



PERÚ

Ministerio del Ambiente

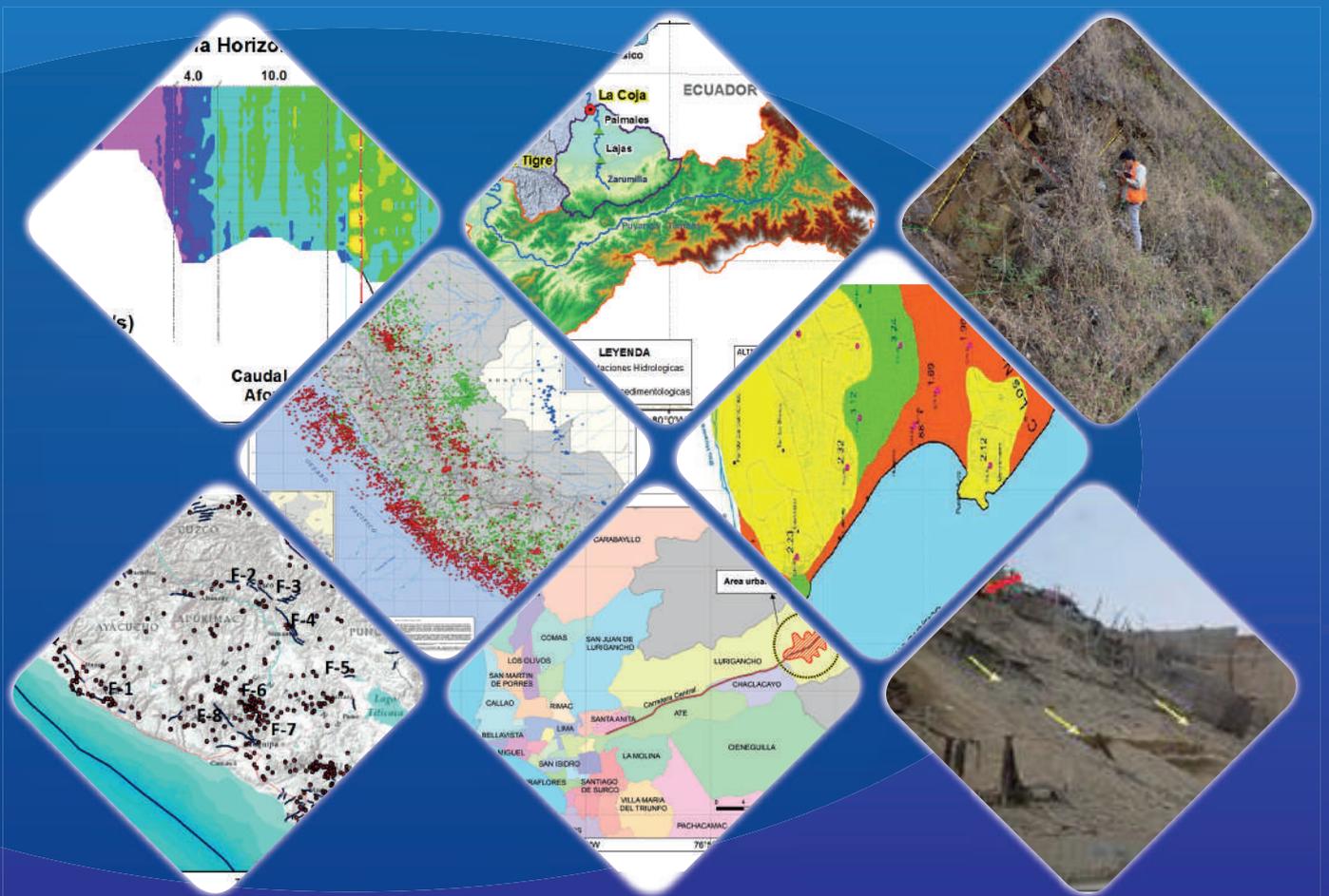
Instituto Geofísico del Perú



Compendio de investigaciones en Geofísica

Trabajos de Investigación realizados por estudiantes

Durante el año 2015



Título: Compendio de investigaciones en Geofísica
Título clave abreviado: Compend. investig Geof.
Volumen: 16
ISSN: 2079-696X

Lima, diciembre del 2015

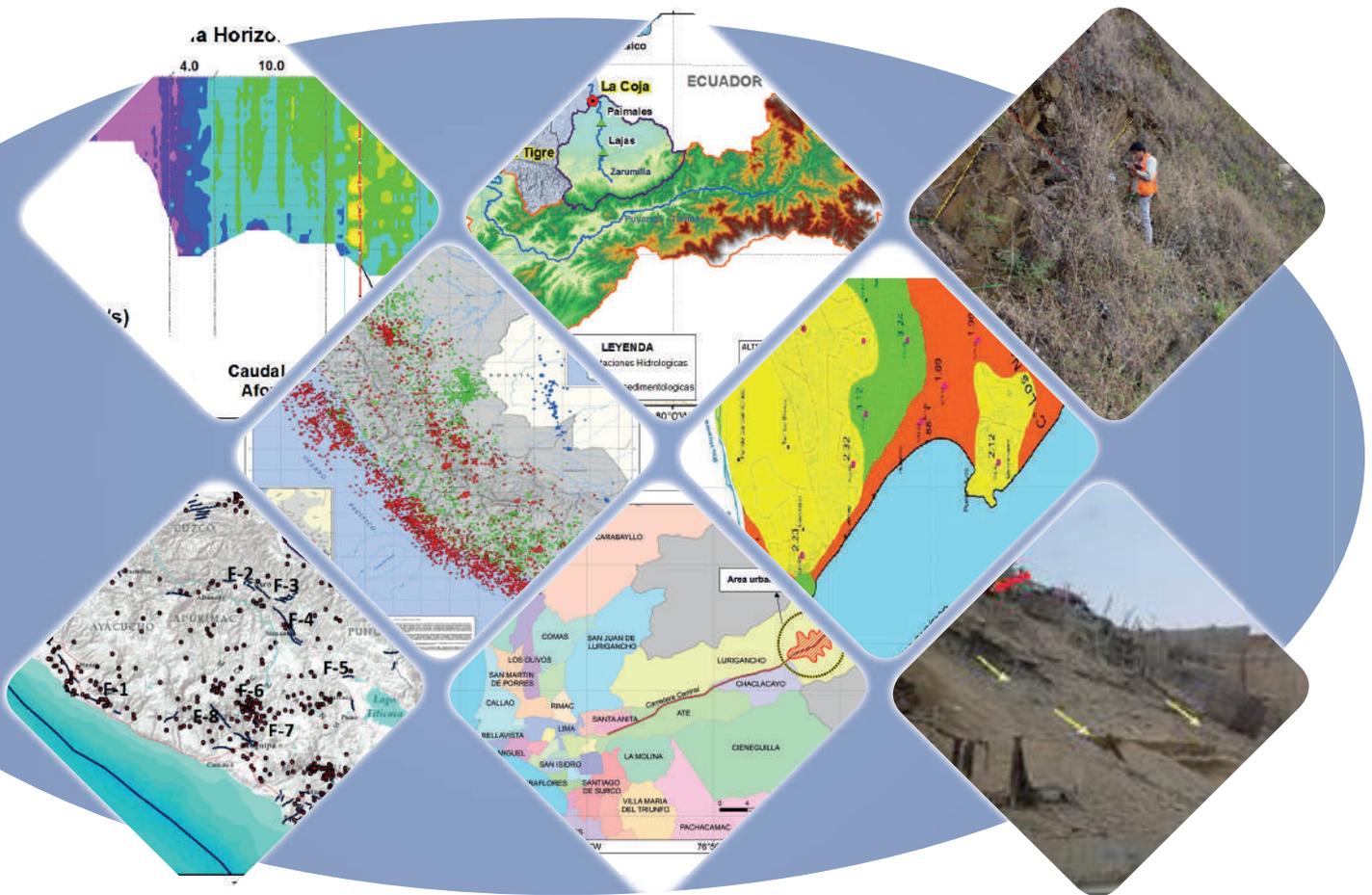
Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú Nro. 2015-19259

Editores: Hernando Tavera, Ken Takahashi y Marco Milla
Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo, IV Etapa, Ate Vitarte

Impreso por Empresa: Imprenta Editora Gráfica Real SAC.
Jr. Independencia 953 – Trujillo – La Libertad
Teléfono (44) 25-3324

Compendio de investigaciones en Geofísica

Trabajos de investigación realizados por
estudiantes durante el año 2015



índice

Prólogo.....	6
De los editores.....	7
CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA.....	8.
<i>CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN LA CIUDAD DE HUACHO SEGÚN LA NORMA E-030 Y VULNERABILIDAD DE ELEMENTOS EXPUESTOS</i> <i>Soil classification in Huacho city according to E-030 standard and exposed elements vulnerability</i> <i>Vilma Nina Figueroa.....</i>	<i>9.</i>
<i>ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO Y LLUVIAS INTENSAS EN EL ÁREA URBANA DE CHOSICA</i> <i>Seismic risk and heavy rainfall scenarios in the urban area of Chosica City</i> <i>Cuya Crispin Angel Ademir</i>	<i>15.</i>
<i>CARACTERÍSTICAS ESPACIO - TIEMPO DE LA SISMICIDAD INTERMEDIA EN EL NIDO DE PUCALLPA</i> <i>Features space - Time in the middle seismicity nest Pucallpa</i> <i>Estela Centeno Moncada</i>	<i>21.</i>
<i>EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL DISTRITO DE SANTA MARÍA DEL MAR SEGÚN LA NORMA E030</i> <i>Seismic risk assessment in the urban area of Santa María del Mar application of the E030 Rule</i> <i>Ricardo Félix Pinedo</i>	<i>26.</i>
<i>ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN SÍSMICA SUPERFICIAL EN LA REGIÓN SUR DEL PERÚ</i> <i>Analysis of the shallow seismic deformation in southern region of Peru</i> <i>Ines Apaza Medina</i>	<i>31.</i>
<i>GEOLOGÍA - GEODINÁMICA DE LOS DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES CON BASAMENTO ROCOSO METAMÓRFICO EN LA LOCALIDAD DE KELLCAYBAMBA DISTRITO DE OCABAMBA, PROVINCIA DE LA CONVENCION, REGIÓN CUSCO</i> <i>Geology - Geodynamics of the rotational slides with metamorphic bedrock in the town of Kelcaybamba, province of La Convencion, Cusco region</i> <i>Roy Arone Padilla</i>	<i>35.</i>
CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA HIDRÓSFERA.....	44.
<i>PATRONES DE CIRCULACIÓN INTRAESTACIONALES DE GRAN ESCALA Y SU ASOCIACIÓN CON LLUVIAS EN LA CUENCA AMAZÓNICA</i> <i>Intraseasonal large scale circulation patterns and their relationship with rainfall in the amazon BASIN</i> <i>Laura Paccini Peña</i>	<i>45.</i>
<i>EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE EL NIÑO EXTRAORDINARIO DENTRO DE LOS PRONÓSTICOS RETROSPECTIVOS DEL MODELO NCEP CFSv2 Y COMPARACIÓN CON PRONÓSTICOS DE 2015-2016</i> <i>Assesment of the mechanisms in the hindcasts of exteme El Niño by the NCEP CFSv2 Model</i> <i>Luis Bryam Orihuela Pito.....</i>	<i>51.</i>
<i>ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y FONDO Y COMPARACIÓN CON FÓRMULAS EMPÍRICAS EN LOS RÍOS PUYANGO-TUMBES Y ZARUMILLA</i> <i>Experimental study of suspended sediment transport and bed load and comparison with empirical formulas in Puyango-Tumbes and Zarumilla rivers</i> <i>Janet Brígida Quincho Olazábal</i>	<i>57.</i>

CIENCIAS DE LA ALTA ATMÓSFERA.....63.

DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN Y SUPERVISIÓN PARA EL ENCENDIDO DEL TRANSMISOR DEL RADAR SOUSY EN EL RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA
Design of the automation and supervision system for the start up of the SOUSY's radar transmitter at Jicamarca Radio Observatory
Jorge André Florentino Collado64.

ESTUDIO DE TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA IONÓSFERA ECUATORIAL EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS USANDO DATOS DE LA IONOSONDA DEL ROJ
A study of the equatorial ionosphere behavior tendency from last twenty years using data from the JRO ionoisonde
Anthony Mard Calatayud Cadenillas69.

AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL LOCAL DE LA ETAPA PA DEL TRANSMISOR DEL ROJ
Automation of stage PA local control of the Transmitter ROJ
Joan Espinoza Alvarado 74.

IMPLEMENTACIÓN DE LVDS EN UN FPGA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS (JARS 2.1)
LVDS Implementation in a FPGA for data acquisition (JARS 2.1)80.
Luis Armando Sanchez Tapia

DIGITALIZACIÓN DE HISTORIAL DE IMÁGENES DE MAGNETÓGRAFO
Magnetograph image record digitalization
Jorge Quesada Pacora86.

DISCRIMINACIÓN DE CABEZA Y COLA EN DATOS DE METEOROS DE ALTA POTENCIA OBTENIDOS CON EL RADAR DE JICAMARCA
Head and trail discrimination in high power meteor data obtained with Jicamarca radar
Héctor Francisco Chahuara Silva91.

Prólogo

Desde hace unos 5000 años cuando los sumerios empezaron a compartir sus conocimientos en tablillas de arcilla, la comunicación ha jugado un rol fundamental en el desarrollo de las civilizaciones. En el siglo V antes de Cristo, los primeros filósofos griegos, principalmente basados en Mileto (Tales, Anaximandro, Anaxímenes), publicaron sus discusiones acerca del origen de la naturaleza.

A inicios de nuestra era, el latín se impone como lengua de comunicación científica en Europa, siendo digna de citar la obra Naturalis Historia de Plinio el Viejo como la primera enciclopedia de conocimientos dedicados a la naturaleza. La última parte de la historia data de 1665, cuando se lanzaron simultáneamente el Journal des Sçavants (Francia) y el Philosophical Transactions of the Royal Society (Inglaterra) como revistas periódicas para publicación de resultados de investigación. Hoy día, varios miles de journals difunden el saber científico de la humanidad.

El arte de la publicación científica y técnica es cultivado en el IGP desde su historia temprana. Actualmente, el número de artículos en revistas internacionales indexadas y libros constituye uno de los principales indicadores de la producción institucional. La formación de los estudiantes en investigación científica y tecnológica incluye su adiestramiento en transmitir sus resultados de manera ordenada y rigurosa en artículos para su publicación.

Este compendio representa el primer hito, alcanzado por los estudiantes autores de los artículos, de una larga y fructífera carrera en la investigación científica, desarrollo tecnológico que estamos seguros ellos emprenderán.

No debo dejar de mencionar y agradecer, en este prólogo, el trabajo dedicado de cada uno de los investigadores que han asesorado a los estudiantes en la preparación de sus artículos y han revisado los textos iniciales. Igualmente, mencionar y agradecer a la Unidad de Asuntos Académicos de la Subdirección de Geofísica y Sociedad por la cuidadosa diagramación y preparación del volumen y el seguimiento de su impresión.

José Macharé

De los editores



Dr. Hernando Tavera

Doctor en Ciencias Físicas – Mención Sismología de la Universidad Complutense Madrid, España y Geofísico de la Universidad San Agustín de Arequipa. Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú, donde está a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, y Director Ejecutivo del Centro Regional de Sismología para América del Sur. Además, es investigador principal del proyecto “Escenarios de Sismos y Tsunamis en el Borde Occidental del Perú”. Recientemente su investigación está a proponer escenarios del comportamiento dinámico de los suelos a la ocurrencia de sismos de gran magnitud e intensidad. Participa activamente en los comités Técnicos de la PCM, Indeci y Cenepred.

Dr. Ken Takahashi

Ph. D. en Ciencias Atmosféricas de la University of Washington, Seattle, EEUU y Físico de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú, donde está a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera, y representa al IGP en el Comité Técnico del ENFEN. Además, es investigador principal del proyecto “Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes”. Recientemente su investigación está enfocada en entender las condiciones que favorecen la ocurrencia de eventos El Niño extremos, los procesos de interacción entre el océano y atmósfera, identificar la variabilidad a escala decadal en el Pacífico sureste.



Dr. Marco Milla

Ph. D. en Ingeniería eléctrica y de computadoras de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, EE.UU e Ingeniero Electrónico de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Actualmente, es investigador científico del Instituto Geofísico del Perú y tiene a su cargo la dirección del Radio Observatorio de Jicamarca, sede científica del IGP dedicado al estudio de la alta atmósfera y ionosfera ecuatorial. Su investigación involucra el desarrollo de técnicas de radar de dispersión incoherente para la medición de parámetros físicos de la ionósfera de forma remota. En particular, se ha dedicado al estudio de los efectos de colisiones de Coulomb y efectos de propagación magneto-iónica en las mediciones que realiza con el radar ionosférico de Jicamarca.



Sección

Ciencias de la
Tierra Sólida

CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN LA CIUDAD DE HUACHO SEGÚN LA NORMA E-030 Y VULNERABILIDAD DE ELEMENTOS EXPUESTOS

SOIL CLASSIFICATION IN HUACHO CITY ACCORDING TO E-030 STANDARD AND EXPOSED ELEMENTS VULNERABILITY

Vilma Nina Figueroa

Universidad Nacional San Agustín
Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica
vilma_2699@hotmail.com

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Unidad de Sismología

Resumen

El presente estudio tiene por finalidad conocer las condiciones de escenarios de eventos naturales y la diversidad de peligros que se dan en nuestro país y que deben ser tomados en cuenta para evaluar el comportamiento de los suelos del área urbana frente a los sismos. Se pretende contar con información adecuada, y en la preparación ante desastres incorporar los criterios de prevención y atención en la formulación de los planes de desarrollo y programas respecto al ordenamiento territorial para la correcta gestión de riesgos.

Para el estudio de clasificación de suelos en la ciudad de Huacho según la Norma E-030 y vulnerabilidad de elementos expuestos, se aplicaron métodos geológicos, geotécnicos y geofísicos. Los resultados obtenidos permiten determinar los riesgos sísmicos y geotécnicos, presentes en el área urbana. En la ciudad de Huacho se ha identificado, la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S2 y S4, según la Norma Peruana de construcción sismorresistente E-030, siendo el suelo S4 el más crítico y considerado de alto riesgo.

Palabras clave: Suelos, técnicas geofísicas, zonificación.

Abstract

The present study aims to know the conditions of scenarios of natural events and the diversity of hazards that occur in our country and should be taken into account in assessing the behavior of soils in urban areas against earthquakes. The aim is to have adequate information and disaster preparedness criteria to incorporate prevention and care in formulating development plans and programs with respect to land use planning for proper risk management.

For the study of soil classification in the city of Huacho according to Standard E-030, exposed elements and vulnerability of geological, geotechnical and geophysical methods were applied. The results allow to determine the seismic and geotechnical present risks in urban areas. In the city of Huacho has been identified the existence of three types of soil: Type S1, S2 and S4, according to the Peruvian earthquake-resistant construction standard E-030, being the S4 the most critical and considered of high risk.

Keywords: Soil, geophysical technology, zonification.

1. Introducción

Según su historia sísmica, el Perú ha sido afectado de manera reiterada por sismos de gran magnitud, siendo la principal fuente generadora de los eventos sísmicos la interacción de la placa de Nazca y la Continental y que han producido daños materiales y pérdidas de vidas humanas. Estos escenarios han mostrado que el riesgo no solo depende de las características de los eventos sísmicos, sino también de los efectos de sitio, condiciones de vulnerabilidad del suelo y otros factores sociales como el crecimiento descontrolado de las ciudades, particularmente la ocupación de zonas no apropiadas por el tipo de suelo y variada topografía, que desencadenan un mayor desastre cuando se presentan peligros como los sismos.

En el presente estudio se realiza el análisis de la clasificación del suelo en el área urbana de Huacho a partir de la recolección de datos en campo del tipo geofísico, geológico, geomorfológico y geotécnico. Esta información permitirá tener mayor conocimiento sobre las características físicas del suelo sobre el cual se levanta el área urbana y/o futuras áreas de expansión.

2. Área de estudio

Huacho es una ciudad ubicada en la costa central del Perú, capital de la provincia de Huaura, departamento de Lima. Se ubica en una bahía formada por el Océano Pacífico a 150 km. al norte de la ciudad de Lima, próximo a la desembocadura del río Huaura, encontrándose delimitado por el Oeste con el Océano Pacífico, por el Norte con el distrito de Hualmay, por el Sur con la provincia de Huaral y por el Este con el distrito de Santa María (Figura 1).

Su territorio es principalmente árido, con acceso al mar y elevaciones menores a 500 m.s.n.m.; es decir es una ciudad costera con relieve llano. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, es la decimonovena ciudad más poblada del Perú y albergaba en el año 2007, una población de 173.585 habitantes.



Figura 1. Mapa de ubicación de la ciudad de Huacho.

3. Condiciones dinámicas de los suelos

En la actualidad se reconoce la importancia de las condiciones dinámicas del suelo, como uno de los principales factores responsables de los daños sufridos por las edificaciones durante los sismos fuertes. Las amplitudes y formas de las ondas sísmicas dependen de la cantidad de energía liberada, así como de la trayectoria y de las condiciones locales. Por otra parte, las ondas sísmicas una vez emitidas por la fuente, dependen fundamentalmente de las propiedades físicas de los medios en que se propagan y de las irregularidades que encuentran en su trayecto. La amplificación de la frecuencia es más elevada cuando se trata de terrenos blandos; mientras que, en terrenos más rocosos la amplificación disminuye. Este conocimiento, conjuntamente con técnicas ingenieriles modernas, permite entender con mayor precisión los daños ocurridos en terremotos pasados y proyectar los niveles de daños esperados en sismos futuros.

4. Aspectos geológicos

En la ciudad de Huacho, las rocas más antiguas corresponden a la formación Casma, de naturaleza volcánica; mientras que los materiales más jóvenes están conformados por depósitos fluviales ubicados en ambos márgenes del río Huaura. Además, en el área de estudio afloran rocas intrusivas (diorita), depósitos marinos, eólicos y aluviales. Estos últimos cubren aproximadamente el 60% de la extensión del área urbana de la ciudad de Huacho.

Por otro lado, la información geomorfológica indica que la ciudad de Huacho se asienta sobre una superficie que tiene variantes topográficas entre cero y 250 m.s.n.m, estando las zonas de menor elevación ubicadas en dirección Oeste y las de mayor elevación hacia el Este, por ejemplo Cerro Colorado.

Desde el punto de vista geodinámico, en la ciudad de Huacho predomina la caída de rocas por efectos de gravedad del material que conforman la ladera, así como por la carga de las construcciones asentadas sobre éstos. Esta situación condiciona el grado de daño que pueden producir y por ser inestables, la zona debe ser considerada como de alto peligro, tal como se observa en las figuras 2 y 3.



Figura 2: Zona de alta susceptibilidad a la ocurrencia de derrumbes. Figura 3: Derrumbes en taludes conformados por depósitos aluviales. Ellos se encuentran en el límite de los distritos de Caleta Carquin y Huacho.

5. Aspectos geotécnicos

Los estudios geotécnicos tienen por finalidad analizar y cuantificar las características físicas de los suelos, siendo su comportamiento geotécnico relevante al momento de utilizarlo como elemento de medida para el soporte de una estructura determinada (cimentaciones). Estos estudios de campo han consistido básicamente en una evaluación geotécnica “in situ” del suelo. En la ciudad de Huacho se hicieron 15 calicatas, con una profundidad máxima de 3 metros y la mínima de 1.1 metros. La información geotécnica, fue completada

con 15 muestreos usando una posteadora, llegando a una profundidad de observación de 3.75 metros y la mínima de 0.5 metros. El análisis de las muestras de suelo en laboratorio permitió conocer la clasificación SUCS de los suelos y la capacidad portante.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para la clasificación SUCS. Para el caso de la capacidad portante, valores bajos de entre 1.0 a 2.0 kg/cm² se encuentra gran parte del área de estudio, abarcando sectores como el distrito de Santa María y los cerros Negro y Colorado Grande. El resto del área de estudio tiene una capacidad portante de valores media y alta 2.0 – 3.0 kg/cm² (Figura 5).

Tabla 1: Clasificación de suelos SUCS para la zona urbana de Huacho

CALICATA	Prof. (m)	Contenido de Humedad (%)	Clasificación SUCS	Denominación
CH-01	2.6	8.18	GW	Grava bien gradada
CH-02	2.65	1.38	GM con arena	Grava bien gradada con arena
CH-03	2.6	0.75	GP-GM con arena	Grava bien gradada - grava bien gradada con arena
CH-04	3	8.23	SM	Arena limosa
CH-05	2.7	6.98	GM con arena	Grava limosa con arena
CH-06	2.7	1.06	GM con arena	Grava limosa con arena
CH-07	2.9	19.62	ML arenoso	Limo arenoso
CH-08	3	8.13	SM	Arena limosa
CH-09	2.7	1.16	GM con arena	Grava limosa con arena
CH-10	3	37.73	SM	Arena limosa
CH-11	2.85	20.27	ML con arena	Grava limosa con arena
CH-12	2.2	2.22	SP con grava	Arena mal gradada con grava
CH-13	2.7	0.7	SP	Arena mal gradada
CH-14	2.8	6.72	SM	Arena limosa
CH-15	1.1	1.24	SM	Arena limosa

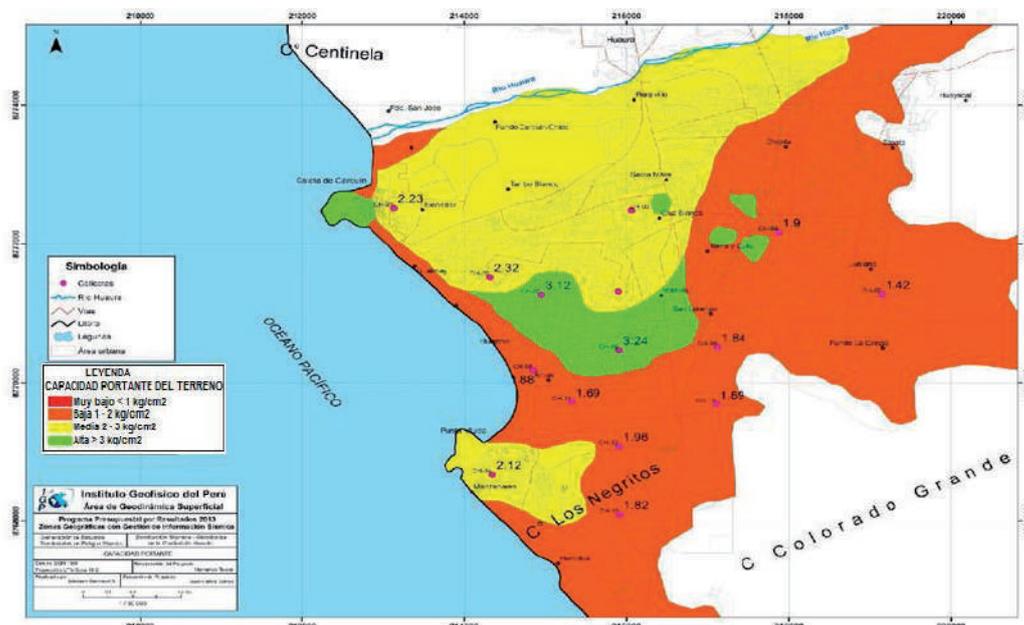


Figura 5. Mapa de capacidad portante para la zona urbana de Huacho.

El análisis de capacidad portante obtenido para la ciudad de Huacho ha permitido clasificar los suelos en tres rangos:

- Baja (1-2 kg/cm²): Se encuentra gran parte de los suelos de la ciudad de Huacho, distrito de Santa María y los Cerros Negritos y Colorado Grande, estos corresponden a arenas eólicas, marinas y limos.
- Media (2-3 Kg/ cm²): Se encuentran en el Norte de la ciudad de Huacho (Carquin y Hualmay) y parte Sur (AA.HH. Manzanares), corresponde suelos gravosos y arenosos con presencia de limos.
- Alta (>3Kg/ cm²): Se encuentran en todo el casco urbano de la ciudad de Huacho. Corresponde a suelos gravosos empaquetados con limos y arenas de grano grueso.

6. Análisis geofísico

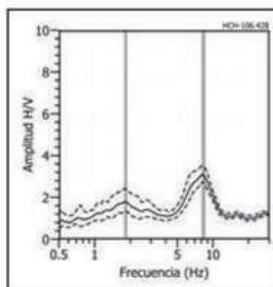
A fin de realizar la evaluación de las características de los suelos en la ciudad de Huacho y estimar el comportamiento dinámico de estos, se han realizado estudios geofísicos, aplicando la técnica de razones espectrales (H/V), y análisis multicanal (MASW).

6.1 Técnica de cocientes espectrales H/V

Esta metodología ha ganado popularidad en los últimos años por ser un procedimiento económico y fácil de aplicar, obteniéndose a partir de éstos los valores de frecuencia y período fundamental del suelo. El uso extensivo del método permite el mapeo rápido y detallado de estas frecuencias en áreas urbanas.

En la Figura 6, se presentan algunos ejemplos de H/V. En el primer registro se observa la razón espectral con dos picos de diferente frecuencia y de menor amplitud, los cuales corresponden a dos capas sedimentarias de poco espesor y medianamente compactos. En el segundo registro se observa la presencia de una banda de frecuencia de gran amplitud y corresponde a una capa sedimentaria blanda de mayor espesor.

HCH-106



HCH-317

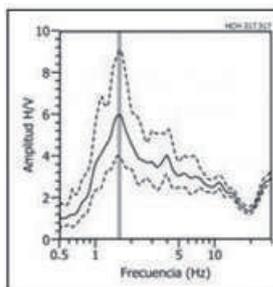


Figura 6. Ejemplos de razones espectrales obtenidas en la ciudad de Huacho.

En campo se recolectaron datos de vibración ambiental de 370 puntos y se tomaron 20 minutos de registro y su análisis ha permitido elaborar mapas de frecuencias predominantes considerando dos rangos de frecuencias: Fo ($F_p < 3.0\text{Hz}$) y frecuencia F1 ($3.0 > F_p > 20\text{Hz}$), (Figura 7). Estos valores fueron convertidos a periodos a fin de realizar un mejor análisis de los resultados.

El mapa de periodos dominantes muestra la presencia de dos zonas con suelos dinámicamente similares. El 80% del área de estudio presenta periodos mayores y menores a 0.3 segundos. En la zona céntrica de la ciudad, los periodos dominantes son menores o iguales a 0.2 segundos. En el extremo Norte del área de estudio, no se identifican valores para los periodos dominantes. En los extremos NO y SO del área de estudio, los periodos son de 0.1 y 0.2 segundos. Los periodos con valores mayores a 0.3 segundos, están presentes en el extremo sur y en la zona céntrica de la ciudad de Huacho.

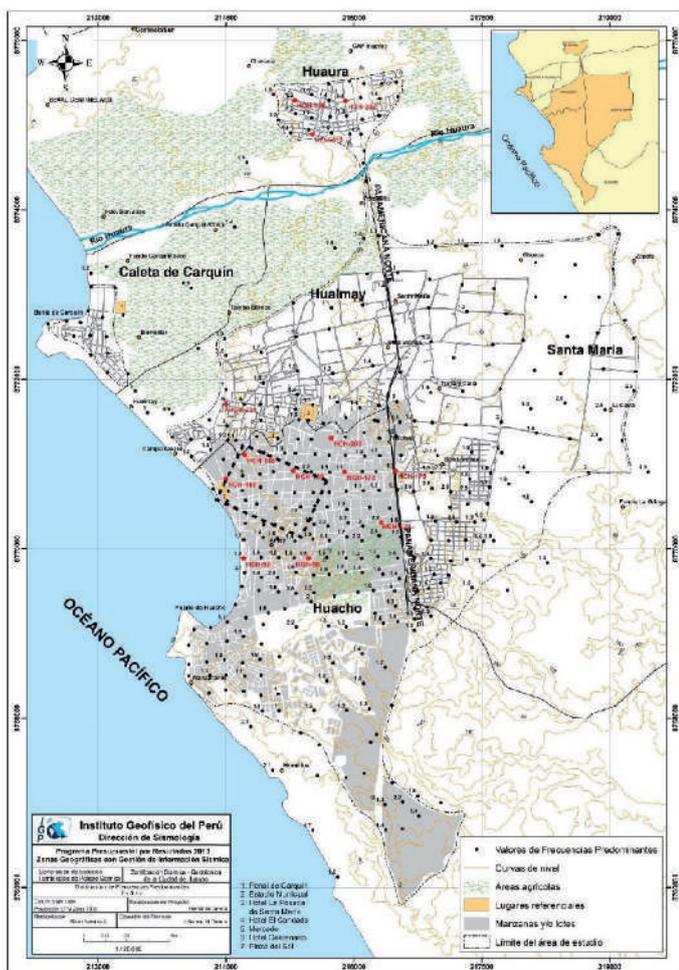


Figura7: Mapa de la distribución predominante Fo (Fp<3.0 Hz)

6.2 Técnica de arreglos sísmicos lineales

Es un método de exploración geofísica MASW que permite determinar la velocidad de propagación de las ondas S (Vs) del terreno en el área de estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos en geotecnia y sísmica se hicieron 8 líneas de exploración y los resultados se interpretaron considerando la clasificación que la Norma E-030 establece para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte (Vs) (Tabla 3)

Tabla 3: Velocidad de las ondas de corte según la norma E-030

DESCRIPCION	Vs (m/s)
Rocas duras	>1.500
Rocas moderadamente duras	800 a 1500
Suelos muy duro o roca blanda	500 a 800
suelo duro	180 a 500
suelo blando	<180

En la urbanización Carquin, al extremo NO del área de estudio, se ha identificado la presencia de dos capas con profundidades de 4 – 12 metros y con velocidades de propagación de 195 a 300 m/s, lo cual correspondería a rocas duras.

En la Av. San Martin de Porras, en el extremo Norte de la Urb. Los Sauces y en el extremo Este de la Panamericana Norte; se identificó la presencia de dos capas, espesores de hasta 4 - 16 metros de profundidad, velocidades de propagación de 220 – 290 m/s, 350 – 400 m/s. Estos valores corresponden a suelos duros.

7. Resultados

Para la ciudad de Huacho el análisis e interpretación de la información sísmica y geotécnica ha permitido identificar, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales (Figura 8).

- **Zona I:** Conformada por estratos de grava coluvial – eluvial que se encuentra a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos predominantes de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1. Dentro de esta zona se encuentra parte de la ciudad de Huacho, Huaura, Carquin, Santa María, Cerro Negritos y Cerro Colorado Grande.
- **ZONAII:** Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3 y 16 metros; subyaciendo a estos estratos se tiene grava. Los periodos predominantes del terreno son mayores a 0.4 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2. Dentro de esta zona se encuentra gran parte de la ciudad de Huacho, Santa María, Hualmay, Huaura, y los AA.HH. Manzanares y Atalaya.
- **ZONA IV:** Conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. El comportamiento dinámico de los suelos ha sido tipificado como suelo Tipo S4. Ésta se encuentra a lo largo del litoral de la ciudad de Huacho, desde el distrito de Carquin al Norte, hasta Punta Viuda al Sur.

De acuerdo a esta zonificación el 23 % de la superficie de Huacho es de alto riesgo.

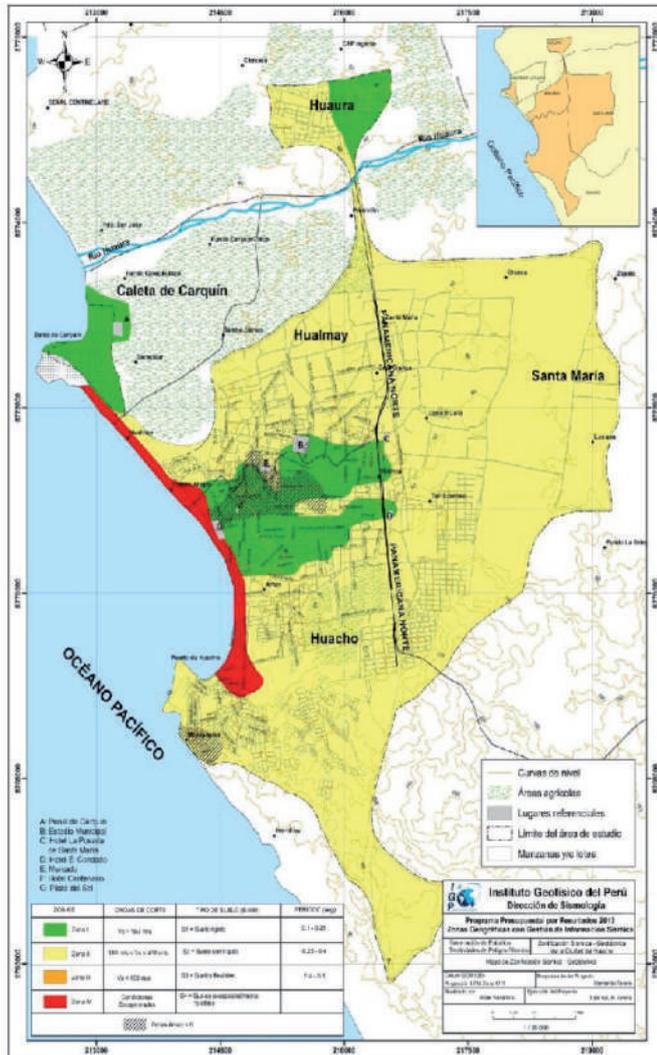


Figura 8: Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica para el área urbano de Huacho

8. Agradecimientos

Mi agradecimiento al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis bajo el asesoramiento del Dr. Hernando Tavera.

9. Bibliografía

Alfaro, A., Egozcue y A. Ugalde (1999): *Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtremores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica, España.*

APASEG (2005): *Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao, CISMID.*

Casagrande A. (1948): *Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions.*

INGEMMET (1970): *Cuadrángulo Geológicos de Barranca. Boletín N°26 – hoja 22h. Sector Energía y Minas.*

Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a): *Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364 pp.*

Nakamura, Y. (1989): *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface.*

Norma E-30 (2003): *Norma Técnica E-030, Diseño Sismo Resistente.*

PNUD (2007): *Mapa de peligros de la ciudad de Huacho. PNUD, INDECI, Proyecto N° 05100014426*

ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO Y LLUVIAS INTENSAS EN EL ÁREA URBANA DE CHOSICA

SEISMIC RISK AND HEAVY RAINFALL SCENARIOS IN THE URBAN AREA OF CHOSICA CITY

Angel Ademir Cuya Crispin

Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
acuya@igp.gob.pe

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Unidad de Sismología

Resumen

La ciudad de Chosica por encontrarse en el borde oriental del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, está afectada a la gran cantidad de sismos que ocurren en toda esta zona. Además, en las épocas de verano y fenómeno El Niño, es también afectada por lluvias intensas que ocasionan inundaciones, huaicos, desprendimiento de rocas y erosión de laderas. Por ello, conociendo los peligros a los que está expuesta, es importante evaluar su vulnerabilidad, sea física, por exposición y resiliencia, a fin de determinar escenarios de riesgo ante la ocurrencia de un sismo y/o lluvias intensas. Los resultados serán de utilidad para la toma de medidas necesarias para prevención y mitigación.

Palabras clave: Escenarios, riesgo, peligro, vulnerabilidad

Abstract

The city of Chosica, being in the eastern edge of the Pacific Ring Of Fire, is affected by the large number of earthquakes that occurs in this zone. Also in summer time and during El Niño phenomenon, it is also affected by heavy rain causing floods, mudslides, rockslides and slope erosion.

Therefore, knowing the hazards to which it is exposed, it is important to assess its physical vulnerability, exposure and resilience, to determine risk scenarios upon the occurrence of an earthquake and / or intense rain. The results will be useful for taking necessary measures for prevention and mitigation.

Keywords: Scenarios, risk, hazard, vulnerability

1. Introducción

El Perú se encuentra en el borde oriental del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, y es el proceso de subducción entre las placas Sudamericana y de Nazca la fuente de origen de la gran cantidad de sismos que afectan principalmente el borde occidental del Perú.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región central ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud. Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro ocurran nuevamente eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad que en el pasado.

El área urbana de Chosica, a lo largo de los años, no solamente ha sido amenazado por los movimientos sísmicos, sino también por las lluvias intensas que se producen mayormente en las épocas de verano y en épocas del fenómeno El Niño, provocando inundaciones, lloccllas (en quechua: lluqlla, “aluvión”), desprendimiento de rocas y erosión de laderas.

Ante la ocurrencia de estos peligros y la posibilidad de un desastre, existe un mayor riesgo de afrontar daños físicos, pérdidas económicas, conflictos sociales, problemas ambientales, etc. si no se efectúan estudios técnicos que permitan identificar el peligro para prevenir y mitigar los riesgos a los cuales se encuentra expuesta la población.

El área urbana de Chosica, debido a una planificación urbana caótica (sin un plan de ordenamiento territorial), a las inadecuadas construcciones de las viviendas, al tipo de suelo y a la falta de cultura ante

la ocurrencia de peligros, es vulnerable ante el peligro de sismos y lluvias intensas. A fin de evitar daños sobre las vidas humanas y pérdidas económicas es necesario realizar escenarios de riesgo a fin de que las autoridades tomen las medidas necesarias que les ayude a prevenir y mitigar los daños.

2. Área de estudio

La ciudad de Chosica está conformada por un continuo urbano que forma una conurbación con el área urbana de los distritos de Santa Eulalia, y Ricardo Palma, correspondientes a la jurisdicción de la provincia de Huarochirí. Durante las últimas cinco décadas, el significativo crecimiento de la población de Chosica, se ha visto reflejado en la ocupación de laderas de cerros, e incluso en los cursos de quebradas y cárcavas.

La ciudad de Chosica, capital del distrito de Lurigancho está ubicada a la altura del kilómetro 32 de la Carretera Central. Políticamente es parte de la provincia y departamento de Lima (Figura 1).

Para fines de la presente investigación, se considerará el área urbana de la ciudad de Chosica, comprendida desde el límite distrital por el Este, hasta las urbanizaciones Santa María y La Cantuta por el Sur Oeste, y el entorno geográfico inmediato, que incide y condiciona el crecimiento urbano de la ciudad.

De acuerdo al censo de 2007 el distrito de Lurigancho cuenta con una población de 169 359 habitantes, distribuidos sobre una superficie de 236.47 km².



Figura 1. Mapa de ubicación del área urbana de Chosica.

3. Objetivos

Los objetivos del presente estudio son:

Generar escenarios de riesgo sísmico y de lluvias intensas para evaluar los niveles de riesgo en el área urbana de Chosica, que ayudarán a proponer medidas de prevención y mitigación de los problemas ante la ocurrencia de sismos y lluvias intensas.

Para tal objetivo se evaluará el tipo, estado de conservación, material, número de pisos, etc. de las construcciones. Con esta información se procederá a determinar los niveles de vulnerabilidad por vivienda a fin de identificar aquellos predios que geográficamente se encuentren expuestos a peligros naturales y/o antrópicos. Del mismo modo, se pretende conocer el nivel de resiliencia de la población frente a los desastres ocasionados por sismos y lluvias intensas.

4. Marco teórico

Para definir el marco teórico, es necesario comprender los conceptos de algunos términos básicos en los cuales se sustentan los estudios de gestión de riesgo.

Peligro: El peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o inducido por la actividad del hombre, potencialmente dañino, de una magnitud dada, en una zona o localidad conocida, que puede afectar un área poblada, infraestructura física y/o el medio ambiente.

El peligro, según su origen, puede ser de dos clases: por un lado, de carácter natural; y, por otro de carácter tecnológico o generado por la acción del hombre.

