, las máximas de las temperaturas mínimas, estas son mejor representadas, excepto para el año 1998.

Meses de anticipación	Interacciones	GCV	Coef. correl.	ECM
M1	Sin Inter.	1.260	0.909	1.146
	Grado 2	1.197	0.920	1.022
	Grado 3	1.161	0.922	0.991
M2	Sin Inter.	0.963	0.933	0.858
	Grado 2	0.963	0.936	0.822
	Grado 3	0.957	0.936	0.817
M3	Sin Inter.	1.261	0.913	1.100
	Grado 2	1.185	0.919	1.025
	Grado 3	1.186	0.920	1.013
M4	Sin Inter.	1.013	0.930	0.893
	Grado 2	1.014	0.930	0.889
	Grado 3	1.028	0.930	0.889
M5	Sin Inter.	1.050	0.925	0.955
	Grado 2	1.111	0.925	0.961
	Grado 3	1.111	0.925	0.961
M6	Sin Inter.	1.224	0.915	1.078
	Grado 2	1.135	0.924	0.969
	Grado 3	1.135	0.924	0.969

Tabla 3. Cuadro resumen de los indicadores de los modelos estudiados para Temp. Mínima TM.

La descripción de las variables es similar a la Tabla 2.

Variable.	Costo de Omisión	Importancia %
N3	5.259	100.000
AN3	4.376	89.207
N12	1.876	46.657
AN12	1.072	17.809
APDO	0.984	10.728
CAR	0.971	9.198
DARWIN	0.946	5.053
AWP	0.946	5.053
PDO	0.934	0.000

Variables ordenadas de mayor a menor importancia. Se excluyeron aquellas variables que tenían importancia 0%

Tabla 3a: Importancia de las variables para el modelo de temperatura mínima.

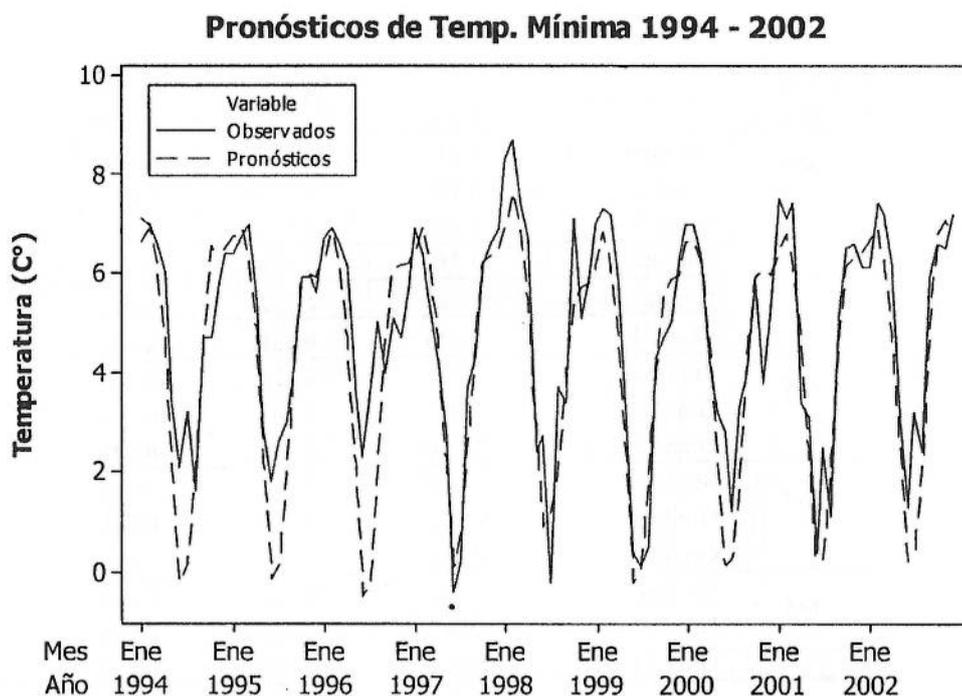


Figura 3: Comparación de pronósticos de temperatura mínima con valores observados.

TEMPERATURA MÁXIMA

Por último se analizaron los modelos obtenidos para la Temperatura Máxima. Se obtuvo que el mejor modelo es el de dos meses de anticipación con interacciones de grado 3, pero similar al caso del modelo para la temperatura mínima elegimos el modelo con el mismo tiempo de anticipación pero con interacciones de grado 2 (M2, grado 2), debido a que las magnitudes no varían en

más de una centésima (Ver Tabla 4). Sin embargo, como puede verse en la Tabla las correlaciones son bastante bajas y comparando los datos pronosticados y observados para el periodo 1994 – 2002, vemos que el modelo no logra representar bien el ciclo anual. Si bien los picos inferiores están de alguna manera bien representada, sin embargo los picos superiores no logran ser captados por el modelo (ver Figura 4).

Meses de anticipación	Interacciones	GCV	Coef. correl.	ECM
M1	Sin Inter.	0.747	0.732	0.645
	Grado 2	0.751	0.721	0.667
	Grado 3	0.732	0.721	0.667
M2	Sin Inter.	0.783	0.698	0.712
	Grado 2	0.725	0.732	0.644
	Grado 3	0.720	0.738	0.631
M3	Sin Inter.	0.725	0.725	0.659
	Grado 2	0.736	0.740	0.628
	Grado 3	0.736	0.740	0.628
M4	Sin Inter.	0.739	0.722	0.665
	Grado 2	0.772	0.711	0.686
	Grado 3	0.755	0.723	0.662
M5	Sin Inter.	0.782	0.706	0.696
	Grado 2	0.782	0.720	0.668
	Grado 3	0.791	0.721	0.666
M6	Sin Inter.	0.793	0.693	0.721
	Grado 2	0.790	0.698	0.711
	Grado 3	0.761	0.725	0.659

Tabla 4: Cuadro resumen de los indicadores de los modelos estudiados para Temp. Máxima (tx).

La descripción de las variables es similar a la Tabla 2.

Variable	Costo de Omisión	Importancia %	
DARWIN	1.045	100.000	
N12	0.888	70.668	
AN34	0.788	42.977	
AN12	0.783	40.898	
AEA	0.768	34.818	
PDO	0.738	15.763	
NAO	0.730	0.000	

Variables ordenadas de mayor a menor importancia. Se excluyeron aquellas variables que tenían importancia 0%

Tabla 4a.: Importancia de las variables para el modelo de temperatura máxima.

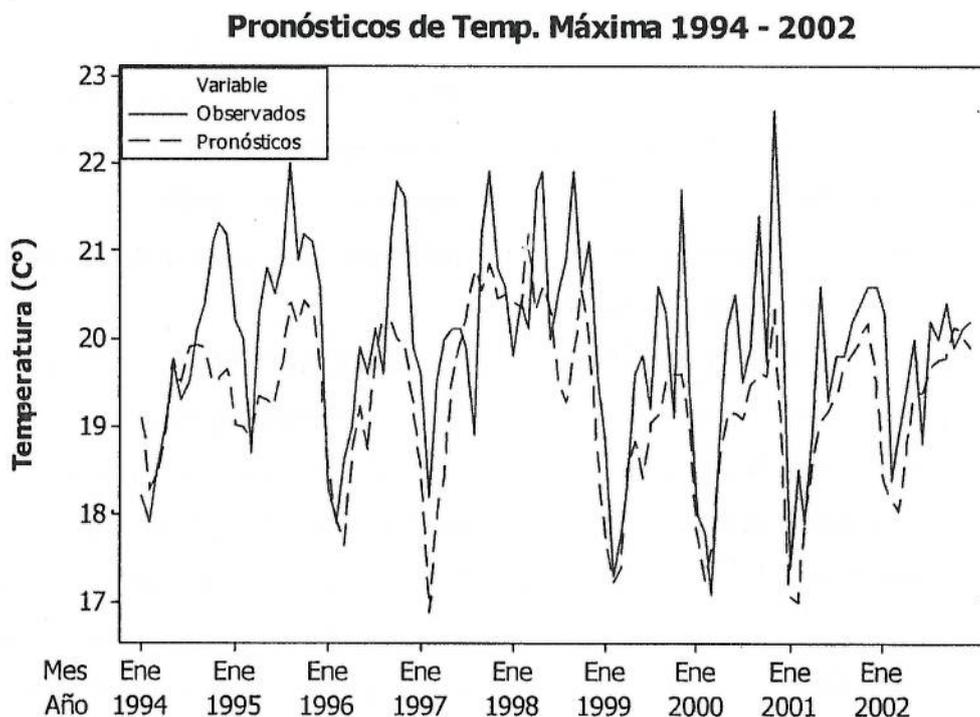


Figura 4: Comparación de pronósticos de temperatura máxima con valores observados.

Conclusiones

El modelo MARS permite un ajuste adecuado, para las estimaciones de Precipitación y Temperatura Mínima. A excepción de algunos puntos entre los años 1994 y 1996, todos los pronósticos son bastante similares a sus observaciones. La Temperatura Máxima, principalmente los picos superiores no son bien representados por los modelos analizados.

El modelo seleccionado para precipitación con los indicadores $GCV =$

902.501 , Correlación = 0.844 y $ECM = 770.566$, es el más idóneo para generar pronósticos.

Para el modelo de temperatura mínima los indicadores son $GCV = 0.963$, Correlación = 0.936 y $ECM = 0.822$ son los óptimos y podrían ser usados para generar pronósticos bastante similares a los observados.

El modelo de temperatura máxima con los indicadores: $GCV = 0.725$, Correlación = 0.732 y $ECM = 0.644$ es el mejor entre los analizados, sin embargo

no logra generar un buen pronóstico, por lo que se requiere seguir trabajando en este modelo.

El pronóstico de precipitación presenta algunos meses en donde sobreestima la cantidad de lluvia, sobre todo en marzo de 1997 y abril de 2000, donde la sobreestimación fue 109.26 y 108.15mm respectivamente. Estas diferencias se podrían deber a otros factores que no fueron tomados en cuenta como humedad del aire, cantidad de nubes, etc.

En cuanto al pronóstico de temperatura mínima, se puede observar que en los primeros años hay meses en los que se subestima la temperatura. Los meses en los cuales, surgen estos problemas son julio de 1994, 1995 y 1996, donde la magnitud del valor verdadero fue subestimada en 2,5°C hasta 3,6°C. Estas diferencias podrían deberse también a factores no incluidos en el modelo.

Luego, los pronósticos de temperatura máxima tienen más variabilidad entre el valor observado y el pronosticado, que en los modelos anteriores. Sin embargo podemos ver que la serie pronosticada sigue el mismo patrón que la serie observada, hay subidas en la estimación

tanto como en las observaciones, sucede lo mismo con las caídas, es decir sigue la tendencia. La mayor diferencia en temperatura las podemos encontrar en los meses de noviembre de 1999, 2000 y septiembre de 1998. En donde el pronóstico es subestimado en más de 2°C.

