

Complejo de métodos geofísicos para caracterizar zonas de fallas en el casco urbano de Managua y sus alrededores.

Complex of geophysical methods to characterize fault zones in the urban area of Managua and its surroundings.

Rosalba Silva Soza¹

¹ORCID 0000-0003-1212-6658, metcatarossylva@gmail.com

¹Dirección de Meteorología Sinóptica-Dirección aeronáutica y CCTR. Dirección General de Meteorología. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Managua, Nicaragua.

Recibido: 02/07/2024
Aceptado: 20/10/2024

© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución- NoComercial-CompartirIgual](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen

La investigación comprende la aplicación de tres métodos geofísicos en algunas zonas de Managua para tratar de caracterizar el estado geológico estructural del lugar donde se encuentran ubicadas las fallas conocidas y cuantificar parámetros aun no establecidos. Hasta antes del año 2004 eran pocos los sitios evaluados con metodología geofísica y con éxito en la localización de fallas geológicas comprobadas por medio de excavación de trincheras de acuerdo con la normativa vigente. Se plantea la existencia de la relación entre los factores geométricos de una zona de falla con los puntos característicos de las curvas de anomalías de los campos que ocurren sobre estas zonas. Se utilizaron los métodos electromagnéticos Very Low Frequency (VLF), Perfilaje Eléctrico Simétrico (PES) y Campo Magnético Total. Se realizaron seis perfiles de los sitios estudiados en donde se describieron las relaciones de los métodos aplicados con las estructuras geológicas. Cualitativamente se relacionan los campos físicos con las litologías presentes y se concluyó que existe una relación directa entre cada una de las anomalías obtenidas por los métodos propuestos con los parámetros geométricos de las fallas, tales como puntos de inflexión, ancho y salto de la anomalía con la falla estudiada.

Palabras clave: Métodos geofísicos, fallas geológicas, curva de anomalías, parámetros geométricos de las fallas.

Abstract

The research includes the application of three geophysical methods in some areas of Managua to try to characterize the structural geological state of the place where the known faults are located and quantify parameters not yet established. Until 2004, there were few sites evaluated with geophysical methodology and with success in locating geological faults proven by excavating trenches in accordance with current regulations. The existence of the relationship between the geometric factors of a fault zone with the characteristic points of the anomaly curves of the fields that occur over these zones is proposed. The electromagnetic methods Very Low Frequency (VLF), Symmetric Electrical Profiling (PES) and Total Magnetic Field were used. Six profiles of the studied sites were made where the relationships of the applied methods with the geological structures were described. Qualitatively, the physical fields are related to the present lithologies and it was concluded that there is a direct relationship between each of the anomalies obtained by the proposed methods with the geometric parameters of the faults, such as inflection points, width and jump of the anomaly with the fault studied.

Keywords: Geophysical methods, geological faults, anomaly curve, geometric parameters of the faults.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances alcanzados recientemente en la prospección geofísica para la detección y localización de fallas cubren un amplio espectro, el estudio continuo ayudará a comprender mejor los procesos geológicos involucrados, entre ellos los movimientos telúricos que poseen una relación directa con las condiciones geodinámicas, estructurales y parámetros geométricos del subsuelo. Nicaragua, a lo largo de su historia ha enfrentado varios eventos sísmicos que estuvieron asociados a la interacción de las Placas Tectónicas y a la Cadena Volcánica de la Costa del Pacífico. La ciudad capital es una de las zonas más afectadas, debido a que está ubicada sobre el eje de la cadena volcánica de Nicaragua y en un sector de desplazamiento N-S de esta, siendo estos eventos causados por las fallas activas, las cuales poseen una orientación preferencial NE-SW (Figura 1).

El presente trabajo resalta la importancia de obtener más información sobre las zonas de fallas conocidas de Managua para poder caracterizar las que no han sido estudiadas. Con la aplicación conjunta de un complejo de métodos geofísicos se propone la implementación de métodos electromagnéticos: Very Low Frequency (VLF), Perfilaje Eléctrico Simétrico (PES) y Campo Magnético Total; con el análisis integral de la respuesta se pretende encontrar una correlación entre los campos medidos, es decir entre las variaciones o anomalías y la caracterización de los parámetros geométricos de las zonas de fallas, y así definir una estrategia para el estudio de fallas. El área de estudio se encuentra en el Departamento de Managua, en la cuenca sur del Lago Xolotlán o de Managua; y los sitios fueron: La Cuesta del Plomo; Costado Sur del Colegio Americano; Costado Norte de la Universidad Iberoamericana de Ciencia y Tecnología

(UNICIT); Urbanización Portal del Carmen; Costado Sur del edificio de Claro, Las Jagüitas y Boquerón-Mateare.

Figura 1

Principales fallas ubicadas en la ciudad de Managua.



Nota

Las fallas Los Bancos, Tiscapa, Chico Pelón, Zogaib y Escuelas se activaron durante el terremoto de Managua en 1972. Fuente: <https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/sis/proyectos/micromana/3-geologia-resx.htm>

Antecedentes

Antes del año 2000; eran pocos los sitios evaluados utilizando la metodología geofísica en la localización de fallas geológicas comprobadas por medio de excavación de trincheras de acuerdo con la normativa vigente. En el siglo pasado, los estudios más prominentes fueron realizados por McBirney y Williams (1965), ellos presentaron una revaloración de los datos de la estructura geológica, tectónica y volcanismo del país hasta esa fecha. Después del terremoto de Managua en 1972, la empresa consultora especialista en geotectónica Woodward-Clyde Consultants (1975), realizaron estudios y presentaron una descripción de las fallas y les asignaron sus respectivas denominaciones, parámetros y características. Tal es el caso del área entre la Pista Suburbana, Colegio Americano y la Universidad Iberoamericana de Ciencia y Tecnología (UNICIT); que fue relacionada según Woodward-Clyde Consultants (1975) y por Johnson & Associates (1977), con el sistema de fallas Zogaib-Chico Pelón.

Sin embargo, debido a los procesos geotécnicos constantes que se registran en Nicaragua, y a la tendencia crecimiento urbano de la ciudad de Managua a inicios de este siglo, se llevaron a cabo estudios más exhaustivos para encontrar zonas de fallas. Estudios realizados por Martínez B. (1999); entre el sector de Las Jagüitas, Reparto Las Colinas y la III Etapa del Reparto Schick, se encontró con cuatro zonas de fallas relacionadas a Fallas Las Colinas-Aeropuerto.

En el desarrollo del proyecto Urbanización El Rodeo ubicado en las proximidades de Estancia Santo Domingo, se encontraron áreas con desplazamientos en fallas superficiales pertenecientes a la Falla Las Colinas, según Rodríguez y González (2000). Con el Proyecto Centro Comercial Terranova ubicado en la esquina suroeste del empalme de la carretera Managua-Masaya y la Pista Jean Paul Genie, se hallaron zonas anómalas que coinciden con zonas de fallamiento (Moreno y González, 2002).

En el estudio realizado por Rodríguez y González (2002) para el Grupo Inmobiliario de Desarrollo Sociedad Anónima (GIDSA) en el proyecto denominado Urbanización Jacarandas ubicado a unos 1,300m al suroeste del kilómetro 13 de la carretera Managua-Masaya, se identificaron cuatro zonas anómalas una de las cuales fue comprobada como activa, la cual es una rama de la falla Ticuantepe. En ese mismo año, el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales-INETER, presentó el informe técnico "Actualización del Mapa de Fallas Geológicas de Managua"(2002), el cual fue el resultado de una exhaustiva recopilación de la bibliografía existente relativas a las fallas.

Durante el desarrollo del Proyecto de Urbanización Portal del Carmen localizado a unos 700 m al sur del borde sur de la Pista Jean Paul Genie, alrededores de Villa Fontana, los consultores Rodríguez y González (2003), encontraron tres estructuras que coinciden con la Falla Centroamericana.

Marco Geológico-Tectónico

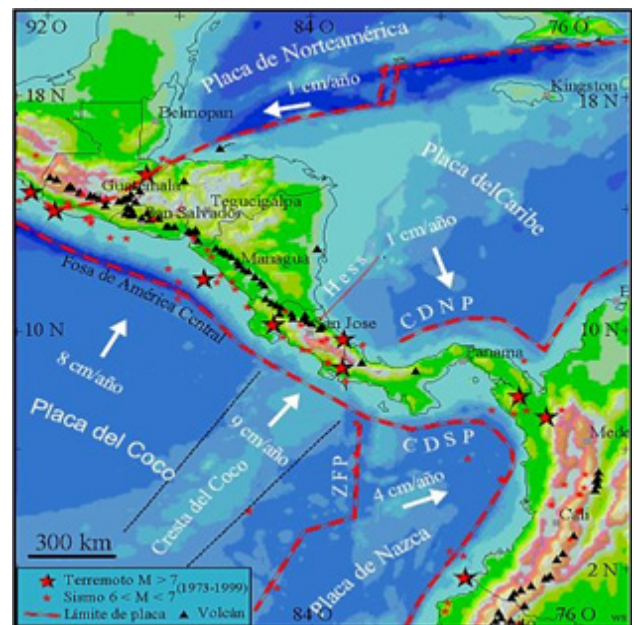
Nicaragua se ubica en la zona de subducción activa; donde la Placa de Cocos subduce a la Placa del Caribe a lo largo de la fosa Mesoamericana en el suroeste de Centroamérica (Figura 2). Es decir, la Placa del Caribe consume corteza oceánica por sus dos extremos, al oeste en la trinchera Mesoamericana a lo largo de Centroamérica y al este en el piso del Atlántico en la trinchera de Puerto Rico que bordea el arco de islas de las Antillas Menores. Las Placas tectónicas Cocos y Caribe chocan en la zona frente a la costa del Pacífico de Centroamérica, formando así la cadena volcánica a lo largo de toda esta región.

Geológicamente Nicaragua se caracteriza por cuatro provincias (McBirney and Williams, 1965) las cuales se originaron en el Paleozoico (Pz) y culminaron con la intensa actividad volcánica del principio del Cuaternario (Q); donde cada provincia está diferenciada por su geología, historia, tectónica, geomorfología, estratigrafía y litología. Sin embargo, estudios posteriores realizados por Hodgson, G (2000), determino que Nicaragua estaba dividida en cinco provincias geológicas, nombradas de la siguiente forma: Provincia de la costa del Pacífico; Provincia de la Depresión de Nicaragua; Provincia Central, Provincia del Norte y la Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica.