Vulnerabilidad: Es la condición existente en la sociedad por la cual puede verse afectada y sufrir un daño o una pérdida en caso de materialización de un peligro. También puede expresarse por la incapacidad de una comunidad para recuperarse de los efectos de un desastre. La vulnerabilidad, entendida como debilidad frente a los peligros o como “incapacidad de resistencia” o como “incapacidad de recuperación”, no depende sólo del carácter del peligro sino también de las condiciones del entorno, definidas por un conjunto de factores. En este sentido, la vulnerabilidad es global.

Riesgo: El riesgo se entiende como el resultado de la interacción del peligro sobre la vulnerabilidad. Éste se puede expresar tanto en forma cualitativa (grados o niveles la calificación), como también en forma cuantitativa, estimando los daños o pérdidas esperadas para un determinado evento específico o escenario de riesgo (por ejemplo: un terremoto de magnitud Richter grado 8 o superior, a una hora determinada).

Escenarios de riesgo: El escenario de riesgo, se construye a partir de la identificación y análisis de las características que presentan en el sitio de estudio los dos factores que en su interacción conforman el riesgo: los peligros (componente extrínseco a las comunidades) y las vulnerabilidades (componente intrínseco a las comunidades).

En un escenario de riesgo, la gravedad de los daños se sitúa justamente en aquellos lugares donde la susceptibilidad social, económica y ambiental es mayor. Es decir, los espacios precariamente asentados relacionados a grupos sociales de mayor concentración, con altos niveles de pobreza y donde la resiliencia es menor, contribuyen a la gravedad de dichos escenarios de riesgo.

Desastres: Es una interrupción severa del funcionamiento de una comunidad causada por un peligro, de origen natural o inducido por la actividad del hombre, ocasionando pérdidas de vidas humanas, considerables pérdidas de bienes materiales, daños a los medios de producción, al ambiente y a los bienes culturales. La comunidad afectada no puede dar una respuesta adecuada con sus propios medios a los efectos del desastre, siendo necesaria la ayuda externa ya sea a nivel nacional y/o internacional.

5. Metodología

Catastro y zonificación sísmica – geotécnica

La Municipalidad de Lurigancho - Chosica realizó junto a la Oficina de Formalización de la Propiedad Informal (COFOPRI), un levantamiento de información catastral en el año 2008, para luego ser actualizado en el 2014. Este catastro permite identificar lotes y manzanas en formato digital, así como también el número de pisos por lote. La base de datos es completada en campo, y otras con fotografías por vivienda que permitirá analizar las características físicas de cada lote, siendo en total 11383 lotes.

Por otro lado, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ejecutó en el año 2012 la Zonificación Sísmica - Geotécnica del Área Urbana del Distrito de Chosica. El estudio permitió conocer el comportamiento dinámico del suelo a partir de la aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Los resultados obtenidos para el área urbana de Chosica permitieron identificar la existencia de dos (2) zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S1 y S2 (Figura 2).

El tipo S1 incluye suelos conformados por estratos de grava coluvial-aluvial que se encuentran a nivel

superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor; tiene un comportamiento rígido con periodos de vibración natural, determinados por las mediciones de vibración ambiental, entre 0.1 y 0.3 s. Esta zona considera la parte baja de las laderas.

El tipo S2 incluye suelos conformados por planicies

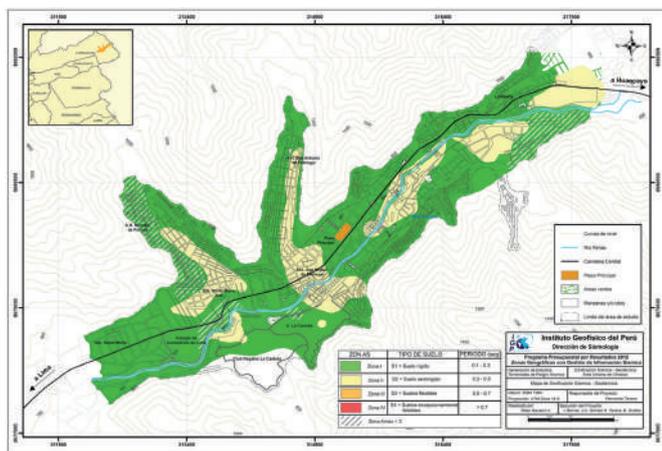


Figura 2. Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica del área urbana de Chosica (IGP, 2012)

aluvionales con columnas de gravas y arenas intercaladas con niveles finos limosos y arcillosos cuyos espesores varían entre 3 y 10 m. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, entre 0.3 y 0.5 s. Esta zona considera la zona céntrica del área urbana y próxima al río Rímac.

Elaboración de base de datos

Las características de cada vivienda como estado de construcción, número de pisos, estado de conservación, configuración geométrica en planta, etc. se obtuvieron mediante el análisis de las fotos, a partir del plano catastral, así como la información obtenida en el campo. Esta información es directamente agregada a la tabla de atributos del ArcGIS 10.2 para su posterior análisis. Al completar la base de datos se procede a obtener planos temáticos de las características evaluadas.

Proceso analítico jerárquico

El Proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process - AHP) es una técnica bastante usada para la toma de decisiones con atributos múltiples (Saaty 1980; 1987). Permite la descomposición de un problema en una jerarquía y asegura, que tanto los aspectos cualitativos como cuantitativos de un problema sean incorporados en el proceso de evaluación, durante el cual la opinión es extraída sistemáticamente por medio de comparaciones entre pares. El PAJ (AHP por sus siglas en inglés) es una metodología de decisión compensatoria porque las alternativas que son eficientes con respecto a uno o más objetivos pueden

compensarse mediante su desempeño con respecto a otros objetivos. El PAJ permite la aplicación de datos, experiencia, conocimiento, e intuición de una forma lógica y profunda dentro de una jerarquía como un todo.

La asignación de importancias o preferencias permite asignar un puntaje de importancia relativa por parejas de indicadores, teniendo como referencia qué tanto, en forma comparativa, cada indicador refleja el aspecto que se desea representar (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de asignación de importancia comparativa entre parejas

Juicio de importancia	Puntaje
Extremadamente más importante	9
	8
Muy fuertemente más importante	7
	6
Fuertemente más importante	5
	4
Moderadamente más importante	3
	2
Igualmente importante	1

6. Resultados preliminares

En los últimos 50 años, la ciudad de Chosica tuvo un enorme crecimiento poblacional que se ve reflejado en la invasión de laderas de los cerros, así como sus quebradas. En la Figura 3 se observa el catastro de 1961, y se observa que en las laderas de los cerros y las quebradas no habían invasiones en comparación con el del 2014. Se observa además, un incremento de aproximadamente un 30% de espacio territorial. A continuación se presentarán los resultados preliminares obtenidos en este estudio que permitirá tener mayor visión sobre el riesgo existente en esta ciudad.

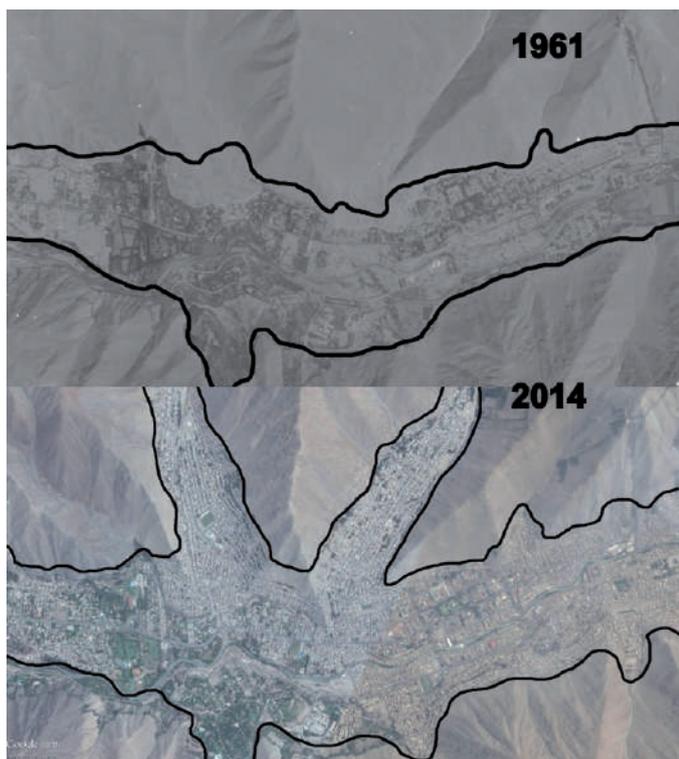


Figura 3. Área urbana de Chosica

Estado de construcción de las viviendas: El área urbana de Chosica abarca un total de 11357 lotes, de los cuales se ha determinado que 10724 lotes son habitados y 633 lotes están sin población. Actualmente se ha identificado que del total de datos, solo el 6% no ha sido construido aún (Figura 4).

Número de pisos: En la Figura 4, se observa que un 43% de los lotes construidos, son de un solo piso y en su mayoría pertenecen a las casa-habitación. Un 34% de lotes presenta 2 pisos que mayormente son casa-habitación y locales de negocios ubicados en la zona central de la ciudad. Un 19% de lotes con 3 pisos y un 4% de lotes que tienen más de 4 pisos, en su mayoría pertenecen a viviendas multifamiliares y comercios como los hospedajes.

Material de construcción predominante: El material de construcción predominante en la ciudad de Chosica, así como en la mayoría de distritos de la capital, es el ladrillo con un 73%. Le siguen el adobe (zona central de Chosica) con un 17%, un 6% de otros materiales como la madera y un 4% de concreto que en su mayoría le pertenecen a los que tienen más de 4 pisos (Figura 4).

Estado de conservación: De acuerdo a la Figura 4, se observa que lotes con un muy buen estado de conservación representan el 1%, con un buen estado de conservación el 66%, con un regular estado de conservación un 31% y con un mal estado de conservación un 2%.

Configuración geométrica en planta: Las viviendas

que tienen una configuración geométrica uniforme en planta van a tener un mejor comportamiento estructural, por tener su centro de gravedad en el punto de equilibrio, que hace que la estructura sea más estable a la ocurrencia de sismos. Las formas irregulares más comunes en edificaciones tienen forma de L, H, U, T o planta en cruz. Un 79% de la configuración geométrica en planta es de forma regular y un 21% de forma irregular (Figura 4).

Configuración geométrica en elevación: Las viviendas que tienen una configuración geométrica uniforme en elevación, van a tener un mejor comportamiento estructural, por tener su centro de gravedad en el punto de equilibrio, que hace que la estructura sea más estable. Un 93% de las viviendas tienen su configuración geométrica en elevación de forma regular y un 7% de forma irregular (Figura 4).

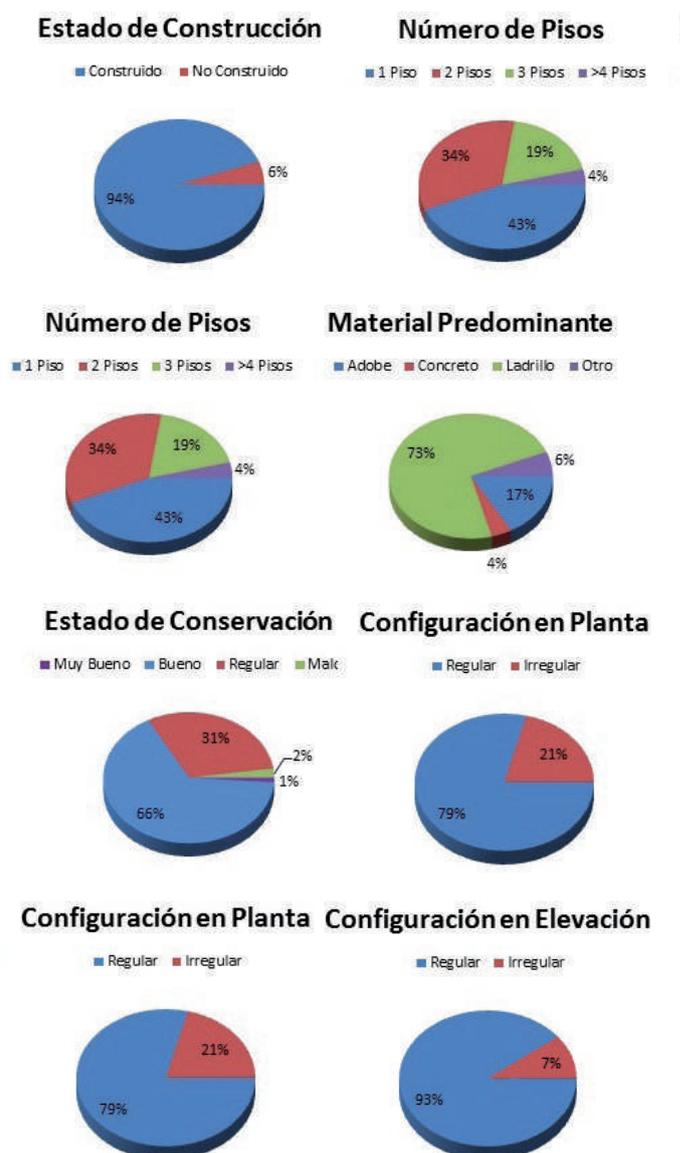


Figura 4. Porcentaje de las características físicas de las viviendas

7. Conclusiones

En lo que respecta al avance de esta investigación, se observa que las condiciones de la vulnerabilidad física es positiva, es decir, cuando ocurra un sismo severo, la mayoría de las viviendas responderán de manera adecuada. El problema se encuentra en las viviendas que se encuentran ubicadas en las laderas de los cerros y en el curso de las quebradas, puesto que cuando ocurran sismos y/o precipitaciones intensas, estas van a ser afectadas por caídas de rocas y huaicos. Este estudio será de vital importancia para la ciudad de Chosica ya que las autoridades podrán tomar las medidas necesarias con las viviendas que se encuentran con un nivel de riesgo alto.

8. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis.

Al Dr. Hernando Tavera por todo el apoyo y las facilidades que me ha brindado, así como su orientación y asesoramiento.

A todo el personal del Área de Sismología, quienes en todo momento me han aclarado algunas dudas y por su amistad.

9. Bibliografía

Castro, R. 2014. "Evaluación del riesgo de desastres por peligros naturales y antrópicos del área urbana del distrito de Punta Hermosa. Tesis Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima – Perú. 265 pp.

CENEPRED. 2013. "Manual para la evaluación de riesgos originados por Fenómenos Naturales". Lima – Perú. 256 pp.

INDECI. 2006. "Manual Básico para la estimación del riesgo". Lima – Perú. 75 pp.

INDECI. 2010. "Determinación del nivel de vulnerabilidad física ante la probable ocurrencia de un sismo de gran magnitud en el distrito de Jesús María". Lima – Perú. 56 pp.

IGP. 2012. "Zonificación Sísmica – Geotécnica del Área Urbana de Chosica (Comportamiento dinámico del suelo)". Lima – Perú. 98 pp.

Ochoa, A. 2012. "Aplicación de los sistemas de información geográfica para la determinación de escenarios de riesgo en el balneario de Pucusana. Tesis Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima – Perú. 265 pp.

Saaty, T.L. (1999). *Basic Theory of the Analytic Hierarchy Process*. University of Pittsburgh.

Tavera, H. 2014. "Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú". Lima – Perú. 30 pp.

CARACTERISTICAS ESPACIO – TIEMPO DE LA SISMICIDAD INTERMEDIA EN EL NIDO DE PUCALLPA

SPACE - TIME FEATURES IN THE MIDDLE SEISMICITY OF PUCALLPA NEST

Estela Juana Centeno Moncada

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Facultad de Geología Geofísica Y Minas
Centenomoncada777@hotmail.com

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Unidad de Sismología

Resumen

En el presente estudio, se analiza la distribución espacial de la región central del Perú, a fin de caracterizar la relación con el Nido de Pucallpa. En esta región la sismicidad sigue el patrón descubierto por otros autores, pero a la altura de Pucallpa en una profundidad intermedia se concentra en mayor número, así la sismicidad se distribuye sugiriendo la presencia de una resubducción de la placa que estaría asociada a la actividad sísmica profunda. Por tanto se elaboró un mapa de distribución espacial para el Perú, en donde se hicieron tres secciones verticales perpendiculares a la fosa en las regiones norte centro y sur, y así enfocándonos en la zona central, se obtuvieron perfiles sísmicos más detallados con la finalidad de evaluar el comportamiento de la sismicidad en cada uno de ellos. Para tal efecto se utilizaron datos sísmicos contenidos en el catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú para el periodo 1980-2015 ($m_b \geq 4.0$).

Palabras clave: Resubducción, nido sísmico, subducción, distribución espacial

Abstract

In this study, the spatial distribution of the central region of Peru is analyzed in order to characterize the relationship with the nest Pucallpa Seismicity. This region follows the pattern found by other authors, but at the height of Pucallpa in an intermediate depth, the seismicity is distributed suggesting the presence of a resubduction plate that would be associated with the deep seismic activity. Therefore a spatial distribution map was elaborated, where three vertical sections was performed to the pit in the central, northern and southern regions, and thus the central zone, seismic data details were obtained, using the seismic catalog of the Geophysical Institute of Peru for the period 1980-2015($m_b \geq 4.0$).

Keyword: Resubduction, seismic nest, subduction, spatial distribution.

1. Introducción

En el Perú la sismicidad tiene su origen en el proceso de subducción de la placa Oceánica (Nazca) bajo la Continental (Sudamericana) la misma que desarrolla una velocidad promedio de 8-10 cm /año (DeMets et al. 1990). Este proceso genera un número ilimitado de sismos con diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad, las cuales permiten conocer e identificar a las principales fuentes sismogénicas presentes en Perú. En este estudio se busca realizar una contribución para el conocimiento de las características de la principal fuente sismogénica asociada al proceso de subducción que genera los sismos debido a la fricción de placas con epicentros cerca de la Costa y con la sismicidad por debajo del Continente asociado a la deformación interna de la placa de Nazca que subduce por debajo del continente. Esta sismicidad sugiere que la placa subduce con ángulo de 28° hasta alcanzar una profundidad de 120 km a partir de la cual se hace horizontal, por debajo de Pucallpa la sismicidad se incrementa y cambia su orientación en profundidad. Es de interés conocer las causas de estos cambios en la geometría de la Placa a fin de comprender su relación con la actividad sísmica profunda.

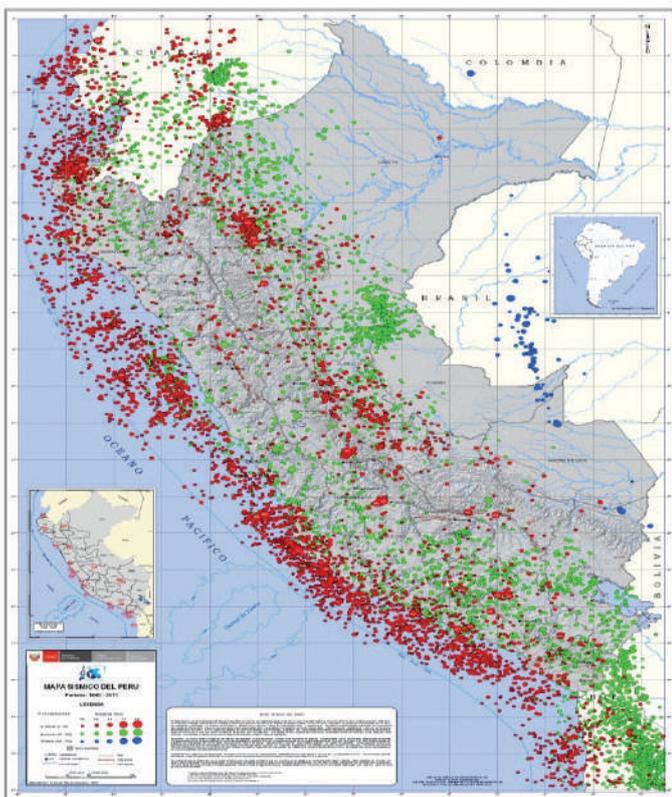


Figura 1. Mapa de la sismicidad del Perú para el periodo 1960-2011 ($M_b \geq 4$). Los círculos rojos indican los sismos de foco superficial, círculos verdes sismos con foco intermedios, círculos azules sismos con foco profundo.

2. Objetivos

Los objetivos del presente estudio son:

- Analizar la distribución espacial de los sismos de la región central del Perú.
- Analizar las características sismotectónicas del Nido de Pucallpa.

3. Metodología

Para la conocer las características de la sismicidad del Nido de Pucallpa se siguieron los siguientes pasos:

- Se utilizó el Catálogo Sísmico del Instituto Geofísico del Perú para el periodo 1980-2015.
- Se elaboraron mapas de distribución espacial de la sismicidad.
- Se elaboraron secciones verticales perpendiculares a la fosa de la sismicidad para las regiones en las regiones Norte, Centro y Sur.
- Se elaboraron perfiles detallados para la zona Central.

4. Características generales de la sismicidad

El Perú se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo y su actividad más importante está asociada al proceso de subducción, generando de manera frecuente sismos con diversas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. Un tipo de sismicidad es la producida por deformaciones corticales, presentes de Norte a Sur sobre la Cordillera Andina y a lo largo de la zona denominada Subandina, en donde se producen sismos menores en magnitud y frecuencia.

Teniendo en cuenta la profundidad en los focos, de acuerdo al criterio establecido por Tavera y Buforn (2001), los sismos se clasifican en: Sismos de focos superficial ($h \leq 60$ km), Sismos de foco intermedio ($61 < h \leq 300$ km) y Sismos de foco profundo ($h > 301$ km).

4.1 Distribución de la sismicidad superficial

En la Figura 1 se observa que los eventos sísmicos superficiales se distribuyen formando grupos con más de 80% del total de la actividad sísmica que ocurre en el país. Esta sismicidad está presente entre la línea de la costa y la cordillera a niveles diferentes de profundidad con sismos de mayor profundidad, pero no supera los 60 km en promedio. Esta sismicidad está asociada principalmente al proceso de subducción en sus primeros niveles de profundidad con sismos de mayor magnitud.

El segundo grupo de sismos con foco superficial se localiza en el interior del continente y su origen se debe al proceso de subsidencia del escudo brasileño bajo la Cordillera Andina, y a la deformación cortical que se produce en la alta cordillera, siendo estos sismos de menor en magnitud y frecuencia. De forma general, la distribución de sismos sobre el territorio peruano muestran las zonas de mayor deformación superficial.

4.2 Distribución de la sismicidad intermedia

Según Tavera y Buforn (1998), la distribución espacial de los sismos con focos intermedios se realiza formando tres grupos localizados cerca de la línea de costa, en la zona subandina y en toda la región sur, bajo el altiplano peruano-boliviano. El primero se distribuyó paralelo a la línea de la costa por debajo de los 9° Sur (Figura 1) cerca de la línea de la costa de la región central del Perú con sismos de magnitud moderada (≤ 7.0). El segundo grupo se encuentra en la región Norte y Centro, con sismos que se distribuyen a lo largo de la Cordillera Oriental y la zona Subandina siguiendo alineamientos Norte Sur. El último grupo, considera aproximadamente el 70 % del total de sismos que ocurren a estos niveles de profundidad.

La distribución de los focos intermedios muestran de manera aproximada las zonas de mayor deformación a estos niveles de profundidad. En el interior del continente, los sismos se alinean sobre la zona Subandina paralela a la cordillera Andina y a partir de la cual, la distribución cambia su rumbo hacia el SO para luego cubrir toda la región sur.

4.3 Distribución de la sismicidad profunda

Los sismos de foco profundo, tal como se muestra en el extremo de la Figura 1, son de menor número a los de foco superficial e intermedio; sin embargo, su tamaño es muchas veces mayor que los sismos que ocurren a menores niveles de profundidad. Los sismos de foco profundo se distribuyen formando dos grupos, el primero se localiza en el llano amazónico próximo al límite Perú y Brasil, entre 6° - 11° Sur, con una distribución prácticamente Norte-Sur sobre la longitud del orden de 500km; y el segundo, alrededor del límite del Perú y Bolivia, entre 13° - 14° Sur, con una orientación próxima a Este-Oeste.

Con la finalidad de analizar la distribución de la sismicidad en función de la profundidad, se han elaborado tres perfiles sísmicos perpendiculares a la fosa, para las regiones Norte, Centro y Sur del Perú (Figura 2).

- **Región Norte:** Se muestra que la profundidad de los sismos aumenta de Oeste a Este. La subducción es de forma subhorizontal y se inicia con ángulo aproximado entre 25° - 30° hasta alcanzar una profundidad 150 km, a partir de la cual la placa se desplaza de manera horizontal hasta los 800 km (perfil a).
- **Región Centro:** Aquí la distribución sigue la misma tendencia que la anterior zona, sin embargo a la distancia horizontal aproximada de 590 km desde la fosa, se observa una doble subducción con un ángulo aproximado de 20° - 30° (perfil b).
- **Región Sur:** Se puede observar una característica diferente a los anteriores en la distribución de los sismos. La profundidad de los sísmicos se distribuye linealmente de Oeste a Este con una pendiente aproximada de 30° hasta los 300 km de profundidad aproximadamente desde la fosa. La placa de Nazca subduce de manera normal (Perfil C).

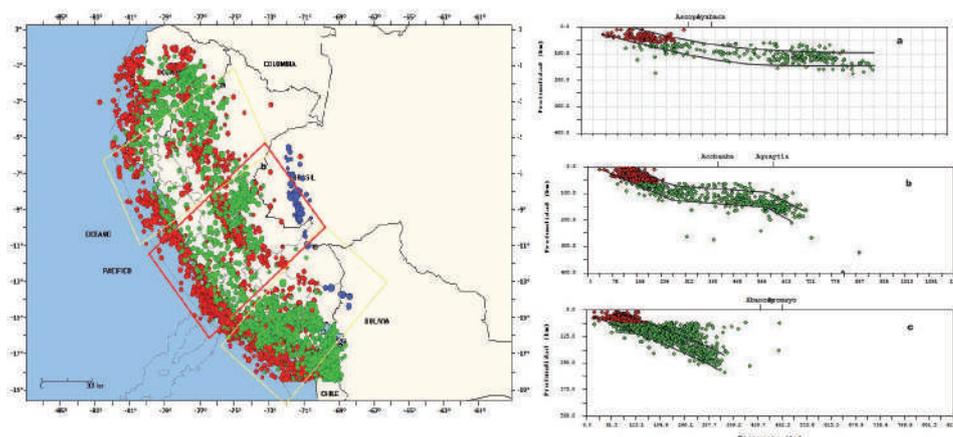


Figura 2. Esquema con las secciones sísmicas de las Regiones del Perú y los tres perfiles sísmicos.

5. Proceso de subducción

La subducción es el proceso por el cual una placa tectónica de mayor densidad se introduce bajo otra de menor densidad. Actualmente las zonas de subducción y la geometría de la placa que subduce han sido conocidas a partir de la distribución espacial de los sismos. En el Perú la Placa de Nazca (Oceánica) se introduce bajo la Sudamericana (Continental). En la región norte y centro de Perú (Figuras 2 a y 2 b), la placa Oceánica subduce con un ángulo medio de 30° hasta la profundidad de 100 Km aproximadamente y a partir de esta profundidad la placa sufre un cambio de buzamiento siendo prácticamente horizontal por debajo de la Cordillera Andina hasta una distancia de 700 Km a partir de la línea de fosa. En las regiones de subducción horizontal, no existen evidencias de vulcanismo cuaternario (Bazarandi y Isacks, 1976) con pendiente continua (Sur del Perú).

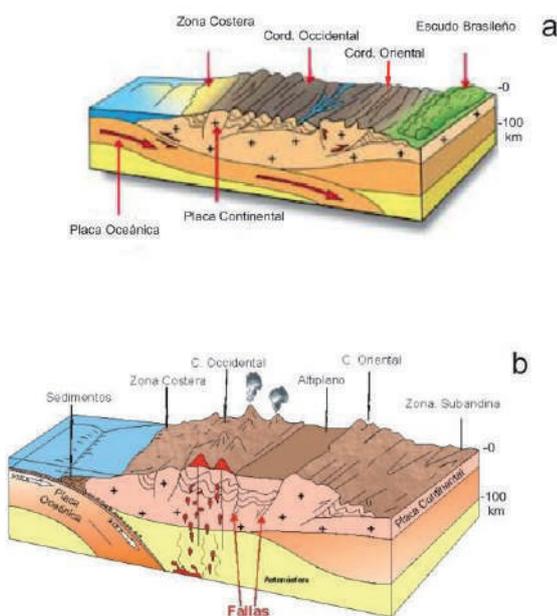


Figura 3. Esquema que muestra la geometría de la subducción de la placa oceánica bajo la continental. a) Subducción horizontal en la región norte y centro del Perú y b) Subducción con ángulo de inclinación constante en la región sur (Mattauer, 1989).

6. Sismicidad en la región Central:

Para esta zona se han considerado ocho perfiles verticales perpendiculares a la fosa. La mayoría de perfiles muestran una subducción subhorizontal, no obstante en los perfiles 2 y 3 se observa una característica diferente. Una agrupación de sismos a una distancia horizontal de 600 km con una profundidad de 150 km, cambia su inclinación con un ángulo aproximado de 28° , esto evidenciaría una posible resubducción presente en el Nido de Pucallpa (Figura 4).

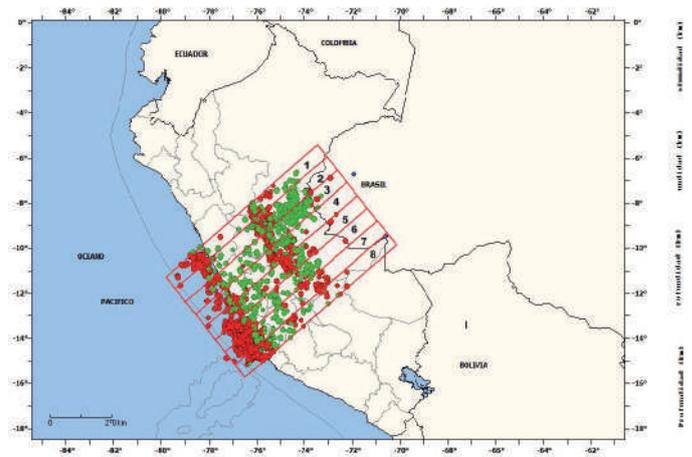


Figura 4. Esquema de los perfiles en la Región Central

7. Conclusión

Los resultados la distribución espacial de la sismicidad en la región central del Perú muestra en profundidad tres características: La primera mostró que frente a la línea de costa existe la presencia de la posible resubducción que existiría en la zona Central, la sismicidad se distribuye con ángulo de inclinación de 28° hasta la profundidad de 150 km, la sismicidad estaría asociada a fricción de placas. La segunda mostró que la sismicidad se distribuye de manera horizontal a profundidad promedio de 120 km hasta una distancia de 600 km desde la costa. Y finalmente, por debajo de Pucallpa el número de sismos se incrementa alcanzando una profundidad de 150 km y muestra un cambio en su distribución sugiriendo el desarrollo de una posible proceso de resubducción tal como lo sugiere Schneider & Sacks (1988); esta resubducción mostraría la relación de la sismicidad intermedia con la profunda.

8. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis.

Al Dr. Hernando Tavera por su asesoramiento y capacitación en la realización de mi tesis.

Al personal de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, por su amabilidad y colaboración.

9. Referencias bibliográficas

Guardia, *Determinación de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú* (2011) 135.

Bernal, *Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú: Características y evaluación de la energía sísmica liberada* (2002)63-67.

National Earthquake Information Center (NEIC) Catalog (1980-2015).

Hasegawa, y Sacks (1981). *Subduction of the Nazca Plate beneath Peru as determinate from Seismic observations. J Geophysical Res.*, 86, 4.971 – 4.980.

Tavera, *Mecanismo focal de terremotos en Perú y sismotectónica* (2003), 224-225.

Schneider & Sacks, *Spatial Distribution and b value of intermediate-depth earthquakes beneath Central Peru Geophysical Research Letters* 1421-1424, 1988.

Vila, *Determinación 3D de la Geometría de la placa de Nazca en el Perú y análisis del estado de esfuerzos* (2014)56-57, 59, 92,110.

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN LA ZONA URBANA DEL DISTRITO DE SANTA MARÍA DEL MAR: APLICACIÓN DE LA NORMA E030

SEISMIC RISK ASSESSMENT IN THE URBAN AREA OF SANTA MARÍA DEL MAR DISTRICT: APPLICATION OF THE E030 RULE

Ricardo Felix Pinedo

Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
rfelixp37@gmail.com

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Unidad de Sismología

Resumen

Santa María del Mar es uno de los distritos de Lima, ubicado en el borde occidental de América de Sur y por lo tanto, es parte del Cinturón de Fuego del Pacífico (la zona de mayor actividad sísmica). Dicha ubicación hace que sea vulnerable ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud y un consecuente tsunami. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la elaboración de escenarios de riesgo sísmico en el distrito e identificar las zonas más vulnerables, a fin de desarrollar un adecuado manejo de prevención y concientización de la población sobre los peligros a los que están expuestos.

Palabras clave: Vulnerabilidad, peligros, escenarios de riesgo, prevención.

Abstract

Santa Maria del Mar is one of the districts of Lima, located on the western edge of South America and therefore is part of the Pacific Ring of Fire (the most seismically active area). This location makes it vulnerable to the occurrence of major earthquakes and subsequent tsunami. This research aims at the development of seismic risk scenarios in the district, and identifies the most vulnerable areas, in order to develop appropriate management of prevention and awareness of the public regarding the hazards to which they are exposed.

Keywords: Vulnerability, hazard, risk scenarios, prevention .

1. Introducción

El Perú está situado en una zona de alta actividad sísmica, ya que se encuentra en el denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”. La fricción de la placa Sudamericana y la placa de Nazca, debido al proceso de subducción entre ambas, significa la acumulación de tensión, y cuando ésta se libera, se producen sismos de grandes magnitudes e intensidades de sacudimiento del suelo.

A consecuencia de los movimientos sísmicos, en las ciudades costeras se producen severos daños que son difíciles de remediar, poniendo a prueba la capacidad de resiliencia de los elementos expuestos (población, infraestructura, actividades económicas, entre otros). Una de las razones de estos daños es que las ciudades están ubicadas en zonas con alto peligro sísmico, y esto conlleva el riesgo de sufrir grandes pérdidas humanas, materiales y económicas. Una de estas ciudades es Santa María del Mar.

2. Definiciones básicas

2.1 Escenario de riesgo

El escenario de riesgo se construye sobre la caracterización del peligro, utilizando datos y/o registros históricos de la ocurrencia del fenómeno a estudiar, como magnitud, intensidad, recurrencia, etc. Así como el análisis de la vulnerabilidad de los elementos expuestos: Integración de información estadística de los daños y/o pérdidas de población damnificada, fallecida, estructura dañada, etc. Lo que ayudará a elaborar el escenario probable y sus posibles consecuencias.

Un escenario no es un pronóstico específico por sí mismo, es una plausible descripción de lo que puede ocurrir. Los escenarios describen eventos, tendencias y su evolución, lo que ayuda a dar recomendaciones en lo referente a la ejecución y/o implementación de medidas estructurales y no estructurales de prevención y/o reducción de riesgos; por lo tanto, es necesario conocer los conceptos de algunos de los temas básicos a emplear:

- **Peligro**

Es un agente agresor externo socio ambiental potencialmente destructivo con cierta magnitud dentro de un cierto lapso de tiempo y en una cierta área.

Fenómeno social que puede causar heridos, muerte y daños graves.

- **Vulnerabilidad**

Es el grado de pérdida de un elemento dado o conjunto de elementos de riesgo, como resultado de la presencia de un peligro ambiental y/o fenómeno natural de magnitud determinada.

- **Riesgo**

Es el grado esperado de pérdida de los elementos en riesgo debido a la presencia de peligros. Puede ser expresado en términos de pérdidas, personas heridas, daños materiales e interrupción de actividades económicas.

3. Ubicación del área de estudio

El distrito de Santa María del Mar es uno de los 43 distritos de la provincia de Lima, limita al Norte con el distrito de San Bartolo, al Este con Cañete, al Sur con el distrito de Pucusana y al Oeste con el Océano Pacífico. Está conformado por 2 zonas (Programa Municipal Villa Mercedes y la Urbanización Santa María del Mar, incluida la zona del Morro) (Figuras 3 y 4). Su superficie es de 9.81 Km², según el Instituto de Estadística e Informática (INEI); al año 2015, Santa María del Mar cuenta con 1608 habitantes.



Figura 1. Mapa de ubicación del distrito de Santa María del Mar.

Aspectos geológicos

Según el mapa geológico del distrito, en su área afloran secuencias sedimentarias del terciario inferior, intrusivas del terciario superior y varios depósitos cuaternarios. Las secuencias sedimentarias corresponden a la Fm. Pamplona, compuestas de lutitas y calizas intercaladas con niveles volcánicos aflorando en todas las colinas que rodean al distrito.

Asimismo, desde el punto de vista geodinámico, en Santa María del Mar las colinas están conformadas por rocas ígneas sedimentarias y el borde litoral conformado por materiales marinos y aluviales que se presentan a modo de terrazas muy bien diferenciadas en su emplazamiento dentro de las quebradas para el caso de los aluviales y el borde litoral para las marinas. Una última unidad son los conos aluviales que se extienden hacia el extremo Este del distrito, los mismos que están conformados por gravas arenosa.

4. Zonificación sísmico-geotécnica

Este trabajo fue realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el año 2010. Como resultado, se determinó que el distrito de Santa María del Mar presenta un suelo de tipo S1 (roca o suelos muy rígidos), según la Norma E-030.

- **ZONA I:** Esta zona está conformada por afloramientos rocosos (sedimentaria-ígnea) a los cuales subyace suelos gravosos pobremente gradados con materiales aluviales y marinos formando terrazas emplazadas dentro de las quebradas cuyos periodos varían entre 0.1 y 0.2 s. Se observa la concentración de periodos de vibración de 0.2 s en el extremo norte y sur del área del distrito, el primero rodeado con periodos de 0.1s., lo cuales disminuyen rápidamente en amplitud conforme se tiende a los lomeríos. Para un 40% del área, no se ha identificado periodos dominantes, lo cual sugiere que el suelo es estable (área achurada).

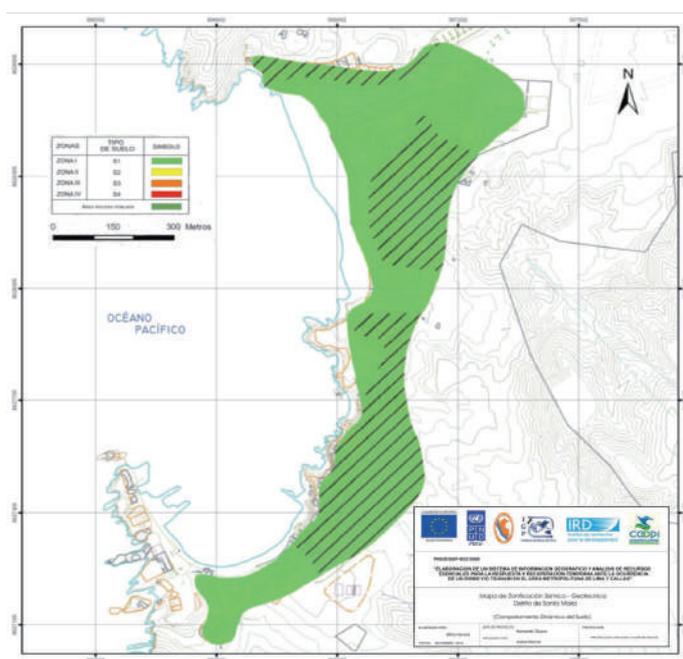


Figura 2. Mapa de Zonificación Sísmico-Geotécnica.

5. Metodología

5.1. Trabajo en campo

Con la finalidad de identificar la vulnerabilidad física de las viviendas, se realizó una ficha, en la cual se registró el tipo de vivienda, estructura, configuración geométrica, tipo de uso, material predominante, número de pisos, estado de conservación y antigüedad.

Además se encuestó a los pobladores para conocer su capacidad de resiliencia ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud y un consecuente tsunami.

Con la información recolectada se generó una base de datos utilizando el programa ArcGIS, la cual permitirá la elaboración de mapas temáticos de peligro, vulnerabilidad y riesgo.

5.2. Evaluación multicriterio

Una de las características principales de las metodologías multicriterio es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación. La particularidad de cada metodología multicriterio está en la forma de transformar las mediciones y percepciones en una escala única, de modo de poder comparar los elementos y establecer ordenes de prioridad. Una de las metodologías multicriterio más utilizadas, con fundamentos matemáticos, es el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process: AHP), desarrollado por Thomas Saaty (1980). Se basa en la importancia entre las variables, para lo cual se genera un matriz de cada una de ellas; al final se tendrá una relación de consistencia, siendo "i" y "j" los criterios y/o alternativas respectivamente. Las equivalencias e interpretaciones son detalladas en la Tabla I.

Tabla I: Escala de Saaty

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	"i" es igualmente importante que "j"	Ambos elementos contribuyen con la propiedad en igual forma.
3	"i" es moderadamente importante que "j".	La experiencia y el juicio favorece a un elemento sobre el otro.
5	"i" es fuertemente o esencialmente importante que "j".	Un elemento es fuertemente favorecido.
7	"i" es muy fuertemente importante que "j".	Un elemento es muy fuertemente dominante.
9	"i" es extremadamente importante que "j".	Un elemento es favorecido, por lo menos con un orden de magnitud de diferencia.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Usados como valores de consenso entre dos juicios.

6. Resultados Preliminares

En el distrito de Santa María del Mar se registraron 540 lotes y de ellos, 445 están construidos, 83 están sin construir, 12 están en construcción y/o son áreas verdes que comprenden 2 zonas: Programa Municipal Villa Mercedes y Urbanización Santa María del Mar, incluida la zona del Morro.

Los resultados obtenidos son:

Tipo de vivienda: En el distrito, el tipo de vivienda predominante es la casa habitación con un 57%, con predominancia en la zona de Villa Mercedes; por el contrario, en la zona de la Urbanización de Santa María del Mar predominan las viviendas multifamiliares (18%) y edificios (17%).

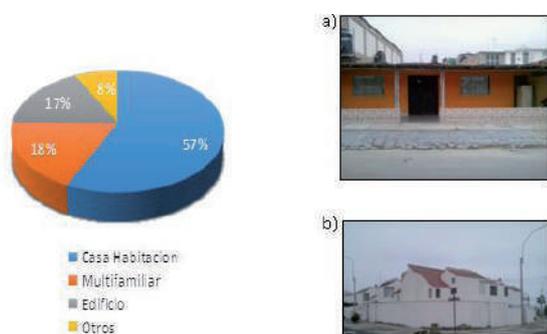


Figura 3. Porcentaje por el tipo de viviendas. a) Casa habitación (Villa Mercedes). b) Multifamiliar (Urb. Santa María)

Tipo de uso: El 93% de las edificaciones de Santa María del Mar son utilizadas como viviendas. En la Urb. Santa María se tienen clubes privados como el club Árabe y el club Esmeralda. Por otra parte la mayoría de los restaurantes se ubican en Villa Mercedes. También existen 2 postas médicas, uno en cada zona y de otros usos como la Iglesia, comisaria, talleres, entre otros.

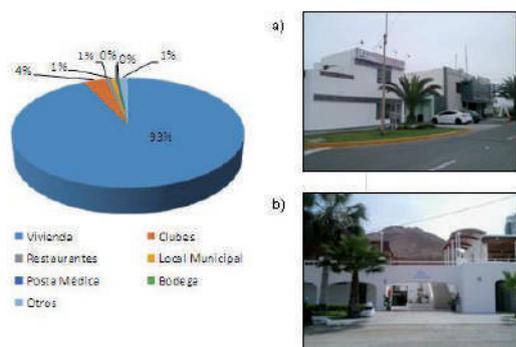


Figura 4. Porcentaje de viviendas por el tipo de uso. a) Comisaria y Posta médica. b) Club Esmeralda, sede náutica y pesca.

