



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica



Electrificadora del Huila S.A.

# APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS DEL ALTO MAGDALENA

## Estudio de Prefactibilidad

### Volumen IV

Apéndice C      SISMOLOGIA



**INTERDISEÑOS**

INGENIEROS CONSULTORES

Bogotá - Colombia

MARZO DE 1983

ESTUDIO FINANCIADO POR: FONDO NACIONAL DE PROYECTOS DE DESARROLLO "FONADE"

## INDICE DE VOLUMENES

VOLUMEN I	INFORME
VOLUMEN II APENDICE A	HIDROLOGIA Y SEDIMENTOLOGIA
VOLUMEN III APENDICE B	GEOLOGIA
VOLUMEN IV APENDICE C	SISMOLOGIA
VOLUMEN V APENDICE D APENDICE E	MATERIALES DE CONSTRUCCION TOPOGRAFIA Y CARTOGRAFIA
VOLUMEN VI APENDICE F APENDICE G	ESQUEMAS DE PROYECTOS COSTOS Y PRESUPUESTOS
VOLUMEN VII APENDICE H	ENERGIA Y POTENCIA
VOLUMEN VIII APENDICE I APENDICE J APENDICE K APENDICE L	INFRAESTRUCTURA ECOLOGIA SOCIO-ECONOMIA AGROLOGIA
VOLUMEN IX	RESUMEN



VOLUMEN IV

APENDICE- C

SISMOLOGIA

INDICE

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVO Y ALCANCES DEL ESTUDIO	2
3. METODOLOGIA GENERAL	3
4. TECTONISMO	4
5. VOLCANISMO	7
6. SISMICIDAD	8
7. FOCOS SISMICOS	8
8. PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES	10
9. RIESGO SISMICO	11
10. ACELERACIONES	14
11. FRECUENCIAS	14
12. CONCLUSIONES	17
13. RECOMENDACIONES	18
BIBLIOGRAFIA	19
ANEXO: INFORME DEL CONSULTOR	



## INDICE DE TABLAS

- TABLA 1. Localidades Cubiertas por la Encuesta.
- TABLA 2. Localización de Epicentros Sísmicos en el Area del Proyecto.
- TABLA 3. Estudio de Profundidades.
- TABLA 4. Valores Regionales Promedio de Indice de Riesgo Sísmico.
- TABLA 5. Información Adicional.



## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. Tectónica de Placas.
- FIGURA 2. Anomalías Gravimétricas.
- FIGURA 3. Perfil Litosférico.
- FIGURA 4. Localización de Volcanes Próximos al Proyecto.
- FIGURA 5. Mapa de Riesgo Sísmico.
- FIGURA 6. Mapa de Riesgo Sísmico de la Zona de Proyecto.
- FIGURA 7. Localidades Cubiertas por la Encuesta.
- FIGURA 8. Mapa Sismotectónico.
- FIGURA 9. Ubicación de Cortes AA' y BB' para Ploteo de Hipocentros.
- FIGURA 10. Ploteo de Hipocentros. Corte AA'.
- FIGURA 11. Ploteo de Hipocentros. Corte BB'.
- FIGURA 12. Registro tomado en las Vecindades de Guarapas durante el Trazado del Perfil Sísmico La Cocha - Bogotá.
- FIGURA 13. Registro tomado en las Vecindades de Pericongo durante el Trazado del Perfil Sísmico La Cocha - Bogotá.
- FIGURA 14. Registro tomado en las Vecindades de El Quimbo durante el Trazado del Perfil Sísmico La Cocha - Bogotá.



## VOLUMEN IV

## APENDICE -C

## SISMOLOGIA

## 1. INTRODUCCION

El proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico del alto Magdalena requiere, por su importancia y ubicación, un cuidadoso estudio sísmico. Un proyecto hidroeléctrico de esta índole constituye una fuente de energía, tanto más importante, cuanto mayor sea el riesgo natural a que está sometida.

Los embalses demandan especial atención en este sentido, puesto que su eventual falla puede liberar de súbito inmensos volúmenes de agua que no alcanzaría a conducir normalmente el cauce original, dando lugar a tragedias como las ocurridas en Lombardía (California) y Huaraz (Perú), entre otros.

El alto riesgo sísmico de estos embalses pone en peligro asentamientos humanos rurales y urbanos, y las fuentes de producción de la región. Por esto la estabilidad de un proyecto de esta índole puede, en último término, considerarse como factor de seguridad pública.

La inversión a realizarse en este proyecto, así como su ulterior usufructo, ameritan detallados estudios sísmicos y dinámicos. Las presas, en particular, están sometidas a grandes sollicitaciones dinámicas: internas debidas a la acción de las ondas sísmicas dentro de su mismo cuerpo; externas ocasiona-



nadas por las mayores presiones que origina la oscilación lateral y vertical del embalse, así como los eventuales desplazamientos diferenciales de los estribos; y, transitorias o capaces de ocurrir durante las distintas fases de la construcción. Todos estos esfuerzos requieren ser ampliamente investigados en las fases posteriores del proyecto.

Proyectos civiles de esta envergadura requieren de cuidadosos estudios sísmicos y dinámicos, debido a la actividad sísmica global de Colombia. Además, la localización geográfica particular del proyecto lo hace aún más vulnerable por cuanto se acerca a las zonas de mayor riesgo sísmico del país.

Las experiencias de los siniestros de Quebradablanca y otros, imputables en parte a factores sísmicos, no pueden pasarse por alto en este proyecto ni en otros de similares características.

## 2. OBJETIVO Y ALCANCES DEL ESTUDIO

A nivel de prefactibilidad es difícil hacer un estudio detallado tanto de la sismicidad de la zona como de los parámetros dinámicos a que deban ajustarse los diseños de las estructuras y obras civiles del proyecto. En tal virtud, este estudio se limita a analizar la actividad sísmica general del área, a fin de establecer el nivel de riesgo sísmico esperado; y la ubicación y las características de los focos inmediatos que puedan tener gran incidencia en el proyecto. Finalmente, se hacen las recomendaciones pertinentes en cuanto a los aspectos y parámetros que se deberán investigar más a fondo en las sucesivas etapas del proyecto.

Se consideró importante estudiar la sismicidad profunda toda vez que se encontró un número apreciable de sismos plutónicos dentro de la región del proyecto; además, porque ningún estudio sísmico está completo si no incluye la sismicidad profunda y la tectónica del área.

Por ser un estudio a nivel de prefactibilidad, dentro del cual



no se considera la instrumentación de la zona, los conceptos acá consignados se basan principalmente en el análisis detallado del material bibliográfico revisado. Es importante resaltar que la región del alto Magdalena es una de las menos estudiadas en el país, desde el punto de vista sismotectónico, por lo cual el material bibliográfico disponible es muy escaso.

Este apéndice comprende los siguientes aspectos:

- Tectonismo.
- Volcanismo.
- Sismicidad.
- Focos sísmicos.
- Profundidades hipocentrales.
- Riesgos sísmicos.
- Aceleraciones.
- Frecuencias.

### 3. METODOLOGIA GENERAL

Los estudios sísmicos detallados, como el que en realidad exige este gran proyecto, requieren cuidadosas y extensas observaciones microsísmicas en el terreno, las cuales, ni se alcanzan a realizar en el corto tiempo disponible para este estudio de prefactibilidad, ni son material pertinente a este nivel. En consecuencia, se realizó una recolección de información, tanto de fuentes primarias como secundarias, la cual fué debidamente procesada para inferir los resultados y las recomendaciones del estudio.

La recolección de datos para el estudio sísmicos en cuestión, se llevó a cabo de la siguiente manera:

- a. Una encuesta hecha en la zona del proyecto mediante formularios especialmente preparados para tal efecto, con el propósito de establecer algunas de las características de la actividad sísmica reciente en el área.





- b. Análisis de los listados de epicentros, de fuentes locales y extranjeras, con el fin de inferir la actividad sísmica remota.
- c. Detallados estudios sobre geología y tectónica local, efectuados tanto en el terreno, como a través de fuentes bibliográficas locales y del exterior.

Para las encuestas mencionadas se utilizó un formulario probado anteriormente en otros proyectos (4), pero debidamente adaptado a las circunstancias particulares de esta zona. La encuesta permitió determinar, para el área del proyecto, la actividad sísmica general, la actividad microsísmica no registrada, la distribución de efectos y la actividad volcánica.

#### 4. TECTONISMO

La teoría de la deriva continental propuesta por Wegner, aporta importantes consideraciones sobre la tectónica de la zona en estudio. Concurren en el territorio Colombiano tres megaplasas, a saber: la del Caribe, la de Nazca y la de Suramérica (figura 1), cuyos movimientos relativos son causa de grandes presiones y fricciones a lo largo de sus bordes.

Algunos de los sismos causantes de los mayores desastres ocurridos en esta parte de Suramérica, como en Centroamérica, han tenido origen en los movimientos de dichas fallas litosféricas que constituyen los bordes de las placas. Tal es el caso, por ejemplo, del sismo que devastó a Guatemala en 1976 y que permitió definir el curso del borde de la placa del Caribe a su paso por el istmo centroamericano, hasta entonces impreciso. La trayectoria de estos extensos bordes aún no se encuentra plenamente definida en otras zonas, como ocurre en Colombia y Venezuela, sectores por donde cruzan los dos únicos segmentos que hace falta determinar para que queden plenamente establecidos los límites de la placa del Caribe (3); es esta incertidum-



bre la que impide estimar con mejor aproximación el riesgo sísmico de éste y de los demás proyectos de ingeniería en el país.

Distintos autores han sugerido varias trayectorias probables. En una de ellas el borde sur de la placa del Caribe, después de surcar el arco insular de las Antillas, toma en las costas Venezolanas el rumbo de la falla de Oca para cortar a Colombia por la Guajira y empatar, en las proximidades de la Sierra Nevada de Santa Marta, con la falla Bolívar la cual cruza la zona de mayor riesgo sísmico del país (1).

Otra trayectoria de común aceptación presupone que dicho borde entra al país por la falla de Boconó, proveniente de Venezuela y continúa hacia el interior para empatar luego con el frente de subducción de la placa de Nazca en la Costa pacífica Colombiana. Sin embargo, estudios recientes (12) concluyen en la posibilidad de que la falla de Boconó enrumbé hacia el S-W para empatar luego con el sistema de fallas de la cordillera oriental, por la falla Salinas o por la falla Santa María. Dichas fallas desembocan en las fallas subyacentes del proyecto del alto Magdalena, como se aprecia en la figura 1.

Entre tanto no se defina con exactitud el curso o los cursos que sigue esta interfase entre las placas continentales, no hay manera de cuantificar el riesgo particular que el fenómeno de la deriva pueda imponer sobre proyectos específicos como el del alto Magdalena. Pero, a pesar de todo, no debe perderse de vista en ningún momento la existencia de la teoría de la deriva de Wegner, y su relación con la presencia de las fallas que se encuentran inmediatamente bajo los enclaves del proyecto. De ahí su importancia de estudiar detenidamente cuidadosamente la actividad de las fallas regionales, especialmente las del Magdalena y de Altamira-Garzón en las etapas de estudios posteriores.

La incidencia de los fenómenos macro tectónicos sobre este proyecto en particular pueden superar ampliamente el riesgo sísmico regional, establecido en este estudio y exigir modificaciones considerables en los diseños realizados en la e-



tapa de prefactibilidad.

A nivel local, la tectónica general de esta zona reviste características de singular complejidad considerando la concurrencia simultánea de varios fenómenos geomorfológicos. De esta ladera oriental del macizo Colombiano, se desprenden dos cordilleras cuya bifurcación, se produce justamente en la zona del proyecto, lo cual ha originado intenso fallamiento y el inicio de un graben, que más al norte se estabiliza como el Valle del Huila, caracterizado por anomalías de Bouger de hasta 250 miligales (11) altamente negativas, como se aprecia en el mapa gravimétrico de la figura 2(5). Las dos cordilleras que flanquean la zona del proyecto se originaron en épocas diversas y presentan estructuras geológicas diferentes. La cordillera central se levantó durante el Paleozoico, el Cretáceo y el Terciario cuando la cordillera oriental era apenas una sinclinal; esta última se levantó posteriormente en el Terciario. No obstante, en la zona de Guarapas a Pericongo se observa una inversión de afloramientos en el flanco oriental de los sitios de presa (tal como lo manifiesta la formación Guacacayo suprayacente), lo cual, coincidiendo con el buzamiento de los estratos, sugiere un mecanismo tectónico de plegamiento particular de esta zona, referida por algunos investigadores (7) como representativa de "un complicado cuadro tectónico, íntimamente ligado con el margen continental activo".

Los procesos de subducción y obducción litosférica, resultado de la deriva continental, concentran hacia esta latitud grandes fuerzas endógenas como lo indican los pronunciados levantamientos que se encuentran en la zona. Detallados estudios de refracción profunda (14) llevados a cabo al sur-oeste del país señalan en esa región el punto de choque entre las placas corticales de Nazca y de Suramérica; lo anterior se pone de manifiesto en la zona del proyecto al observar el alto número de sismos plutónicos (ver tabla 3) concentrados en el sector, indicio de plena actividad orogénica.

Los perfiles de refracción profunda efectuados en el proyecto Nariño (1) no alcanzaron a cubrir la zona en estudio, ni se encontró más información para establecer con mayor exactitud



tud el mecanismo tectónico subyacente en el sector del alto Magdalena; sin embargo, de la información estudiada y de la extrapolación de otros perfiles cercanos se ha idealizado un perfil litosférico (figura 3) que se cree se aproxima al verdadero mecanismo tectónico de la zona; considerando que los sismos plutónicos guardan estrecha relación con las discontinuidades de Moho subyacentes. Nótese que en esta área hay una doble ocurrencia de la discontinuidad de Moho debido a que se encuentra sobre la zona de influencia de la subducción.

## 5. VOLCANISMO

La zona del proyecto se encuentra limitada al occidente por la cordillera central, circunstancia que la sitúa bajo la influencia de otro fenómeno de repercusiones sísmicas: el volcanismo.

La cordillera central, especialmente en estas latitudes, se ha caracterizado por una cadena de focos volcánicos de carácter andesítico, la cual data principalmente del Terciario. A pocos kilómetros al oeste del área del proyecto se localizan los volcanes Puracé y Doña Juana, los cuales han demostrado sus violentas erupciones en épocas recientes. La figura 4 muestra la ubicación de los volcanes con relación al proyecto.

De particular importancia para el proyecto son los focos volcánicos de Puracé y Doña Juana, en cuyos flancos extremos se encuentran ubicados los desarrollos hidroeléctricos en estudio. No solamente constituyen estas fumarolas eventuales focos sísmicos, sino que en caso de una erupción de proporciones mayores pueden colmatar los embalses.

Debe tenerse en cuenta que los magmas andesíticos se originan en esta zona, a profundidades de 150 km (16, 6), profundidades a las cuales se encuentran algunos de los focos sísmicos de influencia para el proyecto.