Teniendo los valores de los índices (predictores) de hoy podemos pronosticar con uno y dos meses de anticipación, pero también se podría escoger unos tres meses de anticipación y calcular pronósticos teniendo en cuenta que el error aumenta. La elección de 1, 2 y 3 meses es debido a que los índices utilizados para hallar el mejor modelo no varían mucho en comparación con los valores de los índices que se utilizan con más meses de anticipación.

Las variables más importantes para los modelos son las TSM el Niño 1+2 que aparece en todos los modelos, además del Niño 3 que es muy importante para el modelo de precipitación y temperatura mínima. Otra variable importante para los modelos es también la presión a nivel del mar en Darwin que esta presente en todos los modelos para precipitación y temperatura máxima.

Recomendaciones

Se podría utilizar además de índices globales algunos índices locales o regionales que proporcionen información acerca de la zona. Además se podrían utilizar los predictandos de los meses anteriores como variables independientes

Los resultados podrían mejorar teniendo un rango mayor de datos. El rango de años utilizado en esta investigación fue de 34 años, desde 1960 hasta 1993 como data de aprendizaje, y con la data de 1994 hasta 2002 se compararon los pronósticos.

Los valores pronósticos se recomiendan calcularse para 6 meses como máximo, en esta investigación se pronosticaron para 9 años, con el único propósito de validar el modelo. En otras investigaciones se podría tomar los modelos aquí utilizados y hacer una retroalimentación, adicionando más años.

Bibliografía

Ayuda R CRAN (Comprehensive R Archive Network)
Climate Prediction Center, National Weather Service, NOAA: "El Niño Regions":

http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/niño_regions.shtml

Friedman, J. H. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *Annals of Statistics*, 19:1–194.

Hastie, T. and Tibshirani R. (2001) *The Elements of Statistical Learning: datamining, inference and prediction*, Springer-Verlag New York, Inc. 9:283–289

Instituto Geofísico del Perú, 2005a: "Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro". Fondo Editorial CONAM. Lima.

Instituto Geofísico del Perú, 2005b: "Atlas Climatológico de precipitaciones y temperaturas en la Cuenca del Mantaro". Fondo Editorial CONAM. Lima

Material encontrado en Internet.

Sobre MARS

<http://www.statsoft.com/textbook/stmars.html>

<http://www.uni.edu/instrsch/pdf/present/mars.pdf>

http://www.umiacs.umd.edu/~shaohua/enee698a_f03/prim.ppt

<http://rweb.stat.umn.edu/R/library/mda/html/mars.html>

<http://math.uprm.edu/~edgar/cap9sl.pp>

Sobre los índices

Instituto Geofísico del Perú

<http://www.met.igp.gob.pe/cpntc/clima/peru/HTML/huayao.html>.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

Global Change Master Directory

<http://gcmd.nasa.gov>

Silva, C., Pérez, P., y Trier, A. (2001). Statistical modeling and prediction of atmospheric pollution by particulate material: two nonparametric approaches. *Environmetrics*, 12:147–159.

Earth System Research Laboratory

<http://www.esrl.noaa.gov/>

Climate Prediction Center

EL CICLO DIURNO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE OBSERVADA EN LIRCAY, HUANCVELICA

CINTHIA SOLEDAD ARELLANO ROJAS

Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Cinthias779@gmail.com

*Investigación dirigida por: Dr. Pablo Lagos Enríquez
Dirección de Investigación sobre Prevención de Desastres Naturales*

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del ciclo diurno de la temperatura (periodo de enero 2001 a diciembre 2007) en la localidad de Lircay-Huancavelica, se analiza qué parámetros afecta dicho comportamiento, para lo cual se considera otras variables como radiación solar, presión atmosférica, y viento en superficie. Se obtuvo el término advectivo de la ecuación de la primera ley de la termodinámica y comparo con las demás variables en su ciclo diurno de cada una. En el análisis de la radiación solar se determinó el ciclo diurno considerando que la radiación solar es la principal fuente de calor. Se analiza también el ciclo anual de todas las variables con el objetivo de conocer la variación de mes a mes.

OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio es explicar el ciclo diurno de la temperatura del aire en función de la radiación solar y el término advectivo utilizando la primera ley de la termodinámica.

INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire es uno de los factores más importantes en el medio que nos rodea es por ello que el estudio del ciclo diurno de esta variable es de gran importancia por tener efectos sobre la agricultura y otros aspectos económicos debido a que al ocurrir un desbalance o alteración en la temperatura nuestro clima se vería afectado y por ello habría que adecuarse a los cambios que pudiera

afectar, además de conocer que factores influyen en el comportamiento del ciclo diurno de temperatura como pueden ser la radiación solar y la advección de temperatura provocada por los vientos.

Definimos el viento como aire en movimiento. Su importancia es enorme, ya que es el principal factor del transporte de calor y del vapor de agua suspendido en la atmósfera. Es la principal componente de la circulación atmosférica. El movimiento del aire es debido a la diferencia de presión que existe en los distintos puntos de la atmósfera. El viento se desplaza de las zonas de altas presiones (anticiclones) a las zonas de bajas presiones (borrascas) y así intenta contrarrestar la diferencia

de presiones existente entre ellas. El viento también tiene una influencia en los procesos de precipitación ya que es responsable del transporte de las nubes de un lugar a otro.

Para este estudio se trabaja con la primera ley de la termodinámica donde se encuentra los factores de advección, convección y radiación.

La primera ley de la termodinámica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \text{grad}T + \omega \left(k \frac{T}{p} - \frac{\partial T}{\partial p} \right) + \frac{Q}{c_p} \dots \dots \dots 1$$

Donde v es el vector de la velocidad horizontal bidimensional (u, v) y ω es la velocidad vertical. El primer término de la ecuación es el cambio en el tiempo de la temperatura, esta ecuación muestra que la variación de la temperatura con el tiempo local depende de tres factores: el diabático de calefacción o de refrigeración (Q/c_p), la advección horizontal ($-\vec{v} \cdot \text{grad}T$), y un término de movimiento vertical conteniendo la estabilidad estática, el término entre paréntesis es la estabilidad estática, el cual afecta fuertemente el movimiento vertical.

Considerando que se cuenta con los datos observados de las variables meteorológicas se procede a analizar cada componente de la ecuación.

Siendo el primer término de la derecha el término advectivo, el segundo término está relacionado con la estabilidad estática y la convección. Este término se considera nulo en un primer análisis por que la velocidad vertical es pequeña en comparación con los demás términos. Entonces tenemos ahora la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \text{grad}T + \frac{Q}{c_p} \dots \dots \dots 2$$

Hallando el término advectivo tenemos:

$$-\vec{v} \cdot \text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{Q}{c_p} \dots \dots \dots 3$$

Teniendo en cuenta que tenemos datos de temperatura y radiación presentamos la siguiente ecuación:

$$-\vec{v} \cdot \text{grad}T = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t} - \frac{Q}{c_p} \dots \dots \dots 4$$

Donde c_p es el calor específico:

$$c_p = 1,004 \text{ kJ/K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$$

DATOS Y METODOLOGIA

Una estación meteorológica automática es una versión autónoma automatizada de la tradicional estación meteorológica, preparada tanto para ahorrar labor humana, o realizar mediciones en áreas remotas o inhóspitas.

- Ubicación geográfica de la estación de Lircay, se encuentra

en el departamento de Huancavelica ubicado en plena sierra sur-central del Perú. Presenta una topografía accidentada que la ubican encerrada entre altas montañas y cumbres cubiertas de nieve, rodeada de desiertas punas, lagunas solitarias y bellas.

- Forma parte de una red de estaciones automáticas que administra SENAMHI instaladas el año 2000.
- Obtiene información horaria.
- Mide Viento, presión,

- Temperatura, precipitación, Radiación y humedad relativa.
- Presenta transmisión satelital.
- El periodo de datos con los cuales se esta contando son de 01 de octubre del año 2000 al 31 de diciembre del año 2007. Las variables con las que se cuenta son viento, presión, temperatura y radiación.
- Para este trabajo se utilizó los datos de temperatura, dirección y velocidad del viento, además de radiación.

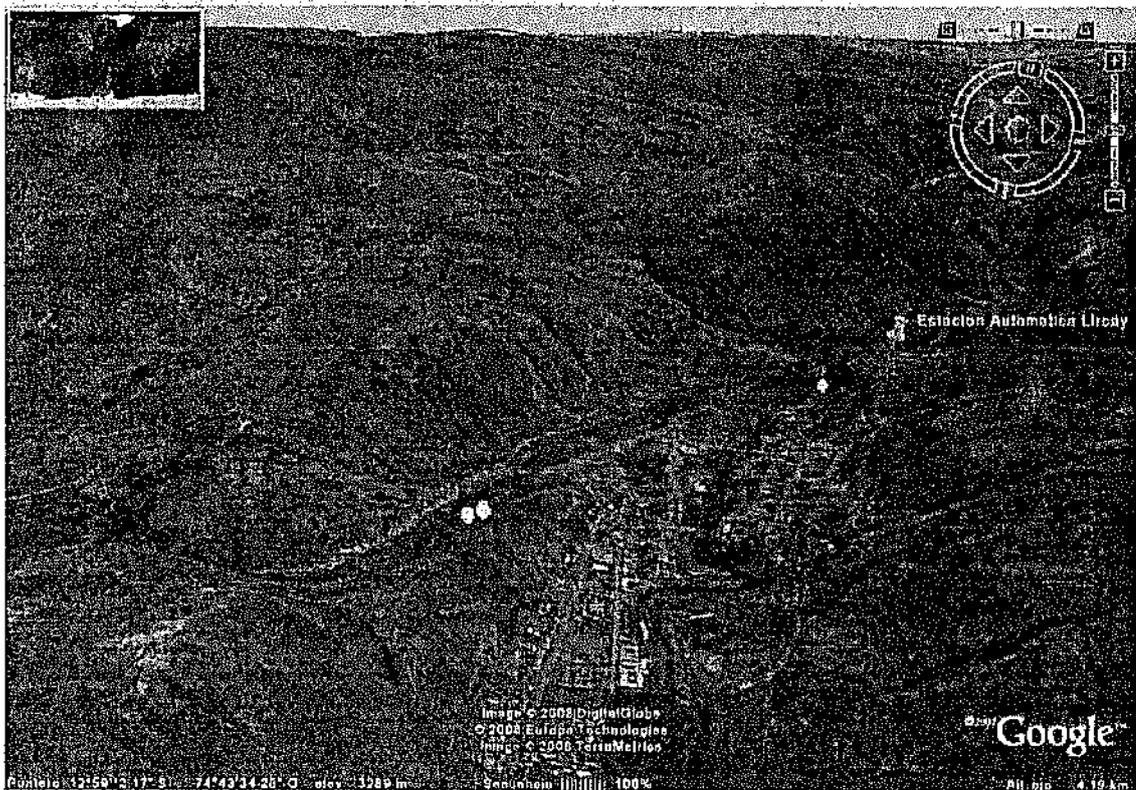


Figura 1: Como se puede observar Lircay se encuentra ubicada rodeado de cerros, los cuales pueden estar interviniendo en la dirección e intensidad de los vientos.

La metodología de este trabajo esta basado en creación de subrutinas en el Programa Matlab y el lenguaje de programación Fortran, para procesar los datos y graficarlos.