Material predominante: El 74% de las viviendas son construidas con albañilería confinada (muros portantes, vigas y columnas), el 24% está construido de concreto armado y el 2% son estructuras de madera (prefabricadas) presentes en Villa Mercedes.

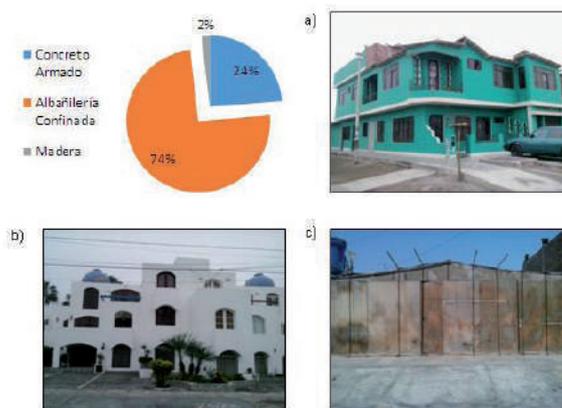


Figura 5. Porcentaje de viviendas por el material predominante. a) Vivienda de albañilería confinada. b) Vivienda de concreto armado. c) Vivienda

Estado de Conservación: De los 445 lotes construidos en Santa María del Mar, el 11% está en muy buenas condiciones, ya que no presentan grietas visibles, el 86% está en buenas condiciones visibles y el 3% de las viviendas presenta un regular estado, según se observa de las visitas de campo.

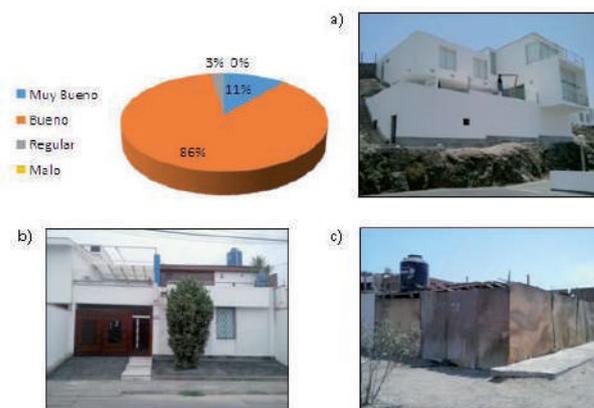


Figura 6. Porcentaje de Viviendas por estado de conservación. a) Vivienda en muy buenas condiciones. b) Vivienda en buenas condiciones. c) Vivienda en regular condiciones.

Antigüedad: El rango de antigüedad de las viviendas está entre los 3 a 50 años, solamente 6 viviendas están en el rango de 0 a 2 años. Los datos de antigüedad fueron proporcionados por la Municipalidad de Santa María del Mar según el catastro vigente. También existen viviendas mayores a 50 años, todas ellas ubicadas en la zona del balneario.

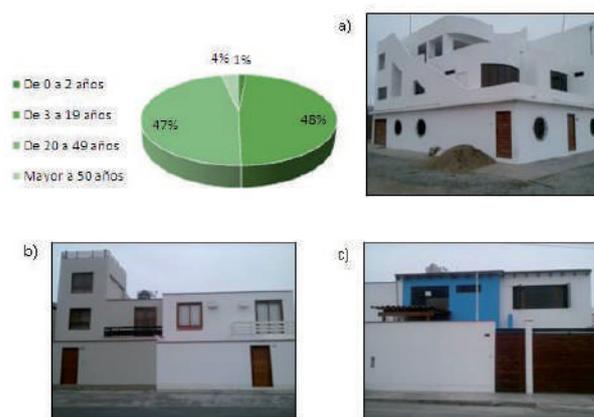
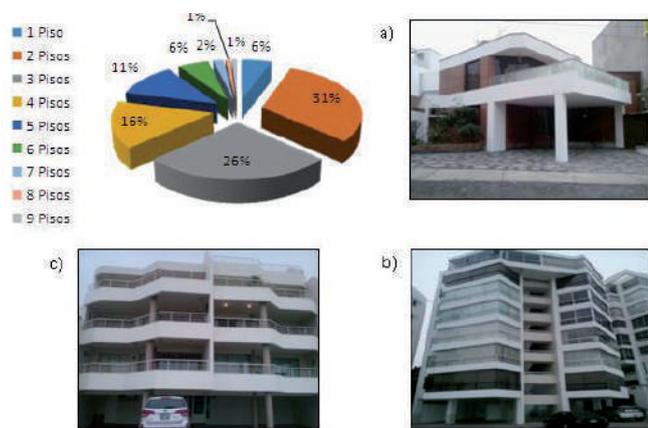


Figura 7. Porcentaje de viviendas por antigüedad. a) Vivienda de 3 a 19 años. b) Vivienda de 20 a 49 años. c) Vivienda mayor a 50 años.

Número de Pisos: En Santa María del Mar, el 31% y 26% de viviendas tienen 2 y 3 pisos respectivamente. En la Urb. Santa María se tiene viviendas de 4 y 5 pisos, y en la zona del balneario, las viviendas son de 6 a 9 pisos.



un evento sísmico, utilización de mensajes de texto o mensaje de voz gratuito que se activa en situaciones de emergencia, ambos promovidos por el INDECI y el MTC.

De las 95 personas encuestadas, el 95% sabe cómo reaccionar en caso se presente un sismo, y un 85% desconoce el servicio de mensaje de voz gratuito.

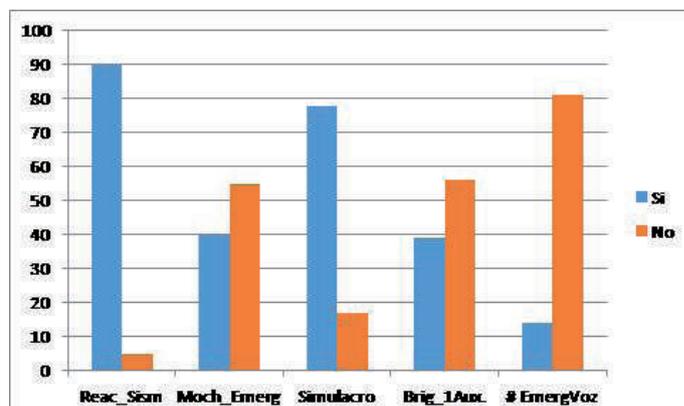


Figura 8. Porcentaje de Viviendas por número de pisos. a) Vivienda de 2 pisos. b) Edificio de 4 pisos. c) Edificio de 8 pisos.

Configuración Geométrica: Cuando una vivienda tiene una configuración geométrica simétrica y regular (en planta y elevación), responde favorablemente a los movimientos sísmicos. De acuerdo a esto, en Santa María del Mar, el 53% de las viviendas en planta es regular y en elevación, solamente el 11%.

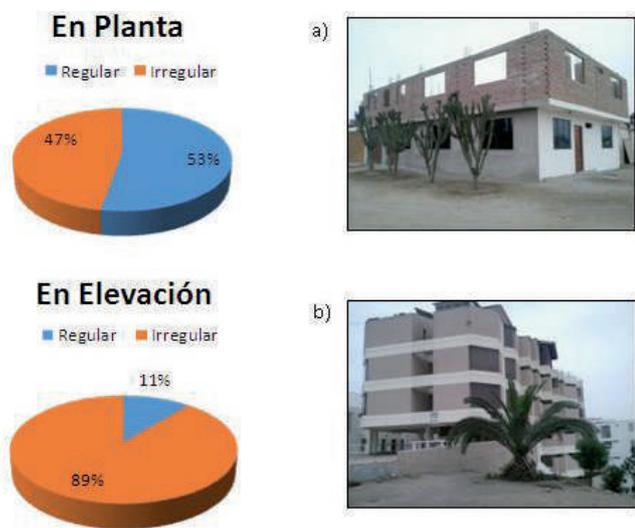


Figura 9. Porcentaje de Viviendas según su geometría. a) Vivienda Conf. Geo. Regular. b) Vivienda Conf. Geo. Irregular.

6.1. Resiliencia

Esta encuesta realizada en Santa María del Mar tiene como objetivo conocer la capacidad de resiliencia que tiene las personas ante la ocurrencia de un desastre natural, por ejemplo, si sabe cómo reaccionar ante un sismo, identificación de las zonas seguras de su vivienda y posterior evacuación, si cuentan con una mochila de emergencia, participación de simulacros, conocimiento sobre alguna brigada de primeros auxilios en el distrito y/o personas que le puedan ayudar cuando se presente

7. Conclusiones

Conocida la calidad de suelos en Santa María del Mar es de importancia evaluar el comportamiento de los elementos expuestos ante la posible ocurrencia de un sismo. En tal sentido, el trabajo de campo realizado para el acopio de información sobre las características de las viviendas en Santa María del Mar, ha permitido observar la pluralidad de viviendas sea por el material empleado en su construcción, número de pisos, estructura, configuración geométrica, tipo de uso, estado de conservación y antigüedad. Estas características permiten concluir que en la zona observada de Santa María del Mar, el riesgo es medio pero se requiere realizar mayor análisis y es el objetivo de la presente investigación.

8. Agradecimiento

Agradezco al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por acogerme en sus instalaciones como tesista y al Dr. Hernando Tavera por darme la oportunidad de crecer como profesional y por su comprensión y asesoramiento.

9. Bibliografía

Tavera, H., & Bernal, I. (2010). *Zonificación Sísmico - Geotécnica para el Distrito de Santa María*.

INDECI (2006). *Manual básico para la estimación del riesgo*.

Saaty, T. (1988), "The analytical Hierarchy Process" McGraw Hill.

CENEPRED (2014). *Manual de Evaluación de Riesgos originados por fenómenos naturales*.

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, Dirección de construcción (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E- 030*.

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN SÍSMICA SUPERFICIAL EN LA REGIÓN SUR DEL PERÚ

ANALYSIS OF THE SHALLOW SEISMIC DEFORMATION
IN SOUTHERN REGION OF PERU

Ursula Ines Apaza Medina

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

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Unidad de Sismología

Resumen

Usando datos sísmicos del catálogo del IGP para el periodo 1980 –2015, se realizó el análisis de la distribución espacial de la sismicidad superficial, a fin de definir las fuentes sismogénicas presentes en la región sur. Los resultados muestran que a profundidades menores a 60 km, la sismicidad se concentra en dos franjas: la primera, en el borde occidental de la zona costera, asociada con el proceso de convergencia de la placas de Nazca y Sudamericana, y la segunda sobre la Cordillera Andina relacionada con la reactivación o generación de nuevas fallas geológicas. La correlación entre las fallas y la distribución espacial de los sismos sugiere que al menos 9 de ellas se encuentran sísmicamente activas, lo cual representa un alto riesgo para las ciudades cercanas.

Palabras clave: Deformación reciente, estructuras activas, fallas, sur de Perú, sismos.

Abstract

Using the seismic catalog of IGP for the 1980 – 2015 period, the spatial superficial seismicity analysis was made in order to define the seismogenic sources on the south Peruvian region. The results shows that at depths of less than 60 km, the seismicity are concentrated in two belts: the first one is located on the occidental edge of the coastal zone, associated with the convergence of the Nazca and South American plates; and the second is related to the Andean Cordillera and the reactivation or generation of new geologic faults. The correlation between the faults and the seismic spatial distribution suggest that at least 9 of them are seismically actives, representing a high risk to nearby cities.

Keywords: Earthquakes, Southern Peru, faults, recent stresses, active structures.

1. Introducción

La acumulación de esfuerzos en el borde occidental del Perú, debido a la subducción de la placa de Nazca y Sudamericana, ha dado lugar al levantamiento de la corteza para dar forma a la Cordillera de los Andes, la misma que al deformarse internamente dio origen a un gran número de sistemas de fallas activas situadas en los bordes y sobre la Cordillera. Los estudios geológicos y tectónicos han permitido conocer sus características y geometría en superficie; sin embargo, estos estudios pueden ser complementados con el conocimiento que podría proporcionar sobre ellas el campo de la sismología. En este contexto, la distribución espacial de los sismos en el Perú es por demás compleja; sin embargo, existe consenso en que los sismos tienen básicamente su origen en dos procesos tectónicos, la subducción o convergencia de placas y la deformación superficial de la corteza. Cada sismo mayor implica largos periodos de deformación y acumulación de esfuerzos que, al momento de ser liberados, producen deslizamientos repentinos que se traducen en sismos de gran magnitud. Sin embargo, a diferencia de los sismos de subducción, los corticales presentan periodos de recurrencia muy largos y mientras tanto se va produciendo una deformación lenta con la consecuente generación de sismos de pequeña magnitud. En este estudio se evalúa y analiza la actividad sísmica superficial ocurrida en la zona sur para el periodo 1980 – 2015 a fin de definir las zonas de deformación cortical presentes en la región.

Datos

La base de datos utilizada considera 6591 eventos sísmicos con profundidades superficiales e intermedias (<300 Km) y magnitudes ≥ 4 para el periodo 1980 a 2015. Esta base de datos proviene del catálogo sísmico del Perú.

2. Análisis espacial de la sismicidad

A fin de analizar y evaluar la distribución espacial de los sismos en el Sur del Perú, tanto en superficie como en profundidad, se han elaborado mapas y perfiles de eventos sísmicos superficiales ($h \leq 60$ km) e intermedios ($61 \leq h \leq 300$ km) con $M \geq 4.0$ para el periodo de 1980 – 2015.

2.1. En superficie

De manera general, los sismos superficiales se distribuyen formando dos grupos. La sismicidad del primer grupo está asociada principalmente al proceso de subducción en sus primeros niveles de profundidad. Un segundo grupo de sismos con foco superficial se localiza de forma dispersa sobre la Cordillera Andina poniendo en evidencia

su origen; es decir, deformación netamente continental como efecto secundario del proceso de subducción, el levantamiento de los Andes y de la subsidencia del escudo Brasileño.

En el Sur del Perú los sismos intermedios están asociados a los procesos de fricción y deformación interna de la placa subducente, por esta razón podrían ser considerados como indicadores directos de la geometría de la placa de Nazca que se encuentra en el proceso de subducción. Los sismos se distribuyen principalmente sobre todo el Altiplano y dispersos en la zona sub-andina.

2.2. En profundidad

El interés de analizar y evaluar la distribución de los sismos en función de la profundidad de sus focos, se debe a que resulta de importancia definir la superficie de contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana y la forma de la primera a diversos niveles de profundidad. Asimismo, este tipo de información permite conocer de manera aproximada la profundidad de los principales sistemas de fallas presentes en la región.

3. Geometría de la subducción

Desde el punto de vista observacional, la subducción es analizada a partir de las tendencias medias de las secciones verticales perpendiculares a la fosa. Estas tendencias de sismicidad muestran como la superficie de contacto de placas y la forma de la placa de Nazca, cambia de Norte a Sur y su buzamiento cambia de casi horizontal a una caída de aproximadamente 30° mostrando la presencia de una subducción normal, sugerida por diversos autores como Grange et al (1984), Hasegawa y Sacks (1981) y Schneider y Sacks (1987) (Figura 1).

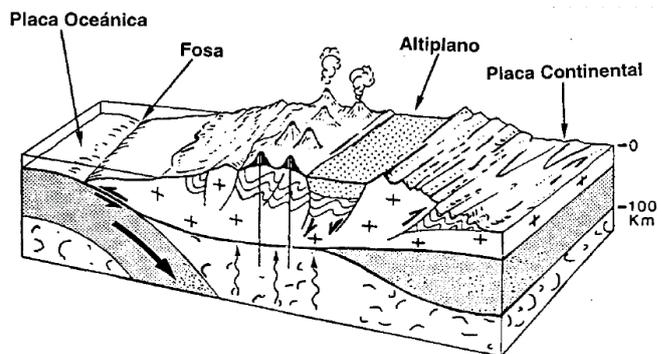


Figura 1: Esquema que muestra la geometría de la subducción para la región sur del Perú (Mattauer, 1989).

4. Deformación superficial

Los procesos de ruptura que se desarrollan debido a la deformación cortical pueden ser analizados de diversas formas. En este caso, el mecanismo focal es una representación gráfica de las soluciones de la ruptura que origina un sismo y de la configuración de los esfuerzos tectónicos en el área; es decir, un compendio de información que describe el posible mecanismo de falla en la fuente o foco donde se libera la energía en forma de ondas sísmicas.

La caracterización precisa del mecanismo focal de un terremoto proporciona información muy importante de las estructuras activas: la orientación del plano de falla, el sentido y orientación del movimiento de la falla, y por supuesto, el tipo de falla que produjo el terremoto: Normal, inversa, transcurrente o de desgarre (Figura 2a). Un ejemplo en el Sur del Perú es el sismo ocurrido el 27 de setiembre de 2014 en Paruro (Cuzco) que presentó una magnitud de 5.1 ML y según el estudio realizado por Tavera et al. (2014) el mecanismo focal del sismo muestra un plano con orientación ONO-ESE y buzamiento en dirección SO con un ángulo de 57°, sugiriendo un proceso de ruptura de tipo extensional. La ubicación del epicentro del sismo sugiere que este tuvo su origen en la reactivación de la falla Paruro (dentro del sistema de fallas del Cuzco). De este modo, un mapa de mecanismos focales debe traducirse rápidamente a un mapa que describe los mecanismos de reactivación de fallas que se mueven bajo un campo de esfuerzos coherente (Figura 2b).

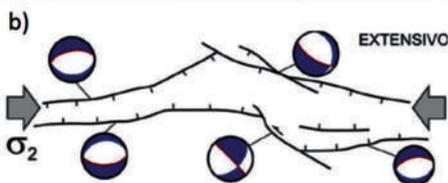
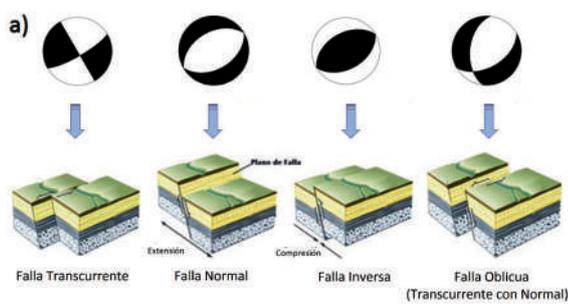


Figura 2: Relación entre mecanismos focales y estructuras activas a) Representación gráfica y sus correspondientes fallas generadoras. b) Modelo del Régimen de esfuerzos presente en la región sur del Perú.

En el Sur del Perú, el proceso de deformación de la corteza continental, como consecuencia del levantamiento de la Cordillera de los Andes, ha dado origen a la formación de diferentes sistemas de fallas. Según los datos compilados por Macharé et al. (2003), y los trabajos recientes realizados por Carlotto et al. (2011) y Benavente et al. (2013), los sistemas de fallas en la región sur del Perú deben

su origen a procesos extensivos; es decir fallas de tipo normal y se encuentran ubicados principalmente al pie de algunos nevados importantes; como se muestra en la Figura 3, se ha identificado 9 sistemas de fallas principales.

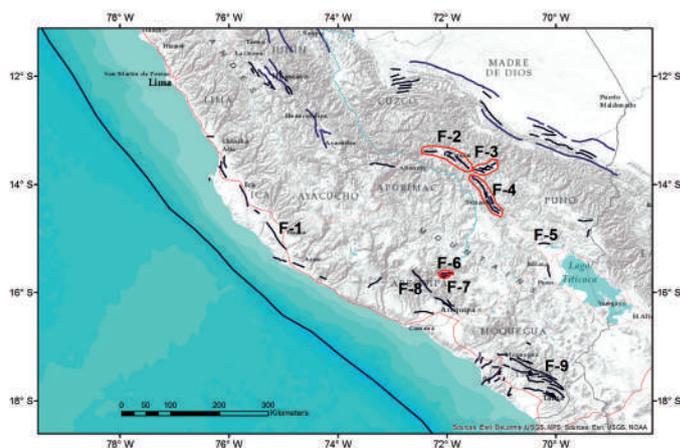


Figura 3: Ubicación de los principales sistemas de fallas presentes en la región sur (Extraído de Macharé et al., 2003, Carlotto et al., 2011 y Benavente et al., 2013): F-1: Falla Marcona, F-2: Sistema de fallas del Cuzco, F-3: Sistema de fallas de Ocongate, F-4: Zona de fallas del Vilcanota, F-5: Falla Viscachani, F-6: Falla Trigal, F-7: Falla Solarpampa, F-8: Falla Lluclla, F-9: Falla Toquepala

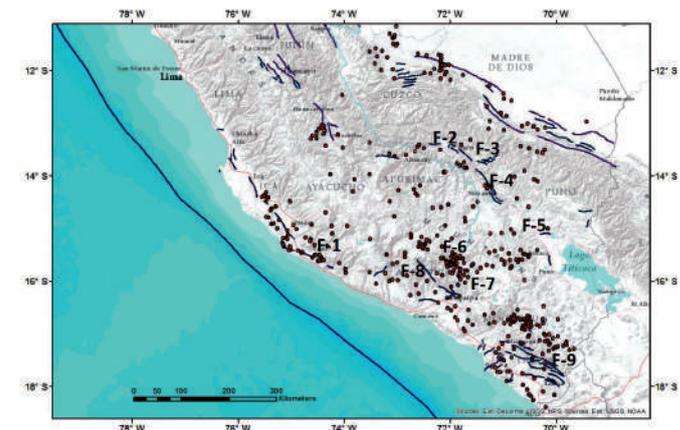


Figura 4: Distribución espacial de la sismicidad superficial asociada directamente al proceso de deformación cortical.

5. Resultados

La distribución espacial de la sismicidad con foco superficial (Figura 4) ha permitido identificar las áreas de mayor deformación en región sur:

- En la falla de Marcona (F-1), los sismos se encuentran delineando su traza; siendo el sismo de mayor magnitud de 5.5 Mw y foco a 26 km de profundidad.
- La distribución de los sismos en el sistema de fallas del Cuzco (F-2) no muestra un patrón de alineamiento en superficie. Los hipocentros sugieren que posiblemente la profundidad máxima de la falla es de 51 km, con sismos de magnitudes del orden de 5.2 Mw.

- En la zona de fallas del Vilcanota (F-4) se presenta actividad sísmica puntual con magnitudes no mayores a 4.7 mb y profundidades máximas de focos de 55 km.
- En las fallas Trigal y Solarpampa (F-6 y F-7) se concentra un gran número de sismos, y en ellas ocurrieron los sismos con las magnitudes más altas de la región sur. En 1998 un sismo de 5.8 Mw con foco a 33 km de profundidad y en el 2013 uno de 6.0 Mw con foco a 7 km de profundidad.
- La distribución de los sismos en la falla Lluclla (F-8) presenta un pequeño patrón de alineamiento a ambos lados de la traza de falla. El sismo de mayor magnitud es de 4.9 mb con foco a 39 km de profundidad.
- En la zona de Moquegua y Tacna, se encuentra un importante número de fallas, siendo la más importante la falla Toquepala (F-9). El sismo de mayor magnitud ocurrido en esta zona fue en agosto del 2003 con un foco a 32 km de profundidad y magnitud de 5.7 Mw.
- Los sismos con foco intermedio tienen relación directa con el proceso de deformación de la placa de Nazca por debajo del continente. La distribución de los sismos en profundidad sugieren que la placa de Nazca subduce por debajo de la Sudamericana de modo normal con un ángulo de 30°.

7. Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Hernando Tavera, Director de la Unidad de Sismología de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP, por brindarme la oportunidad de unirme a su equipo de trabajo, por su asesoramiento y múltiples recomendaciones para la elaboración del presente estudio.

8. 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, 169 pp.
- Grange, F. et al (1984). *Tectonic implications of the microearthquake seismicity and fault plane solutions in southern Peru*. *J. Geophys. Res.* 89, 6139–6152.
- Sébrier, M. et al (1985). *Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of South Peru*. *Tectonics-An agu Journal.* 4, 739–780.
- Sébrier, M. et al (1988). *Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present*.
- Suárez, G. et al, (1983). *Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting, and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador, and southern Colombia*. *J. Geophys. Res.* 88, 10403–10428.
- Tavera, H. y Buforn, E. (1998) *Sismicidad y sismotectónica del Perú*, v 10, 187-219 pp.
- Tavera, H. (1998). *Mecanismo focal de terremotos en el Perú y sismotectónica*. Ph.D. Tesis, Universidad Complutense de Madrid, España.
- Tavera, H. et al (2012) *Sismo de Ica del 30 de Enero del 2012, Aspectos Sismológicos*.
- Vila, K. (2014). *Determinación 3D de la Geometría de la Placa de Nazca en el Perú y Análisis del Estado de Esfuerzos*, Tesis de Ingeniero Geofísico, UNSA, 114 pp.

En síntesis, la actividad sísmica se presenta con pequeños patrones de alineamiento pero en general de forma muy dispersa no superando sus hipocentros los 55 km de profundidad.

Así también se visualizan dos agrupamientos en el área NE (Madre de Dios y al Norte de Cuzco) estando relacionados posiblemente con fallamiento inverso por intrusión del escudo brasileño. Otro agrupamiento está presente al Norte de la falla Toquepala el cual probablemente se encuentra relacionado a fallamiento normal antes del cuaternario.

6. Conclusiones

- En el interior del continente, la distribución de los sismos indica que las deformaciones superficiales se producirían hasta profundidades de 55 km en promedio, delimitando 9 sistemas de fallas principales de tipo normal y dos probables fallamientos inversos en Madre de Dios y al Norte de Cuzco y un fallamiento normal, datado antes del cuaternario, al Norte de la falla Toquepala.
- La distribución espacial de los sismos en el Sur del Perú es por demás compleja; sin embargo, ha sido posible identificar dos fuentes sismogénicas para sismos superficiales, la primera asociada al del proceso de subducción y la segunda fuente a los principales sistemas de fallas presentes en la región.

GEOLOGÍA – GEODINÁMICA DE LOS DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES CON BASAMENTO ROCOSO METAMÓRFICO EN LA LOCALIDAD DE KELLCAYBAMBA DISTRITO DE OCOBAMBA, PROVINCIA DE LA CONVENCION, REGIÓN CUSCO

GEOLOGY – GEODYNAMICS OF THE ROTATIONAL SLIDES WITH METAMORPHIC BEDROCK IN THE TOWN OF KELCAYBAMBA, PROVINCE OF LA CONVENCION, CUSCO REGION

Roy Jack Arone Padilla

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Escuela Académica de Ingeniería Geológica
Jack.roy.a@gmail.com

Asesor: Msc. Juan Carlos Gomez

Unidad de Geodinámica

Resumen

Los deslizamientos son uno de los principales peligros naturales que ocasionan pérdidas humanas y económicas en todo el mundo, esto conlleva al estudio de las causas que los generan. Los deslizamientos se pueden producir entre un contacto suelo-suelo o roca-suelo, estos últimos se originan en diferentes tipos de basamentos rocosos (ígneo, metamórfico y/o sedimentario) y conforman el principal factor condicionante. El contacto roca-suelo, está delimitado por un horizonte de transición llamado saprolito de composición variable dependiendo el tipo de litología de donde provengan.

Para este caso, se ha tomado el deslizamiento suscitado en la localidad de Kelcaybamba, distrito de Ocobamba, provincia de La Convención, región Cusco. El deslizamiento es de tipo rotacional cuya superficie de falla cóncava se desarrolla en el horizonte arcilloso originado por la meteorización y/o alteración del basamento metamórfico de naturaleza pizarrosa.

Un basamento metamórfico pizarroso de edad Paleozoica, presenta como característica principal un alto grado de fracturación y esquistosidad (arreglo paralelo de minerales), que al contacto con el agua se desintegran formando arcillas. El análisis de mecánica del suelo en los materiales que conforman los saprolitos de origen metamórfico pizarroso, muestran que el límite de Atterberg presenta plasticidad y humedad alta.

La morfología del basamento y el nivel freático se determinaron mediante un estudio geofísico de resistividad eléctrica, que delimitó la napa freática entre 10 a 13 metros de profundidad y permitió conocer el contacto entre la roca y el suelo a 15 metros de profundidad.

Finalmente, se correlacionó el caso la localidad de Kelcaybamba con deslizamientos de otros lugares del país, que se desarrollan sobre basamento metamórfico pizarroso: La localidad de Carampa, distrito de Pazos, provincia de Tayacaja, Región Huancavelica y la localidad de Chango, distrito de Chacayán, provincia Daniel Alcides Carrión, región Cerro de Pascor

Palabras clave: Deslizamiento, meteorización, basamento metamórfico, horizonte arcilloso.

Abstract

Landslides are one of the major natural hazards that cause human and economic losses worldwide; this entails the study of the causes that generate them. Landslides can occur between a soil-soil or rock-soil contact, the last ones originate from different types of rock foundations (igneous, metamorphic and / or sediment) and constitute the main determining factor. The rock-soil contact, is defined by a transition called saprolite horizon variable composition depending on the type of lithology they come from.

In this case, the landslide that happened in the town of Kelcaybamba, Ocobamba district, province of La Convencion, Cusco region it has been taken as a reference. The slide is rotational type whose concave surface fault develops in the clay horizon caused by weathering and / or alteration of the metamorphic basement of slate nature.

Analysis of soil mechanics in materials that make up the slate saprolites of metamorphic origin, show that the limit has Atterberg plasticity and high humidity. The morphology of the basement and the water table were determined by electrical resistivity geophysical survey which delineated the groundwater between 10-13 meters deep and allowed to know the contact between rock and soil to depths of 15 meters.

Finally, the case of the town of Kelcaybamba case it was correlated with slides elsewhere in the country, which develop on slate metamorphic basement: The town of Carampa, Pazos district, Tayacaja province, Huancavelica Region and the town of Chango, Chacayán district, province of Daniel Alcides Carrion Cerro de Pasco region.

Keywords: Landslide, weathering, metamorphic basement, clay horizon

1. Introducción

El territorio peruano presenta una geodinámica externa compleja por su morfología generada durante el emplazamiento de la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental y su diversidad de rocas, suelos, múltiples climas y pisos ecológicos que aceleran los diversos procesos geodinámicos.

Uno de los productos de los procesos geodinámicos que se generan son los deslizamientos de tierra, que son desplazamientos de masa de materiales (rocas y suelos) pendiente abajo, ocasionados por factores condicionantes y desencadenantes. Entre los primeros, se encuentran las características geológicas del terreno: geomorfología, vegetación, topografía etc; mientras que, como agentes detonantes, se encuentran la actividad sísmica, las precipitaciones pluviales y la actividad antrópica.

En el presente trabajo de investigación se analiza la génesis de un deslizamiento de materiales inconsolidados que suprayace a un basamento metamórfico, en donde la presencia de fracturas y esquistosidad del basamento, se encuentra altamente meteorizado y alterado, formando así un horizonte saprolito que genera la inestabilidad de la ladera, al estar interactuando con el nivel freático, sirviendo este horizonte como superficie de falla.

El objetivo principal es conocer la influencia del horizonte meteorizado y/o alterado que suprayace al basamento metamórfico pizarroso (subyace al material inconsolidado superficial), como un factor que genera la inestabilidad para la ocurrencia del deslizamiento.

La elaboración del trabajo de investigación y la recopilación de datos fueron realizadas por la Unidad de Geodinámica del IGP a solicitud de la municipalidad distrital de Ocobamba, como apoyo a la gestión de riesgo de la población afectado por este tipo de deslizamiento.

El trabajo de campo se realizó en 5 días, donde se desarrolló la caracterización geológica, geodinámica, geotécnica y geofísica.

1.1 Metodología

Para el desarrollo de la investigación se realizaron las siguientes actividades:

- Caracterización física del deslizamiento: se cartografiaron los rasgos geológicos, geodinámicos, estratigráficos, estructurales y sedimentológicos, a escala 1:5000, lo que ha permitido sistematizar la información en una base de datos usando un Sistema de Información Geográfica (SIG).

- Delimitación del horizonte de transición roca-suelo en base al registro estratigráfico de las calicatas, obteniéndose las propiedades físicas de los suelos con el análisis de laboratorio de mecánica de suelos: granulometría, límites de Atterberg y capacidad portante del suelo.

- Estimación del espesor del horizonte saprolito, la morfología del basamento y la profundidad del nivel freático; mediante ensayos geofísicos de resistividad eléctrica.

- Correlación de los elementos mencionados líneas arriba, en los deslizamientos de las localidades de Chango y Carampa con respecto a Kellcaybamba.

1.2 Características del área de estudio

La localidad de Kellcaybamba distrito de Ocobamba, provincia de la Convención, región Cusco, se encuentra ubicada en las coordenadas UTM (datum WGS 84 zona geodésica 18s) 777039 E, 8575642 N y en la cota 1466 m.s.n.m. (Figura 01)

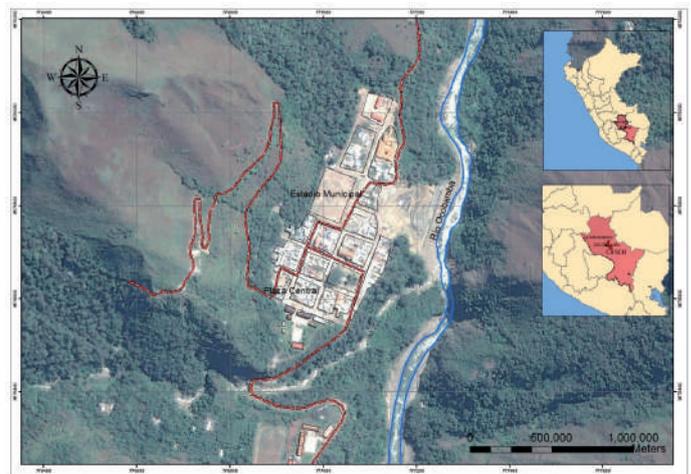


Figura 01: Ubicación de la localidad de Kellcaybamba, tomada del Google Earth.

Este poblado se asienta en la parte media de la ladera Oeste de la Cordillera Oriental, en la quebrada Piscontilla, en el valle del río Ocobamba. Presenta un relieve abrupto, por su fuerte pendiente y litología compuesta de rocas metamórficas pizarrosas fracturadas correspondientes a las unidades geológicas del Grupo San José (Formación Iparo del Ordoviciano inferior), que favorece la ocurrencia de este tipo de eventos.

El deslizamiento rotacional se encuentra ubicado en la parte baja de la quebrada Piscontilla, en la margen izquierda del río Ocobamba. Este evento abarca un área de aproximadamente 19 ha, y la evidencia superficial que presenta son las grietas tensionales (0.5

m ancho 0.5-1.0 m de profundidad y longitud de 25 m aproximadamente), y el material de suelo desplazado pendiente abajo hacia el río antes mencionado. La terraza aluvio-fluvial donde se asienta el poblado, tiene un espesor aproximado de 15 m delimitados con los ensayos de resistividad eléctrica.

2. Aspecto geomorfológico

El relieve está conformado por montañas que presentan gran elevación, cuyo desnivel de terreno es de 300 m aproximadamente, así como pendientes superiores a 30° y terrazas aluvio-fluviales cuya superficie presenta pendientes menores a 7°, delimitados por el río Ocobamba y la quebrada de Piscontilla (Figura 2).



Figura 02: Rasgos geomorfológicos predominantes en Kellcaybamba: zona montaña y terraza aluvio-fluvial donde se asienta el poblado.

3. Aspecto geológico

El estudio de la geología es importante para conocer las causas de la ocurrencia de los deslizamientos, puesto que proporciona información de la estratigrafía, estructuras, y condiciones sedimentológicas (Figura 3).

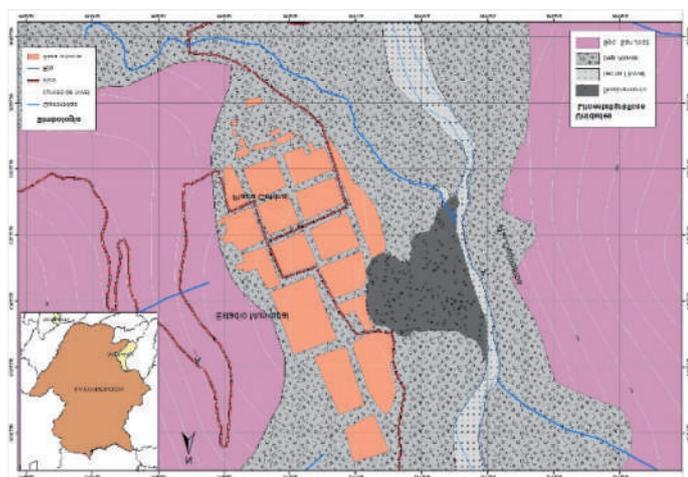


Figura 03: Rasgos litoestratigráficos de la localidad de Kellcaybamba: depósitos aluviales, fluviales y la predominancia de pizarras del Grupo San José.

La geología está conformada principalmente por rocas de origen metamórfico del Paleozoico, fueron modeladas por fases tectónicas distensivas y compresivas que se generaron hasta la actualidad, dando como resultado fracturamientos de las rocas y ordenamiento en láminas con superficies paralelas entre sí, de los minerales, generados por fuerzas tangenciales ligado a la esquistosidad.

La localidad de Kellcaybamba, de acuerdo a la cartografía geológica del cuadrángulo de Quebrada Honda (Salas, 1999), está constituida por la Formación Iparo del Grupo San José del periodo Ordovícico, está conformada por pizarras de color negro a marrón oscuro o gris acero, producto de la meteorización que afecta a las rocas aflorantes.

Las rocas pizarrosas se disponen en estratos métricos y laminados de 4 a 6 cm de grosor. Se encuentran intensamente fracturadas con un orientación N 355° y buzamiento 85° SE (Figura 4).



Figura 03: Rasgos litoestratigráficos de la localidad de Kellcaybamba: depósitos aluviales, fluviales y la predominancia de pizarras del Grupo San José.

La rápida desintegración y alteración de la pizarra (fracturada y con esquistosidad) se debe a su composición mineralógica, presenta micas como la moscovita, biotita y otros que contienen filosilicatos como la moscovita. Tienen estructura atómica en capas, en las cuales las moléculas de agua son fáciles de ingresar, transformándolas en arcillas, un ejemplo es la transformación de la moscovita a hidromoscovita, que presenta la estructura cristalina y viene hacer la transición hacia la estructura de la montmorillonita y/o caolinita, esto ocurre al contacto con el agua, producto de la hidratación (Figura 5).



Figura 05: Arcilla formada por la alteración de las pizarras en el localidad del Kellcaybamba.

La zona de meteorización y/o alteración (transición) del basamento metamórfico a materiales inconsolidados, está conformada por un horizonte saprolito, definido como el nivel de transición de roca a suelo, en donde los minerales primarios se han transformado in situ, con la preservación de estructura y la textura de la roca madre (Velbel, 1985).

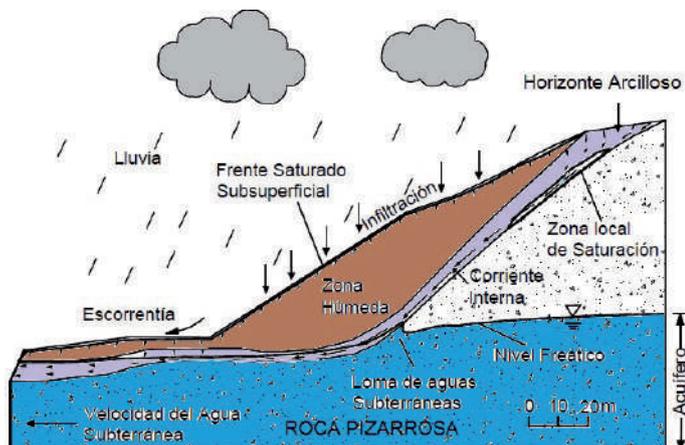


Figura 06: Perfil de roca a suelo, donde se observa horizonte arcilloso (saprolito) por alteración de la roca pizarra al contacto con el agua de infiltración.

El perfil de meteorización y alteración de la zona de transición roca a suelo (saprolito), es descrito por diferentes autores, en relación al tipo de litología, comparando las rocas metamórfica, ígneas, y sedimentarias, en donde delimitan en horizontes la zona de transición, Sowers (1988) compara el granito con la pizarra, donde la roca metamórfica presenta un saprolito muy bien delimitado a diferencia de la roca ígnea (granito). Deere y Patton (1971) definen éstos en horizontes de suelos residuales y de transición; detallando cada uno por el grado de meteorización (Figuras 7 y 8).

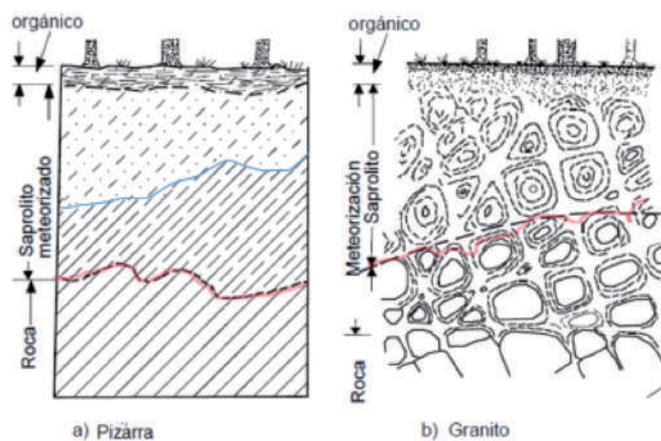


Figura 07: Los perfiles de meteorización varían de acuerdo con la litología. (a) Pizarras. (b) Granitos (Sowers, 1988).

PERFIL ESQUEMÁTICO	SOWERS (1951,1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)
	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS
ZONA SUPERIOR	COMPLETAMENTE ALTERADA	VI	SUELO RESIDUAL	HORIZONTE 1A
				HORIZONTE 1B
ZONA INTERMEDIA	PARCIALMENTE ALTERADA	V	COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE 1C (SAPROLITO)
				IIA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	PARCIALMENTE ALTERADA	IV	ALTAMENTE ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA
				III MODERADAMENTE ALTERADA
ROCA INALTERADA	ROCA INALTERADA	I	IA ROCA SANA	ROCA SANA
				II DEBILMENTE ALTERADA
				IB MUY POCO ALTERADA

Figura 07: Los perfiles de meteorización varían de acuerdo con la litología. (a) Pizarras. (b) Granitos (Sowers, 1988).

4. Aspecto geodinámico

Diferentes autores definen conceptualmente los deslizamientos como un movimiento de materiales inconsolidados (bloques de rocas y suelo), pendiente abajo sobre un superficie de falla. Estas pueden ser de tipo rotacionales (superficie de ruptura curva o cóncava) y translacionales (superficie de ruptura plana) (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Corominas y Yagüe, 1997).

Los mecanismos de los deslizamientos tal como los define Hutchinson (1988), son formas idealizadas a través de las cuales el material de una pendiente podría moverse. El mecanismo del deslizamiento dependerá de las propiedades geométricas, físicas y mecánicas (es decir, el tamaño de partícula, la presión de poros, la cohesión, ángulo efectivo de fricción interna, el espesor del suelo, ángulo de la pendiente, densidad aparente entre otros), hidrológicas (contenido natural de agua, el grado de la saturación) y la composición mineralógica de los suelos.

La disposición de los suelos en movimiento sobre una superficie de falla, como se observa en la figura 09, sobre una superficie de falla, está delimitadas por el horizonte arcilloso meteorizado y alterado de roca metamórfica (permeable o impermeable), interactuando con las fracturas de la esquistosidad y los suelos suprayacentes a este horizonte.