## 6. SISMICIDAD

La sismicidad del área es en general alta, con un índice promedio de riesgo sísmico entre  $7 \frac{1}{2}$  y  $7 \frac{3}{4}$ , siendo el máximo para el país de  $8 \frac{1}{4}$  grados, figura 6.

La sismicidad de la región se estudió mediante la encuesta técnica mencionada, aplicada a una muestra seleccionada entre 19 localidades y algunas áreas rurales circunvecinas a los aprovechamientos considerados; en la tabla 1 se indican las localidades cubiertas por la encuesta.

Como conclusiones de la encuesta realizada pudo apreciarse una considerable actividad en la zona, frecuentemente sentida por los pobladores y concentrada hacia la parte sur-oeste de la región. La encuesta revela, que en su mayoría, las ondas tienen frecuencias medias y llegan por lo general en dirección NE-SW. La distribución de los efectos del sismo de febrero de 1967, el más intenso de los que recuerdan la mayoría de los habitantes del sector, muestra que en esa ocasión se concentró mayor energía hacia la zona de Guarapas-Pericongo. Aún cuando no ha habido erupciones violentas, en los últimos años, sí se reportaron varias evidencias de actividad volcánica relativamente reciente (1949), particularmente con cenizas y humo.

## 7. FOCOS SISMICOS

Para el estudio sobre focos sísmicos se consultaron los archivos locales del Instituto Geofísico de los Andes Colombianos (15) desde 1556 y los archivos de NOAA (8) desde 1904; esta información se actualizó con datos de tablas inéditas utilizadas para la elaboración del Mapa de Riesgo Sísmico de Colombia (13).

Para el análisis, se utilizaron los eventos sísmicos ocurridos en una "ventana" de  $530 \text{ km}^2$  aproximadamente, enmarcada entre las siguientes coordenadas:  $1^\circ \text{N}$  a  $3^\circ \text{N}$  y  $75^\circ \text{W}$  a



77°W. Esta área comprende los cinco desarrollos hidroe-  
léctricos en estudio y aquellas áreas aledañas que se consi-  
deraron con virtual influencia en la sismicidad de la zona.

La tabla 2 contiene los eventos seleccionados de ambos ar-  
chivos, con sus fechas, coordenadas, profundidades y mag-  
nitudes.

Hay que tener presente que en la información recolectada  
se estudiaron registros históricos y registros instrumenta-  
les; al procesar los cuatro siglos de historia sísmica del  
país para la elaboración del mapa de Riesgo Sísmico de  
Colombia (13), a los registros históricos se les asignaron  
valores de magnitud bastante confiables y que se pueden  
combinar numéricamente con los datos instrumentales.

Los datos obtenidos de los archivos NOAA se compararon  
con los datos nacionales, los cuales se complementaron y  
corroboraron en buena parte. Dada la confiabilidad de es-  
tos registros solamente se les uniformizó en cuanto a las  
magnitudes de cuerpo.

El mapa sismo-tectónico de la figura 8 muestra la distri-  
bución de los eventos sísmicos considerados dentro de este  
estudio, en asocio de las principales fallas observadas, en-  
tre las cuales se destacan la del Magdalena y la de Altami-  
ra-Garzón, las cuales corren en dirección SW-NE con una  
separación promedio de 13 km; estas fallas cortan comple-  
tamente la zona del proyecto, sugiriendo de paso la presen-  
cia de un graben. Es notorio el fallamiento intenso del  
área, particularmente hacia el SW donde se encuentran cua-  
tro de los cinco desarrollos que componen el proyecto.

Paralelas a las dos grandes fallas mencionadas corren otras  
de menor evidencia geológica localizadas fuera de la zona de  
alcance de los actuales estudios geológicos, pero que guardan  
mayor correlación con los focos sísmicos registrados y con el  
volcanismo regional. Todo este fallamiento está manifestando  
la presencia de una "charnela" geológica en esta zona, como  
resultado de la subducción continental.



Los epicentros indicados en el mapa sismo-tectónico de la figura 8 no fueron sometidos al proceso de reubicación, procesamiento que debe realizarse en estudios posteriores. Sin embargo, estos epicentros se pueden asignar fácilmente tanto a las fallas regionales, dado su buzamiento, como al sistema de fallas marginales que ocurren paralelas a estas, definiendo en todo caso focos esencialmente lineales. La reubicación de epicentros se deberá hacer mediante programas de computador especiales, si se desea definir con detalle los mecanismos focales correspondientes.

Se observaron en el terreno varias evidencias de actividad de las fallas regionales, encontrándose desplazamientos de hasta 2 m en dirección vertical. Parece, sin embargo, que estas señales de actividad son bastante antiguas; su época se podrá determinar con exactitud en la etapa de factibilidad mediante ensayos cronológicos de Carbono 14.

Para poder afirmar con certeza que las fallas que afectan los embalses del proyecto están o no activas en este momento, es necesario efectuar un completo estudio instrumental de la zona, cuya ejecución está fuera del alcance de esta etapa de prefactibilidad.

En la etapa de factibilidad se deberán buscar mayores evidencias sobre la actividad de la falla principal, toda vez que el emplazamiento de las presas sobre ella, o en su estrecha vecindad, constituye un serio riesgo para su estabilidad, no cuantificado plenamente dentro de este estudio de prefactibilidad. Indudablemente, los índices de riesgo sísmico que se han calculado, o los "períodos de retorno", o cualquier otra proyección basada en los registros disponibles, puede quedar amplia y desastrosamente superada por el eventual movimiento de una falla subyacente profunda.

## 8. PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES

La tabla 3 y las figuras 10 y 11 contienen las profundidades hipocentrales de 34 de los 191 sismos estudiados, a los cua-



les se logró determinar su profundidad. Esta muestra constituye el 18% del total, por lo tanto no puede considerarse como representativa. Estas profundidades han sido agrupadas en cuatro rangos, a saber: a) sísmos superficiales, hasta los 20 km de profundidad; b) sísmos normales, entre 20 km y 60 km de profundidad; c) sísmos profundos de 60 km a 200 km de profundidad y d) sísmos plutónicos de más de 100 km de profundidad.

La tabla 3 presenta también los resultados del análisis estadístico de las profundidades, observándose que tan solo el 3% tienen origen superficial; el 32% son sísmos normales; el 41% son profundos y el 24% corresponde a sísmos plutónicos. Las profundidades promedio para cada rango son: 15 km para los superficiales; 40 km para los normales; 74 km para los profundos y 144 km para los plutónicos, con un máximo de 240 km en lo registrado, y una profundidad promedio de 78 km para el rango total. Se observa que la mayor concentración de hipocentros (76%) ocurre dentro de la corteza como podía esperarse, aún cuando en esta zona se registra un alto índice (24%) de eventos plutónicos, confirmado por la intensa actividad tectónica del área, de lo cual se trata en la sección pertinente de este informe.

Meissner (7) encuentra explicación a algunos de estos sísmos, producidos bajo los Andes Centrales y Orientales, en las tensiones no isostáticas, compresiones y cizallamientos debidos al movimiento global de las placas y al proceso de subducción en sí.

## 9. RIESGO SISMICO

Contrariamente a lo tradicional, en este estudio se ha adoptado el concepto de índice de riesgo sísmico por cuanto los valores así calculados, no solamente tienen ingerencia directa en los parámetros de diseño sin lugar a ambigüedades, sino que consideran integralmente las características topográficas, geológicas, tectónicas y volcánicas de la región para la cual se calculan. Además tienen también en cuenta





la ubicación relativa de la obra civil dentro de la zona en estudio.

Es apenas natural entonces que el riesgo sísmico no sea el mismo en todos los sectores de una región, por lo que mal se podría, como es usual, asignar a todas ellas idéntico período de retorno. En proyectos múltiples, como el del alto Magdalena, es indispensable estimar individualmente el riesgo sísmico para cada posible desarrollo dentro del contexto regional. Esta razón inutiliza por completo la posible aplicación del concepto de período de retorno. Además, si se considera que desde 1975 se hace referencia al mapa de riesgo sísmico de Colombia (13) en diversos estudios relacionados con proyectos de ingeniería por el sector de Energía, es importante buscar la estandarización de los parámetros de evaluación de riesgo sísmico para tales estudios, razón por la cual en este estudio se utiliza el concepto de índice promedio de riesgo sísmico.

Para los diferentes sitios de aprovechamientos con fines hidroléctricos del alto Magdalena se calculó entonces el valor del Average Regional Seismic Hazard Index (ARSHI), mediante el siguiente algoritmo:

$$ARSHI = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \left[ \text{Log} \sum_{n=1}^N \frac{10^{In}}{Y} \right]_0$$

En donde, Y es el tiempo en siglos, A representa los sismos considerados dentro de la región y n es el número de eventos. En este caso se tomó Y = 1 siglo, que corresponde a la vida útil asignada al proyecto a nivel de prefactibilidad por razones de otra índole.

Las magnitudes de los focos se trasladan a los puntos en estudio para obtener las intensidades, a través de distintos esquemas que tienen en cuenta las características locales. Para tal fin, se ajustaron las atenuaciones globales para Colombia, obtenidas para el mapa de riesgo sísmico, teniendo en cuenta los resultados de distribución de efectos de la encuesta técnica realizada y las condiciones y estructuras geológicas



de la zona. Se obtuvieron así los siguientes valores por cada  $1/2^\circ$  de longitud o latitud: 0.17 para la dirección N-S; 0.15 en la dirección NE-SW; 0.19 en dirección E-W y 0.22 en dirección NW-SE. La tabla 4 presenta los valores de índice promedio de riesgo sísmico (ARSHI) para los cinco sitios de presa considerados por el proyecto. Estos valores representan las intensidades que se pueden esperar cuando menos una vez por siglo.

Nótese el amplio espectro cubierto con los valores de ARSHI obtenidos, en los cuales se observa una variación considerable del orden de  $1.5^\circ$  entre El Quimbo y Guarapas, lo cual significa que los coeficientes y parámetros, y aún los conceptos de diseño, deben variar apreciablemente de uno a otro aprovechamiento. Esta margen de diferencia no se hubiese detectado al usar el método de los "períodos de retorno".

El valor de ARSHI para el aprovechamiento El Quimbo es menor, como consecuencia de su posición relativa con respecto a los focos sísmicos y a las fallas principales, y al efecto de polarización ondulatoria tan pronunciado en todo el país. Evidentemente, la transmisión de la energía compresional proveniente de los focos sísmicos marginales es débil en las trayectorias normales a las fallas mayores que circundan el área, poniendo a El Quimbo en una situación de "aislamiento"; este fenómeno, ya ha sido detectado por otros investigadores (8). Esta conclusión sobre el aprovechamiento de El Quimbo se ha encontrado satisfactoriamente respaldada por las investigaciones de la Universidad de Wisconsin, de cuyos reportes (10) se transcribe textualmente lo siguiente: "The sudden cutoff of energy between the 197 and 233 km range (donde se encuentra justamente El Quimbo) can be explained as a shadow zone produced by an inversion of the velocity gradient with depth, or the result of changes in lateral structure".

En cambio los otros aprovechamientos (Pericongo, Oporapa, Chillurco, y Guarapas) están más expuestos al arribo de las ondas sísmicas, en razón de su mayor proximidad a la falla causativa del Magdalena, a su posición relativa



a los demás focos sísmicos, incluyendo los virtuales focos volcánicos de la zona y a su ubicación en una zona geológica de estructuras más complejas y más fracturadas.

En el caso del sismo de febrero de 1967, el cual en el último siglo se ha sentido con mayor intensidad en la región, pudo considerarse como resultado de la encuesta, que la onda liberó mayores niveles de energía en la zona Guarapas-Pericongo, que en las inmediaciones de El Quimbo, a pesar de la mayor proximidad de este último lugar al epicentro instrumental.

El valor global de ARSHI para la zona Guarapas-Pericongo, calculado en base a los valores para cada uno de los cuatro aprovechamientos (Guarapas, Chillurco, Oporapa y Pericongo), sin considerar la situación peculiar de El Quimbo, es de 7.2 grados, cifra ésta que encuadra con suficiente aproximación dentro de los índices generales dados por el mapa de riesgo sísmico de Colombia.

## 10. ACELERACIONES

En los estudios de factibilidad se deberán determinar las varias componentes de la aceleración, como lo requiere el diseño dinámico de este tipo de estructuras civiles masivas. El graben que se mencionó al analizar la tectónica sugiere la eventual ocurrencia de aceleraciones verticales de importancia para el diseño lo cual también deberá determinarse en la factibilidad. Así mismo, conocida ya la orientación que para cada presa propone este estudio, será necesario calcular las componentes de aceleración normal y transversal que se utilizarán en el diseño.

## 11. FRECUENCIAS

Los niveles esperados de energía, que en último término implican un valor ARSHI, tienen que calificarse en cuanto



al contenido de frecuencias, para poder ser aplicados objetivamente al diseño. No se debe olvidar que en este estudio se habla de fuerzas dinámicas y no estáticas; más aún, son las fuerzas cíclicas las que impelen la masa de la presa, por lo que hay que utilizarse, en este caso dentro de un "dominio de tiempo". Pero la situación se complica aún más toda vez que los movimientos sísmicos no son armónicos, sino aleatorios, lo cual significa que dentro de una misma onda "portadora" sísmica, viajan simultáneamente, y con distintos niveles de energía, múltiples ondas ( o componentes ) de diferente frecuencia que a la postre inciden disparejas sobre la represa e inducen sobre ella efectos variados.

Las figuras 12, 13 y 14 reproducen tres de los registros obtenidos en 1973 por el Centro de Investigaciones Geofísicas y Polares de la Universidad de Wisconsin, USA, durante el trazado del perfil sísmico La Cocha-Bogotá. Dichos registros son tomados en las vecindades de los proyectos Guarapas, Pericongo y El Quimbo, y se consideran de importancia en este estudio (registros facilitados directamente por el doctor Joseph Gehrhus, quien tuvo a su cargo la operación de campo). Para la obtención de estos registros se emplearon sismógrafos, de diseño propio de la Universidad de Wisconsin, acoplados a geófonos verticales.

Los sismogramas, grabados directamente en cinta magnética, no fueron filtrados digitalmente y por consiguiente representan con bastante fidelidad las ondas de arriba a los lugares de registro. Por lo demás, los registros solo han sido sometidos a los siguientes procesos: corrección de cota, corrección de velocidad ( a 6.5 km/s ), normalización ( a máxima amplitud ) y ampliación (X15). El análisis de estos registros dió frecuencias promedio de 4.9 Hz en Guarapas, 4.7 Hz en Pericongo y 2.7 Hz en El Quimbo. Las frecuencias más bajas observadas en el perfil La Cocha-Bogotá estuvieron entre 1.0 Hz y 2.3 Hz. Naturalmente estos valores requieren confirmación instrumental en la etapa de factibilidad. Son notorias, la baja frecuencia de arriba a El Quimbo, y la similitud de frecuencias entre Guarapas y Pericongo. La conformación de la traza en el sismograma de El Quimbo revela nuevamente su situación de aislamiento de este aprovechamiento.