Primeramente trabajamos con el viento:

- Se verificaron los datos y se encontraron vacios los cuales

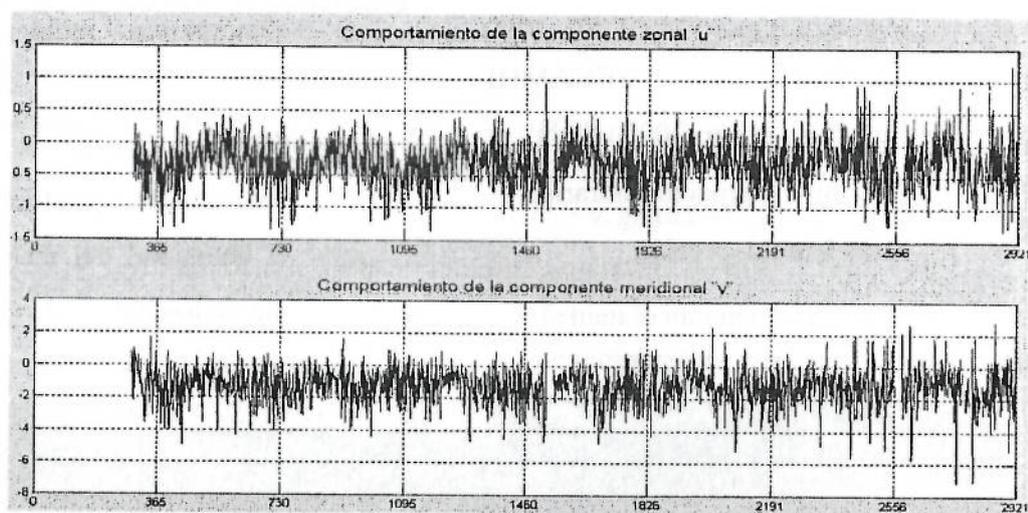


Figura 2: Medias diarias de la componente zonal y meridional del viento, donde se observa que 'u' se encuentra en su mayor parte en la dirección hacia el oeste y v en la dirección hacia el sur. (El eje y esta en m/s)

Las líneas verticales en la Figura 2 separan años a año los datos por lo cual tenemos claramente divididos los 8 años de datos, donde se puede apreciar que a partir del año 2004 aparecen mayores variaciones del comportamiento que viene presentando en años anteriores pero como las variaciones solo son algunos puntos se realiza un control de calidad y eliminar puntos extremos que

fueron rellenos con un número (-999.9) que se declaro como indefinido para que no afectara el proceso.

- Cálculo de las componentes zonal U y meridional V del campo de velocidad superficial de la zona de análisis.

hayan sido errores al momento de tomar los datos o por fallas del instrumento y de no ser por tales motivos tratar de entender que es lo que esta pasando.

Rosa de vientos

Una rosa de los vientos o rosa náutica es un círculo que tiene marcados alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte.

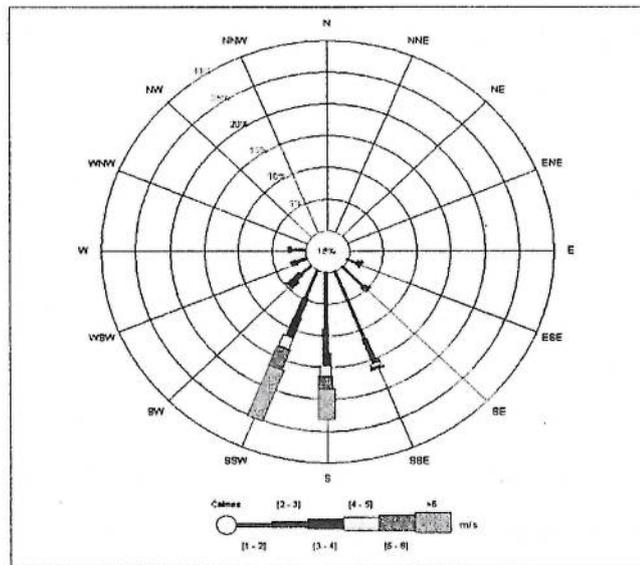


Figura 3: La rosa de vientos nos sirve para identificar la dirección predominantes de los vientos es por ello que se graficó la climatología. El grafico muestra la dirección predominante del mes de Octubre, en los demás meses también se observa que los vientos se dirigen al suroeste.

- El ciclo diurno multianual de las componentes u y v, esto se obtuvo promediando para cada hora los valores de todos los días, meses y años para obtener al final solo 24 puntos.

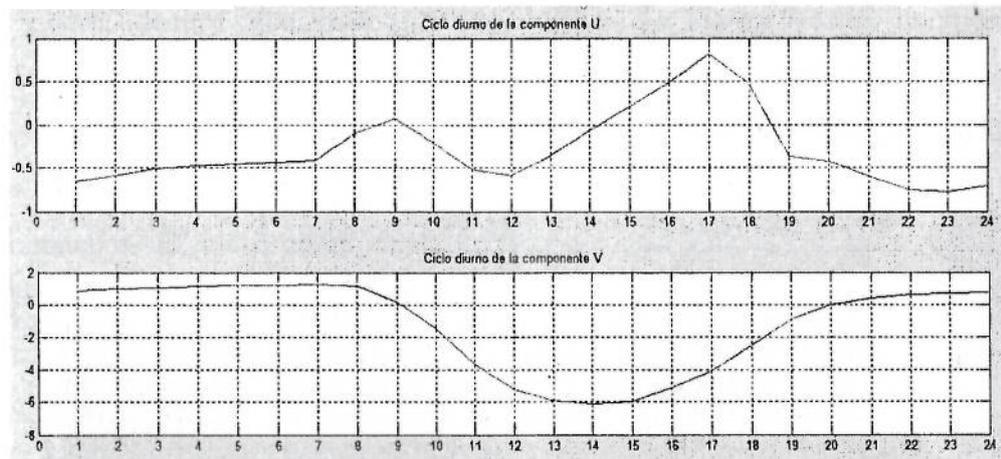


Figura 4: Ciclo diurno de la componente u y la componente v. (Eje y en m/s y eje x en horas).

Figura 4, el ciclo diurno de la componente u se mantiene casi constante entre las horas 00:00 y 06:00 horas con una amplitud entre -0.6 a 0.4, se incrementa a partir de las 06:00 horas hasta alcanzar valores de 0.1 a las 09:00 horas, a partir de ahí decae hasta llegar a aproximadamente -0.6 a las 12:00

horas, y se incrementa hasta alcanzar un máximo entre 0.7 a 0.8 valores a las 17:00 horas. El ciclo diurno de la componente v se mantiene casi constante con valores entre 1 y 1.4 entre 00:00 a 07:00 horas, decae hasta llegar a un mínimo de amplitud de -6 a las 14:00

horas, y se incrementa hasta alcanzar valores cerca a 1.

- **Radiación;** al observar a primera vista la base de datos notamos que los valores son demasiado alto en algunos puntos lo cual nos lleva a verificar que la toma de datos de la radiación no es de la misma manera que de las
- **Ciclo Anual de la radiación** para poder observar mejor el comportamiento año a año. La Figura 5 muestra el comportamiento de todos los años desde el 2001 hasta el 2007 donde se observa que

demás variables, para medir la radiación se toma de manera acumulativa y empieza a partir de las 8 de la mañana y es por ello que a las 00 horas la radiación es alta, tomando esto en cuenta se tiene que restar el acumulado a cada hora, luego de este procedimiento recién se tendrá los valores verdaderos de radiación.

el ciclo anual no es muy claro lo que podemos extraer es que el año 2004 ocurrió algún fenómeno que hizo que la radiación fuera mas débil y la mas intensa fue el 2007.

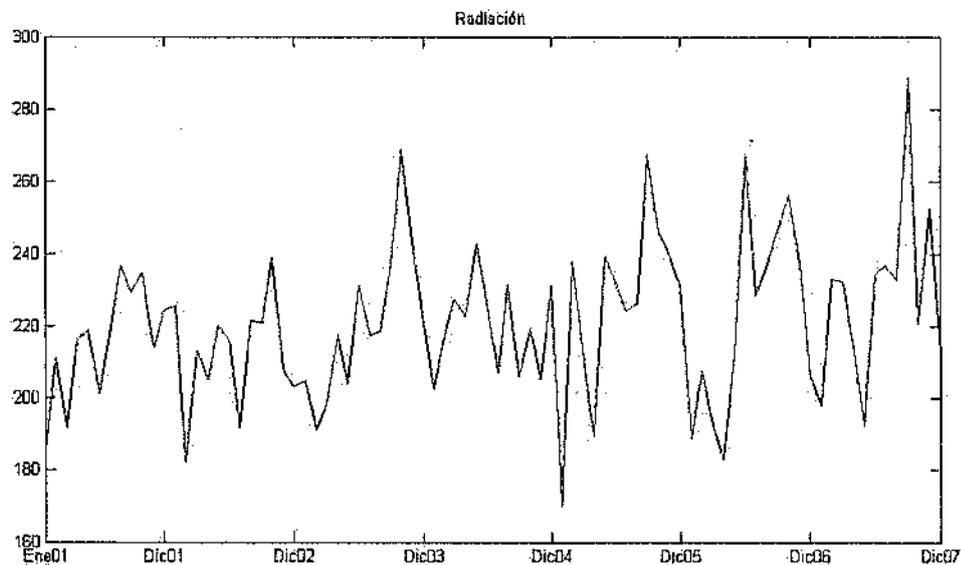


Figura 5: Muestra el comportamiento año a año de la radiación. (Eje x en meses y eje 'y' en watts/m²).

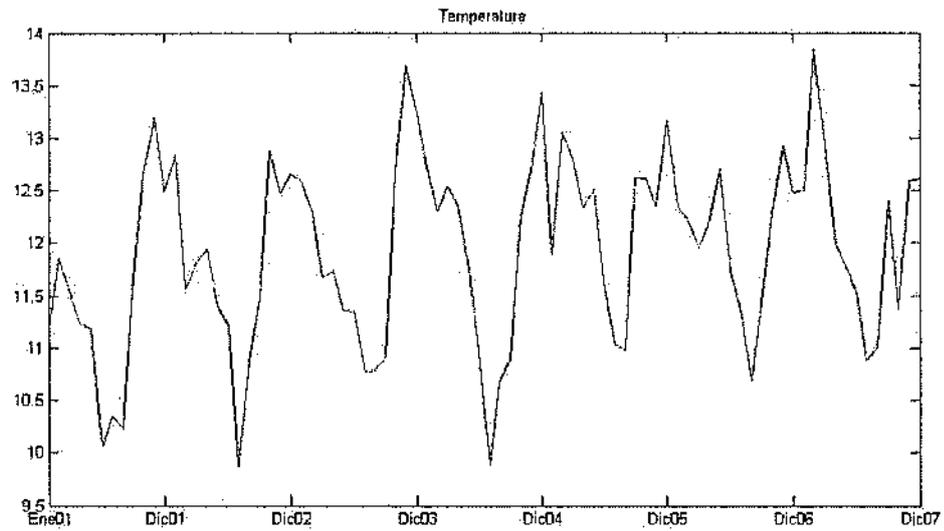


Figura 6: Comportamiento año a año de la temperatura. (Eje 'x' en meses y eje 'y' en grados centígrados).

