

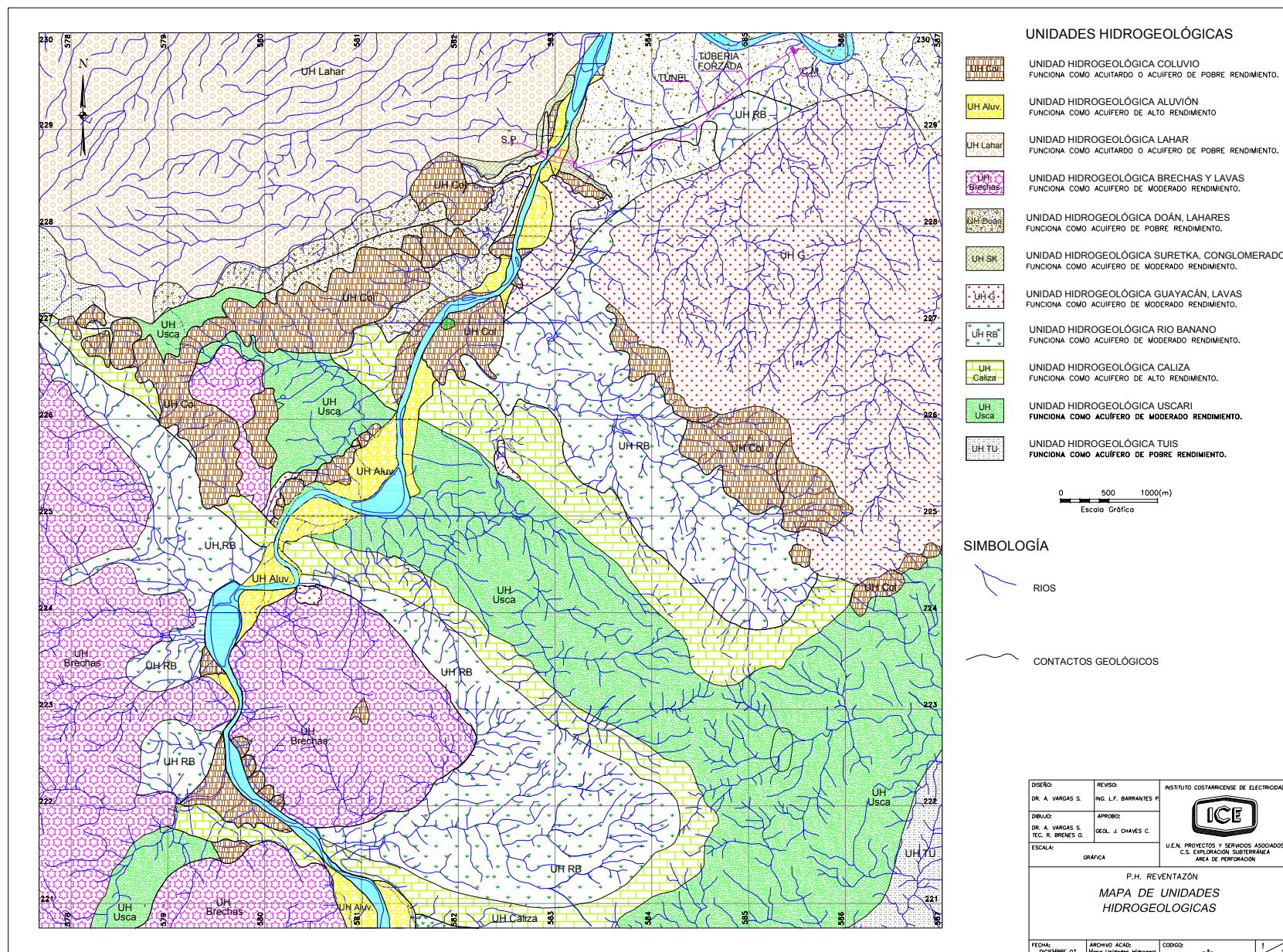


Figura 7.5.2.1. Mapa de unidades hidrogeológicas, modificado de mapa geológico Cervantes (2007).

### 7.5.2.2 Principales unidades hidrogeológicas en el sitio de presa

A partir de la información recopilada de las perforaciones, galerías de investigación, afloramientos geológicos, y de estudios geofísicos se estableció la presencia de tres acuíferos en el sitio de presa. La estratigrafía está definida de lo más antiguo a lo más reciente por un acuífero confinado en lavas, acuífero libre en conglomerado, y acuífero colgado en brechas. Los acuíferos del sitio de presa son de tipo continental, formados en materiales volcánicos y sedimentarios, con permeabilidad por porosidad y fracturamiento de tipo libre y confinado. Se construyó un perfil hidrogeológico con el fin de mostrar la disposición espacial de las unidades hidrogeológicas y la posición del nivel freático en el sitio de presa (figura. 7.5.2.2). Este perfil está orientado de tal manera que atraviesa el sitio de presa. La construcción de este perfil se llevó a cabo por medio de la información de los estudios geofísicos, perforaciones y la investigación geológica e hidrogeológica de campo y tiene una orientación Noroeste-Sureste. La elevación máxima registrada en este perfil es de 400 m.s.n.m. y la mínima es de 50 m.s.n.m., con una diferencia de 350 m. Otro perfil se construyó con orientación transversal al eje de presa (figura 7.5.2.3) y muestra la unidad hidrogeológica Guayacán en la base y sobreyacida por la unidad hidrogeológica Suretka. En esta figura se indica el nivel freático presente en la unidad hidrogeológica aluvión y el nivel piezométrico correspondiente a los acuíferos confinados inferiores.

#### ***Acuífero confinado en la unidad de lavas (Fm.Guayacán)***

Por medio de una serie de perforaciones ubicadas alrededor del sitio de presa se identificaron al menos dos acuíferos con una condición de confinamiento. Este acuífero se detectó durante la construcción de la perforación PHR 5 SP, por medio de las variaciones del nivel de agua. Estos acuíferos confinados tienen una permeabilidad definida por fracturas más que por porosidad primaria y va reduciéndose conforme se profundiza. Se observó un ascenso del nivel a una profundidad de 190 m, aún cuando se estaba perforando dentro de la unidad de conglomerados. Para estudiar las características del acuífero confinado se utilizó la información geológica e hidrogeológica obtenida de las perforaciones PHR5-SP, PHR7-SP, PHR8-SP, PHR12-SP, PHR20-SP, PHR21-SP, PHR26-SP, PHR32-SP y PHR34-SP.