Los estudios realizados por Ocala, et al (10), sobre la vasta información recolectada por la Universidad de Wisconsin, han detectado, bajo este sitio, mantos refractores con velocidades de onda que varían desde 6.4 km/s para la corteza superior y 7.5 km/s para la corteza inferior, hasta los 7.9 km/s en la discontinuidad de Mohorovicic.

Es decir, que la composición cortical de esta zona es de altas velocidades correspondientes a altas densidades.

Las velocidades de las ondas de arriba en Guarapas, es ligeramente más baja y cercana a los 6 km/s (comunicación personal sostenida con el doctor L. Ocala desde Lima, Perú). Por tal motivo, en la factibilidad se deberán adelantar estudios más profundos que los actuales, para determinar el contenido de frecuencias de las ondas sísmicas que finalmente absorbe el cuerpo de la presa. Esto depende de la naturaleza de los focos (gama de frecuencias liberada); de la rigidez de los estratos y horizontes que transmiten directamente por reflexión o refracción; del tren de ondas filtrado efectivamente a lo largo de la trayectoria de algunas de las componentes, y por último, de las frecuencias características de la presa en sí. Esto quiere decir que habrá que hacer observaciones de campo a fin de obtener registros sismográficos, bien sea de eventos naturales o causados (si aquellos no ocurren, o la actividad microsísmica de la región no resulta apropiada) y posteriormente someterlos al análisis de Fourier.

Puede anticiparse que se encontrarán contenidos de frecuencias diferentes para cada aprovechamiento en virtud de la heterogeneidad geológica de la zona, desde frecuencias altas para aquellos sitios de afloramientos ígneos como en Guarapas, hasta las frecuencias bajas para aquellos afloramientos sedimentarios como El Quimbo, ubicado en una zona de aislamiento.

Todo ello orientado a impedir la resonancia, cuyos efectos detrimentales en las presas, han demostrado ser: li-



cuación, esfolación, descascaramiento, asentamiento, agrietamiento, esfuerzos internos y filtraciones entre otros.

## 12. CONCLUSIONES

- a. La zona que comprende los cinco aprovechamientos considerados por el proyecto de aprovechamientos hidroeléctricos del alto Magdalena, tiene un índice de riesgo sísmico entre  $7.50^\circ$  y  $7.75^\circ$  dentro del contexto general del país.

Los estudios realizados, precisan el riesgo sísmico a 7.2 grados para Guarapas-Pericongo y 5.98 grados para El Quimbo, todo lo cual corresponde a una sismicidad alta que debe ser adecuadamente incluida en los diseños de las presas y demás obras civiles.

- b. La zona está agitada por una intensa actividad tectónica como resultado de la subducción oceánica, y del posible encuentro de los bordes de las placas de Nazca y de Suramericana, no plenamente confirmado aún.
- c. La zona presenta intenso fallamiento longitudinal y transversal, y se halla surcada por dos grandes fallas regionales, la del Magdalena al occidente y la de Altamira-Garzón al oriente, dentro de las cuales aparece un graben que sirve de asiento a los aprovechamientos considerados.
- d. El mecanismo tectónico de la zona es bastante complejo, como lo manifiesta la inversión de afloramientos hacia la falla Altamira-Garzón.
- e. La zona está próxima a un núcleo volcánico de incipiente actividad.
- f. Los mecanismos focales que conmueven la zona son esencialmente lineales y atribuibles a las fallas regionales y sus paralelas marginales.
- g. El aprovechamiento El Quimbo se encuentra en una zona de



"sombra" sísmica que lo coloca en condiciones bastante favorables, desde el punto de vista sísmico, con respecto a los demás.

### 13. RECOMENDACIONES

- a. En la etapa de factibilidad es necesario instrumentar la zona del proyecto, particularmente en los enclaves de las presas y a lo largo de las fallas regionales, con el fin de:
  - a.1 Determinar con certeza la actividad de tales fallas.
  - a.2 Establecer con mayor detalle las frecuencias propias de cada sitio.
  - a.3 Definir con mayor precisión los mecanismos focales de la zona.
  - a.4 Detectar la presencia de aceleraciones verticales considerables.
- b. Para completar la anterior información instrumental, se debe ampliar la geología a lo largo de las fallas regionales.
- c. Es conveniente, pero no indispensable, definir con mayor detalle los mecanismos focales dentro la zona del proyecto, previa reubicación de los epicentros.



## BIBLIOGRAFIA

1. Campell, C. "The Santa Marta Irench Fanlt of Colombia and its Regional Setting", Fourth Carebeean Geologi-cal Conference, Trinidad, 1968.
2. Case, J.E., Barnes, J., González, I.H., y Viña, A., "Trans-Andean Geophysical Profile of Southern Colombia", Bulletin of the Seismological Society of America, n.85, 1973.
3. Estrada, U.G. "Guatemala Otra Vez", Informe al Institu-to Panamericano de Geografía e Historia, México, 1976.
4. Estrada, U.G. Formulario elaborado para la Región de Huaraz, Perú, 1973.
5. Howell, B.F. "Average Regional Seismic Hazard Index", Pennsylvania State University, 1972.
6. Marsh B.D., y Carmichael, J.S., "Benioff Zone Magne-tism", Journal of Geophysical Research, n.79, 1974.
7. Meissmer, R.O., Fluch, E.R., Stibane, F., y Berg E. "Dynamics of the Active Plate Boundary in South-west Colombia, According to Recent Geophysical Mea-surements". Instituto de Geofísica de la Universidad de Kiel, Alemania. Publicación n.117.
8. Molnar, P., y Oliver J., "Lateral Variations of Attenuation in the Upper Manthe and Discontinuities in the Lithos-phere", Journal of Geophysical Research, 1974.
9. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earthqua-ke Data File, Boulder CO., USA, 1982. Catálogo es-pcialmente preparado para Interdiseños.





10. Ocola, L., Aldrich, L.T., Gettrust, J., Meyer, R.P. y Ramírez, J.E., "Crustal Structure under Southern Colombian-Northern Ecuador Andes from Seismic Refraction Data". Bulletin of the Seismological Society of America, n.65.
11. Ocola, L., Meyer, R.P., y Woollard, G.P. "Ocean to Continent Transition from the Panamá Basin to the Brazilian Shield", 1974.
12. Pennington, W.D. "La subducción de la Cuenca Oriental de Panamá y la Sismotectónica del Norte de Suramérica". Investigaciones Geofísicas sobre las Estructuras Océano-Continetales del Occidente Colombiano. Instituto Geofísico de los Andes, Bogotá, 1981.
13. Ramírez, J.E., y Estrada, U.G. Atlas de Colombia. "Mapa de Riesgo Sísmico". Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", 1978.
14. Ramírez J.E. "Geological and Geophysical Setting of Colombia". The Ocean-Continent Transition in SW-Colombia. Instituto Geofísico de los Andes, Bogotá, 1973.
15. Ramírez J.E. "Historia de los Terremotos en Colombia". Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2a. Ed. 1975.
16. Ringwood, A.E. "Composition and Evolution of the Upper Mantle". Monografía n.13 de la American Geophysical Union, 1969.



TABLAS



TABLA 1. Localidades cubiertas por la encuesta.

---

Agrado	Gigante	Palestina
Altamira	Guacacayo	Pital
Brucelas	Guadalupe	Pitalito
Chilurco	Isnos	Saladoblanco
Domingo Arias	La Jagua	San Agustín
Elfas	La Laguna	Suaza
El Paso de Maito	Maito	Tarqui
El Viso	Naranjo	Timaná
Garzón	Oporapa	Vega de Isnos

---

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto.

No. de sismo	Fecha		Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
1		1556	5.0	-	76.5 W - 3.0 N
2	Febrero 2	1735	5.0	-	76.5 W - 2.6 N
3	Febrero 2	1736	6.0	-	76.5 W - 2.5 N
4	Abril 25	1751	4.0	-	76.5 W - 2.5 N
5		1765	5.0	-	76.8 W - 1.9 N
6	Mayo 28	1812	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
7	Noviembre 28	1816	5.0	-	75.4 W - 3.0 N
8	Noviembre 29	1816	5.0	-	75.4 W - 3.0 N
9	Noviembre 17	1817	5.0	-	76.5 W - 2.5 N
10	Febrero 5	1819	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
11	Febrero 17	1819	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
12	Jun-Julio	1820	6.0	-	76.5 W - 2.5 N
13	Septiembre 17	1827	4.0	-	76.5 W - 2.5 N
14	Noviembre 16	1827	8.0	-	76.4 W - 1.8 N
15	Noviembre 17	1827	6.0	-	76.4 W - 1.5 N
16	Diciembre 31	1827	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
17	Febrero 9	1828	7.0	-	76.5 W - 2.5 N
18	Febrero 24	1828	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
19	Febrero 28	1828	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
20	Febrero 29	1828	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
21	Marzo 15	1828	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
22	Abril 4	1828	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
23	Mayo 6	1828	3.0	-	76.5 W - 2.5 N

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación).

No. de sismo	Fecha		Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
24	Mayo	12	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
25	Mayo	25	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
26	Junio	6	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
27	Junio	16	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
28	Junio	28	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
29	Julio	5	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
30	Agosto	19	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
31	Agosto	20	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
32	Agosto	25	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
33	Octubre	5	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
34	Octubre	11	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
35	Octubre	18	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
36	Octubre	20	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
37	Octubre	20	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
38	Octubre	22	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
39	Octubre	30	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
40	Noviembre	4	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
41	Noviembre	4	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
42	Noviembre	16	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
43	Noviembre	30	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
44	Diciembre	14	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
45	Diciembre	17	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
46	Febrero	5	1828	3.0	- 76.5 W - 2.5 N

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación)

No. de sismo	Fecha	Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas	
47	Febrero 27	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
49	Febrero 28	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
50	Marzo 1	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
51	Marzo 1	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
53	Marzo 6	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
54	Marzo 7	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
55	Abril 17	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
56	Mayo 7	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
57	Mayo 28	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
58	Septiembre 25	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
59	Septiembre 28	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
60	Noviembre 8	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
61	Diciembre 1	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
62	Diciembre 9	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
63	Diciembre 14	1829	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
64	Febrero 5	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
65	Febrero 28	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
66	Marzo 8	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
67	Marzo 9	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
68	Marzo 10	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
69	Marzo 10	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
70	Marzo 10	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
71	Marzo 12	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N
72	Marzo 12	1830	3.0	-	76.5 W - 2.5 N

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación)

No. de sismo	Fecha		Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
73	Abril	21	1830	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
74	Abril	21	1830	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
75	Abril	21	1830	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
76	Octubre	10	1830	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
77	Marzo	5	1831	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
78	Marzo	17	1831	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
79	Mayo	17	1831	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
80	Febrero	18	1832	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
81	Mayo	21	1832	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
82	Mayo	22	1832	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
83	Junio	5	1832	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
84	Mayo	1	1833	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
85	Mayo	23	1833	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
86	Septiembre	20	1833	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
87	Enero	19	1834	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
88	Enero	19	1834	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
89	Agosto	11	1834	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
90	Junio	6	1835	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
91	Junio	27	1835	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
92	Febrero	16	1838	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
93	Febrero	17	1839	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
94	Diciembre	17	1838	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
95	Mayo	28	1839	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
96	Junio	9	1839	3.0	- 76.5 W - 2.5 N

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación)

No. de sismo	Fecha		Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
97	Junio	19	1839	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
98	Junio	23	1839	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
99	Octubre	13	1839	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
100	Febrero	17	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
101	Abril	10	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
102	Junio	3	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
103	Junio	3	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
104	Agosto	23	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
105	Septiembre	3	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
106	Septiembre	4	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
107	Septiembre	18	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
108	Septiembre	28	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
109	Octubre	2	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
110	Diciembre	12	1840	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
111	Septiembre	22	1841	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
112	Septiembre	22	1841	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
113	Octubre	16	1841	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
114	Octubre	17	1841	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
115	Octubre	4	1869	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
116	Octubre	6	1869	3.0	- 76.3 W - 2.4 N
117	Abril	6	1871	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
118	Marzo-Abr.		1871	3.0	- 76.5 W - 2.5 N
119	Octubre	4	1878	5.0	- 76.5 W - 2.5 N
120	Mayo	25	1885	7.0	- 76.5 W - 2.5 N



TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación)

No. de sismo	Fecha		Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
121	Septiembre 11	1893	5.0	-	76.5 W - 2.5 N
122	Noviembre 14	1893	6.0	-	76.5 W - 2.5 N
123	Abril-mayo	1895	6.0	-	75.9 W - 2.0 N
*124- 176	Mayo	9 1944	6.0	100	76.5 W - 2.5 N
*125- 177	Julio	9 1945	6.5	100	76.5 W - 2.5 N
126	Marzo	29 1946	6.0	-	76.3 W - 2.3 N
127	Marzo	29 1946	4.0	-	76.3 W - 2.3 N
128	Marzo	29 1946	4.0	-	76.3 W - 2.3 N
129	Marzo	30 1946	4.0	-	76.3 W - 2.3 N
130	Abril	25 1955	5.0	-	75.5 W - 2.0 N
*131- 179	Mayo	23 1957	6.75	60	76.5 W - 3.0 N
132	Julio	22 1959	5.5	38	76.1 W - 2.7 N
133	Agosto	7 1959	4.0	-	76.2 W - 2.8 N
134	Octubre	31 1959	3.5	-	76.0 W - 3.0 N
135	Marzo	20 1963	3.5	-	75.0 W - 2.7 N
136	Mayo	10 1966	-	-	78.8 W - 1.9 N
*137- 191	Febrero	9 1967	6.3	60	75.0 W - 2.9 N
138	Febrero	9 1967	-	-	74.9 W - 2.9 N
139	Febrero	9 1967	4.4	62	75.0 W - 2.9 N
146	Febrero	9 1967	-	-	74.8 W - 2.7 N
149	Febrero	10 1967	-	-	74.8 W - 2.8 N
152	Febrero	11 1967	-	-	74.8 W - 2.7 N
155	Febrero	11 1967	-	-	75.1 W - 2.5 N
156	Febrero	9 1967	4.1	31	75.1 W - 2.5 N

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación)

No. de sismos	Fecha	Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
157	Febrero 12	1967	4.1	66 75.5 W - 2.8 N
*158-192	Febrero 24	1967	4.2	87 76.3 W - 2.6 N
*159-194	Febrero 26	1967	5.1	57 75.0 W - 2.9 N
*160-195	Abril 1	1967	4.4	173 75.0 W - 2.7 N
*162-197	Enero 27	1968	4.9	68 75.0 W - 2.8 N
*163-198	Julio 8	1968	4.5	77 75.9 W - 2.3 N
*164-199	Septiembre 28	1970	4.5	65 75.1 W - 2.7 N
*165-200	Noviembre 22	1972	5.0	42 75.2 W - 2.5 N
166	Octubre 18	1973	5.2	42 75.0 W - 3.0 N
*167-201	Julio 27	1974	4.5	240 75.0 W - 2.5 N
*168-202	Diciembre 8	1974	4.6	86 75.3 W - 2.8 N
*169-203	Marzo 31	1975	4.0	83 75.4 W - 2.9 N
*170-204	Febrero 12	1977	4.5	47 75.9 W - 1.9 N
*171-206	Enero 26	1978	-	64 75.8 W - 2.6 N
*172-208	Agosto 24	1979	4.3	36 75.5 W - 2.1 N
*173-209	Septiembre 8	1979	-	127 75.0 W - 2.6 N
175	Julio 17	1936	-	- 77.0 W - 1.5 N
178	Mayo 3	1950	-	- 77.0 W - 2.0 N
180	Julio 23	1959	-	- 76.1 W - 2.7 N
181	Julio 23	1959	-	- 76.5 W - 3.0 N
182	Agosto 7	1959	-	- 76.2 W - 2.8 N
183	Octubre 31	1959	-	- 76.0 W - 3.0 N
184	Abril 2	1960	-	96 76.5 W - 3.0 N
185	Mayo 6	1960	-	- 77.0 W - 2.5 N

TABLA 2. Localización de epicentros sísmicos en el área del proyecto. (Continuación)

No. de sismos	Fecha	Magnitud	Profundidad Focal en km.	Coordenadas
186	Mayo 6 1961	-	87	76.2 W - 2.8 N
187	Junio 9 1961	-	33	76.7 W - 1.5 N
188	Agosto 15 1963	4.3	38	76.1 W - 2.8 N
189	Diciembre 10 1964	4.5	123	76.7 W - 1.9 N
190	Diciembre 12 1964	3.9	40	76.1 W - 2.6 N
193	Febrero 25 1967	4.2	15	76.8 W - 2.3 N
196	Enero 4 1968	4.2	72	75.0 W - 2.6 N
205	Abril 9 1977	4.3	127	76.5 W - 2.9 N
207	Enero 6 1979	4.9	162	75.9 W - 2.2 N
210	Mayo 22 1981	4.2	43	75.9 W - 1.5 N

\* Epicentros listados dos (2) veces.