La capital Managua se localiza en la porción central de la Provincia Depresión de Nicaragua, dentro de una estructura tectónica menor denominada "Graben Managua" poco profundo y con dirección NW-SE. Es considerada una estructura secundaria, con las mismas características y origen de la estructura principal; es reciente, activa y de tipo extensional. La apertura del graben inicia a finales del Terciario (Mio-Plioceno) conti-

Figura 2

Mapa geotectónico de Centroamérica y el Caribe.



Nota. Las flechas blancas indican dirección y velocidad del movimiento.

Fuente: <https://webserver2.ineter.gob.ni/tect/tect-placas.html>

nuando hasta la actualidad (McBirney y Williams, 1965), y es rellenada por una espesa secuencia de depósitos volcánicos, volcanoclásticos, aluviales y lacustres (Woodward-Clyde Consultants, 1975).

El graben se ubica al sur del lago Xolotlán, limitado al oeste por el lineamiento Nejapa-Miraflores, al este por el sistema de Fallas de Cofradías; con unos 40 km de longitud en dirección N-S que consiste en fallas normales escalonadas; a su vez está afectado por una serie de fallas menores activas de tipo normal con rumbo general noreste, según los estudios de Brown et al. (1973) realizados en la parte central de la ciudad de Managua después del terremoto del 1972, obtuvieron que la densidad de fallamiento era de 0.73km⁻¹ y la cual disminuye hacia el este. Al norte el graben se pierde dentro del lago y en el sector suroeste es limitado por la Falla Mateare y Falla Las Nubes; hacia el sur el límite se encuentra dentro de las calderas de Las Sierras. Entre las fallas que se hallan en el área de Managua se tienen la Falla Tiscapa, Falla Aeropuerto, Falla San Judas, Falla Zogaib y otras (Garayar 1976).

El origen del graben está relacionado con una cuenca de extensión (pull apart) como consecuencia de la segmentación del frente volcánico en un ambiente de deslizamiento direccional, representado por el lineamiento Nejapa, y que forma parte del complejo de estructuras menores de graben y horts (Martínez 1992). Según Hodgson (1984), la ciudad de Managua se localiza geológicamente entre las siguientes estructuras:

1. Dentro de la parte occidental del Graben de Nicaragua, por consiguiente, dentro del sistema de fallas que la originaron.
2. En el eje de la prolongación suoriental de la cadena de volcanes activos de Los Marribios.
3. Dentro y al lado oriental del lineamiento volcánico Nejapa.
4. En el fallamiento escalonado del sistema Managua.
5. Dentro y al lado occidental del sistema de fallas de Cofradía.

Las fallas principales que atraviesan la parte central del Graben de Managua tienen pocos kilómetros de longitud (Figura 3). Dentro de él se encuentran fallas orientadas según dos conjuntos conjugados: N-S y NE-SW (Woodward-Clyde Consultants, 1975). Sin embargo, existen lineamientos NW-SE.

Las fallas con orientación N-S generalmente tienen forma de arco, con dirección paralela a estructuras mayores relacionadas con colapsos volcánicos y presentan desplazamientos de tipo normal. Esto sugiere que dichas fallas están relacionadas en el tiempo y espacio con el fenómeno de subsidencia del graben.

La ciudad de Managua sobre yace a depósitos piroclásticos porosos permeables y sueltos de edad Reciente (Holoceno-Pleistoceno) del Grupo Managua intercalados por suelos fósiles, aluviales y residuales; los cuales reposan a su vez sobre el Grupo Las Sierras que es más antiguo y en él se reconocen ignimbritas, ondas piroclásticas, etc.

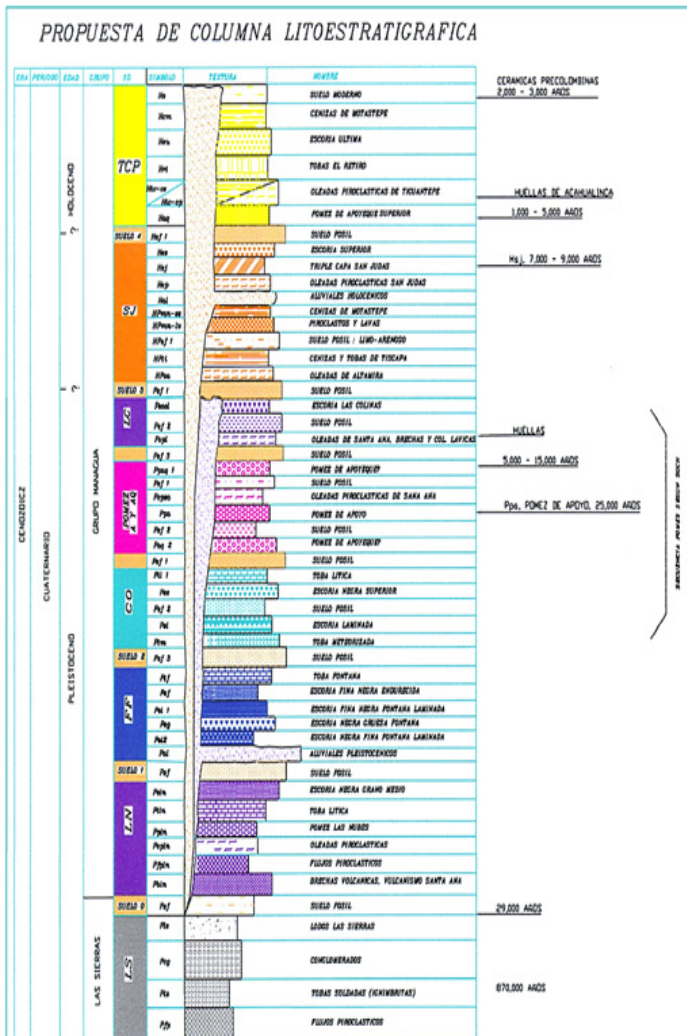
Figura 3
Algunas de las principales fallas activas de Managua y ubicación de sitios de estudio.



Nota. Redibujado de Woodward and Clyde Consultants (1975).

Los depósitos volcánicos son materiales procedentes de la actividad volcánica (holocénica) de las estructuras cercanas Apoyeque, Xiloá, Tiscapa, Nejapa, Motastepe, etc., mientras tanto las piroclásticas provienen de las calderas de Masaya y Apoyo. La siguiente figura 4, se presenta una columna estratigráfica más representativa del área de Managua.

Figura 4
Propuesta de columna estratigráfica generalizada de Managua y alrededores. Elaborada por Rodríguez y Montenegro (2002), en base de Kuang (1971), Woodward-Clyde (1975), Hodgson (1984), Bice (1985), Jica (1993), Hradecky et al. (1997).



Fuente: Actualización del Mapa de Fallas Geológicas de Managua, Informe Técnico. INETER (2002).

Marco Teórico- Metodológico

Método Eléctrico: Perfilaje Eléctrico Simétrico (PES)

La principal característica física que se determina con el método eléctrico es la resistividad eléctrica (ρ); determinando las variaciones del potencial eléctrico creados al comunicar una corriente continua al terreno. Todos los métodos eléctricos son sensibles para la resistividad y aplicados a la superficie terrestre, detectan la resistividad eléctrica total de un volumen de roca situada a cierta profundidad (in situ); así mismo, este puede presentar diferentes resistividades con el tiempo dependiendo de factores como la temperatura o la humedad, siendo este último el más determinante.

Con el PES se obtienen las variaciones laterales de resistividad del subsuelo a una profundidad casi constante de investigación. Entonces, para que exista anomalía, es necesario que se presente un contraste apreciable entre la estructura y el medio que le rodea; por lo tanto, este método es adecuado para la detección de contactos verticales, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad. Según Orellana (1972) la zona explorada en el perfilaje se extiende desde la superficie hasta más o menos una profundidad constante, en función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos.

La resistividad es una propiedad eléctrica fundamental de los materiales rocosos relacionada estrechamente con su litología, en función de una variable relacionada con la profundidad de penetración. Los factores, que determinan la resistividad eléctrica de una roca, son los siguientes:

1. Porosidad.
2. Composición química del agua, que llena los espacios porosos de la roca, como su salinidad, por ejemplo.
3. Conductividad de los granos minerales, aún en la mayoría de los casos es un factor mucho menos importante en comparación a los dos factores anteriores.

El rango de resistividad eléctrica de las rocas es amplio y se extiende desde 10-2 a 108 Ω m a mayor. Las rocas y minerales son conductores: buenos $\rho < 1,0 \Omega$ m; intermedios $\rho = 1 - 100 \Omega$ m y pobres, cuando $\rho > 100 \Omega$ m,

Medida de la Resistividad: Configuración de electrodos y procedimiento

La resistividad aparente (función de repuesta) ρ_a se evalúa o se estima a partir de las mediciones realizadas en la superficie. Para ello se utilizó el dispositivo tetraelectrónico lineal en el Arreglo Wenner (Figura 5); partiendo de sus respectivos dispositivos bases, la metodología de campo del perfilaje, consiste en desplazar los cuatro electrodos AMNB a la vez, manteniendo la separación entre electrodos constante a lo largo del perfil de medición; esta distancia se denota por "a".

El valor obtenido de la resistividad se asigna al centro del dispositivo, correspondiente a un factor geométrico del dispositivo. El valor obtenido de la resistividad se asigna al centro del dispositivo, correspondiente a un factor geométrico del dispositivo que según la ecuación (1) está dado por:

$$K = 2\pi a$$

El equipo utilizado para realizar las mediciones de la resistividad en las zonas de fallas es un TERRAMETER SAS-300 de fabricación sueca (Figura 6).

Figura 5
Diagrama del arreglo tetraelectrónico Wenner.

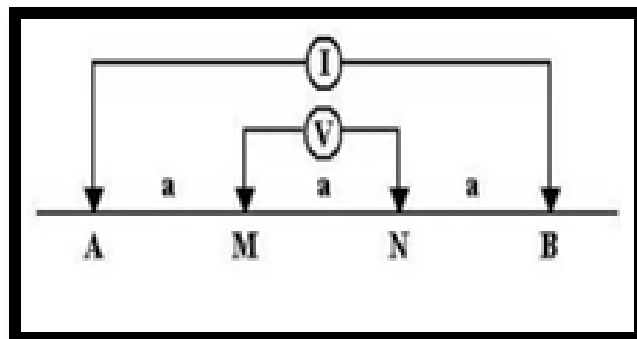
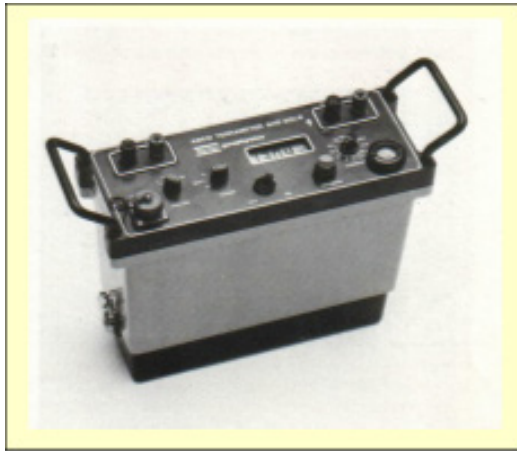


Figura 6

Equipo TERRAMETER SAS-300; fabricado por ABEM (Suecia).



