

RIDTEC - Vol.8, No. 1, Julio 2012

ISSN 1860-8894

Edición Semestral

I + D

Tecnológico

Revista de investigación de la
Universidad Tecnológica de Panamá



REVISTA DE I + D TECNOLÓGICO

VOLUMEN 8, No. 1

• EDICIÓN SEMESTRAL •

2012

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ

RECTORA

Ing. Marcela Paredes de Vásquez

VICERRECTOR ACADÉMICO

Ing. Luis Barahona G.

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN, POSTGRADO Y EXTENSIÓN

Dr. Martín Candanedo G.

VICERRECTORA ADMINISTRATIVA

Ing. Myriam González B.

SECRETARIA GENERAL

Licda. Cesiah Alemán

Correspondencia para suscripciones y/o canje:

Universidad Tecnológica de Panamá
Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión
Apartado Postal: 0819-07289
Panamá, República de Panamá
E-mail: direccion.investigacion@utp.ac.pa

Edición aprobada por la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión de la
Universidad Tecnológica de Panamá



Revista De I + D Tecnológico

Volumen 8, Número 1, Edición Semestral, Julio 2012
ISSN 1680-8894

DIRECTOR DEL COMITÉ EDITORIAL

Dr. Ignacio Chang, Dirección de Investigación, UTP¹

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Humberto Álvarez, Facultad de Ingeniería Industrial¹

Dr. Wedleys Tejedor, Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales¹

Dr. César Peña, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación de Automatización

Dr. Jaime Estrella, Dirección de Investigación y Desarrollo (I+D) SENACYT³

Ing. Eli Faskha, Miembro del CONEP⁴ y de la Junta Directiva de CAPATEC⁵

Ing. Silvio Rojas, MSc., UNI⁶

Suplentes:

Dr. Carlos Medina, Facultad de Ingeniería Eléctrica, UTP¹

Dr. Ramfis Miguelena, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales, UTP¹

Lic. José Javier Rivera, Miembro del CONEP⁴

Arte y diseño: Dirección de Comunicación Estratégica, UTP¹

Corrección y Estilo: Dirección de Comunicación Estratégica, UTP¹

Coordinación y Logística: Ing. Eduardo Caballero, Dirección de Investigación, UTP¹

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá

Imprenta de la Universidad Tecnológica de Panamá

Copy Right

© Derechos Reservados UTP

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Universidad de Pamplona, Colombia

³ Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Panamá

⁴ Consejo Nacional de la Empresa Privada, Panamá

⁵ Cámara Panameña de Tecnología y Comunicaciones, Panamá

⁶ Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua

PRESENTACIÓN

La Universidad Tecnológica de Panamá presenta a la comunidad científica del país la Revista de I+D Tecnológico volumen No. 8 donde presentamos investigaciones de gran interés y utilidad en las áreas de estructura, materiales, metrología y geociencias.

La doctora Gisela Rodríguez nos presenta un artículo sobre el desarrollo de planos de construcción por el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva que promueve el buen ejercicio de ingeniería civil y la metodología que garantice la confección de planos de construcción. En el campo de la metrología, este número incorpora la investigación titulada “Desarrollo de Tiempo Universal Coordinado en Panamá” del Ing. Raúl Solís, investigador de Centro Nacional de Metrología de Panamá AIP (CENAMEP).

Por otro lado, el Dr. Evgeni Cruz de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UTP y su equipo internacional de investigadores nos entregan un artículo en el área de materiales y presentan los resultados de su estudio sobre “Quantum tunneling in magnetict tunneling junctions”. Adicionalmente, tenemos un trabajo de investigación igualmente importante, en el área de hidrogeofísica y geofísica como parte de esta edición de I+D que es titulado “Characterization of shallow ground water in Eocene sediments of Panama Canal Watershed using electrical techniques” y presentado por el Ing. Irving Díaz y el Dr. Alexis Mojica, ambos del Centro Experimental de Ingeniería de la UTP.

Finalmente, el Dr. César Silva del Smithsonian Tropical Research Institute de Panamá divulga resultados preliminares sobre la investigación titulada “Documenting Traslation and Vertical-Axis Rotations using Paleomagnetic Techniques along the Panama Isthmus”.

Consideramos como prioridad la trasferencia ciencia y tecnología por lo que esperamos que el conocimiento plasmado en la edición de la revista I+D sirva de referencia valiosa para futuras investigaciones.

Marcela Paredes de Vásquez

Rectora

Panamá, julio de 2012

Desarrollo de los Planos de Construcción por el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva

Gisela M. Rodríguez Jaramillo

Universidad Tecnológica de Panamá

Programa de Doctorado en Ingeniería de Proyectos

gisela.rodriguez@utp.ac.pa

Resumen - Se comprobó con un estudio realizado a 40 proyectos y la aplicación de la técnica de estudio de caso [11] a dos de estos proyectos, los cuales fueron suministrados por el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MIVI) y por el Ministerio de Obras Públicas (MOP); que estos proyectos en su mayoría contenían un porcentaje elevado de adendas [8]; este artículo tiene como propósito señalar una de las causas que originan dichas adendas, siendo una de las más significativas los errores técnicos observados en el desarrollo de los planos de construcción; como solución se presenta un Método que garantiza la confección de planos de construcción regidos por el buen ejercicio de la ingeniería y sujetos al Método de la Tridimensionalidad Repetitiva, que se propone, el cual garantiza incluir en el desarrollo todas las etapas que definen las volumetrías con sus respectivas especificaciones.

Palabras claves - Acotaciones, elevaciones, notas, plano, secciones, símbolos, tridimensionalidad.

Abstract - It was found in a study of 40 projects and through the technical implementation of the case study [11] that two of these projects, which were supplied by the Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial and Ministerio de Obras Públicas (MOP), had a high percentage of addenda [8]. This paper aims to point out that one of the most significant causes of these addenda are the technical errors observed in the development of construction plans. Therefore, a method that ensures the preparation of construction plans governed by good engineering practices is presented and subject to the Repetitive Three-Dimensional Method which is proposed here, and which will guarantee the inclusion of all the stages required in the development to define the volumetries with their corresponding specifications.

Keywords - Dimensions, elevations, notes, plans, sections, symbols, three-dimensionality.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 2 de diciembre de 2011

Fecha de Aceptación: 12 de enero de 2012

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los países llegan a alcanzar sus metas presentes y futuras relacionadas con su desarrollo, en la medida que en ellos exista una interrelación entre sus componentes básicos: la sociedad civil, las universidades y el gobierno. La sinergia de estos elementos nos permitirá desarrollar estudios, propuestas e investigaciones científicas para dar solución a los problemas que el país requiere afrontar y así alcanzar sus metas.

En el Plan Estratégico de Gobierno 2010-2014, se tiene proyectado realizar una inversión significativa de 13,6 mil millones de balboas, destinadas al mejoramiento de la calidad de vida de la población en la República de Panamá [6].

Este desarrollo origina un despliegue de beneficios en las comunidades, por el hecho de que se construirán obras de infraestructuras de gran importancia tales como proyectos viales, transporte, vivienda, saneamiento, recreación y turismo, los cuales benefician y mejoran la calidad de vida en las comunidades más alejadas y marginadas de la República, así como en los centros urbanos.

Se ha escogido este tema del desarrollo de los planos porque es un componente importante para la ejecución eficiente de un proyecto [8] y se encontró que al observar el ejercicio y la ejecución de proyectos de construcción en otros países y en la República de Panamá los resultados fueron que: [1], [3], [4], [6] y [9].

- La falta de contenido técnico específico en los planos originó la improvisación al crear soluciones no contempladas originalmente.

- En su gran mayoría las obras terminadas no concuerdan económicamente con el valor contemplado originalmente para su construcción; en forma similar, el tiempo estipulado. Siendo esto originado por varios aspectos tales como:

- Errores en el diseño, por espacios y cálculos no contemplados en los planos.

- Situaciones específicas como son: detalles inconclusos y poco claros que promueven la improvisación.

- Falta de supervisión en la ejecución de la construcción por personal idóneo.

- No existe fiscalización eficiente para el control del ambiente y la seguridad, al no cumplirse los reglamentos y normas vigentes en la materia.

- Deficiencias en el cronograma de ejecución por actividades, produciendo atrasos y afectando la programación de desembolso.

Todo lo antes expuesto, en su gran mayoría, se origina por la deficiencia que existe en los planos de construcción, porque el plano de construcción debe representar una construcción en papel y una guía metodológica y técnica para construir una obra y por ende debe ser realizado en forma eficiente y técnicamente completo [7], [8] y [9].

Lo anterior repercute en la economía de los países y en el ejercicio de la profesión de ingeniería, revelándose como lo muestra esta investigación, que los atrasos y sobre costos en los proyectos de construcción se deben en su gran mayoría a errores en el desarrollo de los planos, por el hecho de que en ellos no se realizan todos los dibujos técnicos requeridos, por la falta de una concepción volumétrica tridimensional, de tal forma que permitan construir el objeto exactamente como se diseñó. [7], [8] y [9].

Producto de la serie de inconvenientes que se generan en el desarrollo de los proyectos de construcción se propone un Método denominado Tridimensionalidad Repetitiva que permite la representación volumétrica de las obras a construir en cada una de sus etapas. Este Método es innovador y forma parte de la Metodología para la Ejecución de Proyectos de Construcción con Eficiencia Técnica y Administrativa, la cual deben seguir los proyectos para guiar su ejecución desde su génesis hasta su conclusión [8].

2. OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

Debido a que el ser humano ve los objetos de la realidad en perspectiva y con esa visión no es posible construirlos, pero si pueden ser construidos como los pensamos y como creamos nuestras ideas; es así como nuestra investigación, se ha dirigido a presentar una metodología práctica y eficiente que muestre esa tridimensionalidad y luego amarrar ese concepto con órdenes rígidas y estrictas para que el objeto sea construido exactamente como se visualizó, por supuesto esa visualización del proyecto debe responder a conceptos generales y específicos que contengan soluciones científicas, artísticas, funcionales, económicas e integrales.

Es por ello que esta investigación tiene por objeto, desarrollar una Metodología para el Desarrollo de los Planos que guíe a los profesionales de la ingeniería por el sendero de la lógica científica y funcional y permita con ello, tener planos que presenten todos los elementos necesarios para realizar una construcción libre de adendas.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para este artículo se analizaron los resultados obtenidos de la investigación denominada Propuesta de una Metodología Estructurada para la Ejecución de Proyectos de Construcción Públicos, en donde los ministerios de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MIVI) y de Obras Públicas (MOP) proporcionaron 40 expedientes de proyectos; en los cuales se detectó que una de las causas más significativas de los sobretiempos y sobrecostos en proyectos de construcción fue la utilización de planos deficientes, incompletos y técnicamente pobres; además, al analizar el comportamiento en los casos estudiados, se observó de manera similar que una de las causas que generaron las adendas fue por la deficiencia en el desarrollo de los planos de construcción.

Como elemento complementario se procedió a recibir del cuerpo técnico de la Dirección de Ingeniería y Arquitectura del MIVI y la Dirección general de Inspección del MOP sus apreciaciones con relación a las adendas en los proyectos de construcción que ellos manejan, y se reveló que el 87 % de sus afirmaciones indican que las adendas son originadas por varios motivos tales como: detalles incompletos en los planos de construcción, topografía errada, falta de definiciones de trabajos solicitados, los planos que se le entregan al contratista no son concordantes con lo especificado en el pliego, en el plano no se expresa la geometría requerida para la correcta construcción de la obra, la realidad del plano no es la realidad en campo, entre otros similares relacionados con el plano de construcción.

Al revelarse en los planos del MOP y del MIVI una deficiencia para construir las volumetrías, en otras palabras, los componentes principales del plano; manifestaban de hecho, que era casi imposible construirlos, siguiendo la buena práctica de la ingeniería, porque adolecían de los elementos fundamentales necesarios para seguir un método de construcción lógico; este hecho aclaró el camino, que se

debía seguir, el cual era aplicar un método nuevo que resolviera el problema en forma adecuada, el cual llamamos Tridimensionalidad Repetitiva.

4. RESULTADOS Y PROPUESTA

La investigación realizada nos da evidencia clara y contundente de que existe un problema serio, que parte del hecho que si el plano no está correcto, se generan adendas con cifras de dinero y tiempo exorbitantes; que merman la capacidad de hacer otras obras y terminar las que se ejecutan en los tiempos programados. Esta situación de errores en el desarrollo de los planos se presentó, en cada una de las partes de la investigación analizada, como es el análisis realizado a los expedientes en donde aparecen las mismas adendas y de igual forma al analizar cada uno de los casos típicos seleccionados [8], [9]. Cuando se investigó a los profesionales de los Ministerios estudiados que trabajan con la ejecución de los proyectos, en forma similar consideran en su mayoría, que mientras se sigan desarrollando los planos sin toda la información necesaria para construir o se cometan errores y omisiones, se van a seguir generando adendas de sobrecostos y sobretiempos en los proyectos de construcción.

El Método que se propone para el Desarrollo de los Planos denominado Tridimensionalidad Repetitiva, es parte de la Metodología para la Ejecución de Proyectos de Construcción con Eficiencia Técnica y Administrativa [8]. Por ello, en la Figura No. 1 se describe a continuación el concepto que encierra la Metodología para la Ejecución de Proyectos con Eficiencia Técnica y Administrativa.



Figura 1. Modelo Conceptual: Componentes Técnicos de la Metodología para la Ejecución de Proyectos de Construcción con Eficiencia Técnica y Administrativa.

El seguimiento sistemático aplicado a estos tres componentes, nos revela el desarrollo que un proyecto debe seguir desde su inicio hasta su finalización, porque en el se contemplan todas las actividades inherentes al proyecto. Al ser este procedimiento un elemento

abarcador de la ejecución de un proyecto, se ha utilizado como inspiración para la creación de una ruta técnica, la cual servirá para dirigir, supervisar, inspeccionar y controlar el proceso de diseño y desarrollo de los planos, así como la ejecución de la construcción en sus diferentes etapas, evitando así que se originen adendas, atrasos y el incumplimiento en lo pactado.

En este artículo describiremos el segundo componente de la Metodología propuesta que consiste en seguir una secuencia lógica para el desarrollo de los planos de construcción denominado Método de la Tridimensionalidad Repetitiva y se explica así:

Para crear un proyecto de cualquier índole, el inicio siempre se basará en una necesidad para mejorar nuestra calidad de vida; luego se genera en el diseñador idóneo un pensamiento que representa una posible solución, esto después de haber aplicado para ello todo el conglomerado de conocimientos requeridos que la necesidad exige, dependiendo del tipo de proyecto que se vaya a realizar. Esto ha ocurrido así desde tiempos inmemoriales, brotando en los inicios de la humanidad ideas fabulosas que inclusive están vigentes en la actualidad como fue la creación de la viga simplemente apoyada.

El sistema evolucionó y permitió la construcción de obras monumentales en la antigüedad, utilizando sólo piedra y gravedad, para realizar estas obras los diseñadores y constructores tenían que permanecer en ellas todo el tiempo y esto era así porque, sólo ellos y nadie más sabía interpretar sus pensamientos y menos sus ideas.

Es allí donde surge la necesidad de crear un medio para transmitir el pensamiento del diseñador, entonces nos encontramos con el hecho de que el gran problema al elaborar un plano para construir un edificio, un puente, una máquina, definir una parcela para la siembra, no son solamente los conocimientos complejos de las ciencias como la física, las matemáticas, la hidráulica, la mecánica, la mecánica de suelos, etc., sino el hecho de presentar todo el proceso de construcción en sus diferentes facetas técnicas y estéticas, de su condición tridimensional conceptual a una representación bidimensional en una hoja de plano.

Si se desea construir algún proyecto que primero lo hemos concebido y construido en nuestro cerebro en forma primaria, el problema siguiente será cómo se hace realidad, cómo será entendido por las demás personas

que no tienen idea del diseño. Para ello, se realizan dibujos bidimensionales que muestren su volumetría, sus características principales y especiales.[10].

Se inicia haciendo los dibujos generales que definen una volumetría, los cuales son: las plantas, las elevaciones principales y las secciones, el conjunto de esas vistas define la forma general del proyecto que al ser interpretadas por el ingeniero, este entenderá la volumetría que se le quiere manifestar; a esa volumetría que es un trío técnico, constituido por la planta, elevaciones y secciones se le aplican las órdenes técnicas y los acabados del proyecto con un proceso de ejecución sencillo; este proceso consiste en que cada uno de los dibujos o vistas deben pasar por el tamiz del método propuesto, el cual consiste en desarrollar por separado los componentes; por ejemplo, la planta, a ella se le aplicarán acotaciones parciales y totales en todos sus lados, estas acotaciones definen todo su contenido exterior como puertas, ventanas, paredes, etc., enmarcando los aspectos de la forma volumétrica, para esta vista en particular; seguido se aplicarán los símbolos necesarios para identificar esas características acotadas (puertas, ventanas, etc.), estos símbolos cumplen una función muy especial en el método, porque son íconos que indican que en otras hojas del plano existen dibujos en dos dimensiones que reviven nuevamente la tridimensionalidad de lo señalado, con plantas, elevaciones y secciones de lo indicado por el ícono.

La técnica en el desarrollo del método es seguir una secuencia lógica y estructurada que presente siempre la tridimensionalidad del proyecto a construir, empleando dibujos en dos dimensiones y luego si es necesario aclarar otro aspecto, volver a esa tridimensionalidad con nuevos símbolos que expresen una nueva volumetría manifestada a través de dibujos bidimensionales en la hoja de plano; con esa repetición siempre se estará visualizando la tridimensionalidad requerida para construir cualquier aspecto del objeto.

El método sugiere en forma seguida aplicar notas, las cuales son en este caso, una extensión de las especificaciones porque su objetivo es cumplir el proceso por el cual se definen los materiales, acabados, reglamentos, normas, mezclas, protecciones y otros. Este ciclo repetitivo y continuo se realiza hasta estar satisfecho que todo el contenido plástico de lo señalado por los símbolos ha aclarado la tridimensionalidad de lo

que se desea construir y garantiza el hecho de ver los objetos tal como son en la realidad. Este método aplicado a la planta es el recorrido técnico que debe hacerse para desarrollar el resto de los grupos componentes del plano.

En resumen, la estructura de este Método de la Tridimensionalidad Repetitiva es el siguiente:

Paso 1: Creación de la volumetría del objeto

Fase 1.1 Planta

Fase 1.2 Elevaciones

Fase 1.3 Secciones

Paso 2: Desarrollo Técnico

Fase 2.1 Aplicar acotaciones

Fase 2.2 Aplicar símbolos

Fase 2.3 Aplicar notas

Esta tridimensionalidad repetitiva, se repite siempre que se generen símbolos en el Paso 2, Fase 2.2 y se aplica tantas veces cuantas sean necesarias hasta obtener la respuesta a nuestra pregunta clave ¿Con toda la información técnica suministrada en el Paso 2; el detalle, el elemento o proyecto puede construirse?. Si la respuesta es si, finaliza el desarrollo, si es no, continúa la tridimensionalidad.

A continuación se describe el proceso a seguir en el desarrollo técnico como son las acotaciones, los símbolos y las notas:

Explicación para la aplicación de las acotaciones en los planos:

Las plantas, las elevaciones o las secciones y todos los elementos del plano que integran un proyecto requieren para su construcción de una serie de órdenes técnicas que son indispensables, llamadas acotaciones, las cuales permiten que se construyan los objetos exactamente como se diseñaron, porque al aplicar acotaciones parciales y totales exteriores o interiores en el ancho, el alto y la profundidad en todas las características como formas, radios, entrantes, salientes, entre otras, garantizan que los volúmenes diseñados con sus características sean construidos exactamente como se diseñaron.

Explicación para la aplicación de los Símbolos en los planos:

Consiste en la ubicación de símbolos en la planta, elevación o sección; donde se ubiquen representan un ícono, el cual significa, que en otras hojas del plano hay los dibujos necesarios que permiten construir lo señalado exactamente como se diseñó, es decir, otra

tridimensionalidad [7]. Una característica del método consiste en recordar el hecho de que cuando se aplica un símbolo en una volumetría elaborada (planta, elevación o sección), se está originando el hecho de hacer una nueva tridimensionalidad con plantas, elevaciones y secciones, a las que se dará acotaciones, símbolos y notas, originando así la repetición del proceso hasta tanto se esté completamente seguro que se ha completado el proceso de construcción en papel, esto es en síntesis el proceso de nuestra Tridimensionalidad Repetitiva, expresada con la filosofía de la simplicidad.

Explicación para la aplicación de las Notas en los planos:

Por último, se agregarán notas que son las especificaciones técnicas que garantizan la construcción de acabados, el uso de materiales adecuados donde se enfatiza las normas de calidad, resistencia y color en los acabados y otras características.

La figura No. 2 muestra el Modelo Conceptual para el Desarrollo de los Planos por el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva.

A continuación se indica cómo se aplica el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva en el Desarrollo de las Plantas de Fundaciones del Grupo Estructural

Paso 1- Definición de la volumetría general

Para desarrollar las plantas de fundaciones que es parte de la volumetría general se inicia su desarrollo realizando una planta de fundaciones que sea concordante con la planta arquitectónica y siguiendo los lineamientos expresados en la memoria técnica del ingeniero estructural; la cual servirá de base o plantilla para que toda la estructura esté enmarcada en su perímetro, es así como se enfatiza en dibujar todas las columnas con sus excavaciones y fundaciones, sean estas aisladas, fundaciones con pilotes, muros o cualquier otro tipo para indicar la estructura vertical principal. Luego, se agregan las excavaciones para construir los distintos tipos de paredes, sean interiores o exteriores reforzadas o no, o en su defecto la ubicación de vigas asísmicas que servirán como fundación para las paredes.

Es importante que la posición de las columnas ubicadas en la planta de fundación sea igual a la ubicación existente en la planta arquitectónica, esto garantiza construir un proyecto exactamente como se diseñó.

A estas plantas, seguido se le aplicará el **Paso No. 2**

el cual es el Desarrollo Técnico que consiste en las siguientes fases:

Fase 2.1 - Aplicar acotaciones

Esta fase se inicia dando acotaciones de centro a centro de columnas en la dirección de Y y de centro a centro de columnas en la dirección X parciales y totales, eso amarra totalmente el sistema estructural porque usted da coordenadas en X y Y y obtiene un punto, el cual es el centro de la fundación y sirve para la distribución en la construcción. También se harán acotaciones interiores si son requeridas por el proyecto en estudio.

Fase 2.2 – Aplicar símbolos

Este paso se inicia colocando los símbolos para columnas, por ejemplo el número de la columna se identifica por coordenadas alfa numéricas, tal como se describe en la figura No. 3, en donde se especifica además en qué hojas del plano estarán ubicados los dibujos que resuelven la volumetría de esas columnas. Los dibujos que muestran la volumetría de la columna son la planta de la columna y su fundación, las elevaciones y la sección, y a las cuales se les debe aplicar el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva desarrollando cada uno de sus componentes.

Seguido se colocarán símbolos para identificar las vigas asísmicas, los diferentes tipos de muros sean estos en canto libre, concreto reforzado, concreto ciclópeos, atirantados, pretensados; pilotes sean estos de madera, de metal, de concreto, sean hincados o vaciados en sitio, entre otros, paredes sean estas interiores o exteriores reforzadas o no, vaciadas o de cualquier otro tipo. Para el desarrollo de estos símbolos debe seguirse el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva, porque cada símbolo origina una volumetría general de lo que el representa.