TABLA 3. Estudio de profundidades.

No. de sismo	<u>SUPERFICIALES</u> Profundidad en km.	Número : 1 de sfsmos
193	15	% del total: 3
<u>NORMALES</u> Profundidad en km.		
No. de sismo		
156	31	
187	33	
172	36	
132	38	$\bar{X}$ : 40.636
188	38	
190	40	Número de sismos : 11
165	42	
166	42	
210	43	% del total: 32
170	47	
159	57	

TABLA 3. Estudio de profundidades. (Continuación)

No. de sismo	MEDIANOS	
	Profundidad en km.	
131	60	
137	60	
139	62	
171	64	
164	65	$\bar{X} : 73.786$
157	66	
162	68	Número de
196	72	sismos: 14
163	77	
169	83	% del total: 41
168	86	
158	87	
186	87	
184	96	

TABLA 3. Estudio de profundidades. (Continuación)

<u>PLUTONICOS</u>	
No. de sismo	Profundidad en km.
124	100
125	100
189	123
173	127
205	127
207	162
160	173
167	240
	$\bar{X} : 144$
	Número de sismos: 8
	% del total: 24

Total de Datos

Número de Sismos	:	34
$\bar{X}$	:	77.853
Profundidad máxima	:	240 Km.
Profundidad mínima	:	15 Km.

TABLA No. 4. Valores Regionales Promedio de Indice de Riesgo Sísmico - ARSHI.

---

Aprovechamiento	ARSHI
Guarapas	7.51
Chillurco	7.30
Oporapa	7.13
Perincongo	6.87
Quimbo	5.98

---

TABLA 5. INFORMACION ADICIONAL

Coordenadas de los volcanes más importantes próximos al proyecto.

-	Volcán nevado del Huila	76.0° W	3.0° N
-	Volcán del Puracé	76.4° W	2.3° N
-	Volcán Sotará	76.6° W	2.27° N
-	Volcán Pan de Azúcar	76.3° W	2.2° N
-	Volcán de Cutanga	76.5° W	1.9° N
-	Volcán de Petacas	76.8° W	1.6° N
-	Volcán Doña Juana	76.9° W	1.5° N
-	Volcán de las Animas	76.82° W	1.48° N

Distancias aproximadas al eje del aprovechamiento Guarapas 2 desde cada uno de los volcanes.

-	Volcán nevado del Huila	118.5 km
-	Volcán del Puracé	41.5 km
-	Volcán de Sotará	51.5 km
-	Volcán Pan de Azúcar	27.5 km
-	Volcán de Cutanga	28.0 km
-	Volcán de Petacas	72.5 km
-	Volcán Doña Juana	88.0 km
-	Volcán de las Animas	81.0 km

Distancia desde la falla del Magdalena a cada uno de los aprovechamientos.

-	Aprovechamiento El Quimbo	9.50 km
-	Aprovechamiento Pericongo	10.0 km
-	Aprovechamiento Oporapa	0.5 km
-	Aprovechamiento Chillurco	0.0 km
-	Aprovechamiento Guarapas	3.0 km



Distancia desde la falla de Altamira-Garzón a cada uno de los aprovechamientos.

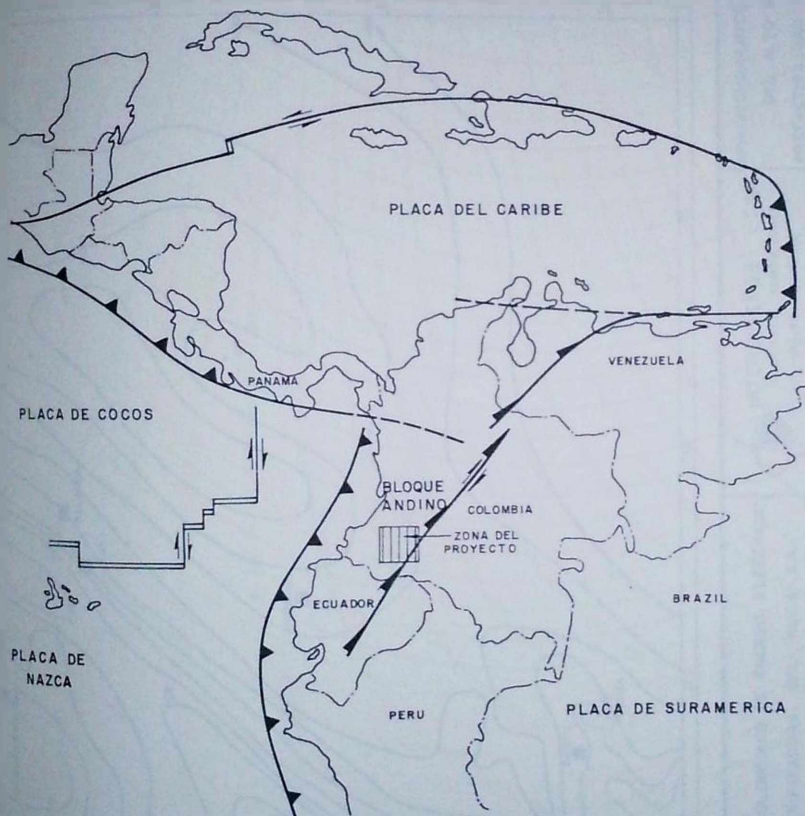
-	Aprovechamiento El Quimbo	7.5 km
-	Aprovechamiento Pericongo	8.0 km
-	Aprovechamiento Oporapa	10.0 km
-	Aprovechamiento Chillurco	15.0 km
-	Aprovechamiento Guarapas	25.0 km

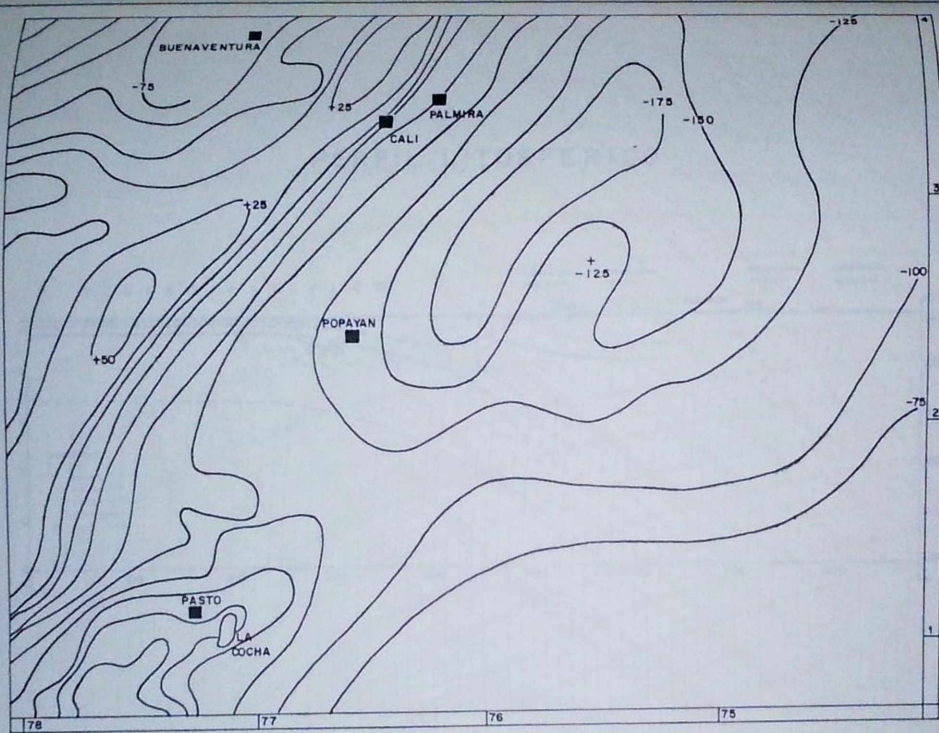
# TECNOLOGIA DE PLACAS

## FIGURAS



# TECTONICA DE PLACAS





INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA  
ELECTRIFICADORA DEL HUILA SA



INTERDISEÑOS LTDA  
INGENIEROS CONSULTORES  
Bogotá - Colombia

APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS  
DEL ALTO MAGDALENA  
PREFACTIBILIDAD TECNICA (GEOLOGIA)

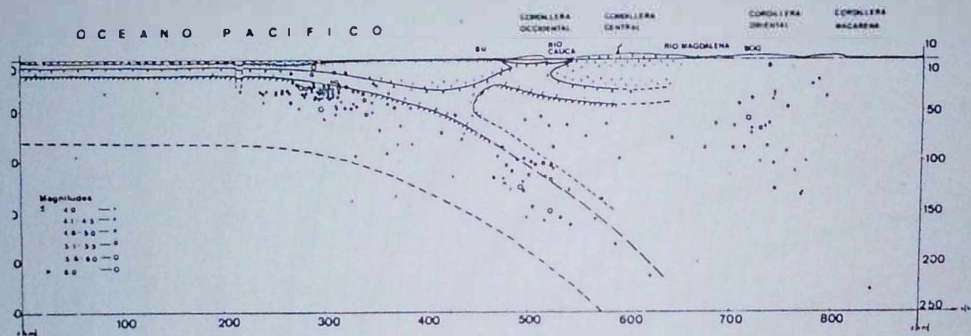
ANOMALIAS GRAVIMETRICAS

PROYECTO

FECHA:

FIGURA N°  
2 de 14

# PERFIL LITOSFERICO



INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA  
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A.



INTERDISEÑOS LTDA.  
INGENIEROS CONSULTORES

APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS  
DEL ALTO MAGDALENA  
PREFACTIBILIDAD TECNICA

INFORME DE SISMICA

PROYECTO:

FECHA:  
Agosto/82




FIGURA Nº  
3 de 14



# MAPA DE RIESGO SISMICO

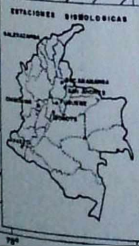
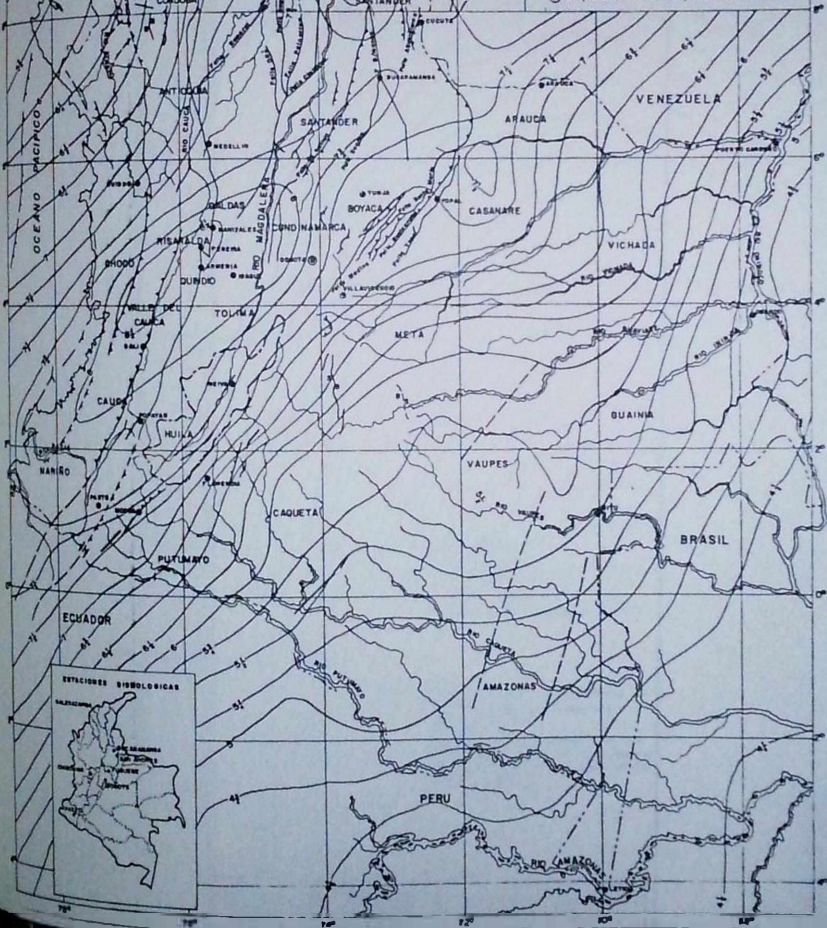
## CONVENCIONES

ESCALA 1:500,000

- Fallas Normales 
- De Sobrecorrimiento 
- Dirección del Corrimiento 

Índice promedio de Riesgo Sísmico  $\frac{7}{10}$   
 Significa que en esta zona puede ocurrir un sismo de intensidad Mercalli mayor de 7 1/2 como sigue. Datos suministrados por Dr. Jesús Emilio Romirax Ph.D. INSTITUTO GEOFISICO DE LA U. JAVERIANA. Preparado por Dr. Gabriel Estrada Uribe Ph.D.