Método Magnético

La Tierra genera un campo magnético en el rango de aproximadamente 30.000 a 65.000nT.; este campo en cualquier punto terrestre es una cantidad vectorial teniendo magnitud y dirección. En un punto cualquiera, el campo magnético puede definirse por su componente horizontal H y vertical Z, su inclinación I su declinación D.

Los elementos magnéticos son representados en forma de mapas de isolíneas, por lo tanto, en un mapa magnético presentará la distribución del campo en superficie a través de líneas isomagnéticas a lo largo de las cuales el elemento mapeado tiene un valor constante. Son notables los cambios continuos del campo magnético terrestre con el tiempo; estos cambios son de varios tipos, hay cambios progresivos lentos, que se desarrollan a lo largo de siglos y que por ello se llaman variaciones seculares; hay también un ciclo diario de variación; la variación diurna, con componentes lunares y solares; por último, existen también variaciones súbitas de gran escala, que se conocen con el nombre de tormentas magnéticas.

El campo geomagnético no es constante, sino que sufre variaciones con el tiempo y con respecto a su forma; estas variaciones laterales y verticales del campo magnético total se denominan anomalías, las que permiten discernir acerca de la existencia de cuerpos y estructuras localizadas en el subsuelo.

Los métodos magnéticos se basan en la detección de variaciones del campo magnético local debidas a la presencia de estructuras asociadas a formaciones geológicas. Estas se pueden localizar porque poseen un campo magnético propio, el que es muy débil generalmente, pero genera una perturbación local que es medible en el campo magnético de la Tierra.

Tales perturbaciones son las anomalías magnéticas y son medibles a causa de la imanación inducida o remanente de los materiales; y estas se presentan a través de las características magnéticas de las rocas, que a su vez se clasifican con base en la susceptibilidad de sus momentos magnéticos; debido a las diferentes cantidades de minerales ferromagnéticos que contiene cada roca, las cuales contrastan con el campo magnético de la Tierra. Las principales propiedades magnéticas de las rocas son:

- La susceptibilidad magnética (κ) es la propiedad física que nos indica el grado de magnetización de los materiales. Es un parámetro fundamental en la prospección magnética.

- El Magnetismo inducido es el magnetismo que adquieren los cuerpos cuando son colocados en un campo magnético. La magnetización inducida depende de la susceptibilidad magnética (κ) de una roca o de un mineral y del campo externo existente.

- La imanación remanente de una roca se refiere al magnetismo residual de la roca en ausencia de un campo magnético externo, la imanación remanente depende de la historia geológica de la roca.

Al someter a los materiales a un campo exterior se presentan tres fenómenos magnéticos, que determinan el comportamiento de las rocas:

- Diamagnetismo, el campo magnético en el interior de estos cuerpos es pequeño, por lo tanto, $\kappa < 0$; estos materiales se caracterizan por ser difícilmente o nada imantables.

- Paramagnetismo, en este las sustancias aparecen como no magnéticas, pero en presencia de un campo exterior se ordenan de forma que refuerzan la acción de este y presentan susceptibilidad $\kappa > 1$; este fenómeno depende de la agitación térmica de las moléculas y por lo tanto de

Figura 7

Magnetómetro de Precesión Protónica. Fabricado por GEM-Systems, Canadá.



la temperatura; además estos materiales paramagnéticos son fáciles de magnetizar.

- Ferromagnéticos, se presentan en sólidos interatómicos suficientemente grandes como para producir un paralelismo, ya que tienen la capacidad de mantener una imanación preferida sin la necesidad de estar en presencia de un campo magnético.

En la figura 7, se muestra el equipo utilizado fue un magnetómetro de precesión protónica GSM-18 de fabricación canadiense. El principio físico de este equipo es la resonancia nuclear magnética en la cual una muestra rica en protones contenida en una botella (sensor), se le aplica por un tiempo corto un campo magnético generado por la corriente en una bobina y los protones se alinean en dirección a él, cuando este campo se interrumpe, los protones giran o precesan alrededor del campo magnético de la tierra.

La velocidad angular de precesión de los momentos magnéticos de los protones crea en la bobina que se encuentra en el sensor una diferencia de potencial. La frecuencia de esta es medida y transformada a una medida de campo magnético a partir de la aplicación de la teoría giroscópica (Telford 1990, Parasnis 1997 y Breiner 1973).

Método VLF (Very Low Frequency)

El método VLF obtiene su nombre de sus siglas en inglés por señales de radio de muy baja frecuencia (Very Low Frequency), fue primeramente utilizado en la prospección mineral entre los años 1960 y 1966 con amplio uso (Paterson y Rönkä 1971). Este es un método electromagnético, que responde a las variaciones de la resistividad en el subsuelo hasta una profundidad de algunas decenas de metros, esto debido a las propiedades eléctricas que afectan el comportamiento de las ondas de radio de baja frecuencia. Este tipo de ondas son generadas por poderosas antenas transmisoras VLF, que operan y se ubican por todo el mundo (Figura 8). Al igual que los otros métodos electromagnéticos, el VLF puede ser utilizado para encontrar estructuras bastante inclinadas que difieren de sus alrededores con respecto a la resistividad eléctrica; tal es el caso de las fallas, las cuales pueden ser conductos de mineralización.

Un transmisor VLF consiste en un cable vertical de algunas centenas de m de longitud que emite una señal de transmisión muy poderosa entre 300-1000 kW. A través de sus antenas se hace circular una corriente alterna, generándose un campo electromagnético variable que se propaga en todas las direcciones y que puede ser detectado a miles de km de distancia desde la antena emisora. Las ondas electromagnéticas irradiadas tienen frecuencias en el orden de 15 a 30 KHz.

Para el campo magnético el vector es horizontal y está orientado perpendicular a la línea que une el punto de observación y el transmisor, mientras que para el campo eléctrico éste es vertical y perpendicular tanto a la dirección de propagación como al campo magnético primario, por tanto, los campos emitidos por estas antenas consisten en frentes de onda cir-

Figura 8

Localización de estaciones emisoras VLF.

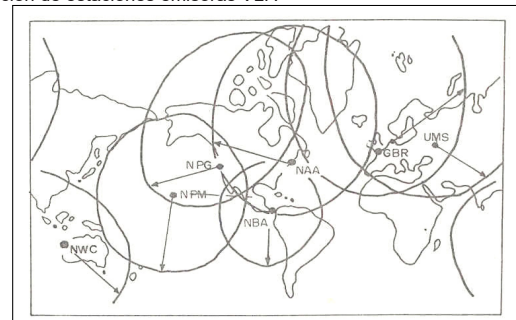
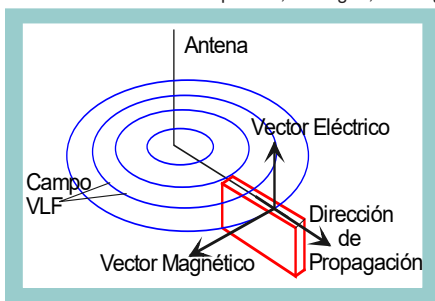


Figura 9

Diagrama esquemático del Principio de funcionamiento del VLF. Tomado de Apuntes del Primer Curso de Geofísica Aplicada, Managua, Nicaragua 1992.



culares que tienen por centro a la antena (Figura 9).

A largas distancias de la antena transmisora el campo puede ser considerado uniforme y dirigido en ángulo recto a la antena. Este campo primario, penetra la superficie del terreno y cuando encuentra un conductor se induce en éste cierta corriente que a su vez produce otro campo magnético y se denomina secundario. La componente del campo secundario en fase con el campo primario se denomina componente real.

Para el análisis de los datos de VLF, estos se pueden mejorar mediante la aplicación de procedimientos de filtrado. La aplicación de un filtrado es fundamental para obtener una fácil correlación entre la anomalía y la estructura. El filtro está diseñado para la supresión del ruido de los datos. Para obtener los resultados, se aplicará el Filtro de Karous-Hjelt (1983), su técnica de interpretación está basada en el filtrado lineal discreto de los datos VLF.

La salida de este filtro se expresa en términos de una densidad de corriente equivalente de corriente a una profundidad específica que reproduce las medidas del campo magnético. Este filtro de seis puntos convierte las anomalías VLF complicadas en curvas que son más fáciles de interpretar. Un máximo ocurre directamente por encima de la zona de fractura con una precisión del 8% haciéndola más fácil de ubicar.

En la interpretación de los datos de campo, los valores obtenidos deben alisarse antes de filtrarse. Es decir, filtrando los mismos datos para varias profundidades nos da una idea acerca de la variación de la densidad de corriente con la profundidad. La inversión de los datos mediante el filtrado lineal explica el perfil completo como una densidad de corriente equivalente distribuida a una profundidad constante. Sin embargo, se debe hacer énfasis en que la sección vertical no representa la verdadera distribución de densidad (Fraser, 1969), pero las posiciones de los máximos de la densidad de corriente siempre se encuentran en el interior de la estructura conductora.

El instrumento utilizado fue el ABE-WADI de fabricación sueca (Figura 10), este registra las razones en porcentaje de los campos vertical y horizontal en la superficie del terreno. Según el fabricante, la señal captada de la antena debe tener una intensidad entre 10 y 50.

Intensidades menores que 10 indican una señal muy pobre, en cambio señales con intensidades mayor que 50 indican un alto nivel de ruido o una antena muy cercana; en ambos casos las mediciones no son fiables. Dado que el campo primario emitido desde el transmisor es horizontal, es evidente que una lectura normal será cero. Una desviación de la lectura normal del WADI se denomina una indicación de anomalía o simplemente anomalía, entonces con este equipo se obtendrá características eléctricas del subsuelo.

Figura 10

Instrumento de medición VLF ABEM-WADI.



2. METODOLOGÍA

En cada sitio se trazó un perfil que oscila entre 100m y 25 m de longitud. La diferenciación en longitud de los perfiles se debe a: tipo de método geofísico a aplicar, accesibilidad al sitio y a la dirección de la estructura geológica establecida; tratando de orientar siempre el perfil perpendicular a dicha estructura. En la aplicación de algunos de estos métodos se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: evitar estar próximo a líneas telefónicas, cables de corriente eléctrica, estructuras metálicas y tomar la precaución de que al momento de realizar la lectura no exista influencia de vehículos.