Fase 2.3-Aplicar notas

Se inicia con las notas que se aplicarán en la planta de fundación para identificar vigas asísmicas, niveles topográficos, niveles modificados, identificación de muros, título de la planta con su escala, entre otros.

A continuación se presenta un ejemplo práctico para desarrollar la columna estructural D1 de un hangar, por el Método Propuesto, la cual está señalada en la planta de fundaciones en la Figura No. 3.

El método se explica así:

Paso 1: Definir la volumetría

En las Figuras No. 4 y 5 se desarrolla la volumetría haciendo planta, elevación y sección de la fundación y la columna.

Método de la Tridimensionalidad Repetitiva

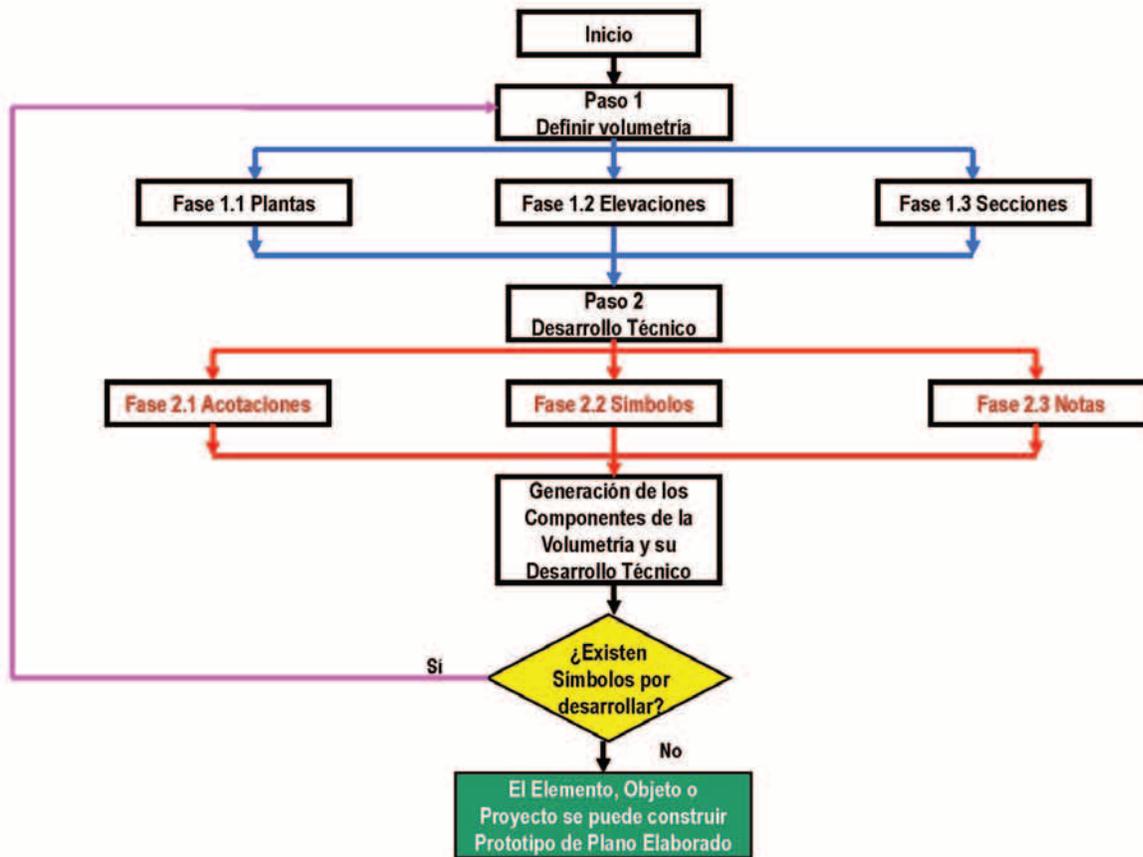


Figura 2. Método para el Desarrollo de los Planos de Construcción. Modelo Conceptual.

Paso 2 – Desarrollo Técnico

A la volumetría generada se le aplica acotaciones, símbolos y notas. Esta etapa del desarrollo se ilustra en las Figuras No. 4 y 5. En la sección de esta tridimensionalidad en la Figura No. 5, aparece un símbolo identificado como 15/S20, el cual según el método que se propone debe ser desarrollado, de la siguiente forma:

Paso 1: Definir volumetría: se desarrolla la volumetría del detalle, haciendo planta, elevación y sección del detalle 15/S20 mostrado en la Figura 6.

Paso 2: Desarrollo Técnico: a esa volumetría se le aplica acotaciones, símbolos y notas que se presentan en la Figura No. 6.

Para finalizar el desarrollo, en la sección del detalle 15/S20, se realiza un detalle de ampliación, identificado como 16/S20, el cual se muestra en la Figura No. 6.

Este método para el desarrollo de planos se aplica hasta que cada uno de los símbolos esté resuelto en su volumetría y puedan estos objetos ser construidos.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En la comparación realizada con la información recopilada se infiere que lo expresado en los documentos encontrados indican en forma general y poco explícita que en un plano deben existir acotaciones, que las unidades deben estar definidas, procurar que el plano quede compacto con el menor número de huecos posibles, que las dimensiones y distancias se expresen con dos cifras decimales, que el contenido del plano debe corresponderse con el título del mismo[5], conceptos que son generales ya conocidos y que todos aplican; pero la metodología propuesta dice como representar una forma y con qué dibujos se expresa un volumen y lo más importante es bajo que concepto técnico y práctico se aplican las acotaciones pues se indica que no deben hacerse siguiendo la acción de cómo se realizó un dibujo, sino siguiendo la información que el constructor necesita para realizar el proyecto y además debe

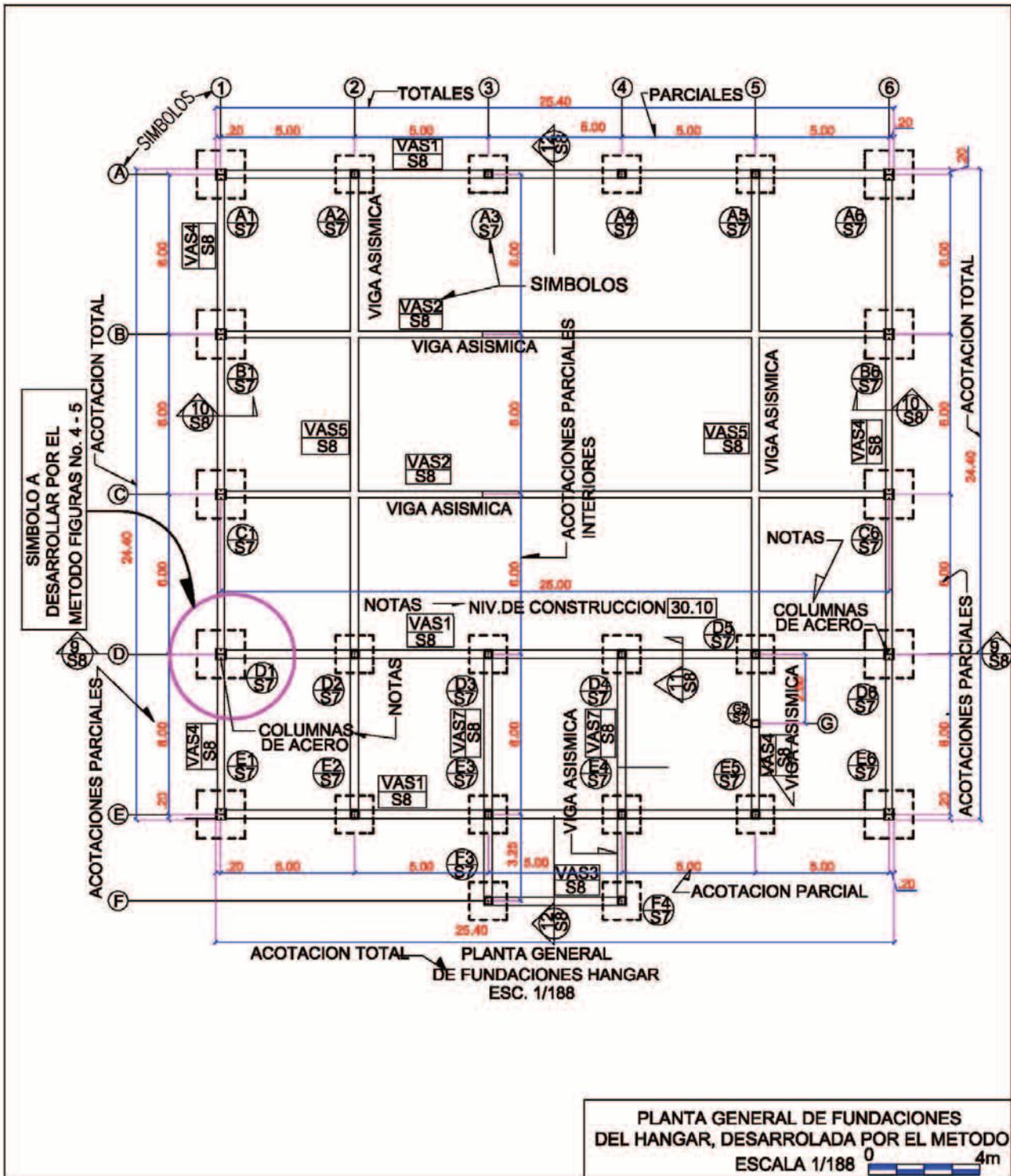


Figura 3. Se muestra en la planta de la fundación el símbolo D1/S7 que señala la columna estructural D1 en estudio y significa el inicio del Método de la Tridimensionalidad Repetitiva.

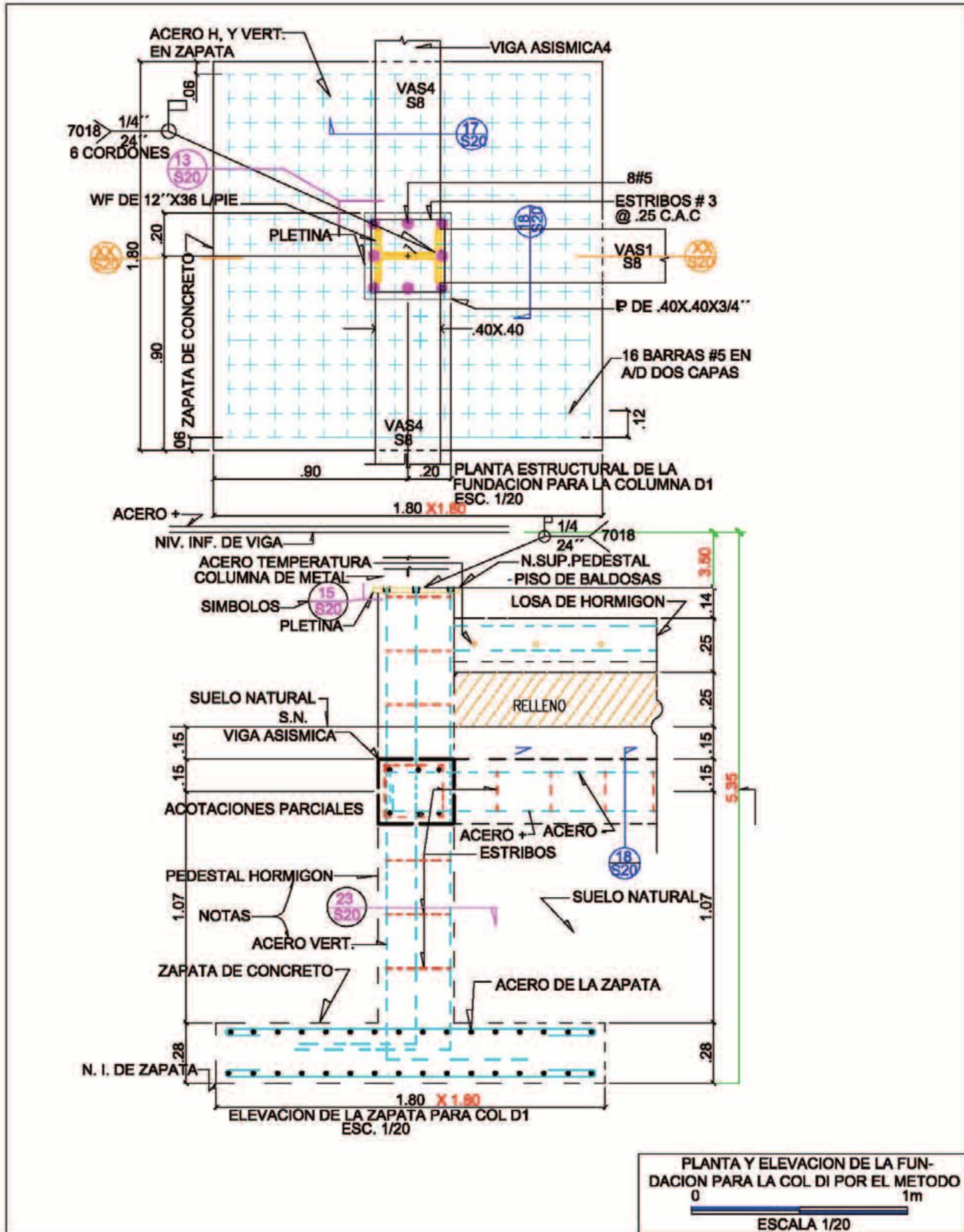


Figura 4. Se aplica el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva desarrollando el símbolo D1/S7 con la planta estructural de la fundación para la columna D1, con su respectiva elevación y la aplicación de acotaciones, símbolos y notas.

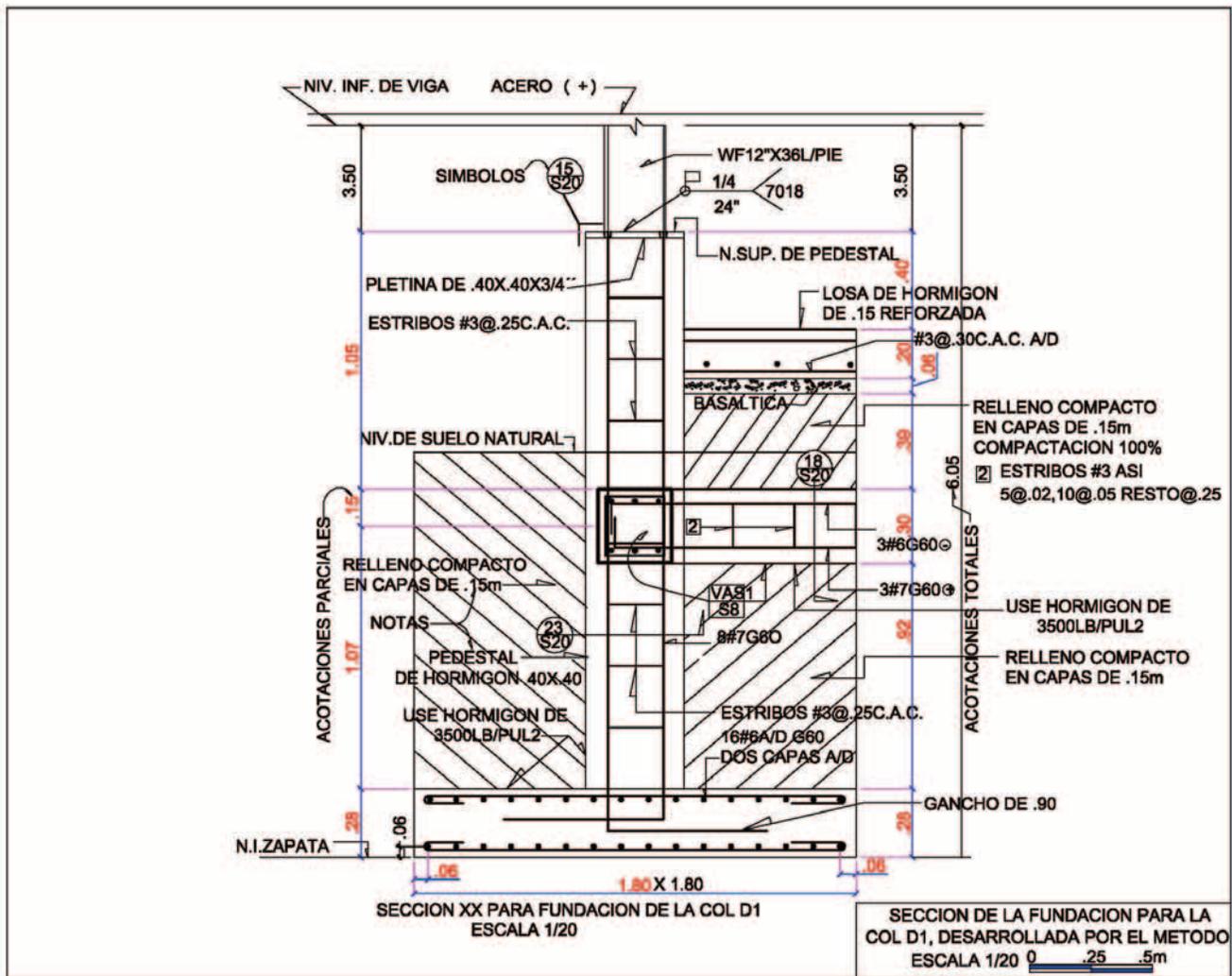


Figura 5. Se aplica el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva desarrollando el símbolo D1/S7 con la sección estructural de la fundación, para la columna D1 con sus respectivas especificaciones y la aplicación de acotaciones, símbolos y notas. Donde el símbolo 15/S20 es el contenido técnico de la Tridimensionalidad Repetitiva porque será desarrollado como un elemento independiente, realizando planta, elevaciones y secciones, con acotaciones símbolos, notas y especificaciones.

ser acotado por un profesional que conozca la técnica de la construcción, con esto y aplicando leyes sencillas que definan el ancho, alto y profundidad parcial y total del objeto más sus especificaciones los objetos se construirán como fueron diseñados.

Uno de los componentes básicos para la ejecución eficiente de los proyectos de construcción radica en el desarrollo correcto de los planos de construcción y por ello concluimos lo siguiente:

A. Para desarrollar un plano de construcción el mismo debe ser dirigido por profesionales idóneos en las ramas de la ingeniería y la arqui-

tectura.

B. Su desarrollo debe ser regido por el concepto de la tridimensionalidad y la técnica constructiva.

La Tridimensionalidad

Se manifiesta cuando aparecen dibujos bidimensionales los cuales dan forma al objeto, estos dibujos son las plantas, elevaciones y secciones. Siempre que desee crear una tridimensionalidad de algún pensamiento o detalle relacionados con la ingeniería, se deben realizar estas tres vistas como mínimo.

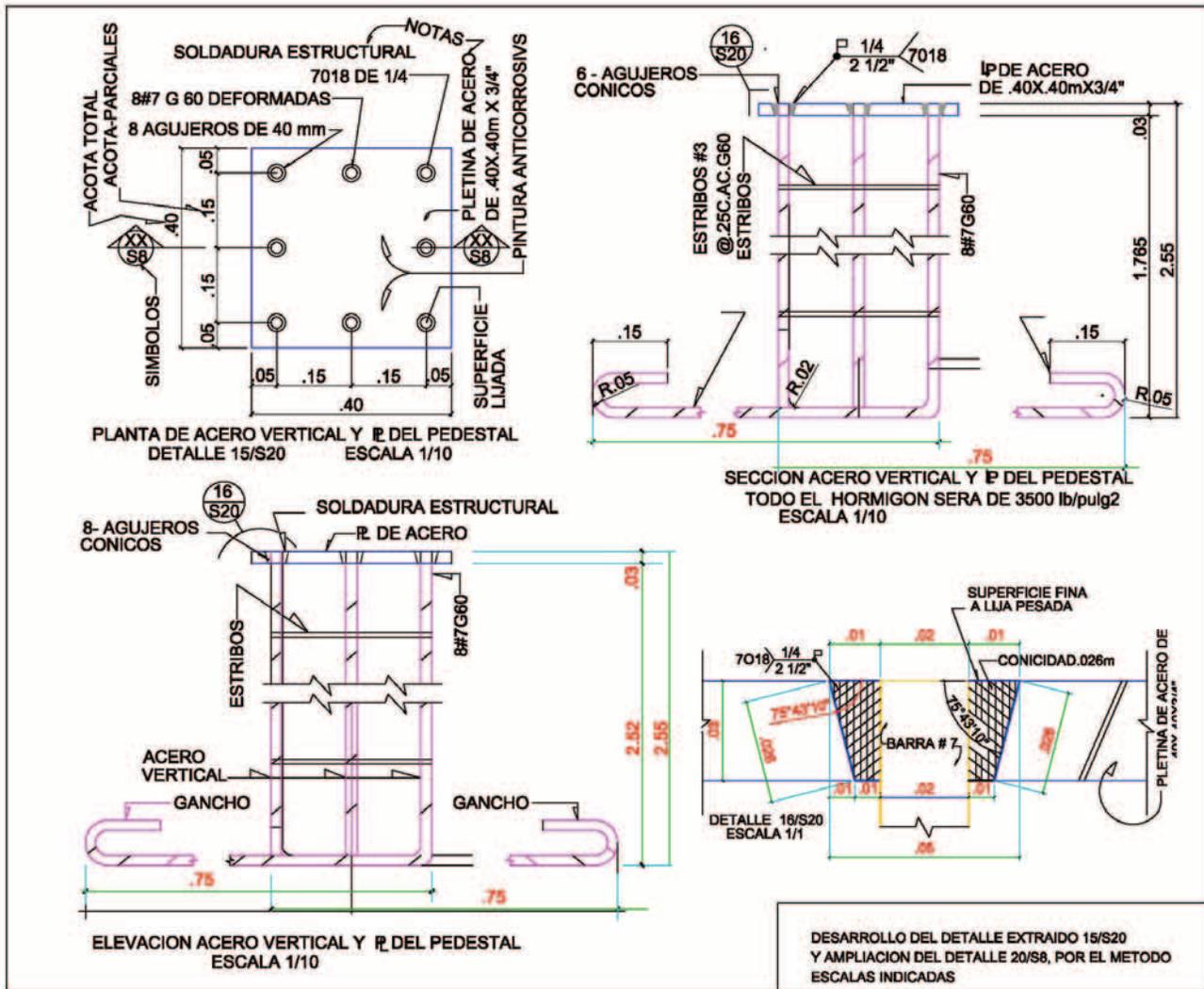


Figura 6. En esta figura se completa el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva al desarrollarse el detalle 15/S20 y aclarándose con el detalle de ampliación 20/S8 requisitos técnicos de la conicidad y la soldadura.

La Técnica Constructiva

Radica en dibujar los elementos a construir dándoles órdenes técnicas, las cuales son de carácter volumétrico y constructivo. Las órdenes volumétricas se dan a través de las acotaciones parciales y totales en sus contornos y en su interior, las cuales definen la forma. Las órdenes constructivas se inician con símbolos que indican que en otras hojas se hará una nueva volumetría donde se aplicaran acotaciones parciales y totales. Otra orden constructiva son las notas que señalan las especificaciones, donde muestra calibre, normas, tipo de material y proceso constructivo.

- C. El no seguir el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva acarrea el hecho de que los objetos no se puedan construir exactamente como se diseñaron, porque no contienen la información adecuada sobre su forma tridimensional, la cual hace posible definir su realidad. Este Método de la Tridimensional Repetitiva se basa en un proceso lógico y estructurado que conduce a transferir los pensamientos tridimensionales a una representación sencilla, a través de dibujos entendibles que revelarán las formas de las ideas y pensamientos.