© 1977, Jesús Emilio Romirax y Gabriel Estrada Uribe.



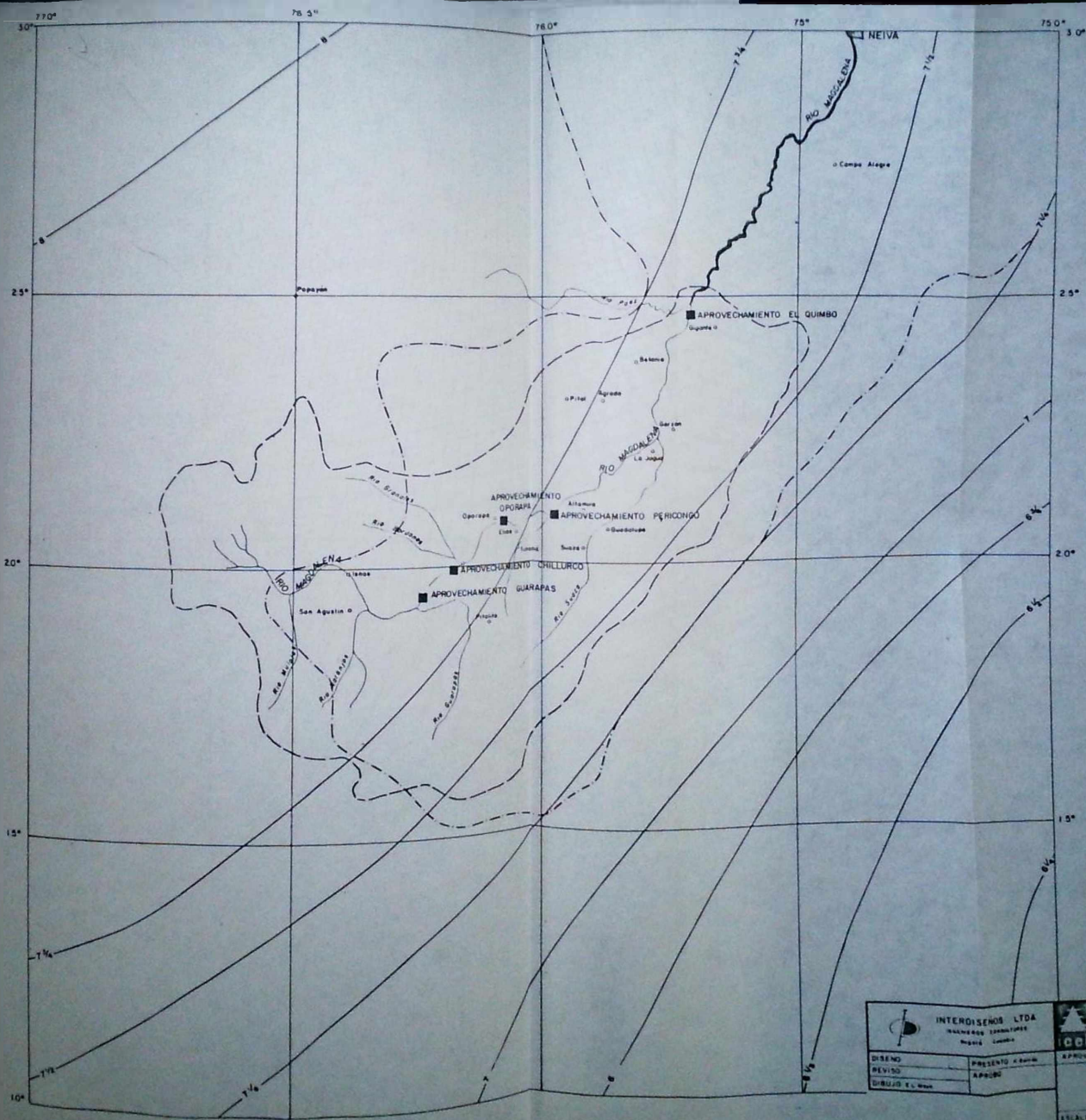
Instituto Colombiano de Energía Eléctrica  
 Electrificadoras del Huila S.A.  
 APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS  
 DEL ALTO MAGDALENA



**INTERDISEÑOS**  
 INGENIEROS-CONSULTORES  
 Bogotá - Colombia

PREFACTIBILIDAD TECNICA  
 SIMBOLOGIA

FIGURA: 5 de 14



CONVENCIONES

- Línea isosísmica
- - - Límite Departamental
- - - Límite Cuenca Hidrográfica

NOTAS: - Base cartográfica: Mapa Geológica del Depto del Huila por Arango J y Kossin T 1977

- El trazado de las coordenadas se hizo en base a los datos del libro "Historia de los terremotos en Colombia" 2ª Ed. Ramirez J. E. 1975.

**INTERDISEÑO LTDA**  
Ingeniería y Arquitectura  
Bogotá, Colombia



INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A.

APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS DEL RÍO MAGDALENA

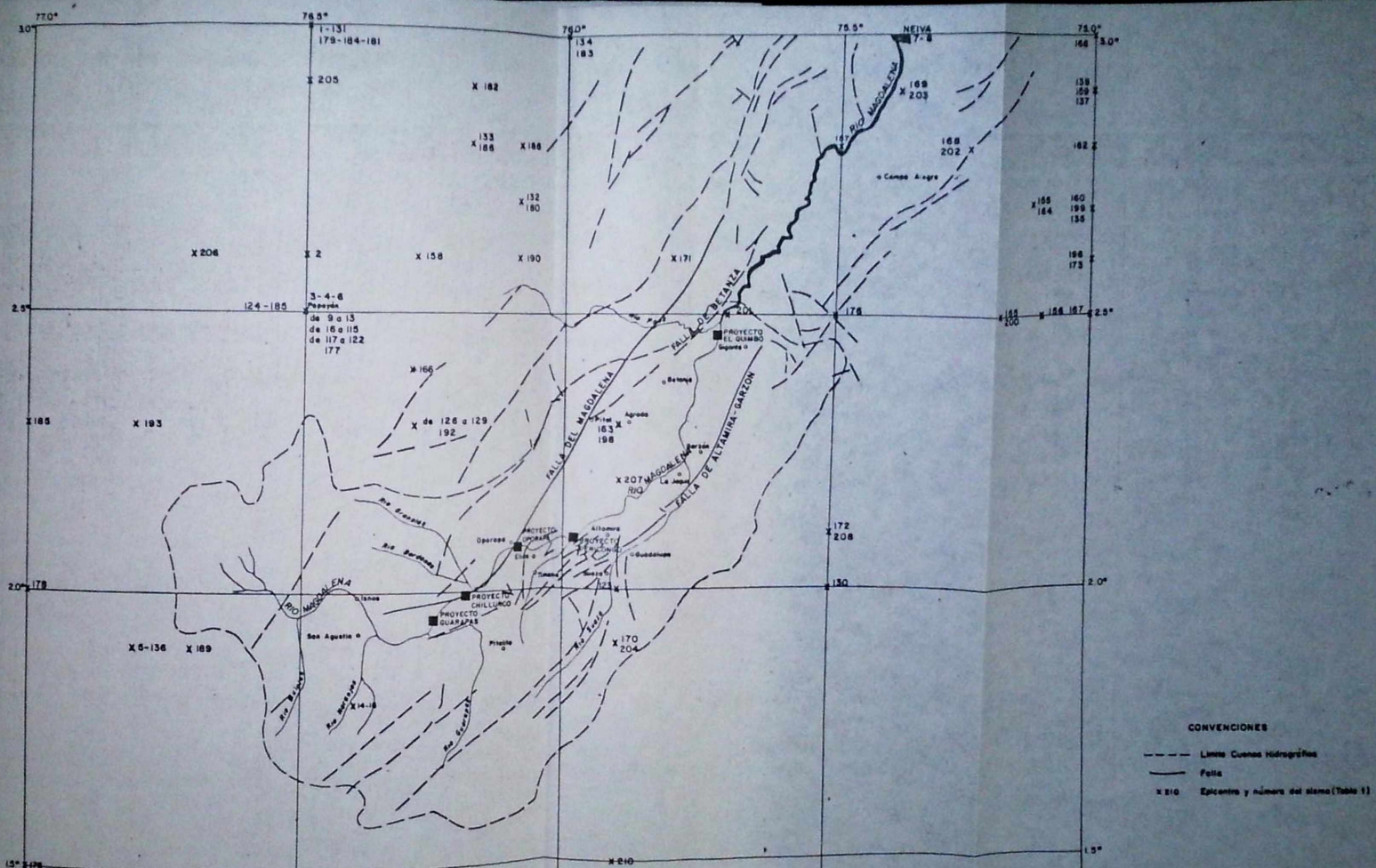
DISEÑO: Presente x/bcm  
REVISÓ: Apacido  
DIBUJÓ: E.L. 1988

MAPA DE RIESGO SISMICO DE ZONA DE APROVECHAMIENTOS

ESCALA: 1:500.000 FECHA: ABRIL 1978 FOLIO: 8 DE 14







**CONVENCIONES**

--- Límite Cuencas Hidrográficas

— Faja

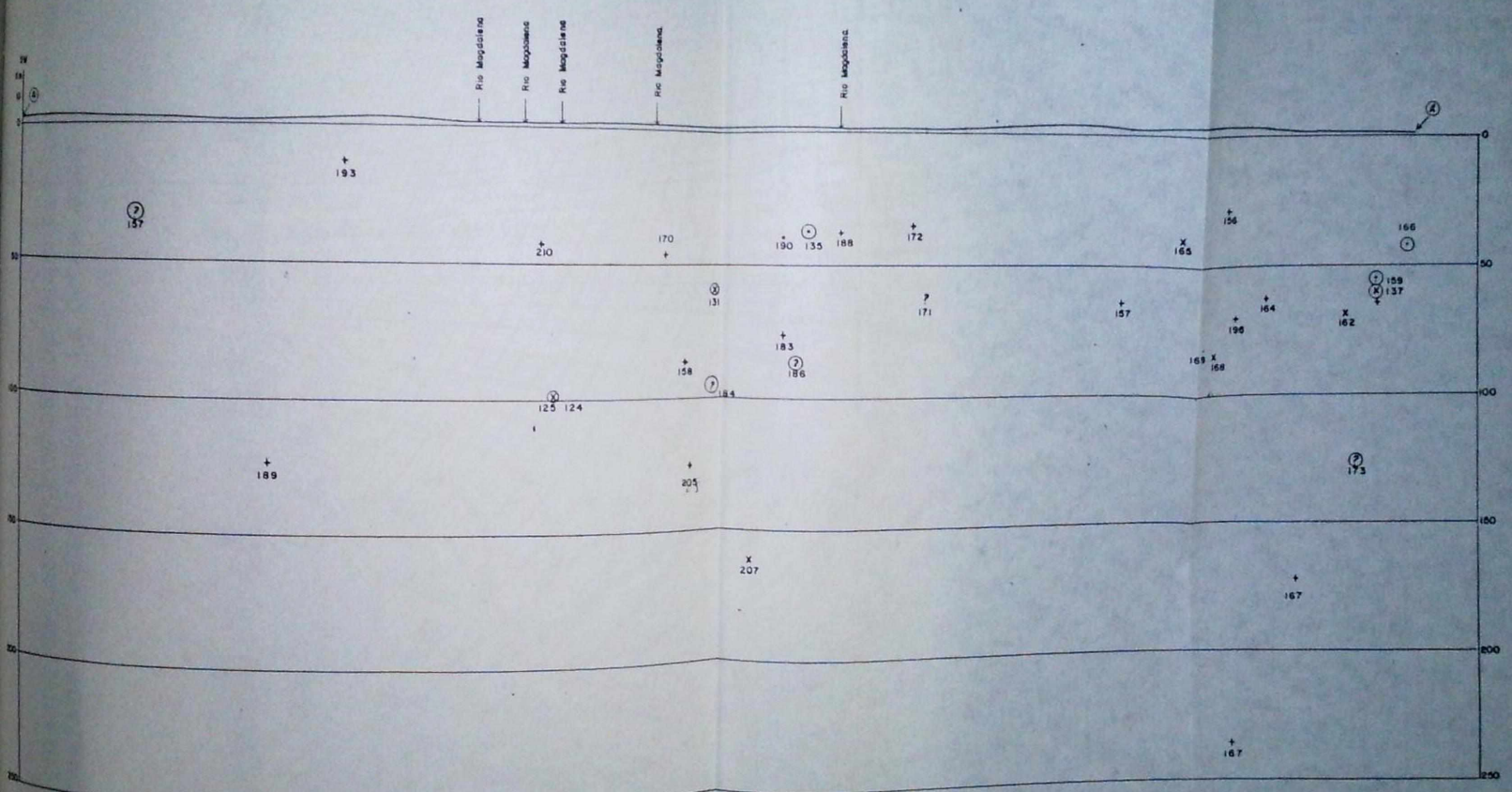
X 210 Epicentro y número del sistema (Tabla 1)

**NOTAS**

- Base cartográfica Mapa Geológico del Depto del Huila por Arango y Nassen T 1977.
- El trazado de coordenadas se basa en datos de los datos del libro Historia de los terremotos en Colombia 2ª Ed. Restrepo J E 1975.