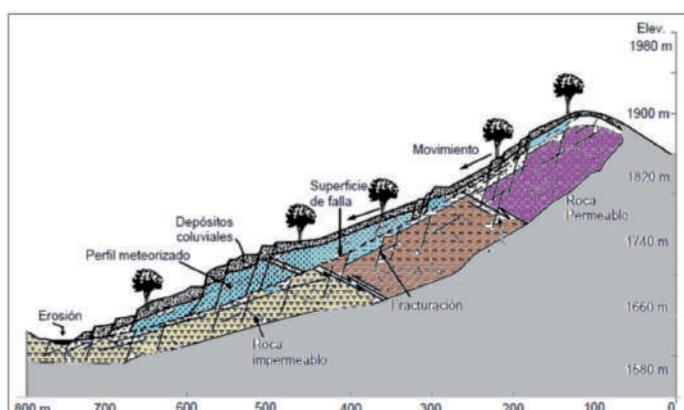


Figura 09: Localización de la superficie de falla, y las características litológicas, estructurales y perfil meteorizado donde se genera el movimiento (Suarez, 2009).

4.1 Correlaciones de los deslizamientos

Para entender la dinámica de los deslizamientos de materiales inconsolidados que suprayacen a basamentos metamórficos pizarrosos, se realizaron correlaciones con otros lugares del territorio peruano, por presentar características similares en su comportamiento y génesis. Específicamente se correlacionaron las localidades de Carampa, distrito de Pazos, provincia de Tayacaja, región Huancavelica y la localidad de Chango, distrito de Chacayán, provincia Daniel Alcides Carrión, región Cerro de Pasco con respecto a la localidad de Kelcaybamba, región Cusco.

Para ello, se tuvo en cuenta las características geológicas, donde se produjeron los deslizamientos:

A. Localidad de Carampa

La localidad de Carampa se asienta sobre materiales coluviales y aluviales. Su basamento está compuesto de rocas del Grupo Cabanillas (Devoniano), principalmente de pizarras y limoarcillitas de tonalidades, gris oscuro, en capas delgadas, muy erosionada, fracturada y bien estratificada.

El deslizamiento que se produjo en la parte baja de la quebrada de Carampa, es un deslizamiento de tipo rotacional donde materiales inconsolidados se desplazan sobre un basamento pizarroso (Ortiz, 2015).



Figura 10: Deslizamiento de materiales inconsolidados suprayacentes a rocas metamórficas en la localidad de Carampa, donde estos suelos se desplazan en dirección al río Acocra.

B. Localidad de Chango

La localidad de Chango se asienta sobre depósitos coluviales y aluviales, producto de la desintegración del basamento de rocas metamórficas del Complejo Marañón de edad Neo Proterozoica, compuesta por rocas pizarrosas a esquistos.

El deslizamiento que se produjo en quebrada Shishing es de tipo rotacional donde estos materiales se desplazan pendiente abajo sobre una superficie de falla (Vivanco, 2015) (Figura 11).



Figura 11: Deslizamiento rotacional generado en la quebrada Shishing, de la localidad de Chango, donde se encuentran desplazándose los materiales pendiente abajo, por la erosión de pluvial y/o las aguas subterráneas.

Los deslizamientos generados en las localidades de Carampa y Chango son de tipo rotacional al igual que en Kellcaybamba, donde éstas presentan evidencias con grietas tensionales o de tracción y un horizonte saprolito en nivel de transición de roca a suelo, de color pardo oscuro, producto de la meteorización de la roca madre por la infiltración de las aguas subterráneas. Para corroborar las características físicas de este horizonte, fue importante el estudio geotécnico (mecánica de suelos) y de geofísica (resistividad eléctrica) para conocer propiedades del suelo, la profundidad del nivel freático y determinar el contacto de transición roca-suelo.

5. Geotecnia y geofísica

Conocer la composición de los suelos de la zona donde se produce el evento geodinámico y obtener las propiedades físicas del comportamiento de los suelos ante la compresión, tracción y la interacción con el agua, permite analizar el comportamiento dinámico del deslizamiento.

Estas propiedades físicas influyen en el movimiento del agua en los suelos (permeabilidad) y la capacidad del suelo para retener líquido (absorción). Así los suelos más finos tienden a retener un mayor volumen de líquido bajo condiciones insaturadas que sus equivalentes de textura gruesa (Sidle, 1984). Otro parámetro del suelo que contribuye a la ocurrencia de deslizamiento de tierra es la velocidad a la que se infiltra el agua en el suelo a una determinada profundidad (Inganga y Ucakuwun 2001).

Los suelos de la localidad de Kellcaybamba, descritos en la tabla 01, están conformados por gravas bien gradadas (GM) a mal gradadas con contenidos de arena, limos y arcillas (GP-GC). Las propiedades físicas de los suelos, presentan un límite plástico promedio de 20 % lo que indica que el potencial de hinchamiento es alto, y el índice de plasticidad de la calicata (CA-02) presenta una baja plasticidad

a diferencia de los otras calicatas, según Sowers, (1979), tabla 02.

Tabla 01: Propiedades de los suelos de cada calicata prospectada, en la localidad de Kellcaybamba según la clasificación SUCS y ASSHTO.

Tabla 01: Propiedades de los suelos de cada calicata prospectada, en la localidad de Kellcaybamba según la clasificación SUCS y ASSHTO.

DESCRIPCION ENSAYOS	RESULTADOS							
Calicatas	CA-01 A	CA-01 B	CA-02 A	CA-02 B	CA-03 A	CA-03 B	CA-04 A	CA-04 B
Profundidad (m)	3.00	3.00	3.40	3.40	3.20	3.20	2.40	2.40
Límite Líquido (%)	24.00	24.07	33.30	33.25	26.47	26.46	26.62	26.65
Límite Plástico (%)	21.01	21.09	17.38	17.39	16.61	16.61	23.06	23.09
Índice Plástico (%)	2.99	2.98	15.92	15.86	9.86	9.85	2.96	2.96
Granulometría (Clasificación SUCS)	GM	GM	GP-GC	GP-GC	GP-GC	GP-GC	GP-GM	GP-GM
Granulometría (Clasificación ASSHTO)	A-1-a	A-1-a	A-2-7	A-2-7	A-2-4	A-2-4	A-1-a	A-1-a
Ángulo de fricción (°)	38	38	35	35	37	37	39	39
Cohesión kg/cm ²	0.697	0.711	0.98	0.99	0.98	0.96	0.67	0.67

Tabla 02: Grado de plasticidad del suelo (Sowers, 1979).

IP	Descripción
0 - 3	No plástico
3 - 15	Ligeramente Plástico
15 - 30	Baja Plasticidad
>30	Alta plasticidad

Se correlacionan las calicatas con estudios geofísicos de resistividad eléctrica, con la finalidad de estimar la localización del horizonte saprolito y la profundidad del nivel freático, sobre el basamento metamórfico, para ello se realizaron 6 ensayos de resistividad eléctrica (SEV) para obtener secciones geoelectricas Figuras 12, 13 y 14.

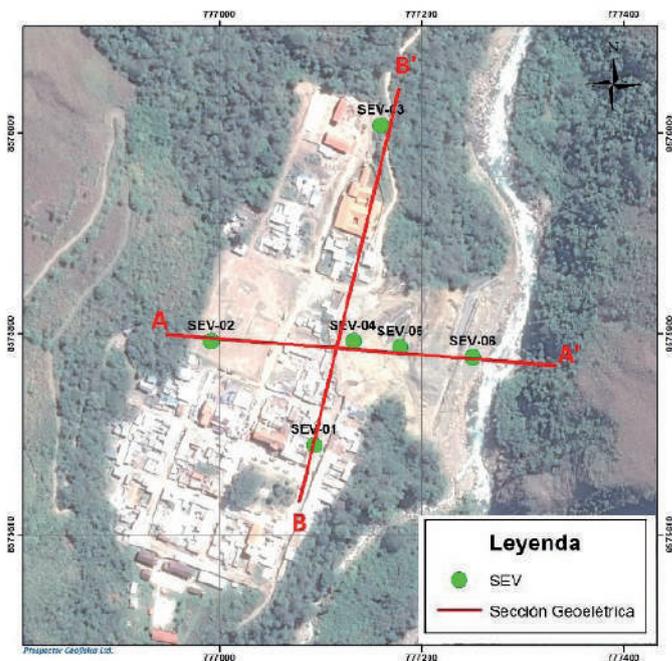


Figura 12: Ubicación de los perfiles geoelectricos en la localidad de Kellcaybamba.

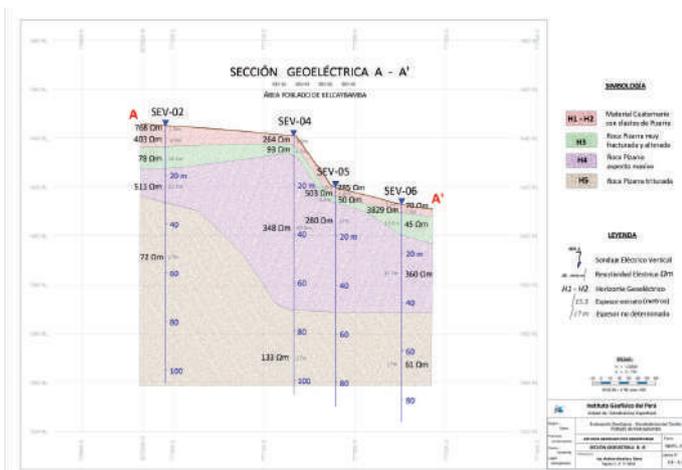


Figura 13: Sección Geoeléctrica A - A' del deslizamiento desde el estadio hacia el río Ocobamba, donde se observa la disposición de los horizontes.

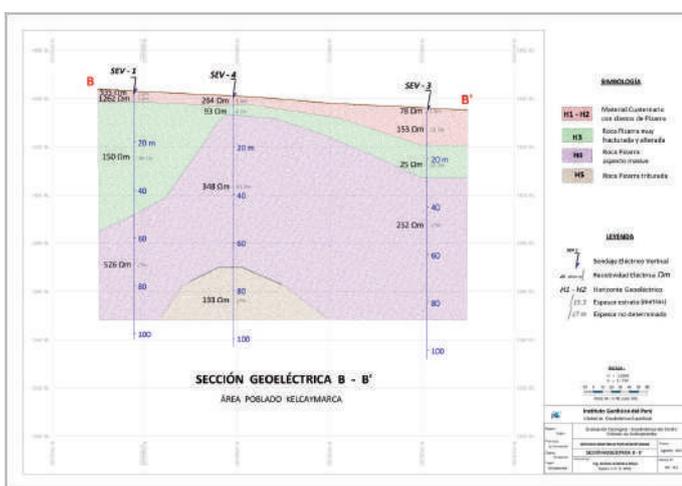


Figura 14: Sección Geoeléctrica B - B' que pasa por el centro de la localidad de Kelcaybamba, estimando espesores de los horizontes y la profundidad del nivel freático.

En la localidad de Kelcaybamba se determinaron cuatro horizontes de materiales con los ensayos de resistividad eléctrica que tuvieron las siguientes características:

Horizonte H1 – H2

Representa la cobertura superficial de terreno compuesta por material de suelo aluvial – fluvial, según clasificación SUCS son de tipo: SM, GP y GM.

Horizonte H3

Este horizonte presenta el nivel saprolito, debido a su mayor saturación y baja resistividad en comparación con H4, éste contiene el nivel freático.

Horizonte H4 y Horizonte H5

Delimita el basamento metamórfico.

Al comparar los perfiles geofísicos obtenidos en localidades de Kelcaybamba y Carampa se observa que en la primera el nivel freático se encuentra entre 10 a 13 metros de profundidad y un espesor de

suelo de 15 metros, en comparación con la segunda localidad, donde se observa el nivel freático a 15 metros con un espesor de suelo de 20 metros, donde el horizonte de mayor saturación se encuentra entre el contacto roca-suelo y sirve como lubricante (superficie de falla) de los deslizamientos. No se realizaron ensayos geofísicos en la localidad de Chango (Figura 15).

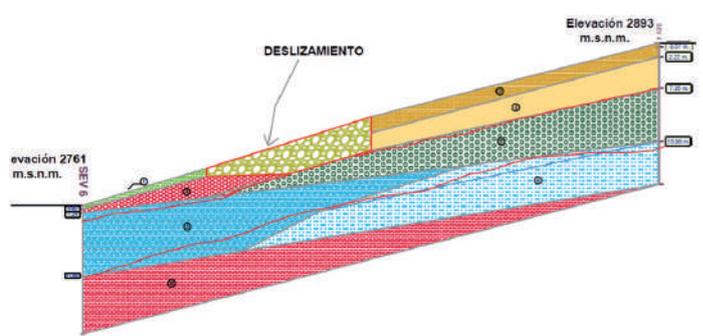


Figura 15: Perfil de resistividad eléctrica de la localidad de Carampa, dispuesta perpendicular a la dirección del deslizamiento donde se observa la profundidad del nivel freático, y el horizonte saturado entre el contacto roca-suelo, donde generó el deslizamiento de tipo rotacional.

6. Resultados

Las investigaciones geofísicas y geotécnicas realizadas arrojaron los siguientes resultados

1. Los ensayos de resistividad eléctrica en Kelcaybamba determinaron la profundidad del horizonte saprolito, donde está presente también el nivel freático, sobre el basamento metamórfico. El agua subterránea se encuentra a una profundidad de 13 metros y un espesor de 5 a 8 metros, (Figura 13), mientras que, en la localidad de Carampa el nivel freático se encuentra a 15 metros de profundidad y el saprolito con un espesor de 8 metros (Figura 15).
2. El horizonte saprolito presenta valores de resistividad eléctrica entre de 90 a 150 Ω en Kelcaybamba y valores entre 132 a 250 Ω en Carampa.
3. Las propiedades geotécnicas del horizonte saprolito, determinadas en laboratorio son: densidad de 17 a 20 kN/m³ y una cohesión 2 a 6 kN/m² según y el valor del ángulo de fricción interna de 10 a 34°.

7. Discusión

La presente investigación formuló como hipótesis que el horizonte de transición suelo roca, denominado saprolito en estado saturado, es el generador de la inestabilidad de una ladera, generando los deslizamientos. El caso particular de un basamento metamórfico pizarroso, por efectos de la meteorización y alteración de la roca madre, altera su composición mineralógica (silicatos de aluminio

hidratados), a diferencia de otros basamentos de origen ígneo, volcánico o sedimentario (excepto las rocas lutitas).

Generalmente los basamentos de origen ígneo y volcánico, por efectos de la meteorización producen suelos arenosos. Los suelos sedimentarios calcáreos presentan fracturamiento de la roca y colapso de la misma por disolución. En cambio los basamentos metamórficos pizarrosos y los lutáceos generan arcillas como productos de la meteorización.

La diferencia de las rocas pizarrosas y las rocas sedimentaria lutitas para generar el horizonte saprolito, es que las pizarras al estar sometidas a altas temperaturas y presiones elevadas, ocasionan agrupamiento y orientación lineal de los agregados mineralógicos componentes de roca. Estos minerales de aluminio se agrupan formando cristales de moscovita, estos al contacto con el agua y meteorización intensa se convierte en hidromoscovita, que presenta una estructura cristalina de transición a arcillas de caolinita o montmorillonita. Esto hace posible su rápida desintegración y alteración a arcilla, a diferencia de las lutitas que presentan microminerales de aluminio muy dispersos.

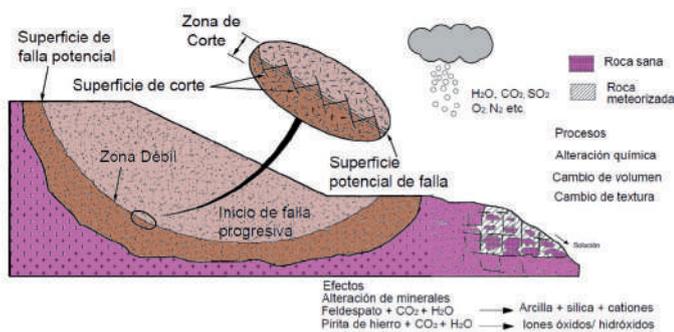
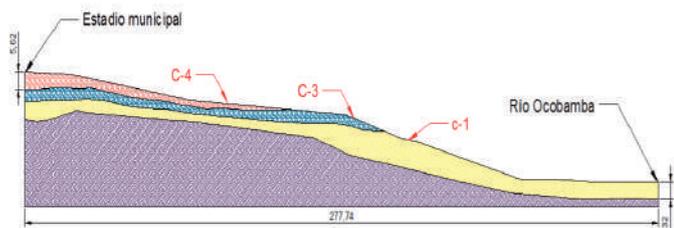


Figura 16: Zona de interacción de roca y suelo, donde se genera la superficie de falla, y presencia del proceso de alteración de las rocas pizarrosas.

Para demostrar la hipótesis de la investigación, se realizó un modelo del deslizamiento con el software Slide utilizando los parámetros geotécnicos obtenidos en el laboratorio de mecánica de suelos y las características geofísicas, tales como la profundidad del nivel freático y espesores de los horizontes de suelos de la localidad de Kellcaybamba (Figura 17).



PFigura 17: Perfil del deslizamiento suscitado en la localidad kellcaybamba, sus dimensiones geométricas, espesores y la ubicación de las calicatas (A-A').

Se propuso dos modelos de estabilidad de taludes e hidrológicos que cumplen las siguientes características: La línea de saturación obtenida

corresponde al nivel freático delimitado con ensayo geofísico Figura 18.

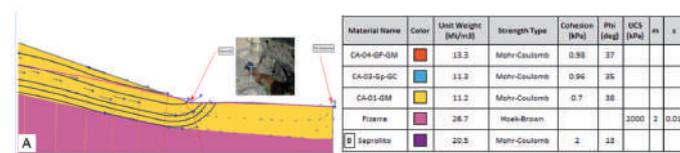


Figura 18: A. Manantial donde aflora el nivel freático, donde las líneas y flechas de color azul indican el movimiento del agua.

B. Parámetros geotécnicos de los suelos de la localidad de Kellcaybamba, usados para el modelar los perfiles de estabilidad e hidrológico.

El primer modelo hidrológico y de estabilidad sin el horizonte saprolito, propuesto por el método elementos finitos (Slide) de estabilidad de taludes, da como resultado un factor de seguridad de 1.2, indicando que la ladera se encuentra estable en esas condiciones (Figura 19). El segundo modelo que toma en cuenta el horizonte saprolito, da como resultado un factor de seguridad 0.68, indicando que la ladera se encuentra inestable (Figura 20).

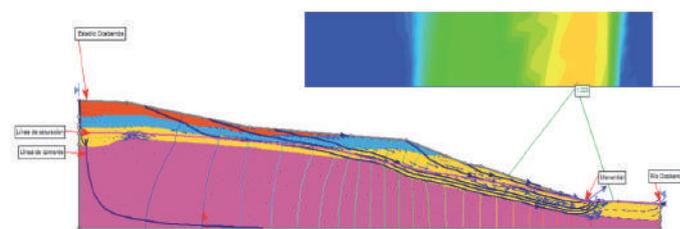


Figura 19: Modelo de estabilidad sin el horizonte arcilloso arroja como resultado un factor de seguridad 1.2, donde las líneas de saturación y corriente del agua tienen un movimiento hacia el río Ocobamba y donde aflora un manantial.

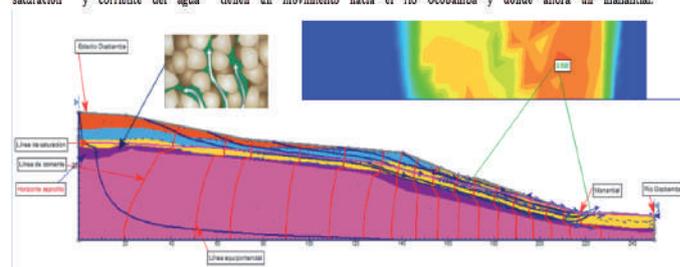


Figura 20: Modelo de estabilidad con el horizonte saprolito da como resultado un factor de seguridad 0.6, indicando que la ladera se desliza.

8. Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Las características geológicas, geodinámicas y geotécnicas del deslizamiento de Kellcaybamba es de tipo rotacional con una superficie de falla localizada en el horizonte saprolito, donde este horizonte se encuentra entre la roca metamórfica pizarrosa y el suelo coluvio-fluvial compuesto de gravas arcillosas principalmente.

- Otros dos deslizamientos rotacionales que se presentan en las localidades de Chango y Carampa presentan configuración geológica similar a Kellcaybamba: Saprolito arcilloso y basamento metamórfico pizarroso.

- Las investigaciones geotécnicas y geofísicas permitieron conocer la profundidad y espesor del horizonte saprolito, así como también la profundidad del nivel freático. En ambos casos, Carampa y Kellcaybamba, el substrato metamórfico se encontró próximo a los 20 m de profundidad en cuyo tope se ubica el nivel freático y el horizonte saprolito algo más superficial entre los 13 a 17 m de profundidad, en este horizonte se genera la superficie de falla del deslizamiento.

- El grado de degradación del saprolito es importante para la generación de deslizamientos en este tipo de roca metamórfica. Se asumió el caso en que la roca estuviera fresca, es decir, sin generar el horizonte saprolito, manteniendo las condiciones geotécnicas de las otras capas, generando un FS de 1.2, en cambio con presencia de saprolito, donde el porcentaje de roca es menor que el material disgregado a suelo, arroja un FS de 0.68, es decir, la ladera tiene una condición inestable y los materiales se deslizan sobre ésta.

- Esta investigación debe complementarse con otras investigaciones geofísicas como refracción sísmica y/o ensayos de MASW para determinar parámetros dinámicos de los horizontes del subsuelo y también alguna perforación o excavación más profunda que las calicatas, para tener información de campo de cada uno de los horizontes incluidos el saprolito.

9. Agradecimientos

Agradezco al Instituto Geofísico del Perú por haberme brindado facilidades para desarrollar mi tema de investigación, así como al personal de la Unidad de Geodinámica y mi gratitud al Ing. Juan Carlos Gómez por su apoyo en el proceso de elaboración de la presente tesis.

10. Bibliografía

Corominas, J. y García Yagüe, A. 1997. "Terminología de los movimientos de ladera". IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3: 1051-1072.

Cruden, D. M. y Varnes D.J. 1996. "Landslide types and processes". In A. K. Turner y R.L. Schuster (Editores): Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press. Washington D.C. pp. 36-75.

Cruden, D. M., (1991) A simple definition of a landslide. IAEG Bull., 43,27-29.

Deere, D.U., Patton F.D. 1971. Slope stability in residual soils. En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.

Hutchinson JN (1988) General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. In: Proceedings of 5th international symposium on landslides, vol 1, Balkema, Rotterdam, pp 3-35

Inganga S, Ucakuwun E (2001) Rate of swelling of expansive soils: a critical factor in triggering of landslides and damage to structure. Documenta Naturae 136:93-98

Ortiz, C., (2015) Evaluación geodinámica del centro poblado de Carampa, distrito de Pazos, provincia de Tayacaja, región Huancavelica. IGP

Salas, G., Chavez, A., y Cuadros, J. (1999). Geología de los cuadrángulos de Quebrada Honda y Porobamba. Serie A, Boletín N° 128. Lima: INGEMMET.

Suárez, J. (2009). Deslizamientos (Vol. 1). Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS.

Sidle RC (1984) Shallow groundwater fluctuations in unstable hill slopes of coastal Alaska. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 20:79-95.

Sowers, G. F. (1979) "Introductory Soil Mechanics and Foundations," 4th edition. Macmillan, 621, New York.

Sowers G. F. (1985) "Residual Soils in the United States". Sampling and Testing of Residual Soils. A Review of International Practice.- Hong Kong.

Velbel MA (1985) Geochemical mass balance and weathering rates in forested water sheds of the Southern Blue ridge. Am J Sci 285:904-930.

Vivanco, M., (2015) Evaluación geológica-geodinámica y geotécnica del Centro Poblado de Chango, distrito de Chacayán, provincia Daniel Alcides Carrión, región Pasco. IGP.

Vilchez. (2013) Informe técnico del derrumbe en el Distrito de Ocobamba, provincia de la Convención, región Cusco. Lima: INGEMMET, (Informe técnico N° A6630).

Sección

**Ciencias de la Atmósfera
Hidrosfera**

PATRONES DE CIRCULACIÓN INTRAESTACIONALES DE GRAN ESCALA Y SU RELACIÓN CON LLUVIAS EN LA CUENCA AMAZÓNICA

INTRASEASONAL LARGE SCALE CIRCULATION PATTERNS AND THEIR RELATIONSHIP WITH RAINFALL IN THE AMAZON BASIN

Laura Giulianna Paccini Peña
Universidad Nacional Agraria La Molina
Facultad de Ciencias
laurapaccini@gmail.com

Asesor: Dr. Jhan Carlo Espinoza
Unidad de Hidrología y Suelos

Resumen

Este estudio tiene como objetivo identificar patrones de circulación (CP) que sinteticen la variabilidad intraestacional de la circulación atmosférica, e identificar la precipitación asociada a dichos CPs en la Cuenca Amazónica (CA). Para determinar los CPs se utilizó vientos diarios de bajos niveles del reanálisis ERA-Interim para el período 1979-2014 a una resolución de 1.5°. En cuanto a su relación con las lluvias, se utilizaron tres tipos de datos: i) precipitación observada del SO-HYBAM y estimada de los productos ii) 3B42 de 0.25° de resolución y iii) 2A25 del TRMM de 0.05°. Se aplicó un método híbrido para definir los CPs combinando la técnica de Self-Organizing Maps y Clasificación Ascendente Jerárquica. Las 9 CPs encontradas muestran un ciclo temporal definido con situaciones alternantes. La lluvia asociada presenta una relación coherente con la dinámica de los CPs y muestra anomalías positivas en el sur de la CA que va progresivamente hacia el norte o hacia el este. Las tres bases de datos coinciden en representar la variabilidad espacio-temporal de lluvia asociada. Este estudio muestra por primera vez la representación de la variabilidad intraestacional de las lluvias en toda la CA y verifica la utilidad de sensores remotos para estudios a escala intraestacional en regiones con datos de precipitación limitados.

Palabras clave: Variabilidad intraestacional, patrones de circulación, lluvias, cuenca Amazónica.

Abstract

This study aims to identify circulation patterns (CP) that summarize the atmospheric intraseasonal circulation and the related rainfall in the Amazon Basin (AB). Daily low level winds from ERA-Interim reanalysis for the period 1979-2014, with 1.5° of resolution, were used to determine the CPs. In addition, in order to associate these CPs with rainfall, three data sources were used: i) observational precipitation from SO-HYBAM and high-resolution dataset from TRMM ii) 3B42 product at 0.25° spatial resolution and iii) 2A25 products at 0.05° of spatial resolution. A hybrid method was applied to define the CPs combining Self-Organizing Maps technique and Hierarchical Ascendant Classification. The 9 CPs found show a defined temporal cycle with alternative situations. The related rainfall reveals coherent association with the CPs, describing positive rainfall located in the south part of the AB that progress gradually to the north and to the east of the AB. Both estimated and observed data agrees in representing the spatio-temporal variability of rainfall related to CPs. This study represents for the first time the intraseasonal rainfall variability and demonstrates that using remote sensing precipitation is useful for intraseasonal studies over this region.

Keywords: Intraseasonal variability, circulation patterns, rainfall, Amazon Basin.

Introducción

La Cuenca Amazónica (CA) es el sistema hidrológico más grande del mundo, de gran importancia por su extensión, biodiversidad e influencia en el clima global (Letteau, et al., 1979; Callède et al., 2010). Pese a ello, el estudio de la variabilidad atmosférica intraestacional ha sido poco desarrollado. Además, la insuficiente disponibilidad de información de datos observados de precipitación, limita los estudios en varias zonas de la CA.

Gracias a los nuevos avances en la estimación de precipitación mediante sensores remotos y datos de reanálisis, es posible tener una comprensión más detallada de la circulación atmosférica y sus impactos en las precipitaciones a una mejor escala espacial. Esto representa una alternativa para regiones con pocos datos observados.

Recientes estudios han documentado la relación entre tipos de circulación atmosférica de gran escala en la región tropical y lluvias en la CA (Wang y Fu, 2002, Espinoza et al., 2012; 2013). Estos proponen la descomposición de la variabilidad atmosférica a escala intraestacional en pocos estados típicos que son recurrentes y reconocibles (patrones de circulación atmosféricos o CPs).

En este trabajo se pretende identificar patrones que sinteticen la circulación atmosférica y ver su relación con la lluvia en la cuenca amazónica. Además se pretende validar el uso de la precipitación estimada para esta región con énfasis en la parte oeste de la CA que incluye la Amazonía peruana.

2. Desarrollo

2.1 Patrones de circulación

a. Datos

Se utilizaron datos de reanálisis ERA-Interim para las variables viento zonal y meridional a 850 hPa diarios a una resolución de 1.5°x 1.5° sobre el área 15°N - 50°S, 100-40°O para el periodo 1979-2014. Estos datos son de libre acceso en <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>

b. Metodología

Estudios anteriores utilizaron técnicas estadística de agrupamiento de datos para la creación de patrones o tipos de circulación (E.g. Espinoza et al., 2012; Moron et al., 2008; Solman y Menéndez, 2003).

En este estudio se utilizará una combinación de métodos estadísticos de agrupamientos de datos como:

- Mapas auto-organizados (SOM) o cartas de Kohonen (Kohonen 1984, 2001).
- Clasificación Ascendente Jerárquica (CAH, Jain y Dubes 1998).

Estos agrupan los días con circulación atmosférica semejante y dan un promedio representativo de ellos. De esta manera se crea lo que se denominará Patrones de Circulación (CPs).

2.2 Lluvia asociada a los CPs

a. Datos

Precipitación observada del observatorio SO-HYBAM (www.ore-HYBAM.org) con una resolución de 1°x1°, ~100 Km. (Espinoza et al., 2009; Guimberteau et al., 2012).

Precipitación estimada del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Se utilizaron los productos 3B42 de resolución 0.25°x0.25° (~25 Km) y el producto 2A25 de resolución 0.05°x0.05° (~5 Km). Para esta última base de datos, fue necesario utilizar una interpolación bilineal de los datos. (Chávez, 2013; Zubieta et al., 2015)

Se escogió el periodo común de ambos datos: 1998 – 2009.

b. Metodología

Para identificar las lluvias asociadas a los CPs, se hallaron las anomalías por punto de grilla en cada conjunto de datos:

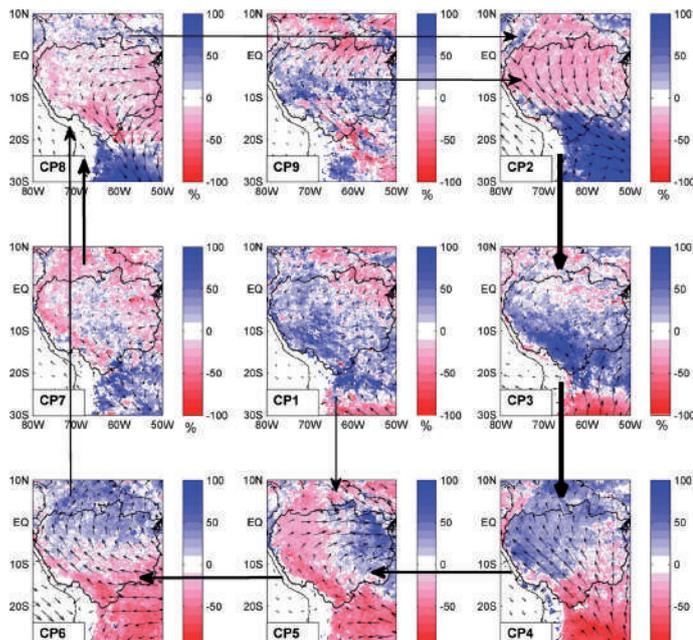
$$\frac{Ppt_{CP} - Ppt_{CL}}{Ppt_{CL}} \times 100$$

Donde:

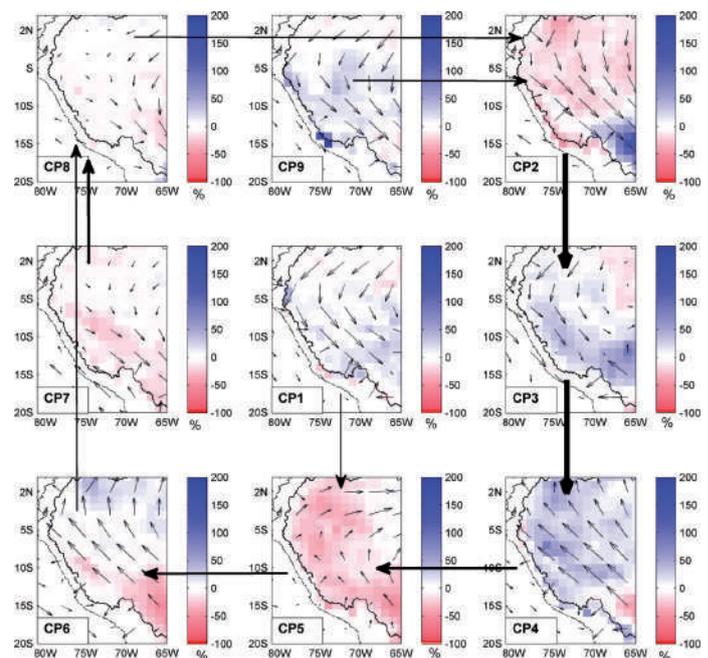
Ppt_CP: Promedio de precipitación de los días pertenecientes al CP.

Ppt_CL: Promedio de precipitación del periodo de estudio.

a) HYBAN



b) TRMM - 3B42



< 20%	→
20%-30%	→
30%-40%	→
>40%	→

Figura 1. Patrones de circulación (CP) indicados con su respectivo número en el exterior interior izquierdo de cada figura. Los vientos estandarizados se muestran en vectores y las anomalías de lluvias asociadas provenientes del SO-HYBAN (en el panel a) y del producto TRMM-3B42 (en el panel b). Las anomalías positivas se muestran en azul y las negativas en rojo. En el lado izquierdo anterior (c) se muestra la leyenda correspondiente a las probabilidades de transición entre patrones.

3. Resultados

3.1 Descripción de los patrones de circulación

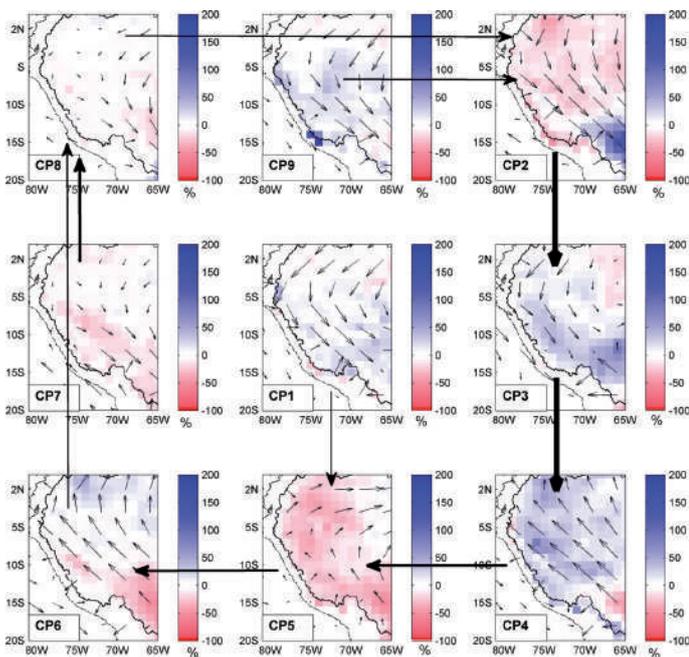
Gracias a la aplicación de los métodos de clasificación, se definieron 9 CPs los cuales se disponen espacialmente de acuerdo a su semejanza; es decir, hay mayor similitud (diferencia) entre patrones próximos (lejanos), mientras que aquellos situados en el centro tienen características intermedias.

Las características de estos patrones están asociados a perturbaciones tropicales y

extratropicales. En general, se tienen 3 tipos de circulación predominante: 3 CPs con vientos del norte (ubicados en el lado superior), 3 con circulación predominante del sur (ubicados en el lado inferior) y los restantes, con circulaciones intermedias (Figura1).

Se calculó además la transición temporal entre ellos y se encontró que los CPs siguen un ciclo temporal definido entre el CP2 y CP8 con rutas alternativas. Este ciclo tiene una duración promedio de 14 días. La Figura 1c muestra las probabilidades de transición entre ellos. Se observa que el CP2, CP3 y CP4 muestran las transiciones más definidas.

b) HYBAM



b) TRMM - 3B42

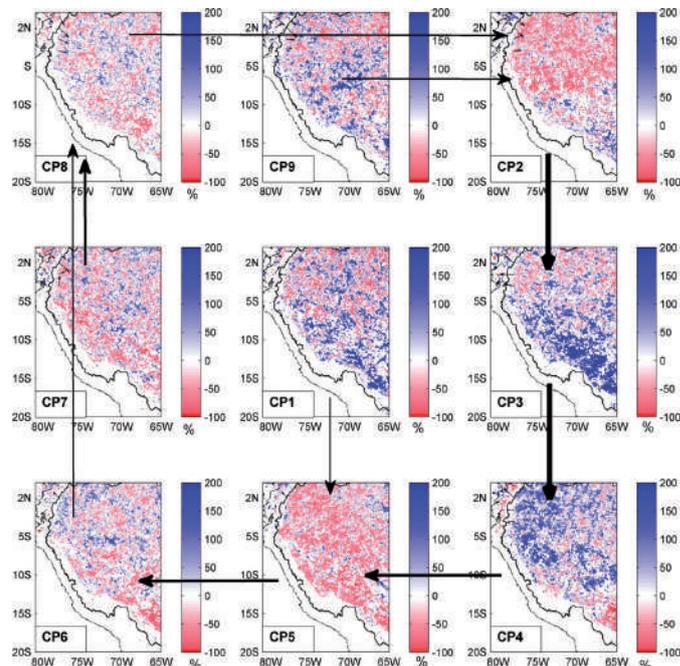


Figura 2. Patrones de circulación (CP) indicados con su respectivo número en el extremo inferior izquierdo de cada figura. Los vientos estandarizados se muestran en vectores y las anomalías de lluvias asociadas provenientes del SO-HYBAM (panel a) en colores. Las anomalías positivas se muestran en azul y las negativas en rojo. En contornos se muestra los límites de la CA y la cuenca de Tamshiyacu

En cuanto a la persistencia, se tiene que el CP8 es aquel con la máxima duración (3 días), mientras que el CP3 siempre muestra el menor valor de probabilidad de persistencia. Asimismo, el CP5 y CP6 presentan una persistencia de hasta 2 días, mientras que los demás CPs, solo muestran persistencia de un día.

3.2. Lluvia asociada a los CPs en la cuenca amazónica

En la Figura 1a se observa la lluvia observada asociada a cada CP en anomalías porcentuales de precipitación. Los colores azules indican anomalías positivas y los rojos, negativas.

Se puede observar que la lluvia asociada sigue coherentemente el ciclo de los patrones de circulación. El CP2 muestra anomalías positivas de precipitación en el sur de la CA que coincide con un flujo del viento del norte que converge con incursiones de vientos del sur de la CA, mientras que el lado norte el CP2 muestra condiciones de menor precipitación. Posteriormente, el CP3 presenta mayormente anomalías positivas en el Centro y Oeste de la CA. Esta característica se asocia a la convergencia de vientos en el lado Suroeste de la cuenca, relacionado a una incursión de vientos del Sur.

El CP4 presenta condiciones opuestas al CP2, y las anomalías positivas de precipitación se ubican en el lado Noroeste de la CA ya que el flujo es predominante del Sureste. El CP5 muestra anomalías negativas de

precipitación en todo el lado oeste de la CA, mientras que presenta valores positivos en el lado Este, lo cual se asocia al flujo del Sureste que posteriormente se desvía hacia el lado Este de la CA, concentrando la humedad en esa zona. A continuación, el CP6 muestra anomalías de precipitación localizadas en la zona Norte de la CA que coinciden con la circulación predominante del Sur, mientras que las condiciones de anomalías negativas de precipitación se ubican en la zona Sur Este de la CA. El CP7 está principalmente asociado a anomalías negativas en toda la parte Sur y extremo Este de la CA, esto se relaciona con el ligero flujo hacia el Sur y condiciones neutras en el centro Oeste de la cuenca. El CP8 presenta valores negativos de anomalías de precipitación en la lado Este y parte de la zona Sur de la CA. En el extremo Sur se observan condiciones de anomalías positivas, lo cual está influenciado por un mayor flujo del noroeste asociado a una condición de tipo Low Level Jet (LLJ, Marengo et al., 2004). Finalmente, los CP9 y CP1 que representan situaciones intermedias, muestran anomalías positivas de precipitación en la parte Oeste de la CA con algunas anomalías negativas en los límites Sur, Este y Norte de la CA.

3.2.1 Precipitación estimada TRMM 3B42

En la Figura 1b se muestra la precipitación observada con el producto 3B42 del TRMM de 0.25° de resolución espacial.

Se observa en general una buena correspondencia respecto a la precipitación

observada asociada a los CPs donde las anomalías positivas (negativas) en el Sur (Norte) de la CA van progresivamente hacia el Norte o Este.

También se distinguen claramente los dipolos de precipitación norte-sur y este-oeste con algunas diferencias debido a la mayor resolución de la lluvia estimada.

Los CPs con más diferencias son el CP7, en el que se muestran anomalías de precipitación positivas en la zona Sur mientras que en los datos del SO-HYBAM, se muestran anomalías negativas; el CP8 que muestra anomalías de precipitación negativas en la parte Noroeste de la cuenca aunque los datos observados muestren zonas de anomalías positivas; y el CP9 que muestra toda la parte Norte de la CA con anomalías negativas de precipitación mientras que en los datos observados solo presenta esta característica en el extremo Norte de la CA.

3.2.2 Precipitación estimada TRMM 2A25

La alta resolución del producto 2A25 del TRMM permite estudiar regiones más específicas. En este caso se dará énfasis a la zona Oeste de la CA, correspondiente a la Amazonía peruana. La Figura 2 muestra los CPs y su respectiva lluvia asociada con datos observados del SO-HYBAM (a) y estimados del TRMM 2A25(b).

Para la cuenca amazónica peruana se tiene la siguiente distribución de precipitación asociada a los CPs: condiciones de anomalía positivas de precipitación en todo el área para los CP1, CP3, CP4, CP9; y en la zona Norte, el CP6. Aquellas asociadas a anomalías negativas de precipitación en toda la cuenca peruana son los CP2 y CP5; y en la zona central los CP6, CP7 y CP8.

La precipitación estimada presenta mayores diferencias debido a su alta resolución (5 Km frente a 100 Km del SO-HYBAM). Debe tenerse en cuenta además, que el número de días que dispone el producto 2A25 del TRMM por cada grilla es menor en comparación al producto 3B42, por lo tanto las anomalías de precipitación pueden sobreestimarse. En efecto, se dispone únicamente de alrededor del 30% de días por grilla con los datos 2A25, mientras que los datos 3B42 presentan información para todos los días del período de estudio. Pese a estas diferencias, aun se puede identificar las áreas más definidas con anomalías de precipitación en ambas bases de datos.

4. Conclusiones

- Se identificaron patrones de circulación que resumen la variabilidad intraestacional de la circulación atmosférica en bajos niveles en la CA.
- La lluvia asociada responde a la dinámica de los vientos de los CPs y por primera vez se representa su variabilidad intraestacional con datos observados para toda la CA.
- La precipitación estimada del TRMM 3B42 representa bien la distribución espacial de las lluvias asociadas con los datos observados del SO-HYBAM. Esta similitud entre ambas bases de datos se presenta también con el producto de mayor resolución 2A25 del TRMM en la zona oeste de la CA, lo cual demuestra que este tipo de precipitación estimada puede ser una alternativa para estudiar la variabilidad intraestacional de las lluvias frente a la escasez de datos en algunas zonas de la CA.