La Temperatura presenta un ciclo anual. Figura 6 con algunas variaciones año a año como se ve en los primeros meses del año 2004 una caída muy abrupta en comparación con los demás años el motivo podría decirse que pudo ser algún fenómeno climatológico como heladas o brisas muy fuertes que hicieron que la temperatura descienda de esta manera. El ciclo anual de la

temperatura presentan valores altos y el año 2007 es el que presenta un valor mucho mayor a los demás eso nos quiere decir que en ese año fue uno de los años con mayor temperatura que los demás. La Figura 7 es la superposición del ciclo anual de cada año y la línea de color blanco es el promedio de todos los años.

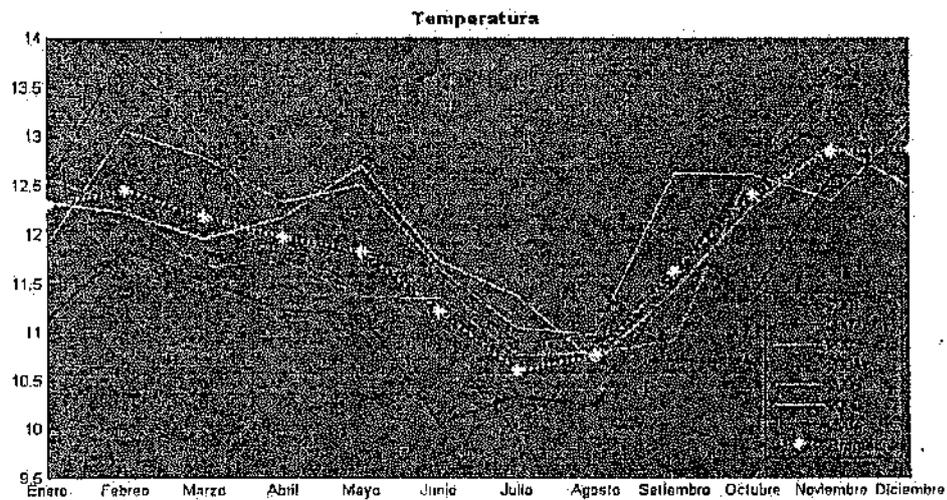


Figura 7: Superposición de los ciclos anuales de la temperatura. (Eje 'x' en meses y eje 'y' en grados centígrados).

Ciclo diurno de las variables meteorológicas

Se obtuvo el ciclo diurno de las variables temperatura, radiación, advección (la advección se obtuvo de la ecuación 4), magnitud de la velocidad, del periodo de 01 de enero del 2001 al 31 de diciembre del 2007, a diferencia de la gráfica anterior esta es una gráfica mucho más suave donde se aprecia más claramente que las variaciones se presentan a partir de las 08 hasta las 20 horas, esto se debe principalmente a la rotación de la tierra en el transcurso de las 24 horas donde la radiación solar se va incrementando lentamente, y debido a la relación que presentan las variables entre sí, por ejemplo la temperatura y la radiación están

relacionados entre sí y presentan un ciclo similar, la temperatura presenta una curva cóncava hacia abajo mucho más ancha que la radiación teniendo en cuenta que ambas curvas su pendiente empieza a partir de las 8 de la mañana, luego vemos que la radiación y la advección también presentan una curva cóncava pero hacia arriba con un desfase de aproximadamente 1 hora. Los vientos y la advección están muy bien relacionados y son dependientes entre sí pero en sentido opuesto y esto también podemos verlo en la figura donde la advección es una cóncava hacia arriba y es lo opuesto a la magnitud de la velocidad del viento y no presentan algún desfase importante entre ellas.

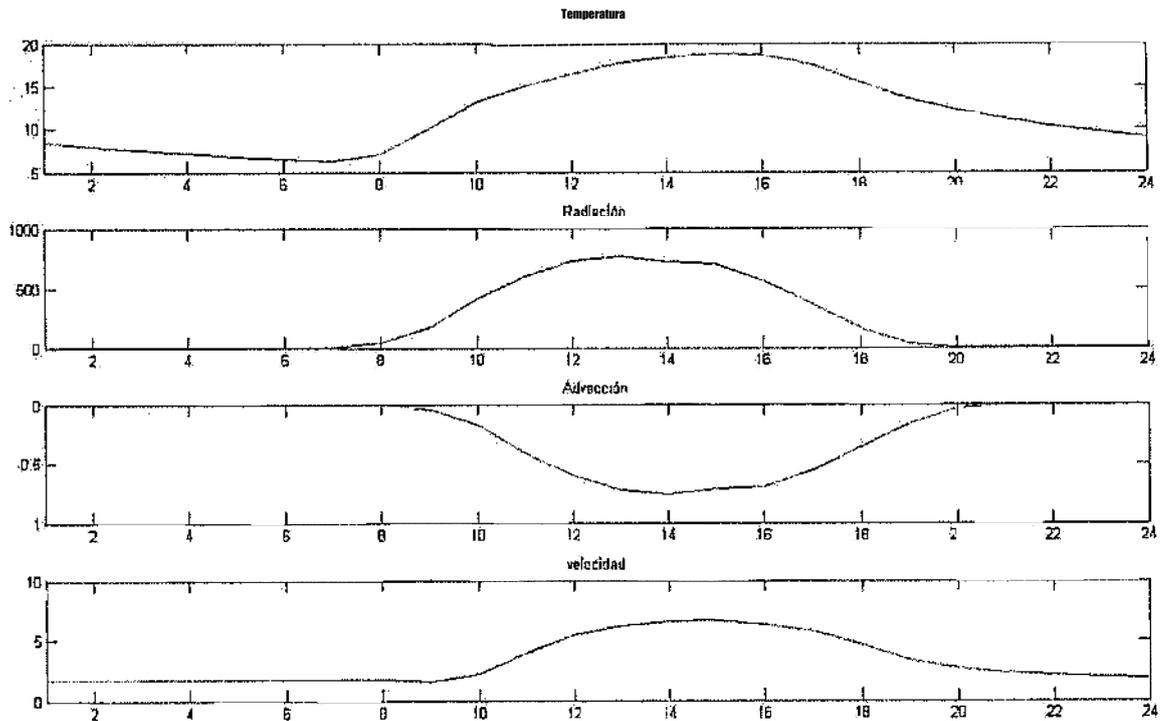


Figura 8: Gráfico de las variables temperatura, radiación, advección, y velocidad para poder observar mejor los desfases entre estas variables. La presión no se incluye en este gráfico. (Eje 'x' esta en horas y el eje 'y' para la temperatura en grados centígrados, para la radiación en watt/m², para la advección tiene unidades de temperatura entre unidad de tiempo y para la velocidad esta en m/s).

Espectro de potencia

Es una herramienta que nos da los ciclos o frecuencias de la variable que se desee analizar como se puede apreciar en la Figura 9 la cual muestra el espectro de potencia de la temperatura.

Como se aprecian los picos del espectro representa los ciclos presentes en esta variable que es temperatura. A la

derecha se encuentran las frecuencias altas y a la izquierda las frecuencias bajas. Para nuestro caso quitamos las frecuencias altas y nos quedamos con las frecuencias bajas.

Las frecuencias de 24 horas es más clara debido a que los datos son in situ, es por ello que se nota claramente los armónicos de 12, 8 y hasta de 6 horas.

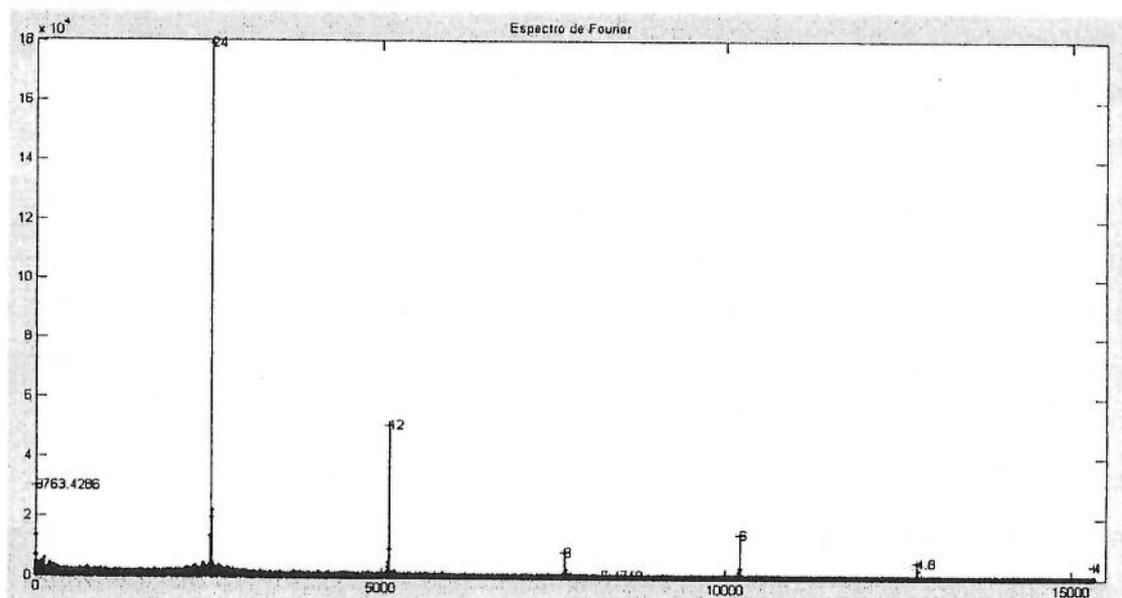


Figura 9: Espectro de potencia de la temperatura el cual muestra armónicos de 24, 12, 8, 6 y hasta 4 horas.

APLICACIÓN

El método que se utilizó en este trabajo fue estadístico, puede ser usado para analizar comportamientos de otras variables meteorológicas para así comprender los diferentes ciclos que presentan dentro de nuestro medio.

RESULTADOS

- El ciclo diurno de los vientos, en cada estación del año, son similares en la dirección, pero ligeramente diferentes en la intensidad.
- Entre las 00:00 a 09:00 horas los vientos se dirigen hacia el noroeste cambiando de dirección a partir de las 09:00 a 16:00 horas dirigiéndose hacia el sur oeste y a partir de las 20:00 a 24:00 horas regresa a la

dirección noroeste; teniendo en cuenta que los vientos de 09:00 a 16:00 horas son de mayor intensidad.

- Como se puede ver en la Figura del relieve de Huancavelica, la estación de Lircay se encuentra en la falda de una montaña. Es por ello, que la variación diurna del viento podría estar influenciada por las brisas de montaña, de valle.
- La advección tiene unidades de temperatura entre unidad de tiempo. Indica la variación térmica que experimenta un punto debida a que, por ejemplo si esta llegando viento que arrastra aire desde una región más fría, experimentaríamos un

enfriamiento y la advección de temperatura sería un número negativo que nos da exactamente cuantos °C por unidad de tiempo está bajando la temperatura.