 <b>INTERDISEÑOS LTDA</b> <small>INGENIEROS Y ARQUITECTOS</small> <small>Bogotá - Colombia</small>		 <b>INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA</b> <b>ELECTRIFICADORA DEL HUILA SA</b>	
DISEÑO: PRESENTE & ASOCIADOS TITULO: SISMOLOGIA ELABORADO EN: Huila		APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS DEL ALTO MAGDALENA	
<b>MAPA SISMOTECTONICO</b>			
ESCALA: 1:500.000		FECHA: Agosto/78	FOLIO: Nº 8 de 14



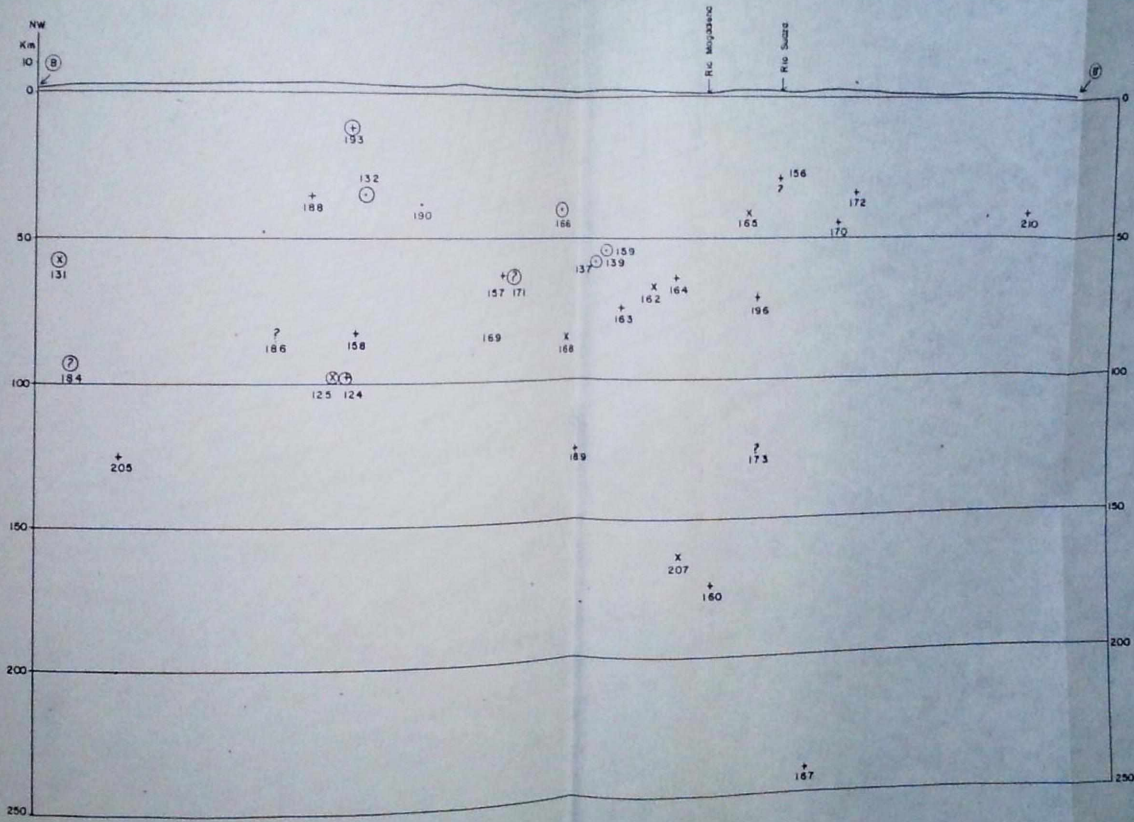


**MAGNITUDES**

- 5.0 — +
- 4.1-4.9 — +
- 4.0-3.9 — x
- 3.1-3.9 — o
- 2.0-2.9 — ⊙
- > 4.0 — ⊖
- Indeterminado — ⊕

Escala Horizontal 1:500,000 Vertical 1:100,000  
 NOTA: El número corresponde al listado de  
 según de la tabla 3.

	<b>INTERDIENOS LTDA</b> S.A. de C.V. (Sociedad Anónima) Bogotá - Colombia		<b>INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA</b> ELECTROFISICA DEL NOBLE S.A.
DISEÑO: _____ REVISO: _____ DIBUJO: J. RIVERA W.	PRESENTE y Firmado: _____ APROBADO: _____	<b>PLOTEADO EN HIPOCENTROS CORTE A-A'</b>	



MAGNITUDES

5.0 ———— +

4.1-4.9 ———— +

4.8-5.0 ———— x

5.1-5.9 ———— o

6.0-6.9 ———— x

> 6.0 ———— x

Indeterminado ———— o

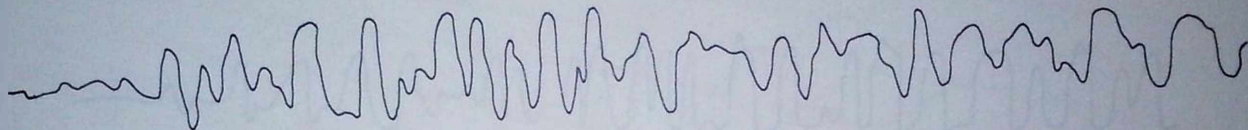
Escala Horizontal: 1:500,000 Vertical: 1:100,000

NOTA: El numero corresponde al listado de sismos de la tabla 3

 <b>INTERDISEÑOS LTDA</b> INGENIERIA CONSULTIVA Bogotá - Colombia		 <b>INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA</b> ELECTRICIDAD DEL RIOSA SA
DISEÑO: _____ REVISÓ: _____ DIBUJÓ: _____	PRESENTE: _____ APROBO: _____	APROXIMACIONES HIDROLOGICAS DEL RIO MAGDALENA
<b>PLOTEO DE HIPOCENTROS CORTE B - B'</b>		

REGISTRO TOMADO EN LAS VECINDADES DE GUARAPAS DURANTE EL  
TRAZADO DEL PERFIL SISMICO LA COCHA-BOGOTA

1 Seg.



GUARAPAS



INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA  
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A.



INTERDISEÑOS LTDA.  
INGENIEROS CONSULTORES

APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS  
DEL ALTO MAGDALENA  
PREFACTIBILIDAD TECNICA

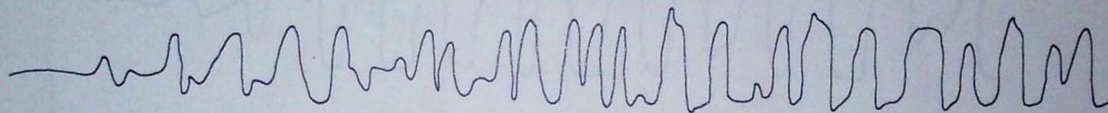
INFORME DE SISMICA

PROYECTO:

FECHA:  
Agosto/82

FIGURA Nº  
12 de 14

REGISTRO TOMADO EN LAS VECINDADES DE PERICONGO DURANTE EL  
TRAZADO DEL PERFIL SISMICO LA COCHA-BOGOTA



PERICONGO

1 Seg.



INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA.  
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A.



INTERDISEÑOS LTDA.  
INGENIEROS CONSULTORES

APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS  
DEL ALTO MAGDALENA  
PREFACTIBILIDAD TECNICA

INFORME DE SISMICA

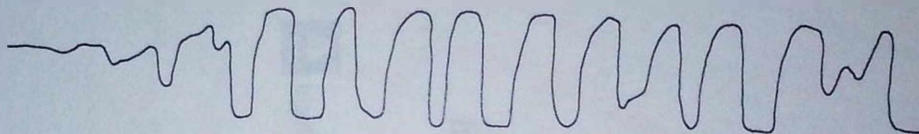
PROYECTO:

FECHA:  
Agosto/82

FIGURA N°  
13 de 14

REGISTRO TOMADO EN LAS VECINDADES DE EL QUIMBO DURANTE EL  
TRAZADO DEL PERFIL SISMICO LA COCHA-BOGOTA

1 Seg.



EL QUIMBO



INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA.  
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A.



INTERDISEÑOS LTDA.  
INGENIEROS CONSULTORES

APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS  
DEL ALTO MAGDALENA  
PREFACTIBILIDAD TECNICA

INFORME DE SISMICA

PROYECTO:

FECHA:  
Agosto/82

FIGURA Nº  
14 de 14



# Initial Seismic Hazard Study Alto Magdalena Project Colombia



Prepared for  
Instituto Colombiano de Energia Electrica  
Electrificadora del Huila, S.A.  
and

Interdiseños, Ltda.



October 8, 1982

Ing. Carlos Vasquez G.  
Interdiseños Ltda.  
Ingenieros Consultores  
Carrera 16, No. 39-A - 77  
Bogota, Colombia

INITIAL SEISMIC HAZARD EVALUATION,  
ALTO MAGDALENA PROJECT, COLOMBIA

Dear Dr. Vasquez:

We are pleased to submit our report, Initial Seismic Hazard Evaluation, Alto Magdalena Project. The most important conclusions of this pre-feasibility study are:

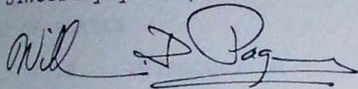
- The Alto Magdalena Project is located in a tectonically active region, where earthquakes are moderately common. The largest historical earthquakes within 50 km of the proposed project facilities are the 16 and 17 November 1827 events, estimated by Estrada (1982) to have magnitudes 8 and 6, respectively; the April or May 1895 event, estimated magnitude 6; and the 9 February 1967 event, magnitude 6.3 (6.7?).
- The faults identified as most significant to the project are the eastern frontal faults of the Cordillera Oriental, the Altamira fault, the Magdalena fault, and the Iquirá fault. The subduction zone is also a significant source of earthquakes.
- No active faults were observed at the Quimbo or Pericongo dam sites. The Magdalena fault passes through the Oporapa and Chillurco sites. A possible branch fault of the Magdalena fault passes through the Guarapas I site and near the Guarapas II site.
- The recommended studies for the feasibility phase of the project are 1) to evaluate the degree of activity of the subduction zone, the regional faults, and the faults at the Guarapas, Oporapa, and Chillurco sites; and 2) to study the historical seismicity to relate events to specific faults.



Ing. Carlos Vasquez G.  
October 8, 1982  
page 2

It has been a pleasure working with you and your professionals on this important project for Huila and Colombia. If we can be of further assistance, please do not hesitate to call on us.

Sincerely yours,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W.D. Page', with a long horizontal flourish extending to the right.

William D. Page  
Senior Project Geologist

## TABLE OF CONTENTS

	<u>Page</u>
LETTER OF TRANSMITTAL	i
LIST OF FIGURES	iv
LIST OF TABLES	iv
LIST OF PLATES	iv
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 TECTONIC SETTING	3
3.0 GEOLOGY AND FAULTS	6
3.1 Geologic Setting	6
3.2 Eastern Frontal Fault System	8
3.3 Altamira Fault	8
3.4 Magdalena Fault	8
3.5 Iquira Fault	11
3.6 Other faults	11
4.0 MAJOR SIGNIFICANT EARTHQUAKES	16
5.0 CONCLUSIONS	17
6.0 RECOMMENDATIONS	19
REFERENCES	R1

## LIST OF FIGURES

	<u>Page</u>
1 Tectonic Model of Northwest South America	4
2 Photograph of Altamira Fault	9
3 Photograph of the Magdalena Fault at Oporapa Dam site.	10
4 Photograph of Guarapas II Dam site	12
5 Photograph Guarapas I Dam site.	13
6 Photograph of Iquirá Fault	14
7 Photograph of Tello Fault	15

## LIST OF TABLES

1 Active Faults, Alto Magdalena Region	7
2 Faults Significant to the Proposed Dam sites, Alto Magdalena Project.	18

## LIST OF PLATES

I Map of principal Faults, Alto Magdalena Region
II Cross-sections AA and BB, Alto Magdalena Region
III Trench Log of the Laguna Fault near the Oporapa Site.

INITIAL HAZARD STUDY  
ALTO MAGDALENA PROJECT, COLOMBIA

1.0 INTRODUCTION

This initial seismic hazard investigation for the Alto Magdalena Project in southern Colombia is part of the pre-feasibility studies being conducted by Interdisenos, Ltda. of Bogota. Interdisenos is under contract with the Instituto Colombiano de Energia Electrica (ICEL) and the Electricadora del Huila, S. A., to study the potential for hydroelectric power development along the Rio Magdalena in the southern part of the State of Huila. The study area is located south of the city of Neiva and south of the Betania Dam, which is currently under construction. The proposed project consists of five different dam sites; several of the sites have two alternative sites. The proposed dams (Plate I) from north to south are:

Quimbo	-	height 120 m
Pericongo	-	height 140 m
Oporapa	-	height 80 m
Chillurco	-	height 60-80 m
Guarapas	-	height 100-120 m

All the dams are rockfill with clay core except Guarapas, which is proposed to be a gravity concrete dam or earthfill dam with a concrete face.

These proposed dams, when integrated with the Betania Dam and others proposed for a major tributary, the Rio Paez, will form a very important power source to aid in the continued growth and development of this part of Colombia.

In September 1982, Interdisenos retained Woodward-Clyde Consultants (WCC) to help them in their preliminary evaluation of the seismic hazards for the project. WCC was requested to paid particular attention to the two alternate Guarapas sites, because a concrete gravity dam is proposed in a zone where an active fault was considered possible. The objectives of the investigation were to:

- Identify the major fault systems in the region that could be active or potentially active.
- Examine each dam site for the possibility of active faults at or near the sites.
- Review the existing compilations of historical earthquakes.
- Formulate a program of investigation for the feasibility studies.

To achieve these objectives, the following was done in the early part of September 1982:

- A review of the pertinent literature on active faults in the region.
- An examination of the LANDSAT images for the region at the Instituto Geografico "Agustin Codazzi."
- A study of aerial photographs at each damsite.
- A discussion of the Betania fault (as it is known near the Betania dam site) with the geologists at Sedic, Ltda. in Medellin.
- A review of the historical earthquakes compiled by Gabriel Estrada and Padre Ramirez.
- Helicopter reconnaissance (1 day) of each site and of a number of faults in the State of Huila.

## 2.0 TECTONIC SETTING

The assessment of the rate and style of faulting and of the degree of activity of faults requires an understanding of the tectonic forces and the times at which tectonic deformation in the region occurred. This brief summary of the tectonic setting is presented as background information.

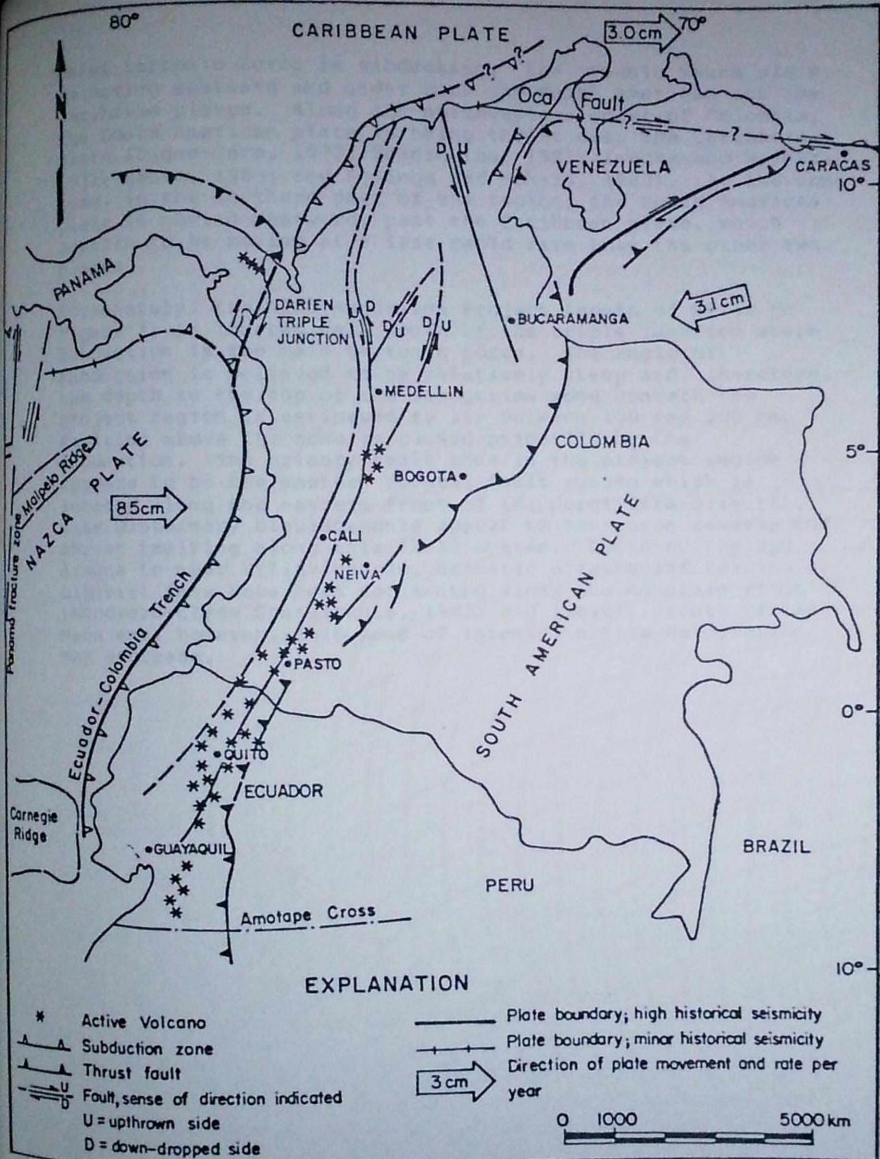
Although the northern Andes have been periodically uplifted since the Jurassic, it is the late Cenozoic history that is important to this study. Since middle Cretaceous time, regional uplifts have occurred during three different orogenies; the Late Cretaceous orogeny (100 million years ago), the early Miocene Proto-Andean orogeny (24 to 21 million years ago), and the Pliocene Andean orogeny (4.5 to 3 million years ago) (Duque-Caro, 1978; Irving, 1975; Martin, 1978). The latest Andean orogenic pulse began approximately 1 million years ago and is continuing (Woodward-Clyde Consultants, 1980).