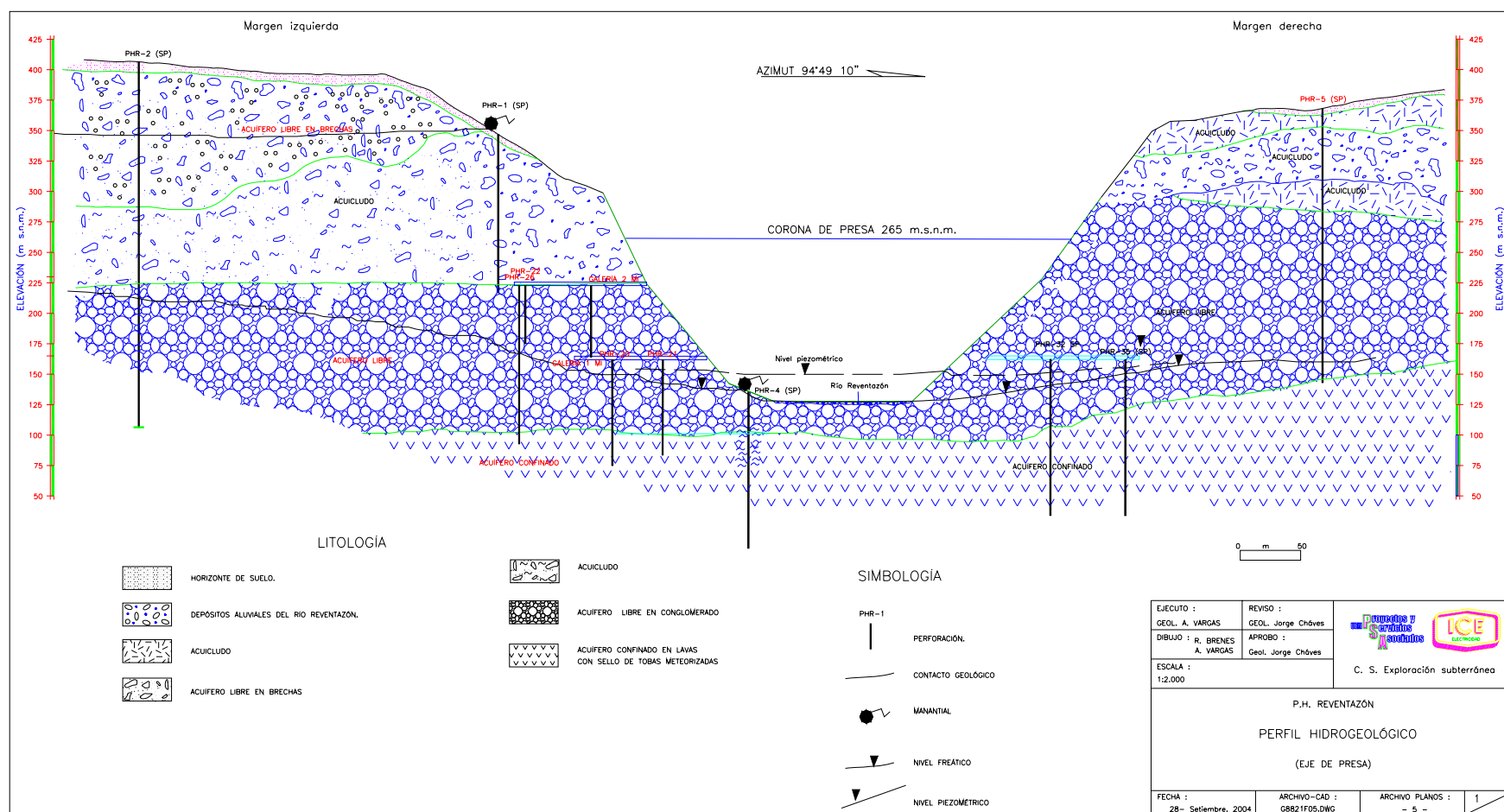


Figura 7.5.2.2. Perfil hidrogeológico longitudinal al eje de presa

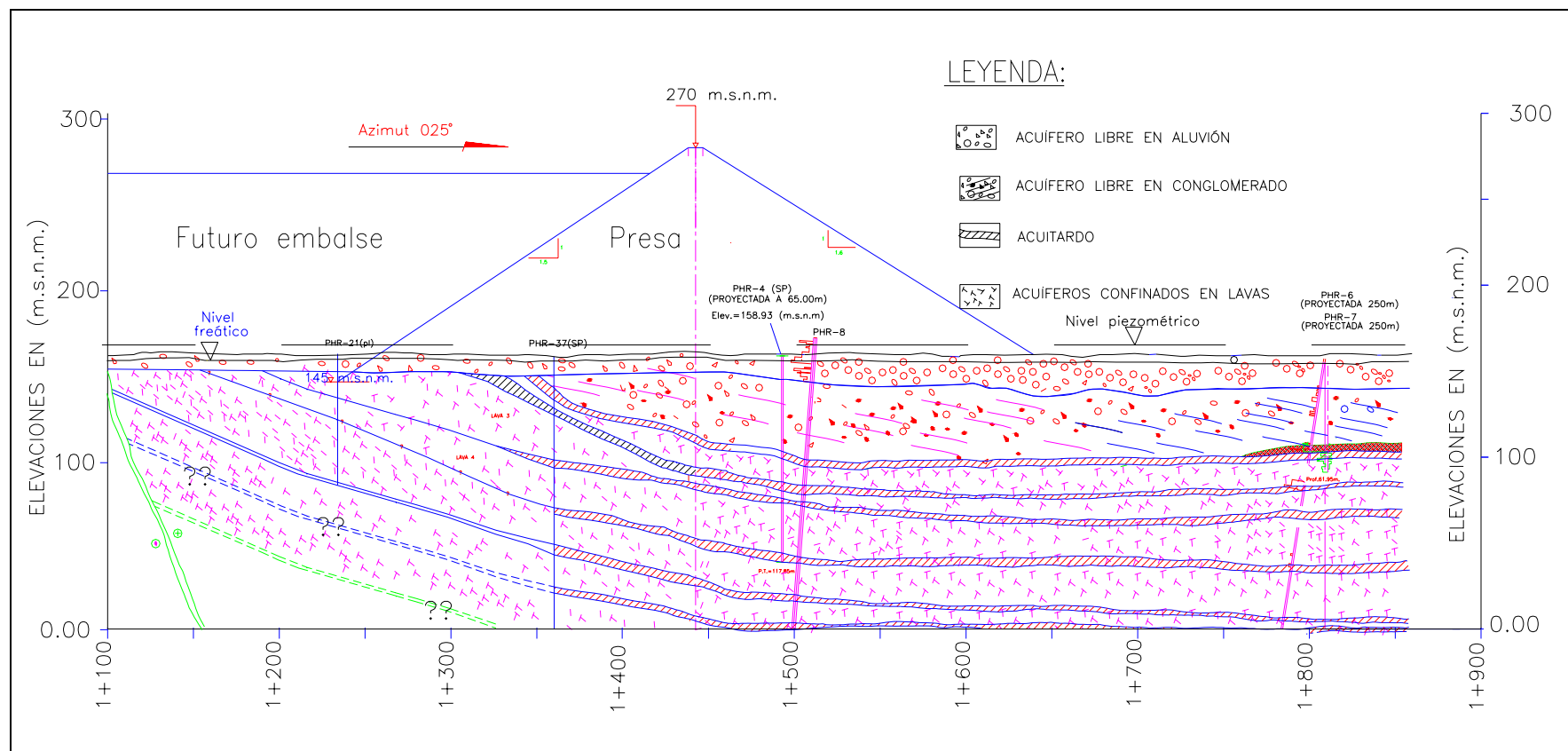


**Figura 7.5.2.3. Perfil hidrogeológico transversal eje de la presa.**

**Acuífero libre en conglomerado de la formación Suretka**

Este acuífero se encontró en las perforaciones PHR4SP, PHR5SP a 176 m de profundidad, PHR 6 SPMI, PHR 7 SP MI, PHR 8 SPMI, PHR 12 SP MD, PHR 20 SPMI, PHR 21 SP MI, PHR 32 MD, PHR 34 SP MI y PHR 35 SPMD. Se asocia con la formación geológica Suretka y está formado por depósitos consolidados a semiconsolidados de cantos redondeados a semiredondeados y en ocasiones angulosos envueltos en una matriz arenosa cuyos componentes son fragmentos de rocas y ocasionalmente ceniza. La proporción de bloques y gravas domina sobre el contenido de matriz. Está cubierto en la parte superior por materiales de menor permeabilidad de la formación geológica Doán y en la base está limitado por lavas y tobas de la formación Guayacán. El espesor supera en algunos sectores los 100 metros y el nivel de agua subterránea tiene un gradiente hidráulico relativamente bajo, lo cual podría indicar una permeabilidad de alta a moderada. Este acuífero es de tipo continental, formado por rocas sedimentarias de pie de talud o de abanico aluvial con una permeabilidad inducida de baja a moderada con valores menores de 5 UL (6,5 E-5 cm/s).

**Acuicludo**

Dentro de la unidad geológica Doán se identificaron dos unidades hidrogeológicas. Una de ellas corresponde con un acuicludo formado por clastos y bloques volcánicos envueltos en una matriz limo arenosa y tobácea bien compacta y forma el sello inferior del acuífero colgado.

**Acuífero colgado en la brecha**

En la margen izquierda del sitio de presa se presenta un acuífero que tenía un nivel freático en el año 2002 con una elevación cercana a las cotas 340 m.s.n.m. en la perforación PHR 2 MI y 332 m.s.n.m. en la perforación PHR 3 MI. Este acuífero está compuesto por bloques y gravas poco redondeados envueltos en una matriz de arena fina hasta gruesa semiconsolidada y la permeabilidad inducida es mayor de 10 UL. En el talud de la margen izquierda del sitio de presa se nota la presencia de este acuífero de escaso potencial por la presencia de varios manantiales. Para efectos de la construcción de la presa parece que tendría poca influencia.

**Acuífero libre en el aluvión**

Las perforaciones PHR 40, PHR 41, PHR 42, PHR 43, PHR 44 y PHR 45 ubicadas en la margen derecha del sitio de presa ponen en evidencia la presencia de un acuífero libre constituido en la unidad hidrogeológica del aluvión, con un espesor variable. Así mismo en las perforaciones de la margen izquierda, 10 pt, 11pt, 12pt, 13pt, 21pt se destaca la presencia de este acuífero en los primeros metros de perforación.

**7.5.2.3 Principales unidades hidrogeológicas en el túnel**

El túnel se inicia con la toma de aguas fundada en la formación Suretka que forma un acuífero libre de moderado rendimiento, constituido por bloques redondeados de tamaño centimétrico envueltos en una matriz arenosa. Luego el túnel continúa dentro de esta unidad hidrogeológica por una longitud de casi 1000 m y a partir de este sector entra en la unidad hidrogeológica Doán, considerada como un acuífero de pobre rendimiento por un tramo de casi 500 m (figura 7.5.2.4). Dentro de esta unidad se presentan subunidades que forman acuíferos colgados de mayor permeabilidad que la matriz de la brecha lahárica que dan origen a manantiales de bajo caudal (<1 l/s). La separación entre el túnel y los manantiales mencionados sería de casi 80 m.