- A partir de la ecuación termodinámica y despreciando el término de advección vertical de temperatura y procesos adiabáticos tenemos que la diferencia de temperatura sería igual a la suma de la advección horizontal de temperatura y flujos de calor tenemos la advección. Para nuestro caso el flujo que estamos considerando es el flujo incidente.
- Para poder observar ciclos anuales con el espectro de potencia se podría hacer un filtrado de las frecuencias altas y quedarnos solo con las frecuencias bajas.

AGRADECIMIENTOS

Mi especial agradecimiento al Dr. Pablo Lagos, por brindarme la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación y al Instituto

Geofísico del Perú. Igualmente en agradecimiento a Kobi Mosquera por su constante apoyo, enseñanzas y paciencia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Roland Stull, 'Meteorology for scientists and engineers'.
- [2] José P. Peixoto "Physics of Climate".
- [3] Judith A. Curry & Peter J. Webster, 'Thermodynamics of atmospheres and oceans'.
- [4] <http://mathsci.ucd.ie/met/msc/fezzi/k/Phys-Met>.
- [5] Oscar Pizarro A., Samuel Hormazabal F., "Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile".
- [6] Edward Aguado, James E. Burt "Understanding weather and climate".
- [7] Thomas D. Potter, "Handbook of weather, climate and water".

ESTUDIO SÍSMICO Y SÍSMOTECTÓNICO DE LA REGIÓN CENTRAL DEL PERÚ DESDE 1980 HASTA 2008.

OLIVIA COLLET y NELLY RODRIGUES
Escuela de Observatorio de Ciencias de la Tierra
Universidad Louis Pasteur de Strasbourg - Francia.
oliviacollet@hotmail.com
lagrima7azul@hotmail.com

Investigación dirigida por: Dr. Hernando Tavera.
Dirección de Sismología - CNDG

RESUMEN

El Perú forma parte del cinturón Circum Pacífico, que es una de las zonas con la mayor actividad sísmica del mundo. En efecto, este país se ubica en borde de placas, donde un fenómeno de subducción ocurre: la placa Nazca se introduce por debajo de la placa Sudamericana. Esta inmersión de la placa no es tan sencilla como parece porque se hace de dos maneras diferentes; se habla de una subducción normal y de otra subhorizontal. La transición entre estos dos tipos se realiza en la zona de estudio; es decir, la región central del Perú. También lo que resalta en este trabajo es la distribución espacial de los sismos en la fosa a lo largo de la línea de costa y en interior del continente, bajo la Cordillera Andina. Además, se nota que los sismos de gran magnitud afectan particularmente a los departamentos: el de Ancash, Ica y el extremo Occidental de Ucayali.

INTRODUCCION

Cuando se observa un Mapa de sismicidad mundial, es fácil ver que los sismos no se presentan con igual frecuencia en todas las regiones de la tierra, siendo mayor en número en los países que bordean el Océano Pacífico. El borde occidental de América del Sur se ve afectado por la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, donde la primera subduce bajo la segunda con una velocidad relativa de 8 a 10 cm/año (DeMets et al, 1980).

A través del tiempo, este proceso ha dado origen a gran parte de los movimientos sísmicos que ocurren en esta franja, como producto de la acumulación de energía dividida al movimiento de las placas.

En el presente estudio, se analiza la distribución espacial de la actividad sísmica entre las latitudes -9° y -15° desde 1980 hasta 2008. Todos los sismos estudiados tienen magnitudes superiores o iguales a 4 ML. En la Figura 1 se muestra la distribución espacial de estos sismos.

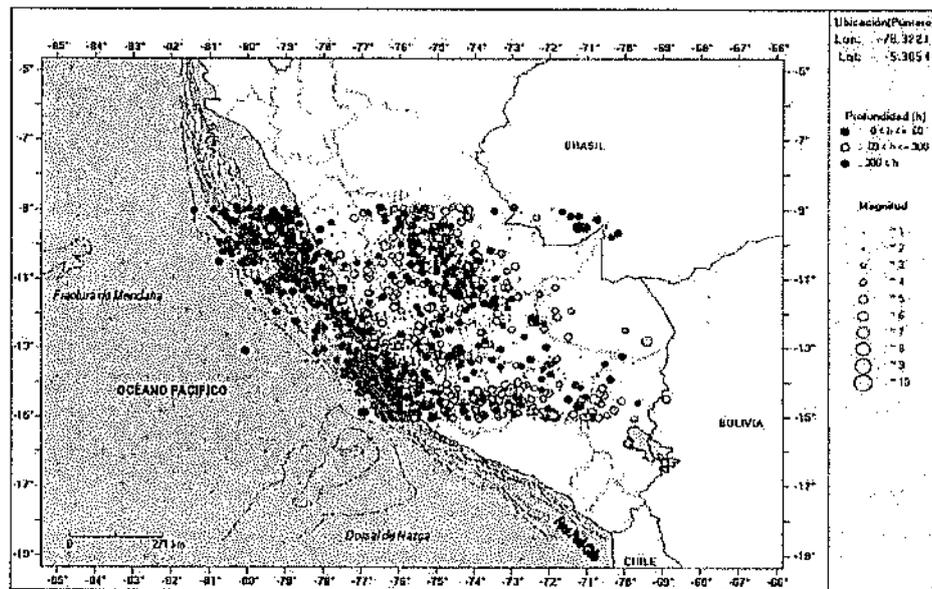


Figura 1: Distribución espacial de los sismos desde 1980 hasta 2008, de magnitud $\geq 4ML$, en la región central del Perú.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS SISMOS SEGÚN SU PROFUNDIDAD FOCAL

SISMOS CON FOCO SUPERFICIAL

Son considerados como sismos de foco superficial, los que se localizan a menos

de 60 km de profundidad y de acuerdo a esta clasificación, se pueden definir dos principales fuentes sismogénicas A1 y A2: los sismos localizados entre la fosa y la línea de costa, y los localizados en el interior del continente, respectivamente.

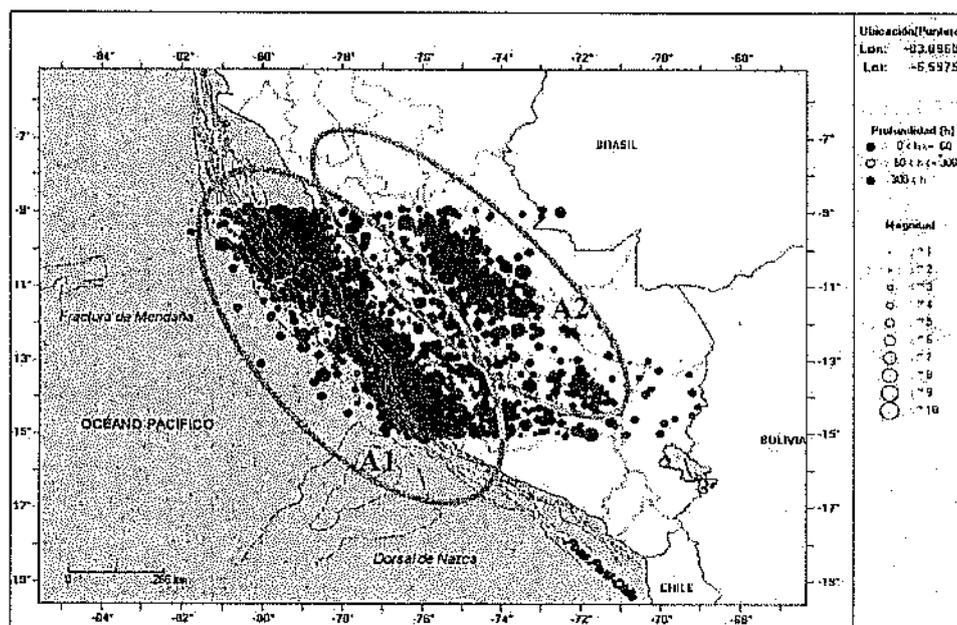


Figura 2: Distribución espacial de los sismos con foco superficial ($h \leq 60km$).

Grupo A1

Este grupo ubicado entre la fosa y la línea de costa puede ser explicado por la fricción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, tal como se muestra en la Figura 3. También se nota una importante concentración de sismos frente al departamento de Ancash ($-9^{\circ}, -11^{\circ}$) que podría ser debido a la fractura de Mendaña y en la región de

Ica ($-13^{\circ}, -15^{\circ}$), que se puede haber explicado con la presencia de la dorsal de Nazca.

Grupo A2

Los sismos localizados en el interior del continente tienen su origen en las deformaciones corticales cuya expresión en superficie son las trazas de fallas que se muestran en la Figura 4. En la Figura 3, estas deformaciones se sitúan en las zonas de fracturas.

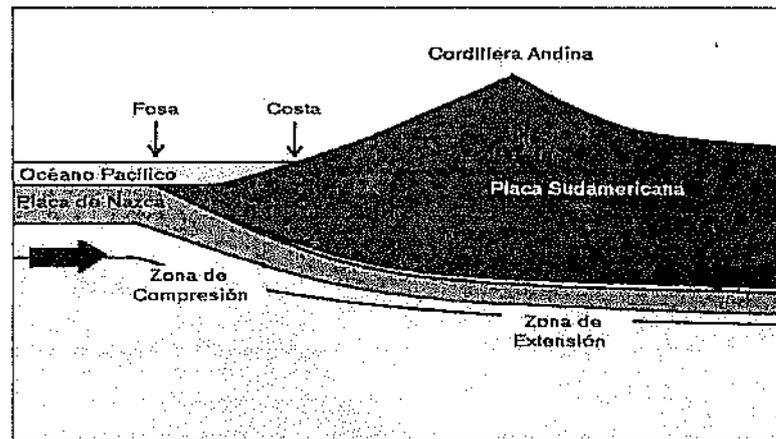


Figura 3: Esquema de la subducción en la región central del Perú.

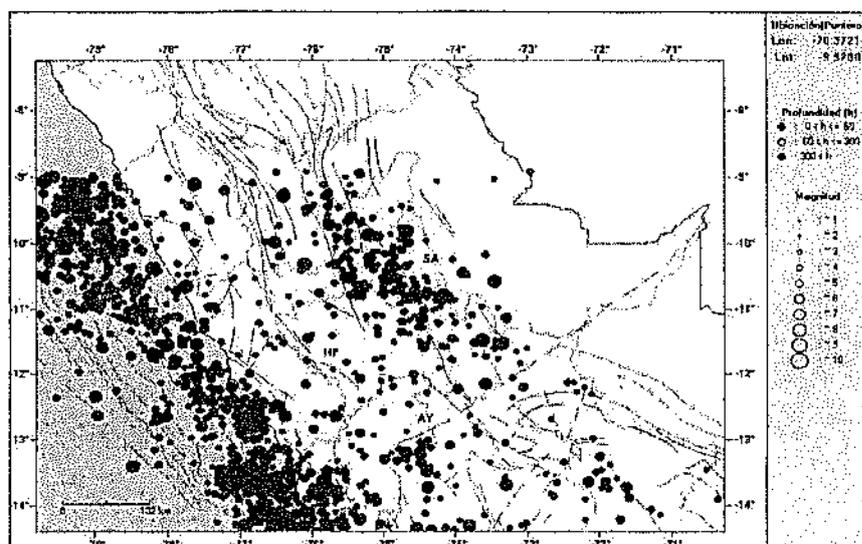


Figura 4: Puesta de evidencia del vínculo entre los sismos superficiales y las fallas: Ayacucho (AY), Huaqapallam (HP) y Satipo-Ancash (SA).