Para la interpretación de los datos geofísicos se hizo uso de información adicional existente en los sitios de estudios. En la Tabla 1, se muestra una lista con las resistividades del Grupo Managua y unidades superiores del Grupo Las Sierras, que nos ayudara a relacionar los parámetros y las litologías con la ocurrencia de fallas y su comportamiento.

- En las mediciones eléctricas con el TERRAMETER SAS-300, para su revisión realizar mediciones de prueba y notar que la lectura permanezca constante.

- En las mediciones magnéticas revisar que el PROTON MAGNETOMETER GSM-18; esté funcionando en el rango correspondiente de intensidad que en nuestro caso es de 37500nT y que la carga de la batería tenga su valor requerido.

- Los datos obtenidos de las mediciones de resistividad aparente y campo magnético para su interpretación se graficaron usando el programa Golden Software Grapher; y se determinaron los gradientes de resistividad aparente y gradientes magnéticos; entre los valores máximos y mínimos, respectivos de cada anomalía. También se puede determinar un estimado para el ancho de la estructura, usando siempre ambos datos de los métodos aplicados.

- En las mediciones in situ de los parámetros geométricos de las fallas se logró determinar Rumbo (δ), el ancho (b) y el salto (h). Además, también se conoce la Inclinação del Campo magnético (I) en Nicaragua el cual es de $\pi/4$.

- A partir de las anomalías magnéticas se realizó la interpretación cuantitativa para determinar los otros parámetros geométricos faltantes de las fallas; para ello se toma el valor máximo ΔB (2) y el mínimo ΔB (1) de la anomalía que se localiza próxima a la falla estudiada y se calculan los siguientes parámetros geométricos (Parasnis, 1997):

- Posición lateral del borde del techo de la estructura, dada por $\Delta B = \Delta B$ (1) + ΔB (2).

- Profundidad "a" del borde, se determina a partir de x_1 y x_2 que denotan las coordenadas de ΔB (1) y ΔB (2) respectivamente. La relación está dada por $a = (-x_1 x_2)^{1/2}$.

- Los valores de k y buzamiento θ , para k se emplea una relación sencilla $k = 2a / (x_1 + x_2)$. El ángulo de buzamiento lo obtenemos de $\theta = 2I' - \tan^{-1}(1/k)$. Donde $I' = \tan^{-1}(\tan I / \sin \delta)$.

- La componente normal del flujo de densidad de la Tierra se calcula por la relación:

$B'_{0t} = B_{0t} (1 - \cos^2 I \cos^2 \delta)^{1/2}$, donde $B_{0t} = B_0$ y es el valor del Rango del campo magnético usado en las mediciones el cual fue de 37500nT.

- La estimación de la susceptibilidad magnética de las rocas presente en la estructura. La relación empleada es $\kappa = (2\pi C / bB'_{0t})$. (sen $I' / \sin I$).

- Para las mediciones con el método Electromagnético VLF con el equipo WADI, se debe primeramente buscar la antena transmisora VLF, la cual debe poseer una buena señal, esto lo observaremos por la intensidad percibida.

- Los datos obtenidos con el WADI-VLF, se procesaron con su programa de interpretación SECTOR de ABEM, que emplea el Filtro de Karous-Hjelt. El gráfico filtrado presenta la parte real e imaginaria del perfil seleccionado. Para la interpretación de los datos filtrados fijaremos nuestra atención sobre las curvas de la parte real positiva. La zona de falla se identifica por la curva real filtrada con picos máximos positivos justo encima de la estructura, calculando la profundidad de la densidad de corriente, a la cual se desee filtrar. Además, se puede extraer la información referente al ancho de la estructura y de su posición a lo largo del perfil con respecto a la horizontal.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan las principales características y relaciones entre las anomalías del complejo de métodos geofísicos utilizados para la correlación con las estructuras geológicas. Las figuras siguientes corresponden a los resultados obtenidos en cada perfil gradientes resistivos y magnéticos y porcentajes de campo de las anomalías VLF; que se

Tabla 1
Rango de Resistividades de las Principales Formaciones de Managua.

Edad	Grupo F	Formación G	Granulometría	Resistividad $\Omega.m$		Características	
				Promedio R	Rango de Var.		
H O L O C E N O	M	Toba El Retiro Hrt	Suelo limo arenoso	70	15 – 200	Variación baja por meteorización y fracturamiento	
		Flujo de Lodo Hmf	Arenas gruesas y finas	4.6	3.5 – 5	Baja resistividad por alto contenido de sales	
		Suelo Fósil Hfs	Grano fino Suelo limo-arenoso	150	40 – 320	Altos valores a suelos con altos contenidos de clastos de pómez; menores valores a suelos arcilloso-limoso	
	A	N	Pómez de Apoyeque Haq	Pómez blanca entre granos finos a medio	3500	1700 – 4700	Altos valores por contenidos de sílice
				San Judas (Distribución BIMODAL) Hsj	Grano grueso	300	100 – 500
	H-P	A	G	Grano fino	1000	600 – 1400	Delgada capa de ceniza negra existente en su base
				Suelo Fósil Pomáceo HPfs	Grano fino Suelo limo-arenoso	45	5 – 110
	P L E I S T O C E N O	U	A	Grano fino	1200	800 – 1500	Valores correlacionados con los tamaños de granos de ceniza y lapilli
				Black Lapilli (Distribución BIMODAL) Pbl	Grano grueso	330	
		Pómez de Apoyo	G	Papu G	Grano grueso	7700	6000 – 9000
Papm				Grano medio y fino	1300	520 – 2600	Valores correlacionados a presencia de sílice
Papi G				Grano fino	300	200 – 500	Valor relacionado con Suelo Limo-arenoso y húmedo
?		TQs	Escoria Lapilli de Fontana Pf	Grano grueso en la base y en el techo facies más finas	3600	1100 – 8000	Altos valores debido a minerales máficos y granulometría de lapilli
				Suelo Fósil Pomáceo Pfs	Granos medios	45	30 – 60
?	TQs	Flujo de Lodo Pmf	< Compacto	70	50 – 90	Su valor se debe a más compacto más resistivo	
			Compacto	120	90 – 140		

Fuente: Adaptado de Cuadra (2001).

consideraron para la determinación de los parámetros de las fallas: buzamiento, techo, ancho y susceptibilidad. Además, se muestran algunas fotografías que permiten apreciar los elementos geométricos de la falla.

1) Perfil Cuesta El Plomo

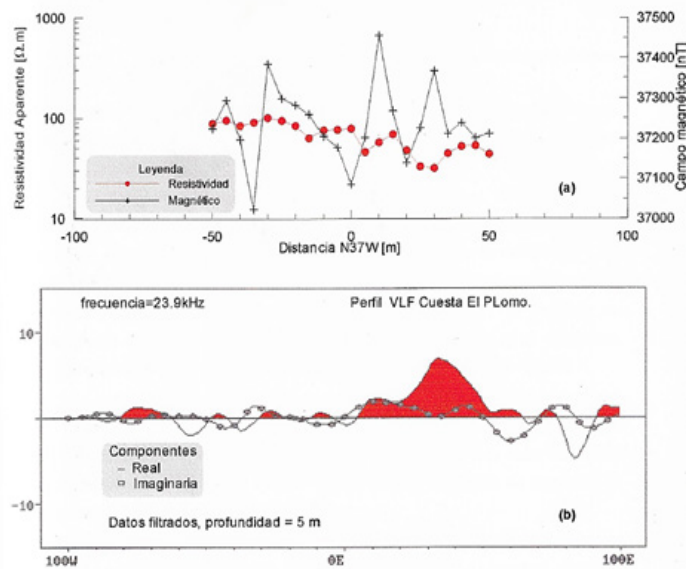
Este sitio se localiza en el Km 11 carretera Nueva a León avanzando hacia la Refinería en plena curva de la pendiente. El punto "O" posee las coordenadas UTM 573035E/1343550N. El perfil trazado tiene un rumbo N77°E. Las mediciones VLF, magnetometría y resistividad se realizaron en el costado sur de la carretera. Un corte de la carretera en este sector muestra que la falla es tipo normal con rumbo N37°W; y se observan diversas fracturas y fallamiento. A 60cm al este del plano de falla se encuentra un mojón de camino y por razones de comodidad se tomó como

punto de origen de coordenadas.

En la Figura 11 (a) se presentan las curvas de resistividades y campo magnético total; (b) se muestran las curvas VLF de las componentes reales e imaginarias filtradas para una profundidad de 5m; en (c) se observa una vista hacia el sur del corte de la carretera en la Cuesta del Plomo donde claramente se indican los elementos geométricos de un pequeño graben destacándose el plano del borde oriental el cual se ubica 60cm al oeste de la estación O del perfil. Debe notarse, que en la foto el oeste se encuentra hacia la derecha.

La curva de resistividad presenta cuatro máximos y tres mínimos, lo mismo hace la curva magnética. A simple vista el plano oriental del graben anterior coincide con los puntos de inflexión de las curvas de resistividad

Figura 11
Perfil Cuesta El Plomo.



(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total.
(b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria.
(c) Vista hacia el sur de corte de carretera. Falla en estación 0.6W

y de campo magnético total. El plano de falla del borde oriental coincide con la estación O y el punto de inflexión de la anomalía resistiva. El gradiente es equivalente a una resistencia eléctrica de 6.5. Las otras anomalías seguramente corresponden a otras fracturas y fallas observables en el perfil. Alrededor de la estación 0 se observan dos puntos de inflexión ubicados, el primero 5m al este y el segundo 5m al oeste los cuales están asociados a planos de fallas. Dentro de este segmento se encuentra el graben mostrado en la Figura 11 (c).

La componente real filtrada a una profundidad de 5m no presenta anomalía en la estación O, sino que lo hace con una pequeña anomalía menor de 1%, la cual se ubica aproximadamente en la estación 6 oeste. Y una anomalía de 2.5% en la estación 11E, la cual está asociado al fallamiento que dio lugar al graben observable próximo a la estación O. Esto explica el aparente desplazamiento de la anomalía respecto a la falla. Además, ocurren anomalías en las estaciones 75, 45 y 27W, con intensidades de menores que 1.5%. Hacia el este se observan otras anomalías en la que destacan la de la estación 35E con una amplitud de 7%. La amplitud de las otras anomalías es menor; sin embargo, todas están asociadas con el fallamiento.