Ancient subduction of the Nazca plate below the South American plate in early to middle Miocene time presumably caused the substantial uplift of the three cordilleras. Erosion of these ranges resulted in deposition of a thick sequence of sediments in the upper Magdalena area and along the Caribbean coast (Duque-Caro, 1978). After this period of quiescence and erosion, subduction apparently resumed during the late Andean orogeny and the three modern cordilleras were uplifted. This latest orogeny was accompanied by extensive volcanism in the Cordillera Central near and to the south of Manizales.

The most recent period of uplift of the Cordillera Oriental was initiated 3 to 4 million years ago and lasted for 1.5 to 2.0 million years (van der Hammen and others, 1973). The Cordilleras Central and Occidental were probably concurrently uplifted. This period of uplift coincided with the collision of the Central American and the South American continental masses, which isolated the Caribbean Sea from the Pacific Ocean, 3.5 to 3.1 million years ago (Keigwin, 1978). The late Andean orogeny was the period of most extensive uplift and deformation, and the most recent phases of this orogeny form the present tectonic framework for northwestern Colombia.

In regions of the world where only two crustal plates interact, the zone of major deformation is generally localized along a relatively simple plate boundary. In a region where there is a triple junction, where three crustal plates are interacting, the tectonic model is more complicated. Northwestern Colombia, which is located near a triple junction between the South American, Nazca, and Caribbean plates, is such a tectonically complex area (Figure 1). In the central and southern part of Colombia (south of 6°N latitude), the





chief tectonic force is subduction: the oceanic Nazca plate is moving eastward and under both the South American and the Caribbean plates. Along the northwestern coast of Colombia, the South American plate is being thrust over the Caribbean plate (Duque-Caro, 1978; Pennington, 1981; Isacks and Molnar, 1971; Santo, 1969; and Kellogg and others, 1980). At the same time, in the northern part of the region, the South American plate is moving westward, past the Caribbean plate, which appears to be moving at a less rapid rate than the other two plates.

Fortunately, the Alto Magdalena Project (south of Neiva on Figure 1) is located well south of the triple junction where subduction is the main tectonic force. The angle of subduction is believed to be relatively steep and, therefore, the depth to the top of the subduction zone beneath the project region is estimated to lie between 100 and 200 km. Faulting above the zone is caused primarily by the subduction. The primary fault zone in the project region appears to be the eastern frontal fault system which is located along the eastern front of the Cordillera Oriental. Late Quaternary displacements appear to have been reverse and thrust faulting along this fault system. South of the Rio Arauca to near Villavicencio, dramatic offsets and folding of alluvial fans have been documented along the mountain front (Woodward-Clyde Consultants, 1982a and 1982b). South of the Macarena, however, this zone of intense, active deformation may decrease.

### 3.0 GEOLOGY AND FAULTS

#### 3.1 Geologic Setting

The region of the Alto Magdalena Project lies in the valley of the upper Rio Magdalena where the Cordillera Oriental meets or merges with the Cordillera Central. This region is tectonically and geologically a complex. To the east are the jungle-covered plains of the Llanos Orientales. These plains, at elevation 500 m, are underlain by relatively undeformed Tertiary and older sedimentary rocks that cap a Precambrian basement. Meeting the plains abruptly are mountains of the Cordillera Oriental. These mountains reach elevations of 2000 to 3000 m in the project region; they are composed mostly of Precambrian igneous and metamorphic rocks on the eastern side and of complexly folded and faulted metamorphic and sedimentary rocks of Paleozoic and Mesozoic age on the western side.

West of the Cordillera Oriental is the upper Magdalena valley. It is occupied by low hills and lowlands at elevations between 500 and 1500 m. The rocks beneath the valley are generally gently folded and faulted sedimentary rocks, Cretaceous to late Tertiary in age. Locally in the south and common in the north, Quaternary terraces and fans occur. On the western side of the valley are volcanic lahars and flows that originated from the still active volcanoes in the Cordillera Central.

The Cordillera Central bounds the Magdalena valley on the west. It reaches elevations of 3500 to 4000 m and has volcanic peaks that rise above the general crest to 5000 m. The main rocks are Triassic, Jurassic and Cretaceous sedimentary rocks that are complexly folded and faulted, and Triassic and Jurassic intrusive plutonic rocks. These are capped by volcanic deposits of late Tertiary and Quaternary age. Several of the volcanoes have been active in historical times (Ramirez, 1975).

Although there are many bedrock faults mapped in the Alto Magdalena region (Arango Caldad and others, 1976; Torres and others, 1959; Interdisenos, 1982; Kroonenberg and Diederix, 1982), the main fault systems that exhibit marked evidence of activity during Quaternary time are the northeast-trending zones (or groups) of faults (Plates I and II). These fault zones are generally reverse. The principle faults are the eastern frontal fault system of the Cordillera Oriental, the Altamira, the Magdalena, and the the Iquira (including the Nataga). The evidence for the activity on these faults during the Quaternary is summarized in Table 1.

TABLE 1  
ACTIVE FAULTS, ALTO MAGDALENA REGION

<u>FAULT</u>	<u>TYPE</u>	<u>LENGTH</u>	<u>EVIDENCE OF ACTIVITY</u>
Eastern frontal faults of the Cordillera Oriental.	Reverse and thrust; dips west	300 km between La Macarena and Ecuador; 900 km between Rio Arauca and Ecuador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dramatic faulted Quaternary fans and alluvial deposits known near Villavicencio and Yopal (Woodward-Clyde Consultants, 1982a, 1982b).</li> <li>- Alluvial surfaces appear faulted on LANDSAT images between La Macarena to Florencia and possibly farther to the south.</li> </ul>
Altamira fault	Reverse (?) with major strike-slip (?) component	290 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alluvial terraces faulted up-on-the-west approximately 50 m near Algeciras (Torres and others, 1959).</li> <li>- Fault appears as striking lineaments on LANDSAT images.</li> </ul>
Magdalena fault (includes Betania and Vertedero faults)	Reverse; dips west	140 km $\pm$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faulted Quaternary alluvial terraces near Salado Blanco (Alfredo Rosales, 1982 personal communication).</li> <li>- Possible faulted soils in trench near Oporapa site. (Interdisenos, 1982).</li> <li>- Apparently faulted alluvial terraces on Vertedero fault with up-on-west displacement of 10 m <math>\pm</math>, 6 km south of Betania dam site.</li> <li>- Betania fault cuts "talus" with 30 cm displacement (Sedic, Ltda. and Harza Engineering Co., 1976).</li> </ul>
Tello fault	Reverse (?) dips east (?)	>50 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faulted alluvial fan deposits at Rio Fortalecillas and near Tello (Torres and others, 1959).</li> </ul>
Iquira fault (includes Plata fault)	Reverse dips west	>120 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geomorphic evidence near Iquira and Teruel includes over steepened slopes, fans that begin at the fault, possible warped volcanic fan surface near La Argentina, and abrupt changes in slope at the fault.</li> </ul>
Nataga fault	Reverse (?)	>80 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geomorphic evidence includes oversteepened slopes, abrupt changes in slope at the fault, lineaments in volcanic deposits along projection of the fault.</li> </ul>

### 3.2 Eastern Frontal Fault System

The eastern frontal fault system is probably the master system in the region. In the Alto Magdalena region, it trends along the eastern base of the Cordillera Oriental as a series of en echelon, right-stepping faults. The fault system to the north, between Villavicencio and the Rio Arauca, has probably the highest degree of activity of any fault in that part of Colombia (Woodward-Clyde Consultants, 1982a,b). It is not well known in the Alto Magdalena region, however, and was not visited during WCC's reconnaissance.

### 3.3 Altamira Fault

The Altamira fault is a remarkably straight fault that appears as a dramatic lineament on LANDSAT images. It cuts diagonally across the Cordillera Oriental generally bounding Precambrian basement on the east and Cretaceous and other sedimentary rocks on the west. In the area of Algeciras, Quaternary terrace and alluvial fill deposits have been faulted (Torres and others, 1959), leaving dramatic fault scarps (Figure 2) as evidence of recent activity. South of Algeciras, the Altamira fault has a number of branches. The branch that passes near Pitalito has a prominent geomorphic form suggestive of Late Quaternary activity. Another, but lesser branch, passes near the Pericongo dam site where it separates Cretaceous from Tertiary rocks.

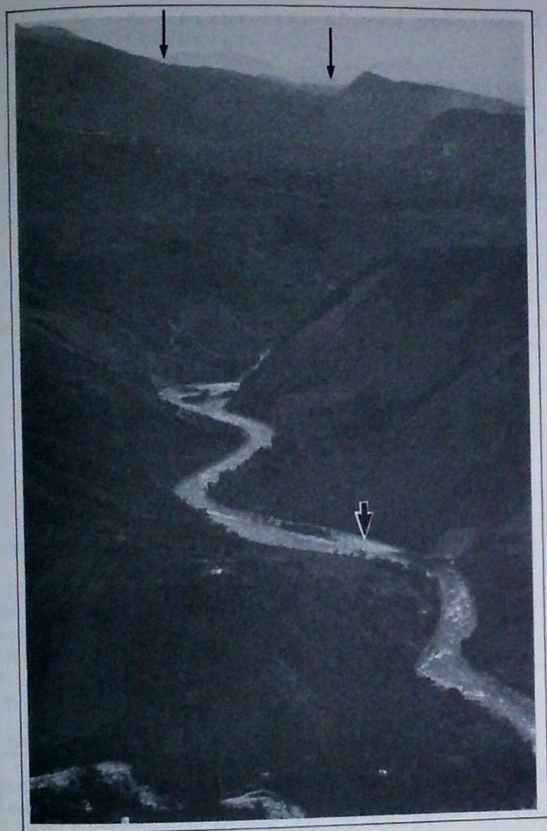
### 3.4 Magdalena Fault

The Magdalena fault trends northeast, extending from east of San Augustine to near Neiva, more or less up the central part of the Magdalena Valley. It consists of a number of different strands that are subparallel and that occupy a zone of 1 to 4 km wide. One fault, the Betania fault (near the Betania dam site) is a reverse fault. In a trench excavated at the site, the fault dips west at 70 degrees and is shown to displace colluvium ("talus") by 30 cm (Sedic, Ltda. and Harza Engineering Company, 1976). The Vertedero fault, another branch of the Magdalena fault near the Betania site, appeared during the helicopter reconnaissance to displace terrace deposits a few kilometers south of the Betania site. Eighty kilometers south of the Betania site, near the Oporapa dam site, the Magdalena fault zone is narrower, less than 1/2-km wide. The main Magdalena fault, as exposed along a small creek north of the Oporapa site, is over 100 m wide and consists of gray gouge and milonite. In this area, the fault has prominent geomorphic expression including side hill saddles, side hill lineaments, and over-steepened slopes (Figure 3). A trench near the Oporapa dam site was excavated over the Laguna fault, a branch of the Magdalena fault. The trench was logged by Interdisenos earlier in the year. The



The Altamira fault ( ↓ ) west of Algeciras (right center). The fault displaces the older alluvial fan with a prominent scarp in the foreground and the younger fan with a scarp and a vegetation line in the middle ground. View is looking north.

INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA ELECTRIFICADORA DEL HUILA, S. A.	PHOTOGRAPH OF ALTIMIRA FAULT	
INTERDISEÑOS LTDA. Woodward-Clyde Consultants	Alto Magdalena Project	Figure 2



The Oporapas dam site (↓) is located on the Rio Magdalena. The Magdalena fault (↙) forms the left abutment as a wide zone of milonite and sheared rock. The fault has two branches along the skyline. A trench that exposed the fault was excavated near the house on the ridge in the center foreground. The view is looking north.

INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA ELECTRIFICADORA DEL HUILA, S. A.	PHOTOGRAPH OF MAGDALENA FAULT AT OPORAPA DAM SITE	
INTERDISEÑOS LTDA. Woodward-Clyde Consultants	Alto Magdalena Project	Figure 3

log from the trench (Plate III) showed possible fault displacements in the soils.

From the Oporapa site to near the Guarapas site, the Magdalena fault makes a strong, northeast-trending lineament consisting of straight river segments of the Rio Magdalena and low side-hill saddles. Near Salado Blanco, a terrace was reported as displaced (A. Rosales H., 1982, oral communication). Near The Guarapas sites, the main Magdalena fault is located approximately 2 km to the northwest of the sites where it makes a prominent alignment of stream segments and low saddles. A probable branch fault that trends north passes near both the proposed Guarapas I and II sites. This fault appears as a side-hill shoulder, 100 m to the northwest of the Guarapas II site (Figure 4), and it passes through the axis of the proposed Guarapas I site (Figure 5). The fault was not seen in the field, but the lineament in the river and the eroded core near the Guarapas I site (Figure 5) indicate that it is a weak zone of shearing and possible fault gouge.

### 3.5 Iquira Fault

The Iquira fault trends northeast along the west side of Magdalena valley. It is well defined west of Neiva, between Natagaima on the north and Tesalia on the south. South of Tesalia, it branches into several less prominent splays, such as the Plata fault and the Nataga fault, that trend into the Cordillera Central. Near Iquira and Teruel, it is several very prominent lineaments (Figure 6) of over-steeped slopes, straight stream segments, side-hill saddles and deep notches. This geomorphic evidence strongly suggests that the fault is active.