SISMOS CON FOCO INTERMEDIO

Los sismos con foco intermedio son los que ocurren entre 61 y 300 km de profundidad. De esta manera, se puede distinguir tres agrupaciones de sismicidad, G1, G2 y G3 y tal como se ve en la Figura 5. Estos sismos se encuentran los cuales se ubican principalmente en la línea de costa, en el interior del continente en la zona Subandina y también en el extremo Sur de la zona de estudio.

Grupo G1

Se nota que estos sismos son más dispersos frente al departamento de Ancash sobre una distancia de 120 km. Al contrario, al sur de este grupo, los

sismos están más concentrados entre las latitudes -11° y -14° .

Grupo G2

Este grupo con orientación NO-SE se encuentra concentrado en la zona Subandina, entre las latitudes -9° y -12° y pueden ser explicados por la deformación interna de la placa de Nazca.

Grupo G3

Ubicado en la región Sur de la zona de estudio, y se extiende sobre el Altiplano peruano-boliviano y quizás se ve afectado por una parte, por la dorsal de Nazca y por otra parte, por la deflexión de Abancay. Esta deflexión es un cambio de dirección de los principales relieves que pone la Cordillera en una dirección EO sobre 200km.

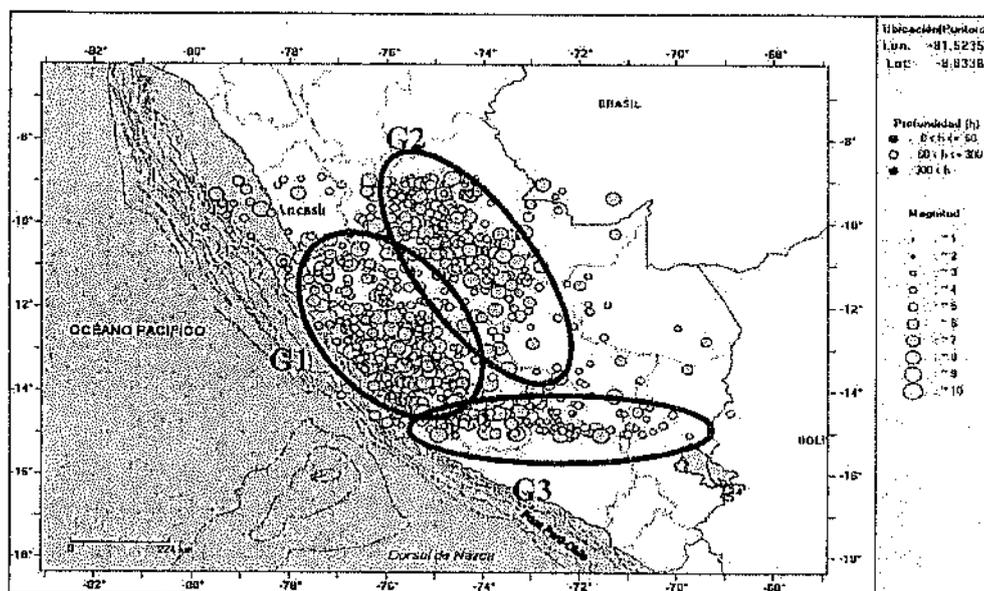


Figura 5: Distribución espacial de los sismos con foco intermedio ($61 \leq h \leq 300$ km).

SISMOS CON FOCO PROFUNDO

Son considerados como sismos de foco profundo, los que se localizan a profundidades superiores a 301 km. En la Figura 6, se puede observar que estos sismos, separados en dos grupos P1 y P2, menos numerosos que los otros tipos de sismos, y en general, se ubican en las fronteras de Perú, Brasil y Bolivia. En ambas regiones definidas por los grupos, tendrían su origen en la ruptura de la corteza oceánica a tales

niveles de profundidad. En la parte de la corteza que se flota en el interior del manto, hay fuerzas generadas por la gravedad y fuerzas provocadas por el medio que trata de expulsar a esta parte. Estas fuerzas antagónicas provocan estos sismos profundos. Los sismos del Grupo P1 son parte de la placa que subduce subhorizontalmente (Figura 7a), mientras que, los grupo P2 son producidas por placa que subduce normalmente (Figura 7b).

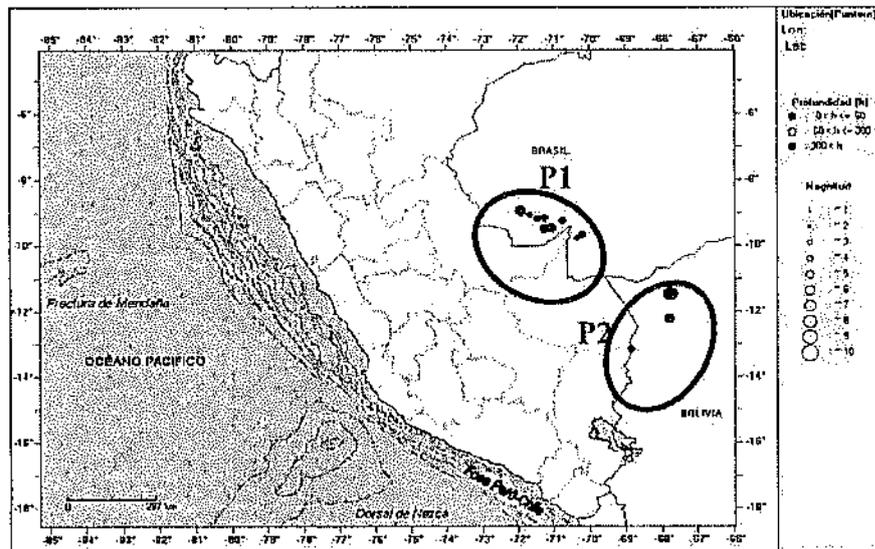


Figura 6: Distribución espacial de los sismos con foco profundo ($h \geq 301$ km).

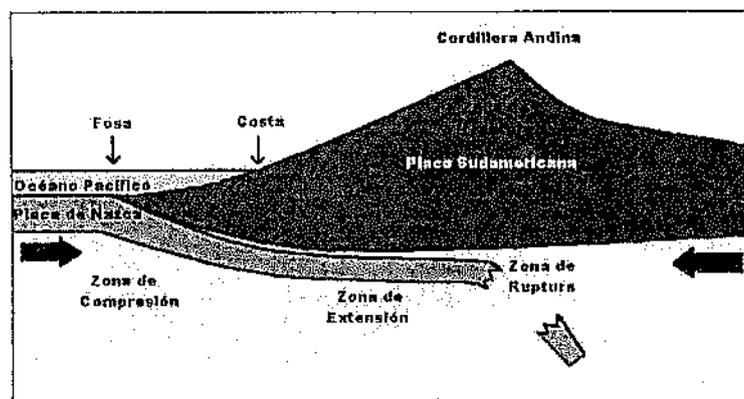


Figura 7a: Esquema de subducción mostrando la ruptura de la corteza oceánica en profundidad en la región central de Perú.

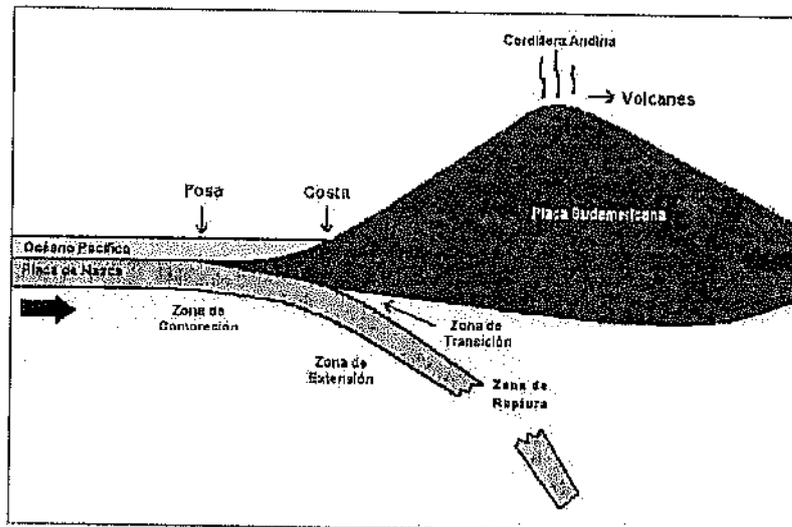


Figura 7b: Esquema de subducción mostrando la ruptura de la corteza oceánica en profundidad en la región Sur de Perú.

PERFILES SISMICOS Y PRESENTACIÓN DE LOS DOS TIPOS DE SUBDUCCIÓN

El Procesos de Subducción

La fuerte sismicidad presente en la zona de estudio; es decir, la región central del Perú, es causada principalmente por la subducción de la placa de Nazca (placa oceánica) bajo la Sudamericana (placa continental) que se produce a una velocidad de 8-10 cm/año. Esta velocidad hace de Perú, una de las regiones con mayor actividad sísmica en el mundo por ser parte del denominado Cinturón Circum Pacifico donde se libera más de 85% de la energía sísmica al nivel mundial.

Los movimientos causados por la subducción generan fuerzas que fracturan la corteza cuando son demasiado fuertes.

Dos tipos de subducción

En los dos perfiles, se puede notar que la profundidad de los sismos aumenta de Oeste a Este. Esto muestra como la placa de Nazca se sumerge debajo de la Sudamericana. Al hacer el perfil del extremo Norte y el del extremo Sur (Figura 8), se distingue dos tipos de subducción, los cuales pueden ser observados en las Figuras 9b y 10b. Esta transición se hace a la latitud -14° (Bernal, 1999).