El nivel freático en el tramo de la unidad hidrogeológica Suretka se encuentra por debajo del piso del túnel. Sin embargo entre la estación 0+1100 y 0+1200 dentro de la unidad hidrogeológica Doán se

espera que el túnel corte la superficie freática. Las mayores profundidades del nivel freático principal se presentan a los 300 m de la toma de aguas con valores mayores a 170 m. Luego de la estación 0+1500 se inicia la tubería de presión y se estima que el nivel freático principal estará a menor profundidad y conforme se va desplazando hacia el sitio de casa de máquinas la profundidad vuelve a aumentar, hasta alcanzar niveles próximos al nivel del río Reventazón en la restitución, ya que este río funciona como un colector hidrológico regional.

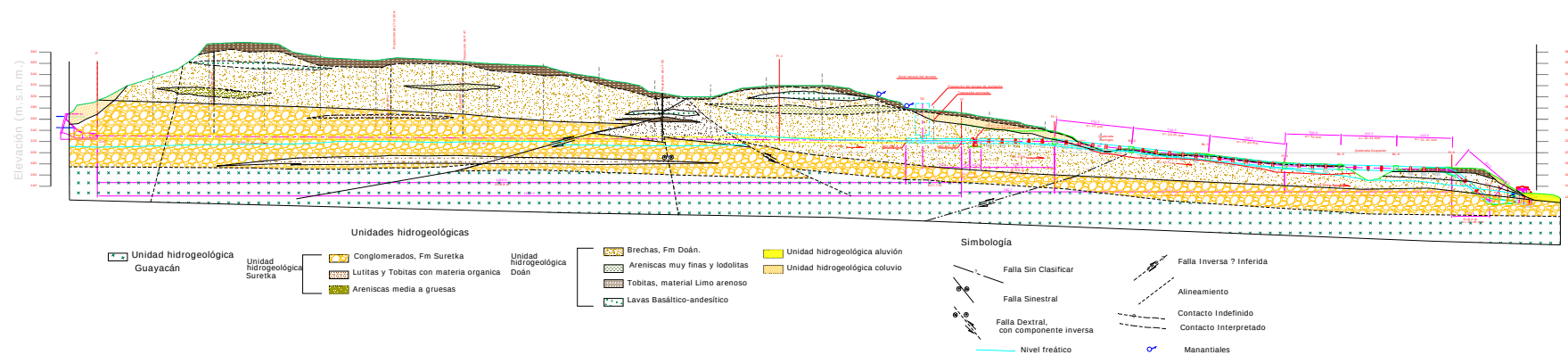


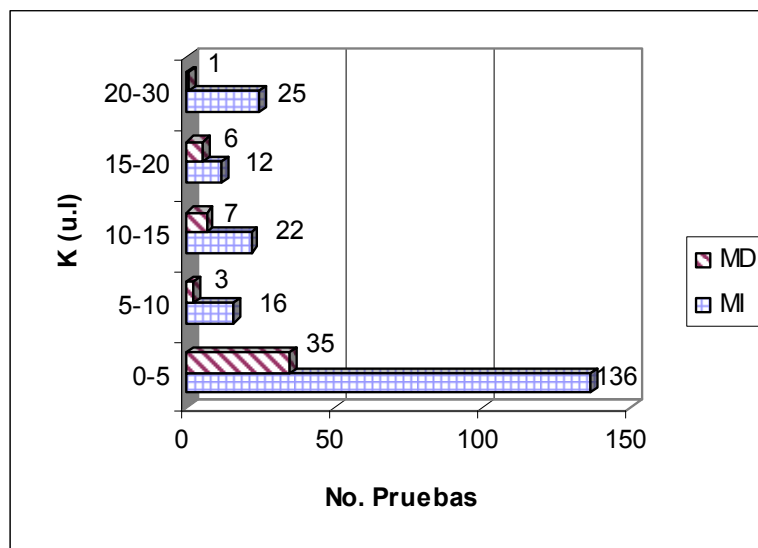
**Figura 7.5.2.4 Unidades hidrogeológicas en el trazado del túnel de conducción principal**

#### 7.5.2.4 Permeabilidad

La permeabilidad inducida se determinó por medio de pruebas de agua a presión realizadas en 24 perforaciones saca núcleos realizadas en el sitio de presa y en el plinto de la presa (cuadro 7.5.2.1). Las permeabilidades inducidas promedio asignadas a las unidades hidrogeológicas en el sitio de presa son las siguientes. Brecha Doán ( $k = 1 \times 10^{-4}$  cm/s); Conglomerado Suretka ( $k = 1 \times 10^{-4}$  cm/s); Lava ( $k = 9,9 \times 10^{-5}$  cm/s); Toba ( $k = 1 \times 10^{-5}$  cm/s) (cuadro 7.5.2.2).

La mayor cantidad de pruebas, tanto en la margen derecha como en la izquierda brindaron valores de permeabilidad en el rango de 0 a 5 U.L o de baja permeabilidad (figura 7.5.2.5). En la margen izquierda se efectuaron 136 pruebas y en la margen derecha 35, cuyos resultados de permeabilidad fueron menores de 5 U.L. Por su parte en la margen izquierda se efectuaron 63 pruebas cuyos resultados fueron mayores de 5 U.L.

**Figura 7.5.2.5.**  
**Pruebas de permeabilidad en el sitio de presa, margen derecha e izquierda**



Esto se muestra más claramente en términos porcentuales, ya que un 65% de las pruebas realizadas se encuentra en el rango de 0-5 U.L. El resto de rangos de permeabilidad ocupan cada uno porcentajes menores al 11%, sumando en total 35%. Dentro del último rango de valores de permeabilidad se incluyen valores más elevados de 20 unidades.

**Cuadro 7.5.2.1. Permeabilidad de los materiales en perforaciones en el sitio de presa.**

| Perf. | Material | No. de pruebas | K prom (U.L) | K. prom (cm/s) | K. max (U.L.) | K. min (U.L.) | K. max (cm/s) | K. min (cm/s) | Material | No. de pruebas | K prom (U.L) | K. prom (cm/s) | K. max (U.L.) | K. min (U.L.) | K. max (cm/s) | K. min (cm/s) |
|-------|----------|----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1MI   | Brecha   | 13             | 17           | 1.9E-4         | 57            | 4             | 6,7E-4        | 4,7 E-5       | Congl.   |                |              |                |               |               |               |               |
| 2MI   | Brecha   | 20             | 4            | 1.7E-4         | 65            | 0             | 7,8E-4        | <1,0 E-5      | Congl.   |                |              |                |               |               |               |               |
| 3MI   | Brecha   | 36             | 2            | 5.5E-5         | 28            | 0             | 3,2E-4        | <1,0 E-5      |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 4MI   | Congl.   | 10             | 8            | 8.0E-5         | 29            | 0             | 3.4E-4        | < 1,0 E-5     | Lavas    | 10             | 2            | 2,9E-4         | 14            | 0             | 4,2E-4        | < 1,0 E-5     |
| 5MD   | Congl.   | 9              | 7            | 1.4E-4         | 20            | 0             | 2.3E-4        | <1.0E-5       | Lavas    | 1              | 0            | 1,0E-5         | 0             | 0             | < 1,0 E-5     | < 1,0 E-5     |
| 6MI   | Congl.   | 6              | 1            | 1.1E-5         | 2             | 0             | 2.7E-5        | < 1,0 E-5     |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 8MI   | Congl.   | 5              | 1            | 1.3E-5         | 1             | 0             | 1.6E-5        | <1.0E-5       |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 12MD  | Congl.   | 9              | 5            | 1.8E-4         | 19            | 0             | 2.3E-4        | <1.0E-5       | Lavas    | 9              | 2            | 2,6E-5         | 11            | 0             | 3,6E-5        | 8.90E-06      |
| 14MD  | Congl.   | 12             | 8            | 2.5E-4         | 40            | 0             | 5.2E-4        | <1.0E-5       |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 20MI  | Congl.   | 21             | 17           | 1.9E-4         | 80            | 0             | 4.4E-4        | <1.0E-5       | Lavas    | 7              | 6            | 2,4E-4         | 41            | 0             | 2,4E-4        | <1.0E-5       |
| 21MI  | Congl.   | 21             | 9            | 2.5E-4         | 35            | 0             | 1.3E-3        | <1.0 E-5      |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 26MI  | Congl.   | 24             | 14           | 2.1E-4         | 146           | 0             | 1.9E-3        | <1.0 E-5      | Lavas    | 2              | 4            | 5,2E-5         |               |               |               |               |
| 30MI  | Congl.   | 8              | 7            | 1.2E-4         | 17            | 0             | 2.2E-4        | <1,1 E-5      |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 32MD  | Congl.   | 4              | 32           | 5.2E-4         | 88            | 0             | 1.7E-3        | <1,1 E-5      |          | 4              | 2            | 9,9E-5         | 5             | 0             | 9,9E-5        | <1,1 E-5      |
| 34MI  |          |                |              |                |               |               |               |               | Lavas    | 12             | 17           | 2,8E-4         | 89            | 0             | 1,0E-3        | <1,1 E-5      |
| 35MD  | Congl.   | 2              | 9            | 1.1E-4         | 15            | 3             | 1.7E-4        | 5.9E-5        |          |                |              |                |               |               |               |               |
| 10 pl |          |                |              |                |               |               |               |               | Lavas    | 11             | 12           | 1,2E-4         | 68            | 2             | 5,8E-4        | 2,4E-5        |
| 11pl  | Lavas    | 7              |              |                |               |               |               |               |          |                |              |                |               |               |               |               |
|       |          |                | 12           | 1.2E-4         | 68            | 2             | 5,8E-4        | 2,4E-5        | Toba     | 6              | 7            | 9,3E-5         | 14            | 1             | 1,8E-04       | 1,1E-05       |
| 21pl  | Lavas    | 7              |              |                |               |               |               |               |          |                |              |                |               |               |               |               |
|       |          |                | 2            | 2.0E-5         | 3             | 1             | 3,0E-5        | 7,6E-6        | Toba     | 3              | 6            | 1,0E-4         | 11            | 3             | 1,9E-04       | 3,2E-05       |