El aporte a los profesionales consiste en que garantiza un Método para el Desarrollo de los Planos, que parte del hecho de mantener en el plano el concepto de la volumetría con toda la información que permite construir las obras tal como fueron concebidas por el diseñador.

La fortaleza de esta propuesta consiste en que es una contribución al ejercicio profesional de la ingeniería y contempla el saber científico en todas sus etapas, porque se muestra el saber de las ciencias en cada una de las hojas que integran el plano de construcción, lo cual nos permite plasmar en el terreno de la realidad un concepto que nace en la mente del diseñador.

Las debilidades son:

- La intervención de la política para la selección de profesionales que ejecutan los planos.
- Se necesita una amplia divulgación por las autoridades para que se cumpla el método descrito.
- Conseguir a través de Ingeniería Municipal la aplicación del método en la aprobación del plano.

Para futuras investigaciones se recomienda elaborar un prototipo de contenido que establezca un seguimiento a la ejecución del plano, que mantenga vigente las etapas del método y que determine el símbolo final que indique la terminación del proceso tridimensional, que controle las acotaciones de manera tal que definan la forma y sus características y que establezca la concordancia que debe existir entre el libro de las especificaciones y las notas en los dibujos técnicos del plano.

6. AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a los profesionales de las diferentes ramas de la ingeniería y la arquitectura en los Ministerios de Vivienda y Ordenamiento Territorial y en el Ministerio de Obras Públicas, que nos permitieron hacer nuestra labor investigativa tanto de trabajo en oficina, como de trabajo en campo y lograr con ello, recopilar información indispensable para hacer nuestra propuesta metodológica. De igual manera, se hace un reconocimiento especial a todos los profesionales de la Ingeniería y Arquitectura que con sus aportes han enriquecido y permitido validar el Método de la Tridimensionalidad Repetitiva para el Desarrollo de los Planos de Construcción y que han mostrado la necesidad de que exista un instrumento que guíe el desarrollo de los planos, por todos los motivos que han sido evidentes en esta investigación.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ali S., Alnuaimi; Ramzi A., Taha; Mohamed, Al Mohsin and Ali S., Al-Harhi. Causes, Effects, Benefits, and Remedies of Change Orders on Public Construction Projects in Oman. *Journal of construction Engineering and Management*. ASCE/Mayo 2010.
- [2] Dygdon, John Thomas. *Dibujo Técnico*. 8ª Edición. Alfa Omega. 2009.
- [3] Ellis, Ralph D. and Thomas, H. Randolph. (2003) *The Root Causes of Delays in Highway Construction*, 82nd Annual meeting of the transportation research board, Washington DC.
- [4] Nirmal Kumar Acharya†, Young Dai Lee, Soo Yong Kim, Jong Chool Lee and Chae Soo Kim. Korea. *Analysis of Construction Delay Factor: A Korean Perspective*. Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2006. Bangkok, Thailand
- [5] Pellicer Armiñana, Eugenio; Sanz Benloch, Amalia; Catalá Alis, Joaquín. *El Proceso Proyecto – Construcción*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. 2004.
- [6] *Plan Estratégico de Gobierno de la República de Panamá*. 2010-2014.
- [7] Profesor Titular Flórez Taboada, Hernando. *Apuntes Pedagógicos sobre Metodología para el Desarrollo de los Planos de Construcción*. 1984.
- [8] Rodríguez Jaramillo, Gisela M. 2011. *Propuesta de una Metodología Estructurada para la Ejecución de Proyectos de Construcción Públicos*. Universidad Tecnológica de Panamá. *Revista de I+D Tecnológico*. Volumen 7, No. 1. Edición Semestral. 2011.
- [9] Sesiones técnicas de trabajo con el Arquitecto Hernando Flórez Taboada referente a la buena práctica en la Ejecución de Veinte Obras en el Sector Público. 2008, 2009, 2010 y 2011.
- [10] Steve M., Slavy. *Geometría Descriptiva Tridimensional*. Editorial: Publicaciones Cultural S.A. Lago Mayor 1986. México 13. D.F. 1968.
- [11] Yin, Robert K. *Case Study Research. Design and Methods*. Second Edition. 1994.

Desarrollo del Tiempo Universal Coordinado en Panamá

Raúl F. Solís B.

*Centro Nacional de Metrología de Panamá AIP.
Laboratorio de Tiempo y Frecuencia
rsolis@cenamep.org.pa*

Resumen- *La metrología es la ciencia de las mediciones que intervienen directamente en la calidad y competencia de los productos y servicios y, por ello, como parte de una estrategia de lograr el reconocimiento internacional desde el punto de vista metroológico, el Centro Nacional de Metrología de Panamá, adquirió dos patrones atómicos de tiempo de Cesio 133, lo cuales se han comparado con otros relojes atómicos de igual o mejor nivel mediante la red de posicionamiento global desde el año 2003. La realización local del tiempo universal coordinado es comparada cada segundo por los 365 días del año de manera ininterrumpida con los más de 70 laboratorios de tiempo y frecuencia alrededor del mundo, y es coordinada por el Buró Internacional de Pesas y Medidas, y de manera regional el Sistema Interamericano de Metrología.*

El objetivo de este trabajo es el establecimiento de una referencia primaria de tiempo a nivel nacional con la cual se establecieron las bases para el desarrollo de investigaciones y servicios de calibración que requiriesen patrones de alto nivel para una economía de servicios. Los resultados muestran como en los últimos años se ha logrado reconocimiento tanto a nivel nacional como a nivel internacional y se ha comenzado a generar un marco regulatorio de las actividades basadas en el uso de la hora universal coordinada. Finalmente este artículo muestra el trabajo continuo que se ha realizado en los últimos años en el desarrollo del laboratorio y el cómo nos ha permitido establecer las bases para desarrollar nuevas áreas de trabajo y cooperación científica, industrial y legal tanto nacional como internacional.

Palabras Claves - *CENAMEP, frecuencia, metrología, tiempo, reloj atómico, UTC (CNMP), Tiempo Universal Coordinado.*

Abstract - *Metrology is the science of measurement that is directly involved in the quality and competence of the products and services and for this as a part of the strategy to achieve international recognition in the metrological field, the National Metrology Center of Panama, acquired two Cesium 133 atomic time standards, which have been compared with another atomic clocks of the same or better level through the global positioning system since 2003. The local realization of the Universal Time Coordinated is compared every second for the 365 days in the year without interruption with the another 70 laboratories of time and frequency around the world, and is coordinated by the International Bureau of Weights and Measures, and the regionally Inter-American Metrology System.*

The objective of this work is the establishment of a national primary time reference which establish the basis for research and the development of calibration services that required high-level standards for an economy based in services. The results show that

in recent years has been obtaining national and international recognition and has begun to create a regulatory framework for the activities that use the universal time coordinated. Finally, this paper shows the continuing work that has been made in recent years in the developing of the laboratory and how has allowed us to establish the basis for new areas of work and cooperation in the scientific, industrial and law area, both nationally and internationally.

Key words - *Atomic clock, CENAMEP, frequency, metrology, time, UTC(CNMP), Universal Time Coordinated.*

Tipo de Artículo: *Original*

Fecha de Recepción: *19 de agosto de 2011*

Fecha de Aceptación: *12 de enero de 2012*

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1970, llegó la era atómica del tiempo con la definición del segundo en base a la transición atómica del átomo de Cesio 133 [1]. Con esta nueva definición del segundo, se establece el Tiempo Universal Coordinado o UTC, el cual es coordinado por el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) mediante la implementación de una escala de tiempo ponderada sostenida por los cerca de 70 laboratorios de tiempo y frecuencia alrededor del mundo (En la Figura 1 se muestran las localizaciones de los laboratorios participantes), y los datos de las comparaciones son obtenidos mediante el método de comparación por vía vista común (Figura 2) de las señales de tiempo de los distintos laboratorios participantes suscritos al Acuerdo de Reconocimiento Mutuo [2] los cuales se denominan como UTC(k), y reportando los datos de la comparación en el Día Juliano Modificado (MJD) terminado en 4 ó 9.

En Panamá, la realización y el mantenimiento del tiempo atómico se introdujo en septiembre del año 2003, bajo la administración de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, la cual pensando que la introducción de una referencia de tiempo de alta estabilidad sería de fundamental importancia estratégica para un país basado en los servicios, adquirió dos patrones atómicos de Cesio 133 de bajo desempeño.

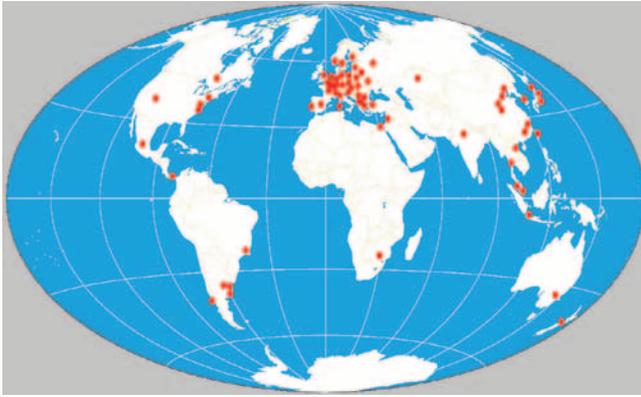


Figura 1. Ubicación de los relojes participantes en el desarrollo de UTC.

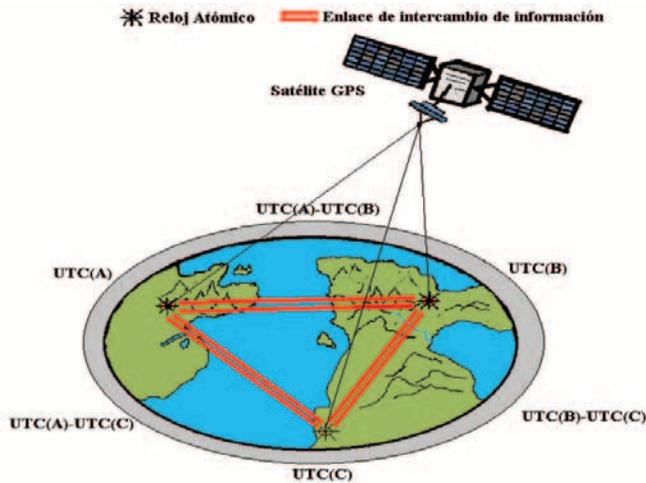


Figura 2. Esquema de la comparación por vista común.

En octubre de 2003, se designó a unos de los dos relojes atómicos como el reloj maestro y el segundo reloj como el testigo, y se procedió a enviar datos a la sección de tiempo del BIPM sobre las comparaciones realizadas [3] mediante el Time Transfer System versión 2 (TTS-2). Por la falta de experiencia en el manejo de relojes atómicos, estas comparaciones se basaron en mantener la estabilidad del reloj maestro y no su exactitud ya que el resultado de este tipo de comparaciones se obtenían una vez al mes mediante la Circular T, y esto requería de un trabajo de predicción del comportamiento de la señal bastante avanzado, por lo que se acumularon hasta noviembre de 2006 aproximadamente 6 000 ns (Figura 3).

Por el hecho de tener comparaciones con el BIPM (las cuales solo se puede participar con patrones atómicos de Cesio o de mejor estabilidad), y además de ser el primer laboratorio del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) en el área de tiempo y frecuencia en

publicar sus capacidades de medición y calibración [4], hizo que Canadá, Estados Unidos y México, donaran a Panamá un nuevo sistema receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global por sus siglas en inglés) multi-canal, lo que resultó en que fuimos el cuarto país en incorporarse al proyecto de un nuevo sistema de comparaciones por vista común con procesamiento de datos en tiempo real, que permitiría sincronizar los patrones de tiempo y frecuencia de todo el continente americano [5], sin importar su naturaleza (pudiendo incorporar patrones atómicos de rubidio) dentro del proyecto llamado SIM Time and Frequency Network (SIMTFN) [6].

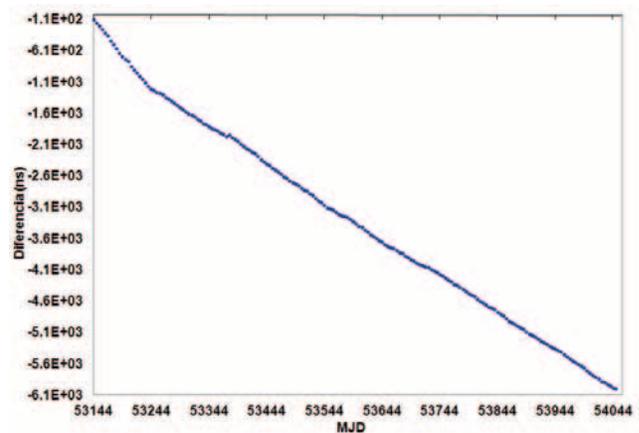


Figura 3. Comportamiento entre las fechas 52914 y 54049.

Con este nuevo sistema, se podía obtener la diferencia de tiempo entre nuestro reloj maestro con los laboratorios de la red con en tan solo 10 minutos, a diferencia del mes que había que esperar para obtener los resultados en la Circular T. Esto incorporó la ventaja de que se pueda conocer en corto plazo la estabilidad y exactitud, lo que permite realizar correcciones en la frecuencia del reloj maestro mejorando los niveles de exactitud, pero llegando a sacrificar la estabilidad si la corrección es muy grande o se realizan en repetidas ocasiones en cortos plazos de tiempo.

Al poseer los dos sistemas de comparaciones y un historial de mediciones equivalente entre ambos sistemas [7], se pudo llegar al empleo de lo mejor de ambos sistemas de comparaciones. Utilizando el TTS-2 se realizan comparaciones con los laboratorios alrededor del mundo, con lo que se obtienen mejores lecturas de estabilidad a largo plazo, y al utilizar el SIMTFN se puede seguir el comportamiento del reloj maestro para

mejorar los niveles de exactitud a corto plazo usando la metodología de una red de comparación redundante.

Esto mejora la participación de los laboratorios latinoamericanos que no tienen mucha experiencia en el área del mantenimiento del tiempo [8] de manera pública o civil. En noviembre de 2006 se procedería a realizar la primera corrección en la frecuencia del reloj maestro para lograr reducir la diferencia y cumplir con lo recomendado por el BIPM de mantener una diferencia de tiempo menor a ± 100 ns [9].

Gracias al trabajo técnico desarrollado por el laboratorio, se logró obtener la confianza de la capacidad en el desarrollo de la hora, por lo que el Ministerio de Comercio e Industrias declaró a los relojes atómicos como los Patrones Nacionales de Tiempo y Frecuencia [10]. Con la base legal en que CENAMEP poseía los patrones de tiempo y frecuencia de mayor jerarquía en el país, la Autoridad Nacional para la Innovación Gubernamental establecía que la hora sostenida por los relojes sería la Hora Oficial para el Gobierno Nacional [11].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la definición local del segundo, es necesario contar con un oscilador de Cesio 133 para que se cumpla la definición teórica y un sistema de recepción GPS para realizar comparaciones por vista común para comparar la definición local del segundo. Como elementos auxiliares se requieren cables caracterizados, distribuidores de frecuencia y de tiempo, sistemas de acondicionamiento de aire, computadora para comunicarse con los servidores de datos fuera del país y un buen respaldo energético para los patrones de tiempo. Los equipos que posee el CENAMEP para realizar y mantener el segundo de manera local son los siguientes:

- **Patrón Atómico de Tiempo:** Son dos relojes atómicos de Cesio 133 de bajo desempeño, cuyo tubo tiene una vida útil no menor a 10 años, según lo declarado por el fabricante. Su exactitud inicial es de $\pm 1E-12$ Hz/Hz y tiene un ruido piso en 5 días de 5E-14Hz/Hz. Estos son realmente patrones duales ya que poseen una referencia de tiempo en la señal de 1 Pulso Por Segundo (PPS) y una referencia de frecuencia de 10 MHz.
- **TTS-2:** Sistema de recepción GPS de 8 canales, que compara la señal de 1 PPS proveniente del reloj maestro con la señal de 1 PPS que proviene de cada

satélite visto, y los datos los guarda bajo el formato establecido por el BIPM. Los datos se extraen manualmente cada 7 días a partir de cada lunes a las 0 horas UTC y son enviados antes de tres días al servidor en Francia. Su resolución es de 0,1 ns.

- **SIMTFN:** Sistema de recepción GPS de 8 canales, que compara la señal de 1 PPS proveniente del reloj maestro con la señal de 1 PPS que proviene de cada satélite visto, y los datos los guarda bajo el formato establecido el grupo de tiempo y frecuencia del Sistema Interamericano de metrología. Los datos se extraen automáticamente cada 10 minutos y posteriormente son enviados a servidores en Estados Unidos, México y Canadá. Su resolución es de 0,01 ns.
- **Distribuidor de frecuencia:** sistema que toma la señal de 10 MHz provenientes del patrón atómico y multiplica las salidas mediante amplificadores de muy bajo ruido y poca distorsión. Con ello se protege la salida del patrón frente a corto circuitos y se obtienen más salidas de 10 MHz para conectarlas a otros equipos que requieran esta señal de frecuencia.
- **Distribuidor de tiempo:** sistema que toma la señal de 1 PPS provenientes del patrón atómico y multiplica las salidas mediante amplificadores de muy bajo ruido y poca distorsión. Con ello se protege la salida del patrón frente a corto circuitos y se obtienen más salidas de 1 PPS para conectarlas a otros equipos que requieran esta señal de tiempo.
- **Respaldo energético:** Es un arreglo de baterías de bajo mantenimiento y un sistema de alimentación ininterrumpida con la tecnología de doble conversión que filtra la señal AC de la línea. Entre las baterías y el respaldo se tienen cerca de 3 días para los patrones atómicos.
- **Cables:** tanto los cables para conectar los receptores con las antenas, como los cables que se emplean para distribuir las señales de 10 MHz y de 1 PPS están caracterizados en su retraso para poder realizar las correcciones pertinentes. Se utilizan actualmente los cables RG-58C y el LM-600.
- **Computadora:** es una computadora conectada a internet en la cual se guardan los datos provenientes del TTS-2. También tiene un cliente de servidor de red para enviar los datos a Francia. Primero se conectaron los sistemas de respaldo y se verificó su funcionamiento. Después se procedió a

conectar las baterías a los relojes atómicos y a los sistemas de alimentación ininterrumpida. También se conectaron a los sistemas de alimentación ininterrumpida al TTS-2 y a los distribuidores. A continuación se procedió a conectar la señal de 1 PPS y de 10 MHz provenientes de los distribuidores a l TTS-2 y después se procedió a conectar la señal de 1 PPS y de 10 MHz provenientes del reloj maestro a los distribuidores de tiempo y de frecuencia. Una vez todo conectado se procedió a encender los equipos y ver como se comportaba el sistema conectado en todo su conjunto.

Antes de iniciar los procesos de comparaciones, se procedió a establecer las coordenadas geográficas mediante un sistema de posicionamiento geodésico por GPS (con una incertidumbre relativa de $\pm 0,2$ m en mediciones realizadas por 48 horas). Estas fueron las coordenadas resultantes:

- Latitud: $9^{\circ} 0' 13,3087''$ Norte.
- Longitud: $280^{\circ} 24' 56,4097''$ Este.
- Altura: 36,09 m.

Una vez establecidas las coordenadas geográficas e instalando las antenas, se procedió a configurar los receptores con respecto a las coordenadas obtenidas (un error de 1 metro representa un error de 3,34 ns en la medición teórica en el vacío), se procedió a corregir los datos de la medición con respecto a la calibración de los sistemas, del cual el TTS-2 [12] es el principal mecanismo para obtener trazabilidad y el SIMTFN entraría como una fuente secundaria para la trazabilidad. Los valores de la configuración están mostrados según la Tabla 1:

Tabla 1. Fuentes de retraso obtenidas de la calibración para el sistema TTS-2 y el SIMTFN.

Fuente	TTS-2	SIMTFN
Antena activa y su cable	205,1 ns	39,2 ns
Cable de referencia	27,8 ns	27,8 ns
Procesamiento	9,3 ns	7,5 ns

Después de configurar el TTS-2 se procedió a sincronizar al reloj maestro con la señal de tiempo proveniente de un generador de tiempo y frecuencia disciplinado por GPS, cuya incertidumbre total (incluyendo antena, cables y procesamiento de la señal) era de ± 110 ns. Una vez sincronizado el reloj maestro se procedió con su señal de 1 PPS a sincronizar el reloj testigo.

Cuando ya se tenían el reloj maestro y el reloj testigo disciplinado, se procedió a empezar a realizar las comparaciones mediante el TTS-2. Los datos de las comparaciones con los satélites GPS se obtienen cada 7 días, y cuyos datos son analizados antes de enviarlos al servidor de archivos de la oficina de tiempo en el BIPM. De esta manera Panamá obtenía trazabilidad en tiempo y frecuencia para la realización primaria del segundo de manera local, con una diferencia de tiempo con respecto a UTC de manera acumulativa cercana a -10 ns/día con una incertidumbre de tiempo de 16,4 ns con un intervalo de confianza al 95%. Con esto se reconocía oficialmente la realización de UTC(CNMP) y su contribución con UTC y el Tiempo Atómico Internacional (TAI) frente al BIPM por parte de la República de Panamá.

Al haber establecido las capacidades de medición y calibración del laboratorio de tiempo y frecuencia frente al BIPM, se procedió a utilizar el sistema SIMTFN para establecer la forma en que se realizaban las correcciones directamente en la frecuencia del reloj maestro, que permite correcciones de frecuencia con pasos de $\pm 6,3E-15$ Hz/Hz. Antes de realizar la corrección se sincroniza nuevamente el reloj testigo para poder rescatar la diferencia de tiempo en caso de algún contratiempo. Esta corrección se estableció la primera vez para disminuir la diferencia de 5736,65 ns a un valor aproximado a 0 ns en un periodo de 30 días (Figura 4). El valor utilizado para realizar dicha corrección se calculó utilizando el desvío fraccional de frecuencia mostrado en la siguiente relación:

$$\frac{\Delta f}{f} = - \frac{\Delta t}{t} \quad (1)$$

$\frac{\Delta f}{f}$ Es el desvío fraccional de la frecuencia del oscilador.

$\frac{\Delta t}{t}$ Es el desvío fraccional del tiempo o la fase del oscilador.

El resultado del valor de la pendiente fue de 197,5 ns/día estableciéndose en el MJD 54052. En el MJD 54084 nuevamente se utilizó (1) para estimar el desvío de la frecuencia del oscilador atómico, y se le ingresó una pendiente de -6,7

ns/día para estabilizar diferencia de tiempo que mantenía y así estar dentro de la recomendación para el mantenimiento de UTC (Figura 4). Todas estas correcciones se le informaron a la oficina de tiempo del BIPM como parte de la responsabilidad del laboratorio frente al mantenimiento de las escalas de tiempo UTC y el TAI.

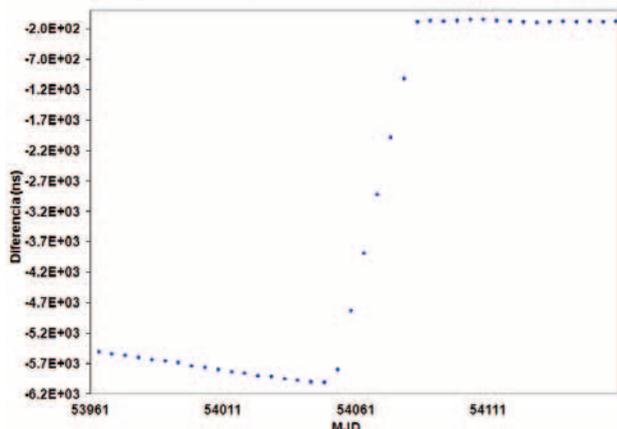


Figura 4. Comportamiento entre las fechas 53961 y 54160.