Debe notarse que la proximidad inmediata a la estación 35E se observaron fuertes agrietamientos verticales con salbandas de 10cm o más cm, pero sin desplazamiento vertical visible. Más allá del perfil medido existen otras fallas escalonadas en las que el bloque descendente es el oriental (Figura 12).

2) Perfil Colegio Americano

Este sitio se localiza en el costado norte de la Pista Suburbana, el punto cero posee las coordenadas UTM 578594E/1338476N, el perfil trazado tiene un rumbo N86°E. Las mediciones de VLF, campo magnético y de resistividad se tomaron en el costado sur de la carretera. En la estación O

Figura 12
Falla en el extremo oriental de la Cuesta El Plomo.



Fuente: Foto G. González, 2000.

de este perfil se ubicó una falla normal cuyo desplazamiento vertical es de 20cm, siendo el bloque occidental el que descende. La falla estudiada posee un rumbo de N37°E, es visible en los cortes de las elevaciones de la Pista Suburbana.

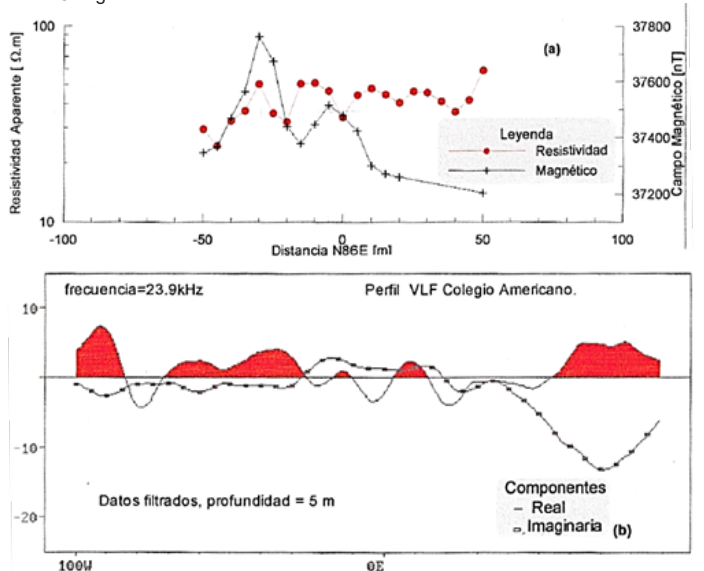
En la Figura 13 (a) se presentan las curvas de resistividades y campo magnético total; en (b) las curvas VLF de las componentes real e imaginaria filtrada para una profundidad de 5m. En la (c) una vista hacia el norte del corte de la Pista Suburbana y en el costado sur del Colegio Americano donde claramente se indican los elementos geométricos de una falla normal cuyo plano de se ubica en la estación 0 del perfil.

En la figura 13 (a), notamos que la resistividad presenta pequeñas variaciones a lo largo del perfil. Un mínimo resistivo ocurre en la estación O coincidente con el plano de la falla observado en la Figura 13 (c). Los puntos de inflexión alrededor de este mínimo se encuentran en las estaciones 5W y 5E, lo cual indica un ancho anómalo de 10m. Otros mínimos ocurren en las estaciones 20W y 40E.

La curva magnética indica un punto de inflexión en las estaciones 25W, 10W y 5E, respectivamente. Esto es indicativo de un desplazamiento del punto de inflexión magnético 5m al este del plano de falla presentado en la Figura 13 (c). El punto de inflexión 25W magnético y mínimo resistivo coincide con el borde oriental de una depresión que pasa por la cancha de voleibol del Colegio Americano. En términos generales existe una relación entre la simetría de la curva magnética y la inclinación de la estructura o plano de falla. Alrededor del punto de inflexión la rama que se levanta coincide con el lado del bloque descendente de la falla.

La componente real filtrada a una profundidad de 5m no presenta anomalía en la estación O, sino que lo hace en la estación 8E con una amplitud de 2.3%. En la estación 35W ocurre un máximo relativo con amplitud de 3.4%. Otro máximo ocurre en 63W correspondiente los dos a una misma estructura con un ancho de 50m que podría asociarse con la continuidad

Figura 13
Perfil Colegio Americano.





(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total.
 (b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria.
 (c) Vista hacia el Norte Pista Suburbana. Falla en estación O.



(c)

(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total
 (b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria
 (c) Fracturas de la falla Zogaib. Foto tomada de González y Rodríguez (1999).

hacia el sur de la falla Tiscapa.

Al final del perfil ocurre una anomalía incompleta, representada por una doble estructura con una amplitud alrededor del 5% que podría estar asociada a la continuidad hacia el sur de la falla Chico Pelón. La zona anómala en este sector tiene aproximadamente 35m de ancho.

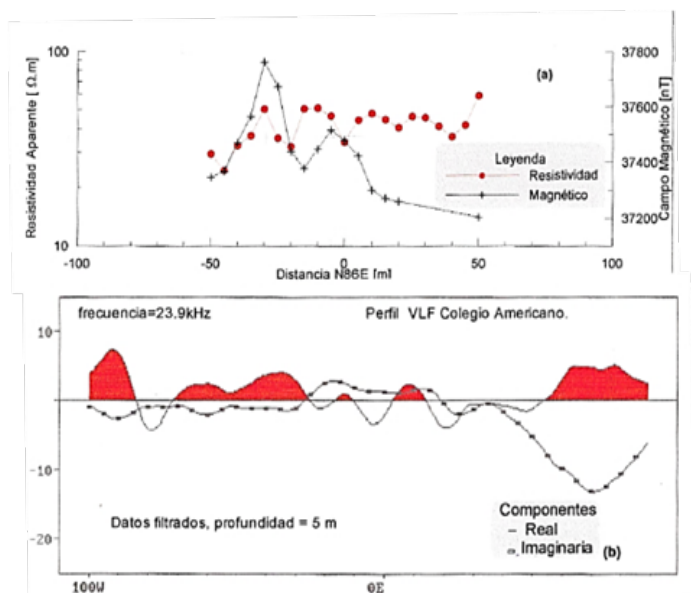
3) Perfil UNICIT

Este sitio se localiza en el costado sur de la Pista Suburbana. El punto cero posee las coordenadas UTM 578927E/1338822N, el perfil trazado tiene un rumbo N33°E. Las mediciones de VLF, campo magnético y de resistividad se tomaron en el costado sur de la carretera; dándole seguimiento a la extensión hacia el norte de la falla Zogaib. En la Figura 14 (a) se presentan las curvas de resistividades y campo magnético total. En la Figura 14 (b) se presentan las curvas VLF de las componentes real e imaginaria filtrada para una profundidad de 5m. En la Figura 14 (c) se presenta una vista hacia el norte de la Pista Suburbana donde claramente se muestra una zona de fracturamiento intenso en un bloque de la Falla Zogaib.

La curva de resistividad presenta las características de cuatro zonas anómalas. Los mínimos se localizan en 10W, 15E, 75E y 110E y alrededor de ellos sus puntos de inflexión indican zonas de aproximadamente 20m de ancho. En la estación 105E ocurre un punto de inflexión en la curva de resistividad que presenta un gradiente de 6.00hm similar al gradiente encontrado en el perfil Cuesta el Plomo.

La curva de campo magnético total, figura 14 (a) presenta mínimos en las estaciones 5, 60 y 120E y puntos de inflexión en los puntos 5, 55 y 95E. Este último coincide con uno de los planos de la Falla Zogaib el cual se observa en el talud occidental de un predio vacío al norte de la UNICIT. La componente real filtrada a una profundidad de 5m, presenta un conjunto de anomalías. La estructura asociada a estas representa la conti-

Figura 14
 Perfil UNICIT.



nuidad de la Falla Zogaib. Hacia el este se observa el conjunto de las anomalías, iniciando en 5.5% la cual se ubica aproximadamente en la estación 3E. En las estaciones siguientes 23E y 40E, ocurren máximas con amplitudes de 11.7% y 13.1%, respectivamente. En el borde final de toda esta estructura se muestra la una última anomalía con una amplitud de 7.6% en la estación 60E. La zona anómala en este sector tiene aproximadamente 60m de ancho.

4) Perfil Portal del Carmen

Este perfil fue realizado sobre el borde sur del camino de acceso a la urbanización Portal del Carmen, la cual se ubica a unos 700m al sur del borde sur de la Pista Jean Paul Genie. El punto inicial de medición posee las coordenadas UTM 580889E/1337353N y se ubica a 30m del eje de la carretera hacia el sur que conduce a dicha urbanización. El perfil medido tiene un rumbo N86°E. Este perfil se realizó en la continuidad de la Falla Centroamérica.

En la Figura 15 (a) se presentan las curvas de resistividades y campo magnético total; la (b) se presenta las curvas VLF de las componentes real e imaginaria filtrada para una profundidad de 5m. En la Figura 15 (c) se presenta una vista hacia el sur del corte en el terreno de la Urbanización Portal del Carmen donde se presenta una falla normal y así como una serie de fracturamiento. La falla presentada en la Figura 15 (c) se ubica en la estación 90E del perfil.

La curva de resistividad presenta cuatro máximos y tres mínimos. Alrededor de la estación 60E, donde se localiza la falla Centroamérica. Según Rodríguez (1997) afirma que ésta es una falla normal con rumbo N15°E que presenta un desplazamiento vertical de 40cm hacia abajo del bloque este y un ancho de 20m. Los puntos de inflexión asociados se ubican en las estaciones 43E y 63E lo que indica un ancho de anomalía de 20m, lo cual es muy similar al asignado por Rodríguez (1997), para la zona de fracturamiento de la Falla Centroamérica. El gradiente horizontal de la resistividad que limita a la estructura se presenta por los valores de 1.0Ω y 6.5Ω.