|      |       |    |    |        |    |    |        |         |      |   |    |         |    |    |         |         |
|------|-------|----|----|--------|----|----|--------|---------|------|---|----|---------|----|----|---------|---------|
| 40MD | Lavas | 11 |    |        |    |    |        |         |      |   |    |         |    |    |         |         |
|      |       |    | 4  | 5.0E-5 | 7  | 1  | 7,7E-5 | 1,10E-5 | Toba | 3 | 0  | <1,1E-5 | 0  | 0  | <1,1E-5 | <1,1E-5 |
| 41MD | Lavas | 1  |    |        |    |    |        |         |      |   |    |         |    |    |         |         |
|      |       |    | 3  | 3.3E-5 | 14 | 0  | 1,6E-4 | 6,50E-6 | Toba | 1 | 15 | 1,7E-4  | ND | ND | ND      | Nd      |
| 42MD | Lavas | 3  |    |        |    |    |        |         |      |   |    |         |    |    |         |         |
|      |       |    | 13 | 1.4E-4 | ND | ND | ND     | ND      |      |   |    |         |    |    |         |         |
| 43MD | Lavas | 16 |    |        |    |    |        |         |      |   |    |         |    |    |         |         |
|      |       |    | 8  | 9.8E-5 | 15 | 4  | 1,8E-4 | 5,40E-5 | Toba | 6 | 6  | 3,4E-4  | 16 | 0  | 1,8E-04 | <1,1E-5 |
| 45MD | Lavas | 10 |    |        |    |    |        |         |      |   |    |         |    |    |         |         |
|      |       |    | 1  | 1.0E-5 | 8  | 0  | 9,0E-5 | <1,1E-5 | Toba | 3 | 2  | 3,0E-5  | 3  | 0  | 3,9E-05 | <1,1E-5 |

**Cuadro 7.5.2.2.**  
**Permeabilidades inducidas en el sitio de presa**

| Material     | Total No. de pruebas | K prom (U.L) | K. prom (cm/s) | K. max (U.L.) | K. min (U.L.) | K. max (cm/s) | K. min (cm/s) |
|--------------|----------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Brecha       | 69                   | 8            | 1,4E-4         | 50            | 1             | 5,9E-04       | 4,7E-05       |
| Conglomerado | 136                  | 9            | 1,6E-4         | 146           | 0             | 1,9E-03       | <1,1 E-5      |
| Lava         | 111                  | 5            | 9,9E-5         | 89            | 0             | 3,0E-04       | 6,5E-06       |
| Toba         | 22                   | 6            | 1,5E-4         | 16            | 0             | 1,9E-04       | 1,1E-05       |

#### 7.5.2.5 Profundidad del nivel freático

La representación espacial de la profundidad del nivel de agua principal se presenta por medio de isolíneas de igual profundidad, construidas con datos de las perforaciones PHR2 SP, PHR3 SP, PHR4 SP, PHR5 SP, PHR6 SP, PHR8 SP, PHR11 LT, PHR13 LT, PHR15 LT, PHR18 LT, PHR19 TO, y PHR43 SP, e interpolados por medio de un algoritmo matemático numérico. Esta representación de la profundidad debe tomarse como un valor promedio, pues existe una variación del nivel debido al aporte de la precipitación en el período de mayo a agosto y de noviembre a marzo, así como a la recarga de agua subterránea y a los aportes de agua desde el río Reventazón en los períodos de mayor caudal. El área próxima al sitio de presa en el cauce del río Reventazón compuesta por materiales aluvionales dispuestos en forma de terrazas, cauces o meandros abandonados, presenta la menor profundidad del nivel del agua, con valores menores a 10 m (figura 7.5.2.6), mientras que hacia la línea de túnel se tienen profundidades mayores. Es en esta área donde se esperan las menores variaciones en el valor de la profundidad, pues el aporte principal corresponde a la recarga de agua subterránea.

Existen manantiales tanto en el talud de margen izquierda del sitio de presa como entre las coordenadas Lambert Norte 584 000 -585000 este y 229000-230 000 norte sobre la línea de túnel que representan la menor profundidad de niveles colgados de agua subterránea, separados del nivel de agua principal por capas de baja permeabilidad. La disminución de profundidad del nivel de agua en la margen derecha se orienta de sur a norte, mientras que en la margen izquierda es de oeste a este. Esto se debe a que el río Reventazón funciona como un colector de aguas regional.



### **7.5.2.6 Determinación de la susceptibilidad a la recarga acuífera**

Las zonas de recarga acuífera son zonas que permiten la infiltración y percolación de la precipitación hasta que alcanza la zona saturada de un acuífero y pasa a formar parte del almacenamiento. La cantidad de recarga a un acuífero depende de varios factores, entre ellos la capacidad de infiltración de la zona no saturada, la pendiente del terreno y la conductividad hidráulica del acuífero. La recarga al acuífero tiene semejanza con la vulnerabilidad de un acuífero la cual se representa por la susceptibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente por una carga contaminante. Para determinar la recarga es necesario tomar en cuenta la susceptibilidad de que el agua penetre el suelo y alcance el acuífero. Existen varias metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, las cuales podrían aplicarse para determinar la susceptibilidad de que el agua ingrese al subsuelo. Uno de los métodos es el denominado GOD, desarrollado por Foster & Hirata (1987) y considera tres parámetros: régimen hidráulico del agua subterránea (G); naturaleza del acuífero (O) y profundidad del nivel del agua (D).

Aquí se propone usar un método conocido como DRASTIC (Aller et al., 1985; Aller et al., 1987) y permite la determinación de la vulnerabilidad por medio de la ponderación de varios factores, basado en un coeficiente de ponderación asignado a cada parámetro, rangos de clasificación y valores de los parámetros. A cada factor se le asigna un peso, que varía de 1 a 5, que identifica la importancia relativa con respecto a la vulnerabilidad. El valor de vulnerabilidad se obtiene como una sumatoria de los productos de los pesos por el valor del parámetro. Las zonas de recarga acuífera para las unidades hidrogeológicas en el área del proyecto se definieron por medio de la aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) que utiliza una ecuación basada en la modificación del método utilizado para definir la vulnerabilidad de un acuífero denominado DRASTIC. Para la aplicación de este método se consideraron solo los siguientes factores: uso del suelo, tipo de suelo, pendiente del terreno, zona vadosa y densidad de drenaje.

#### **a. Uso del suelo (S)**

El factor uso del suelo se toma en cuenta la actividad o cobertura que cubre el suelo. Una cobertura boscosa densa retiene mayor cantidad de agua en el follaje favoreciendo por un lado la evaporación pero por otro la disponibilidad de agua para infiltrarse en el terreno. Mientras que una superficie urbanizada y cubierta de concreto muy compacta propicia la escorrentía y disminuye la recarga. El cuadro 7.5.2.3 contiene la valoración que se le asigna a cada uso del suelo.