Esta variación de frecuencia hizo que la estabilidad del reloj maestro frente al BIPM cayera (la predictibilidad del reloj desapareció). Esto es porque el algoritmo que calcula UTC es afectado por variaciones de tiempo tan grandes por lo que se le bajaba el peso para evitar causar alteraciones en la estimación de UTC.

Con la diferencia de tiempo llevada a niveles aceptables, y después de corregir el error sistemático se procedió a establecer nuevamente la forma que se establecería las correcciones, las cuales serían llevadas para lograr la mayor relación entre la exactitud y la estabilidad del patrón para sostener la realización de UTC(CNMP). Estas correcciones se realizarían con la pendiente que mantuviera la diferencia de tiempo en un periodo de 20 días, cuando la diferencia de tiempo alcanzara los ± 90 ns con respecto a UTC.

En el momento que se llegara a la diferencia de tiempo establecida, se procedería a realizar la corrección siempre reportando a la oficina de tiempo sobre cualquier cambio, y siempre tratando que el valor no sobrepase el valor de $\pm 3,46$ ns/día (variación de frecuencia cercana a $\pm 4E-14$ Hz/Hz), empleando (1). Con la implementación de este mecanismo se pretende solo realizar correcciones

cada cuatro a cinco meses y así lograr disminuir el nivel de incertidumbre de la realización de UTC(CNMP).

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x)^2 \quad (2)$$

Donde:

- $\sigma_y^2(\tau)$: representa la varianza de Allan de la fase de la señal analizada en el tiempo de observación τ .
- N : representa el número de muestras utilizadas
- m : representa el factor de integración en el tiempo
- x_i : representa la muestra de fase en la i -ésima posición

$$TVAR^2(\tau) = \frac{\tau^2}{3} MOD\sigma_x^2(\tau) \quad (3)$$

Donde:

- $TVAR^2(\tau)$: representa la varianza de tiempo de la fase de la señal analizada en el tiempo de observación τ .
- $MOD\sigma_y^2(\tau)$: representa la varianza de Allan Modificada de la fase de la señal analizada en el tiempo de observación τ .

Como la varianza de Allan y la varianza de Allan modificada difieren solamente por el promedio de los puntos m adyacentes, esto hace que cuando $m=1$ la varianza modificada de Allan coincida con la varianza de Allan [13]. La evaluación de los resultados se realiza mediante (2), la cual brinda información sobre la estabilidad del reloj maestro, y (3) nos permite obtener la predictibilidad de UTC(CNMP).

Paralelamente a estas acciones, también se lleva a cabo un programa de verificaciones y registros mensuales de todos los componentes que actúan en la realización de UTC(CNMP) como es el caso de comportamiento electrónico de los patrones, receptores GPS, distribuidores de señales, cables y conectores, programas de captura y análisis de los datos y también el respaldo de

energía de los equipos, ya que una interrupción (caídas de voltajes, cables rotos, falsos contactos, pérdida de los datos de medición, etc.) en la continuidad de los datos, afecta la estabilidad de su desarrollo. Al realizar todas estas tareas, buscamos mejorar la estabilidad de ambos patrones atómicos para incrementar nuestra capacidad de predecir su comportamiento a largo plazo y la exactitud sería manejada por el corrector de fase.

3. RESULTADOS

Al aplicar las correcciones, se pudo apreciar mejoras en el desempeño del reloj maestro, y por consiguiente en la realización de UTC(CNMP). También se pudo lograr una disminución notable en la diferencia de tiempo $|\text{UTC}-\text{UTC}(\text{CNMP})|$, lo que permitió determinar nuevas fuentes de ruido en la señal (variaciones en la temperatura y humedad del laboratorio, posicionamiento de la antena GPS, interferencias de equipos de medición dentro del mismo gabinete que los equipos de generación de señales) las cuales se procedieron a minimizar (se instaló un nuevo sistema de aire acondicionado y se adquirió un nuevo gabinete para los equipos de medición y otro para los de generación).

Tabla 2. Estado de la diferencia de tiempo y el desvío de frecuencia.

Año	Diferencia (ns)	Valor (Hz/Hz)
2006	-4795,91	-7,0E-14
2007	84,32	1,8E-14
2008	206,87	1,3E-14
2009	-20,47	-5,9E-15
2010	-15,43	-1,2E-14

Después de realizar las correcciones de la señal y las correcciones en la infraestructura, se pudo apreciar que la exactitud de la señal y su estabilidad a corto plazo mejoraban, aunque su estabilidad a largo plazo quedó comprometida con las correcciones que se le realicen al reloj maestro. Los resultados de estos análisis se muestran en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, las cuales están referenciadas a la misma fecha en un periodo de 200 días hacia atrás a partir de la fecha señalada (29 de junio).

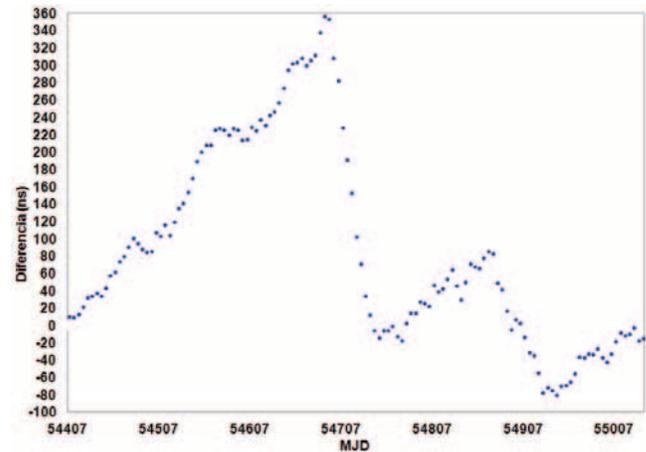


Figura 5. Comportamiento entre las fechas 54407 y 55040.

Tabla 3. Estabilidad de la señal de tiempo.

Tau	Desviación de Tiempo (ns)				
	2006	2007	2008	2009	2010
600	5,6	1,3	0,7	0,8	0,9
1200	4,2	1,1	0,8	0,8	0,9
2400	3,3	1,1	1,0	0,9	1,0
4800	3,1	1,4	1,3	1,3	1,4
9600	3,4	1,9	1,9	1,9	2,1
19200	4,0	2,6	2,4	2,4	3,0
38400	5,1	3,5	2,9	3,0	3,8
76800	4,4	2,1	2,2	2,3	2,4
153600	5,4	2,9	2,7	2,9	2,7
307200	5,7	4,3	3,4	4,2	3,5
614400	6,8	4,1	4,4	6,4	4,2
1228800	5,1	8,2	6,4	10,3	7,1
2457600	7,8	9,0	14,2	16,3	12,5

Tabla 4. Estabilidad de la frecuencia

Tau	Desviación de Allan (1E-12 Hz/Hz)				
	2006	2007	2008	2009	2010
600	16	3,7	2,5	2,3	2,7
1200	8,5	2,2	1,5	1,5	1,6
2400	4,4	1,2	9,9	9,7	1,0
4800	2,3	0,78	0,68	0,67	0,72
9600	1,3	0,51	0,49	0,49	0,53
19200	0,72	0,34	0,32	0,32	0,37
38400	0,44	0,24	0,21	0,21	0,26
76800	0,20	0,091	0,091	0,094	0,098
153600	0,12	0,059	0,057	0,059	0,061
307200	0,069	0,043	0,036	0,039	0,041
614400	0,038	0,021	0,019	0,025	0,019
1228800	0,017	0,015	0,013	0,018	0,013
2457600	0,0089	0,0098	0,010	0,012	0,0095

En la Figura 6 se puede apreciar el desempeño de UTC(CNMP) desde el inicio de sus comparaciones el 2 de octubre de 2003 hasta el 28 de mayo de 2011 los cuales suman 2795 días de trabajo continuo en el laboratorio.

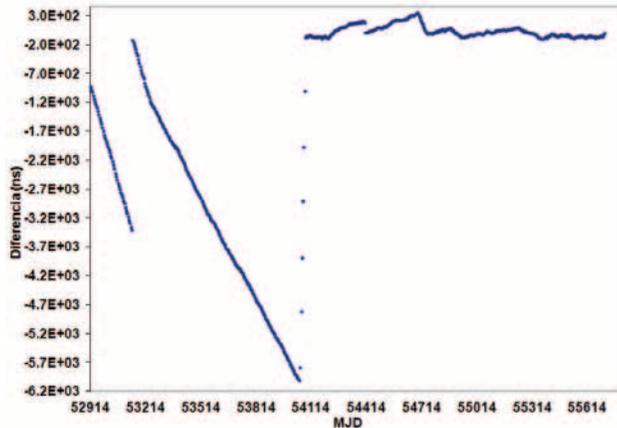


Figura 6. Comportamiento entre las fechas 52914 y 55709.

Además del trabajo del laboratorio de mantener el UTC(CNMP) dentro de lo recomendado, se debe implementar el segundo intercalar, el cual es un instrumento utilizado para hacer acorde la hora UTC con la hora solar, mejor conocida como el Greenwich Mean Time. Este instrumento consiste en la adición o sustracción de un segundo a la cuenta final de UTC (minutos de 61 ó 59 segundos respectivamente) ocurridos en el día 30 de junio o el día 31 de diciembre a las 0 horas UTC, y es la responsabilidad del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) en conjunto con el BIPM mediante la publicaciones de notas y boletines (Boletín C), el dictaminar en el momento que tenga que ser utilizada. Para hacer uniforme el uso del segundo intercalar, se debe aplicar a las 00:00:00 horas UTC, de los días indicados por el IERS y es empleada de la siguiente manera:

- 31 de diciembre del 2008, 23 h 59 m 59 s
- 31 de diciembre del 2008, 23 h 59 m 60 s
- 01 de enero del 2009, 00 h 00 m 00 s

En Panamá, que está ubicado en la zona horaria de UTC-5, el segundo intercalar se aplicaría a las 19:00:00 del día designado para la ocurrencia del evento, y es la responsabilidad del CENAMEP la generación y disseminación de la unidad de tiempo generada por los relojes. Debido a que los equipos y sistemas que dependen de la hora no pueden

ser modificados automáticamente por lo impredecible que puede llegar a ser el segundo intercalar (por eso hay satélites GPS que tienen hasta 15 segundos de atraso), la corrección se realiza horas antes de lo estipulado de manera manual, para que la población no se percate de lo sucedido y pueda realizar sus actividades sin inconvenientes.

4. DISCUSIÓN

4.1. Son necesarios altos niveles de conocimiento en la realización y el mantenimiento de la hora

A pesar de que el laboratorio se considera que está sobre nivel del mar y sin demasiadas fuentes de perturbaciones en la gravedad (no hay grandes macizos montañosos cerca) las variaciones de temperatura y humedad afectan el desempeño de las mediciones a corto y largo plazo, tanto de los instrumentos dentro del laboratorio como de los que están expuestos a la intemperie. También las vibraciones mecánicas llegan a afectar la estabilidad (internamente los relojes atómicos mantienen cuarzos disciplinados en su interior) de la señal por lo que el control del acceso del reloj maestro siempre pudiese estar restringido a personal competente en su manejo y en cantidades de veces que se pueda acceder. En la Figura 7 se puede apreciar la vista actual del laboratorio de Tiempo y Frecuencia.



Figura 7. Vista del laboratorio.

Hasta que se comenzaron a realizar estancias profesionales de varias semanas en laboratorios de primer nivel, se pudo adquirir el conocimiento necesario para realizar el manejo adecuado de los relojes y los equipos que intervienen en la realización de UTC(CNMP). Este conocimiento adquirido permitió elevar el nivel del laboratorio mejorando el nivel y la profundidad necesaria que

requiere el mantenimiento de patrones atómicos y de los servicios que dependen de ellos. Esto quedó en evidencia cuando una de las señales de frecuencia de uno de los patrones comenzó a mostrar anomalías, lo que permitió tomar las acciones pertinentes para mantener la realización de UTC(CNMP) al cambiar de reloj maestro sin que existiesen problemas frente al BIPM.

El constante entrenamiento y comunicación con los pares en la región SIM [14], así como con las distintas regiones (incluyendo al BIPM) es necesaria para perfeccionar los conocimientos y generar nuevas soluciones a los problemas que se presentan, ya que por ser realizaciones primarias de la unidad, el nivel de conocimientos requeridos para el mantenimiento del tiempo es elevado, por lo que el estudio continuo es recomendado y si es posible, adquirir nuevos conocimientos más profundos en estudios doctorales.

4.2. Supervisión continua es necesaria

Por la naturaleza de las mediciones realizadas (cada segundo las 24 horas del día, los 365 días del año) es necesaria una completa supervisión de todos los componentes involucrados. La automatización de todos los procesos debe darse para disminuir la incidencia de errores humanos, y darle una autonomía plena a los sistemas para así optimizar su desempeño. Estas automatizaciones son realizadas de manera progresiva, modular y siempre validándolas, de tal manera que se complementen todos los elementos en un completo sistema de realización, supervisión y mantenimiento de manera óptima e integral.

En la actualidad se han desarrollado dos programas para la supervisión y respaldo de los datos de comparación. Uno se encarga de supervisar el estado de operación del sistema TTS-2 (datos recibidos cada 16 minutos, alertas por correo electrónico, comparación de las diferencias de tiempo entre el promedio de señales GPS y la realización UTC(CNMP)) y el otro supervisa el estado operacional del comparador de fase (datos generados cada segundo, estima la diferencia que hay entre cada canal, reportes de funcionamiento por correo electrónico).

Ambos programas están desarrollados para generar los datos necesarios en un formato útil para el establecimiento de un programa que controle automáticamente el corrector de fase en base a la

información suministrada y, así se logre establecer la escala de tiempo local, el TA(CNMP), la cual mejoraría el desempeño de UTC(CNMP) al hacerla menos vulnerable a los fallos y variaciones del sistema por vista común (que a pesar de su amplia utilización para fines comerciales es una tecnología de naturaleza militar y que es susceptible a variaciones espaciales como tormentas solares, basura espacial, variaciones en la ionósfera y contaminación por ruido de bandas de comunicación cercanas).

4.3. Relojes atómicos a óptimo desempeño

Los relojes atómicos de Cesio comerciales, tienen una exactitud declarada por el fabricante de $\pm 1E-12$ Hz/Hz, pero con los cuidados y el mantenimiento realizado en el laboratorio, hemos tenido que su exactitud siempre es menor al valor de $\pm 7E-14$ Hz/Hz y, para asegurarnos que siempre estemos en los niveles más óptimos de estabilidad y exactitud, el desvío fraccional de frecuencia no podrá ser más allá de $\pm 4E-14$ Hz/Hz. Esta mejora en la exactitud y estabilidad se observa en el peso asignado a los relojes por parte del BIPM para estimar UTC, los cuales han pasado de números cercanos a 0,001 hasta valores próximos a 0,230 referenciados a un máximo valor de 1,000.

4.4. La escala de tiempo es el siguiente paso

Por lo visto y analizado, el paso más lógico que se debe implementar para mejorar el desempeño de la realización de UTC(CNMP) son las escalas de tiempo locales. Con ellas se pueden mejorar significativamente los parámetros de estabilidad, exactitud e incertidumbre de UTC(CNMP), ya que el nivel actual de mantenimiento y realización mantiene un piso que no puede ser superado sin excluir al componente humano, y sin el conocimiento de las estabilidades absolutas de cada patrón no se podrá lograr escoger cual realmente tiene mejor estabilidades a corto y largo plazo. Por ello implementando una escala de tiempo, se procederá a generar un reloj atómico virtual, que será sostenido por un algoritmo especializado que lo generará en base a los pesos ponderados de los relojes que en el momento estén en el laboratorio. Esto dará permanencia al UTC(CNMP) sin importar cual reloj atómico sea declarado como reloj maestro.

4.5. Diseminación la hora en Panamá

Con toda esta información recopilada, se han podido desarrollar proyectos paralelos para disemi-

nar la hora, como es el caso del reloj Web, la sincronización mediante el protocolo NTP y el Servidor de Tiempo por Voz (desarrollado en colaboración por el Centro Nacional de Metrología, en México). De estos servicios de diseminación del tiempo se puede apreciar que han tenido un incremento significativo en su utilización ya que desde el año 2009 (cuyo alcance va desde marzo hasta diciembre y siendo el año en que se comenzaron a incorporar los servicios de diseminación de la hora), y comparándolos con los datos obtenidos solamente en el primer semestre de 2010, se ha tenido una evolución muy favorable del uso de estos servicios y que puede traducirse en un mayor impacto del laboratorio de tiempo y frecuencia en la sociedad y, por lo tanto, en la economía del país.

Esto trae como resultado la necesidad de mejorar las capacidades de mediciones y calibraciones del laboratorio de tiempo y frecuencia, mejorando los servicios actuales e incorporando nuevos servicios de calibración y pensando en nuevas maneras de lograr un mejor alcance en la diseminación de la Hora Oficial de Panamá.

5. CONCLUSIÓN

Tras la primera corrección realizada en el año 2006, el laboratorio de tiempo y frecuencia ha logrado mantener el UTC(CNMP) cada vez más dentro de lo recomendado. Estas diferencias estuvieron primero en rangos de ± 400 ns y posteriormente dentro del rango de ± 100 ns. También se logró disminuir la incertidumbre de UTC(CNMP) de 16,4 ns a 12,0 ns (ambas incertidumbres con un factor de cobertura del 95%) y se logró obtener reconocimiento internacional en el área de tiempo y frecuencia, como uno de los países latinoamericanos que más han aportado al desarrollo del nuevo sistema de comparaciones por vista común (por ello fue el cuarto país en ingresar a la red de comparaciones del SIM). Desde la primera corrección se estableció un programa de mantenimiento preventivo que permite disminuir la posibilidad de fallas en el sistema permitiendo que sea más fácil establecer nacional e internacionalmente la confianza que se tiene en los mecanismos de diseminación de la hora.

Cabe destacar que todo este trabajo es de gran

ayuda a la comunidad internacional en la definición del segundo, ya que al mejorar la realización de la definición local y al estar dentro del margen de los ± 100 ns, permite mejorar el desempeño del algoritmo ALGOS [15], el cual estima el UTC. Esto es que al contar con más laboratorios que tengan sistemas estables y predecibles, el algoritmo ALGOS es mucho más robusto. También hay que destacar que existen pocos relojes atómicos con estas características en latitudes cercanas al ecuador (ver Figura 1), lo que permite que funcionen como enlaces para comparaciones cuando los laboratorios en el hemisferio norte y el hemisferio sur no puedan ver los mismos satélites GPS y así evitar que la comparación empleando la diferencias entre relojes con otros laboratorios en latitudes diferentes incremente la incertidumbre de la comparación al tener una sola diferencia entre laboratorios y no una diferencia sucesiva de varios laboratorios.

En el futuro se plantea relocalizar las antenas receptoras (así se disminuiría las inestabilidades debido a los rebotes de las señales y mejorar la visibilidad de los satélites) y la incorporación de un corrector de fase que pueda realizar correcciones por debajo de $1E-15$ Hz/Hz. Además se plantea poner en marcha un comparador de fase por doble mezclado (resolución de $1E-15$ s) con lo que se mejorará la relación entre la exactitud y la estabilidad de UTC(CNMP) al conocer localmente las diferencias de tiempo entre relojes y así lograr disminuir la incertidumbre de la realización local del segundo al conocer otros procesos de ruido sin la necesidad de incorporar las comparaciones por GPS. Con todo esto se pretende una futura creación de una escala de tiempo local conocida como el Tiempo Atómico de Panamá, lo que permitirá abrir la oferta de servicios a la industria, el sector educativo y gubernamental, y al público en general al poseer una definición local que no sea dependiente de las redes de comparación por GPS.

6. AGRADECIMIENTO

Se le agradece al Dr. José Mauricio López R. jefe de la División de Tiempo y Frecuencia del Centro Nacional de Metrología, en México por su

valiosa ayuda para el desarrollo de este documento. También se agradece al Ing. Luis Mojica O. por su ayuda en los trabajos dentro del laboratorio de tiempo y frecuencia del CENAMEP AIP.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bureau International des Poids et Mesures, 13vo Comité General de Pesas y Medidas, Por el cual se acoge la nueva definición del segundo, Resolución 1 del CGPM, 1967/68.
- [2] Bureau International des Poids et Mesures key comparison database, “CCTF-K001.UTC: Calculation of the reference time scale UTC (Coordinated Universal Time)”, *o n g o i n g*, <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/>, [Consulta: 9 de junio de 2011].
- [3] Bureau International des Poids et Mesures, Circular T, monthly report, ISSN 1143-1393, acceso electrónico de la base de datos, <http://www.bipm.org/en/scientific/tfg/>, [Consulta: 9 de junio de 2011].
- [4] M. A. Lombardi, “The SIM Time Network and its Contributions to Metrology in the Americas,” *Metrologist: NCSLI Worldwide News*, pp. 16-21, April 2009.
- [5] J. M. López-Romero, M. A. Lombardi, A. N. Novick, J-S. Boulanger, R. de Carvalho, R. Solis, 2008, “The SIM Network: Improved Time Coordination for North, Central, and South America”, *Proceedings of the 22nd European Frequency and Time Forum (EFTF)*, April 2008.
- [6] M.A. Lombardi, A.N. Novick, J.M. López-Romero, F. Jimenez, J.S. Boulanger, R. Pelletier, R. de Carvalho, R. Solis, C. Donado, H. Sanchez, C.A. Quevedo, G. Pascoe, and D. Perez, “The SIM Time and Frequency Network”, *INFOSIM*, pp. 15-25, December 2008., “The SIM Time and Frequency Network”, *INFOSIM*, pp. 15-25, December 2008.
- [7] Michael A. Lombardi, Andrew N. Novick, J. Mauricio Lopez R, Francisco Jimenez, Eduardo de Carlos Lopez, Jean-Simon Boulanger and Raymond Pelletier, Ricardo J. de Carvalho, Raul Solis, Harold Sanchez, Carlos Andres Quevedo, Gregory Pascoe, Daniel Perez, Eduardo Bances, Leonardo Trigo, Victor Masi, Henry Postigo, Anthony Questelles, Anselm Gittens, “The SIM Time Network”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 116, pp. 557-572 (2011), December 2008.
- [8] Arias E.F., “The Iberoamerican contribution to international time keeping”, *Revista Mexicana de Astronomía. (Ser. Conf.)*, 2006, pp. 21-23.
- [9] Bureau International des Poids et Mesures, Need to improve world-wide time co-ordination to UTC recommendation S5, Report of the Comité Consultatif pour la définition de la second (12th meeting-1993) to the Comité International des Poids et Mesures, 1993.
- [10] Ministerio de Comercio e Industrias, Decreto Ejecutivo No.10 del 26 de enero de 2009 "Por el cual se declaran los patrones nacionales de la República de Panamá", *Gaceta Oficial N° 26219*, Ciudad de Panamá.
- [11] Autoridad Nacional para la Innovación Gubernamental, Resolución No.7 del 31 de mayo de 2010 “Por medio de la cual se adopta la Hora Nacional de Panamá, según definición del CENAMEP AIP, como la Hora Oficial para todas las Entidades del Estado”, *Gaceta Oficial No.26547-A*, Ciudad de Panamá.
- [12] Lewandowski W. y Tisserand L., Determination of the differential time corrections for GPS time equipment located at the OP, TCC, ONBA, IGMA and CNMP, Rapport BIPM-2008/03, France.
- [13] Bregni S., *Synchronization of Digital Telecommunications Networks*, John Wiley & Son, LTD. 2002, pp. 234-236.
- [14] Time and Frequency Metrology Working Group home page, [En línea] <http://tf.nist.gov/sim/> [Consulta: 13 de junio de 2011].
- [15] Arias E.F, Panfilo G. y Petit G., “Timescales at the BIPM”, *Metrologia*, vol. 48, pp. 145-153, Julio 2011.