Estos resultados permiten iniciar nuevos estudios sobre la variabilidad atmosférica intraestacional en la CA. En este sentido, esta investigación pretende asociar los CPs a la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos recientes (como sequías en 2005 y 2010). Asimismo, es posible implementar una herramienta de previsión de precipitación en la CA utilizando estos CPs mediante una técnica de pronósticos por análogos. Finalmente, se puede analizar los CPs en escenarios climáticos futuros e identificar los principales cambios de la circulación atmosférica intraestacional en la CA en el marco del cambio climático.

5. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis, al observatorio SO-HYBAM por brindar los datos observados de lluvia para toda la cuenca amazónica y al proyecto PNICP-Peru a través del contrato N° 397-PNICP-PIAP-2014 (PNICP-IGP-IRD) por haber financiado esta investigación. También a mi asesor y a los investigadores del IGP que me orientaron continuamente.

6. Bibliografía

Callède J, Cochonneau G, Ronchail J, Alves F.V, Guyot JL, Guimarães VS, de Oliveira E. (2010). Les apports en eau de l'Amazonie à l'Océan Atlantique. *Revue de sciences de l'eau/ Journal of Water Sciences* 23(3) : 247-273.

Espinoza, J., Ronchail, J., Guyot, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., and Vauchel, P.: (2009) Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador), *Int. J. Climatol.*, 29, 1574–1594.

Espinoza JC, Lengaigne M, Ronchail J, Janicot S. (2012). Large-scale circulation patterns and related rainfall in the Amazon Basin: a neuronal networks approach. *Clim. Dyn.* 38(1–2): 121–140.

Espinoza, J. C., Ronchail, J., Lengaigne, M., Quispe, N., Silva, Y., Bettolli, M. L. & Llacza, A. (2013). Revisiting wintertime cold air intrusions at the east of the Andes: propagating features from subtropical Argentina to Peruvian Amazon and relationship with large-scale circulation patterns. *Climate dynamics*, 41(7-8), 1983-2002.

Guimberteau, M., Drapeau, G., Ronchail, J., Sultan, B., Polcher, J., Martinez, J.-M., Prigent, C., Guyot, J.-L., Cochonneau, G., Espinoza, J. C., Filizola, N., Fraizy, P., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Noriega, L., and Vauchel, P (2012).: Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 911-935,.

Lettau, H., Lettau, K., & Molion, L. C. B. (1979) Amazonia's hydrological cycle and the role of atmospheric recycling in assesing deforestation effects. *Monthly Weather Review*, 107(3), 227-238.

Marengo, J. A., Liebmann, B., Vera, C. S., Nogués-Paegle, J., & Báez, J. (2004). Low-frequency variability of the SALLJ. *CLivAR exchanges*, 9(1), 26-27.

Moron V, Robertson A, Ward M-N, Ndiaye O. (2008). Weather types and rainfall over Senegal. Part I: observational analysis. *J Clim* 21:266–287

Solman S, Menéndez C. (2003). Weather regimes in the South American sector and neighbouring oceans during winter. *Clim Dyn* 21:91–104

Wang H., Fu R. 2002. Cross-equatorial flow and seasonal cycle of precipitation over South America. *J.Climate*, 15, 1591-1608.

EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE EL NIÑO EXTRAORDINARIO DENTRO DE LOS PRONÓSTICOS RETROSPECTIVOS DEL MODELO NCEP CFSv2

ASSESSMENT OF THE MECHANISMS IN THE HINDCASTS OF EXTREME EL NIÑO BY THE NCEP CFSv2 MODEL

Luis Bryam Orihuela Pinto
Universidad Nacional Agraria La Molina
Facultad de Ciencias
bryamorihuela@gmail.com

Asesor: Ken Takahashi Guevara, PhD.
Unidad de Climatología

Resumen

Recientemente se ha propuesto que los eventos El Niño extraordinario como los acontecidos en 1982-83 y 1997-98 son dinámicamente diferentes que otros eventos El Niño, debido a retroalimentaciones no lineales asociadas con convección profunda en el Pacífico oriental. Sin embargo los modelos climáticos tienen fuertes errores sistemáticos en esta región que pueden afectar la representación de estos procesos clave en el desarrollo de eventos El Niño para su mejor uso. En este estudio, analizamos los mecanismos que conducen a la predicción de El Niño extraordinario en las predicciones retrospectivas del modelo NCEP CFSv2. Los resultados preliminares indican que, asociado a la deriva ("drift") del estado climatológico del modelo con mayores tiempos de anticipación, este modelo puede llegar a confundir en su pronóstico los tipos de El Niño,

Palabras clave: El Niño, CFSv2, predicción, Pacífico Este.

Abstract

Very strong El Niño events like the ones observed in 1982-83 and 1997-98 have been recently proposed to be dynamically different from other El Niño, involving nonlinear feedbacks associated with deep convection in the eastern Pacific. However, climate models have strong biases in this region that can affect the representation of these key feedback processes. In this study, we analyze the mechanisms leading to the prediction of a strong El Niño in the hindcasts from the NCEP CFSv2 model. Preliminary results indicate that, associated with model climate drift with higher lead times, this model cannot distinguish between El Niño types.

Keywords: El Niño, CFSv2, forecast, Eastern Pacific

Takahashi & Dewitte 2015, mostraron con observaciones y modelamiento, la existencia de un umbral en la anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico oriental que al ser sobrepasado, la respuesta del viento zonal y la convección es fuertemente amplificada (Figura 3). Esta no-linealidad en la retroalimentación de Bjerknes aumenta la tasa de crecimiento de eventos El Niño, haciendo que pase a ser un evento extraordinario, si se logra la suficiente amplitud.

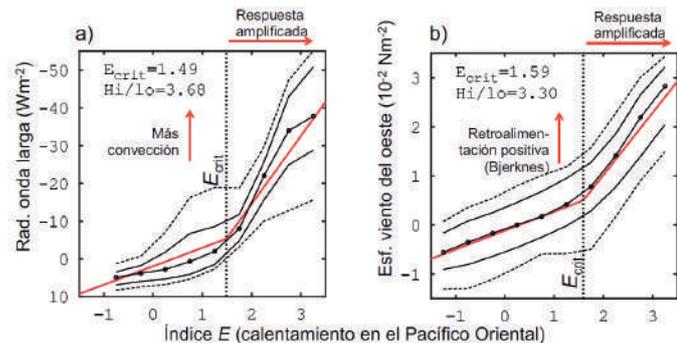


Figura 3. Relación entre el índice E y a) la radiación de onda larga y b) el esfuerzo de viento zonal mensual promediados sobre la región indicada en la Fig. 1b. Las líneas negras indican los percentiles de 10, 25, 50, 75, y 90% para diferentes valores de E, mientras que las líneas rojas indican el ajuste usando el método MARS. (Adaptado de Takahashi y Dewitte, 2015).

3. Datos

3.1 Observaciones

Tabla 1. Variables utilizadas

Dato	Fuente
Temperatura superficial del mar	Extended reconstructed sea surface temperature (ERSST) v3b (Smith et al. 2008)
Precipitación	Global Precipitation Climatology Project (GPCP) v2.2 (Adler et al. 2003)
Esfuerzo de viento zonal	Reanálisis ERA INTERIM
Isoterma de 20°C.	NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS)

3.2 Modelo NCEP CFSv2

Se usaron los pronósticos retrospectivos del modelo NCEP CFSv2 (National Center for Environmental Prediction – Climate Forecast System version 2., Saha et al., 2014) de 1982 al 2011 de las mismas variables de la Tabla 1 y pronósticos operacionales de 2011-2015.

Los pronósticos retrospectivos fueron inicializados con el Climate Forecast System Reanalysis o CFSR (Saha et al. 2010). Y se cuenta con 24 corridas o “members” por cada mes de inicialización a partir de los cuales se tienen pronósticos mensuales desde 0.5 hasta 9.5 meses de anticipación o “leads”

Para calcular las anomalías y disminuir errores sistemáticos presentes en el modelo, se tomó una

climatología basada en el promedio de corridas o “ensemble” diferente para cada lead; es decir, para cada lead (10) se cuenta con una climatología por mes (12) haciendo un total de 120 climatologías diferentes.

Adicionalmente, las anomalías de temperatura superficial del mar del modelo, fueron usadas para calcular los índices E y C como en Takahashi et al. (2011), proyectando estas sobre los EOF observados para cada tiempo de anticipación del pronóstico.

4. Resultados

4.1 Errores en el modelo

Los errores promedio del modelo debido al proceso de “deriva” fueron analizados. Con estos errores, las condiciones iniciales usadas para inicializar el modelo son llevadas hacia el “clima del modelo” en el transcurso de los meses de pronóstico.

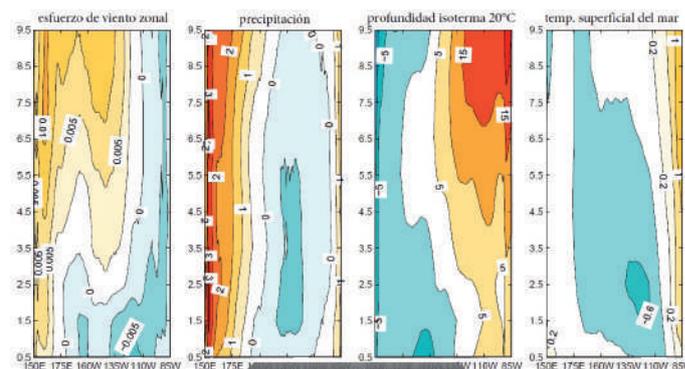


Figura 4 Errores (modelo menos observado) para todas las variables analizadas, desde lead 0.5 hasta 9.5 meses

En la Figura 4 se ilustran los errores promedio (de todos los meses de condición inicial), variando con cada “lead” (tiempo de anticipación), que pueden llegar a tener mucha influencia sobre los procesos físicos que simula el modelo.

Se puede ver que en el esfuerzo de viento hay una sobreestimación de los vientos del Oeste entre 150E y 170E que se va intensificando a lo largo de los leads, además a partir de aproximadamente 3.5 meses de anticipación ocurre lo mismo entre las longitudes 160W 130W. La precipitación presenta también una sobre-estimación entre 150E y la línea de cambio de fecha, siendo bastante homogénea para todos los leads. Por otro lado, la isoterma de 20°C se vuelve en promedio más profunda entre las longitudes 135W y 85W, aumentando el error con el lead. Finalmente, en la TSM se observan los errores típicos de la lengua excesivamente fría ecuatorial y el Pacífico oriental demasiado caliente, sin embargo, es peculiar que a partir de 6 meses de anticipación la lengua fría se debilita.

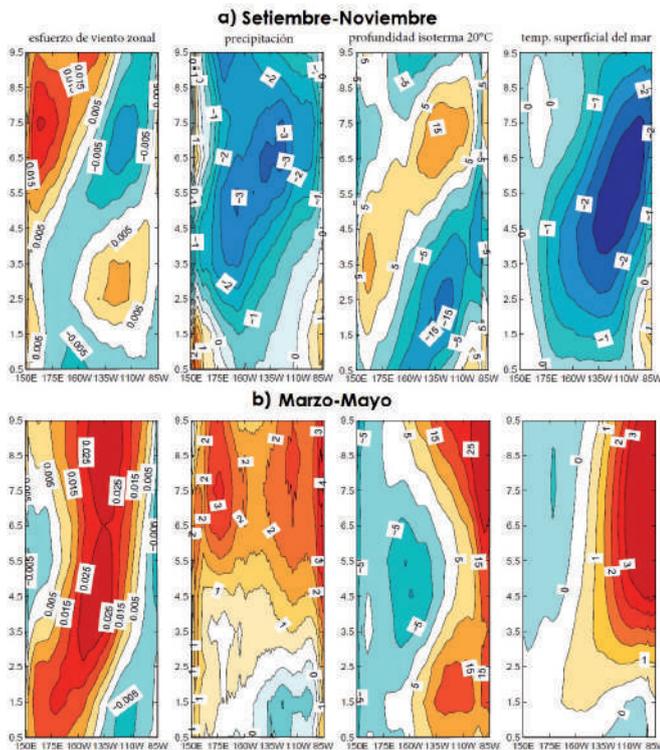


Figura 5 Como en figura 4, pero separando para trimestres a) setiembre-noviembre y b) marzo-mayo

Con la Figura 5 se hace evidente que los errores son muy dependientes de la estación como también fue documentado en Yan Xue et al. (2013), de modo que los errores promedio de la fig 4 podrían no servir para analizar la influencia de estos errores sistemáticos en algunos procesos que se dan en épocas específicas.

4.2. Retroalimentación no lineal

Se graficó la respuesta de la lluvia (precipitación en la zona 5N 5S y 170W 120W) al calentamiento en el pacifico oriental (Índice E) para cada lead.

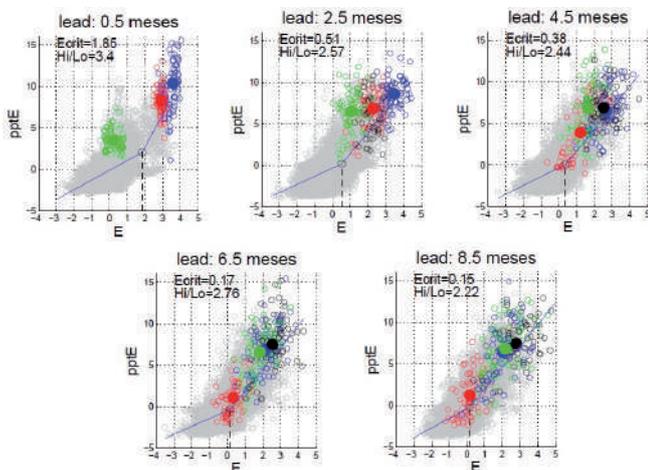


Figura 6. E vs anomalía de lluvia para diferentes lead del modelo. Los círculos grandes son el promedio de cada ensemble y los pequeños los miembros individuales para el trimestre de diciembre-febrero para 82-83 (rojo) 97-98 (azul) 09-10 (verde) y 15-16 (negro)

El valor de E crítico para la lluvia (a partir del cual esta aumenta entre 2 a 3 más rápido) disminuye con el lead, de 1.85 para 0.5 meses a 0.15 con 8.5 meses; es decir, cada vez se necesita menos calentamiento para gatillar convección profunda. Sin embargo, para el esfuerzo de viento, el E crítico (no se muestra) es poco confiable debido a que la respuesta no-lineal al calentamiento no es tan evidente como en las observaciones, lo que posiblemente es debido a que el viento, además de responder a la convección, esté respondiendo al gradiente zonal de temperatura, como se sugieren Takahashi & Dewitte (2015).

4.3. Tipos de El Niño en los pronósticos

El modelo CFSv2, como cualquier otro, en tiempos de anticipación bajos, está bastante influenciado por las condiciones iniciales, por lo que sus pronósticos a 0.5 meses podrían ser bastante parecidos a lo observado. Sin embargo, con mayores leads, el modelo no logra diferenciar entre los eventos extraordinarios como el de 1997-98, con Niños “Modoki” (con máximo calentamiento en el Pacífico Central) como el de 2009-10.

Esto se evidencia con la Figura 7 graficando los índices E vs C para diciembre-febrero (fase “madura” de El Niño), en donde los eventos extraordinarios deberían escapar de la distribución regular, mostrando un valor mucho mayor de E como se ve en la observaciones (Figura 7a), sin embargo, con mayores leads, hay otros años que se acercan a esta distribución e incluso El Niño extraordinario de 1982-83 no llega a ser pronosticado como tal.

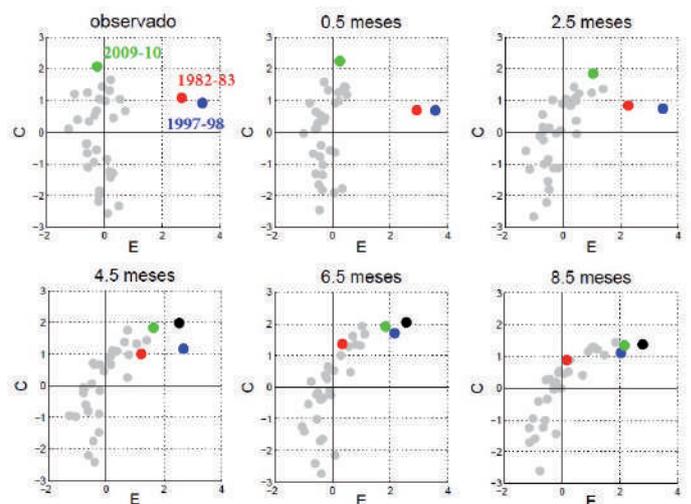


Figura 7. Gráfico de dispersión de los índices E y C para diciembre-febrero, cuando se da la fase “madura” de El Niño (observado y predicciones del modelo con distintos tiempos de anticipación).

4.4 Evolución temporal de eventos extraordinarios

Para evaluar los procesos que se llevan a cabo dentro del modelo para hacer la predicción de El Niño, extraordinario, se hizo una selección (para cada mes de inicialización) de las corridas con valor de $E > 1.5$ en el trimestre de diciembre-febrero, en los pronósticos que tienen incluido este trimestre.

Tabla 2. # de members que pronostican El Niño extraordinario, en diferentes años y meses de condición.

año\mesIC	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov
1982	0	1	0	0	10	17	23
1991	0	1	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	1	0
1997	17	21	18	21	23	24	24
2000	1	0	0	0	0	0	0
2001	8	1	1	0	0	0	0
2002	12	6	7	4	8	16	10
2004	4	3	0	0	2	1	0
2005	1	0	0	0	0	0	0
2006	2	2	2	1	6	7	4
2008	1	1	3	0	0	0	0
2009	17	14	20	15	16	11	4
2012	8	1	8	0	0	0	0
2014	16	6	3	2	1	0	0
2015	24	19	24	24	24	23	21

En estas corridas se analizó la evolución temporal de sus variables. Cabe resaltar que de las corridas utilizadas para este análisis, muchas de ellas fueron pronósticos equivocados (Tabla 2) porque los únicos eventos El Niño extraordinarios en el período de análisis son los de 1982-83 y 1997-98, pero nos permiten evaluar la realidad del modelo.

En la Figura 8 se muestra el composite de las corridas inicializadas en mayo que culminaron en El Niño extraordinario para analizar de manera más directa el efecto de altos tiempos de anticipación en el error del pronóstico de este tipo de El Niño (desde mayo hasta el trimestre DEF, hay 8.5 meses de anticipación). Es notable que en mayo los años 1997 y 2009 el 71% de los miembros de los ensembles produjeron El Niño extraordinario, aunque el 2009 en realidad fue “Modoki”, con máximo calentamiento en el Pacífico central, (en el 2002 ocurrió algo similar con el 50% de los miembros) mostrando que el CFSv2 no pudo distinguir en tipos de El Niño. Por otro lado, en mayo del 2015, el 100% de las corridas indicaron El Niño extraordinario.

Se puede notar, al igual que con los demás meses de condición inicial (no se muestra), una característica común, que es la generación de un pulso de viento en el Pacífico occidental, bastante fuerte en noviembre, que desencadena el gran calentamiento en el verano, aunque previo a este mes se puede ver una profundización de la termoclina en el Pacífico oriental, la que favorecería la llegada de ondas Kelvin.

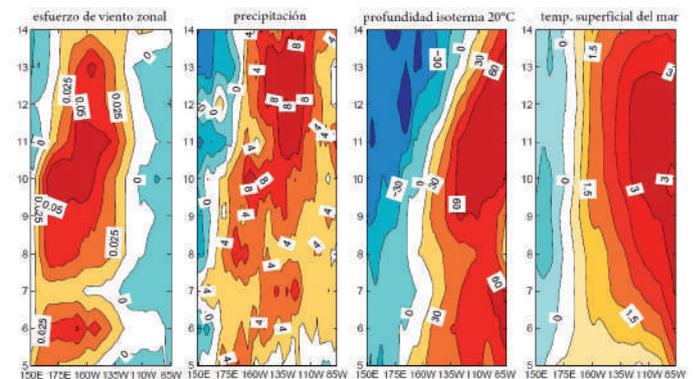


Figura 9. Similar a figura 8, pero con datos observados del niño extraordinario de 1997-98.

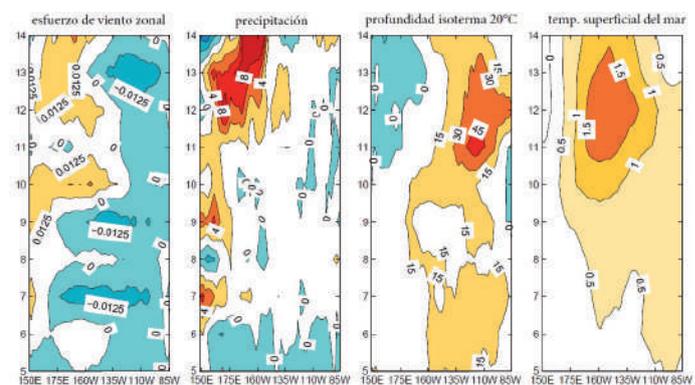


Figura 10. Similar a Figura 8, pero con datos observados de El Niño Modoki de 2009-10

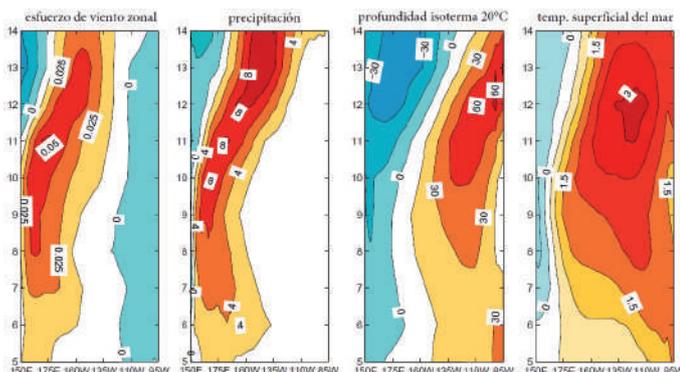


Figura 8. Composite de corridas del modelo que pronostican El Niño extraordinario (inicializadas en Mayo) variables promediadas en latitud 5°S-5°N (2°S-2°N para la isoterma de 20°C)

Para El Niño 1997-98, la evolución temporal del modelo es bastante parecida a la observada (Figura 9) siendo la principal diferencia que el mayor calentamiento en el modelo se da más al oeste que en la realidad, lo que también se evidencia en la Figura 7 dado que con leads altos, los eventos “extremos” tienen un valor de C mayor que en las observaciones.

En cambio al compararlo con lo observado el 2009-10 (Figura 10), hay muchas diferencias: pulsos de vientos y precipitaciones más débiles, y tanto la mayor profundidad de la termoclina como el núcleo del calentamiento están posicionados más hacia el Pacífico central.

5. Discusión

En lo que respecta a los errores, la sobre-estimación de vientos del Oeste en el Pacífico ecuatorial con altos leads parece ser un factor importante para la génesis de eventos El Niño extraordinario especialmente si ocurre en el pronóstico del mes de noviembre (Figura 8), dado que el debilitamiento de los vientos alisios en el Pacífico occidental juega un rol esencial, generando pulsos de viento que dan origen a las ondas Kelvin. Además la profundidad de la termoclina sobrestimada en el Pacífico oriental facilitaría la llegada de estas últimas. Todo ello podría haber contribuido a pronosticar El Niño Modoki de 2009-10 como extraordinario, ya que en este tipo de eventos, se tienen pulsos de viento no tan intensos, y una profundización de la termoclina no tan cercana a la costa de Sudamérica, como se puede ver en la Figura 10.

Otro factor importante para la generación de El Niño extremo, es probablemente, el hecho que la convección profunda es gatillada con calentamientos más pequeños a medida que aumenta el lead, favoreciendo la amplificación de la retroalimentación de Bjerknes asociado a que, en promedio se tiene temperaturas sistemáticamente por encima de lo observado en el Pacífico oriental (Figura 4).

Cabe resaltar que la intensidad de los “Niños extraordinarios” es subestimada con respecto a lo observado.

6. Conclusiones

- Los errores del modelo CFSv2 debido al proceso de deriva del estado climatológico del modelo, varían según la estación.
-
- El modelo confundió en sus predicciones con alto lead (tiempo de anticipación), a los Niños Modoki del 2009-10 y (en menor grado) del 2002-03 con Niños extraordinarios, además no pronosticó correctamente el Niño extraordinario de 1982-83.
-
- En promedio, con altos lead:
- Se sobreestiman los vientos del oeste en el Pacífico occidental, que son de importancia para la generación de ondas Kelvin.
- En el Pacífico oriental, se simula una profundidad de la termoclina mayor a la observada, la cual tiene influencia en la llegada de ondas Kelvin .
- Se sobreestima la TSM en el Pacífico oriental, ocasionando que se necesite menos calentamiento para gatillar convección profunda en esta zona.

7. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis, a mi asesor Ken Takahashi por su orientación en esta investigación y en general a los investigadores y asistentes de investigación del IGP por ser un ejemplo y fuente de consulta.

8. Bibliografía

Adler, R.F., and coauthors, 2003: *The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present)*. *J. Hydrometeor.*

Saha S, and coauthors, 2014: *The NCEP Climate Forecast System Version 2*. *J. Climate*

Saha S and Coauthors, 2010: *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*

Smith, T.M., R.W. Reynolds, Thomas C. Peterson, and Jay Lawrimore, 2008: *Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006)*. *Journal of Climate*

Takahashi K, Montecinos A, Goubanova K, Dewitte B (2011) *ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Niño*. *Geophys Res Lett*

Takahashi K and Dewitte B (2015). *Strong and moderate nonlinear El Niño regimes*. *Clim Dyn.*

Yan Xue, Mingyue Chen, Arun Kumar, Zeng-Zhen Hu, and Wanqiu Wang, 2013: *Prediction Skill and Bias of Tropical Pacific Sea Surface Temperatures in the NCEP Climate Forecast System Version 2*. *J. Climate,*

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y FONDO Y COMPARACIÓN CON FÓRMULAS EMPIRICAS EN LOS RÍOS PUYANGO-TUMBES Y ZARUMILLA

EXPERIMENTAL STUDY OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT AND BED LOAD AND COMPARISON WITH EMPIRICAL FORMULAS IN PUYANGO-TUMBES AND ZARUMILLA RIVERS

Janet Brígida Quincho Olazábal

Universidad Nacional Agraria La Molina
Facultad de Ingeniería Agrícola
janet.quincho26@gmail.com

Asesor: Sergio Byron Morera Julca, PhD.

Área de Hidrología y Sedimentos – Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue cuantificar el transporte de sedimento de fondo y en suspensión mediante datos observados y compararlos con los estimados a partir de fórmulas empíricas en los ríos Puyango (PT) y Zarumilla (ZA). Para ello, durante los años 2013-2014 se estableció una metodología de monitoreo de sedimento de fondo mediante la combinación de un equipo (Helley-Smith) y el uso del ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Los sedimentos en suspensión ya venían siendo monitoreados por el observatorio HYBAM a partir del año 2004. Para este estudio en particular se utilizó una nueva estrategia de muestreo de sedimento en suspensión (Morera, et al., 2013). En la cuenca del río PT (estación El Tigre), se obtuvo un gasto sólido total igual a 1.6 millones de toneladas anuales de los cuales el 98 % se transporta en suspensión y 2 % en fondo. En la cuenca del río Zarumilla (estación La Coja) se obtuvo un gasto sólido total igual a 0.1 millones de toneladas anuales de los cuales el 75 % se transporta en suspensión y un 25 % en fondo. Por otro lado, las fórmulas empíricas de transporte de sedimento de fondo muestran un alto rango de sobreestimación.

Palabras clave: Sedimento de fondo, sedimento en suspensión, gasto sólido total, estrategia de muestreo.

Abstract

The main aim of this research was to quantify the transport of bedload and suspended sediment using observed data in order to compare it with those estimated values from empirical formulas in Puyango-Tumbes (PT) and Zarumilla (ZA) rivers. For this purpose, a monitoring methodology for bedload was established by combining the use of an instrument called Helley-Smith and the ADCP (Current Profiler Acoustic Doppler) in 2013-2014. Suspended sediments have already been monitored by HYBAM observatory since 2004 and for this particular research a new suspended sediment sampling strategy was performed (Morera, et al., 2013). In the PT river basin (El Tigre station), the average annual total sediment load transported was equal to 1.6 million tons per year, of which 98 percent is transported in suspension and 2 percent as bedload. For ZA river basin (Zarumilla station), the average annual total sediment load transported was equal to 0.1 million tons per year, of which 75 percent is transported in suspension and 25 percent as bedload. Furthermore, the empirical equations show a high rate of overestimation.

Keywords: Bedload, suspended sediment, total sediment load, sampling strategy.

Introducción

Las cuencas binacionales de los ríos Puyango-Tumbes (5530 Km²) y Zarumilla (880 Km²) son dos cuencas de montaña que se originan en el Ecuador y terminan su recorrido en el Perú. En la desembocadura de estos ríos existe la comunidad de los manglares de Tumbes, altamente dependiente de la dinámica del transporte de sedimento fluvial (Morera y Flores, 2013). El transporte de sedimento fluvial estudia la dinámica de los flujos líquidos y sólidos este último dividido en dos componentes: sedimento en suspensión, material que se mantiene suspendido en un flujo (Maza, 1996) y sedimento de fondo, material que se desplaza en contacto o muy próximo al lecho (Espinoza et al., 2004).

En el año 2004 el Observatorio HYBAM-IRD inició los registros continuos de material en suspensión en la estación El Tigre (PT). En el año 2011 el Instituto Geofísico del Perú (IGP) mediante el "Proyecto Manglares de Tumbes" y convenio marco con el

Instituto de Investigación para el Desarrollo Francés (IRD) inició el muestreo estratégico de sedimentos en suspensión para las cuencas PT y ZA. Sin embargo, caracterizar la dinámica de los flujos de sedimentos requiere también de la cuantificación del sedimento de fondo, cuyo conocimiento para el Perú es limitado.

En el año 2013, el IGP mediante el Proyecto Manglares de Tumbes y apoyo del IRD de Francia, el Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (PEBPT) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), inició el monitoreo de sedimento de fondo en la cuenca del río PT a la altura de la estación El Tigre y en la cuenca del río ZA a la altura de la estación La Coja. A partir de estos estudios se ha obtenido la primera base de registros continuos de monitoreo de sedimento en suspensión y fondo, cuya confiabilidad y limitaciones podrán servir de referencia para proyectos de aprovechamiento del recurso hídrico (represas, reservorios, canales etc.).

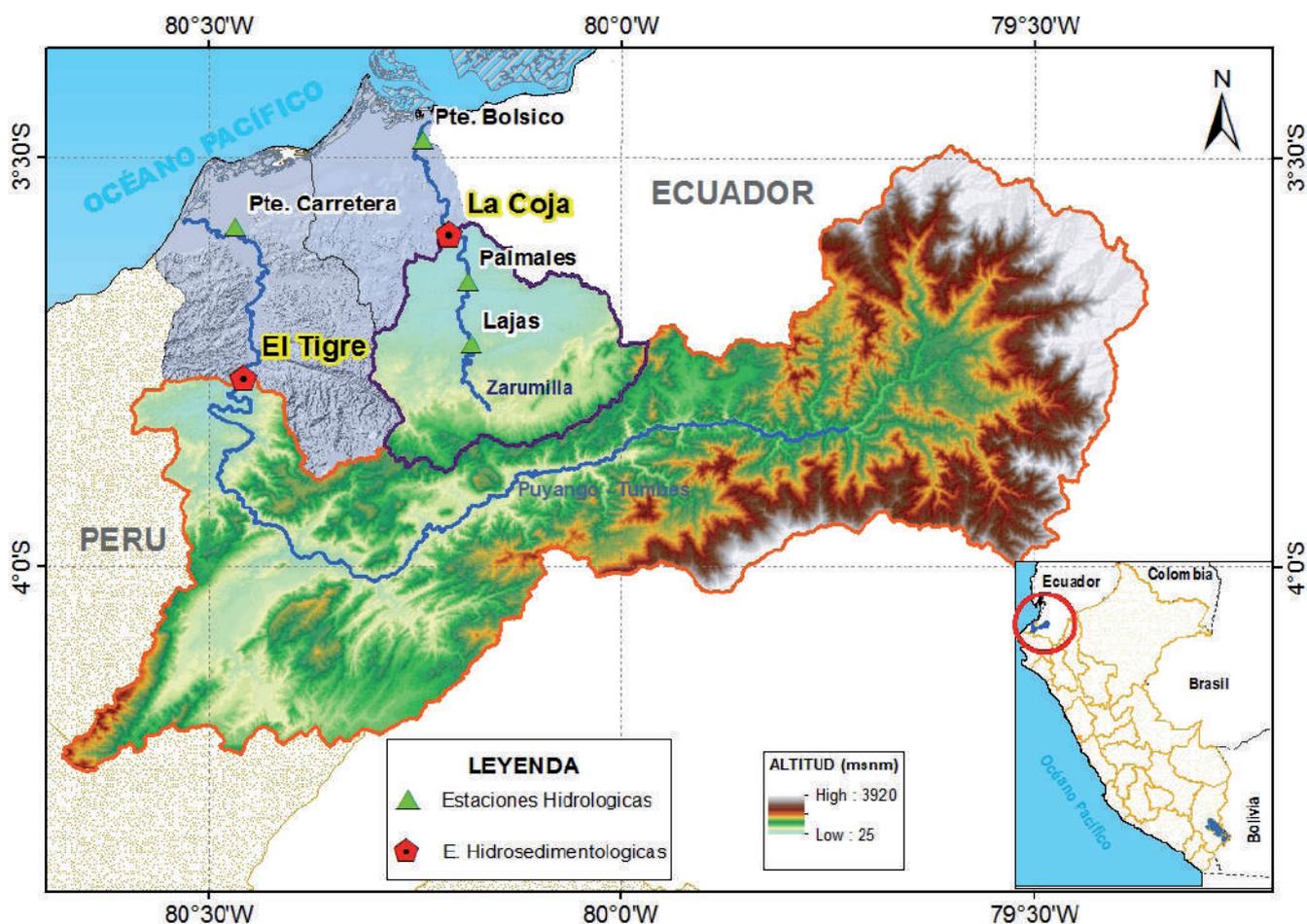


Figura 1. Mapa topográfico de ubicación del área de estudio y estaciones hidrométricas.

2. Metodología

Para cuantificar el gasto sólido total (Q_{st}) dividido en sus dos componentes: gasto sólido en suspensión (Q_{ss}) y gasto sólido de fondo (Q_{sf}) se estableció la siguiente metodología.

2.1 Monitoreo de líquidos

A partir del inventario de registros de caudales líquidos en las estaciones de monitoreo se realizó un análisis hidrológico de cada cuenca. Los registros horarios de los niveles del río (1963-2014) en las cuencas PT Y ZA fueron transformados en caudales a partir de la curva de gasto líquido. Dicho procedimiento se realizó mediante el software Hydraccess (Vauchel, 2010).

El río PT presenta un caudal permanente durante el ciclo hidrológico, cuyo periodo húmedo está comprendido entre enero y abril con un caudal promedio histórico anual de 110 m^3/s . Por otro lado, el río ZA presenta un régimen intermitente con una marcada estacionalidad, cuya época húmeda está comprendida entre enero y abril con un caudal promedio histórico anual de 11 m^3/s .

Durante el período monitoreado 2014-2015, los caudales registrados en la estación El Tigre (PT) y La Coja (ZA) estuvieron por debajo de los promedios históricos sin embargo, durante el mes de mayo se registraron caudales extraordinarios. En la Figura 2 se muestra el hidrograma de caudales diarios registrados en la estación El Tigre.

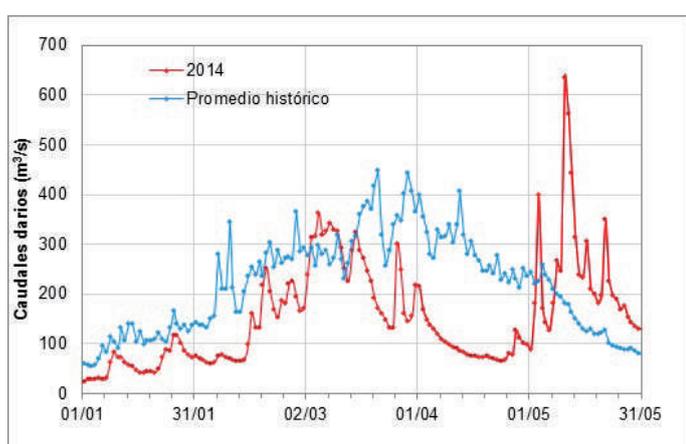


Figura 2. Hidrograma de caudales diarios (enero-mayo). La línea celeste representa los caudales diarios históricos (1963-2014). La línea roja representa los caudales diarios registrados en el 2014, con picos que alcanzaron los 650 m^3/s en mayo 2014.

2.3.1. Aforo con ADCP

Durante el 2014 se realizaron aforos de líquidos con ayuda de un equipo ADCP (Tecnología Doppler) el cual permitió obtener un perfil de profundidades y una gradiente de velocidades, a partir del cual se definió la ubicación del equipo muestreador de fondo (Helley-Smith). El perfil de velocidades también permitió caracterizar el movimiento de sedimento de fondo dándole una mayor precisión a los cálculos. Se obtuvo un promedio de 8 mediciones que fueron trabajadas en el software ArcGis 10. La sección promedio obtenida (Figura 3) fue sub seccionada en función de la gradiente de velocidad.

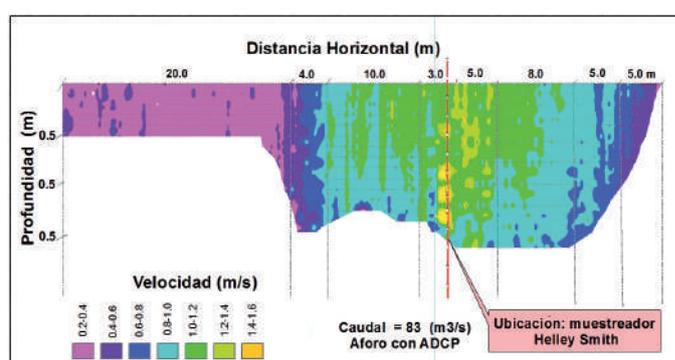


Figura 3: Gradiente de velocidades promedio (12/04/14). La velocidad media registrada fue de 0.8 m/s . Las mayores velocidades se registran en el centro de la sección, siendo el valor máximo de 1.4 m/s . La profundidad media donde se registraron velocidades fue de aproximadamente de 0.8 m y la máxima profundidad fue de 1.6 m, cercana a la margen derecha de la sección.

2.2 Monitoreo de sólidos

2.3.1. Sólidos en suspensión

El protocolo de muestreo del sedimento en suspensión consistió en recolectar manualmente una muestra de agua a la orilla del río, en botellas de 600 ml, las cuales se introducen 20 cm de la superficie del río.

En el laboratorio las muestras fueron filtradas en un papel filtro de 45 μm de porosidad, mediante el método de succión al vacío; luego los filtros fueron secados en la estufa a 60°C durante 24 horas y finalmente pesados. A partir de la concentración de sedimento en suspensión (MES) y los caudales instantáneos (QI), se calculó el gasto sólido en suspensión (Q_{ss}). El cálculo se realizó a partir del método 15 (Ecuación 1) de Phillips et al., (1999).

$$Q_{ss} = K \sum_{i=1}^{ns} \left(\frac{C_i Q_i}{ns} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Ecuación 1

Donde:

Q_{ss} : Gasto sólido en suspensión (Kg/s)

- K: Factor de conversión
- Q_i : Descarga instantánea (m³/s)
- ns : Número de muestras
- C_i : Concentración instantánea de sedimento (mg/l)

2.3 Sólidos de fondo

• Caracterización granulométrica

La primera etapa consiste en caracterizar la granulometría del río mediante el muestreo superficial y sub superficial en las estaciones de estudio. La granulometría de gruesos superficiales se determinó de acuerdo al método fotogramétrico (García, 1994). De acuerdo a este análisis se determinó que existe una mayor predominancia de arenas a finos en ambas estaciones sin embargo, en la estación La Coja (ZA) el material de arrastre de fondo está compuesta principalmente por arena gruesa. Para el muestreo sub superficial se realizaron calicatas de 1x1x1 metros. A partir de las muestras se obtuvo la caracterización granulométrica mediante el método de tamizado.

• Selección del muestreador de fondo

De acuerdo a los requisitos técnicos (Xiaoqing, 2006) que debe tener un muestreador de fondo se seleccionó el muestreador tipo trampa Helley-Smith (Emmet, 1981). En la Figura 3 se aprecia los dos prototipos de muestreador Helley-Smith que fueron construidos para la presente investigación. El muestreador está compuesto por un marco de acero, una malla de 0.2 mm elaborado de poliéster y boquilla. El tamaño de la boquilla (76x76mm) se seleccionó de acuerdo a Vericat et al., 2006.

• Monitoreo

En ambas estaciones se realizaron pruebas de ensayo de aforo de sólido de fondo. Se determinó un tiempo óptimo de muestreo de 10 min para la estación El Tigre y 15 min para la estación La Coja. Tiempo requerido para que la muestra capturada en la malla encargada de capturar los sedimentos de fondo no sobrepase las tres cuartas partes de su capacidad de almacenamiento. Para la estación El Tigre las mediciones fueron realizadas en la parte media de la sección de aforo donde se registraron las mayores velocidades de acuerdo a la gradiente de velocidad (Figura 3).



Figura 4. Muestreador de fondo Helley-Smith. Se contó con dos prototipos.

• Procesamiento y análisis de muestras

Las muestras obtenidas fueron guardadas en bolsas herméticas para su adecuada conservación. En laboratorio el procedimiento consistió en el secado al ambiente (Figura 5) y luego en estufa a 60 °C por una hora para finalmente ser pesadas.



Figura 5. Secado al ambiente de muestras de sedimento de fondo.

A partir de la ecuación de Iroumé (2003) (Ecuación 2) la cual considera el peso de la muestra (P), el ancho de boquilla del Helley Smith (b), tiempo de toma de muestra (t), el ancho de la sección de aforo (B), y número de muestras (n) se calculó el gasto sólido de fondo (Q_{sf}), adicional a las variables mencionadas se consideró un factor de velocidad al cálculo. Para ello, a partir de la gradiente de velocidades (Figura 3), el ancho total de la sección (B) fue dividido en siete sub secciones. En función de la velocidad se consideró un factor del 100 % para la sub sección donde se encontraron las máximas velocidades.

$$Q_{sf} = \frac{P * B}{n * t * b} \quad \text{Ecuación 2}$$

Ecuación 2

4. Estimación del gasto sólido de fondo a partir de ecuaciones empíricas

A partir de la caracterización granulométrica del lecho en las estaciones El Tigre y La Coja se seleccionaron 7 ecuaciones empíricas de fondo (Haddadchi et al, 2013):

- Du Boys-Straub
- Meyer-Peter y Muller
- Schoklitsch
- Einstein-Brown
- Yalin
- Van Rijn
- Pernecker y Vollmer

3. Resultados

3.1 Modelo hidrosedimentológico del transporte total

Para la cuenca Puyango-Tumbes existe una clara relación potencial entre los caudales líquidos y las descargas de sedimentos. Para un mismo caudal instantáneo la magnitud del gasto sólido de suspensión (Q_{ss}) es 12 veces la magnitud del gasto sólido de fondo (Q_{sf}). La tendencia del Q_{sf} disminuye respecto al Q_{ss} .

En la Ecuación 3 se muestra el modelo sedimentológico obtenido de gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido en base a una serie histórica del 2004 al 2013 con una correlación de $R^2=0.81$. Asimismo en la Ecuación 4 se muestra el modelo sedimentológico de gasto sólido de fondo en función del gasto líquido en base a la serie histórica del 2014 con una correlación de $R^2=0.551$.

$$Q_{ss} = 0.6006 Q_l^{1.7357} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Q_{sf} = 0.0563 Q_l^{1.5008} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para la cuenca Zarumilla la magnitud del gasto sólido en suspensión es 0.6 veces la magnitud del gasto sólido de fondo.