**Cuadro 7.5.2.3.****Valores de parámetros para el cálculo de la recarga potencial**

| Uso de suelo                                         | Valor | Tipo de suelo                                | Valor | Inclinación de pendiente (%) | Valor | Densidad drenaje (km/km <sup>2</sup> ) | Valor | Zona vadosa                                    | Valor |
|------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|-------|------------------------------|-------|----------------------------------------|-------|------------------------------------------------|-------|
| Bosque                                               | 10    | Capa delgada o ausente                       | 10    | 0-2                          | 10    | 0-2                                    | 10    | Capa confinante                                | 1     |
| Bosque intervenido                                   | 9     | Grava                                        | 10    | 2-6                          | 9     | 2-6                                    | 9     | Limo arcilla                                   | 3     |
| Bosques con parches de charral o plantación forestal | 8     | Arena                                        | 9     | 6-12                         | 5     | 6-12                                   | 5     | Lutita                                         | 3     |
| Tacotal                                              | 7     | Carbón                                       | 8     | 12-18                        | 3     | 12-18                                  | 3     | Caliza                                         | 6     |
| Charral                                              | 6     | Agregado arcilloso                           | 7     | >18                          | 1     | >18                                    | 1     | Arenisca                                       | 6     |
| Cultivo permanente                                   | 5     | Arenisca margosa                             | 6     |                              |       |                                        |       | Horizontes de caliza, arenisca y lutita        | 6     |
| Cultivo anual                                        | 4     | Marga                                        | 5     |                              |       |                                        |       | Arena y grava con alto cont. de limo y arcilla | 6     |
| Pastos con árboles                                   | 3     | Limo margoso                                 | 4     |                              |       |                                        |       | Contenido de limo y arcilla                    | 6     |
| Pastos                                               | 1     | Arcilla margosa                              | 3     |                              |       |                                        |       | Rocas ígneas y metamórficas                    | 4     |
| Zona con infraestructura                             |       | Arcillas no agregadas y material no compacto | 1     |                              |       |                                        |       | Arena y grava                                  | 8     |
|                                                      |       |                                              |       |                              |       |                                        |       | Basaltos fracturados                           | 9     |
|                                                      |       |                                              |       |                              |       |                                        |       | Caliza cárstica                                | 10    |
| Peso específico                                      | 2     | Peso específico                              | 2     | Peso específico              | 1     | Peso específico                        | 1     | Peso Específico                                | 5     |

**b. Tipo de suelo (Ts)**

Incluye a la porción superficial del terreno donde generalmente existe una actividad biológica significativa. En esta clasificación, se considera al suelo como la porción superficial de terreno con una profundidad máxima de 2 metros. Los suelos tienen un impacto significativo en la cantidad de agua que se puede infiltrar en el subsuelo. La presencia de materiales finos tales como arcillas, disminuyen la permeabilidad y restringen la infiltración. El cuadro 7.5.2.3 muestra las calificaciones de acuerdo al tipo de suelos. Para capas de suelo muy delgadas o materiales aluvionales constituidos de gravas se les asigna un valor máximo de 10 puntos.

**c. Pendiente del terreno (Pt)**

La topografía del terreno ayuda a controlar que el agua permanezca en un sitio (donde la pendiente tiende a ser horizontal) o sea arrastrada hacia otros sitios (donde la pendiente es fuerte). Este efecto se encuentra asociado con el grado de infiltración, siendo este menor en las zonas donde la pendiente del terreno es fuerte y mayor donde la pendiente es moderada o nula. En el cuadro 7.5.2.3 se muestran los rangos de calificaciones de acuerdo a la pendiente del terreno.

**d. Densidad de drenaje (Dr)**

La facilidad del agua para formar drenajes está influenciada por la mayor o menor contenido de arcillas y arena. Una densidad de drenaje baja en zonas de alta pluviosidad indica alta infiltración y probablemente alta recarga a los acuíferos.

**e. Zona vadosa**

La zona vadosa o zona de aereación, es la que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel estático. De acuerdo a la composición de los materiales que constituyen a la zona vadosa, esta presenta un rango de calificación de susceptibilidad en el cual a una capa confinante, que impide el paso del agua, se le asigna un valor de 1, y a una caliza cárstica que permite más fácilmente el paso del agua un valor de 10.

El cálculo de la susceptibilidad a la recarga se realizó por medio de la suma de los productos de los parámetros considerados anteriormente y los factores respectivos. Los factores utilizados dependen del grado de importancia que se le quiera asignar a cada parámetro.

$$ID= S*Fs+Ts*Fts+Pt*Fpt+Dr*Fdr+Zv*FZv$$

Se sugiere usar una escala de vulnerabilidad que consta de siete categorías, variando desde susceptibilidad insignificante (<100) hasta susceptibilidad extrema (>200) como se ilustra en el cuadro 7.5.2.4, según lo han calculado Martínez et al., 1998 y Wei, 2003.

**Cuadro 7.5.2.4.****Distribución de categorías para el índice**

| Valor   | Categoría                      |
|---------|--------------------------------|
| < 100   | Susceptibilidad insignificante |
| 101-119 | Susceptibilidad muy baja       |
| 120-139 | Susceptibilidad baja           |
| 140-159 | Susceptibilidad moderada       |
| 160-179 | Susceptibilidad alta           |
| 180-199 | Susceptibilidad muy alta       |
| >200    | Susceptibilidad extrema        |

A partir de este análisis se determina que para los acuíferos identificados en el área de influencia del proyecto, existen varias zonas que podrían permitir la recarga acuífera potencial. En el mapa de recarga potencial se delimitan zonas de recarga potencial ubicadas al sur del área de estudio (figura 7.5.2.7) marcadas con círculos de color rojo, caracterizadas por la presencia de los materiales de la unidad hidrogeológica de brechas y las areniscas calcáreas de la formación Uscari, así como de la formación Río Banano. Por su parte los acuíferos detectados en el sitio de presa reciben agua por medio de áreas de recarga ubicadas al este y oeste del sitio de presa a una mayor elevación y descargan el agua en zonas relativamente puntuales denominadas manantiales o por medio de flujo base al río Reventazón. Como aguas arriba del sitio de presa en el lecho del río Reventazón afloran materiales geológicos de tipo lávico de la formación Guayacán y considerando las líneas equipotenciales no se descarta que los acuíferos confinados reciban recarga desde dicho río.