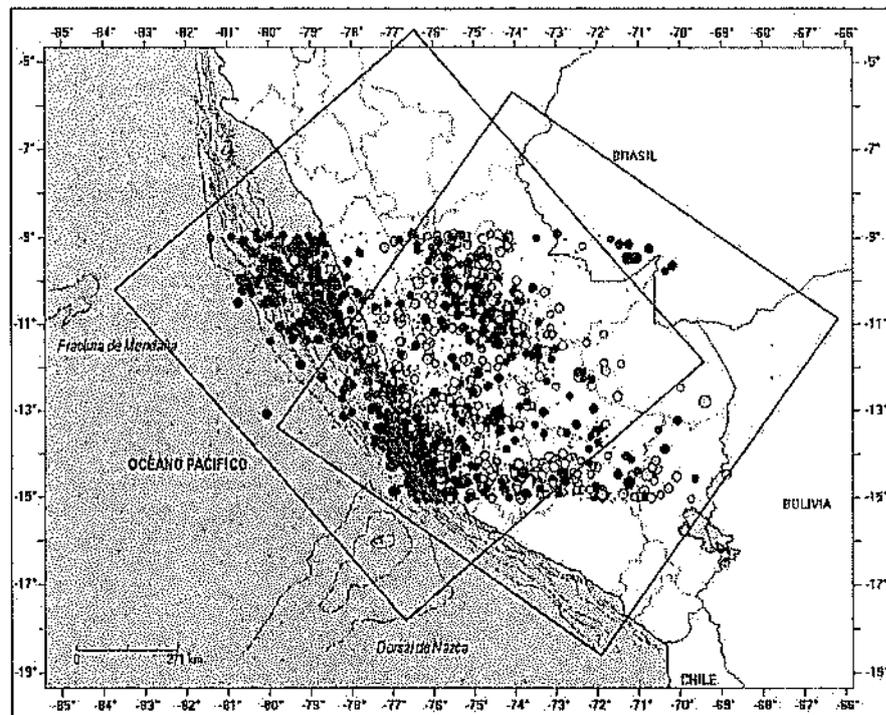


Figura 8: Mapa de sismicidad con secciones elaboradas para hacer los perfiles perpendiculares a la línea de fosa.

Para el extremo Norte, la subducción se hace con un ángulo inferior a lo observado en el extremo Sur. En efecto, al calcular los ángulos de la subducción en el extremo Norte y en el extremo Sur, se ve que el ángulo de la primera es $i=23^\circ$, mientras que el de la segunda es $i'=33^\circ$. Además, se nota que la placa de Nazca en la primera región subduce de manera casi horizontal a partir de una profundidad de más o menos 120 km. La diferencia entre estos dos tipos de subducción puede ser explicada por un cambio en estructura de la corteza. En efecto, el peso de los volcanes de la región Sur hace que la placa oceánica es más sometida a las fuerzas de gravedad, y por eso se sumerge más en

profundidad. En cambio, en la región Norte, la ausencia de volcanes, y entonces de sobrepeso, explicaría la subducción subhorizontal.

Varios autores realizaron trabajos y estudios para explicar la transición entre los dos tipos de subducción. Dos principales hipótesis han resaltado de estos trabajos. La primera, postulada por Barazangi y Isacks (1976-1979) supone la existencia de una ruptura en la litosfera subducente que separaría a estas dos regiones. La segunda, postulada por Hasegawa y Sacks (1981), habla del hecho que la forma de la placa subducente es continua y que el cambio en el modo de subducción se produce con una contorsión de la placa.

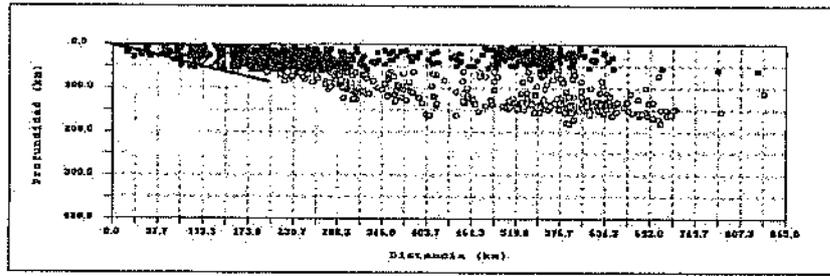


Figura 9a: Perfil del extremo Norte de la zona de estudio.

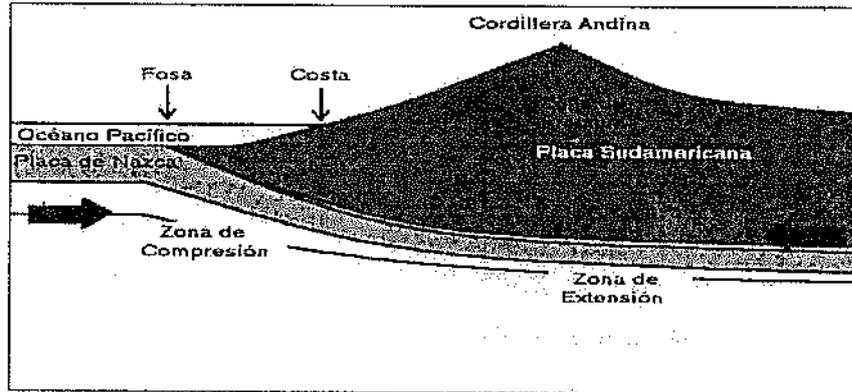


Figura 9b: Esquema de la subducción subhorizontal.

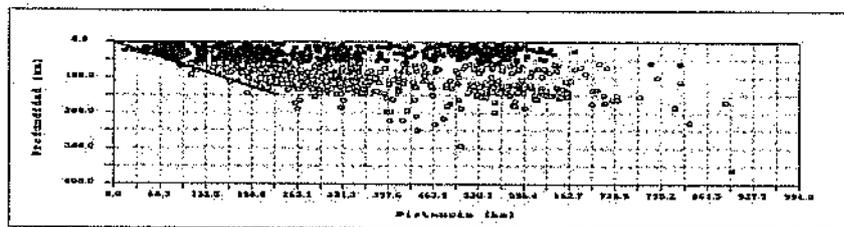


Figura 10a: Perfil del extremo Sur de la zona de estudio.

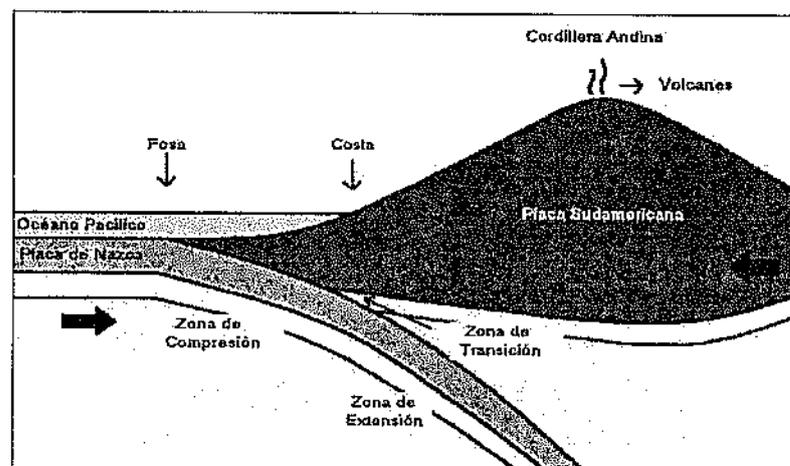


Figura 10b: Esquema de la subducción normal.

Perfiles paralelos a la línea de fosa

Estas secciones han sido elaboradas paralelas a la línea de fosa Perú-Chile, y perpendiculares a la dirección de convergencia de las placas. Los sismos estudiados se encuentran entre las

latitudes -9° y -15° . Se han obtenido 5 perfiles trazados de Oeste a Este según la Figura 11. Cada perfil tiene un ancho de 175 km, excluido el último, y un largo de 1050 km.

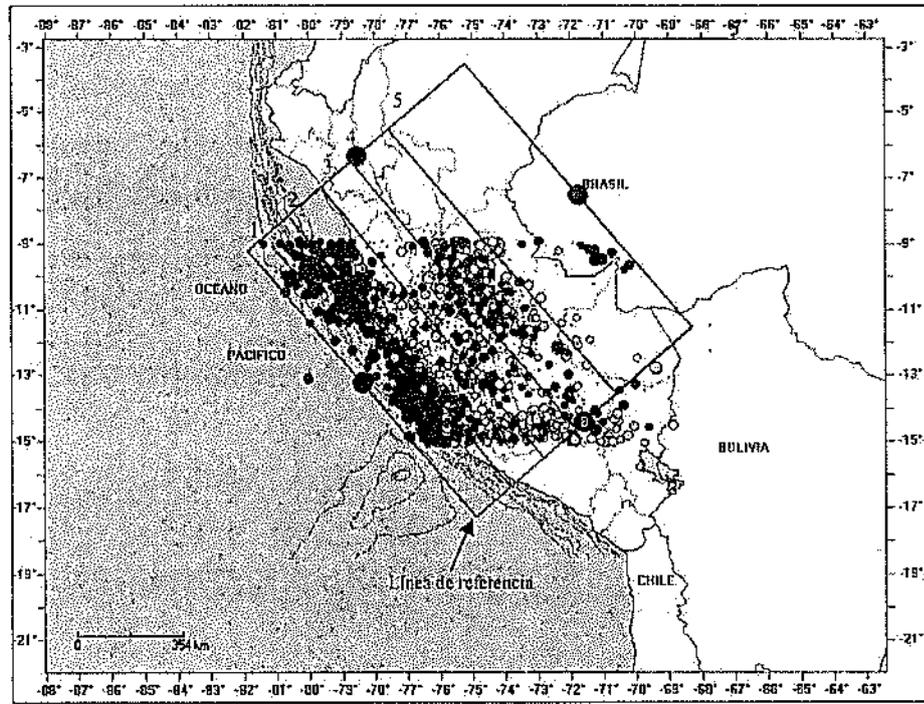


Figura 11: Mapa de sismicidad con secciones elaboradas para hacer los perfiles paralelos a la línea de fosa.

Perfiles 1 y 2

Estos dos perfiles se localizan cerca de la línea de fosa. En el primer perfil, la mayoría de los sismos se ubican a menos de 60 km de profundidad y se concentran a una distancia de 200 y 1200 km, desde la línea de referencia. En el perfil 2, los sismos son más numerosos, alcanzan profundidades de 150 km y siguen la misma alineación que los del primer perfil. De manera general, se observa que más la distancia, desde la línea de fosa, más numerosos son los sismos intermedios.

Perfiles 3 y 4

Los sismos de estos perfiles tienen sus focos en el interior del continente y se nota que se tornan más dispersos que los sismos precedentes. Comparando estos perfiles con los 1 y 2, se observa que los sismos superficiales son menos numerosos pero hay un aumento de los sismos intermedios que alcanzan profundidades de 200 km. En el perfil 3, se nota una concentración de sismos al nivel de la línea de referencia hasta una distancia de 200 km de ella, que puede ser explicada por la presencia de la

deflexión de Abancay. En el perfil 4, los sismos aparecen concentrados desde una distancia de 300km de la línea de referencia y esta concentración puede ser debida a la deformación interna de la placa de Nazca debajo de la Cordillera Andina.

Perfil 5

La sismicidad en este perfil es muy difusa, sin ningún patrón de

distribución. Se observa casi la desaparición de los sismos superficiales y también una importante de en el número de sismos intermedios. Por otra parte, se destaca la presencia de actividad sísmica de carácter profundo entre 350 y 650 km. Estos sismos profundos se ubican a las fronteras con Brazil y Bolivia y pueden ser explicados por la ruptura en profundidad de la corteza oceánica.