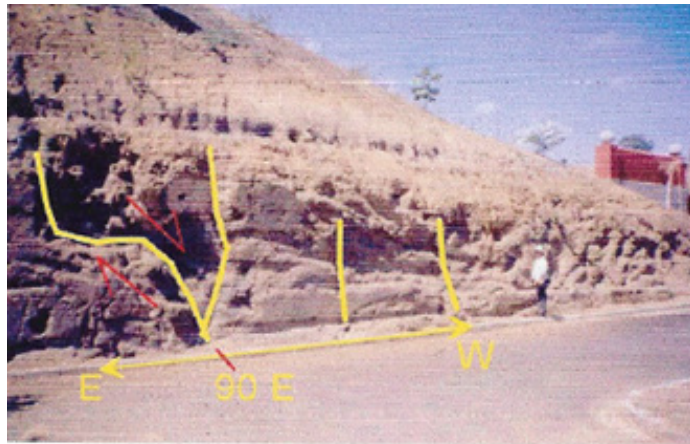
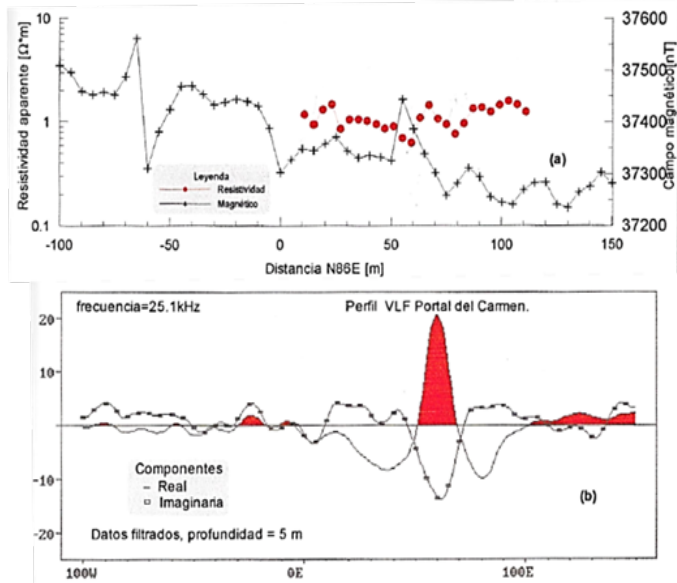
Hacia el este de la Falla Centroamérica, la curva de resistividad presenta un mínimo relativo que coinciden con la falla mostrada en Figura 15 (c), este se localiza en la estación 95E. Desde el mínimo de la Falla Centroamérica al máximo de la anomalía resistiva existe un gradiente horizontal de resistividad asociado a esta falla de aproximadamente 3.2Ω. Esta falla se define como una falla antigua, ya que únicamente se han visto afectadas las unidades litológicas de edad pleistoceno inferior (> 29,000 años). La curva magnética presenta los puntos de inflexión para la falla Centroamérica, estos se localizan entre las estaciones 52E y 72E. Posee un ancho de aproximadamente 20m (igual valor al encontrado en resistividad). Los gradientes horizontales magnéticos correspondientes a los puntos de inflexión tienen valores de 23.6nT/m y 9.3nT/m.

Además, para los puntos de inflexión en las estaciones 80E y 95E. Con un ancho aproximado de 15m. Los gradientes horizontales magnéticos para estos puntos de inflexión tienen los valores de 5.3nT/m y 3.6nT/m, respectivamente.

En la parte oeste del perfil la curva magnética presenta una zona anómala entre los puntos de inflexión de las estaciones 63W y 55W. El ancho aproximado de esta estructura tiene un valor de 8m. El gradiente horizontal magnético para esto puntos de inflexión tienen los valores de 50.2nT/m y 11.3nT/m, respectivamente. El relativamente alto gradiente magnético de 50.2nT/m es indicativo de materiales que poseen alta susceptibilidad asociados con sustancias con altos contenidos de hierro como el de las escorias del Lapilli de Fontana la cual sería la unidad afectada por el posible fallamiento asociado a la anomalía magnética aquí descrita.

La componente VLF real filtrada a una profundidad de 5m, presenta un máximo de amplitud de 21% en la estación 60E. Esta anomalía se asocia sin lugar a duda a la presencia de la Falla Centroamérica; Figura 21 (b).

Figura 15
Perfil Portal del Carmen.



(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total
(b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria
(c) Vista hacia el Sur en corte Portal del Carmen. Falla en estación 90E.

Dada la forma de la anomalía se presenta como una falla vertical que tiene un ancho aproximado de 20m. A la altura de la estación 125E ocurre otra anomalía de amplitud 2.5 %, la cual se asocia directamente a la falla de la estación 90E, Figura 15 (c). Estas son las únicas anomalías que se pueden asociar y correlacionar con los resultados de resistividad y de magnetometría. Aunque el método VLF indica estructuras más anchas en la parte final del perfil.

5) Perfil Jean Paul Genie

Este sitio se localiza en un terreno vacío en el costado Sur del Edificio Claro carretera a Masaya y unos 20m del costado norte de la Pista Jean Paul Genie. El punto de medición 50W/00N este perfil posee las coordenadas UTM 584306E/1335310N. El perfil trazado tiene un rumbo N60°E. Entre los puntos que van de 30E a 75E las mediciones se hicieron a 5m al norte del perfil trazado para reducir el efecto que pudiera ejercer la estructura metálica del revestimiento del cauce. Sobre este perfil no se realizaron mediciones de resistividad.

En la Figura 16 (a) se presenta la curva de campo magnético total; en la (b) las curvas VLF de las componentes real e imaginaria filtrada para una profundidad de 5m. En la Figura 16 (c) se presenta una vista hacia el sur Pista Jean Paul Genie donde se muestra una falla de tipo normal en la que el bloque este descende aproximadamente 60cm. La falla se correlaciona con la anomalía de la estación 105E. La curva de la anomalía magnética presenta un punto de inflexión asociado a la falla localizado en la estación 110E.

En la estación 120E se ubica un mínimo magnético. Entre este mínimo y el máximo ubicado en la estación 80E existe un gradiente de 2.5nT/m. El ancho aproximado asociado a esta anomalía es de 45m. Entre las estaciones 10 y 60E existe una anomalía de bajo magnetismo, la cual se asocia directamente a un cauce por el que discurren las aguas pluviales de la zona. Actualmente este cauce no presenta continuidad hacia el sur

debido a las obras y remociones de tierra realizado en el Proyecto Centro Comercial Terranova.

Más hacia el oeste ocurre un mínimo ubicado en la estación 45W el cual coincide con el camino a Santo Domingo. El gradiente horizontal magnético presenta los valores 3.8nT/m y 3.6nT/m, para los puntos de inflexión dados en las estaciones 55W y 35W. También, se observan otras anomalías; una de ellas tiene los puntos de inflexión en las estaciones 10W y 5E; con un ancho de aproximadamente 15m. La otra anomalía presenta los puntos de inflexión entre las estaciones 65E y 110E. El ancho aproximado de esta es de 45m; sus gradientes horizontales magnéticos asociados tienen valores de 4.0nT/m y 2.5nT/m.

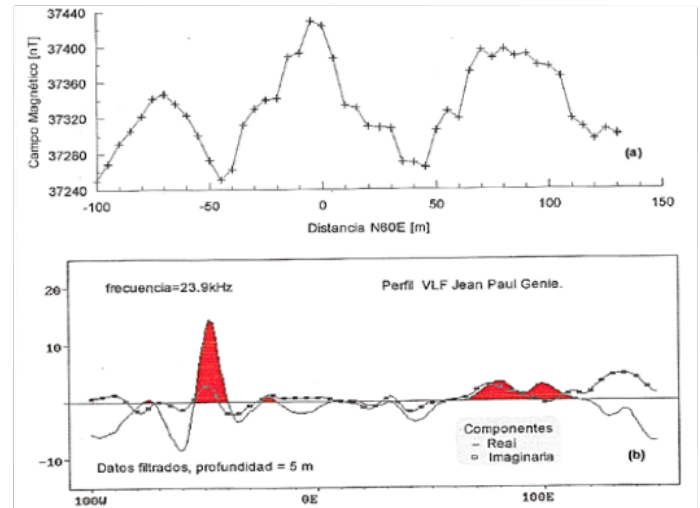
La componente real filtrada a una profundidad de 5m, presenta un máximo de amplitud de 3% entre las estaciones 80E y 100E, ambas representadas por una doble estructura. La anomalía de la estación 100E se asocia directamente a la falla presentada en la Figura 16 (c). Además, se presenta otra anomalía a lo largo del perfil, ubicada en la estación 50W con una amplitud de 14%. El pico de esta anomalía coincide con la anomalía magnética, Figura 16 (a).

La existencia de esta anomalía se explica por la existencia de una excavación realizada anteriormente la cual fue utilizada para colocar tuberías de conducción de agua pluvial, sin embargo, la existencia de una falla no se descarta todavía sobre la base de estos resultados.

6) Perfil Las Jagüitas

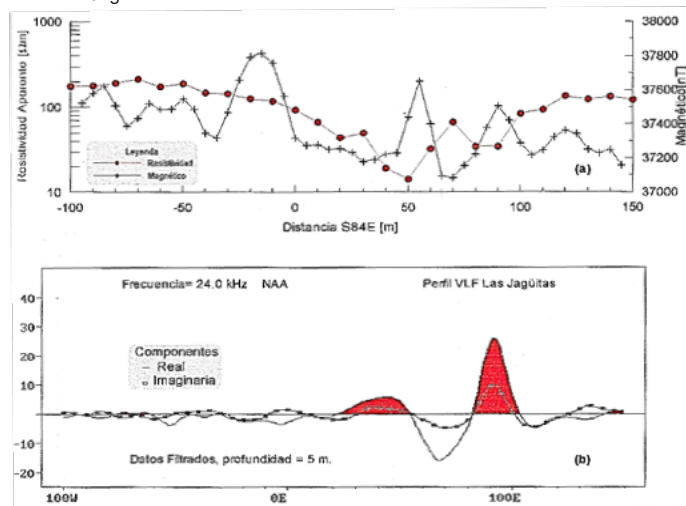
El perfil denominado Las Jagüitas se ubica sobre el camino que va de Veracruz a Managua. El punto cero del perfil tiene coordenadas UTM 586132E/1337467N. El perfil trazado tiene un rumbo S84°E y en los puntos 65E/00N y 100E/00N (UTM 586158E/1337405N) existe una acometida eléctrica de 110V que perturbaba las mediciones por lo que se realizaron paralelamente sobre el otro costado de la calle. En la Figura 17 (a) se presentan las curvas de resistividades y campo magnético total; en

Figura 16
Perfil Jean Paul Genie.



(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total
(b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria
(c) Vista hacia el Sur de la Pista Jean Paul Genie. Falla en estación 105E.

Figura 17
Perfil Las Jagüitas.



(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total.
(b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria.

la (b) las curvas VLF de las componentes real e imaginaria filtrada para una profundidad de 5m.

La curva de resistividad que se presenta en la Figura 17 (a) muestra una amplia anomalía de bajo valores de resistividad. Dentro de esta amplia anomalía ocurren dos mínimos relativos ubicados en las estaciones 50 y 90E, respectivamente. Los puntos de inflexión relacionados se encuentran en las estaciones 35, 62, 75 y 100E. Estos puntos los podemos asociar a zonas de fallas con anchos de 27m y 25m, respectivamente. El gradiente horizontal de resistividad entre estos puntos de inflexiones tiene los valores de 3.0Ω y 3.4Ω. El gradiente horizontal asociado a esta anomalía tiene los valores de 3.2Ω y 4.9 Ω.