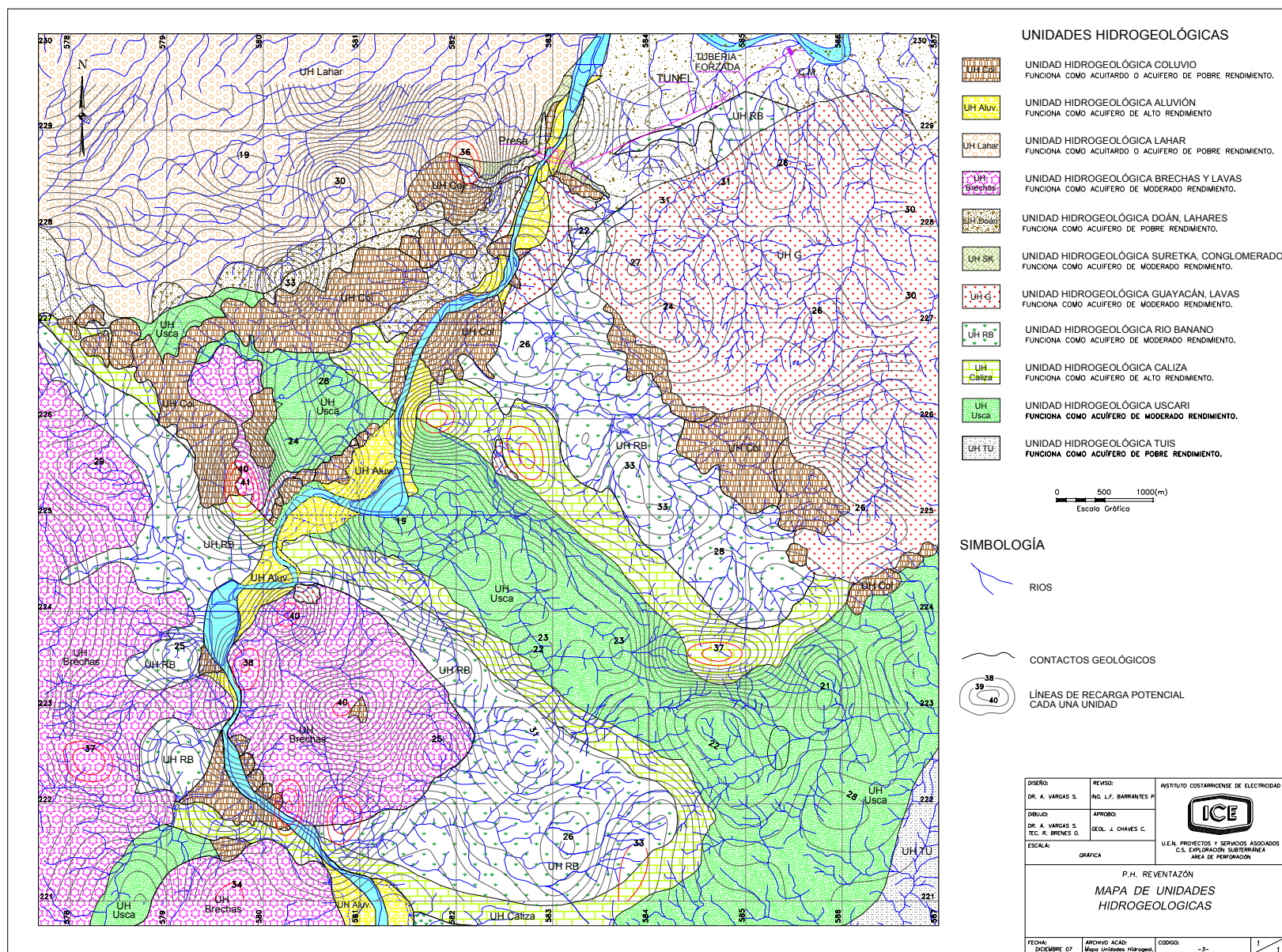


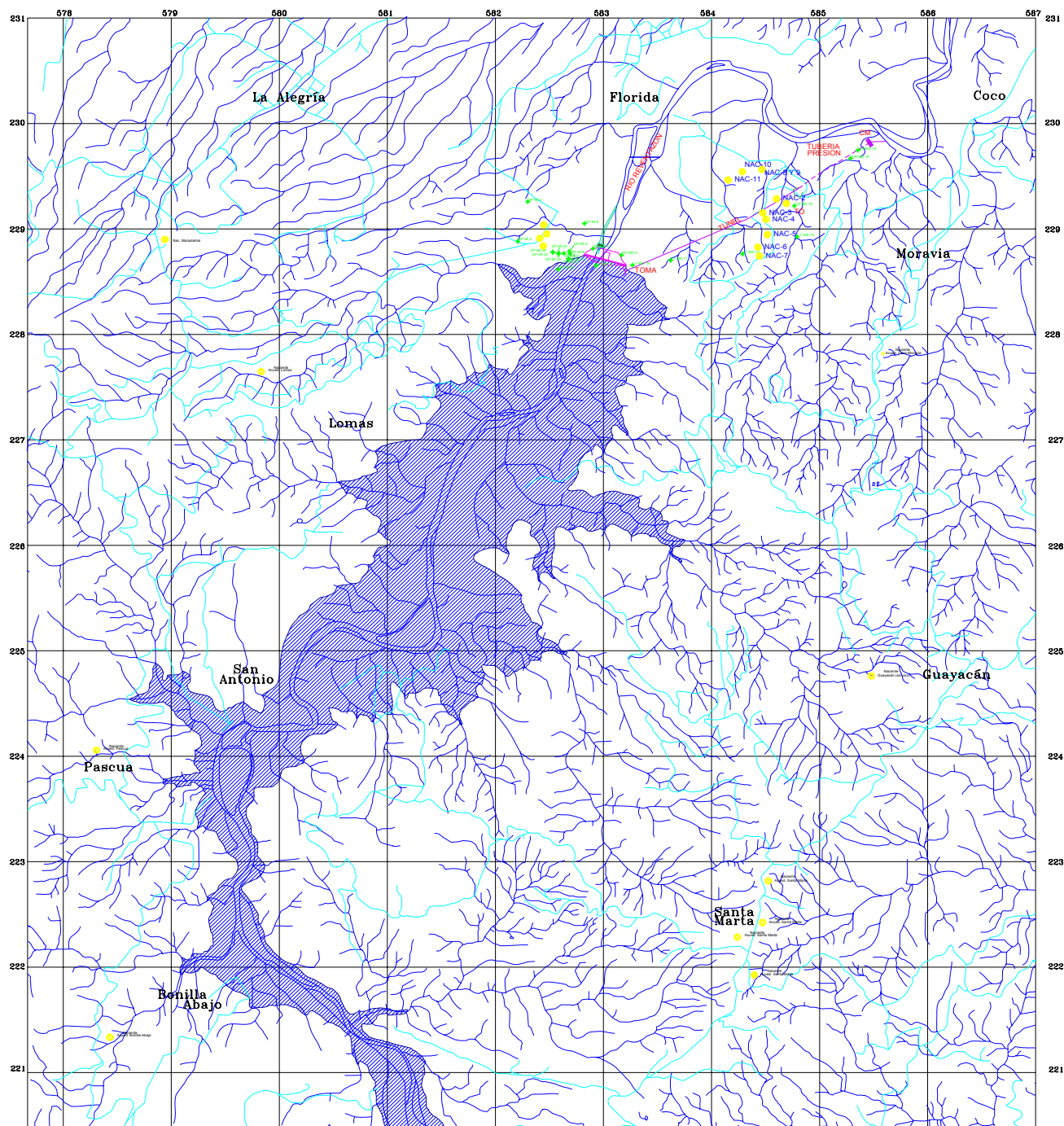
Figura 7.5.2.7. Mapa de susceptibilidad a la recarga acuífera.

### **7.5.2.7 Áreas de descarga acuífera**

En el área de estudio las zonas de descarga visibles son de tipo puntual, en forma de manantiales, con descarga variable. En ambos márgenes del sitio de presa se han detectado varias manifestaciones de agua subterránea de forma puntual (figura 7.5.2.8) identificadas de color amarillo. Estos manantiales se encuentran dispuestos en varias elevaciones comunes según las mediciones topográficas. Por ejemplo en la margen izquierda los manantiales se ubican a una elevación común cercana a 340 m.s.n.m. que se asocia con la descarga del acuífero en las brechas, detectado en las perforaciones PHR 2 SPMI y PHR 3 SPMI.

Así mismo se han observado afloramientos de agua subterránea en forma de manantiales en el trayecto de la línea ferroviaria entre las estaciones Florida y Andarivel en la margen izquierda del sitio de presa. Estas manifestaciones no superan un caudal de 1 l/s y se presentan muy cerca del cauce del río Reventazón por lo que se piensa que existe una descarga de agua subterránea del macizo rocoso compuesto por la unidad Suretka hacia el río Reventazón. Otros manantiales han sido identificados en el trayecto del túnel de conducción que podrían estar asociados con acuíferos de extensión local o de baja permeabilidad ya que los caudales de descarga no superan los 2 l/s.

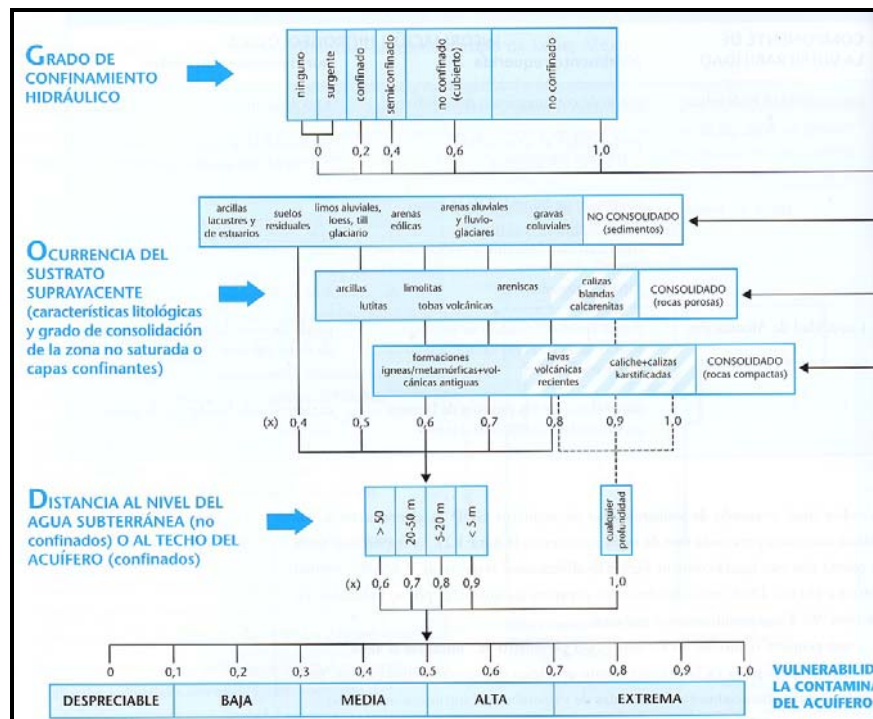
**Figura 7.5.2. 8.**  
**Mapa de manantiales, localidades y acueductos.**



### 7.5.2.8 Vulnerabilidad de los acuíferos alrededor de la presa

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1987 en Foster e Hirata, 1991). La vulnerabilidad a la contaminación representa la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta (Foster et al., 2002; pág. 18). La vulnerabilidad a la contaminación sería función de la accesibilidad de la zona saturada del acuífero a la penetración de contaminantes, en un sentido hidráulico y de la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada resultantes de la retención o reacción química de los contaminantes (Idem, 2002, pág. 18). A partir de estos factores y su interacción por medio de relaciones matemáticas es posible determinar un índice de vulnerabilidad del acuífero. Para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos existen varias metodologías. Una de ellas denominada GOD (por sus siglas en inglés), desarrollado por Foster & Hirata (1991) considera tres parámetros: régimen hidráulico del agua subterránea (G); naturaleza del acuífero (O) y profundidad del nivel de agua (D). La aplicación de este método involucra un diagrama de calificación a partir del cual se determina el grado de vulnerabilidad (figura 7.5.2.9). Otro método aplicable es conocido como DRASTIC (Aller et al., 1985; Aller et al., 1987, Inst. Geológico Brasileño, 1997) y permite la determinación de la vulnerabilidad por medio de la ponderación de un número mayor de factores, sin embargo requiere datos de un número mayor de parámetros (ver análisis de sensibilidad a la recarga).