Quantum tunneling in magnetic tunneling junctions

Evgeni S. Cruz de Gracia

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Panamá
evgeni.cruz@utp.ac.pa

Lucio Strazzabosco Dorneles, Luiz Fernando Schelp

Departamento de Física
Universidad Federal de Santa Maria, Brasil
lsdorneles@gmail.com, fschelp@gmail.com

Sérgio Ribeiro Teixeira, Mario Norberto Baibich

Instituto de Física
Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Brasil
srgbrbrtxr@gmail.com, mbaibich@gmail.com

Abstract - This paper reports on the study of ferromagnetic tunneling junctions produced by magnetron sputtering technique and deposited under oxidation conditions that lead to low potential barrier height, low asymmetrical barrier and quantum tunneling as the charge transport mechanism. The exponential growth of the effective area-resistance product with the effective barrier thickness, and the concentration of the tunnel current in small areas of the junctions, were identified by fitting room temperature I-V curves, for each individual sample, with either Simmons' [J. Appl. Phys. 34, 1793 (1963); 35, 2655 (1964); 34, 2581 (1963)] or Chow's [J. Appl. Phys. 36, 559 (1965)] model. This result suggests the presence of effective tunneling areas or hot spots, leading to a non-uniform current distribution and showing quantum tunneling as the charge transport mechanism. This mechanism, is also, verified through I-T curves.

Keywords - Electronic transport, junction, magnetization, tunneling.

Resumen - Este artículo reporta sobre el estudio de la juntura túnel ferromagnética producida por la técnica de erosión iónica y depositada bajo condiciones de oxidación que llevan a baja altura de la barrera de potencial, baja asimetría de la barrera y el tunelamiento cuántico como mecanismo de transporte electrónico. El crecimiento exponencial del producto de la resistencia por el área efectiva detunelamiento en función del espesor efectivo de la barrera y la concentración de la corriente detunelamiento en pequeñas áreas de la juntura túnel fueron identificados a través del ajuste de las curvas I-V medidas a temperatura ambiente, para cada muestra individual, usando ya sea el modelo de Simmons [J. Appl. Phys. 34, 1793 (1963); 35, 2655 (1964); 34, 2581 (1963)] como el de Chow [J. Appl. Phys. 36, 559 (1965)]. Este resultado

sugiere la presencia de áreas efectivas para tunelamiento o focos caliente que nos lleva a una distribución no uniforme de la corriente y muestra el tunelamiento cuántico como mecanismo de transporte electrónico. Este mecanismo, también es verificado a través de las curvas I-T.

Palabras Claves - Juntura, magnetización, Transporte electrónico, tunelamiento.

Paper Type: Original

Received: May 26, 2011

Accepted: January 12, 2012

1. INTRODUCTION

The field of research in spin engineered materials is very active on account of its richness in physical phenomena and technological applications. Among the spin device arrangements, the magnetic tunneling junction (MTJ) is the simplest structure which consist basically of two magnetic layers (electrodes) separated by a thin insulating layer (barrier). Electrodes can be deposited from partially spin polarized materials (3d ferromagnetic metals such as Fe, Co, Ni or its alloys) or completely spin polarized materials such as half metals (Bi and $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$). The insulating layer can be obtained by plasma oxidation of metallic Al. More recently, MgO has been widely reported. MTJs are incorporated in non-volatile magnetic random access memories (MRAM), racetrack memories, sensor heads and biomedicine applications.

The study of transport phenomena in MTJs, on account of the many possible mechanisms, entails a systematic analysis of experimental data. The most exploited phenomenon in MTJs has been the tunneling conductivity behavior with applied magnetic field. This phenomenon is called tunnel magnetoresistance (TMR) and is very attractive for spin engineered materials. In spite of the tremendous number of works in this particular field, the TMR bias dependence and the tunneling resistance behavior with barrier thickness still remains not well understood.

At the beginning, experiments on quantum tunneling were used to reveal the electronic structure of superconductor materials. Later, by applying a strong magnetic field these experiments were used to study the density of states (DOS) of these materi-

als through measurements of conductivity as a function of the applied bias.

The exponential growth of resistance with increasing barrier thickness is an important criterion to verify quantum tunneling in the junction's electronic transport. This comes among many other criteria, such as tunnel current behavior as a function of temperature (I-T), breakdown voltages and I-V curve shapes [1]. Although the exponential growth of resistance is a necessary condition for quantum tunneling, it is not a sufficient one [2]. It is, also, the most fundamental and difficult to be determined.

This difficulty may be ascribed to the imprecise determination of the actual insulating barrier thickness involved in the tunneling process, which defines the actual current density. Electronic transport measurements, I-V curves in our case, are sensitive to small fractions of the barrier thickness and tunneling area due to the thickness fluctuations occurring during the growth of the films.

Transmission electron microscopy (TEM) and grazing incidence x-ray reflectivity (GIXR) are powerful tools for thin films thickness determination, but the visualized area for TEM may sometimes not be representative of the effective junction area as a whole [3]-[4]. On the other hand, GIXR determines an average thickness over relatively large areas. As a matter of fact, thickness values determined from TEM and GIXR are usually higher than those deduced from electronic transport [5]. Buchanan et al. [6], using GIXR, showed that the insulating barrier thickness is, in all cases, much larger than the thickness of the initial Al metallic layer before oxygen incorporation and twice the value determined from the I-V curves fitting. As a matter of fact, results for insulating thickness extracted from GIXR, TEM and I-V curves should converge only in small and strictly perfect junctions. In this context, fitting of the I-V from model curves is helpful because the current will intrinsically probe the relevant part of the junction.

These differences in thickness suggest that the tunneling current is concentrated in small regions, or hot spots, of the total junction area [7]-[8]. It is therefore reasonable to leave not only the barrier thickness and potential height as free parameters for the fitting procedure of I-V curves, but also the junction area. Dorneles et al. [5] showed a consistent result for the exponential growth of the effective area resistance product (RA_{eff}) as a function of the effective barrier thickness for non-magnetic

tunneling junctions, Al/AlOx/Al, using intrinsic barrier parameters extracted from I-V curves with Simmons's model for symmetric tunnel barrier [9]-[10]. The physical meaning of A_{eff} for hot spots would be the effective area covered by the thinnest barrier, where the tunnel current is supposed to be concentrated.

In this work we take advantage of the fact that the intrinsic barrier parameters (thickness and potential height) are correlated, and that we cannot precisely control the effective area of hot spots. We leave, therefore, the junction area as a free parameter, with barrier thickness and potential barrier height to fit room temperature I-V curves with either Simmons' [9]-[11] or Chow's [12] models for MTJs. An exponential growth of the normalized resistance ($R.A_{\text{eff}}$) with the effective barrier thickness is found for MTJs with low potential barrier height and low asymmetrical barrier showing quantum tunneling as the charge transport mechanism. This mechanism, is also, verified through I-T curves.

2. EXPERIMENTAL

Samples were deposited from pure (99.99%) bulk targets by magnetron sputtering with typical base pressure of 10^{-7} mbar (or lower), using masks to define 200 μm electrodes in the crossed stripe geometry with a $4 \times 10^{-4}\text{cm}^2$ junction area. Material stack was deposited on glass substrate and consist of: Ta(98)/Py(474)/Al(20)Ox(Y)/Co(420)/Cu(100), where Y=30s, 45s and 60s stand for the oxidation time process (T_{ox}), and all the nominal thickness are in \AA . The insulating barrier was deposited by glow discharge assisted oxidation of a thin Al (20 \AA) film in a 100 mbar O₂ atmosphere.

I-V curves were measured using the four point probe method in a DC low noise system. This system allows noise rejection and has input impedance greater than 10 G Ω . A standard resistor in series with the sample is used to detect the sample's current flow. A homemade differential instrumentation amplifier then amplifies the measured voltage.

2.1 Fitting Procedures

The fitting procedure for the I-V curves was done using Simmons' [9]-[11] and Chow's models [12]. Both models evaluate the tunnel current density using the Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) approximation for tunneling probability, differing on the approach to solve the integrals. While the first approximates the arbitrary potential barrier $\phi(x, V)$ to a mean barrier height [], the second approximates any arbitrary potential barrier

by an equivalent rectangular barrier whose height is determined by the root mean square value of the arbitrary potential barrier. This leads to a dependence of bias polarity for asymmetrical tunnel barriers. In order to compare the tunnel current density with the experimental data, an explicit potential barrier shape must be assumed. Also, while fitting the experimental curves with the models, the junction area was left as an additional free parameter to contemplate the presence of hot spots [13]-[15].

For similar electrodes and nonzero temperatures both models assume a rectangular potential barrier, so the tunnel current density is given in practical units for Simmons' and Chow's models by:

$$J(V,T) = \left(\frac{6.2 \times 10^{10}}{t^2} \right) \left(\left(\varphi_0 - \frac{V}{2} \right) \exp \left[-1.025 t \left(\varphi_0 - \frac{V}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \left(\varphi_0 + \frac{V}{2} \right) \times \exp \left[-1.025 t \left(\varphi_0 + \frac{V}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \left(1 + \left[\frac{3 \times 10^{-9} t^2 T^2}{\left(\varphi_0 - \frac{V}{2} \right)} \right] \right), \quad (1)$$

and

$$J(V,T) = \left(\frac{9.2484 \times 10^{10}}{t^2} \right) \left(\varphi_r \exp \left[-1.025 t \left(\varphi_r \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \left(\varphi_r + V \right) \times \exp \left[-1.025 t \left(\varphi_r + V \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \left(1 + \left[\frac{3 \times 10^{-9} t^2 T^2}{\varphi_r} \right] \right), \quad (2)$$

respectively. In the expressions, T stands for temperature and the free parameters are the rectangular potential barrier $\varphi_0(V)$, the insulating barrier thickness t (Å), and the junction area A (cm²) which is related to the measured tunnel current (I) through $J(V,T) = I/A$.

Also, φ_r is the equivalent rectangular barrier height given by:

$$\varphi_r = \frac{4}{9} \left(\left[\varphi_0^{\frac{3}{2}} - \left(\varphi_0 - V \right)^{\frac{3}{2}} \right] \times V^{-1} \right)^2, \quad (3)$$

For dissimilar electrodes and nonzero temperatures, both models assume a trapezoidal potential barrier. In this work we assume the tunnel current density in the reverse direction, that is, electrode 2 (Py) is positively biased with respect to electrode 1

(Co). In practical units for Simmons' and Chow's models the tunnel current is given by:

$$J_{1 \rightarrow 2}(V,T) = \left(\left(\varphi_1 + \varphi_2 - V \right) \exp \left[-0.7244 t \left(\varphi_1 + \varphi_2 - V \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \left(\varphi_1 + \varphi_2 + V \right) \exp \left[-0.7244 t \left(\varphi_1 + \varphi_2 + V \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \left(\frac{3.6537 \times 10^{10}}{t^2} \right) \times \left(1 + \left[\frac{6 \times 10^{-9} t^2 T^2}{\left(\varphi_1 + \varphi_2 - V \right)} \right] \right), \quad (4)$$

and

$$J_{1 \rightarrow 2}(V,T) = \left(\frac{9.2484 \times 10^7}{t^2} \right) \left(\varphi_{r12} \exp \left[-1.025 t \left(\varphi_{r12} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \left(\varphi_{r12} + V \right) \exp \left[-1.025 t \left(\varphi_{r12} + V \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \times \left(1 + \left[\frac{3 \times 10^{-9} t^2 T^2}{\varphi_{r12}} \right] \right), \quad (5)$$

respectively. The parameter φ_{r12} is the effective barrier height and is given by:

$$\varphi_{r12} = \frac{4}{9} \left(\left[\varphi_1^{\frac{3}{2}} - \left(\varphi_2 - V \right)^{\frac{3}{2}} \right] \times \left[\varphi_1 - \varphi_2 + V \right]^{-1} \right)^2, \quad (6)$$

and φ_1 , and φ_2 (free parameters) are the potential barrier heights at the interfaces between the insulating barrier and electrodes 1 and 2, respectively.

It should be noted that all equations are in the intermediate voltage range, that is, $0 \leq V \leq \varphi_0$ for similar electrodes and $0 \leq V \leq \varphi_2$ for dissimilar ones. Also, the potential barrier height has a bias dependence, and when $\varphi_1 = \varphi_2$, all equations reduce to similar electrode equations.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows $I-V$ curves for a Py/Al(20Å)Ox(30s)/Co sample with a linear shape for $V \rightarrow 0$ and a non ohmic behavior above 150 mV. The moderate increases of the low voltage electrical resistance when the temperature decreases, together with the I-V curve shape indicate quantum tunneling as the charge transport mechanism [16]. For $V \rightarrow 0$

the first exponential factor on the right hand side of equation 5, corresponding to the first quadrant of figure 1, has a small contribution, leaving only the linear contribution for the I-V characteristic.

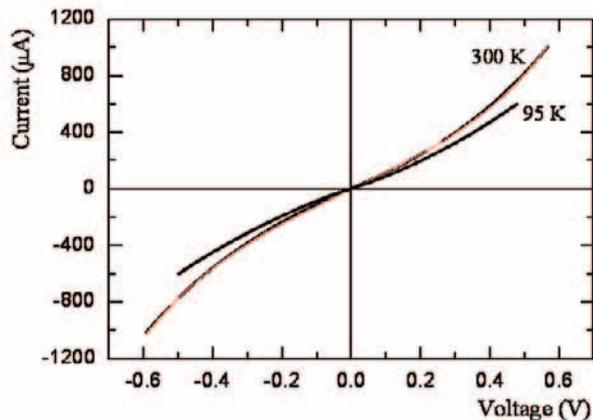


Figure 1. Experimental room temperature I - V curve fitted using Chow's model for asymmetrical tunnel barrier showing experimental curve (points) and simulated one (line). The ferromagnetic electrodes are in the parallel state of magnetization. Some experimental points have been left out intentionally to show the quality of the fit. I - V curve for 95 K shows a resistance increase with a decrease in temperature [17].

For $V \leq \phi_2$ the exponential factor has a larger contribution than the linear one, approximately one order of magnitude higher than the normalized value for $V \rightarrow 0$, leading to a nonlinear behavior, as can also be seen on figure 1. The low-voltage ohmic and the non ohmic behavior of the I - V curves appear at both low and room temperatures, with or without an applied magnetic field [17].

Physically this means that the bias shifts the Fermi level of one electrode with respect to the other, and the effective barrier height decreases, so more electrons can tunnel because there are more empty states available on the second electrode, increasing the transmission coefficient. As a consequence, the barrier resistance decreases. Figure 2 shows a schematic energy diagram illustrating this idea for both regions.

Also, figure 1 shows the room temperature fit using Chow's model for asymmetric tunnel barrier, where the experimental curve can hardly be differentiated from the fitted one. This I - V curve behavior can be reasonably well described also by Simmons' model, on account of the small potential asymmetry. The values obtained by the fitting procedures, for a group of samples, are shown in Table 1. Several aspects of these parameters merit to be addressed.

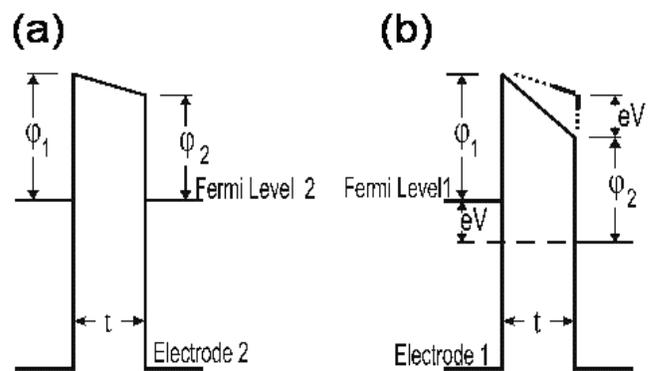


Figure 2.(a) Schematic energy diagram for low voltage region $V \rightarrow 0$ and (b) for intermediate voltage region $0 \leq V \leq \phi_2$. The electrode 2 is positively biased with respect to the electrode 1 [17].

First, under our experimental conditions, neither the barrier height nor its thickness is strongly affected by the oxidation time. We interpret this as a signature of the presence of hot spots. The mean oxide thickness, measured with low angle RX diffraction, increases almost linearly with oxidation time, but this will not be relevant for the tunneling when the current concentrates in small portions of the sample. As can be seen on Table 1, the effective tunneling areas extracted from the fittings represent less than 1% of the junction's geometrical area, a percentage that is near those found by scanning tunneling microscopy (STM). The extracted values for barrier thickness are around 10 Å, smaller than the values usually reported for similar junctions but close to those extracted by fitting of I - V curves measured using STM tips [18].

It should be mentioned here that considering the effective tunneling area in the fitting procedure limits the errors induced by interface roughness, as has been proved by modeling and simulations [14]. If the values obtained for all the samples are put together they compose a consistent picture, showing the expected exponential growth of the normalized resistance (RA_{eff}) versus effective barrier thickness (t_{AlOx}) as depicted in figure 3 for data taken from Table 1 corresponding to Chow's model for symmetric tunnel barrier [17]. Figure 3 suggest that quantum tunneling is indeed the charge transport mechanism. A slight increase of 3 Å in barrier effective thickness is in agreement with two orders of magnitude change for RA_{eff} . This is a robust result and leaves no doubt about quantum tunneling for MTJs, but also suggest the

Table 1. Barrier's intrinsic parameters extracted from fittings of I-V curves using Simmons' [22]-[24] and Chow's models [25]. Barrier effective thickness (t_{AlOx}), barrier potential height (ϕ), effective tunneling area (A_{eff}) and oxidation time (T_{ox}). I-V curves measured at 300 K and ferromagnetic electrodes in the antiparallel state of magnetization [17].

Symmetric Barrier				Asymmetric Barrier		
Simmons		Chow		Chow		
$T_{ox}(s)$	ϕ_0 (eV)	t_{AlOx} (Å)	ϕ_0 (eV)	$A_{eff}(cm^2)$	ϕ_1 (eV)	ϕ_2 (eV)
30	0.726 ± 0.014	8.98 ± 0.08	0.778 ± 0.017	$(2.9 \pm 0.4)E-9$	1.221 ± 0.018	0.985 ± 0.014
30	0.743 ± 0.004	9.39 ± 0.08	0.827 ± 0.006	$(1.9 \pm 0.3)E-9$	1.239 ± 0.015	1.032 ± 0.019
30	0.807 ± 0.023	9.96 ± 0.18	0.914 ± 0.035	$(1.2 \pm 0.4)E-8$	1.231 ± 0.025	0.990 ± 0.011
45	0.819 ± 0.021	10.14 ± 0.20	0.926 ± 0.032	$(2.1 \pm 0.3)E-8$	1.236 ± 0.024	1.002 ± 0.023
45	0.793 ± 0.006	10.53 ± 0.07	0.945 ± 0.013	$(1.1 \pm 0.1)E-8$	1.251 ± 0.013	1.018 ± 0.022
60	0.836 ± 0.024	10.98 ± 0.11	0.990 ± 0.017	$(3.9 \pm 0.4)E-8$	1.269 ± 0.011	1.034 ± 0.017
60	$0.845 \pm 9E-4$	11.71 ± 0.20	1.039 ± 0.007	$(3.5 \pm 0.7)E-8$	1.308 ± 0.029	1.075 ± 0.025

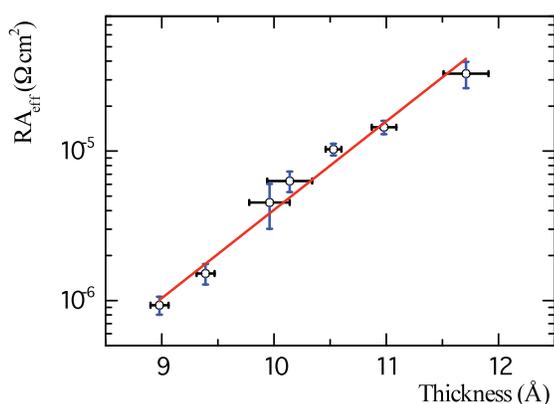


Figure 3. Room temperature effective area resistance product ($R.A_{eff}$) as a function of the tunneling effective barrier thickness (t_{AlOx}). Low voltage electrical resistance determined in the linear range of I-V curves between $-40mV$ and $+40mV$. The continuous line has been calculated according to the expression $P \exp\left[\frac{2 t_{AlOx}}{\hbar} \sqrt{2 m \phi_0}\right]$ where $P = 7.4 \times 10^{-12}$

$\Omega \text{ cm}^2$ and $\phi_0 = 1.4 \text{ eV}$. For this expression the potential barrier height (ϕ_0) is an independent function of the t_{AlOx} , and the effective mass of the tunneling electron within the barrier is neglected [17].

presence of hot spots. In this particularly case A_{eff} scales from 10^{-8} to 10^{-9} cm^2 , as can be seen on table 1. If compared with the physical junction area of about $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, we conclude that there must be an effective tunneling area, indicating the presence of hot spots. During the bottom electrode thin film deposition there will always be thickness fluctuations. These fluctuations define regions where both

electrodes will remain closer (hot spots).

The last two columns on the right hand side of Table 1 show the potential barrier heights ϕ_1 and ϕ_2 for asymmetric tunnel barrier, as shown in figure 2, where ϕ_1 and ϕ_2 are the potential barrier height at the first and second metal/insulator/metal interfaces, respectively. The asymmetry ($\Delta\phi$) is roughly 0.2 eV , meaning that the MTJs have an almost rectangular potential barrier ($\phi_1 \approx \phi_2$). The low asymmetry is usually correlated to properly oxidized tunnel barriers with a strong glow discharge [19] but also reflects the similar work function values for both electrodes. On the other hand, this result also justifies why simulations for symmetric tunnel barrier show good agreement with experimental I-V curves for both models.

As can be seen on Table 1, for Simmons' and Chow's models simulations we have values of $\phi \leq 1.0 \text{ eV}$, meaning that we have deposited samples with low potential barrier height values, if compared to values reported in the literature for the same system ($\phi \geq 1.9 \text{ eV}$) [20]-[21]. We can argue about the physical reasons for this low potential barrier. It could be due to deviation from Al_2O_3 stoichiometry in the regions relevant for the tunneling transport. Up to now, we do not have an experimental method to follow locally the composition of the oxide. Another possibility is that a build-up process of the tunnel barrier is present indicating that for very thin oxide layers the insulator gap has not yet been com-

pletely established.

Finally, the other accepted criterion to verify quantum tunneling as the charge transport mechanism is presented in figure 4, showing the tunnel current behavior as a function of temperature for a constant applied bias of 300 mV and 40 mV. This result is in accordance with Stratton's model (1962) [22]. This model takes on account thermal energy contribution for the tunnel current and is given by:

$$I(T) = I(0)[1 + C T^2 + \dots], \quad (7)$$

where $I(0)$ represents tunnel current for zero temperature and C is a constant which depends on barrier's intrinsic parameters (t e ϕ).