La curva de campo magnético presenta una anomalía cuyos puntos de inflexiones se localizan en las estaciones 80 y 100E, con un ancho aproximado de 20m. Los gradientes horizontales magnéticos asociados a estos puntos tienen los valores de 21.0nT/m y 19.1nT/m, respectivamente. Otra anomalía se caracteriza por sus puntos de inflexión ubicados en las estaciones 50 E y 65 E; la cual presenta un ancho de 15 m. Los gradientes horizontales magnéticos asociados a estos puntos de inflexión tienen valores de 42.1nT/m y 37.8 nT/m.

La componente real filtrada a una profundidad de 5m, presenta un máximo de amplitud de 26% en la estación 90E. La cual se asocia directamente a la primera anomalía descrita tanto en resistividad como en magnetismo. Por la forma de la anomalía dada en la Figura 23 (b), decimos que es una falla vertical y de poca profundidad. Además, la componente real filtrada a 5m, presenta la otra anomalía con una amplitud máxima de 5.8 % en la estación 45 E. Esta anomalía también fue descrita en resistividad como en magnetismo. En contraste con la anomalía anterior y de acuerdo con la forma achatada y poca amplitud de esta anomalía podemos decir que la misma corresponde a una estructura profunda.

7) Perfil Boquerón

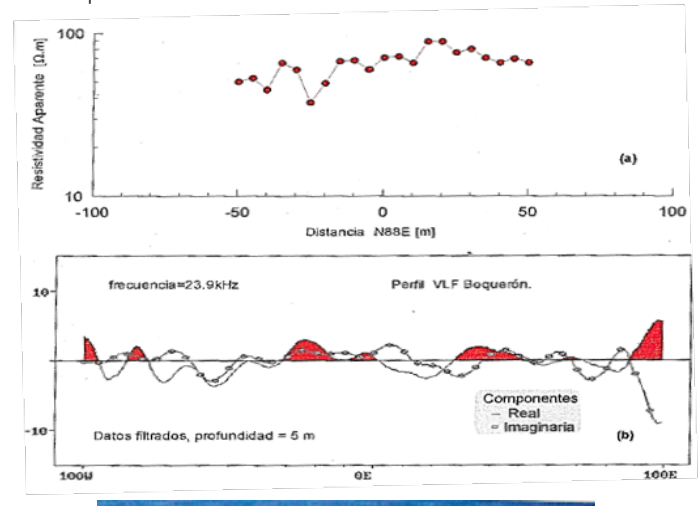
Este sitio denominado Boquerón se localiza en carretera nueva a León entre los Municipios de Mateare-Nagarote, el punto O posee las coordenadas UTM 552938E/1357800N, el perfil trazado tiene un rumbo N90°E. En donde, tanto las mediciones de VLF como de resistividad se hicieron en el costado norte de la carretera, porque la falla estudiada se encuentra de este costado, además posee un rumbo de N44°W, es visible y el punto O se sitúa paralelo al plano de falla. Además, se pueden notar otras dos fallas localizadas en 10W con rumbo N40°W y en 10E con rumbo N58°E, con desplazamiento menores a 70cm.

En la Figura 18 (a) se presenta la curva de resistividad aparente; en la (b) las curvas VLF de las componentes real e imaginaria filtrada para una profundidad de 5m. En la Figura 18 (c) muestra una vista hacia el norte donde se muestra la falla en la que el bloque oeste desciende aproximadamente 80cm.

La curva de resistividad, Figura 18 (a) presenta cinco zonas anómalas. Los mínimos se localizan en 40W, 25W, 5W, 10E y 25E. El gradiente de resistencia obtenido para la falla asociada en la estación O es de 1.70Ωm. El ancho aproximado es de 7m. Las otras anomalías corresponden a otras fallas y fracturas observables en el perfil. Tal es el caso de las fallas señaladas en las estaciones 10W y 10E del perfil.

La componente real filtrada a una profundidad de 5m, presenta un máxi-

Figura 18
Perfil Boquerón.



(a) Curvas de resistividad aparente y de campo magnético total
(b) Curvas VLF Componente Real y componente Imaginaria
(c) Vista hacia el Norte carretera Nueva a León. Falla en estación O.

mo de amplitud de 1.1% en la estación 3E. El ancho de esta anomalía es de aproximadamente de 10 m presentada en la Figura 18 (c). Se observan otras anomalías a lo largo del perfil, ubicadas en 83W, 25W, 37E y 68E; con amplitudes de 2.3, 3.0, 2.0 y 0.5%, respectivamente. Es importante señalar que tres de las anomalías VLF dadas en las estaciones 25W, 3W y 37E, están asociadas a las fallas vistas a lo largo del perfil, en donde el desplazamiento observado por medio de las gráficas se deba al rumbo de estas y a la disposición de sus estratos.

A partir de estos parámetros se determinan algunos de otros parámetros asociados a las fallas como son buzamiento, techo, ancho y la susceptibilidad magnética. Se trató de encontrar una posible relación entre los gradientes y el salto de las fallas en los sitios donde se logró determinar este último parámetro.

En las Figuras 19 y 20, se muestran las gráficas y la posible relación entre estos parámetros. Observamos a priori que se sigue para ambos casos una relación lineal y que existe entre los dos gráficos la diferencia de que sus pendientes son contrarias. Podemos esperar estos comportamientos, puesto que se trata de variables diferentes que no son correlacionables entre sí. En la primera tenemos el gradiente resistivo horizontal del campo eléctrico y en la segunda el gradiente magnético horizontal del campo magnético total.

También se presentan las ecuaciones de regresión donde los coeficientes nos indican una buena correlación que para la cantidad de datos se debe considerar como una correlación preliminar, pues se necesitan mayores mediciones principalmente para saltos de fallas mayores de 40cm.

Para los casos de las fallas estudiadas en Managua y sus alrededores los saltos de fallas se encuentran generalmente en valores menores de 50 cm. Para estos intervalos es posible que se pueda establecer una mejor

Tabla 2
Resultados de parámetros determinados de las fallas.

Sitio	δ (Rumbo)	DZ [m] (Salto)	b [m] (ancho)	a [m] (techo)	θ (Buzamiento)	ΔB [nT] (valor de centro- anom)	κ (susceptibilidad)
Cuesta del Plomo Colegio	N26W	1.50	5.6	4.5	102.0°	165.0	0.100
Americano	N38E	0.25	10.0	10.9	85.5°	255.0	0.123
UNICIT	N25E	0.30	18.0	9.2	172.6°	84.0	0.088
Portal El Carmen	N15E	0.40	20.0	8.7	117.9°	185.0	0.043
Jean Paul Genie	N30E	0.80	46.0	19.4	136.4°	53.0	0.005
Las Jagüitas	N15E	0.0	22.0	7.1	128.5°	22.5	0.026

Figura 19
Gráfico de correlación del gradiente resistivo en función del salto de la falla.

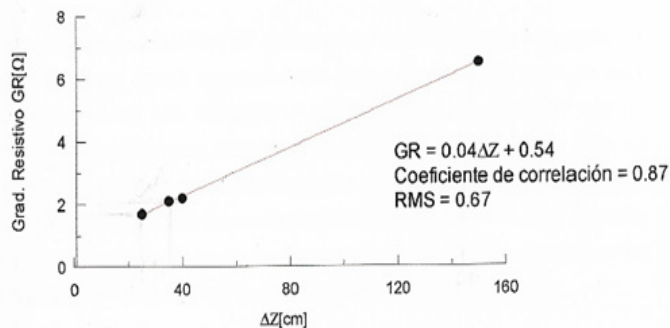
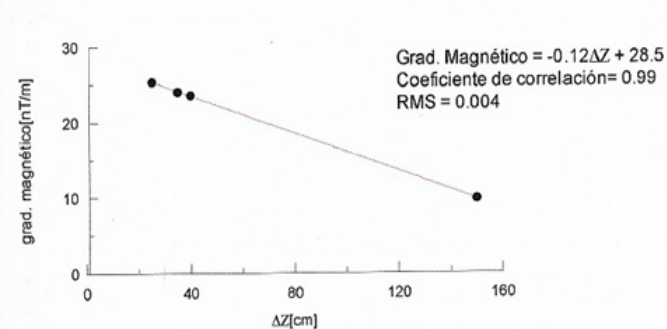


Figura 20
Gráfico de correlación del gradiente magnético en función del salto de la falla.



correlación si observamos en los gráficos como los datos se agrupan a lo largo de la recta de regresión. El último punto en los gráficos asociado a la Falla de La Cuesta el Plomo marca la tendencia del comportamiento de los datos en el intervalo de 40 a 160cm. Se debe señalar que esta estructura es Considerada como una mega falla en comparación con las fallas que se localizan en el casco urbano de Managua.

4. CONCLUSIONES

Se logró realizar mediciones geofísicas utilizando los métodos descritos tanto en fallas conocidas como en sitios donde aún no se conocen su existencia. Las curvas obtenidas con la aplicación de los tres métodos geofísicos demuestran que estas se pueden Correlacionar y caracterizar las zonas de fallas. La cuantificación de los puntos de inflexión, gradientes, amplitudes y anchos de las anomalías revelan la disposición de la estructura el subsuelo. En los perfiles investigados comprobamos que los planos de falla coinciden con los puntos de inflexión tanto de la anomalía resistiva como de la magnética y presenta máximos en las curvas VLF. Por lo tanto, se puede afirmar que la zona de falla o fractura está estrechamente relacionada a los puntos de inflexiones correspondientes a estos puntos. De forma general el levantamiento de una de las ramas de la anomalía magnética está relacionado con la inclinación de la estructura geológica. Esto es el sentido del buzamiento de la estructura coincide con el lado de la rama que se levanta, que a su vez coincide con el bloque descendente. Las anomalías VLF de la curva de componente real filtrada a 5m presen-

tan anomalías de baja amplitud. Se observó que el punto máximo de la anomalía aparentemente se deslaza contrario al de la inclinación de la estructura. Filtrar la misma curva para diferentes profundidades es un buen ejercicio para tener una idea del sentido de buzamiento de la estructura, los cuales se pueden graficar en pseudosecciones de densidad de corriente en función de la profundidad.

De igual manera el método magnético a través de cálculos numéricos nos provee también de la información del buzamiento de las estructuras y de la profundidad del bloque desplazado que esté más próximo a la superficie. Los valores altos de los gradientes magnéticos y resistivos son indicativos de materiales que poseen altas susceptibilidades y resistividades asociados con sustancias con altos contenidos de hierro como el de las escorias de Lapilli de Fontana, la cual sería la unidad afectada por el posible fallamiento asociado a la anomalía magnética o resistiva.