En la Ecuación 5 se muestra el modelo sedimentológico obtenido de gasto sólido en suspensión en función del gasto líquido en base a la serie histórica del 2014 con una correlación de $R^2=0.7697$. Asimismo en la Ecuación 6 se muestra el modelo sedimentológico de gasto sólido de fondo en función del gasto líquido en base al monitoreo del 2014 con una correlación de $R^2=0.7386$.

$$Q_{ss} = 0.3614 Q_l^{1.9182} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Q_{sf} = 0.05317 Q_l^{1.5609} \quad \text{Ecuación 6}$$

3.2 Dinámica del transporte de sedimentos

Para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre, se obtuvo un Q_{st} promedio histórico igual a 340 t.km-2.año-1, de los cuales el 92 % se transporta durante la época húmeda, el 7 % en transición y solo 1 % durante estiaje. Para la cuenca Zarumilla en la estación La Coja, se obtuvo un Q_{st} promedio histórico equivalente a 136 t.km-2.año-1, de los cuales el 99 % se transporta en época de lluvias y el 1 % en transición.

Durante el periodo de monitoreo (2013-2014) en la cuenca Puyango-Tumbes se transportó 530 t.km-2.año-1 de los cuales el 98 % se transportó en suspensión y un 2 % en fondo y en la cuenca Zarumilla se transportó 158 t.km-2.año-1 de los cuales aproximadamente un 75 % se transportó en suspensión y un 25 % en fondo. En la Figura 6 se muestra la dinámica del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión.

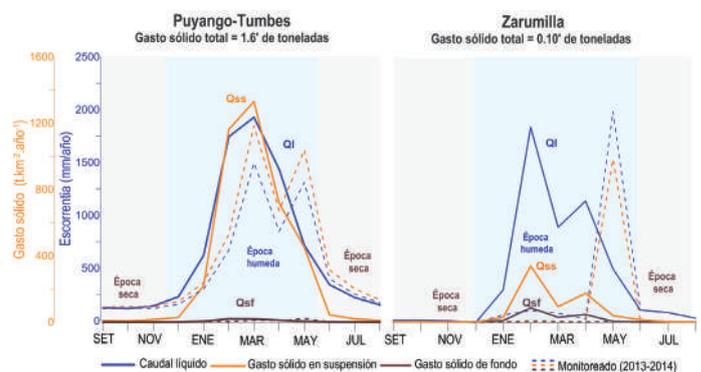


Figura 5. Dinámica del transporte de sedimentos de fondo y en suspensión. El eje X representa el espacio temporal, el eje Y (azul) representa la escorrentía, el eje Y (naranja-marrón) representa el gasto sólido en suspensión y de fondo en t.km-2.año-1. Las líneas continuas representan los caudales históricos y las líneas punteadas corresponden al ciclo hidrológico monitoreado (2013-2014). Los mayores picos de gasto sólido total (suspensión y fondo) en ambas cuencas se dan durante los meses de febrero, marzo y abril.

3.3 Gasto sólido de fondo observado y estimado a partir de ecuaciones empíricas

Para la cuenca Puyango-Tumbes todas las fórmulas sobreestiman el gasto sólido de fondo observado un mejor ajuste de la fórmula de Yalin bajo un rango de caudales diarios monitoreados menor a 500 m3/s.

Para la cuenca Zarumilla las fórmulas de Schoklitsch, Van Rijn, Meyer Peter y Muller, Yalin obtienen un mejor ajuste respecto a la cuenca PT sin embargo, esto limitado bajo un rango de caudales diarios observados menores a 20 m3/s.

4. Discusión

Se ha logrado obtener una base de datos confiables del transporte de sedimento de fondo en la cuenca Puyango-Tumbes y Zarumilla. Sin embargo, los registros obtenidos han sido limitados por los bajos caudales registrados durante el periodo de monitoreo con caudales menores a 500m³/s.

Por otro lado se ha detectado que durante el registro de avenidas se dificulta el uso del muestreador de fondo Helley-Smith debido a las grandes palizadas que son arrastradas por el río el cual pone en riesgo la integridad del observador y el equipo.

La mejor dispersión de las fórmulas empíricas de fondo respecto a los valores observados en la cuenca Zarumilla contrasta con lo afirmado por diversos autores ya que, sugieren que las fórmulas empíricas de transporte de sedimento de fondo predicen razonablemente el gasto sólido de fondo en corrientes con fondo arenoso. Esto se debe a que las ecuaciones fueron calibradas en canales experimentales o ríos de baja pendiente compuesto por arenas con nulo contenido de cantos rodados.

5. Conclusiones

- Se estableció una metodología para el monitoreo de sedimento de fondo mediante la combinación de un equipo Helley-Smith y el uso del ADCP.
- Para la cuenca Puyango-Tumbes en la estación El Tigre, se obtuvo un Qst promedio histórico igual a 1.6 millones de los cuales aproximadamente el 98 % se transporta en suspensión y un 2% en fondo. Para la cuenca Zarumilla en la estación La Coja, se obtuvo un Qst promedio histórico igual a 0.1 millones de los cuales aproximadamente el 75 % se transportan en suspensión y un 25 % en fondo.
- La fórmula de Yalin obtuvo el mejor ajuste respecto a los datos observados de sólido de fondo cuya desviación estándar para la cuenca ZA resultó 180 y 300 t/d para la cuenca PT, limitado a los valores observados de caudales líquidos.

6. Recomendaciones

Se recomienda monitorear los sedimentos en suspensión y de fondo durante la etapa de estudios de obras de infraestructura hidráulicas.

Se recomienda continuar monitoreando los sedimentos de fondo en las estaciones El Tigre y

La Coja durante caudales altos para ajustar estos resultados en épocas de avenida, previo a la construcción de modelos hidrosedimentológicos.

Se recomienda plantear políticas de gestión para estudios sedimentológicos en el Perú.

7. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú y el Proyecto Manglares de Tumbes por brindarme las facilidades para desarrollar mi tesis y también a mi asesor por la orientación y paciencia.

8. Bibliografía

- Emmett, W.W. (1980). "A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bed load sampler". (pp. 44). Espinosa, M.; Osterkamp, W. & López, V. (2004). "Transporte de sedimentos en corrientes naturales". Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimento de fondo. Terra Latinoamericana. 22: 377-386.
- García, C. (2004). "Métodos para la caracterización granulométrica en ríos de gravas. Notes de Geografía Física. 23: 5-16.
- Haddadchi, A.; Omid, M.H; Dehghani,A.A. (2003). "Sediment transport in a mountainous catchment in the Andes of the Ninth Region of Chile". Bosque. 24 (1): 125-135.
- Iroumé, A. (2003). "Sediment transport in a mountainous catchment in the Andes of the Ninth Region of Chile". Bosque. 24 (1): 125-135.
- Morera, S.B., & Flores, D. (2013). "de erosión actual y eventos El Niño en la cuenca del río Puyango-Tumbes y Zarumilla". Identificación de servicios ecosistémicos en el santuario nacional los Manglares de Tumbes (pp. 51-53). Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú.
- Morera, S. B.; Mejía-Marcacuzco, A.; Guyot, J.L.; Gálvez, C.; Salinas, F.; Collas, M., & Ingol-Blanco, E. (2013). "Uncertainty in Suspended Sediment Load Estimates for Mountain Rivers. Case of Study of Central Andes in Peru". Paper presented at the World Environmental and Water Resources Congress, Cincinnati, Ohio. 3216-3225
- Maza, J. (1996). Transporte de sedimentos. México. Instituto de ingeniería UNAM. 531p.
- Phillips, J. M.; Webb, B. W.; Walling, D. E., & Leeks, G.J.L. 1999. "Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples". Hydrological Processes. 13(7): 1035-1050.
- Vauchel, P. (2010). "Software para manejo y procesamiento de información hidrometeorológicas". Recuperado el 25 de Mayo de 2014, de <http://www.orehybam>.
- Vericat, D.; Church, M., & Batalla, R.J. (2006). Bed load bias: "Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley – Smith sampler in gravel bed river". Water Resour. Res. 42 (1-13).
- Xiaoqing, Y. (2006). "Manual on Sediment Management and Measurement. World Meteorological organización (pp.47).

Sección

Ciencias de la
Alta Atmósfera

DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN Y SUPERVISIÓN PARA EL ENCENDIDO DEL TRANSMISOR DEL RADAR SOUSY EN EL RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA

DESIGN OF THE AUTOMATION AND SUPERVISION SYSTEM FOR THE START UP OF THE SOUSY'S RADAR TRANSMITTER AT JICAMARCA RADIO

Jorge André Florentino Collado

Pontificia Universidad Católica del Perú
Facultad de Ciencias e Ingeniería – Ingeniería electrónica
andre.florentino@jro.igp.gob.pe

Asesor: Danny Scipión, Ph.D

Dr. Marco Milla
Radio Observatorio de Jicamarca

Resumen

El radar SOUSY (SOUNDing SYstem) del Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) es un radar monoestático que opera a la frecuencia de 53.5 MHz y que permite realizar estudios en la Mesósfera, Estratósfera y Tropósfera (MST, por sus siglas en inglés) con alta resolución (37.5 m) ya que posee un ancho de banda de 4 MHz. Su tecnología de operación (transmisión y recepción) fue diseñada en la década del 70. Al ser donado e instalado en el ROJ en el 2002 se le realizó una primera actualización reemplazando el sistema de recepción por uno digital, haciéndolo compatible con los demás sistemas de radar del ROJ. Se plantea realizar el diseño de una segunda actualización al sistema, esta vez aplicada al encendido del transmisor del radar. Para esto, se propone trabajar con un PLC para controlar la secuencia de encendido, el cual trabajará en forma conjunta a una computadora, permitiendo la supervisión del proceso de encendido a través de un sistema SCADA.

Palabras clave: radar, SOUSY, transmisor, PLC, SCADA.

Abstract

The SOUSY (SOUNDing SYstem) radar at the Jicamarca Radio Observatory (JRO) is a monostatic radar that operates at 53.5 MHz that allows observations of the Mesosphere, Stratosphere, and Troposphere (MST) with high resolution (37.5 m) thanks to its wide bandwidth of 4 Mhz. The system was designed and constructed in the 70s. Right after its donation to the JRO in 2002, the original reception technology was updated to digital receivers, making it fully compatible with the current standards used at Jicamarca. Nowadays, a new update is on its way: the design of the start up sequence for the transmitter using a programmable logic controller (PLC) that will work with a computer to monitor and supervise the sequence throughout a supervisory control and data acquisition (SCADA) system.

Keywords: radar, SOUSY, transmitter, PLC, SCADA.

1. Introducción

Los radares MST permiten estudiar fenómenos atmosféricos en capas como la Mesósfera, Estratósfera y Tropósfera con una técnica pionera desarrollada en el Perú en la década de los 70 (Woodman et al., 1973). Usualmente cuentan con grandes arreglos de antenas de alta potencia que trabajan en el rango de frecuencias VHF (30 a 300 Mhz), características que permiten estudiar las capas mencionadas. Tras los buenos resultados obtenidos usando dicha técnica, otros radares fueron construidos específicamente con dicho propósito, entre ellos mencionamos al radar SOUSY (Woodman et al., 2002). El radar SOUSY precisamente es un radar MST construido originalmente en Harz, Alemania, por el Max Planck Institute für Aeronomie donado en el 2002 al ROJ. Allí dicho radar se actualizó por primera vez y se modificaron los sistemas de control de transmisión y recepción de señales por unos controlables por computadora (Woodman et al., 2007). Por otro lado, el transmisor se mantiene con la lógica de control de encendido, protección y supervisión originales. Sin embargo existen otros radares cuyos sistemas de transmisores sí han sido actualizados (Gaudreau et Al., 2005), como es el caso del radar principal del ROJ, en donde el control de los transmisores ha sido automatizado con un sistema que además permite la supervisión del sistema (Espinoza et. al 2006). El presente trabajo tiene como objetivo realizar el diseño de la segunda etapa de actualización del radar SOUSY, en cuanto al control y la supervisión del transmisor del mismo.

2. Desarrollo

La evolución de los dispositivos electrónicos es constante. Tal es el caso del radar SOUSY, en el cual las señales de control y la recepción de las señales han pasado a ser de naturaleza digital, lo que permite el uso de computadoras en el proceso. Por otro lado, las tecnologías de transmisores (amplificadores de potencia) no han variado tan significativamente. Sin embargo, los sistemas de supervisión y control han sufrido un mayor cambio. Tal es el caso del radar principal del ROJ, cuyo transmisor solía manejarse desde los botones de una consola y supervisarse con indicadores luminosos, por lo que para su manejo era necesario cierto nivel de experiencia con el equipo.

Actualmente, el sistema de control de encendido del transmisor del radar SOUSY tiene entre 30 y 40 años de antigüedad y está basado en lógica cableada el cual tiene varias desventajas, como: repuestos difíciles de encontrar, poca flexibilidad para modificar el sistema (por si se busca cambiar la tecnología en la que está basado el transmisor) y difícil adaptación a sistemas de supervisión. Pero la principal desventaja es la difícil tarea que significa identificar errores en el proceso de encendido del transmisor, la cual se realiza de manera manual y

toma periodos prolongados de tiempo en llevarse a cabo, afectando la ejecución de los experimentos programados por los usuarios.

Por los motivos expuestos, se plantea diseñar un nuevo sistema de control que eventualmente reemplace al actual para compensar las desventajas que este presenta. En cuanto a la supervisión, deberá permitir la visualización a través de un medio amigable (por ejemplo, un monitor) que facilite la identificación de errores y fallas en el transmisor. Como paso previo a implementar el sistema de control en un dispositivo moderno, se estudiará el sistema actual para entender las funciones de cada bloque e identificar las señales que lo gobiernan.

2.1. Diseño

El sistema tiene los siguientes requerimientos para el diseño de su sistema de control:

- Leer sensores binarios (de dos estados) que gobiernan el funcionamiento del transmisor
- Permitir el encendido modular del sistema (elegir qué etapas serán utilizadas: Pre Driver, Driver o Amplificador final de potencia).
- Identificar errores durante el encendido o funcionamiento del transmisor.
- Elaborar una interfaz que permita administrar el funcionamiento del sistema a los usuarios.

En base a los requerimientos, y tomando en cuenta que el transmisor requiere un control netamente secuencial (sin retroalimentación de señales) se plantea un diseño como el mostrado en la Figura 1.

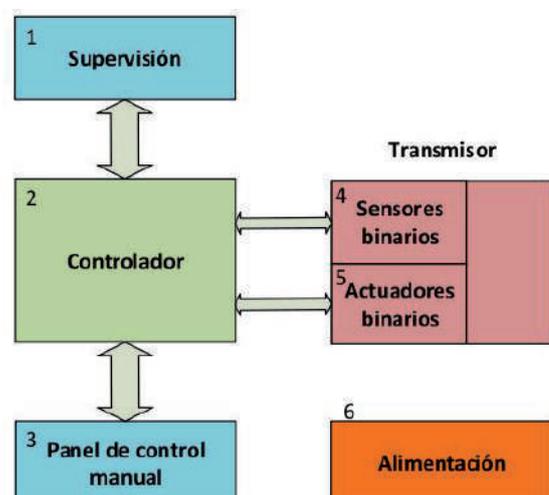


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema propuesto.

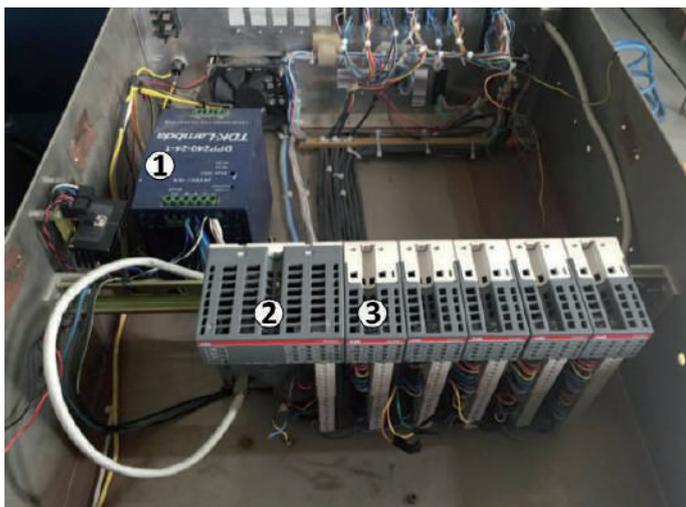


Figura 2: Hardware utilizado para implementar el sistema de control del transmisor.

Figura 1: Diagrama de bloques del sistema propuesto. El bloque (1) de supervisión es un medio gráfico para controlar el funcionamiento del sistema, el cual se comunica con el controlador (2) enviando y recibiendo instrucciones para cumplir dicho propósito. El controlador a la vez, ejecuta el algoritmo de control a partir de la lectura y escritura de señales que son tomadas de los sensores (4) y actuadores binarios (5).

De las posibles alternativas de dispositivos de control, se optó por usar un PLC por tratarse de un equipo muy empleado en lo que respecta a actualizaciones de radares (como el caso del transmisor del radar principal del ROJ). Se manejaron diversas alternativas de PLC para implementar el sistema, de entre ellas se eligió la alternativa ABB por ser la más económica y porque dentro del costo del equipo se incluía el precio del software de programación y visualización (CoDeSys), las cuales se realizan desde el mismo entorno de desarrollo, facilitando la tarea de implementación.

El hardware utilizado puede observarse en la Figura 2, la cual consta de los siguientes bloques: (1) fuente de alimentación de 24 V; (2) CPU del PLC, modelo PM554-T-ETH y (3) módulos de expansión digital compatibles con la familia del PLC. Entre las características de la familia de PLC están: dispositivos escalables, módulos fáciles de instalar (solo se requiere un riel DIN para dicho propósito), conexión Ethernet incorporada, entre otros.

3. Resultados

El encendido del transmisor se maneja a través de la secuencia de encendido mostrada en la Figura 3, la cual consta de 6 temporizadores que encienden en paralelo las 3 etapas del transmisor. Para la implementación, la duración de dichos temporizadores no ha sido modificada.

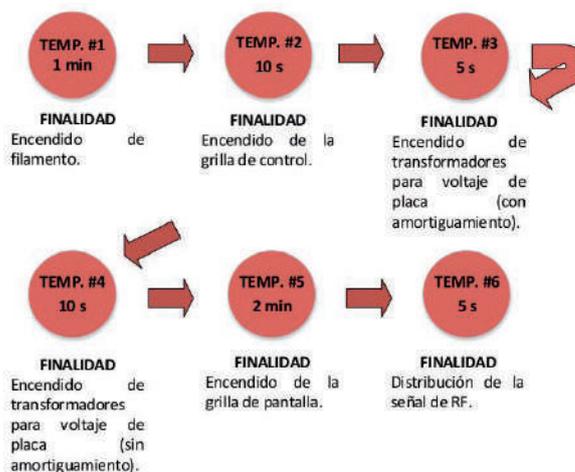


Figura 3: Representación de la secuencia de encendido original del transmisor (manejada por 6 temporizadores).

Aunque solo se presentan simulaciones del sistema, este se encuentra implementado e instalado, como puede verse en la Figura 4. No pudo ser probado por factores externos que no lo permitieron, como averías en el transmisor o en el grupo electrógeno que lo alimenta. Sin embargo, la solución fue evaluada mediante casos de estudio analizados usando el modo simulación del entorno de desarrollo. En todos los casos, se solo se seleccionó la etapa Pre Driver del transmisor (Figura 5).

En la Figura 6 se puede observar uno de los casos de estudio que se da cuando un error ocurre una vez que el transmisor se encuentra funcionando. En la figura se ve una representación del transmisor, en la cual se colorea de rojo la etapa en la que ocurrió el error (Pre Driver en este caso). También se observa que los temporizadores han sido desactivados (indicadores Temporizador 1 al 6 de negro). Para observar con más detalle la naturaleza de la falla, el botón "Estado" lleva a otra pantalla (Figura 7) en la cual se observa el estado de los circuitos que la constituyen, indicando de rojo aquellos en los que haya ocurrido el error. Si en dicha pantalla se presiona el botón "Detalle" correspondiente al circuito de filamento, entonces se accede a un cuadro (Figura 8) que registra el error con una ubicación más exacta dentro de los circuitos del transmisor, así como la fecha y la hora del evento.

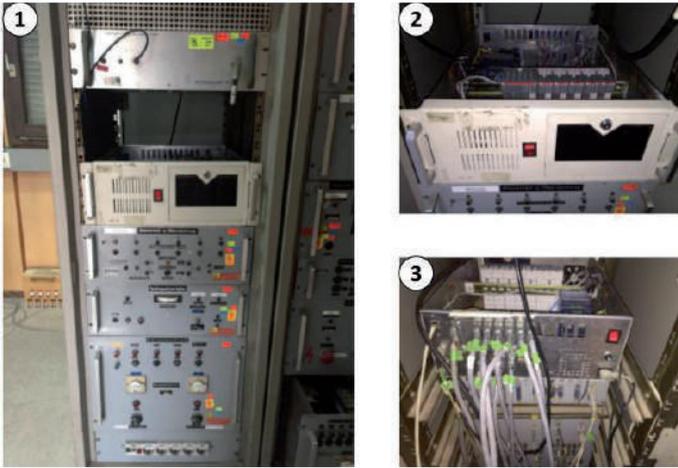


Figura 4: Sistema instalado: (1) Vista frontal del transmisor (2) Vista frontal del sistema instalado y (3) Vista de las señales conectadas al sistema.



Figura 7: Pantalla que permite visualizar con mayor detalle el estado de los circuitos de la etapa seleccionada del transmisor.

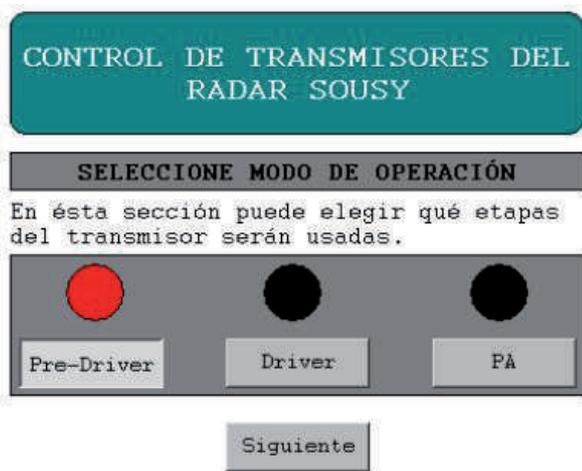


Figura 5: Pantalla de la visualización que permite elegir qué etapas del transmisor utilizar.



Figura 8: Pantalla que permite visualizar con mayor detalle dónde ocurrieron los errores dentro de una etapa.

4. Conclusiones

- El sistema de control basado en PLC permite que la implementación se haga de manera sencilla, ya que se tiene hardware flexible y el software de control es fácil de modificar. Incluso si se cambia de tecnología en el transmisor, el controlador se puede adaptar a la misma sin necesidad de rehacer todo el sistema desde cero.
- El encendido modular del transmisor permite que el radar pueda funcionar a menores potencias. Esto ya sea porque así se requiere en un experimento, por si se requieren hacer pruebas etapa por etapa o porque alguna de ellas no se encuentra disponible en ese momento.
- El entorno de supervisión desarrollado facilita el manejo del sistema al usuario permitiendo que se le notifique rápidamente de los errores durante el encendido o funcionamiento del transmisor, lo que agiliza la detección de fallas y por consiguiente del mantenimiento correctivo del sistema.

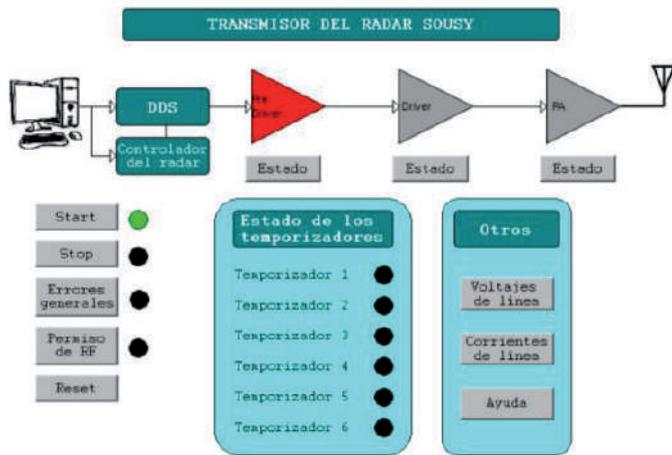


Figura 6: Caso de estudio en el cual un error ocurre cuando el transmisor se encuentra funcionando.

- Es posible realizar un manejo remoto del sistema de encendido del transmisor a través de una conexión ethernet directa, de una red local o configurando un servidor web que sirva para lo propio.

5. Recomendaciones

- Antes de iniciar el proceso de diseño o implementación de un nuevo sistema de control, es recomendable que primero se acuerde con el usuario la forma en la que será desarrollado. Esto permite saber si se quiere optar por un diseño totalmente nuevo o si solo se requiere una adaptación de un nuevo tipo de tecnología a la lógica de control que controla al sistema.
- Se debe contar con el apoyo del personal de más experiencia en el manejo del equipo para asuntos relacionados con el levantamiento e interpretación de los circuitos que conforman al sistema.
- Cuando se busca implementar un control que sigue una lógica secuencial es importante seguir con orden las señales de control con las que se cuentan que pueden ser muchas. En ese sentido, se puede tener una lista con las señales enumeradas y ahí seguir un código de colores que permita identificarlas rápidamente con los cables que le corresponden.
- La etapa de pruebas se debe hacer de cerca con el personal que más conoce el equipo, pues ellos tienen una idea definida de cómo debería responder este ante diversas situaciones. Así también, es importante contar con un protocolo de seguridad para las pruebas, que permita dejar al equipo fuera de riesgos durante las mismas.

6. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú, en especial a la sede del Radio Observatorio de Jicamarca, por la oportunidad y el apoyo brindados durante el periodo del desarrollo de mi tesis.

7. Bibliografía

Espinoza, J. (2006) "Automatización del encendido de los transmisores principales del Radio Observatorio de Jicamarca".

Gaudreau, M., Casey, J., Brown, P., Hawkey, T., Mulvaney, J., Kempkes, M. (2005) "High performance, solid-state high voltage Radar modulators". En: *IEEE Pulsed Power Conference*, pp. 13-17.

Woodman, R., Guillen, A. (1973) "Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere". En: *J. Atmos. Sci.* 31, pp. 493-505.

Woodman, R. (2002) "MST and ST RADARs and Wind Profilers". En: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, pp.18-25.

Woodman, R., Micchue, G., Röttger, J., Castillo, O. (2007). "The MPI-SOUSY-VHF Radar at Jicamarca: High Altitude-Resolution Capabilities". En: *11th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar*.

Zheng, Y., Li, D., Ye, F. (2010). "WRMDDS: A Web-based Remote Monitoring and Distributed Diagnosis System". En: *3rd International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM)*, pp. 273-276.

ESTUDIO DE TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA IONÓSFERA ECUATORIAL EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS USANDO DATOS DE LA IONOSONDA DEL ROJ

A STUDY OF THE EQUATORIAL IONOSPHERE BEHAVIOR TENDENCY FROM LAST TWENTY YEARS USING DATA FROM THE JRO IONOSONDE

Anthony Mard Calatayud Cadenillas

Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ciencia
Facultad de Ciencia
anthony.calatayud.c@gmail.com

Asesor: Marco Milla, Ph.D

Radio Observatorio de Jicamarca

Resumen

El aumento de la concentración de “gases de efecto invernadero” entre los que se encuentran el CO₂ y los óxidos de nitrógeno NH_x, no tienen la misma influencia en la atmósfera. Desde el siglo diecinueve se tiene indicios que la temperatura de la superficie de la Tierra y de la baja atmósfera presentan tendencia al aumento. Sin embargo, estudios realizados por Roble (1987) mostraron una disminución en la temperatura de la alta atmósfera. Estos resultados fueron tomados por Rishbeth (1990) para encontrar posibles consecuencias en los valores de hmF₂ (altura de la densidad máxima de electrones en la capa F₂) y NmF₂ (densidad máxima de electrones en la capa F₂), dado que estos parámetros, incluyendo foF₂ (frecuencia máxima del plasma en la capa F₂), suelen ser utilizados para caracterizar el estado de la ionósfera. En general son muy importantes para las telecomunicaciones terrestres y satelitales, por lo que se viene monitoreando constantemente desde hace casi un siglo (Bremer, 2004; Bencze, 2005). La comunidad científica tiene el consenso del enfriamiento de la termósfera. No obstante, no se ha podido determinar si hmF₂ está disminuyendo de manera significativa por consecuencia de los gases de efecto invernadero.

Entonces Rojas (2012), utilizando los datos medidos por la ionosonda del ROJ (Radio Observatorio de Jicamarca), realizó medidas en las tendencias de las series de tiempo hmF₂, NmF₂, foF₂ sobre el ROJ, es decir, sobre el área del ecuador magnético que pasa por el ROJ. Para ello usó el método de Bremer (1992) y el método directo (Rojas, 2012). Las series de tiempo utilizadas por Rojas (2012) se extienden desde 1993 hasta 2012.

En este trabajo, se volverán a medir las tendencias de las series de tiempo de hmF₂, NmF₂ y foF₂, usando diferentes formas de filtrado y técnicas de análisis como el PCA (Principal Component Analysis), además del estudio de correlación entre variables del modelo y las series de tiempo. El objetivo de este trabajo es comparar los resultados obtenidos por Rojas (2012) y los nuevos métodos de análisis anteriormente mencionados.

Palabra clave: Ionósfera; tendencias; hmF₂; PCA

Abstract

The increase at the concentration of “greenhouse effect gases” including CO₂ and nitrogen oxides NH_x, do not have the same influence over the atmosphere. Since nineteenth century we have evidence that the temperature of the earth surface and the low atmosphere present a tendency to increase. However, studies from Roble (1987) showed a decrease at the low atmosphere temperature. These results were used by Rishbeth (1990) to find possible consequences at the values of hmF₂ (the high of the maximum density of the electrons at the layer F₂) and NmF₂ (maximum density of the at layer F₂), because that parameters, including foF₂ (maximum frequency of the plasma at layer F₂), are commonly used for characterize the state of the ionosphere. In general, these are very important for the earth and satellites telecommunications, and that is why they have been frequently monitored for almost a century (Bremer, 2004; Bencze, 2005). The scientific community agree at the cooling of the thermosphere. Nevertheless, nobody have determined if hmF₂ is decreasing significantly due to greenhouse effect gases.

Then Rojas (2012), using the data from the Jicamarca Radio Observatory (JRO) ionosonde, made measurements at the tendencies at hmF₂, NmF₂, foF₂ time series over the JRO, that is, over the area from the magnetic equator at the JRO. To achieve this, he used the Bremer (1992) method and the direct method (Rojas, 2012). The time series used by Rojas (2012) goes from 1993 to 2012.

In this work, the tendencies of the hmF₂, NmF₂ y foF₂ time series will be measure again, using other types of filtering and PCA (Principal Component Analysis) techniques, apart from the study of correlation between variables from the model and time series. The objective of this work is to compare the results obtained by Rojas (2012) and the new methods of analysis previously mentioned.

Keywords: Ionosphere; tendency; PCA

1. Introducción

El aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero no provocan los mismos cambios en la atmósfera, de esta manera se tienen aumentos de temperatura en la superficie de la Tierra y baja atmósfera, y disminución de temperatura de la termósfera (Roble, 1987). Además, el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero, traen consecuencias en la ionósfera, pues los principales parámetros que la caracterizan (hmF2, NmF2 y foF2) se ven afectados (Rishbeth, 1990). Sin embargo, no se ha podido determinar si hmF2 disminuye de manera significativa a consecuencia del aumento de concentración de gases de efecto invernadero.

Entonces, es importante investigar las tendencias a largo plazo de los parámetros hmF2, NmF2 y foF2 pues son muy importantes para las telecomunicaciones terrestres y satelitales. Con el fin de hallar estas tendencias, se tomó el trabajo de tesis de Rojas (2012) y se siguieron los modelos planteados por Rojas agregándoles nuevas formas de análisis. No obstante, existen varios problemas con la medición e interpretación de tendencias de estos parámetros, principalmente relacionadas con el cálculo de la incertidumbre asociada a la tendencia medida y por que las series de tiempo usadas son pequeñas (18 años).

2. Datos

Los datos de hmF2 y foF2 fueron adquiridos por la ionosonda del ROJ, llamada "Digisonde Portable Sounder" (DPS) de Lowell Digisonde Internacional. El sistema de adquisición DPS viene con un software de procesamiento de datos llamado ARTIST (Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True heights). La ionosonda del ROJ fue renovada de la versión DPS-1 a DPS-4 durante los años 2000 y 2001.

Los datos de F10.7 (flujo de ondas electromagnéticas solares con longitud de onda de 10.7cm) y Ap (actividad geomagnética) fueron descargados de la base de datos de "Madrigal".

3. Desarrollo

En esta sección se comentará de manera resumida cuales fueron los tópicos de más importancia en el desarrollo del trabajo.

3.1. Estudio de las bases teóricas

Se estudió la física detrás de la formación de la ionósfera y la dinámica básica que rige la formación de la densidad máxima de electrones. Esto implicaría estudiar la ecuación de continuidad donde los términos de transporte son tan importantes como los de ionización.

Siguiendo el trabajo de Rojas (2012) se estudiaron conceptos de estadística multi variable y los modelos autorregresivos esenciales para el estudio de tendencias de las series de tiempo, así como la manera de estimar el error asociado a las tendencias de las series de tiempo estudiadas eligiendo utilizar los resultados de Weatherhead (1998).

Finalmente, se estudió el método de PCA (Principal Component Analysis), con la intención de realizar el un nuevo análisis de la series de tiempo y comparar los resultados obtenidos por Rojas (2012) realizados por ajuste de mínimos cuadrados.

3.2. Procesamiento de datos

Como se mencionó anteriormente, los datos fueron obtenidos por la ionosonda del ROJ, los cuales fueron tomados desde el año 1993 hasta finales del 2012 cada 15 minutos. Por ello, se siguió el método de Bremer (1992) y Ulich (1997) generar tres series de tiempo correspondientes al amanecer (de 4 a 8 horas), el medio día (de 10 a 14 horas) y el atardecer (de 16 a 20 horas) para cada parámetro estudiado (hmF2, foF2 y NmF2) tomando la mediana diaria dentro de los intervalos de tiempo anteriormente mencionados. Se elaboró un script en Python para este procedimiento, generando graficas como el de la Figura 1.

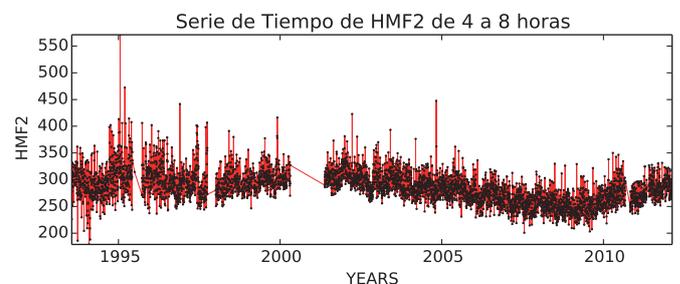
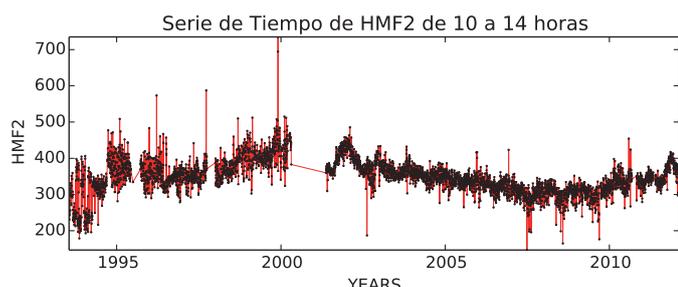


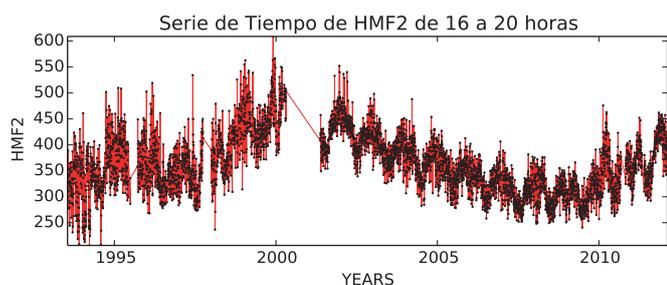
Figura 1: Serie de tiempo de medianas diarias de hmF2 de 4 a 8 horas.

Entre 1993 y 1994 el sistema de adquisición trabajó con diferentes parámetros generando valores inconsistentes, por ellos se decidió trabajar con los datos a partir de 1994. De esta forma se obtuvieron series de tiempo que se extienden desde 1994 hasta finales del 2012.

Además, para eliminar los outliers encontrados en la serie de tiempo, cada serie pasó por un median filter (filtro de medianas) acotado por tres desviaciones estándar como se muestra en la Figura 2.



(a)



(b)

Figura 2: (a) Muestra la serie de tiempo de hmF2 de 10 a 14 horas centrada en la media y acotada por 3 desviaciones estándar. (b) Muestra la serie de tiempo filtrada.

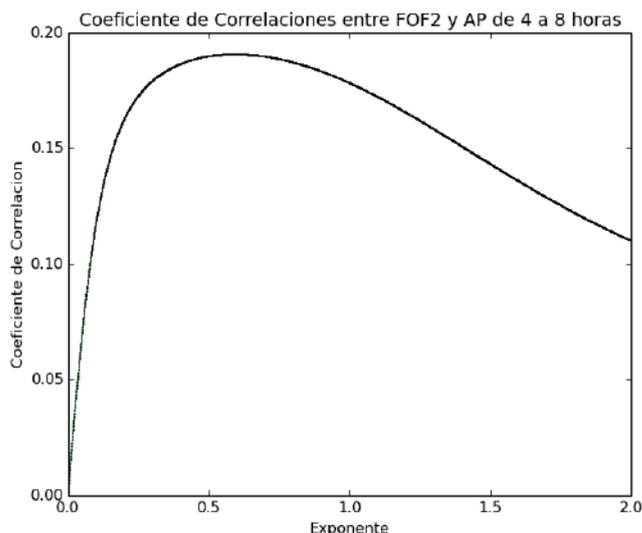
Siguiendo el análisis de Rojas (2012), se realizó el método directo (Rojas, 2012) proponiendo el siguiente modelo empírico lineal:

$$Y_t = c_0 + c_1 t + c_2 \delta_t + c_3 F10.7_t + c_4 S a_t + c_5 S s_t + c_6 A p_t$$

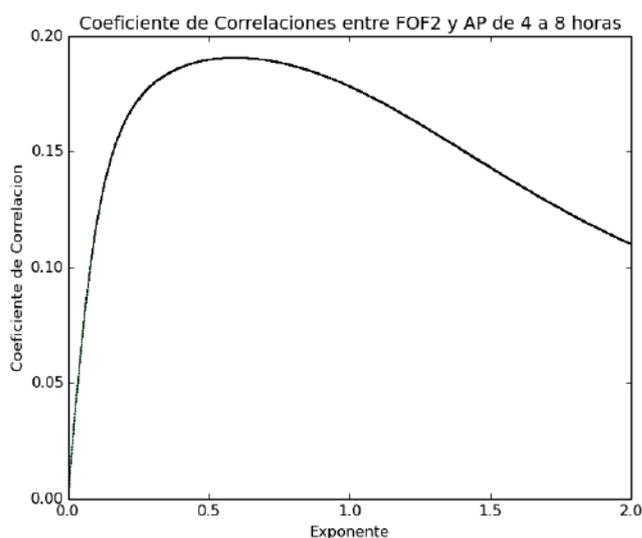
Donde Y_t representa el modelo empírico, $\{c_0, c_1, \dots, c_6\}$ son constantes, S_t es una función escalonada debido a la actualización de la digisonda y las variables $S a_t$ y $S s_t$ representan combinaciones lineales de funciones senoidales y cosenoidales con periodo de oscilación anual y semianual respectivamente.

Se ajustó Y_t por mínimos cuadrados a las series de tiempo de hmF2, foF2 y NmF2, y se construyeron tablas similares a las obtenidas por Rojas (2012).

Luego se calcularon las correlaciones existentes entre las potencias de variables del modelo empírico y las series de tiempo, obteniendo que la mayor correlación entre F10.7 y NmF2 se da cuando se asume proporcionalidad lineal, mientras que la mayor correlación entre F10.7 y foF2 se da cuando foF2 es proporcional a $\sqrt{F10.7}$.



(a)



(b)

Figura 3: Graficas comparativas de la correlación entre NmF2 y foF2 vs las potencias de la variable F10.7. (a) Corresponde a NmF2 y (b) a foF2, ambas gráficas realizadas en el amanecer (4 a 8)

Por último, se calcularon las componentes principales de las variables del modelo empírico. Luego se propuso un modelo lineal de los componentes principales (aumentando gradualmente el número de componentes principales) y se ajustó por mínimos cuadrados a la serie de tiempo de hmF2, foF2 y NmF2, obteniendo de esta forma las gráficas de autocorrelación de la diferencia entre la serie de tiempo y el modelo empírico. Estos resultados se compararon con las obtenidas usando el método directo (Rojas, 2012).

4. Resultados

Los parámetros estadísticos calculados en cada serie de tiempo por método directo (Rojas, 2012) fueron próximos a los resultados de Rojas (2012). Casi en todos los casos se obtuvieron tendencias negativas. La tendencia más relevante es la que pertenece al intervalo de 4 a 8 horas para la serie de tiempo de hmF2, pues concuerda con las predicciones de Rishbeth (1990) indicando una disminución de 44.82 km para hmF2 entre los años 1994 y 2012. Las tendencias halladas para las demás series de tiempo no muestran cambios significativos de los parámetros foF2 y NmF2, siendo los de menor magnitud las tendencias correspondientes al intervalo de 4 a 8 horas.

En la **Tabla 1**: Tendencias ω calculadas para las series de tiempo.

	HORAS		
HMF2	4 - 8	10 - 14	16 - 20
ω	-2.494116	-0.47188	-0.08727
FOF2	4 - 8	10 - 14	16 - 20
ω	0.004329	-0.030299	-0.022215
NMF2	4 - 8	10 - 14	16 - 20
ω	0.000736	-0.004511	-0.004245

En la **Tabla 1** las unidades para ω de hmF2 son km/año, ω de foF2 son MHz/año y para ω de NmF2 son $w10^{12} m^3/año$.

En la **Tabla 1** las unidades para ω de hmF2 son km/año, ω de foF2 son MHz/año y para ω de NmF2 son $10^{12} m^3/año$.

El cambio de la variable F10.7 por $\sqrt{F10.7}$ no disminuyó de forma significativa la memoria del sistema, es decir que la autocorrelación de la variación entre el modelo empírico Y_t y la serie de tiempo de foF2 no cambio su comportamiento, salvo un ligero desplazamiento vertical, como se muestra en la **Figura 4**.