As predicted by Stratton, tunnel current is proportional to T^2 in the whole temperature range for a constant applied bias of 300 mV and 40 mV.

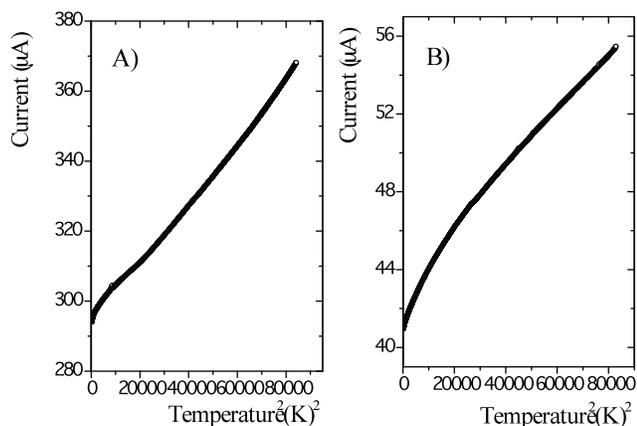


Figure 4. Experimental curves of tunnel current as a function of temperature for a Py/Al(17 Å)Ox(45 s)/Co MTJ. Curve (A) for a constant applied bias of 300 mV and (B) for 40 mV.

4. CONCLUSIONS

Electronic transport measurements, I-V curves, are sensitive to small fractions of the barrier thickness and tunneling area. This is helpful because the current will intrinsically probe the relevant part of the junction. It means that leaving the junction area as free parameter, together with barrier thickness and potential barrier height, lead us to coherent results for fitting I-V curves. Following this idea, an expected exponential growth of the effective area-resistance product with the effective barrier thickness for MTJs with low potential barrier height and low asymmetrical barrier, was found. Therefore we can conclude that tunnel current concentrates in

small areas of the junctions (less than 1% of the junction's geometrical area).

This result composes a consistent picture showing that quantum tunneling is indeed the charge transport mechanism for our MTJs. I-T curves, are also consistent with this picture.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been partially supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Centro Latinoamericano de Física (CLAF).

6. REFERENCES

- [1] U. Rudiger, R. Calarco, U. May, K. Samm, J. Hauch, H. Kittur, M. Sperlich, and G. Guntherodt, *J. Appl. Phys.* 89, 7573 (2001).
- [2] B.J. Jonsson-Akerman, R. Escudero, C. Leighton, S. Kim, I.K. Schuller, and D.A. Rabson, "Reliability of normal-state current-voltage characteristics as an indicator of tunnel-junction barrier quality," *Appl. Phys. Lett.* v.77, n.12, pp.1870 Sept. 2000.
- [3] S. Yuasa, T. Nagahama, and Y. Suzuki, "Spin polarized resonant tunneling in magnetic tunnel junctions," *Science* v.297, n.5579, pp.234-237, 2002.
- [4] S. Yuasa, T. Sato, E. Tamura, Y. Suzuki, H. Yamamori, K. Ando, and T. Katayama, "Magnetic tunnel junctions with single-crystal electrodes: A crystal anisotropy of tunnel magnetoresistance," *Europhys. Lett.* v.52, n.3, pp.344-350, 2000.
- [5] L.S. Dorneles, D.M. Schaefer, M. Carara, and L.F. Schelp, "The use of Simmons equation to quantify the insulating barrier parameters in Al/AlOx/Al tunnel junctions," *Appl. Phys. Lett.*, v. 82, n. 17, pp. 2832-2834, Apr. 2003.
- [6] J.D.R. Buchanan, T.P.A Hase, B.K. Tanner, N.D. Hughes, and R.J. Hicken, "Determination of the thickness of Al₂O₃ barriers in magnetic tunnel junctions," *Appl. Phys. Lett.* v.81, n.4, pp.751-753, 2002.
- [7] V. da Costa, F. Bardou, C. Béal, Y. Henry, J.P. Bucher, and K. Ounadjela, "Nanometric cartography of tunnel current in metal-oxide

- junctions,” *J. Appl. Phys.*, v.83, n.11, pp.6703-6705, June 1998..
- [8] T. Dimopoulos, V. da Costa, C. Tiusan, K. Ounadjela, and H.A.M. van der Berg, “Local investigation of thin insulating barriers incorporated in magnetic tunnel junctions,” *J. Appl. Phys.*, v. 89, n. 11, p. 7371-7373, June 2001.
- [9] J.G. Simmons, “Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film,” *J. Appl. Phys.*, v.34, n.6, pp. 1793-1803, June 1963.
- [10] J.G. Simmons, “Generalized thermal J-V characteristic for the electric tunnel effect,” *J. Appl. Phys.*, v.35, n.9, p.2655-2658, Sept. 1964.
- [11] J.G. Simmons, “Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film,” *J. Appl. Phys.*, v.34, n.9, p.2581-2590, Sept. 1963.
- [12] C.K. Chow, “Square-mean-root approximation for evaluating asymmetric tunneling characteristics,” *J. Appl. Phys.*, v.36, n.2, p.559-563, Aug. 1965.
- [13] Philip C. D., Hobbs, Robert B., Laibowitz, and Frank R. Libsch, *Appl. Optics* v.44, n.32, pp.6813, 2005.
- [14] Casey W. Miller, Zhi-Pan Li, JohamAkerman, and Ivan K. Schuller, “Impact of interfacial roughness on tunneling conductance and extracted barrier parameters,” *Appl. Phys. Lett.* v90, n.4pp.043513, Jan. 2007.
- [15] V. Da Costa, C. Tiusan, T. Dimopoulos, and K. Ounadjela, “Tunneling phenomena as a probe to investigate atomic scale fluctuations in metal/oxide/metal magnetic tunnel junctions,” *Phys. Rev. Lett.*, v. 85, n.4, p. 876-879, July 2000.
- [16] T. Miyazaki, and N. Tezuka, “Spin-polarized tunneling magnetoresistive effect in ferromagnet/insulator/ferromagnet junctions,” *J. Magn.Magn.Mater.*v.151, pp.403, 1995.
- [17] E. S. Cruz de Gracia, L. S. Dorneles, L. F. Schelp, S. R. Teixeira and M. N. Baibich, “Low potential barrier height effects in magnetic tunneling junctions,” *Phys. Rev. B.*, v.76, pp.214426, 2007.
- [18] V. Da Costa, Y. Henry, F. Bardou, M. Romeo, and K. Ounadjela, “Experimental evidence and consequences of rare events in quantum tunneling,” *The European Physical Journal B*, v. 13, pp.297-303, Apr. 2000.
- [19] J. Nowak, D. Song, E. Murdock, “Dynamic conductance of Ni80Fe20 /Al2O3/ Ni80Fe20 tunnel junctions,” *J. Appl. Phys.*, v.87, n.9, p.5203-5205, May 2000.
- [20] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, “Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions,” *Physical Review Letters*, v.74, n.16, p.3273-3276, Apr. 1995.
- [21] H. Boeve, E. Girgis, J. Schelten, J. De Boeck, and G. Borghs, “Strongly reduced bias dependence in spin-tunnel junctions obtained by ultra violet light assisted oxidation,” *Appl. Phys. Lett.*, v.76, n.8, p.1048-1050, Fev. 2000.
- [22] R. Stratton, “Volt current characteristics for tunneling through insulating films,” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v.23, p.1177-1190, Mar. 1962.

Characterization of shallow groundwater in Eocene sediments of Panama Canal Watershed using electrical techniques

Irving Díaz

*Estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Panamá
irving.diaz@utp.ac.pa*

Alexis Mojica Ábrego

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
Miembro del Sistema Nacional de Investigación (SNI)
alexis.mojica@utp.ac.pa*

Carlos A. Ho

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Centro Experimental de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Panamá
carlos.ho@utp.ac.pa*

Reinhardt Pinzón, José Fábrega, Erick Vallester, David Vega

*Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas
Universidad Tecnológica de Panamá
reinhardt.pinzon@utp.ac.pa,
jose.fabrega@utp.ac.pa,
erick.vallester@utp.ac.pa, david.vega@utp.ac.pa*

Fred Ogden

*Department of Civil & Architectural Engineering
College of Engineering and Applied Science,
University of Wyoming
fogden@uwoyo.edu*

Jan Hendrickx

*Department of Earth & Environmental Science,
New Mexico Tech
hendrickx@nmt.edu*

Abstract - This work is focused on the detection of seepages caused by the affluent located in a small area of the Panama Canal Basin during the dry season, and to define the subsurface stratigraphy (Eocene sediments) that characterize this area through a geophysical survey. Two electrical resistivity tomography were developed to identify the extent of infiltration and the nature of the clay layers vertically and laterally, these results were corroborated by a drilling operation in the vicinity of electrical tests and based on this information, established a model for a two-dimensional geoelectric profile in order to compare (i) the pseudo-sections of synthetic and measured apparent electrical resistivity, and (ii) the electrical resistivity tomography as a result of the inversions of such pseudo-sections. The results of electrical resistivity tomography obtained in the two profiles revealed the existence of (i) a surface layer moderately resistant (18-85 ohm.m) with a thickness not exceeding 1,8 m, (ii) an area of high electrical conductivity (3,8 to 10,7 ohm.m) with a thickness not exceeding 9.5 m and (iii) a resistant substratum with electrical resistivity values calculated in excess of 30,1 ohm.m and a range depth ranging from 2 to 11,5 m. The drilling operation in the vicinity of the geophysical tests revealed the presence of clay with varying moisture content and density, and thicknesses that corroborate the results of the geophysical evidence. The two-dimensional geoelectrical model of Profile 1 was established according to the results of electrical resistivity tomography as well as the profile and information of the drilling operation. Based on the results of this study, we conclude that the infiltration generated by the affluent in this part of the Isthmus of Panama are very important, even in periods when precipitation levels are.

Keywords - Apparent resistivity, electrical resistivity tomography, forward problem, Gamboa zone, inverse data, Panama Canal watershed, synthetic data.

Resumen - El objetivo de este trabajo se focalizó en la detección de las infiltraciones causadas por los afluentes ubicados en una pequeña zona de la Cuenca del Canal de Panamá durante la época seca, y de definir la estratigrafía del subsuelo (sedimentos eocénicos) que caracteriza a dicha zona a través de la prospección geofísica. Se desarrollaron dos tomografías de resistividad eléctrica para identificar la extensión de las infiltraciones y la naturaleza de las capas arcillosas tanto en profundidad como lateralmente; estos resultados fueron corroborados por una perforación realizada en las cercanías de las pruebas eléctricas y en base a toda esta información, se estableció un modelo geoelectrico bidimensional para uno de los perfiles con el objetivo de comparar (i) las pseudo-secciones de resistividad aparente sintética y medida, y (ii) las tomografías de resistividad eléctricas como resultados de las inversiones de dichas pseudo-secciones. Los resultados de las tomografías de resistividad eléctrica obtenidos en los dos perfiles

revelaron la existencia de (i) una capa superficial moderadamente resistente (18-85 ohm.m) con un espesor que no sobrepasa los 1,8 m, (ii) una zona de alta conductividad eléctrica (3,8-10,7 ohm.m) con un espesor que no supera los 9,5 m y (iii) un sustrato resistente con valores de resistividad eléctrica calculados que superan los 30,1 ohm.m y un rango de profundidad que se extiende desde 2 hasta 11,5 m. La perforación realizada en las cercanías de las pruebas geofísicas revelaron la presencia de arcilla con variaciones en contenido de humedad y densidad, y con espesores que corroboran los resultados de las pruebas geofísicas. El modelo geoelectrico bidimensional del Perfil 1 se estableció de acuerdo a los resultados de la tomografía de resistividad eléctrica de dicho perfil y a la información de la perforación realizada. Basado en los resultados del presente estudio, se concluye que las infiltraciones generadas por los afluentes en esta parte del Istmo de Panamá son muy importantes, aun en periodos en donde los niveles de precipitación son bajos.

Palabras claves - Cuenca del Canal de Panamá, datos sintéticos, inversión de datos, problema directo, resistividad aparente, tomografía de resistividad eléctrica, zona de Gamboa.

Paper Type: Original

Received: August 22, 2011

Accepted: January 12, 2012

1. INTRODUCTION

The Canal of Panama is located in the Central American isthmus, corresponding to a clearly tropical region that is governed during the whole year by the dry and rainy stations (Figure 1). This canal is a route of interoceanic navigation between the Caribbean sea and the Pacific Ocean and it crosses the isthmus of Panama in his narrowest point. From its opening on August 15, 1914, the Canal of Panama has had a notable effect on the marine communication by having shortened time and distances necessary to transport people and materials; thus economic dynamism. The canal provided the cheapest route for transport between two oceans. This fact has influenced in a decisive way the patterns of world commerce, impelling the economic growth of the developed countries and enabling expansion of many remote regions of the world.

At present, the Canal of is challenged to guarantee the supply of sufficient water to satisfy the demands of consumption in the urban centers located in the neighborhood of the Canal and for the navigation and functioning of the canal, and whose behavior expresses increasing needs by both. To this challenge is added the importance conserving the resources and the sustainable development of the regions of the Panama Canal watershed.

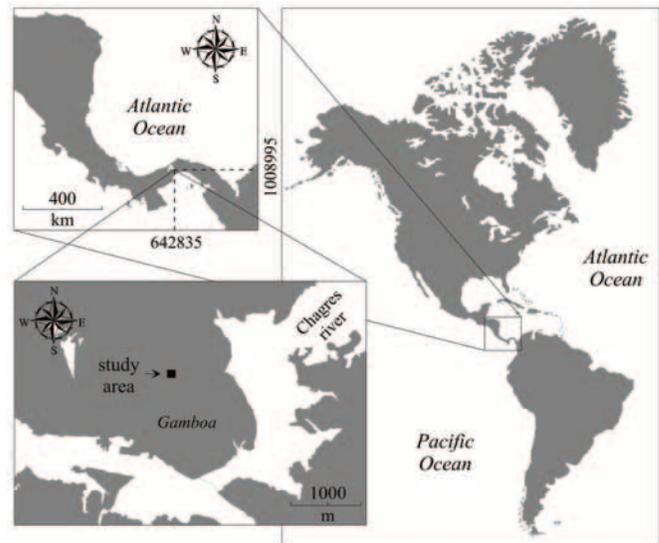


Figure 1. Gamboa area geographic location-Panama Canal watershed.

Inside the metropolitan area, the hydrographic basin of the river Chagres is directly tied to the hydraulic stability of the Canal. Preservation of the basin of the river Chagres is the basis of the program of conservation of natural resources in the Metropolitan zone. The geophysical study that next appears focused in one of the most important zones of the above mentioned basin: the area of Gamboa, which is located in the Southeast sector of the Gatún Lake and in the mouth of the river Chagres (see Figure 1). The target of the study centered on determining the zones of infiltration that experience the sedimentary soils of a small area of the sector of Gamboa due to an affluent, by means of the use of the electrical resistivity tomography during the dry season.

A total of two electrical profiles of 47 m long were developed in the field of interest; Figure 2 presents the distribution of these profiles, the system of affluent in Gamboa that feeds the lake Gatún and the perforation (boring) drilled to few meters of the profiles.

This electrical technique is one of the geophysical methods most used in studies of groundwaters and thanks to the development of computational technologies for the rapid acquisition of the field information and inversion geoelectrical algorithms, this method has been considered as the most effective for the exploration of the subsoil in high resolution [1].

In addition to the geophysical explorations and to the results obtained in the perforation (boring) to 10,5 m deep below ground surface developed in the Southwestern sector between both profiles, a 2D electrical model was developed for Profile 1 using a software algorithm based on finite difference approximation [2].

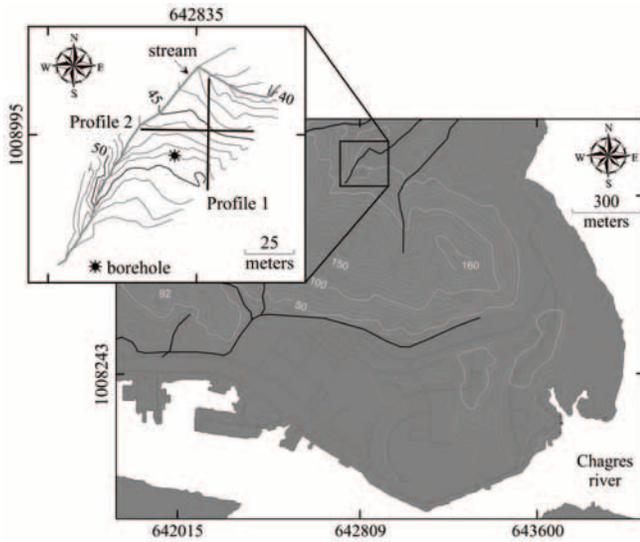


Figure 2. Detailed map of site and electrical profiles distribution and perforation in Gamboa area, Panama Canal Watershed.

The goal of electric modeling consisted of generating a set of virtual values of apparent resistivity according to the values of resistivity measured in the above mentioned profile. Also the results of the electrical resistivity tomographies obtained from the resolution of the inverse problem for both sets of information of apparent resistivity were compared.

2. GEOLOGICAL AND CLIMATE DESCRIPTION

Four tectonic plates influence the complex geology of the Isthmus of Panama, and that in accordance with [3] and [4] the same have been recounted to the block of Panama. The isthmus is a part of a volcanic arch which genesis goes back to the period of the early Miocene (~ 17 Ma).

The tectonic distortions and flaws molded the terrestrial forms up to the current moment. The rocky bed includes volcanic, intrusive rocks and extrusive, pyroclastics and sedimentary [5]. The Panama Canal basin is characterized by a sequence of thicknesses of sediments and volcanic rocks of the Eocene to the Pleistocene [6]. The study site rests on the Gatuncillo Formation, characterized by the presence of siltstone, quartz, algal and foraminiferal limestone [7]. Figure 3 presents a geologic widespread map of the study zone.

In accordance with [8] the convergence of the intertropical zone is narrowly related to the rainy stations regimen in the tropical forests and this is

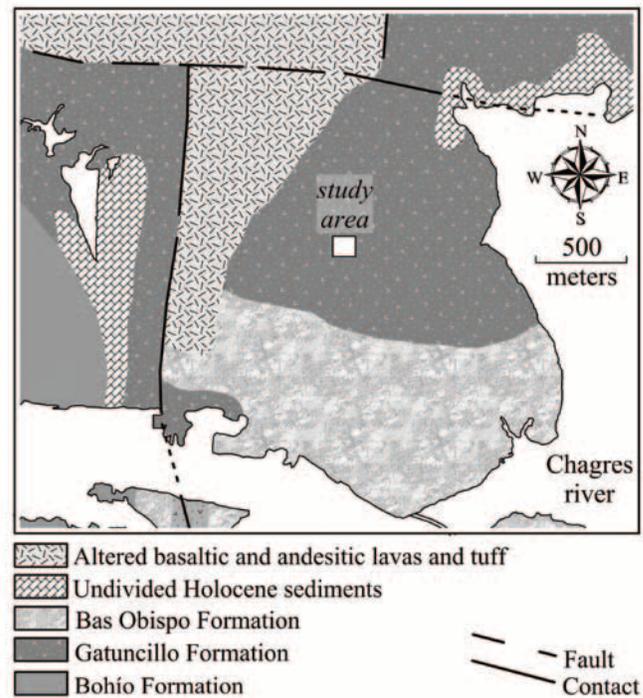


Figure 3. Geological map of Gamboa, its surroundings and study area [7].

the case of the period of rains that rule in Gamboa and in fact in the whole Panama.

In the isthmus, the rainy season in general persists from May until December and the dry from the end of December up to the end of April. In 2009, the dry season had changes of 4,9°C with precipitations not greater than 22 mm. During the geophysical measurements, there registered void levels of precipitation and a status of temperatures of the air between 26,3 and 27,0°C greater than the average temperatures registered during the whole dry season.

3. METHODOLOGY, RESULTS OF THE FIELD APPLICATIONS AND DISCUSSION

Water is obviously an essential element for human life and geophysical tools used to determine the quality and quantity of groundwater have been used worldwide [9]. Electrical prospecting was chosen as the method to measure groundwater properties for this study based on its sensitivity to water in the terrestrial stratum. This method measures the apparent electrical resistivity which corresponds to a volumetric integration of subsurface electrical resistivity; this parameter, which is expressed in ohm.m, measures the soil volume capacity for electric charge movement.

Figure 4 presents a graph on the changes of temperature of the air and precipitations for the above mentioned period of the year 2009.

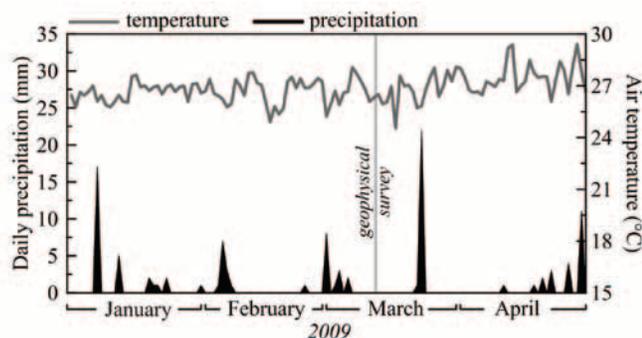


Figure 4. Daily precipitation and air temperature recorded data in Gamboa meteorological station. Information given by ACP (Panama Canal Authority) Water Division – Hydric Resources Section.

Particular geological factors that affect the electrical resistivity value include granularity, water mineralization, water amount and clay amount [10]. These properties are influenced by thermodynamic parameters such as pressure and temperature and by the environmental chemistry in which the electrical charges are moving ([11] and [12]).

Electrical prospecting is characterized by the injection of an electrical current at a given intensity through two electrodes (A and B) and recording the electrical potential difference by means of another pair of electrodes (M and N) taken a few centimeters beneath the top of the soil. This recording is representative of a determined soil volume and depends on the geometry and position of the electrode array used. In our case we used a Wenner- α configuration in which the electrodes A, M, N and B are collinear and the separations between adjacent electrodes are the equal. To obtain an electrical tomography, it is necessary that the four electrodes are aligned with $AM = MN = NB = a$, as shown in Figure 5.

Once the first measurement was collected, the four electrodes were moved to the next position and the second measurement was collected. This procedure was repeated along the entire profile. The first data group corresponds to the top depth level of first depth level denoted by $n = 1$. In order

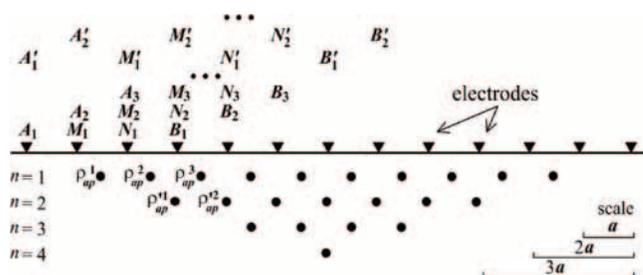


Figure 5. Wenner- α electrode configuration schematic representation used in the current study with 4 depth (n) levels as an example.

to get the second level ($n = 2$), the above operation is repeated, but with $AM = MN = NB = 2a$. It is important to point out that the Wenner- α array selection has several advantages over other array types; these advantages include (i) an intermediate range of depth, (ii) an intermediate resolution and (iii) a moderated sensitivity to geological noise [13]. In addition, as [14] points out, the final output of this array is a smooth signal. The electrical resistivity tomography method allows for the recording of a large amount of data through different possible combinations of the four electrodes. Such recordings are gathered by a pseudo-section of apparent resistivity where the vertical axis corresponds to a pseudo-depth. By convention, the recordings are located at a depth that is the function of the electrode separation and the configuration (see Figure 5).