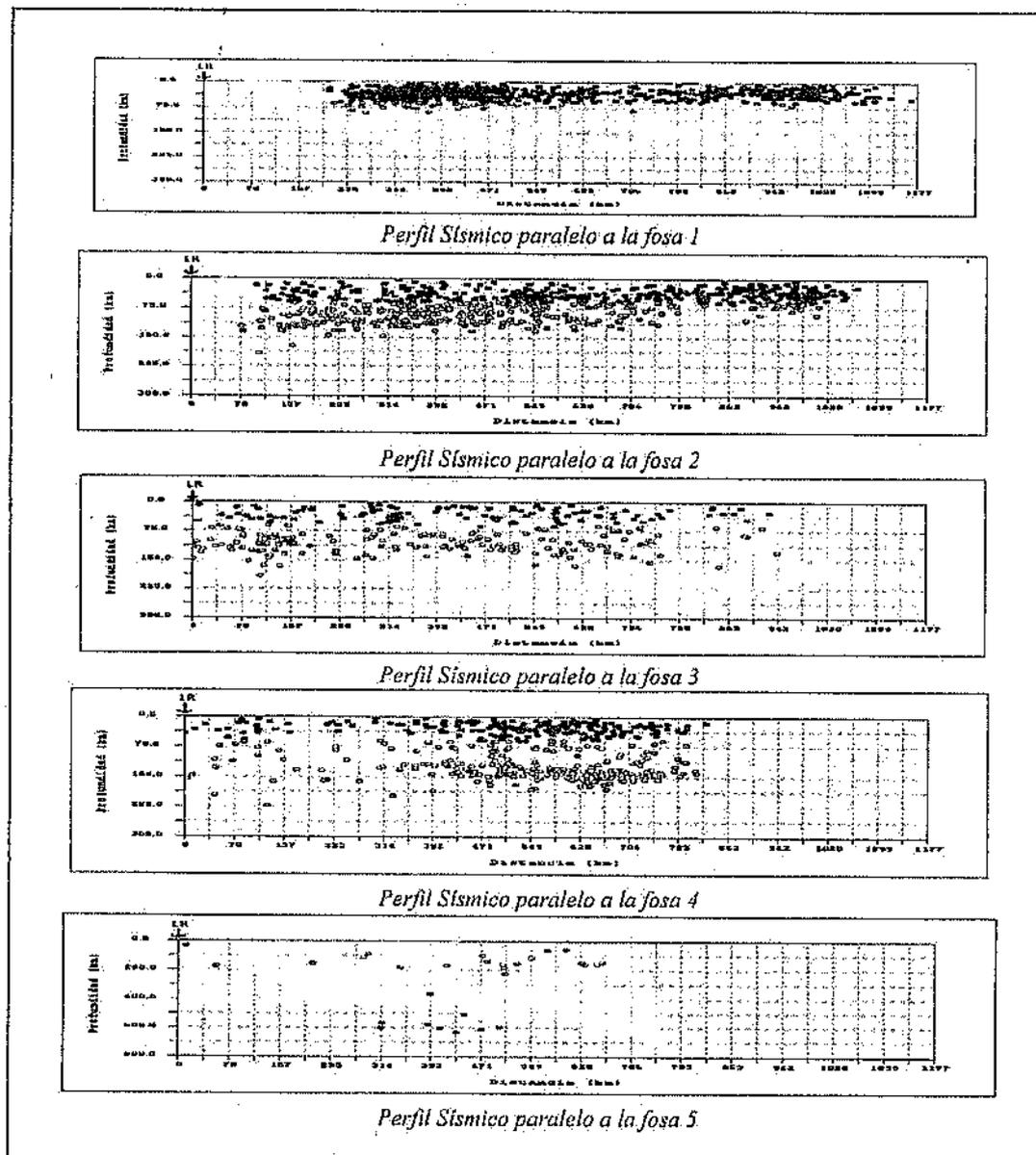


Figura 12: Cortes verticales de sismicidad en dirección paralela a la línea de fosa

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS SISMOS DE GRAN MAGNITUD

La Figura 13 muestra la distribución espacial de los sismos desde originados entre 1980 y 2008, cuyas magnitudes van de 5.0 hasta 6.9 (ML). Se puede distinguir tres zonas, Z1, Z2 y Z3, donde los sismos están concentrados. Cada zona de actividad sísmica tiene su relación con un rasgo tectónico.

Zona Z1

Esta zona se ubica frente al departamento de Ancash entre las latitudes -9° y -12° . También se puede observar la presencia de la fractura de Mendaña frente a este departamento, orientada en dirección NE – SO y perpendicular a la línea de la fosa peruano-chilena que se sitúa a 180 km de ella. Esta fractura corresponde a una discontinuidad de la corteza oceánica. El hecho que esta fractura está llegando puede explicar la importante

importante actividad sísmica en esta región.

Zona Z2

Esta zona se ubica frente al departamento de Ica entre las latitudes -13° y -15° . Frente a este departamento, se sitúa la dorsal de Nazca orientada en dirección NE-SO y también perpendicular a la línea de fosa que se sitúa a 50 km de ella. La dorsal de Nazca es una cordillera oceánica y su llegada puede explicar el reagrupamiento de sismos en esta región.

Zona Z3

Esta zona se sitúa en el interior del continente paralelamente a la Cordillera Andina entre las latitudes -9° y -12° . El agrupamiento de estos sismos puede ser explicado por el levantamiento de la Cordillera, que forma parte del proceso de subducción, y por la subsidencia del escudo brasileño bajo la cordillera (Bernal y Tavera, 2002).

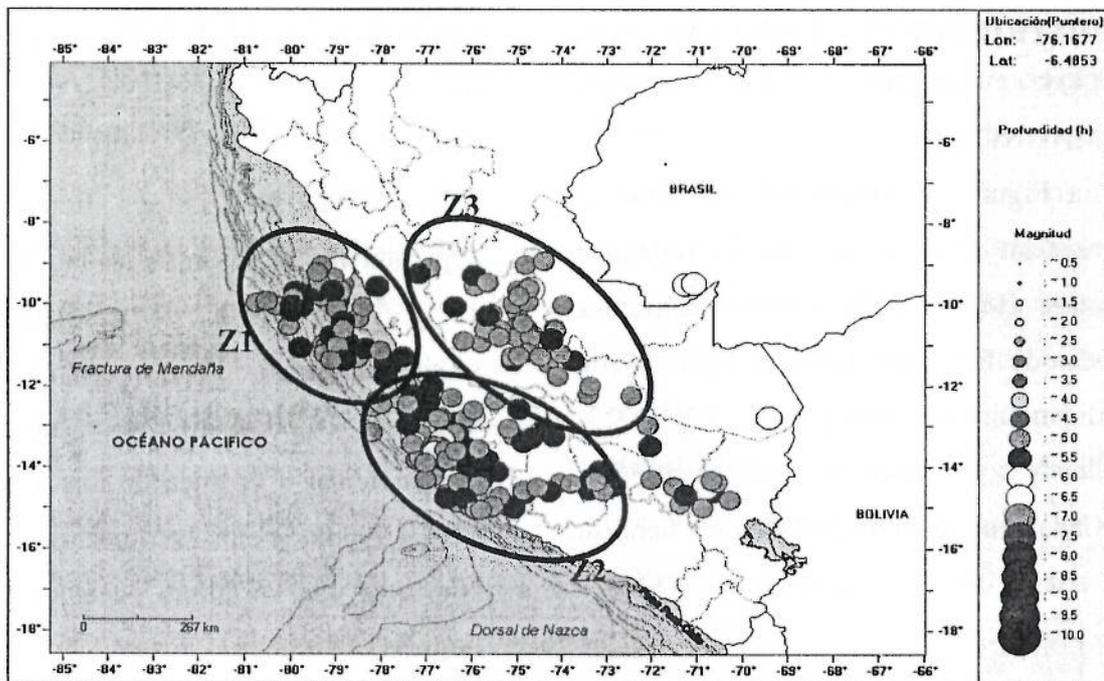


Figura 13: Distribución espacial de los sismos de magnitudes entre 5.0 y 6.9 (ML).

Conclusiones

En la región central del Perú, la actividad sísmica está asociada mayormente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Esta sismicidad se clasifica en función de la profundidad de los focos de los sismos que pueden ser superficiales, intermedios o profundos. La sismicidad presente en el interior del continente está relacionada a la deformación cortical, que aparece bajo la forma de fallas, presente a lo largo de la Cordillera Andina.

En Perú se pueden observar, gracias a los perfiles sísmicos, dos tipos de subducción: la subducción normal y la subducción subhorizontal. La transición entre estos dos tipos de subducción se presenta en la latitud -14° , se parará lo

que sobresale del presente estudio, en cuanto a los sismos de gran magnitud, es que las regiones de Ancash, Ica y la zona subandina de Ucayali son particularmente sensibles porque corresponden a zonas de rasgos tectónicos: es decir, la Dorsal de Nazca, la fractura de Mendaña y la deformación cortical en el continente.

Sin embargo, hay que tener cuidado al estudiar la distribución espacial de los sismos, y sobre todo cuando se trabaja con datos antihistóricos, porque la red sísmica no es y no era homogénea en todo el país. Por ejemplo, en la Figura 3, entre las latitudes -12.5° y -13° , hay una zona importante de fallas sin sismos. Esto puede ser explicado por la ausencia de estaciones sísmicas en ciertas partes del país.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al Dr. Hernando Tavera que nos ha ofrecido la posibilidad de entender y analizar fenómenos naturales tan frecuentes en este país sísmologicamente y culturalmente diferente del nuestro. Asimismo, a Simeón Rodríguez por su paciencia, sus numerosas explicaciones y su apoyo constante en todas las dudas que se presentaron durante la práctica. Finalmente, a todo el personal del IGP por sus sonrisas y por su amabilidad.

Bibliografía

- Bernal, I y Tavera, H (2002). Geodinámica, Sismicidad y Energía sísmica en Perú. Monografía, Dirección de Sismología, Instituto Geofísico del Perú.
- Barazangui, M. y Isacks, B. (1979). Subduction of the Nazca plate beneath Perú: evidence from the spatial distribution of earthquakes: *Geoph. Jour. Roy. Astr. Soc.*, v.57, 537-555.
- Hasegawa, A. y Sacks, S. (1981). Subduction of Nazca plate beneath Perú as determined by seismic observations. *J. Geophys. Res.* 86,4971-4981.
- DeMets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). Current plate motion. *Geophysical Journal International*, V101, 425-478.
- Bernal, I.(1999). Características de la sismicidad en la región Sur de Perú. Informe de Practicas Pre-profesionales, Dirección de Sismología, Instituto Geofísico del Perú.

**COMPENDIO DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓ
REALIZADOS POR ESTUDIANTES EN EL IGP**

Volumen 1: Editado en Enero del año 2000

Volumen 2: Editado en Enero del año 2001

Volumen 3: Editado en Enero del año 2002

Volumen 4: Editado en Enero del año 2003

Volumen 5: Editado en Enero del año 2004

Volumen 6: Editado en Enero del año 2005

Volumen 7: Editado en Enero del año 2006

Volumen 8: Editado en Enero del año 2007

Volumen 9: Editado en Enero del año 2008

Todos los trabajos contenidos en cada volumen del compendio se encuentran disponibles en la siguiente dirección electrónica:

<http://www.igp.gob.pe>
Ingresar a Biblioteca