En el Perfil Cuesta El Plomo los planos de fallas del pequeño graben aparentemente se unen en un solo plano en profundidad el cual se inclina hacia este, al igual que las demás estructuras observadas en el corte de la carretera. Se observó que el plano oriental del graben anterior coincide con los puntos de inflexión de las curvas de resistividad y de campo magnético total. Las otras anomalías seguramente corresponden a otras fracturas y fallas observables en el perfil. El método VLF mostró otras anomalías con amplitudes menores las cuales Se asocian todas al fallamiento presente en la zona.

Las anomalías VLF de la curva de componente real filtrada a 5m presentan anomalías de baja amplitud. En los sitios donde el punto máximo de la anomalía aparentemente se desplaza contrario al de la inclinación de la estructura. Filtrando la misma curva para diferentes profundidades es un buen ejercicio para tener una idea del sentido de buzamiento de la estructura los cuales se pueden ver de una vez por todas en pseudosecciones de la densidad de corriente en función de la profundidad.

En el Perfil del Colegio Americano el punto de inflexión 25 W magnético y mínimo resistivo coincide con el borde oriental de una depresión que pasa por la cancha de voleibol. En el perfil VLF se observan dos máximos continuos en la estación 63W correspondiente los dos a una misma estructura con un ancho de 50m que se asocian con el lineamiento verde del mapa de fallas de Managua (INETER 2002). Al final del perfil ocurre una anomalía incompleta representada por una doble estructura que se asocia a un ramal de la Falla Zogaib.

En el Perfil UNICIT la curva de resistividad y de campo magnético total presentan puntos de inflexión similares. El más representativo está localizado en la estación 100E esté punto se asocia con uno de los planos de la Falla Zogaib, el cual se observa en el talud Occidental de un predio vacío al norte de la UNICIT. El perfil VLF presenta un conjunto de importantes anomalías; la estructura asociada a estas representa la continuidad de la Falla Zogaib. La zona anómala en este sector tiene aproximadamente 60 m de ancho.

En el Perfil Portal del Carmen la curva de resistividad, campo total y VLF presentan una zona de anomalía de 20m de ancho, que se asocia a la Falla Centroamérica. La forma de la anomalía VLF representa una falla de tipo vertical.

En el Perfil Jean Paul Genie la curva magnética mostró al lado oeste, anomalías de bajo magnetismo asociadas a la existencia de una excavación, a un cauce y al camino que va a Santo Domingo (Las Sierritas). Sin embargo, la existencia de una falla no se descarta todavía sobre la base de estos resultados. El método VLF en la estación 100E, muestra una anomalía dada por una doble estructura la cual se asocia a la falla observada.

En el Perfil Las Jagüitas la curva de resistividad, campo magnético y de

VLF presentan en la parte este del perfil dos zonas de anomalías asociadas a zonas de fallas. Dada la forma de la anomalía de VLF con la amplitud máxima decimos que es una falla vertical y de poca profundidad. En el Perfil Boquerón tanto la curva de resistividad como de VLF mostraron el mismo ancho de anomalía para la falla estudiada, igual ocurre en las otras dos fallas observadas.

En general a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación podemos afirmar que los métodos geofísicos utilizados son efectivos en la ubicación y caracterización para resolver el problema de zonificación de falla. Los desplazamientos laterales observado en las gráficas se debe posiblemente al rumbo de estas ya la disposición de sus estratos. La estimación obtenida para la correlación entre los gradientes resistivos y gradientes magnéticos con los saltos de las fallas, pueden cambiar al aumentar el número de sitios estudiados. Los parámetros aquí presentados y podrían ser considerados como preliminares.

En los sitios donde no se presentan las evidencias que despejen la duda respecto a la existencia de una falla, esta permanecerá hasta que nuestras anomalías sean comprobadas o rechazadas por la exploración de obras directas como trincheras mecanizadas y excavaciones manuales o bien por medio de perforaciones suficientemente densas y profundas.

5. RECOMENDACIONES

Sabemos que la ciudad de Managua presenta numerosas zonas de fallas tanto conocidas como algunas aún desconocidas, las cuales deben ser investigadas. Los resultados de nuestro estudio conllevan a recomendar siempre la utilización de un complejo de métodos como el aquí utilizado. A los interesados en este tipo de investigación se les recomienda tomar en cuenta las siguientes sugerencias: para futuras mediciones en la ubicación y caracterización de las zonas de fallas en la que se utilicen los métodos anteriormente aplicados, se debe evitar realizar mediciones próximas a líneas telefónicas, cables de alta tensión, transformadores, estructuras metálicas de hierro, etc.

Las mediciones por realizar con las metodologías empleadas en este estudio deben llevarse a cabo con un paso no mayor de 5m, porque de esta manera se obtiene una curva de mayor definición para la correlación entre la estructura geológica y su respectiva anomalía. Realizar un levantamiento de la litología del área de estudio, además si las fallas son visibles tomar sus parámetros geométricos tales como salto, ancho, rumbo, inclinación, ubicación de falla.

Es importante aumentar el número de estudios para caracterizar las zonas de fallas de aquellas a las que se pueden tener acceso. Tomar en consideración todos sus parámetros geométricos posibles. Determinar estos parámetros nos permitirá establecer una relación para la estimación de estos en sitios donde aún se desconocen. Esto también nos ayudará a revelar la presencia de fallas profundas, que por el costo de la abertura de una trinchera o por la poca capacidad técnica de la maquinaria a utilizar no revelen estos sitios poniendo en riesgo las vidas humanas. Tomando en cuenta el Mapa de Fallas INETER 2002 y los sitios que se estudiaron recomendamos cambiar el color de la línea verde por el de línea roja en los alrededores del sitio de estudio del Colegio Americano. Además, se sugiere el cambio de línea punteada en rojo por una línea en rojo continua en el sitio de estudio Jean Paul Genie, este se localiza en las cercanías de la Rotonda Jean Paul Genie.

6. REFERENCIAS

Bice D. C. (1980). Tephra Stratigraphy and Physical Aspects of Recent Volcanism Near Managua. Unpublished Ph.D. Thesis, Univ. of Berkeley, California, 422 pp.

Breiner, S. (1973). Applications manual for portable magnetometers. Geometrics. USA.

Brown, R. D., Jr., Ward, P.L. y Plafker, G. (1973). Geologic and Seismologic Aspects of the Managua, Nicaragua, Earthquakes of December 23, 1972. U.S. Geological Survey Professional Paper 838, 34.

Cuadra, G. (2001). Rango de Variación de Resistividad de las Principales Formaciones Geológicas del Grupo Managua.

Fraser, D. C. (1969). Contouring of VLF-EM Data. Geophysics, (Vol.34), 958-967

Garayar, S. (1976). Resumen de todas las Fallas Activas de Managua, (Actualización hasta junio de 1976) VIMPU, Managua.

Hodgson Valrey, Glen. (1984). Seminario de Estructura. Facultad de Ciencias Física y Matemática Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Código INETER: geología 0007.

Hodgson, V. G.(2000). Geología Regional de Nicaragua.

Hradecky, P. (1997). Estudio para el Reconocimiento de la Amenaza Geológica en el Área de Managua, Nicaragua. Editor P. Hradecký. Elaborado por: P. Havlicek, P. Hradecký, M. Navarro, Z. Norák, E. Stanik, J. Sebesta. diciembre 1997. Código INETER: geología 0061.

Hradecky, P. (2001). Informe Final de Consultoría para el Proyecto "Actualización del Mapa Geológico-Estructural del Área de Managua", Informe INETER.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. (2002). Informe técnico Actualización del Mapa de Fallas Geológicas de Managua.

Agencia de Cooperación Internacional del Japón e Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados. (1993). Proyecto de abastecimiento de agua en Managua. Reporte INAA, Managua.

Johnson y Associates. (1977). Estudio Geológico sobre Riesgo Sísmico de Fallamiento de la Escuela Americana, Managua D.N. Archivo del MINVAH No. 0111.

Karous, M. y Hjelt, S. T. (s.f). Linear Filtering of VLF Dip-Angle Measurements. Geophysical Prospecting 31,782-794.

Kuang S, J. 1971. Estudio Geológico del Pacífico de Nicaragua. División de Geología. Informe técnico No.13 Archivo catastro e inventario de recursos naturales. Código INETER: geología 0046.

Martínez, W. y Noguera, E. (1992). Geological Framework of Earthquake Occurrence in Nicaragua, Central America. Jour. Geol. Soc. Japan, 1998.

Martínez, W. (1993).The Interrelationship between Volcanic and Seismic Activity to Subduction-Related Tectonics in Western Nicaragua. Jour. Geol. Soc. Japan, 1999.

Martínez, W. (1999). Estudio Geológico de Riesgo Sísmico, IBASA, Proyecto: Las Jagüitas.

McBirney y Williams. (1965). Volcanic History of Nicaragua. UCLA, Geol.Sci. V.55. C.A.U.S

Moreno, H. y González, G. (2002). Proyecto: Centro Comercial Terranova.

Orellana, Ernesto. (1972). Prospección Geoelectrica de Corriente Continua. Biblioteca Técnica Philips. PARANINFO, Madrid.

Parasnis, D. S. (1997). Principles of Applied Geophysics, Fifth Edition. CHAPMAN & HALL.

Paterson, N. P. y Rönkå, V. (1971). Five Years of with the Very Low Frequency – ElectroMagnetics Method. Geoexploration, Vol.9, pp 7-26.

Rodríguez, N. y González, G. (2000). Estudio Geológico por Fallamiento superficial Proyecto: Urbanización El Rodeo, Managua, Nicaragua.

Rodríguez, N. y González, G. (2002). Proyecto: Urbanización Jacarandas. Grupo Inmobiliario de Desarrollo Sociedad Anónima (GIDSA).

Rodríguez, N y González, G. febrero 2003. Proyecto de Urbanización Portal del Carmen.

Rodríguez, N.y Montenegro, D. (2002). Propuesta de columna estratigráfica para Managua, Informe INETER, Managua.

Telford, W. M., Geldart, L. P. y Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics, 2ªed., Cambridge University Press.

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.(1989). Introducción a la Geofísica.

Woodward-Clyde Consultants. (1975). Preliminary Evaluation of Active Faulting in Western Nicaragua. Vol. I, II, III, Managua, Nicaragua.

Woodward-Clyde Consultants.(1975). Investigation of Active Faulting in Managua, Nicaragua and Vicinity. Summary Report, Viceministerio de Planificación Urbana Managua.

Wright, J. L.(1988). VLF interpretation manual. EDA Instruments, Toronto, Ontario, Canadá.