A prototype of electrical source of 400 V output was developed with a switch that interconnects all the electrodes that were used for the acquisition of the information of electrical apparent resistivity. A separation of 1 m was established between 48 electrodes in both profiles with a number of depth levels equal to 15. The information of apparent resistivity measured along these profiles was transferred to a computer, processed and interpreted using a 2D inversion algorithm which subdivides the subsoil into a number of rectangular cells for which positions and sizes have been established [15]. Later, the resistivity of each cell is calculated in order to produce a pseudo-section of apparent resistivity (resolution of the forward problem).

The above mentioned pseudo-section is then

compared with the information measured on the surface and its difference can be represented in terms of an RMS error. For this latter the program EarthImager 2D of AGI Advanced was used, which determines automatically a two-dimensional model of real resistivity of the subsoil from the information that constitutes the pseudo-section of apparent resistivity measurements. The calculation of the values of resistivity is carried out thanks to the forward modeling based on the works of [16] and the application of are gularized least-squares optimization method as inversion method in electrical exploration. In this work there appears the results obtained with the application of a special constraint to this method of inversion known as robust inversion.

The selection of this method is due to the existence of rock accumulations, roots and the strong existing interface between the groundwaters and the surrounding material; [17] allude to the selection of the method of smoothed based on the nature of the study area. The equations obtained from Taylor's expansion of the first order that relates the model parameters and the model response, and the misfit corresponding to the difference between the model response and the field information, define the solution of Gauss-Newton. The implementation of the robust method to this solution consists of the formulation of iteratively reweighted least-squares method [18], and whose mathematical structure has the following form:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{J}_i^T \mathbf{R}_a \mathbf{J}_i + \alpha_i \mathbf{W}^T \mathbf{R}_b \mathbf{W}) \Delta \mathbf{m}_i = \\ & = \mathbf{J}_i^T \mathbf{R}_a \mathbf{g}_i - \alpha_i \mathbf{W}^T \mathbf{R}_b \mathbf{W} \mathbf{m}_{i-1}. \end{aligned} \tag{1}$$

In this equation \mathbf{J} is the Jacobian matrix of partial derivatives, \mathbf{R}_a and \mathbf{R}_b are the weighting matrices introduced in such a way that the different elements of the data misfit and of the model roughness vectors are approximately equal weights in the inversion process [15]. \mathbf{W} corresponds to a roughness filter, \mathbf{g} is a vector that contains the differences between the logarithms of the measured and calculated apparent resistivity values, and $\Delta \mathbf{m}_i$ is the change in the model parameters of the for i -th iteration, which is given by:

$$\Delta \mathbf{m}_i = \mathbf{m}_i - \mathbf{m}_{i-1} \tag{2}$$

with \mathbf{m}_{i-1} is the model parameters vector for the previous iteration. corresponds to a damping factor related to the model roughness. This inversion method considers an exponential distribution of the data errors [19]. This method possesses the advantage of reproducing models with strong limits that separate zones of relatively constant electrical resistivity [15] y [20]. Other works allude to the versatility of this method at similar cases, for example to see [21], [15] y [22].

Profiles 1 and 2 are the electrical resistivity tomographies under depth of investigation greater than 10 m (to see Figure 6 a and b). Figure 6 (a) depicts three horizons and a strong anomaly in the initial part of Profile 1he above mentioned anomaly is represented across a dark tonality which range of calculated electrical resistivity extends from 85 up to 239,0 ohm.m, the same one possesses an extension of approximately 8,5 m and a thickness that does not exceed 5 m. This anomaly is associated with an accumulation of rocks and roots of trees. The first horizon corresponds to a moderated superficial layer of resistivity (18-85 ohm.m) extending 45 m along the above mentioned profile; the thickness of this horizon does not exceed 1,8 m. This superficial horizon is associated with a clayish material with a low moisture content, resulting from the absence of rains and the evapotranspiration during the dry season.

In the same profile, below the first horizon there is the second one represented by an anomaly of light gray tonality that spreads from the 12 m up to 47 m along the profile; the calculated electrical resistivity range that characterizes this horizon ranges between 3,8 and 10,7 ohm.m. The thickness of this horizon is lower than 11 m and the same one finds associated with a clayish material with a moisture content of generated by an source that surrounds the site. The third and last horizon detected in this survey has a range of values of calculated electrical resistivity that ranges from 10,7 up to 85 ohm.m which is associated with a clay material of greater thickness compared to the detected ones before; the depth of this horizon spreads from 3,5 up to 11,5 m.

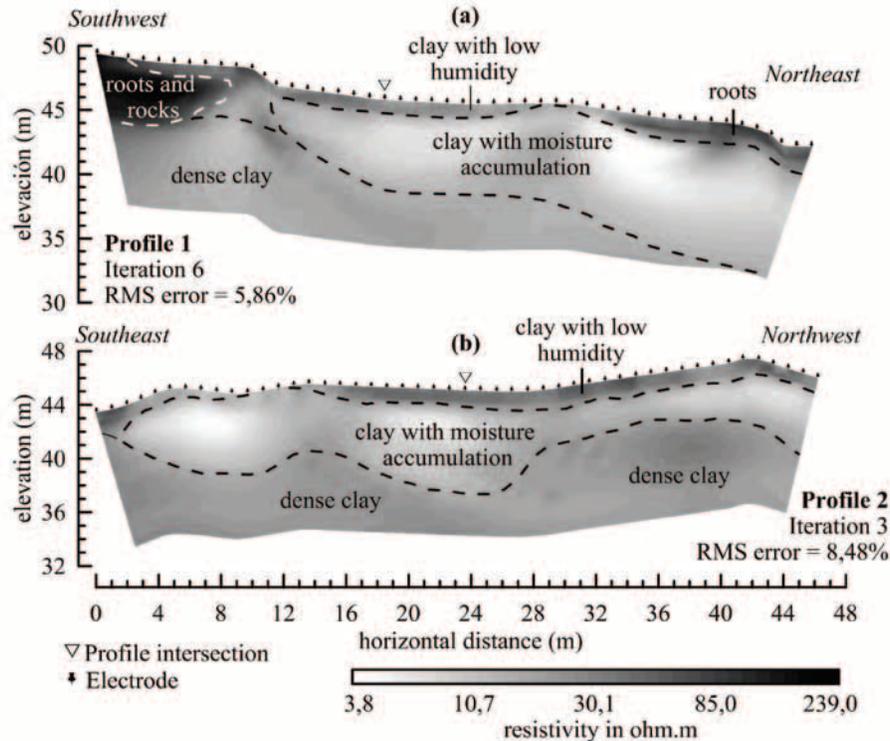


Figure 6. Electrical resistivity tomography for profiles (a) 1 and (b) 2.

Excepting the strong anomaly detected in the initial part of Profile 1, the results depicted by Profile 2 are quite similar since the moderated superficial layer of electrical resistivity is present and its thickness ranges between 0 and 1,7 m (clay material at low level of moisture). In addition the horizon of low resistivity is represented in light gray tonality (3,8 and 10,7 ohm.m) which associates with clay material with a high moisture content and finally, the layer of dense clay which is found below the horizons already defined. The latter layer has depths that spread from 4,5 up to 9,5 m.

A three-dimensional representation of these results allows more clear visualization of the different horizons typical of the site (see Figure 7). The results obtained during the electrical prospecting fitted very well to the information given by the perforation (boring) developed in the site. In this test a layer of superficial clay was detected at low level of moisture, followed by the phreatic level to approximately 4 m and finally to 8,5 m deep the clay material typical of the site presents a level of thickness much bigger than the previous horizons; the perforation finished to 10,5 m deep.

The fact that the thickness of the layer superficial of clay is greater than the one detected in the tomography of electrical resistivity is due to the elevation to which the perforation was initiated.

4. FORWARD MODELLING

With the goal to verify the results obtained in the electrical resistivity tomography of the Profile 1 (Figure 6a), there was proposed a two-dimensional model based on the forward problem solution. The above mentioned methodology consists of finding a mathematical equation for the voltage or potential difference (V) between any pair of points in the space in function of (i) the distribution of the electrical resistivity of the subsoil (ρ or his inverse one, the electrical conductivity σ), (ii) the intensity of electrical injected current (I) and (iii) the geometry or electrode configuration used in the study. With the calculated values of the voltage the apparent resistivity data is obtained. This expression of the electrical potentials is generated from certain theoretical topics related to the stationary fields, the principle of conservation of electrical charge and the Ohm's law, and the same one is represented by:

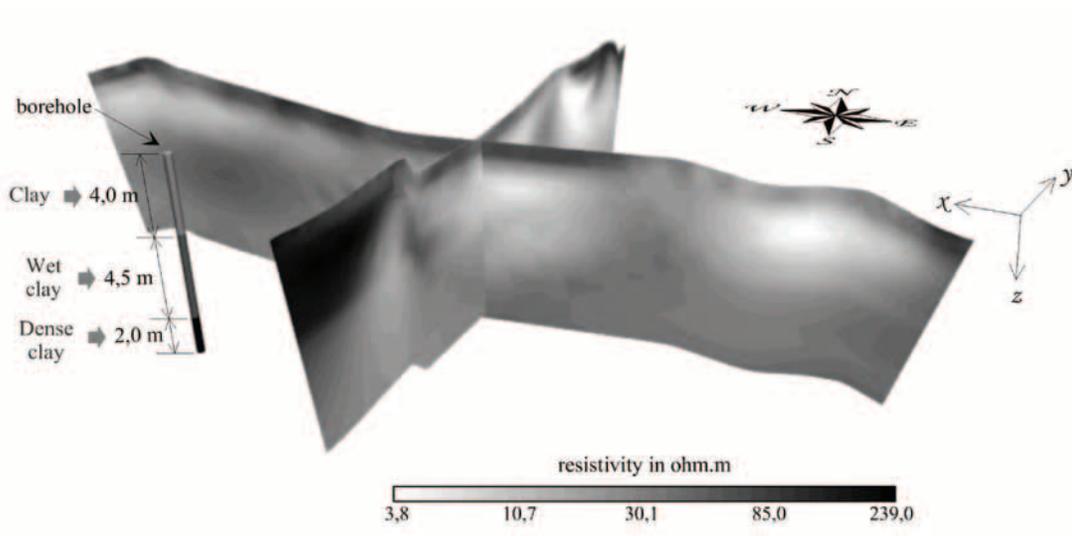


Figure 7. Tridimensional representation of electrical resistivity tomographies carried out in this study and drill results made at point showed Figure 2.

$$\nabla \cdot \left\{ \sigma(x, z) \nabla V(x, y, z) \right\} = -\frac{\partial \xi}{\partial t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s). \quad (3)$$

In this expression corresponds to electrical charge density at a point in the Cartesian space and the Dirac delta function. are coordinates of the electrical current source. According to [16], this equation could be expressed at Fourier space as:

$$\nabla \cdot \left\{ \sigma(x, z) \nabla \tilde{V}(x, \lambda, z) \right\} + \lambda^2 \sigma(x, z) \cdot \tilde{V}(x, \lambda, z) = -\tilde{I} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s). \quad (4)$$

And after an elemental vectorial mathematical manipulation also is obtained:

$$\sigma(x, z) \nabla^2 \tilde{V}(x, \lambda, z) + \nabla^2 \left\{ \sigma(x, z) \cdot \tilde{V}(x, \lambda, z) \right\} - \tilde{V}(x, \lambda, z) \nabla^2 \sigma(x, z) - 2\lambda^2 \sigma(x, z) \tilde{V}(x, \lambda, z) = -2\tilde{I} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s). \quad (5)$$

Where \tilde{V} , \tilde{I} and λ are voltage, electrical intensity and the transformation of in the Fourier space respectively. To solve these two equations numerical tools with suitable boundary conditions are used.

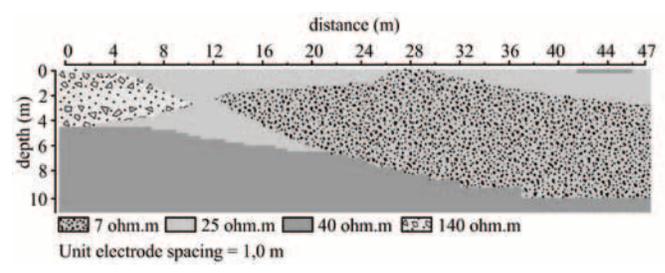


Figure 8. Theoretical resistivity model used for study of Profile 1 in Gamboa, Panama Canal watershed.

The synthetic apparent resistivity values generated from a two dimensional model were obtained by Res2Dmod [2] which is software based on finite difference numerical approximation with a modification carried out on area discretization method given by [16].

The cells model is based on both perforation (drilling) results as well as the electrical prospection carried out in the profile 1 (see Figure 8). It was defined: (i) a conductor layer of 7 ohm.m which extends from 12 to 47 m along the profile and a thickness not greater than 8,6 m.

This layer is a clay material with a notable accumulation of moisture; (ii) a resistant structure of 140 ohm.m located near the beginning of the profile and whose extension along the profile does not go beyond 11 m. The same one is related to an accumulation of rocks and roots of the site, (iii) a third horizon defined in this model that contains the previous ones but with an intermediate

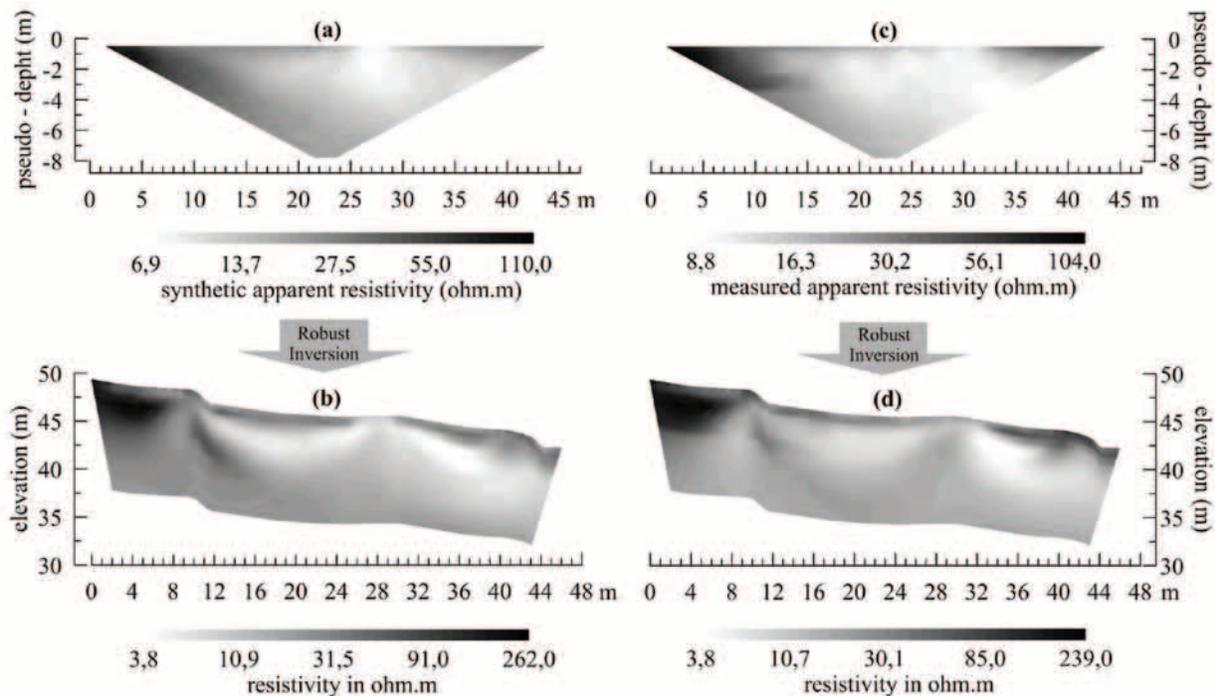


Figure 9. (a) Pseudo-section of synthetic apparent electrical resistivity values obtained from electrical model of Figure 8, (b) inversion process results obtained from Figure 9 (a); (c) pseudo-section of measured apparent electrical resistivity values and (d) result of inversion process of the pseudo-section from Figure 9 (c)-Profile 1.

value of electrical resistivity of 25 ohm.m. and (iv) a fourth horizon that represents the resistant substratum related to the same clay material (40 ohm.m). The model established in Figure 8 generated a set of apparent electrical resistivity values with an addition of 2% of gaussian noise and whose pseudo-section is presented in Figure 9 (a). The inversion of this pseudo-section of synthetic apparent data across the method of robust inversion and the implementation of the topographic data corresponding to the Profile 1, gave rise to the electrical resistivity tomography of the Figure 9 (b).

Additional to these results, Figures 9(c) and (d) correspond to the pseudo-section of apparent measured electrical resistivity. The results obtained in this section not only show a similarity as for the distribution of the values of resistivity showed in the pseudo-sections and electrical resistivity tomographies but also in the ranges of calculated and apparent resistivity.

Figures 9 (b) and (d) indicate very similar anomalies, which demonstrate that the synthetic model of cells presented in the Figure 8 fits very well to the results obtained during the geophysical prospection. Additional to this analysis, Figure 10 presents a graph that compares the values of the

apparent synthetic resistivity with those registered in Profile 1 during the dry season. The distribution of the points on this graph and the straight line regression are indicative of the similarity that exists between both analyses, from what the geoelectrical model proposed fits to this type of tropical zones.

5. CONCLUSIONS

The electrical prospection can play a very important role in the study of the underground waters contained in sedimentary formations in the Panama Canal watershed. The results obtained in this work reveal that the water intrusions from the area of Gamboa are significant, even in the dry season where the levels of precipitation are low and the processes of evapotranspiration are important.

Thanks to the electrical resistivity tomographies obtained in this study, it was possible to delimit the nature of the layers of clay where the levels of moisture in the surface are low and whose response is associated to the natural phenomena already mentioned previously, very typical of the tropical zones in this period of the year. The interpretation of the results of the geophysical prospection is associated very well to the results of the perforation done in the outskirts of the zone of study,

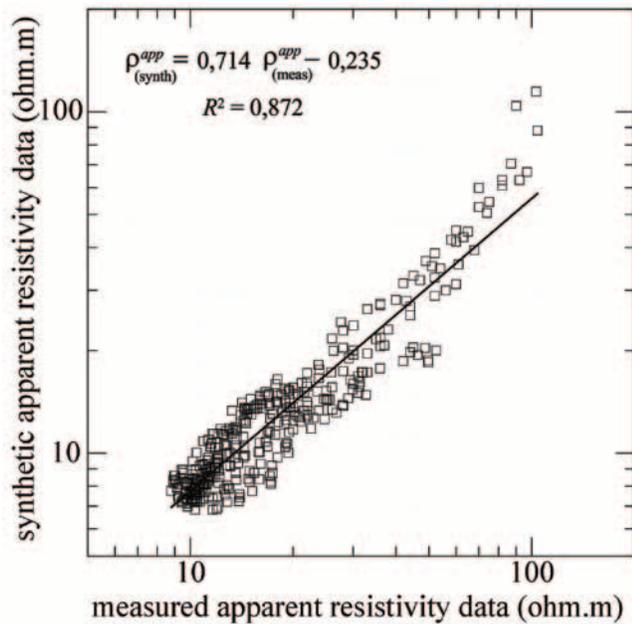


Figure 10. Comparison between the synthetic apparent resistivity data generated from the electrical model and the measured apparent resistivity along Profile 1 during dry season.

where the clay geologic formations, become present. Finally, the model of cells established in this study fits very well to the experimental obtained results, the presence of clay conductive and resistant layers constitute the most important geologic components of this site. The geophysical tests did not reveal the existence of hard bedrock to the explored depths.

6. ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful for the financing granted by SENACYT (endorsed proposal-code COL08-75). Also, the authors thank Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Centro Experimental de Ingeniería-UTP) and Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas who provided laboratory assistance, and specially information on field studies given by José Rodríguez. We would like to acknowledge the editorial services provided by Sustainable Sciences Institute (SSI), in particular the revisions and comments made by Engineer Dana Brock an SSI volunteer. Finally, the authors thank Dr. Sarah Boyle for her wise comments about the current work and for checking and correcting the completed manuscript.

7. REFERENCES

- [1] T. Dahlin, "The development of DC resistivity imaging techniques", Computer Geoscience, vol 29, pp. 1019-1029, Enero 2001.
- [2] M. H. Loke, "Res2Dmod ver. 3.01-Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods", Technical Notes, Malasia, 2002.
- [3] S. Adamek, C. Frohlich and W. D. Pennington, "Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: constraints on microplate tectonics of the Panama region", Journal of Geophysical Research, vol 93, pp. 2053-2075, Marzo 1988.
- [4] E. A. Silver, D. L. Reed, and J. E. Tagudin, "Implications of the North and South Panama thrust belts for the origin of the Panama Orocline", Tectonics, vol 9, pp. 261-213, Julio 1990.
- [5] R. Kaufmann, "Ampliación del Canal de Panamá", Revista de Publicaciones Navles, vol 702, pp. 125-130, Febrero 2009.
- [6] M. X. Kirby, D. S. Jones and B. J. MacFadden, "Lower Miocene Stratigraphy along the Panama Canal and Its Bearing on the Central America Peninsula", Plos One, vol 3, pp. 1-14 p. Julio 2008.
- [7] R. H. Stewart, J. L. Stewart and W. P. Woodring, "Geologic Map of Panama Canal and Vicinity, Republic of Panama", Department of the Interior United States Geological Survey, U.S.A. 1980.
- [8] E. J. Palka, "A geographic overview of Panama: Pathway to the continents and link between the seas", in Río Chagres, Panama: A Multidisciplinary Profile of a Tropical Watershed (Harmon, R.S. editor), vol 52, pp. 3-18, Springer, Dordrecht 2005.
- [9] M. Goldman, "Geophysical methods for exploration and management of groundwater", in Proceeding for the EEGS-ES-2000 Annual Meeting, Bochum, Alemania 2000.
- [10] J. D. McNeill, "Electrical conductivity of soils and rocks", Technical Note TN-5, Geonics Limited, pp. 22, Canada, 1980.
- [11] G. Nover, "Electrical properties of crustal and mantle rocks: A review of laboratory

- measurements and their explanation”, *Surveys in Geophysics*, vol 26, pp. 593-651, Septiembre 2005.
- [12] A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand and G. Richard, “Electrical resistivity survey in soil science: a review”, *Soil and Tillage Research*, vol 83, pp. 173-193, Septiembre 2005.
- [13] R. D. Barker, “Principles of electrical imaging”, *Research Note 1*, pp. 1-3, Inglaterra, 2001.
- [14] R. Guérin, C. Panissod, M. Thiry, Y. Benderitter, A. Tabbagh and S. Huet-Taillanter, “La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59)-III-Approche méthodologique d’étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées”, *Bull. Soc. Géol. France*, vol 173, pp. 471-477, Septiembre 2002.
- [15] M. H. Loke, I. Acworth and T. Dahlin, “A comparison of smooth and blocky methods in 2D electrical imaging surveys”, *Exploration Geophysics*, vol 34, pp. 182-187, Abril 2003.
- [16] A. Dey and H. F. Morrison, “Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures”, *Geophysical Prospecting*, vol 27, pp. 106-136, Marzo 1979.
- [17] R. G. Ellis and D. W. Oldenburg, “Applied geophysical inversion”, *Geophysical Journal International*, vol 116, pp. 5-11, Enero 1994.
- [18] R. Wolke and H. Schwetlick, “Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons”, *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, vol 9, pp. 907-921, 1988.
- [19] X. Yang and M. B. Lagmanson, “Planning Resistivity Surveys Using Numerical Simulations”, 16th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Abril 2003.
- [20] V. Leroux and T. Dahlin, “Time-lapse resistivity investigations for imaging saltwater transport in glaciofluvial deposits”, *Environmental Geology*, vol 49, pp. 347-358, Enero 2006.
- [21] M. Giudici, M. Manera y E. Romano, “The use of hydrological and geoelectrical data to fix the boundary conditions of ground water flow model: a case study”, *Hydrology and Earth System Science*, vol 7, pp. 297-303, 2003.
- [22] B. Robineau, J. L. Join, A. Beauvais, J. C. Parisot and C. Savin, “Geoelectrical imaging of a thick regolith developed on ultramafic rocks: groundwater influence”, *Australian Journal of Earth Science*, vol 54, pp. 773-781, 2007.