### 3.6 Other Faults

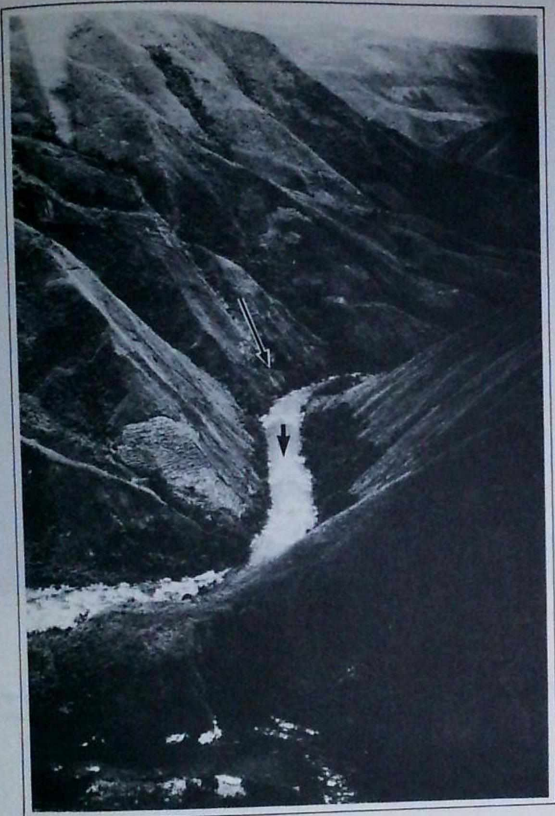
Other active faults, such as the Tello fault (Figure 7), are undoubtedly present in the Alto Magdalena area. Most, however, will probably prove to be related to the above mentioned major fault systems. This reconnaissance showed, moreover, that some parts of bedrock faults are more active than other parts. This information suggests that over a period of time the fault activity shifts from fault to fault in the region; thus, any analysis of fault activity will be complicated.





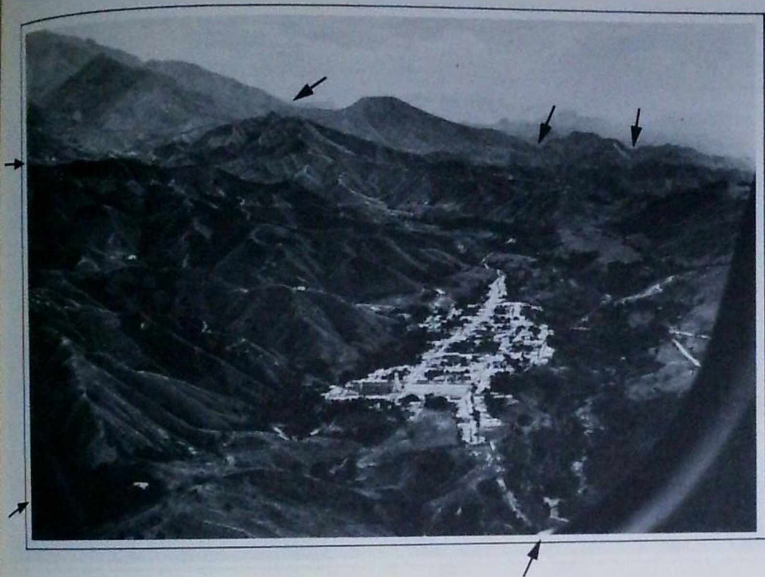
The Guarapas II damsite ( ↓ ) on the Rio Magdalena. A possible branch fault ( ↓ ) of the Magdalena fault passes in the saddle on the left abutment. Note the fill terrace in the background. View is looking south.

INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA ELECTRIFICADORA DEL HUILA, S. A.	PHOTOGRAPH OF GUARAPAS II DAM SITE	
INTERDISEÑOS LTDA. Woodward-Clyde Consultants	Alto Magdalena Project	Figure 4



The Guarapas I dam site (↓) on the Rio Magdalena. A lineament, which is a possible branch fault (↙) of the Magdalena fault, is seen as the straight stream segment and eroded cove full of trees at the bend in the river in the foreground. View looking north.

INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA ELECTRIFICADORA DEL HUILA, S. A. INTERDISEÑOS LTDA. Woodward-Clyde Consultants	PHOTOGRAPH OF GURAPAS I DAM SITE  Alto Magdalena Project	Figure 5
---	--	----------



The Iquira fault, a reverse fault, has several branches ( ↘ ) seen as strong lineaments ( ↘ ). View is looking north toward Iquira (center of photograph).

INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA ELECTRIFICADORA DEL HUILA, S. A. INTERDISEÑOS LTDA.	PHOTOGRAPH OF IQUIRA FAULT	
Woodward-Clyde Consultants	Alto Magdalena Project	Figure 6



The Tello fault (↓) southeast of Tello. The fault displaces the alluvial fan with a prominent scarp in the central part of the photograph. View is looking north.

#### 4.0 MAJOR HISTORICAL EARTHQUAKES

Summaries of the historical earthquakes that have occurred in Huila and adjacent areas have been compiled by Estrada (1982) and Ramirez (1975) and are not duplicated here. The region has been subjected to a large number of earthquakes (Estrada lists 210) reflecting deep subduction below the region and faulting in the overlying crust. Although earthquakes smaller than magnitude 6 can produce potentially damaging ground motions for the project facilities, for the purposes of this report, only three historical earthquakes that were larger than magnitude 6, that occurred in the Department of Huila are discussed here. These descriptions underscore that very large earthquakes are probable in the project region (see Plate I for locations).

The 16 November 1827 earthquake had an approximate magnitude 8, based on intensity reports (according to Estrada, 1982) or magnitude 6.5 to 6.9 (according to Ramirez, 1975). It was located 40 km south-west of Pitalito and 15 km south of San Augustin. An aftershock at the same location occurred a day later, 17 November, and had an estimated magnitude 6. The effects of these two earthquakes were devastating in the region. Shaking from the first shock lasted at least 3 minutes and by some accounts 6 to 8 minutes (this is a very long time of shaking and is anomalous in the historical reports). Two hundred and fifty people were killed in Neiva, and damage was heavy in Bogota, Popayan, and Pasto. The town of Timana was completely destroyed. Literally thousands of landslides occurred. One in particular blocked the Rio Suaza for 55 days.

The earthquake of April or May 1895 had an approximate magnitude of 6. The damage from this event was wide spread in Huila, but was mostly concentrated near Suaza.

The most recent large earthquake in the region of Huila occurred east of Neiva on 9 February 1967. The event lasted a minute and had a Richter magnitude of 6.3 and depth of 60 km (according to Estrada, 1982), and a magnitude of 6.7 and depth of 50 km (according to Ramirez, 1975). Damage was wide spread.

## CONCLUSIONS

1) The Alto Magdalena project is located in a moderately active seismic area where several damaging level earthquakes are likely to occur during the projected lifetime of the proposed dams.

2) The tectonics of the region is activated by the subduction of the Nazca plate beneath the South American plate. The subduction zone is 100 to 200 km below the sites.

3) A number of major regional faults exhibit evidence of having been active during the late Quaternary; that is, in the last 50,000 years (see Table 1). These include:

- o Eastern frontal faults of the Cordillera Oriental
- o Altamira fault
- o Tello fault
- o Magdalena fault (includes the Betania fault)
- o Iquira fault

4) The location of active faults to the proposed dam sites is shown on Table 2. In general the Altamira and Magdalena faults are the most critical because they form the more continuous and longer faults that pass closest to the proposed sites.

5) Several large historical earthquakes have occurred in the region and within 50 km of the proposed project dam sites. Earthquakes of magnitude (5 to 8) can be expected in the future in the region during the projected life-time for the project.

6) Large numbers of landslides can be expected to accompany a major earthquake in the region. Erosion from these could cause a huge increase of sediments transported into the proposed reservoirs.

TABLE 2  
 FAULTS SIGNIFICANT TO PROPOSED DAM SITES,  
 ALTO MAGDALENA PROJECT

<u>Proposed Site</u>	<u>Appropriate Distance (km) from Fault</u>			
	<u>Magdalena Fault</u>	<u>Alta Mira Fault</u>	<u>Other Faults</u>	<u>Subduction Zone</u>
Quimbo	3-4 km, branch fault at 2 km	15	Anticlinal fault (Presumed not active) (100 m)	100-200 km
Pericongo II	8 to 10 km	5	--	100-200 km
Oporapa	Passes through left abutment	12	--	100-200 km
Chillurco	Passes through left abutment	12	--	100-200 km
Guarapas I	3 km from main fault 200-400 m from branch fault	12	Splay fault (?) with unknown activity passes through center of dam site.	100-200 km
Guarapas II	1 km from main fault; 1/2 km from branch fault	12	Splay fault (?) passes within 100 m southwest of the left abutment.	100-200 km

## 6.0 RECOMMENDATIONS

Based on this initial seismic hazard evaluation, the following general program is recommended for future studies of the project. Phase I is suggested for the feasibility study, Phase II and III for the design stage.

### PHASE I - SEISMICITY AND SEISMIC GEOLOGY

During the feasibility stage of the project, a number of tasks are recommended to define the design parameters. These tasks are designed to obtain the information needed to locate accurately the significant faults to the project, to assess the recurrence of earthquakes on these faults (including the subduction zone), assess the potential for surface fault displacement at the proposed dam sites, and evaluate the maximum earthquakes.

- 1) Historical Seismicity - Study the larger earthquakes in the region to confirm, if possible, their locations and to calculate their focal mechanisms. The region investigated should extend from the Cordillera Occidental into the Llanos and from Ecuador to Ibagu . Particular attention should be paid to both the 9 February 1967 earthquake and the 16 November 1826 earthquake.
- 2) Location of Regional Faults - After a complete literature review, a reconnaissance by helicopter and fixed-wing aircraft and ground study should be undertaken to locate more accurately the major regional faults. This study would assess the type of fault, length, width, etc. as well as select locations where detailed studies can be undertaken to evaluate the activity of the faults.
- 3) Fault Activity - Several small study areas where adequate Quaternary deposits are present should be mapped in detail. The study should include aerial photograph interpretation, trenching, and dating of the Quaternary deposits. One of these areas could be the Algeciras area, where Quaternary deposits have been faulted.
- 4) Dating of Quaternary Deposits - Several areas where Quaternary deposits are extensive and well exposed should be investigated to establish the sequence of deposits, their ages, and the geomorphic events. This information is needed to provide the time framework for the assessment of the degree of fault activity. Relative dating, as well as the more precise Carbon 14, paleomagnetism, fission track and Potassium Argon should be attempted, if samples are sufficient.



- 5) Faults at the Dam Sites - Detailed geologic mapping of the faults at the dam sites would be done to relate the regional faults to the damsite faults. This mapping might require trenching as part of the study.
- 6) Significant Earthquakes - The geologic and seismologic information obtained from the above studies would be combined with knowledge of the regional tectonic setting and with information on fault activity throughout the world to assess the degree of activity on each fault significant to the sites. The maximum earthquakes would be estimated and their recurrence interval would be calculated. The potential for reservoir induced seismicity would be examined.

PHASE II - Seismic Exposure

PHASE III - Engineering Studies

## REFERENCES

- Arango Caldad, J. L., Kassem Bustamante, T., and Duque-Caro, H. (compilers), 1976, Mapa geologico de Colombia: Ministerio de Minas y Energia, Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Minerales, escala 1:1,500,000.
- Duque-Caro, H., 1978, Major structural elements and evolution of northwestern Colombia, in Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 29, p. 329-351.
- Estrada, G., 1982, Estudios sismicos a nivel de pre-factibilidad en las areas de influencia de los aprovechamientos hidroelectricos del Alto Magdalena; draft report to Interdisenos, 27 p, plus tables and figures.
- Interdisenos, Ltda., 1982, Mapa geologico general, zona de proyectos, aprovechamientos hidroelectricos del Alto Magdalena, escala 1:100,000 (part of report to Instituto Colombiano de Energia Electrica and the Electricadora del Huila, S.A, Bogota).
- Irving, E., 1975, Structural evolution of the northernmost Andes, Colombia: U.S. Geological Survey, Professional Paper 846, Washington, D.C., 47 p.
- Isacks, B. and Molnar, P., 1971, Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes: Reviews of Geophysics and Space Physics, v. 9, p. 103-175.

Keigwin, L. D., 1978, Pliocene closing of the Isthmus of Panama, based on biostratigraphic evidence from the nearby Pacific Ocean and Caribbean Sea cores: *Geology*, v. 6, p. 630-634.

Kellogg, J., Bonini, W. and Garing, J., 1980, Subduction of the Caribbean plate and Neogene uplifts in the overriding South American plate (abstract): American Geophysical Union (in press).

Kroonenberg, S. B. and Diederix, H., 1982, Geology of south central Huila, uppermost Magdalena Valley, Colombia: A preliminary note: Colombia Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, 22nd Annual Field Conference, 39 p.

Martin, F. C., 1978, Mapa Tectonico, Norte de America del Sur: Republica de Venezuela, Ministerio de Energia y Minas, Caracas, 3 sheets, scale 1:2,500,000.

Pennington, W. D., 1981, Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America: *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 10753-10770.

Ramirez, J. E., 1975, Historia de los Terremotos en Colombia (2nd. Ed.): Instituto Geografico "Agustin Cadazzi", Bogota: 250 p.

Santo, T., 1969, Characteristics of seismicity in South America: *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Tokyo, v. 47, p. 635-672.

Sedic, Ltda., and Harza Engineering Company, 1976, Aprovechamiento Hidroelectrico del Rio Magdalena, Proyecto

de Betania, Etapa B, Estudio de Factibilidad Tecnica, v. III, apendice C., Geologia: Report to Instituto Colombiano de Energia Electrica, 72 p, plus plates and figures.

Torres, J. A., Raasveldt, H. C., Burgl, H., and Quintero, R., 1959, Mapa geologico de la Republica de Colombia, Plancha N8 "Neiva": Ministerio de Minas y Petroleos, Servicio Geologico Nacional, Seccion de Fotogeologia: scale 1:200,000

van der Hammen, T., Werner, J. H., and van Dommelen, 1973, Palynological record of the upheaval of the northern Andes: A study of the Pliocene and lower Quaternary of the Colombian eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota: Review of Paleobotany and Palynology, v. 16, p. 1-122.

Woodward-Clyde Consultants, 1980, Stages A and B, Phase I: Preliminary seismic hazard study, San Carlos project, Colombia: unpublished report to Integral, Ltda., Medellin, 82 p., plus appendix and plates.

Woodward-Clyde Consultants, 1982a, Preliminary evaluation of seismic hazards and of erosion and sediment sources (geomorphology), Rio Negro-Guayuriba Project, Colombia: Report to Geome-Cajiao y Asociados and Empresa de Energia Electrica de Bogota, Colombia, 70 p., plus appendix, references and plates.

Woodward-Clyde Consultants, 1982b, Preliminary seismic hazard evaluation, Catatumbo Project, Colombia: Report to Gomez-Cajiao y Asociados Cia., Ltda., Instituto Colombiano de Energia Electrica, and Centrales Electricos del Norte de Santander, 43 p., plus appendix, references and plates.