**Figura 7.5.2.9.**  
**Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos.**



La vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos se obtuvo por medio de la aplicación de la metodología GOD, distribuida de manera discreta en una cuadrícula de 500 x 500 m, en donde se multiplicó el valor de cada parámetro usado en el método y luego el valor final en cada celda se interpoló por medio de un algoritmo matemático numérico. La información necesaria para aplicar el método sobre el grado de confinamiento hidrogeológico, de la profundidad del nivel de agua y el material sobreyacente

al acuífero se obtuvo de las perforaciones realizadas en el sitio de presa (ambas márgenes), en la línea de túnel y en el área de la casa de máquinas. En el área cercana al cauce del río Reventazón se obtuvo la mayor vulnerabilidad acuífera (0,8) como se observa de la figura 7.5.2.10, debido a la presencia de acuíferos de tipo libre, con una escasa cobertura y un nivel de agua subterránea con una profundidad menor a 10 m, por su parte en el área de la línea de túnel la vulnerabilidad acuífera es reducida (0,25-0,3). El hecho de que la mayor vulnerabilidad acuífera se presente cerca del cauce del río Reventazón, demanda medidas de protección para los acuíferos durante la construcción de las obras civiles ubicadas en esta área.

Aunque esta metodología sólo utiliza tres parámetros para el cálculo de la vulnerabilidad, se considera que es una buena aproximación pues los tres parámetros usados son esenciales en cualquier análisis de vulnerabilidad, y de hecho metodologías con más parámetros como por ejemplo DRASTIC lo toman en cuenta. Por otro lado con el tipo de información que se cuenta es posible llevar a cabo un buen acercamiento a la vulnerabilidad usando GOD. El cálculo de otros parámetros de análisis como el riesgo de contaminación implica la estimación del tipo de amenaza o del contaminante y de su modo de disposición en el subsuelo, que para este diagnóstico no se considera necesario.

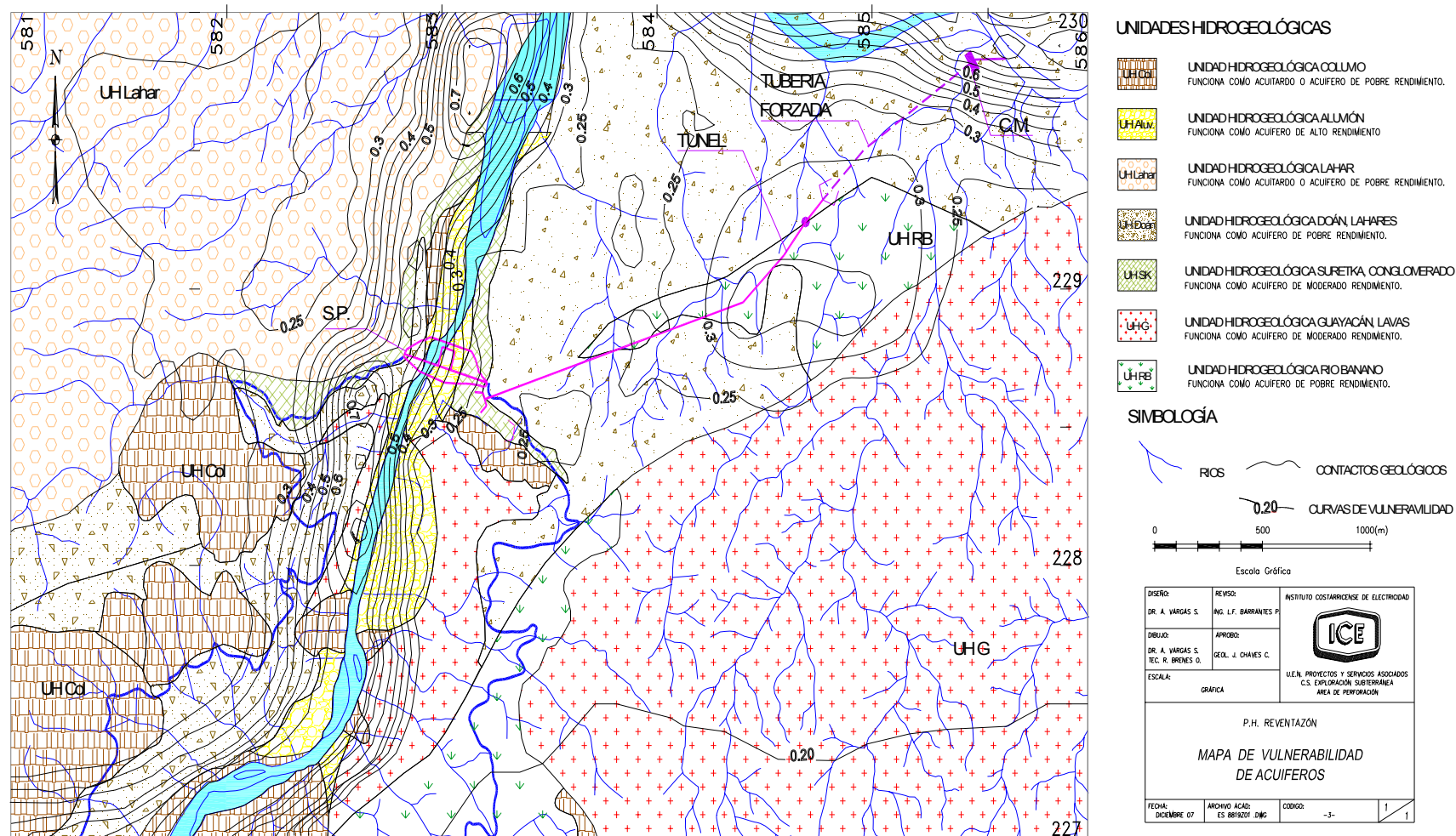


Figura 7.5.2.10. Vulnerabilidad a la contaminación de las unidades hidrogeológicas.

### 7.5.2.9 Investigación hidroquímica

Con el fin de determinar las características hidroquímicas del agua subterránea, se realizaron dos campañas de muestreo y análisis en los manantiales alrededor del sitio de presa. En cada sitio de muestreo se tomó al menos una muestra de agua de un litro en envase plástico rotulado y se trasladó al laboratorio para la determinación de la concentración de los iones mayoritarios y el potencial de hidronio entre otros. Dentro del análisis de las características químicas del agua en las márgenes del sitio de presa se analizaron las concentraciones de los iones mayores y el carácter del agua junto con la posible reacción sobre las estructuras de concreto determinada a partir del índice de Langelier.

La técnica empleada en la recolección de muestras de agua fue la de muestreo simple instantáneo a profundidad media, de acuerdo a lo que sugiere el APHA, AWWA, WPCF (1985). Se utilizaron envases de polietileno de 100 ml y con objeto de aislar por completo las muestras de agua del anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) atmosférico, las botellas se cerraron bajo la superficie del agua. El análisis de las muestras estuvo a cargo del personal del laboratorio químico del Centro de Servicio de Estudios básicos de Ingeniería, de la Unidad Estratégica de Negocios de Proyectos y Servicios Asociados del ICE.

Utilizando diagramas de Stiff, obtenidos a partir de la concentración de los iones mayoritarios en las muestras de agua y colocándolos sobre un mapa es posible identificar variaciones espaciales de la composición química del agua subterránea. En la figura 7.5.2.11 se presentan los diagramas de Stiff para las muestras de agua tanto subterránea como superficial tomadas en sitios cercanos a las principales obras del proyecto. Estas muestras están distribuidas espacialmente, notándose similitudes en la forma del polígono, con una mayor cantidad de bicarbonato y carbonatos, excepto para las muestras tomadas en el piezómetro PHR 7 SP, con una concentración mayor de sodio y potasio.