Documenting Translation and Vertical-Axis Rotations using Paleomagnetic Techniques along the Panama Isthmus: Preliminary Results

César Silva

Smithsonian Tropical Research Institute, Panama
casilvac@bt.unal.edu.co

Germán Bayona

Corporación Geológica ARES, Colombia
gbayona@cgares.org

Abraham Osorio

Smithsonian Tropical Research Institute, Panama
osorioa@si.edu

Camilo Montes

Smithsonian Tropical Research Institute,
Corporación Geologica ARES, Colombia
montesc@si.edu

Carlos Jaramillo

Smithsonian Tropical Research Institute, Colombia
jaramilloc@si.edu

Luis Santamaría

Universidad de Panamá, Panama
luis.santamaria@ancon.up.ac.pa

Abstract - Along the Isthmus of Panama 23 paleomagnetic sites were sampled in order to determine preliminary block rotations and paleolatitudinal movements. The lithology selected for this research corresponds to volcanic and sedimentary rocks with ages ranging from Upper Cretaceous to Pleistocene.

Counterclockwise vertical axis rotations were uncovered in Paleocene and Oligocene units separated by a sinistral fault. Mean directions of two sites collected in Cenozoic rocks to the north of the fault are westerly (D 275.4, I -20.8, k 20.46, a95 10.9; D 264.6, I 5.3, k 292.35, a95 3.5), whereas the mean direction uncovered in one site collected in Oligocene rocks to the south of the fault yields a northward declination and positive inclination (D 346.3, I 14.3, k 18.43, a95 14.4). Vertical axis rotation of $81.7^\circ \pm 13.3^\circ$, of the Paleocene rocks with respect to the Oligocene rock. Cenozoic sites record the northward path of the trailing edge of the Caribbean plate, from 10.8°S for Paleocene to 6.6°N for Oligocene. However, more sites are needed to be collected in order to better constraint this northward translation. Components isolated in El Valle volcano and Canal areas using Middle Miocene to Pleistocene rocks, indicate normal and reverse directions similar to the current direction of the Earth magnetic field. Therefore, no major latitudinal displacement of the Panama Isthmus has occurred during the Neogene.

Northward migration of the Panama arc is consistent with the Pacific origin of the Caribbean plate and counter-clockwise vertical axis rotation of several blocks in Panama could be related with the South American Plate collision since Pliocene.

Keywords - Caribbean Plate, Paleogene, Neogene, paleomagnetism, sinistral fault, volcanic arc.

Resumen - Con el objetivo de determinar rotaciones de bloques y movimientos paleolatitudinales del arco volcánico de Panamá, fueron muestreados 23 sitios de tobas, lavas y arenitas calcáreas con edades Pleistocenas a Cretácicas.

Rotaciones de bloques en sentido antihorario fueron registradas en unidades Paleocenas y Oligocenas separadas por la falla sinistral del Río Gatún. Dos sitios de edad Cenozoica, al norte de la falla, registran direcciones hacia el occidente (D 275.4, I -20.8, k 20.46, a95 10.9; D 264.6, I 5.3, k 292.35, a95 3.5), mientras un sitio de edad Oligoceno, al sur de la falla, registra declinación hacia el norte con inclinación positiva (D 346.3, I 14.3, k 18.43, a95 14.4). Rotaciones sobre el eje vertical de $81.7^\circ \pm 13.3^\circ$ son registradas en rocas de edad Cenozoica. Estos sitios a su vez indican un movimiento paleolatitudinal hacia el norte del borde sur de la Placa Caribe, desde 10.8° sur a 6.6° norte, entre el Paleoceno hasta el Oligoceno. Sin embargo, una mayor cantidad de sitios de muestreo es necesaria para aseverar más claramente esta translación latitudinal. Otros componentes aislados en rocas volcánicas del Mioceno Medio al Pleistoceno, en El Valle de Antón y el área del Canal, indican direcciones normales y reversas del campo magnético similares al campo magnético actual. Estas direcciones permiten sugerir que no ha habido significantes movimientos latitudinales del Istmo de Panamá durante el Neógeno.

El movimiento hacia el norte del arco volcánico de Panamá es consistente con la hipótesis del origen Pacífico de la Placa Caribe. Las rotaciones de bloques en sentido antihorario de varios terrenos en Panamá puede estar relacionada a la colisión con la Placa Suramericana durante el Plioceno.

Palabras Claves - Placa Caribe, Paleógeno, Neógeno, paleomagnetismo, falla sinistral, arco volcánico.

Paper Type: Original

Received: August 27, 2011

Accepted: January 12, 2012

1. INTRODUCTION

The formation of the Isthmus of Panama has been explained by several theories during last decades but the explanation is still unclear. One of the most acceptable theories is the accretion of allochthonous terrains that were migrating from southern latitudes since Cretaceous [1] Coates et al.,



Modified from Coates et al., (1992) and Hoernle et al., (2002)

Figure 1. Geologic terrains of Panama indicating sampled areas and quantity of paleomagnetic sites at each area.

1992; [2] Kellogg & Vega, 1995; [3] Hoernle et al., 2002. The Isthmus of Panama is represented by, at least, three terrains, ‘Chocó’, ‘Chorotega’ and the ‘Galapagos Igneous Complexes’ (Figure 1). Using fossil record of mammals and reptiles, [4] Kirby et al. (2008) suggest that there was a ‘landbridge’ between North America and the Isthmus of Panama since Paleocene.

The ‘Chocó’ terrain is located at eastern Panama, is the extension of the Baudó range and the Atrato basin. The ‘Chocó’ terrain is represented by shallow marine rocks of Miocene age (Chucunaque basin). The ‘Chorotega’ terrain located at western Panama, is the extension of the Costa Rica – Panama Volcanic Arc. Volcanic rocks of Upper Miocene to Pleistocene age represent the ‘Chorotega’ terrain. The Galapagos Igneous Complexes (GIC) is the group of rocks that have a geochemical affinity with the Galapagos hotspot. The GIC are mainly ophiolitic rocks like basalts, chert, turbidites and other marine affinity rocks. The age of this complex is around Upper Cretaceous to Paleocene.

Several structural styles have been proposed to explain the shape of the Isthmus. Interpretations of seismic profiles suggest the origin of an orocline due to the interaction of the Nazca plate with the South American plate [5] Silver et al., 1990.

2. METHODOLOGY

Five areas of Panama (Azuero, El Valle, Colon, Canal and Darien) were sampled with a total of 23 paleomagnetic sites. The age of the sampled units are in between Upper Cretaceous and Pleistocene, and mainly volcanic rocks.

Alternating field (AF) and thermal progressive demagnetization analysis were carried out at the paleomagnetism laboratory of the University of Florida in Gainesville, FL. Component analysis [6] Kirschvink (1980) interpreted from orthogonal demagnetization diagrams [7] Zijderveld (1967), gave us the mean magnetization directions, calculated using statistical methods by Fisher (1953) [8].

Mean Virtual Geomagnetic Pole (VGP) were determined from the characteristic components and then compared with the reference poles of the South American craton, in order to compare tectonic implications. For vertical-axis rotations, the confidence limits for structural domain declinations and the relative difference of declinations with an arbitrary point in the stable craton, following the criteria given by Demarest (1983) [9].

3. RESULTS

From 23 sites, 16 sites uncovered reliable directions (Table 1). In the Canal area, five sites uncovered directions with southerly declinations and

Table 1. Mean components isolated in this research. Di Marco et al. (1995) [10] direction was isolated in the same terrain of the Azuero area.

Area	Site	Bedding	Comp	N/n	R	Range		Before tilt correction		After tilt correction		alfa95	kappa
						AF (mT)	Thermal (C)	Dec	Inc	Dec	Inc		
CANAL	PAN2	170/31	a	7/5		15	250	Dispersed direction. NW - moderate positive inclination					
			b	7/7	6.83	15-100	250-560	183.4	-4.5	186.3	-34.5	10.3	35.02
	PAN5	220/35	b	7/6	5.87	10-60		127.9	-12.8	120.9	-9.2	11.1	37.48
	PAN6	176/29	b	6/6	5.92	30-100	300-540	151.1	9.5	150.3	-16.9	8.5	62.88
	PAN8	210/35	b	6/6	5.58	15-60	560	125.2	27.4	140.5	19.3	20.2	11.9
			a	8/5		10	200	Dispersed direction. S - moderate positive inclination					
	PAN9	227/27	b	8/8	7.98	10-90	300-620	179.6	3.7	177.7	-14.4	3.3	287.61
PAN24			138/30	b	7/5	4.99	15-100	200-590	147	-10.8	149.6	-40.3	4.4
PAN25	161/52	b	6/6	5.88	15-100	300-660	129.6	53.1	142.7	5.1	10.6	41.06	
AZUERO	PAN13	204/27	a	9/7		10	450	Dispersed direction. E - low positive inclination					
			b	9/9	8.71	20-70	590	314.6	8.3	308.8	16.6	9.9	27.92
COLOON	PAN14	278/22?	a	7/5		15	300	Dispersed direction. N - high positive inclination					
			b	7/7	6.98	20-100	400-620	263.1	26.6	264.6	5.3	3.5	292.35
	PAN15	288/56	b	16/10	9.56	10-100	250-620	273.7	33.9	275.4	-20.8	10.9	20.46
PAN17	320/25	a	8/7		10	200	Dispersed direction.						
		b	8/8	7.66	10-80	200-560	352.3	35	346.7	13.1	12.5	20.73	
EL VALLE	PAN18	164/36	a	12/4		5-25	450	Dispersed direction.					
			b	12/7	6.92	70	300-640	174.2	-12.6	178.9	-47.8	6.9	78.54
	PAN19	194/18	a	8/5	4.48	10	200	93.1	76.4	152.3	69.8	29.4	7.71
			b	8/8	7.87	10-100	300-640	170.3	0.2	169.3	-16.2	7.6	54.57
PAN20	340/07	a	10/2		10		28.3	27.5	25.1	24.8	53.9	23.61	
		b	10/9	8.89	70	620	351.3	13.7	350.6	7.8	6	73.47	
DARIEN	PAN22	69/18	a	8/4		15		276.6	12.1	279.9	27.9	39.2	6.46
			b	8/7	6.33	15-100		323.1	11.6	327.5	15.9	21.4	8.92
PAN23	98/32?	?	6/6	5.81	15-100	300-590	196.5	25.8	180.4	26.1	13.4	25.79	
GOLFITO	DiMarco et al., 1995			5	4.8			306.4	18.1	304.8	5.4	18.9/11.4	17.4/46.1

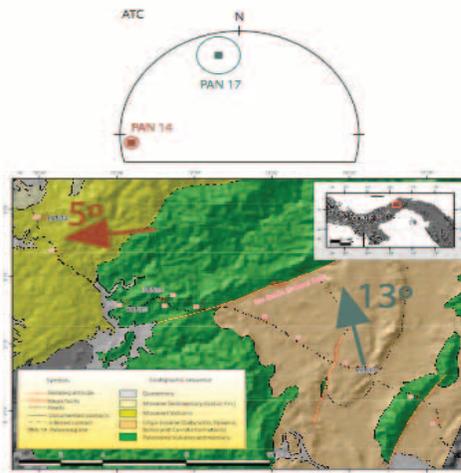


Figure 2. Counterclockwise vertical axis rotation of the tectonic block to the north of the Rio Gatun sinistral fault.

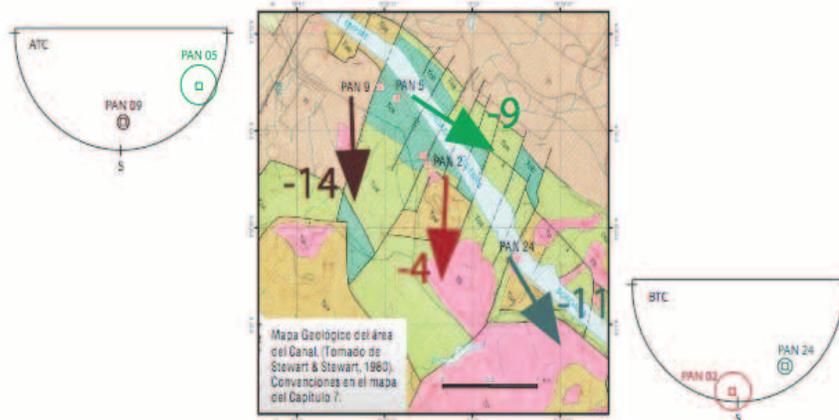


Figure 3. Counterclockwise vertical axis rotation at the Canal area.

shallow to moderate negative inclinations after tilt correction, such as PAN 2 (D 186.3, I -34.5, k 35.02, α_{95} 10.3), PAN 5 (D 120.9, I -9.2, k 37.48, α_{95} 11.1), PAN 6 (D 150.3, I -16.9, k 62.88, α_{95} 8.5), PAN 9 (D 177.7, I -14.4, k 287.61, α_{95} 3.3), and PAN 24 (D 149.6, I -40.3, k 298.56, α_{95} 4.4). Other two directions uncovered in the Canal area show southerly declinations, as well, but positive inclinations, PAN 8 (D 140.5, I 19.3, k 11.9, α_{95} 20.2), and PAN 25 (D 142.7, I 5.1, k 41.06, α_{95} 10.6).

In Azuero, only one site uncovered a reliable direction, PAN 13 (D 308.8, I 16.6, k 27.92, α_{95} 9.9); the other three sites of this area showed scattered directions. The Colon area uncovered three reliable directions from four sites sampled. Sites PAN 14 (D 264.6, I 5.3, k 292.35, α_{95} 3.5) and PAN 15 (D 275.4, I -20.8, k 20.46, α_{95} 10.9) show good grouping with westerly declinations but inclinations are remarkable different. The third site is PAN 17 (D 346.7, I 13.1, k 20.73, α_{95} 12.5) shows north declination with shallow inclination, similar to the recent magnetic field direction (Table 1).

El Valle area uncovered three directions, PAN 18 (D 174.2, I -12.6, k 78.54, α_{95} 6.9), PAN 19 (D 170.3, I 0.2, k 54.57, α_{95} 7.6), and PAN 20 (D 351.3, I 13.7, k 73.47, α_{95} 6). And Darien area uncovered scattered directions not used for statistical analysis (Table 1).

4. DISCUSSION

The Colon area shows a very clear counterclockwise vertical axis rotation between volcanic rocks of Cenozoic age (Figure 2). Mean directions of two sites collected in Cenozoic rocks to the north of the fault are westerly (PAN 15 D 275.4, I -20.8, k 20.46, α_{95} 10.9; PAN 14 D 264.6, I 5.3, k 292.35, α_{95} 3.5), whereas the mean direction uncovered in one site collected in Oligocene rocks to the south of the fault yields a northward declination and positive inclination (PAN 17 D 346.7, I 13.1, k 20.73, α_{95} 12.5).

Several sites indicate counterclockwise vertical axis rotation due to transverse faults along the Canal area (Figure 3). Three sites uncovered normal and reversal directions were isolated in El Valle, in Upper Miocene to Pleistocene volcanoclastics, show a very good example of a polarity change of the magnetic field. Site PAN 13, in Azuero, indicates a moderate grouping with one

direction isolated by Di Marco et al., (1995) [10] in the same terrain (Golfito terrain).

Table 2. Vertical axis rotations uncovered in this research. Colon area, sites PAN 14 and PAN 17; Canal area, sites PAN 9 and PAN 5, PAN 2 and PAN 24; Chorotega direction is represented by site PAN 20 in El Valle area, and Golfito direction is represented by site PAN 13 of Azuero area.

Sites	Dec (°)	alfa95	Rotation (°)	Uncertainty (±)
PAN 14	264.6	3.5150278	81.7	13.3066441
PAN 17	346.3	12.8339922		
PAN 9	177.7	3.40703838	56.8	11.74946905
PAN 5	120.9	11.2446482		
PAN 2	183.4	10.3318496	36.4	11.26106642
PAN 24	147	4.47934145		
Chorotega	351.3	6.17570422	44.5	27.29629938
Golfito	306.8	26.5885057		

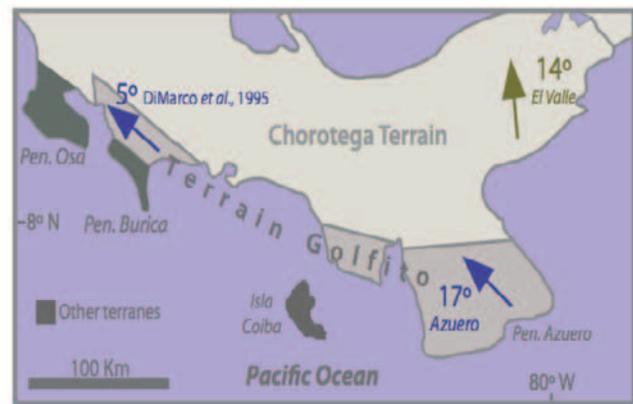


Figure 4. Counterclockwise vertical axis rotation of the ‘Golfito’ terrain with respect to the ‘Chorotega’ terrain.

Table 3. Paleolatitudes of the Panama arc for two sites in the Colon area.

Sites	Inc (¼)	alfa95	Paleolatitude	Uncertainty (±)
PAN 15	-20.8	10.9	10.8¼ S	10.9¼
PAN 17	13.1	12.5	6.6¼ N	12.5¼

Directions isolated for Colon and the Canal area, suggest a counterclockwise vertical axis rotation tendency of the Panama Isthmus. Vertical axis rotation of the Colon area is $81.7^\circ \pm 13.3^\circ$ (Table 2, Figure 2) and $56^\circ \pm 11.7^\circ$ in the Canal area (Table 2, Figure 3). An average of a direction from one site in Azuero and a direction from one site of the ‘Golfito’ terrain [10], compared with the direction isolated for ‘Chorotega’ terrain (El Valle), suggest a counterclockwise vertical axis rotation of $44.5^\circ \pm 27.3^\circ$ of the ‘Golfito’ terrane compared with the ‘Chorotega’ terrain (Table 2, Figure 4).



Modified from Coates et al., (1992) and Hoernle et al., (2002)

Figure 5. New paleomagnetic areas in order to have better resolution about rotations and translations in the Panama volcanic arc.

5. CONCLUSIONS

Directions of El Valle area show the best grouping before tilt correction, indicating an actual magnetic field direction. Furthermore, the directions isolated in this area indicate a non-rotated block since Upper Miocene (age of the oldest site of this area, PAN 18).

Directions from Colon uncovered in Cenozoic volcanic rocks, at north of the Rio Gatun Fault, indicate a counterclockwise vertical axis rotation due to the Rio Gatun sinistral fault (Figure 2; Table 2). A similar rotation is shown in the Canal area, in basaltic dikes and tuffs of Middle Miocene units (Figure 3; Table 2). The magnitude of the rotation is greater in the Colon area than in the Canal area.

Two sites of Colon area allow us to calculate a VGP for Paleocene and Oligocene rocks. These two VGP indicate that the Panama Volcanic Arc was formed at southern latitudes since Paleocene Paleolatitudes of two sites in Colon area (Table 3), indicate a 10.8° S latitude for a Paleocene site and a 6.6° N latitude for an Oligocene site. It means that the northward translation of the Panama Volcanic Arc was since Paleocene (or before) until the Oligocene, and after Oligocene, there is not major latitudinal movement of the mentioned arc.

6. RECOMMENDATIONS

In order to get more confidence about the rotations and translations is necessary to get more

samples in other locations of the Panama Isthmus.

Following that idea, other areas have been sampled along the eastern Caribbean coast (Kuna Yala), and upstream along Mamoni and Terable rivers (Figure 5). Collected samples are volcanic rocks of the ophiolitic complex (Early Arc), and other associated bedded sedimentary rocks, with age ranging between Upper Cretaceous to Paleocene.

This new data will allow us to determinate events of rotation and trace paleolatitudinal path of the Panama Volcanic Arc more accurately.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from Senacyt (Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Panamá). Staff researchers and postDoc fellows of the Smithsonian Tropical Research Institute. All the researchers of the Corporación Geológica ARES, specially Andrés Valencia. Dr. James Channel and Dr. Kainian Huang of the Paleomag Lab in the University of Florida. Very useful comments from David Farris and Agustín Cardona.

8. REFERENCES

- [1] Coates, A., Jackson, J., Collins, L. S., Cronin, T., Dowsett, H., Bybell, L., Jung, P., Obando, J., "Closure of the Isthmus of Panama: The near-shore marine record of Costa Rica and western Panama" *Geological Society of America Bulletin*, v. 104, p. 814-828, 1992.

- [2] Kellogg, J. & Vega, V., "Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity", in Mann, P., ed., *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 295, p. 75 – 90, 1995.
- [3] Hoernle, K., van den Bogaard, P., Werner, R., Lissinna, B., Hauff, F., Alvarado, G. & Garbe-Schonberg, D., "Missing history (16-71 Ma) of the Galápagos hotspot: Implications for the tectonic and biological evolution of the Americas", *Geology*, Vol. 30, No. 9, 795-798, 2002.
- [4] Kirby M.X., Jones D.S. & MacFadden B.J., "Lower Miocene Stratigraphy along the Panama Canal and Its Bearing on the Central American Peninsula", *PLoS ONE* 3(7): e2791. doi:10.1371/journal.pone.0002791, 2008.
- [5] Silver, E., Reed, D., Tagudin, J. & Heil, D., "Implications of the North and South Panama thrust belts for the origin of the Panama orocline", *Tectonics*, Vol. 9, No. 2, 261-281, 1990.
- [6] Kirschvink, J., "The least-squares line plane and the analysis of palaeomagnetic data", *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 62, 699-718, 1980.
- [7] Zijdeveld, J.D.A., "A.C. demagnetization of rocks: analysis of results" in Collinson, D.W., Creer, K.M. & Runcorn, S.K. eds., *Methods in Paleomagnetism*, Elsevier, New York, pp. 254-286, 1967.
- [8] Fisher, R.A., "Dispersion on a sphere", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A217*, 295-305, 1953.
- [9] Demarest, H., 1983, "Error analysis for determination of tectonic rotation from paleomagnetic data", *Journal of Geophysical Research* 88, 4321-4328, 1983.
- [10] Di Marco, G., Baumgartner, P.O. & Channell, J.E.T., "Late Cretaceous - Early Tertiary paleomagnetic data and a revised tectonostratigraphic subdivision of Costa Rica and western Panama" In: Mann, P. (ed.). *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*. 1-27, 1995