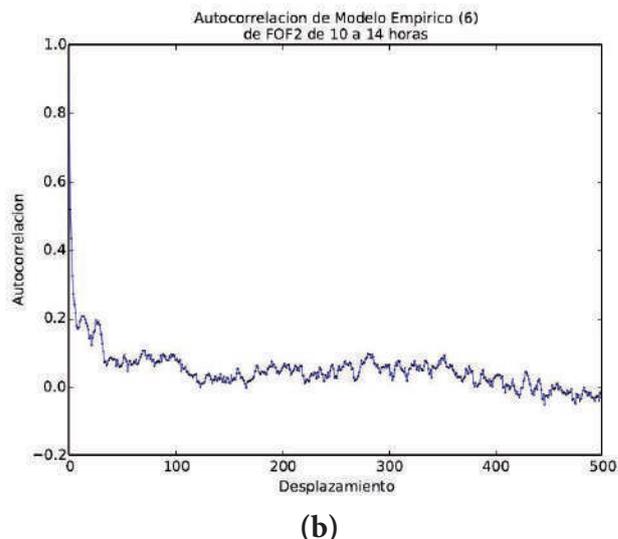
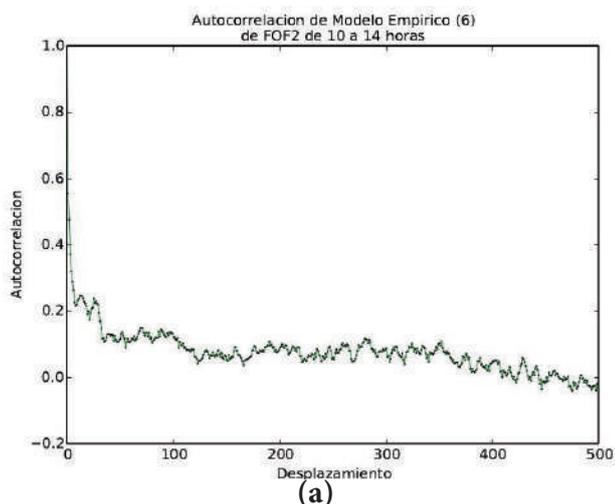


Figura 4: (a) Muestra la autocorrelación de la variación de Y_t y foF2. (b) Muestra la autocorrelación de la variación de Y_t y foF2 cambiando F10.7 por $\sqrt{F10.7}$.

El uso de PCA no dio mejores resultados, pues al usar menos componentes principales en el modelo lineal, los resultados no mostraban disminución en la memoria del sistema, y a usar todos los componentes principales, se lograban reproducir los resultados obtenidos por el método directo (Rojas, 2012).

5. Discusión

Los resultados de este trabajo depende en gran medida a la cantidad de datos de la series de tiempo. Bencze (2007) recomienda trabajar con series de tiempo de más de dos ciclos solares. Las series de tiempo usadas en este trabajo fueron de 18 años. Además hay que tener en cuenta que durante los años 2000 y 2001 no se obtuvieron datos y se cambiaron los parámetros del sistema de adquisición de la digisonda, esto provocó un desplazamiento vertical apreciable en las Figuras 1 y 2(b). Por ello fue necesario incluir al modelo empírico la función de salto δS_t .

Las diferencias entre las tendencias halladas en este trabajo y las halladas por Rojas (2012), se deben principalmente al filtrado de la series de tiempo. Pues, en este trabajo se usó un median filter, mientras que Rojas (2012) realiza un filtro de las derivadas de las series de tiempo.

Se realizó un análisis de correlación entre las variables del modelo empírico y las series de tiempo de hmF2, foF2 y NmF2, con el cual se observó que las variables del modelo empírico guardaban poca correlación entre si (menor a 0.2). Debido a este resultado los modelos lineales con menor cantidad de componentes principales no dieron mejores resultados que el método directo.

6. Conclusiones

- Los métodos usados en este trabajo para el análisis de las series de tiempo de hmF2, foF2 y NmF2, arrojaron resultados similares a los obtenidos por Rojas (2012).
- Estudiar la correlación entre las potencias de las variables del modelo empírico y las series de tiempo no ayudan significativamente a disminuir la memoria de los sistemas estudiados.
- El uso de PCA no logró disminuir la memoria de los sistemas analizados.

7. Recomendaciones

- Construir series de tiempo mas grandes y de diferentes estaciones contiguas (Rojas, 2012).
- Agregar más variables a los modelos empíricos, pues aún no se ha logrado eliminar las pequeñas oscilaciones que suceden cada 12 desplazamientos, y las autocorrelaciones de generadas por foF2 y NmF2 de 4 a 8 horas aún tienen un máximo local alrededor de los 330 desplazamientos.
- Estudiar formalmente cual podría ser un mejor modelo para la serie de tiempo de foF2, porque si se propone un modelo lineal para NmF2, no se puede aplicar el mismo modelo a foF2, pues foF2 es proporcional a $NmF2^{1/2}$.
- Realizar el cálculo teórico de la incertidumbre para el modelo directo (Rojas, 2012) y para el PCA.

8. Agradecimientos

- Agradezco al IGP y al Radio Observatorio de Jicamarca por haberme dado la oportunidad de realizar mis primeras prácticas pre profesionales, e iniciarme en la investigación científica.
- Al Dr. Marco Milla por asesorarme en la realización de este trabajo de investigación con paciencia y buenos consejos.

9. Bibliografía

- Roble, R. G., & Dickinson (1989). How Will Changes in Carbon Dioxide and Methane Modify the Mean Structure of the Mesosphere and Thermosphere, *Geophysical Research Letters*, 16(12), 1441-1444.
- Rishbeth, H. (1990). A Greenhouse Effect in the Ionosphere?, *Planetary Space Science*, 38(7), 945-948.
- Rishbeth (1992). Cooling of the Upper Atmosphere by Enhanced Greenhouse Gases: Modelling of Thermospheric and Ionospheric Effects, *Planetary Space Science*.
- Bremer (1992). Ionospheric Trends in Mid-Latitudes as a Possible Indicator of the Atmospheric Greenhouse Effect, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*.
- Ulich, T., & Turunen, E. (1997). Evidence for Long-Term Cooling of the Upper Atmosphere in Ionosonde Data, *Geophysical Research Letters*, 24(9), 1103-1106.
- Weatherhead, E. C., Reinsel, G. C., Tiao, G. C., Meng, X. L., Choi, D., Cheang, W. K., ... & Frederick, J. E. (1998). Factors Affecting the Detection of Trends: Statistical Considerations and Applications to Environmental Data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 103(D14), 17149-17161.
- Rishbeth, H., Müller-Wodarg, I. C. F., Zou, L., Fuller-Rowell, T.J., Millward, G. H., Moffett, R. J., ... & Aylward, A. D. (2000, August). Annual and Semiannual Variations in the Ionospheric F2-Layer: II. Physical Discussion, *Annales Geophysicae*. (Vol. 18, No. 8, pp. 945-956). Springer-Verlag.
- Bencze (2007). What Do We Know of the Long-Term Change of the Earth's Ionosphere?, *Advances in Space Research*.
- Rojas E. (2012). Estudio de tendencias de la altura de la Densidad Máxima de electrones en la región F sobre Jicamarca (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL LOCAL DE LA ETAPA PA DEL TRANSMISOR DEL ROJ

Automation of stage PA local control of the Transmitter ROJ

JOAN ESPINOZA ALVARADO

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
unilenin@gmail.com

Asesor: Dr. Rommel Yaya Arias

Radio Observatorio de Jicamarca

Resumen

El presente proyecto, tiene la finalidad de analizar el funcionamiento del control local de la etapa PA y proponer un sistema automatizado que permita monitorear y controlar los elementos que integran el control local del transmisor de alta potencia parte importante del radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca. El elemento principal del amplificador es el tetrodo 8973 de Eimac, que es considerado el más potente del mundo y los elementos que componen el amplificador son complejos en estructura y en funcionamiento. El contenido del proyecto, contempla una descripción de las entradas y salidas del Controlador Lógico Programable (PLC), así como el prototipo de implementación basado en los planos principales de la instalación de las fuentes de poder y del circuito de control local. El diseño del proyecto fue puesta bajo prueba por personal especializado del área de Operaciones del Radio Observatorio mediante un entorno de simulación para el encendido y apagado normal del transmisor, incluso en caso de fallas frecuentes.

Palabras clave: PLC, HMI, INTERLOCK.

Abstract

This project aims to analyze the functioning of local control of stage PA and propose an automated system to monitor and control the elements of local control of high power transmitter important part of the main radar JRO. The main element is the tetrode amplifier Eimac 8973, which is considered the most powerful in the world and the elements of the amplifier are complex in structure and operation. The content of the project, provides a description of the inputs and outputs of the Programmable Logic Controller (PLC) and a description of the prototype of implementation taking into account the principal planes of the installation sources power and local control circuit. The project design was put under test by qualified personnel Operations Area Radio Observatory using a simulation environment for normal transmitter on and off, even in case of frequent failures.

Keywords: PLC, HMI, INTERLOCK.

1. Introducción

El radar principal del ROJ posee un sistema de cuatro transmisores de alta potencia para la frecuencia de 49.92 MHz, cada uno con una potencia de salida de 1.5 MW pico nominal o 8973 y circuitos de entrada y salida de RF, como estructura base del funcionamiento del amplificador. Adicionalmente necesita fuentes de polarización y un sistema de enfriamiento que permiten el funcionamiento adecuado del amplificador. Las pruebas realizadas a la interfaz HMI diseñada, indican un funcionamiento que cumple con los requerimientos del amplificador para operar condiciones normales.

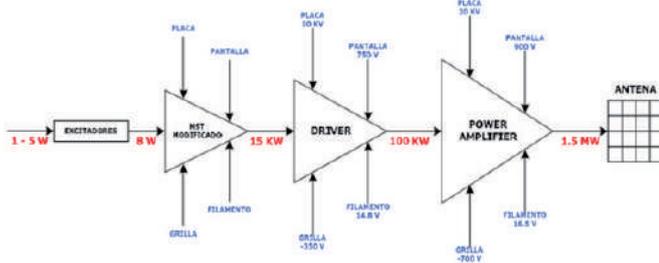


Figura 1: Etapas de potencia del transmisor del ROJ.

• Etapa Pre-Driver

Esta etapa está compuesta por una excitación y el MST Modificado (Mesósfera, Estratósfera y Tropósfera) alcanzando una potencia pico de 15 KW.

• Etapa Driver

La potencia de salida de la unidad es de 100 KW pico nominal, en régimen de funcionamiento pulsado, con un ciclo de servicio máximo de 5 %. El amplificador driver está compuesto por el tetrodo 4CX40000G, y los circuitos sintonizados de entrada y salida de RF. Adicionalmente necesita fuentes de polarización y un sistema de enfriamiento por circulación de aire, que permiten el funcionamiento adecuado del amplificador.

Comprende el circuito de radiofrecuencia (RF), y también el montaje del circuito de control, cuya función es dar la secuencia de encendido, control y protección de la unidad.



• Etapa PA

El amplificador PA está compuesto por el tetrodo 8973 y circuitos de entrada y salida de RF, como estructura base del funcionamiento del amplificador. Adicionalmente necesita fuentes de polarización y un sistema de enfriamiento que permiten el funcionamiento adecuado del amplificador.

El presente reporte describe todas las partes de la etapa de salida PA, cada una de ellas divididas en diferentes capítulos para hacer más comprensible el funcionamiento. Se describe el funcionamiento general de todos los elementos electrónicos, eléctricos y mecánicos, así como su función en el desempeño del amplificador.

Las pruebas realizadas al amplificador construido, indican un funcionamiento que cumple con sus especificaciones. Estos resultados están incluidos en el presente reporte, dando a conocer asimismo la información técnica básica de su funcionamiento.



2. Transmisores del ROJ

El sistema de transmisores cuenta con cuatro unidades de transmisión capaces de operar de forma independiente o en conjunto.

En cada unidad de transmisión la señal que se envía a la antena es amplificada en varias etapas. La primera de ellas es una etapa de excitación que amplifica la señal hasta los 8 W de potencia, luego la señal pasa por los transmisores llamados MST (Mesosphere Stratosphere Troposphere), estos transmisores son conectados directamente a la antena cuando el radar funciona en el modo denominado JULIA (Jicamarca Unattended Longterm Investigations of the Atmosphere), los transmisores MST alcanzan una potencia pico de 15 KW. Finalmente cuando el radar opera a máxima potencia se utilizan dos etapas

adicionales primero una etapa previa denominada “Driver” y finalmente la etapa de salida “Power Amplifier” comúnmente llamada “PA”.

Cada tetrodo, de la etapa Driver y Etapa PA cuenta con las siguientes fuentes de polarización:

- **Fuente de Filamento:**

El filamento emite electrones al elevarse su temperatura cuando es recorrido por una corriente eléctrica, lo que permite una emisión de electrones que serán recogidos por la placa durante la transmisión de señal pulsada.

- **Fuente de Bias:**

Con un voltaje negativo respecto al electrodo emisor termoiónico (filamento), controla el flujo de electrones que puede llegar a la rejilla pantalla y a la placa.

- **Fuente de Pantalla**

Tiene una tensión positiva de polarización respecto al cátodo, esta polarización sirve para acelerar el flujo de electrones en su recorrido hacia el ánodo; también sirve para disminuir la capacitancia entre ánodo y la grilla de control, proporcionando en nuestro caso, un efecto de apantallamiento ajustable por el nivel de tensión elegido.

- **Fuente de Placa**

Con un voltaje altamente positivo respecto al electrodo emisor termoiónico, recoge los electrones que han atravesado la rejilla de control y la rejilla pantalla, apareciendo así una corriente de placa.

3. Datos

La información utilizada para automatizar el panel de control local fue suministrada de los planos eléctricos de las fuentes de filamento, fuente de bias, fuente de pantalla y del circuito de interlock del panel de control local, así como del informe elaborado por el personal de operaciones sobre la automatización de la etapa PA en setiembre del 2013. También se revisó la tesis de la automatización de la etapa PA realizada por Juan Espinoza.

4. Desarrollo

- **Sistema de Control Automático**

- a) Sistema de Enfriamiento

La etapa de salida del sistema de transmisores cuenta con un sistema de enfriamiento el cual

está formado por dos circuitos de agua: uno de baja presión y otro de alta presión además de un circuito de enfriamiento secundario.

a.1 Circuito de alta presión: Es un circuito cerrado de agua destilada, cuenta con una electrobomba de 30 HP, un intercambiador de calor agua - agua y medidores de flujo a la entrada de cada transmisor.

a.2 Circuito de baja presión: Este circuito cuenta con dos electrobombas de 3 HP operando en paralelo, un intercambiador de calor agua - agua y medidores de flujo a la entrada de cada transmisor.

a.3 Circuito secundario: Se utiliza para enfriar el agua de los circuitos de alta y baja presión. Cuenta con una electrobomba de 30 HP, dos intercambiadores de calor y cuatro intercambiadores agua - aire.

La automatización del sistema de enfriamiento consiste en el arranque secuencial de cada uno de los equipos que forman parte del mencionado sistema y el monitoreo de los flujos de agua de cada uno de los circuitos los cuales están ligados al interlock de encendido de los transmisores.

- b) Activación de la fuente de alta tensión

La etapa de salida de los transmisores cuenta con el tubo de vacío más potente del mundo, este tubo de vacío utiliza para alimentar uno de sus electrodos (la placa) una fuente de 20 KV. La activación de la fuente ahora la realiza LookOut PLC siguiendo con la respectiva secuencia.

El LookOut PLC también monitorea la señal analógica de la tensión y en caso de producirse alguna falla la fuente es desactivada.

- c) Activación de la señal de radiofrecuencia

Antes de que la señal de radio frecuencia RF pase al sistema de transmisión es necesario que se cumplan ciertas condiciones, el encendido de la fuente de 20 KV es una de ellas, es por ello que se utiliza un relé para permitir el paso de la señal de RF, este relé se encuentra en la sala de acondicionamiento.

El LookOutPLC se encarga de verificar que se cumplan todas las condiciones para recién permitir la activación del relé.

• Sistema de Control Local

a) Control de encendido y apagado del sistema

Activación de la secuencia del INTERLOCK con lo cual se inicia el proceso de encendido del transmisor y se activa la fuente de bias.

b) Control de encendido de pantalla

Bajo el cumplimiento de la última etapa del INTERLOCK (HV PA), se habilitan estos controles para el encendido de la fuente de pantalla del transmisor.

c) Control de incremento y disminución de voltaje de filamento.

Control disponible al usuario para activar el voltaje de filamento aplicado al tubo del transmisor. Este voltaje es aplicado de manera controlada hasta alcanzar el nivel de tensión nominal, establecido a 16.5 VDC.

El operador puede elegir el incremento manual o automático de esta fuente, en ambos casos los incrementos serán establecidos por la velocidad de un motor servo que controla el transformador VARIAC de entrada de esta fuente, protegiendo al tubo de cambios bruscos de tensión en esta fuente.

5. Encendido y Apagado de la etapa de salida PA

5.1 Secuencia de Encendido Normal

Luego de activarse el Sistema de enfriamiento (acción realizada por LookOut PLC) se activan los sensores de agua ubicados en Filamento, Pantalla y Placa; posteriormente se activará el sensor térmico de temperatura de agua en Placa. En consecuencia se manda una señal de Flujo Ok PA (acción realizada por LookOut PLC) lo que permite encender el sistema ya sea local o remotamente activándose el voltaje a la salida de la fuente de Bias y el encendido del ventilador que activará los sensores de flujo de aire ubicados en filamento y en el circuito pi. Al energizar los Meter Relays sus contactos de HIGH SET POINT cambian de estado, mientras que los contactos de LOW SET POINT se mantienen constantes. Las entradas CAM ZERO SET y CAM LL indican que el voltaje de filamento está en 0 voltios por lo tanto al cambiar a modo auto sube el voltaje de filamento y activa el nivel inferior de voltaje FIL LL e inmediatamente activa INTERLOCK PA que se envía a LookOut PLC, luego el voltaje de Filamento llega a su nivel superior y activa FIL UL con lo cual ya deja girar el servomotor y cambiando a modo manual se

ajusta al nivel de voltaje de filamento requerido. Con la activación de HV PA (acción realizada por LookOut PLC) se procede a encender la fuente de pantalla ya sea local o remotamente y se activa el permiso del paso de RF.

5.2 Secuencia de Apagado Normal

Para iniciar el proceso de apagado del transmisor se desactiva el permiso del paso de RF (acción realizada por LookOut PLC), luego se apaga la tensión de pantalla ya sea local o remotamente y se desactiva HV PA (acción realizada por LookOut PLC). Se procede a apagar el sistema con lo cual se desactiva el voltaje de Bias y el voltaje de filamento comienza a descender automáticamente y cuando esté por debajo del nivel inferior fijado se desactivará INTERLOCK PA que se envía a LookOut PLC, continúa descendiendo hasta llegar a 0 voltios y se activan CAM ZERO SET y CAM LL porque el variac ya está en su nivel mínimo. También después de 5 minutos de apagado el sistema se desactiva el ventilador y por consiguiente los sensores de flujo de aire se desactivan. Finalmente LookOut PLC desactiva el sistema de enfriamiento lo que genera que los sensores de flujo de aire de filamento, pantalla y placa se desactiven.

6. Descripción del Sistema Propuesto

El sistema de control local estará conformado por un PLC como unidad central de control que reemplazará a toda la circuitería interna del panel de control local, lo que se mantendrá es el exterior del panel de control, es decir, el operario no notará el cambio ya que dispondrá de la visualización de los medidores locales, indicadores del circuito de interlock, variacs de la fuente de bias y pantalla, llaves de protección principal, y los controles locales.

6.1 PLC

El PLC propuesto es de la familia de controladores SLC 500 de la marca Allen Bradley con E/S modulares y basada en chasis. Con múltiples opciones de procesador, numerosas opciones de fuente de alimentación eléctrica y amplia capacidad de E/S, la familia SLC 500 proporciona una poderosa solución para el control industrial autónomo o distribuido de rango medio. Como uno de los primeros controladores pequeños completamente equipados del mercado, sigue siendo el principal estándar en controladores lógicos más de una década después de su introducción en el mercado industrial.

Entre sus ventajas están:

- Alta flexibilidad
- Poco mantenimiento
- Fácil programación
- Espacio reducido
- Facilidades de comunicación
- Auto diagnóstico
- Fácil detección de fallas
- Expansibilidad
- Confiabilidad

El prototipo del sistema será conformada de la siguiente manera:

- Chasis de 7 ranuras
- Fuente de alimentación
- CPU SLC 5/02
- Módulo de entradas digitales
- Módulo de salida tipo Relé
- Módulo de salida tipo TTL 5V

6.2 Descripción de las entradas al PLC

- 2 Switch de flujo de aire: 1 ubicado en filamento y el otro en el circuito pi.
- 5 Switch de flujo de agua: 2 ubicados en filamento, 1 ubicado en pantalla, 1 ubicado en escorb y el último en placa.
- 1 Switch térmico: ubicado en placa.
- 6 Medidores locales: 1 Meter de voltaje en pantalla, 1 Meter de corriente en pantalla, 1 Meter de voltaje en bias, 1 Meter de corriente en bias, 1 Meter de voltaje en filamento y 1 Meter de corriente de la bomba de iones.
- 5 Pulsadores locales: 2 para el encendido y apagado del sistema, 2 para el encendido y apagado de pantalla y 1 de reset.
- 2 Switch de 2 estados: 1 auto/manual, 1 local/ remote
- 1 Switch de 3 estados: 2 estados momentáneos (lower local y raise local) y 1 estado fijo
- 4 Sensores final de carrera: ubicado en el variac de la fuente de filamento.
- 2 Contactores: Vienen del PLC principal que indican flujo ok y la activación de la fuente de alta tensión.

6.3 Descripción de las salidas del PLC

- 7 Salidas tipo Relé: Bias on (activa la fuente de bias), ventilador, fil on (activa la fuente de filamento), screen on (activa la fuente de pantalla), horario (eleva la tensión de filamento), aAntihorario (disminuye la tensión de filamento), interlock PA (indica secuencia de interlock correcta).
- 24 Salidas tipo TTL 5V, donde 12 salidas muestran el estado del funcionamiento de la secuencia de interlock y los otros indican en donde se presentó la falla del circuito de interlock.

7. Resultados

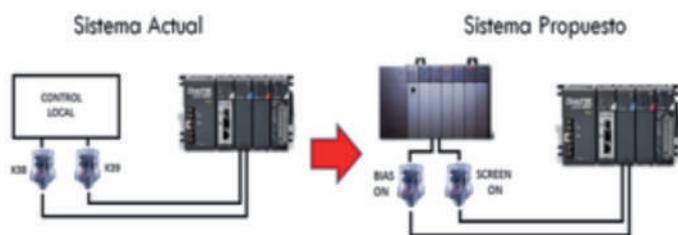
El funcionamiento del panel de control local de la etapa PA del transmisor fue probado por los operarios usando un PLC virtual y una interfaz gráfica similar al exterior del panel de control que existe actualmente cumpliendo con el funcionamiento del control local de la etapa PA.

8. Conclusiones

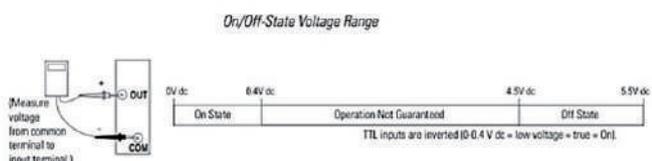
- Al automatizar el control local se cuenta con un sistema más confiable y dependiendo de las necesidades su funcionalidad se puede extender, ya sea disponiendo de mayor cantidad de entradas y salidas hasta incluso contar con pantallas táctiles que monitorean el funcionamiento del control local y muestren alarmas en caso algo falle.
- El sistema desarrollado constituye un prototipo y, las pruebas realizadas con él, indican que los objetivos del presente proyecto fueron cumplidos en forma satisfactoria. Como resultado, se cuenta con la facilidad de encender operar y supervisar de forma remota el control local de los Transmisores del ROJ.
- Para extender el nuevo sistema de control al resto de transmisores solo se necesita copiar lo realizado en uno de los transmisores.

9. Recomendaciones

El sistema actual de panel de control local actual usa sobre los relés K38 y K39 que son señales que regresan al Control Automático, sin embargo en este nuevo diseño esos relés serán reemplazados por el contactor de Bias On y Screen On respectivamente.



El módulo de Salidas tipo TTL 5V del sistema propuesto están configuradas de manera invertida, es decir, que en estado activo su voltaje es entre <0-0.4 VDC>, mientras que en estado inactivo es entre <4.5-5 VDC>.



10. Agradecimientos

Mi agradecimiento al Radio Observatorio de Jicamarca, por haberme brindado un ambiente agradable de trabajo y la logística necesaria para realizar este proyecto. Asimismo, mi eterna gratitud al personal del área de operaciones.

11. Bibliografía

Espinoza, Juan Carlos. *Automatización del encendido de los transmisores principales del Radio Observatorio de Jicamarca. Tesis (Licenciatura para Ingeniero Mecánico Eléctrico)*. Piura, Perú, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, 2006, pp. 5-10.

IMPLEMENTACIÓN DE LVDS EN UN FPGA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS (JARS 2.1)

LVDS Implementation in a FPGA for data acquisition (JARS 2.1)

Luis Armando Sanchez Tapia

Universidad de Ingeniería y Tecnología
Facultad de Ingeniería Electrónica
luis.sanchez@utec.edu.pe

Asesor: Jorge Ortiz, Ph.D

Radio Observatorio de Jicamarca

Resumen

El presente trabajo expone los métodos utilizados para la conexión de dos tarjetas basadas en FPGA a través del protocolo diferencial LVDS (Low Voltage Differential Signaling). La comunicación se realiza con una línea de reloj, una de sincronización y 4 líneas de comunicación, las cuales llevan la información multiplexada de 32 bits. La implementación se desarrollo sobre una tarjeta Zed Board y otra SP601 de Xilinx conectadas con tarjetas auxiliares para la comunicación LVDS sobre cables SATA.

Palabras clave: FPGA, LVDS, Multiplexor

Abstract

This work presents the methods used for the connection of two FPGA-based boards between the differential protocol LVDS (Low Voltage Differential Signaling). The communication consists in a clock sent through an LVDS connection, a synchronization line and four lines of data, carrying 32 bits of multiplexed information. The system was implemented in a Zed Board and a SP601 board by Xilinx; and these boards were connected by an auxiliary FMC-LPC board for the LVDS communication over SATA cables.

Keywords: FPGA, LVDS, Multiplexor

1. Introducción

El sistema de adquisición de datos del radar del Radio Observatorio de Jicamarca (JARS) forma parte de los sistemas utilizados en el radio observatorio para el estudio de los fenómenos físicos en la ionosfera. Se compone de dos tarjetas principales y otras tarjetas de adquisición y procesamiento de las señales del radar. La tarjeta de bus, la cual recoge la información obtenida de otras tarjetas de recepción de datos, y la tarjeta de control, que comunica el sistema con la computadora, recibiendo comandos y enviando de vuelta los datos requeridos. En las primeras versiones del sistema JARS (1.0 y 1.1) se utilizaba un conexión paralela usando conectores FMC-LPC entre ambas tarjetas. Debido a la dificultad de conseguir los cables compatibles con dichos conectores en cantidades de unas cuantas unidades, se optó en una nueva versión de JARS (2.0) la utilización de una tarjeta auxiliar para reemplazar dicha conexión paralela por cables SATA diferenciales (Figura 4).

Las tarjetas auxiliares (Figura 2) corresponden a una adaptación realizada en el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) para sustituir los cables FMC-LPC por cables SATA, que son mucho más comunes y fáciles de conseguir. Estas líneas SATA se componen de 2 pares diferenciales con la respectiva conexión a tierra. Las tarjetas basadas en FPGA (Zed Board y SP601) cuentan con soporte para el estándar Low-Voltage Differential Signaling (LVDS), que es un protocolo físico desarrollado por IEEE que aprovecha los pares diferenciales para transmitir datos a alta velocidad. Dentro de las ventajas que del estándar LVDS se encuentran: soporte para velocidades de transmisión de hasta de 3 GHz, y un bajo consumo de energía, con 2.5 V y 3.5 mA.

El uso de cables SATA trabajando sobre LVDS a alta velocidad permite reducir las líneas de comunicación de datos en paralelo a unas cuantas líneas seriales utilizando un proceso de multiplexación de las líneas de datos.

La implementación del sistema sobre dispositivos lógicos programables para efectuar la lógica y el manejo de los datos implica su codificación en “lenguaje de descripción de hardware (HDL)”, que en este caso fue: VHDL.

Dentro de los cambios realizados al sistema JARS 1.1 se encuentra el reemplazo de los CPLD (Complex Programmable Logic Device) por FPGA (Field Programmable Gate Array) debido a la facilidad del FPGA para implementar lógica compleja, que se ocupe de los procesos de transmisión de la información.

Las tarjetas SP601 de Xilinx y ZedBoard de AVNET pueden en la figura 1. Igualmente se referencia sus manuales de usuario en [1] y [6] respectivamente.

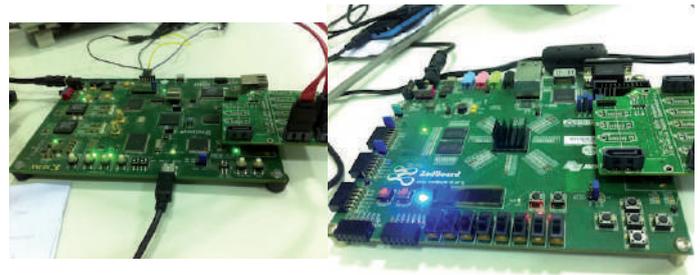


Figura 1. Tarjeta de Evaluación SP601 (izquierda) y Zed Board (derecha).

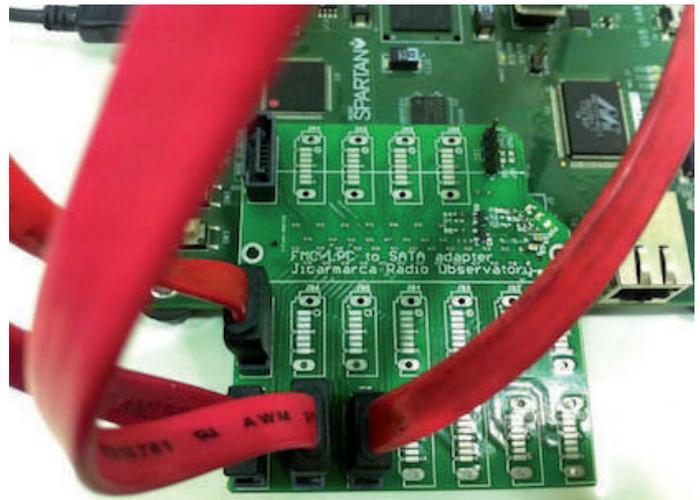


Figura 2. Tarjeta auxiliar FMC-LPC a SATA.

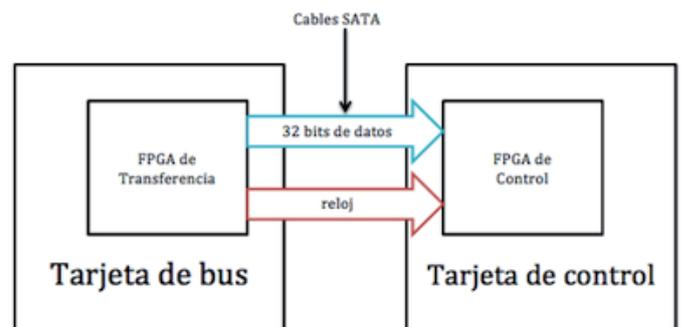


Figura 3. Diagrama del sistema JARS 2.0 comunicado por SATA (LVDS).

2. Materiales

El sistema estuvo compuesto por el siguiente entorno de desarrollo:

- ISE Design Suite 14.7 de Xilinx (ISE, Core Generator, PlanAhead, iMPACT)
- Tarjeta FPGA SP601 de Xilinx
- Tarjeta FPGA Zed Board de AVNET
- Tarjeta FMC-LPC a SATA [7] (x2)

La instalación inicial incluye:

- Conectar las tarjetas SP601 y Zed Board a la computadora por medio de su cable USB-JTAG.

- Conectar las tarjetas FMC-LPC a los conectores del mismo nombre en cada una de las tarjetas.
- Conectar a estas tarjetas FMC-LPC los cables SATA necesarios para la transmisión.

3. Método

La primera etapa del diseño del sistema se centro en encontrar los dispositivos primitivos disponibles según el modelo del FPGA para implementar funciones especiales que habilitan hardware especialmente optimizado para tal función. Los primitivos fueron : OBUFDS y IBUFDS para las salidas y entradas diferenciales respectivamente.

Luego, para la conexión entre tarjetas se utilizó la tarjeta de adaptación FMC-LPC a SATA [7] con cables SATA.

Un punto de importante en esta etapa destaca la modificación que se tuvo que realizar a la tarjeta auxiliar FMC-LPC que se conectaba a la tarjeta ZedBoard. Las terminales TMO y TMI [7] tuvieron que ser unidas con puntos de soldadura tras comprobar que no era posible programar la tarjeta Zed board desde la herramienta de Xilinx Impact porque esta automáticamente reconocía como parte de la cadena de programación a la tarjeta auxiliar.

Finalmente se procedió a las pruebas para el envío de información, primero en paralelo y luego multiplexada. Las siguientes secciones describen los métodos utilizados para enviar el reloj mediante LVDS; para diseñar el transmisor y por ultimo el receptor. Al final de esta implementación se obtiene el diseño de la Figura 5, que es el que seria adaptado dentro del sistema JARS 2.0 para la comunicación entre la tarjeta de bus y la tarjeta de control (Figura 4).

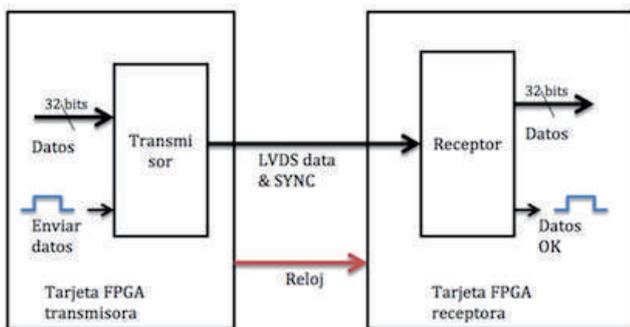


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema a ser implementado.

3.1 Envío del Clock entre tarjetas

Como parte del desarrollo se tuvieron que buscar los dispositivos primitivos capaces de rutear la señal de reloj por los canales designados dentro del FPGA para no obtener retardos en la señal y por tanto un diseño ineficiente [4]. Parte también de esta etapa se centro en verificar hasta que frecuencia era capaz de mantener una señal legible por la tarjeta

receptora, siendo en los primeros intentos unos cuantos kilohertz, para luego, una vez activados las resistencias diferenciales en la tarjeta receptora pasar a ser varias decenas de gigahertz.

En el editor de constraints Plan Ahead se procedió a desactivar las resistencias de 100 ohmios en los terminales LVDS del transmisor, algo que no podía hacerse mediante código, por lo que se mencionara más adelante en las recomendaciones que se utilice esta herramienta en todo momento. Por ultimo se activaron las mismas en la tarjeta receptora mediante las configuraciones disponibles en la declaración del dispositivo primitivo. Esto último se realizó definiendo DIFF TERM al valor TRUE.

Los primitivos de reloj usados en el envío de la señal de reloj fueron los registros diferenciales ODDR, en el caso de la tarjeta Zed Board perteneciente a la serie 7, y el registro ODDR2 para el caso de la tarjeta SP601, de la serie 6. Luego de pasar por estos registros la señal de reloj podía ser enviada a través de los buffers de salida diferencial tal como se hizo en la primera etapa del proyecto. En el caso de la recepción de esta señal, un dispositivo primitivo especial fue utilizado en ambas tarjetas llamado Differential Clock Input Buffer IBUFGDS encontrado también en el language templates del ISE 14.7.

3.2 Multiplexor

Para lograr reducir estas señales paralelas y enviarlas por una sola conexión SATA de una tarjeta a la otra se procedió con el diseño del multiplexor y el demultiplexor.

El multiplexor se basa en un bloque serializador que es activado con la generación del pulso de sincronización. El cual comienza con la serialización de la señal en paralela conectada al bloque, empezando desde el bit más significativo hasta el menos significativo. Adicionalmente, una vez que el contador termina de contar cada uno de los bits del paquete, no se reinicia, por lo que los paquetes no son enviados de forma continua, sino que solo se envían una vez por cada flanco de subida de la señal de sincronización. El resto del tiempo que el pulso de sincronización esta activado, el multiplexor solo envía ceros, que es el valor que envía mientras este en estado de espera al comando de envío.

3.3 De multiplexor

El demultiplexor opera solo cuando la señal de sincronización se activa. En este punto, el contador pasa por dos buffers que retrasan su acción sobre el registro que almacena los bits entrantes. Dicho registro tiene la longitud de la cantidad de entradas que ingresan al multiplexor, y por tanto, la cantidad de cuentas que realizará tanto el contador del multiplexor como el contador del demultiplexor. El contador indica los datos almacenados en el registro

del demultiplexor, que a su vez, también vuelve al estado inicial cuando la señal de sincronización se vuelve cero.

Durante la obtención de los datos almacenados en el registro es importante añadir que una máquina de estados detecta cuando se ha terminado de serializar los datos enviados; puesto que mientras el demultiplexor no opera, tiene una salida permanente de ceros. Esta señal, llamada cmd data ready, sirve para indicarle a otros bloques del sistema en la tarjeta receptora que el paquete de datos ha llegado correctamente.

Debido a que la señal de sincronización demora algunos periodos más de tiempo en desactivarse de lo que el multiplexor demora en enviar todos los datos de su buffer de entrada, se terminan enviando ceros al finalizar el envío de la información. Por esta razón el pulso que indica los datos listos en el receptor se añade desde el periodo de pruebas.

3.4 Bloques de control

La última parte del desarrollo del sistema se compone de bloques externos que permiten controlar el envío de la información desde una tarjeta FPGA a otra mediante pulsos.

El primero de ellos se encuentra en la tarjeta transmisora, cargados los datos en el buffer de entrada del transmisor, se envía un pulso de un ciclo de reloj para enviar la información; el reloj corresponde al reloj de operación al cual se enviarán los datos y en el caso de este sistema, a 60 MHz. No se podrá enviar nueva información hasta que los datos lleguen al demultiplexor, esta restricción se implementa con un contador calibrado según el retardo obtenido en la señal.

Por último, un bloque recibe la señal que indica que los datos han sido recibidos con éxito en el demultiplexor y los almacena en un buffer. Este buffer actúa como una pila en donde cada vez que llega un nuevo dato se ubica en el tope de esta; los datos son leídos desde el fondo de la pila y una vez que son obtenidos, el sistema requiere un pulso de confirmación para eliminar este dato. Entonces la pila se desplaza un nivel y el próximo dato más antiguo estará listo para ser leído.

4. Resultados

4.1 Simulación

Se presenta primero la simulación donde se procesan los datos para ser enviados de forma serial. Tal como se puede ver en el Figura 6 y su continuación en la Figura 7, se recuperan los datos enviados, en este caso de 8 bits para cada línea. Estos datos se muestran en color amarillo, los datos originales están en celeste, mientras que los bits serializados se muestran en morado. Debido a la duración de la señal de sincronización, solo se puede observar el comienzo, en la Figura 6, y los resultados del proceso en la Figura 7.



Figura 6. Simulación 1 parte 1.

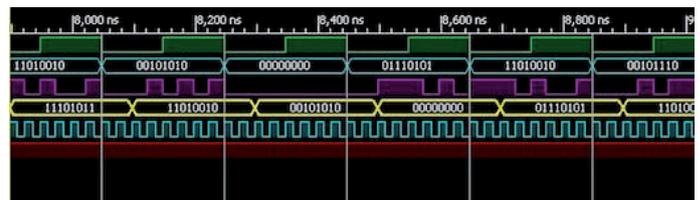


Figura 7. Simulación 2 parte 2.

La simulación de las Figuras 8 y 9 corresponden a la última parte del diseño del sistema. En esta etapa descrita en la sección de desarrollo, se puede observar la señal que indica enviar los datos, en este caso representado por la señal amarilla en las figuras, y la señal que indica que los datos han sido decodificados de forma correcta, la señal en color morado. En rojo se puede observar también como la señal de sincronización se activa durante cierto periodo de tiempo, para luego desactivarse y volver a estar encendida otro periodo de tiempo; que es determinado por la cantidad de bits a multiplexar más 3, contado en ciclos de reloj. La razón de hacerlo así, es que durante la implementación del diseño, la duración del pulso del botón que indica el envío de datos tomara mucho más que los 500 nano segundos que le toma al sistema enviar todos los datos aproximadamente. De esta manera se simula lo más cercano a la realidad al momento de la implementación.

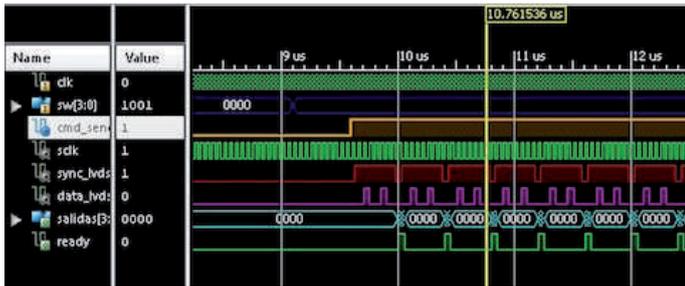


Figura 8. Simulación 2 parte 1.

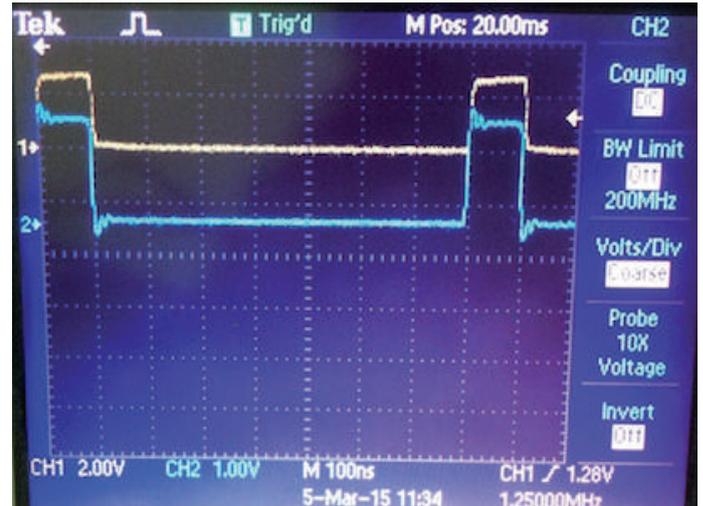


Figura 11. Comparando data enviada con data interna.



Figura 9. Simulación 2 parte 2.

4.2 Implementación

En la implementación de la simulación descrita previamente, se puede observar en la Figura 10 la señal que contiene los datos, en azul, y la señal de sincronización, en amarillo. Estos datos luego fueron decodificados y se muestra en la siguiente figura anexada (Figura 11) como la señal que indica la correcta demultiplexación de los datos se enciende durante un pulso.

Tras la implementación sobre dos tarjetas del módulo encargado de enviar la señal de reloj. Se encontró determinante la correcta configuración de las resistencias de los terminales diferenciales para alcanzar velocidades superiores a 1 MHz.

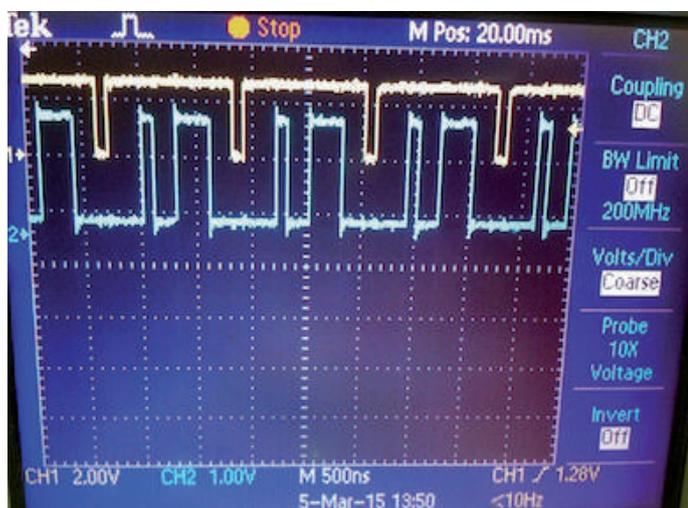


Figura 10. Comunicación LVDS y SYNC a 10 MHz

5. Discusión

En caso se utilice el ucf editado directamente por texto, se recomienda utilizar los archivos ucf proporcionados por Xilinx en las páginas de soporte de sus tarjetas. [1] y [5].

Otra recomendación importante radica en el ruteado de las terminaciones positivo y negativo de los pares diferenciales en la tarjeta auxiliar FMC-LPC para la conexión de cables SATA sobre LVDS. Se espera que una versión posterior de esta tarjeta auxiliar se corrija este aspecto.

La recomendación más importante de la segunda etapa corresponde a la edición de los constraints mediante el Plan Ahead, herramienta de Xilinx. Una parte importante de las dificultades causadas en las pruebas e implementaciones se debió a que al no estar correctamente configurada la resistencia en los terminales diferenciales, la señal no iba directamente del transmisor al receptor, afectando severamente la calidad de la señal al aumentar la frecuencia. En un primer momento se configuraron apropiadamente usando el editor de ucf, tal como se describió en las recomendaciones de la etapa primera. Pero estas configuraciones manuales llevaron a conflictos dentro del entorno del sistema. La importancia de esto radica en que solamente es posible cambiar, en nuestro caso remover, la resistencia del terminal diferencial en la tarjeta transmisora mediante la herramienta Plan Ahead, y esto es algo a tener en cuenta para la reproducción de este proyecto en la futura implementación del JARS 2.0.

6. Conclusiones

La conexión de dos tarjetas basadas en FPGA se realizó de forma efectiva utilizando cables SATA junto con dos tarjetas auxiliares FMC-LPC. Las velocidades alcanzadas para recuperar las señales enviadas con precisión fue de 80 Mhz, con una señal de reloj, una señal de sincronización y 4 líneas seriales de datos multiplexados.

Fueron identificados potenciales focos de error y fallas en el sistema actual, como el ruteado en la tarjeta auxiliar FMC-LPC a SATA y el grabador de FPGA basado en Papilio para el FPGA de transferencia en el sistema JARS 2.0.

Como trabajo futuro se establece unificar el diseño de este sistema con el modulo Ethernet realizado por otro estudiante del programa de practicas.

Por último se espera implementar estos diseños sobre la tarjeta de transferencia del JARS 2.0 y la tarjeta SP601, que sería la tarjeta que reemplazaría a la tarjeta de control en el nuevo sistema de JARS 2.0.

7. Agradecimientos

Mi agradecimiento al Radio Observatorio de Jicamarca, a mi asesor el Dr. Jorge Ortiz. Asimismo mi sincero agradecimiento al Ing. Joaquin Verastegui y al Ing. Miguel Urco por su apoyo y cruciales consejos en el desarrollo de este proyecto.

8. Bibliografía

XILINX. *SP601 Hardware User Guide. UG518 (v1.14)*, Setiembre 2012.

XILINX. *Spartan 6-FPGA Configuration. UG380 (v2.7)*, Octubre del 2014.

XILINX. *Spartan 6-FPGA SelectIO Resources. UG381 (v1.6)*, Febrero 2014.

XILINX. *Spartan 6-FPGA Clocking Resources. UG382 (v1.9)*, Diciembre 2014.

AVNET. *Zed Board Master UCF. (vC.2)*, Marzo 2015.

AVNET. *Zed Board Hardware User Guide. (v2.2)*, Enero 2014.

Radio Observatorio de Jicamarca. *Esquemático en Eagle de tarjeta FMC-LPC a SATA*, Febrero 2015.

DIGITALIZACIÓN DE HISTORIAL DE IMÁGENES DE MAGNETÓGRAFO

MAGNETOGRAPH IMAGE RECORD DIGITALIZATION

Jorge Quesada Pacora

Pontificia Universidad Católica del Perú
Facultad de Ciencias e Ingeniería
jorge.quesada@puccp.pe

Asesor: Jorge Ortiz, Ph.D

Radio Observatorio de Jicamarca

Resumen

Se ha desarrollado un sistema de procesamiento de imágenes escaneadas de magnetogramas obtenidos en el Observatorio Magnético de Huancayo. El sistema propuesto consta de una etapa de preprocesamiento o acondicionamiento de la imagen (basada en operadores morfológicos y análisis de componentes conectados), y una etapa de extracción de las curvas de interés. Los resultados obtenidos en este proyecto muestran que es posible recuperar un alto porcentaje de las mediciones, principalmente aquellas curvas que no presenten variaciones drásticas en el tiempo. Finalmente se presentan recomendaciones para enfocar el problema de la detección de las curvas más complejas en investigaciones futuras.

Abstract

We have developed an image processing system for scanned images of magnetograms obtained at the Magnetic Observatory of Huancayo. The proposed system consists of a preprocessing stage (based on morphological operators and connected component analysis), and an interest curve extraction stage. The results obtained through this project show that it is possible to recover a high percentage of the measurements, mainly those that do not vary strongly over time. Finally, suggestions are presented in order to tackle the problem of higher complexity curve detection in future research.

1. Introducción

Actualmente, el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) es una de las sedes del Instituto Geofísico del Perú, centrado en el estudio de la ionósfera ecuatorial. Una de las tareas que realiza es el estudio de la relación entre el electrochorro ecuatorial y el campo magnético terrestre. Por otro lado, el Observatorio Magnético de Huancayo (también sede del IGP) es un observatorio que se dedica, entre otras tareas, a la continua medición del campo magnético terrestre. Durante la segunda mitad del siglo pasado, este observatorio generó dichos datos mediante un magnetómetro analógico (recientemente sustituido por uno digital), los cuales fueron almacenados en papel fotográfico y finalmente digitalizados mediante su escaneo. Si bien se cuenta con un historial de imágenes de los datos tomados, un análisis estadístico o macroscópico de los mismos no es viable, dada la dificultad inherente a realizar dichas tareas mediante inspección visual.

En este contexto, el presente proyecto busca digitalizar las mediciones del campo magnético terrestre realizadas por el magnetómetro ubicado en Huancayo, mediante el procesamiento de las imágenes escaneadas. Esto se hace con la finalidad de tener un historial de dichas mediciones para algún estudio futuro sobre el comportamiento del campo magnético terrestre en los años en que los datos fueron tomados.

Este trabajo está estructurado del modo que se explica a continuación. Primero, se explica la naturaleza de los datos a procesar. Luego se procede a explicar el método empleado para el desarrollo del proyecto en sí. Posteriormente se mostrarán los resultados obtenidos, para finalmente dar las conclusiones y recomendaciones del caso.

2. Datos

Se tiene un historial de imágenes obtenidas por el magnetómetro analógico, las cuales han sido manualmente escaneadas.

El campo magnético de la tierra es usualmente representado como un vector tridimensional, en función de tres componentes:

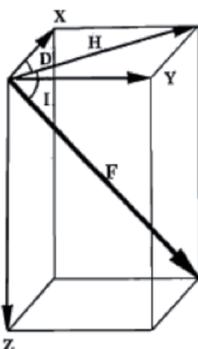


Figura 1. Representación del vector campo magnético terrestre

- H: es la intensidad en la dirección del norte magnético
- D: declinación, es el ángulo entre el Norte magnético (H) y el Norte geográfico (X)
- I: inclinación, es el ángulo que forma el vector campo magnético (F) con respecto a su proyección en el plano horizontal (H)

Dado que los datos son tomados por un magnetómetro de torsión (el cual se basa en un sistema de imanes suspendidos que calculan magnitudes relativas a un valor base obtenido a partir de un imán fijo) se tiene un número de curvas o mediciones con valor constante en el tiempo, y cierto número de curvas de valor variable.

3. Método

Para el análisis de las imágenes se utilizó el lenguaje de programación Python versión 2.7, haciendo uso de las librerías matplotlib, scipy, numpy y PIL. El análisis se divide principalmente en dos etapas: preprocesamiento basado en técnicas morfológicas y análisis de componentes conectados (ACC) para eliminar las líneas verticales, y extracción de curvas para identificar las mediciones de interés.

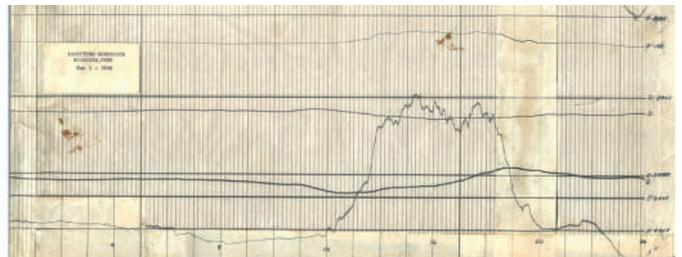


Figura 2. Ejemplo de imagen tomada por el magnetómetro

3.1. Preprocesamiento

El primer paso del preprocesamiento es aplicar un filtro mediano seguido de una umbralización adaptativa, con el fin de suavizar la imagen y eliminar posibles diferencias de iluminación en la imagen.

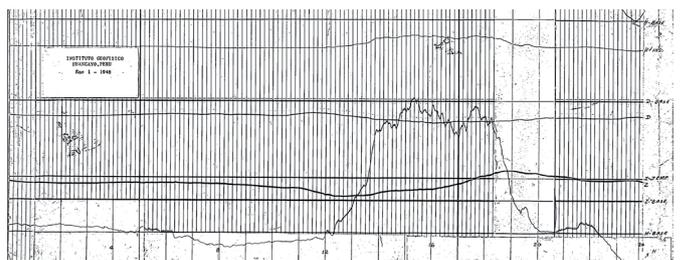


Figura 3. Imagen ejemplo filtrada y umbralizada

El siguiente paso es aplicar un ACC con criterio de conectividad-2 vertical para agrupar los “objetos binarios” en función de su extensión vertical. En ese contexto, aquellos objetos cuya área sea mayor a cierto valor umbral (50 en este caso) son considerados líneas verticales y eliminados. Para eliminar el ruido y cerrar las grietas que esta eliminación pueda provocar en las curvas de interés, se aplica una apertura seguida de dos cerraduras morfológicas.

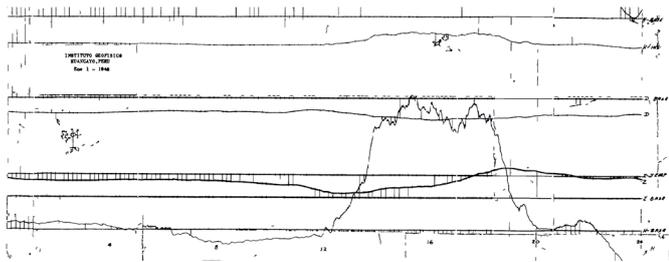


Figura 4. Imagen ejemplo con eliminación ACC vertical

Luego de esta etapa se procede a esqueletizar la imagen, con el fin de simplificar las curvas al máximo posible sin perder información y reducir lo que resta de las líneas verticales.

Por último se realiza un ACC comparativo entre criterios vertical y diagonal. La lógica es sencilla: si un objeto detectado es verticalmente grande y además está incluido en un objeto diagonalmente grande, posiblemente se trata de un segmento creciente o decreciente de una curva de interés, y se conserva. Si un objeto es extenso en el eje vertical pero no cumple con la segunda condición, se elimina.

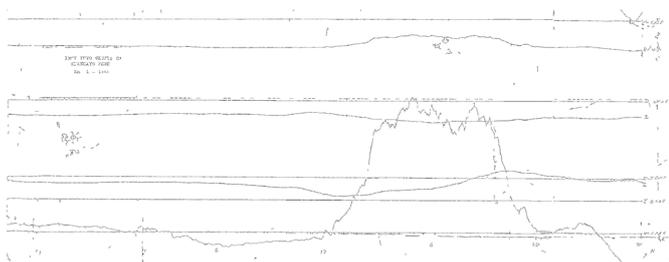


Figura 5. Imagen ejemplo con esqueletización y eliminación ACC comparativa

3.2 Extracción de curvas

La extracción de curvas se realiza en dos “ciclos”: en el primero se busca detectar todas las curvas de valor constante o líneas horizontales, y en el segundo se busca detectar todas las demás.

El punto de partida es un corte vertical en algún punto de la imagen que determina el inicio de cada curva (en la implementación actual dicho corte se realiza en la coordenada horizontal 150).

A partir de dicho punto inicial, para cada curva se realizan cortes verticales consecutivos cada 15 píxeles (resolución del análisis) con el fin de encontrar el “mejor punto siguiente” para expandir la curva. Dependiendo del “ciclo” en ejecución la expansión puede realizarse de acuerdo a uno de dos criterios:

- Para la detección de líneas horizontales, la expansión se realiza buscando preservar el valor promedio de la curva.
- Para la detección de las curvas variables o dinámicas, la expansión se realiza buscando preservar el promedio de las derivadas más recientes.

Asimismo, se verifica que se cumpla con condiciones de continuidad (para evitar saltos de una curva a otra) así como de horizontalidad (para el primer ciclo) e independencia (para el segundo).

4. Resultados

A continuación se muestran algunos ejemplos de los resultados obtenidos en diversas imágenes.

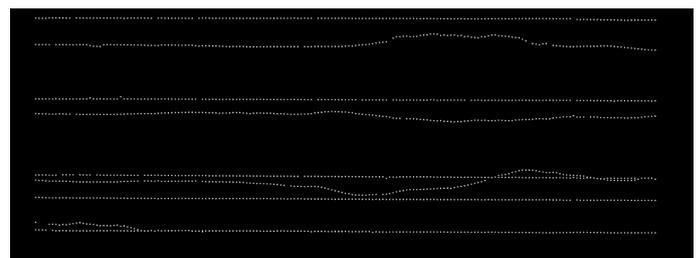
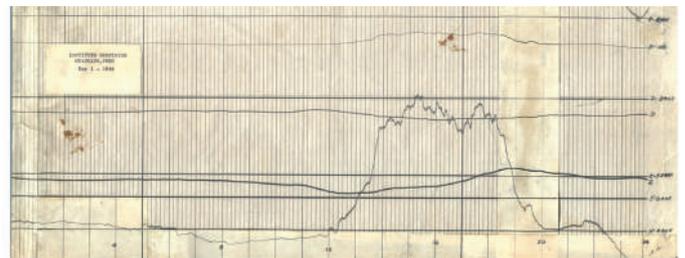


Figura 6. Imagen de prueba 1 y resultado correspondiente

5. Discusión

Se observa que las curvas de valor constante y aquellas moderadamente variables se detectan de acuerdo a lo esperado. La curva parcialmente detectada (H) posee un comportamiento drásticamente más dinámico que las demás, y requiere etapas posteriores de procesamiento para ser adecuadamente detectada.

Algunas curvas (mayormente las de valor constante) parecen haber sido generadas con mayor intensidad que el resto (probablemente debido a la superposición de dos trazos), lo cual se manifiesta en un “reflejo” en la imagen resultado (caso de la imagen de prueba 3).

6. Conclusiones

El procesamiento de las imágenes de magnetogramas escaneados, permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha verificado una implementación exitosa de la etapa de preprocesamiento, logrando aislar las curvas de interés del resto de la imagen.
- Se requiere un mayor procesamiento de la imagen en la etapa de extracción de curvas para detectar la curva que representa a la magnitud H, dada su alta variabilidad en el tiempo, particularmente en los magnetogramas tomados durante tormentas magnéticas
- Las curvas horizontales y moderadamente variables han sido detectadas prácticamente en su totalidad, lo cual facilitaría un posterior análisis de dichos datos para su conversión a las unidades reales de los componentes del campo magnético terrestre.

7. Recomendaciones

- Con el fin de facilitar la detección de la curva H, una opción sería sustraer o eliminar aquellas curvas ya detectadas de la imagen binaria, reduciendo así las posibilidades de error al realizar la búsqueda.
- Se puede mejorar la resolución de las curvas detectadas realizando nuevamente la extracción una vez ya detectadas las curvas, pero esta vez expandiendo píxel a píxel, en lugar de cada cierta cantidad de pasos (el patrón detectado funcionaría como guía para orientar la dirección de la búsqueda).

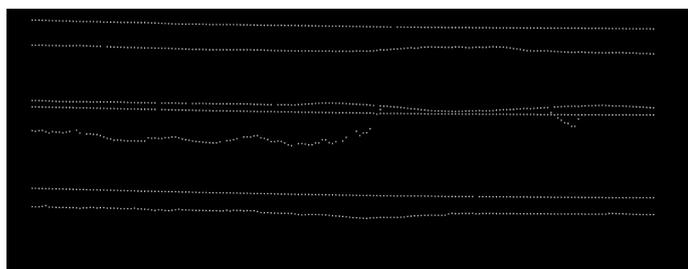
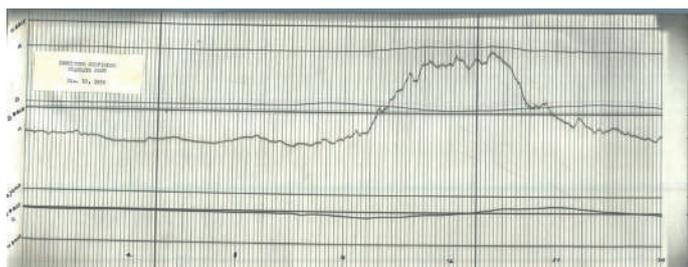


Figura 7. Imagen de prueba 2 y resultado correspondiente

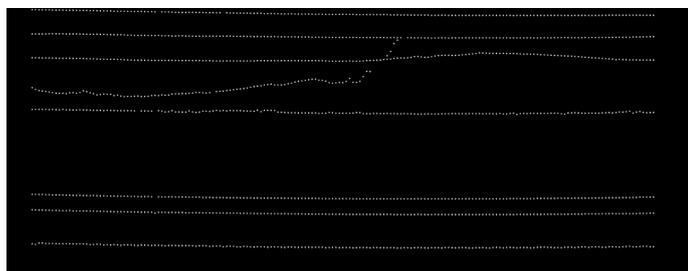
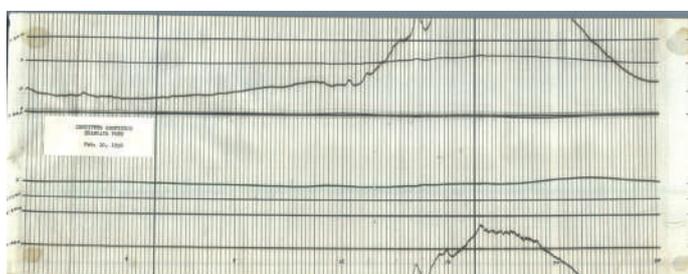


Figura 8. Imagen de prueba 3 y resultado correspondiente

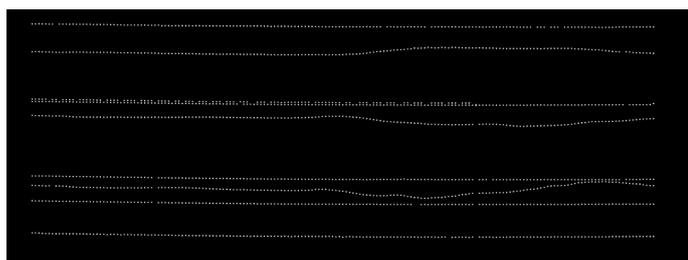
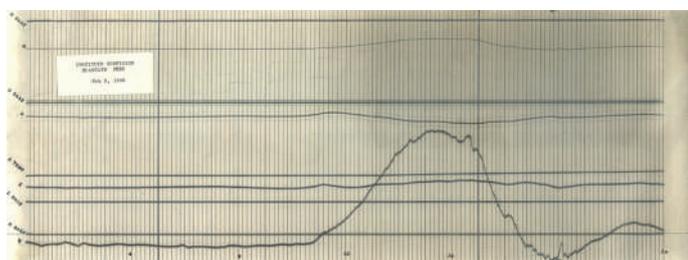


Figura 9. Imagen de prueba 4 y resultado correspondiente

8. Agradecimientos

Mi agradecimiento al IGP, particularmente al Radio Observatorio de Jicamarca, por haberme brindado un ambiente agradable de trabajo y la logística necesaria para realizar este proyecto. Asimismo, mi gratitud a mi asesor del proyecto, el Dr. Jorge Ortiz.

9. Bibliografía

Jankowsky J. (1996). Guide for magnetic measurements and observatory. Warsaw 1996, pp 54-60

Gonzales R. C., and Woods R. E. (2007). Digital Image Processing. Prentice Hall: New Jersey, pp 523-540

Dillencourt M. B., Samet H. and Tamminem M. (1992). A general approach to connected component labelling for arbitrary image representations. J. ACM, Vol 9, no 2, pp 253-280.

DISCRIMINACIÓN DE CABEZA Y COLA EN DATOS DE METEOROS DE ALTA POTENCIA OBTENIDOS CON EL RADAR DE JICAMARCA

HEAD AND TRAIL DISCRIMINATION IN HIGH POWER METEOR DATA OBTAINED WITH JICAMARCA RADAR

Héctor Francisco Chahuara Silva

Pontificia Universidad Católica del Perú
Facultad de Ciencias e Ingeniería
a20090815@pucp.edu.pe

Asesor: Danny Eddy Scipión Castillo, Ph.D

Radio Observatorio de Jicamarca

Resumen

Un meteoro es un fenómeno que ocurre cuando una partícula ingresa desde el espacio a la atmósfera teniendo como consecuencia una enorme transferencia de energía. La información que se puede extraer de un meteoro es usada en estudios de la mesósfera y en la construcción de perfiles de vientos. En el presente trabajo se presenta un método que permite que permite detectar meteoros de alta potencia y discriminar sus dos partes principales: cabeza y cola. Para evaluar el método se utilizan datos obtenidos con el radar principal de Jicamarca en el año 2007, los cuales presentan meteoros en presencia del Electrochorro ecuatorial y sin presencia de este.

Palabras clave: Meteoros, Electrochorro ecuatorial, Radar de Jicamarca

Abstract

A meteor is a phenomena that occurs when a particle enters from outer space to atmosphere producing an enormous energy transfer, that often is visualized as light or detected by radars. Information given by meteors is used in mesosphere studies and to make wind profiles. In the present work, a method is presented that allow to detect high power meteors and to separate its two principal parts: head and trail. To test the method, data obtained using the principal Jicamarca's radar in year 2007 is used. The data used include Equatorial electrojet presence and not.

Keywords: Meteors, Equatorial electrojet, Jicamarca Radar

1. Introducción

El sector de la atmósfera llamado Baja Termósfera comprende las zonas ubicadas entre 0 y 100 km de altura. Dentro de este sector ocurren fenómenos que han sido estudiados intensivamente. En el Radio Observatorio de Jicamarca han sido estudiados varios de estos fenómenos, los cuales permiten conocer mejor el espacio y la atmósfera. Entre ellos, los meteoros son fenómenos que han atraído la atención a su estudio desde el siglo pasado. Un meteoro es un fenómeno que se produce cuando una partícula o cuerpo ingresa desde el espacio hacia la atmósfera, lo cual produce una transferencia de energía, la cual, en ocasiones puede producirse como emisiones de luz, por lo cual las estrellas fugaces han sido asociadas con este fenómeno. Sin embargo, no todas las transferencias de energía pueden ser vistas, por lo cual, se utilizan otras técnicas para su observación y estudio. Entre ellas, destaca el uso de radares para la detección de ecos de meteoro.

En el Radio Observatorio de Jicamarca se realiza desarrollo de hardware y software con el objetivo de lograr un adecuado procesamiento de señales que permitan el estudio del espacio y la atmósfera. En cuanto al desarrollo de software se han usado diversos lenguajes de programación como Ensamblador, C, C++, MATLAB, IDL, entre otros. Signal Chain es uno de los proyectos de software desarrollados en Jicamarca el cual consiste en el uso de software libre para procesamiento de señales de radar (Suárez, 2013), para lo cual se han desarrollado librerías usando el lenguaje de programación Python. Los métodos implementados permiten desde el procesamiento de datos crudos hasta la obtención de parámetros importantes de señales captadas por el radar.

El presente estudio contempla la implementación de algoritmos que permitan el procesamiento de señales necesario para una adecuada discriminación de ecos de cola y cabeza de meteoros. Para ello, se ha modificado una versión del proyecto Signal Chain, en la cual se han implementado y modificado rutinas de decodificación, filtrado, obtención de características y discriminación de partes de meteoro, entre otras que permiten lograr ese fin.

2. Datos

Se han utilizado muestras realizadas durante dos días, el siete de mayo y el seis de mayo del año 2007. Las muestras del día siete de mayo corresponden a datos en presencia de Electrochorro ecuatorial mientras que los datos del día seis de mayo corresponden a datos sin presencia de EEJ. El método implementado ha sido probado primero en las muestras del día seis de mayo para comprobación de

funcionamiento y luego en el día siete de mayo. Estos datos fueron tomados usando el radar principal de Jicamarca usando una disposición especial gracias a que este puede modularizarse. Esta disposición se detalla en la siguiente figura:

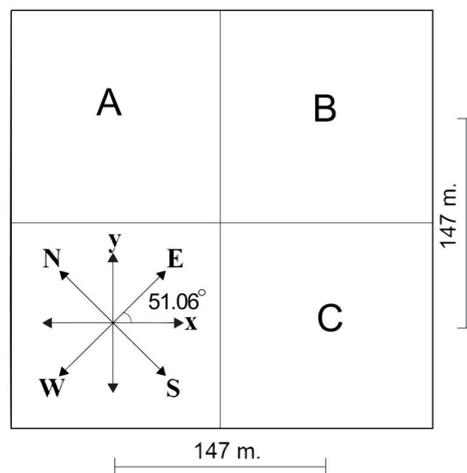


Fig 1: Disposición del radar de Jicamarca para la toma de datos. Se usan 1 canal de transmisión y 3 de recepción A, B y C.

3. Método

3.1 Pre procesamiento de datos crudos

En el Radio Observatorio de Jicamarca, los datos de voltaje obtenidos por el radar se guardan en formato .r (rawdata) que almacenan los datos de voltaje como matrices de 3 dimensiones, donde estas son el rango de altura, número de perfiles y número de canales. Debido a que los meteoros analizados en el presente proyecto ocurren solo en un determinado rango de alturas, entonces, la primera tarea será seleccionar alturas, es decir, extraer solo una parte de la matriz con la cual se trabajará. Sin embargo, es posible que los datos hayan sido sobremuestreados en altura, es decir, que el ancho de muestreo en alturas sea mucho mayor al número de baudios transmitidos. El proceso de Integraciones Coherentes (Galindo, 2007) es una solución a este problema que consiste en promediar un número de muestras consecutivas lo suficientemente grande para no tener el problema de sobremuestreo, para luego tomar el promedio como el dato a operar. Esto permite mejorar tanto el problema de sobremuestreo como la Relación Señal a Ruido (SNR), sin embargo, al tenerse menos muestras, el ancho de banda de la señal a analizar luego de las integraciones coherentes es menor. Finalmente, solo para datos en presencia de electrochorro ecuatorial, se define una función que implementa un filtro pasoalto. Debido a que el electrochorro se comporta como una constante, entonces, es posible removerlo si se filtran las componentes de baja frecuencia del voltaje de entrada.

3.2. Decodificación

Debido a que se desea obtener el mayor SNR posible en la recepción se usa la codificación Barker la cual codifica según la fase de la señal sin codificar para lograr ese fin. Debido a ello, los datos recepcionados por el radar deben decodificarse antes de proceder con otros tipos de procesamiento. La decodificación usada fue propuesta en (Galindo, 2007) consiste en el cálculo siguiente:

$$s_o(t) = \mathcal{F}^{-1} \{S(f')C(f' + f_d)C^*(f' + f_d)\}$$

Donde $S_o(t)$, $s(t)$ y $c(t)$ son el voltaje decodificado, la señal transmitida por el radar y el código Barker respectivamente. Sin embargo, según se necesite información de la cola o la cabeza del meteoro, el proceso de decodificación tiene que tomar en cuenta la ambigüedad. En el caso de extraer información de ecos de cabeza de meteoros, se decodificará para la máxima velocidad doppler, mientras que para las colas no será necesario hacer esto.

3.3. Cálculo de variables y parámetros

Varios parámetros y variables son calculados debido a que contiene información útil para la detección de meteoros y discriminación de cabezas y colas. Estos tienen como base el cálculo de las correlaciones entre canales y autocorrelaciones por canal. Estos son:

3.3.1. Relación Señal a Ruido (SNR)

El parámetro SNR es usado para la detección de ecos de cabeza y cola de meteoros y se define como la relación entre la potencia de una señal entre la potencia del ruido con la que está contaminada la señal. Donde S_i es la potencia de la señal de entrada sin ruido y N es el nivel de ruido en la señal de entrada. Debido a que se necesita una estimación del nivel de ruido existente en la señal decodificada, se usa el algoritmo de Hildebrand -Sekhon (Hildebrand y Skehon, 1974), el cual permite estimar el nivel de ruido en decibelios (dB). Luego, el cálculo del SNR procederá de acuerdo a:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{S_i - N}{N} \right)$$

Donde el nivel de potencia de la señal S_i se calcula como el promedio de las autocorrelaciones de los canales en el lag 0 y N es el nivel de ruido en dB.

3.3.2. Coherencia

El parámetro de Coherencia se refiere a la coherencia temporal de primer orden, el cual es un parámetro normalizado entre 0 y 1 que mide el parecido entre dos señales en el dominio del tiempo. Se define como sigue:

$$coh_{i,j} = \frac{r_{ij,\tau}(t)}{\sqrt{r_{ii,\tau}(t)r_{jj,\tau}(t)}}$$

Donde $coh_{i,j}$ es la coherencia entre los canales i y j y $r_{ij,\tau}$ es la correlación entre los canales i y j en lag τ .

3.3.3. Fases entre autocorrelaciones

Las correlaciones son representadas como matrices de elementos complejos por lo cual poseen fase. Este parámetro es utilizado para la detección y caracterización de meteoros.

3.3.4. Velocidad Doppler

La velocidad Doppler es la velocidad del meteoro, su nombre proviene del efecto Doppler que relaciona variaciones de frecuencia con variaciones de velocidad. Se calcula de la siguiente manera:

$$v_r = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \angle ACF$$

Donde T_s es el período de transmisión de los pulsos de radar, λ es la longitud de onda del radar y ACF es el promedio de autocorrelaciones por canal.

3.3 Discriminación de cabeza y cola de meteoros

Una vez calculados los parámetros ya mencionados, se puede notar que la velocidad de la cabeza del meteoro puede llegar a valores extremadamente altos (cerca a los 3700 Km/h) en comparación con la cola del meteoro (la cual no sobrepasa los 150 Km/h) (Sugar et al., 2010) y el SNR para la cabeza es generalmente mayor que el valor de SNR de la cola. Usando estos resultados y observaciones preliminares, se puede plantear primero el uso de una umbralización

para separar las cabezas de la cola. Los umbrales usados son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{SNR} &\geq 5 \text{ (cabeza)} \\ \text{SNR} &\geq 1 \text{ (cola)} \\ \text{coh} &\geq 0.6 \\ \text{vr} &\geq 800 \text{ (cabeza)} \\ \text{vr} &\leq 160 \text{ (cola)} \end{aligned}$$

Sin embargo, debido a que los ecos de cola significativos poseen una duración mayor a 5 segundos (Oppenheim et al., 2014), entonces, se necesita tener una manera de recuperar solo estos. Interpretando los gráficos RTI (Range Time Intensity, por su siglas en inglés) como imágenes, entonces, se puede procesar cada cuadro independientemente de acuerdo a unos criterios definidos. Observaciones hechas en Jicamarca anteriormente muestran que a cierta altura tanto en potencia como en altura existe una fuerte correlación en la aparición de pares cola-cabeza tal que la cola es de alta duración y la cabeza es de alta potencia (Sugar et al., 2010). Además, es válido el mencionar que si bien existen pares de tales características en rangos de altitud fuera del especificado, son casos aislados en comparación con otros meteoros ya vistos en los resultados del cálculo de parámetros anterior, por lo cual, el criterio a utilizar debe diferir por rango de alturas examinado. Teniendo en cuenta esto, se ha planteado un criterio que hace uso del tamaño de las colas de meteoros para poder discriminar colas largas de meteoros de las cortas. El criterio se plantea de la siguiente forma:

- Binarizar (mediante umbralización) una imagen que represente la presencia de meteoros. En el presente estudio se ha utilizado la SNR.
- Remover el ruido de la imagen binarizada (remoción de puntos aislados). Se ha utilizado un filtro mediano de 2 dimensiones de tamaño 5.
- Realizar una reforma de la imagen para obtener los rectángulos de mínimas dimensiones que contengan los ecos de las colas. Para ello se hace uso de operaciones morfológicas de imágenes, en particular, la cerradura morfológica, y luego se procede a identificar objetos, que en la imagen vendrían a ser los ecos de los meteoros, los cuales se encuentran identificados con los rectángulos ya mencionados.
- Luego, los ecos válidos tendrán un rectángulo asociado de largo en tiempo mayor a 5 segundos, sino, para el rango de altura de 90 a 100 Km, los ecos válidos tendrán una duración

parcial (los ecos pueden comenzar en un cuadro de análisis y terminar en otro, es decir, pueden tener duración menor a 5 segundos por cuadro) de 2 segundos y un ocuparán un rango de 6.5 Km. Si el eco comienza al inicio del cuadro actual, entonces, debe tener una duración mayor o igual a 4 segundos para ser válido. Fuera del rango de alturas mencionado anteriormente, la duración parcial en tiempo debe ser mayor a 3 segundos y su rango de alturas mayor a 8 Km. Todos los ecos válidos conservan sus rectángulos asociados, mientras que los demás se pierden.

- Finalmente, los rectángulos asociados restantes poseen la información de los ecos de cola significativas, es decir, los ecos de duración mayor a 5 segundos.

La operación morfológica aludida, cerradura (Gonzales y Woods, 2008), consiste en, dado un objeto en una imagen y un elemento estructurante (un objeto o subimagen), la expansión y reducción consecutivas del objeto usando el elemento estructurante. El efecto visual de esta operación es el llenado de huecos en objetos y la desaparición de apéndices delgados, tal y como se muestra en la figura siguiente:



Fig 2. Aplicación de la operación de cerradura morfológica al objeto B usando el elemento estructurante X. A la izquierda se muestran X y B, y a la derecha el resultado.

Este criterio ha sido probado tanto en ventanas de 10 segundos como de 5 segundos con resultados muy similares con algunas variaciones debido a la operación morfológica usada y al árbol de decisión descrito.

4. Resultados

4.1 Resultados sin presencia de electrochorro ecuatorial

A continuación se presentan los resultados de aplicar el algoritmo a datos sin presencia de electrochorro ecuatorial. Se presentan las imágenes de SNR debido a que en estas se puede distinguir mejor los meteoros.

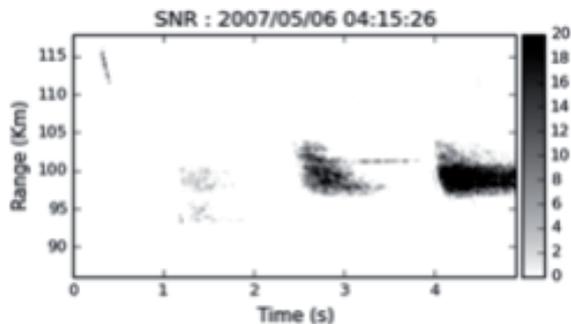


Fig 3. Relación Señal a Ruido sin procesar. Datos desde 4:15:26 hasta 4:15:31.

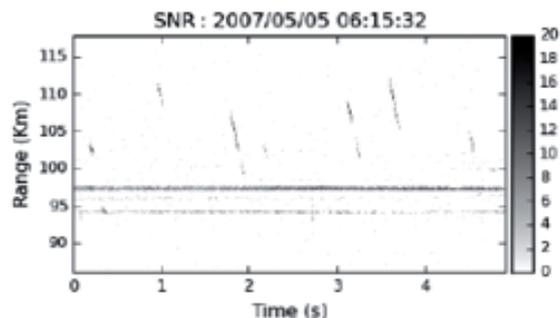


Fig 6. Relación Señal a Ruido sin procesar. Datos desde 4:15:26 hasta 4:15:31.

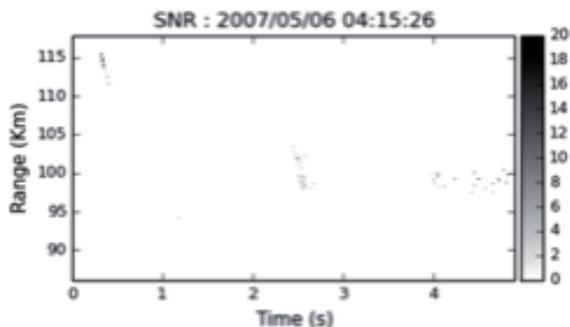


Fig 4. Relación Señal a Ruido mostrando ecos de cabeza detectados. Datos desde 4:15:26 hasta 4:15:31.

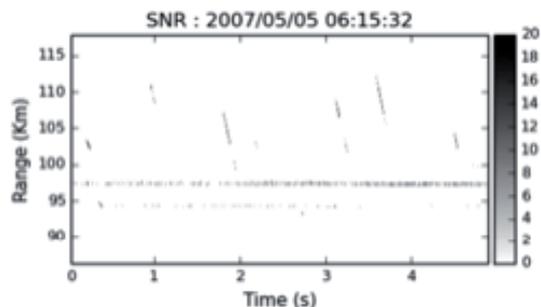


Fig 7. Relación Señal a Ruido mostrando ecos de cabeza detectados. Datos desde 4:15:26 hasta 4:15:31.

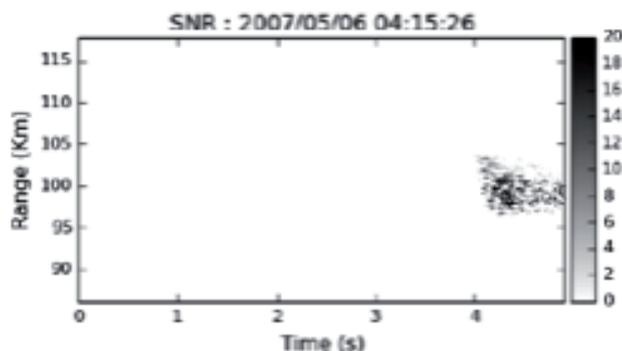


Fig 5. Relación Señal a Ruido mostrando ecos de cola detectados. Datos desde 4:15:26 hasta 4:15:31.

4.2 Resultados en presencia de electrochorro ecuatorial

A continuación se presentan los resultados de aplicar el algoritmo a datos en presencia de electrochorro ecuatorial. Se presentan las imágenes de SNR debido a que en estas se puede distinguir mejor los meteoros. Se ha aplicado un filtro de orden 4 para remover el electrochorro.

5. Discusión

- Se puede recuperar las cabezas de meteoros en ambas bases de datos. Sin embargo, se tiene una presencia fuerte de ruido en los resultados para datos en presencia de EEJ, lo cual se debe a los parámetros del filtro.
- Las colas de meteoros son recuperables con ciertas condiciones. Las partes de los ecos largos de cola que ocupan un área muy pequeña o que tienen baja potencia son difícilmente recuperables. Sin embargo, debido a que los perfiles de vientos se construyen con bases de datos grandes, de hasta 30 minutos, estas pérdidas no representan un error significativo.
- Se observa que la decodificación de colas, a diferencia de la decodificación de cabezas produce resultados diferentes en las imágenes RTI, en cuanto al grosor de los ecos de cabeza, los cuales deben ser delgados, mientras que los ecos de la cola deben tener una velocidad continua, lo cual se cumple en la decodificación de colas.

6. Conclusiones

- El algoritmo planteado funciona correctamente con resultados visiblemente correctos en su mayoría. La presencia de falsos positivos se debe a que se necesita una mayor observación para efectuar un ajuste de parámetros más fino.
- En general, los ecos de cabeza más

prominentes o fuertes, es decir, aquellos de más alta potencia son aquellos que corresponden a los ecos discriminados de cola, lo cual está de acuerdo con las observaciones hechas en [13].

- La remoción del Electrochorro ecuatorial realizada funciona adecuadamente, sin embargo, mucha de la información de las colas se pierde por lo cual se necesita una mejor alternativa que el filtro utilizado.

7. Recomendaciones

- La codificación Barker, permite tener un incremento del SNR sin reducir la resolución en altura de las muestras. En el espectro de potencia, esto se puede corroborar cuando se tiene una diferencia de -22 dB entre el pico principal y los picos contiguos. Para aumentar el SNR, se puede implementar un filtro tal que se aumente esa diferencia a poco menos de -32 dB sin afectar el proceso de decodificación (Chau y Woodman, 2004).
- Se recomienda tener un procesamiento por cada dos o más cuadros o retrasar el procesamiento de discriminación de colas de duración larga en un cuadro para tener resultados más adecuados.
- El método en general ha sido planteado en base a observaciones hechas en mediciones en Jicamarca en los años 2005 y 2007, sin embargo, debido a ello, pueden ocurrir casos no previstos por el algoritmo. Se plantea entonces usar algoritmo basado en aprendizaje máquina para tener un árbol de decisión o una red neuronal que permita reconocer ecos largos de cola de forma tal que se pierda el mínimo de información relevante para una adecuada recolección de datos.
- Una posible mejora del algoritmo proviene de Sugar et al. (2010), donde se plantea una relación entre las potencias de los ecos de cola y cabeza para un meteoro. Así, estimando la potencia de cola de un meteoro a partir de la potencia de su cabeza, se podrían obtener solo colas con información importante.
- Otro resultado aplicable (Dyrud, et al., 2002) resalta que la cola de un meteoro aparece aproximadamente alrededor de 20 milímetros después de la cabeza dependiendo de la altitud. Esto puede ser usado para la búsqueda de colas a partir de cabezas y viceversa.

8. Agradecimientos

Mi agradecimiento al Radio Observatorio de Jicamarca, por haberme brindado un ambiente agradable de trabajo y la logística necesaria para realizar esta investigación. Asimismo, agradezco a mi asesor, Dr. Danny Scipión, por la confianza depositada en mí en el desarrollo del presente proyecto. Un agradecimiento especial a mis amigos practicantes en el Radio Observatorio de Jicamarca, un grupo en el cual compartimos conocimientos, consejos y experiencias.

9. Bibliografía

Chau J., y Woodman R. *Observations of meteor-head echoes using the Jicamarca 50 MHz radar in interferometer mode. Atmospheric Chemistry and Physics 4th volume, 2nd (2004).*

Dyrud L., Oppenheim M., Close S. y Hunt S. *Interpretation of non-specular radar meteor trails. Geophysical Research Letters 29th volume (2002).*

Galindo, F. *Detección y Caracterización de ecos de meteoros no especulares en Jicamarca. Tesis para optar por el título de Ingeniero Físico. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. 2007.*

Gonzales R. y Woods R. *Digital Image Processing, 3rd ed. Pearson Education, 2008.*

Hildebrand P. y Sekhon, R. *Objective determination of the noise level in doppler spectra. Journal of Applied Meteorology 13th volume (1974), 808-813.*

Oppenheim M., Arredondo S. y Sugar G. *Intense winds and shears in the equatorial lower thermosphere measured by high-resolution nonspecular meteor radar. Journal of Geophysical Research and Space Physics (2014).*

Suárez, D. *Signal chain, 2013.*

Sugar G., Oppenheim M., Bass E., y Chau J. *Nonspecular meteor trail altitude distributions and durations observed by a 50 MHz high-power radar. Journal of Geophysical Research 115th volume (2010).*

 <http://www.facebook.com/igp.peru>
 http://twitter.com/igp_peru
 https://www.youtube.com/c/igp_videos