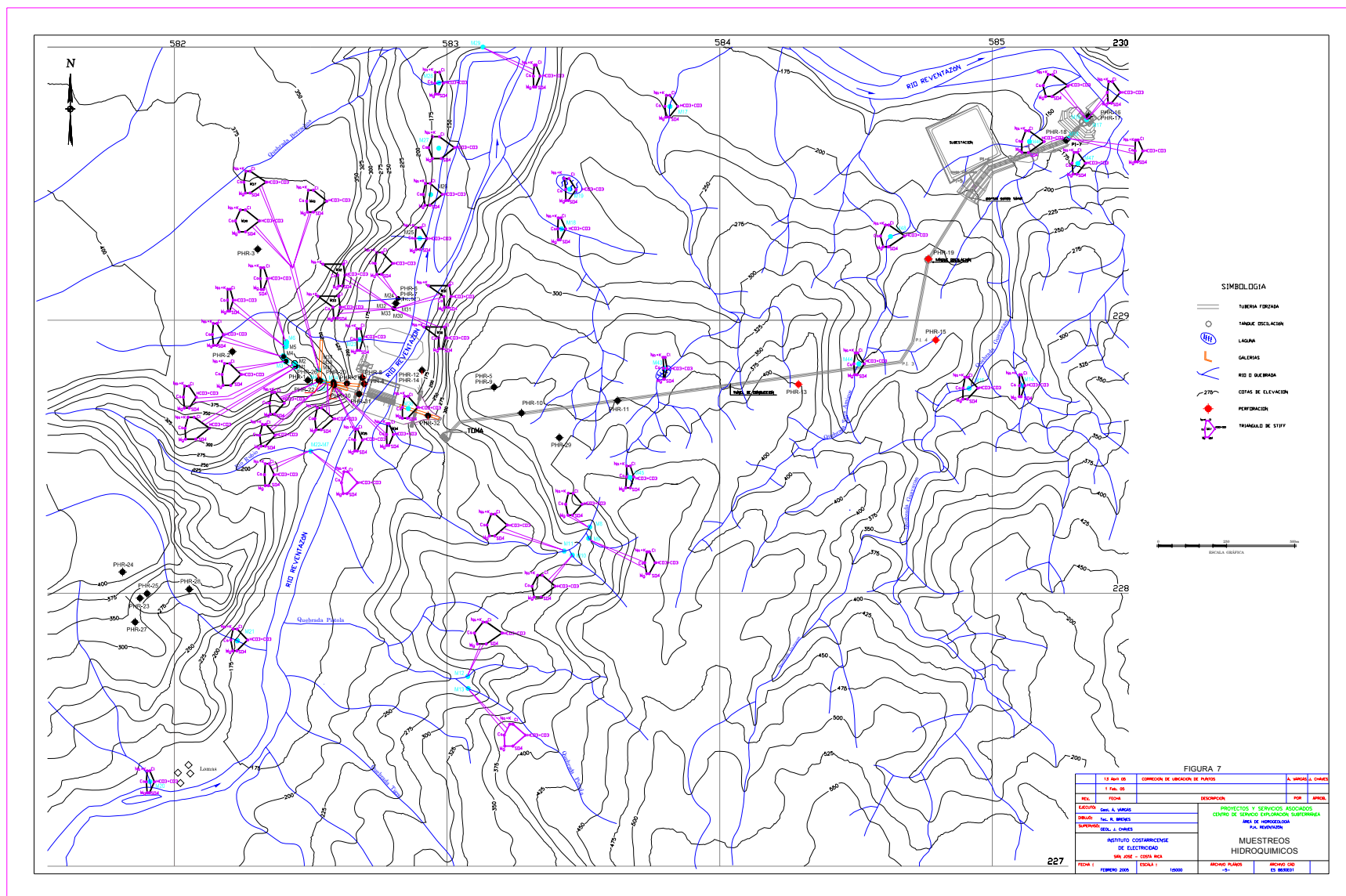
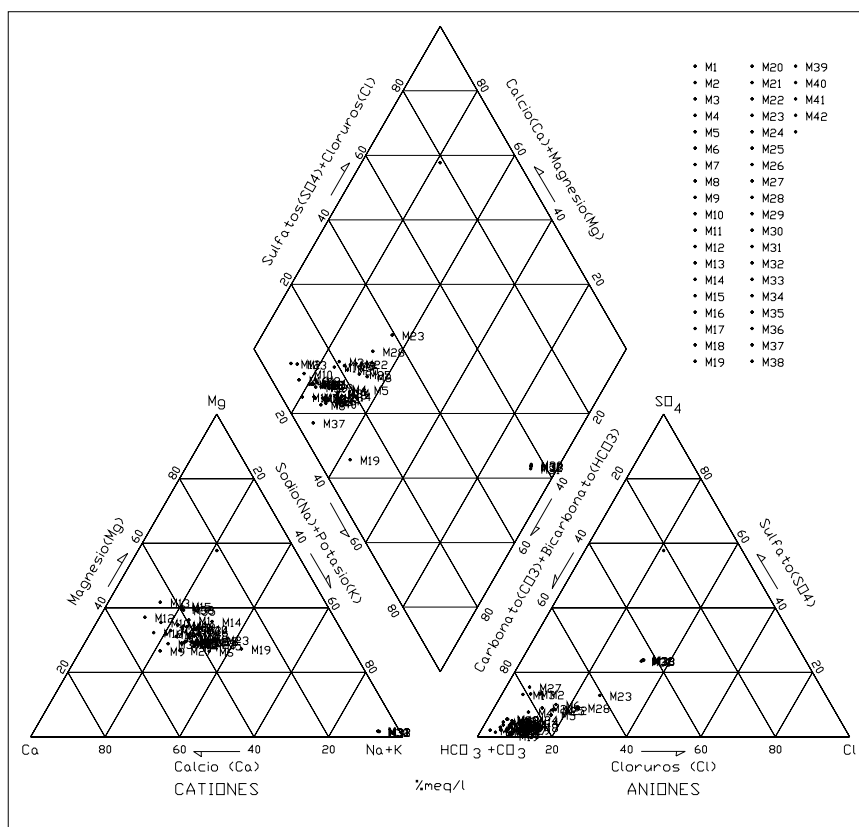


Figura 7.5.2.11. Mapa de ubicación de los muestreos hidroquímicos y diagramas de Stiff.

### Hidroquímica de margen izquierda

Para evaluar la composición química del agua superficial y subterránea en la margen izquierda del sitio de presa se tomaron 42 muestras de agua a partir de varios manantiales presentes en el talud del valle de río Reventazón cercanos al eje de presa y del río Rubio y se midieron las concentraciones de los iones mayores. Por medio del diagrama de Piper se aprecia de manera gráfica las características químicas de cada muestra (figura 7.5.2.12). La mayoría se clasifican como bicarbonatadas mixtas.

**Figura 7.5.2.12.**  
**Diagrama de Piper para muestras de agua de la margen izquierda**



### Hidroquímica en margen derecha

El día lunes 3 de setiembre del 2001 se procedió a tomar 6 muestras de agua de varias quebradas sin nombre de la margen derecha del sitio de presa. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de química de Estudios Básicos para la determinación de la concentración de los iones mayores y de los sólidos totales disueltos. Se analizaron 10 parámetros incluidos los iones mayores, la temperatura y los sólidos disueltos (cuadro 7.5.2.5).

**Cuadro 7.5.2.5****Química del agua en quebradas de la margen derecha**

| Parámetro                                    | RMD<br>1 | RMD<br>2 | RMD<br>3 | RMD<br>4 | RMD<br>5 | RMD<br>6 | Promedi<br>o |
|----------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Ph                                           | 7,87     | 7,48     | 8,04     | 7,95     | 8,05     | 7,86     | 7,9          |
| HCO <sub>3</sub> CaCO <sub>3</sub><br>(mg/L) | 44,3     | 28,3     | 64,0     | 56,4     | 73,5     | 59,9     | 54,4         |
| Cloruros (mg/L)                              | 2,30     | 1,26     | 3,56     | 1,43     | 2,16     | 1,78     | 2,1          |
| Sulfatos (mg/L)                              | 0,46     | 1,27     | 0,56     | 0,67     | 1,87     | 2,40     | 1,2          |
| Sodio (mg/L)                                 | 5,36     | 2,82     | 4,50     | 4,97     | 4,00     | 3,72     | 4,2          |
| Potasio (mg/L)                               | 2,36     | 0,20     | 1,83     | 1,07     | 0,99     | 0,92     | 1,2          |
| Calcio (mg/L)                                | 9,75     | 6,19     | 13,3     | 11,4     | 16,7     | 11,8     | 11,5         |
| Magnesio (mg/L)                              | 3,92     | 1,93     | 6,05     | 4,63     | 7,40     | 6,74     | 5,11         |
| Temperatura (°C)                             | 23,0     | 24,0     | 23,0     | 23,5     | 23,0     | 23,0     | 23,2         |
| Sol. Disueltos                               | 106,0    | 56,0     | 86,0     | 86,0     | 104,0    | 92,0     | 88,3         |
| Indice Langelier                             | -1,02    | -1,75    | -0,55    | -0,75    | -0,39    | -0,81    | -0,87        |

Las muestras presentan un potencial de hidronio (pH) ligeramente básico cercano a 8 con una concentración promedio de calcio y de magnesio de 11,5 mg/l y 5,11 mg/l respectivamente. Esta concentración es mayor que en margen izquierda, debido a la presencia de las formaciones geológicas con mayor contenido de calcio y magnesio.

**7.5.2.10. Acueductos alrededor del proyecto**

Los acueductos que abastecen de agua a las comunidades alrededor del proyecto utilizan el agua subterránea descargada de manantiales, y solamente en la comunidad de Guayacán dos familias utilizan el agua de pozos excavados para suplir las necesidades domésticas, además en esta zona por sus condiciones topográficas, el agua de lluvia también es usada. Estos pozos excavados están ubicados a más de 3 km de distancia del sitio de presa del proyecto Reventazón. Como parte del diagnóstico se tomaron varias muestras de agua de acueductos ubicados alrededor del proyecto.

**Toma del Río Siquirres**

La ciudad de Siquirres recibe agua que es captada del río Siquirres (fotografía 7.5.2.1). Se nota que existe una vulnerabilidad a la contaminación, pues aguas arriba del sitio se observan desechos plásticos y existen accesos vehiculares al río que ponen en peligro esta captación.

**Fotografía 7.5.2.1.**

**Captación del río Siquirres por medio de una derivación con rejilla.**



El análisis químico realizado para una muestra de agua tomada el día 6 de mayo del año en curso, considerando los iones mayoritarios, potencial de hidronio (pH) y nitratos, indica que el agua es potable (cuadro 7.5.2.6).

**Cuadro 7.5.2.6****Química del agua en la toma Siquirres**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |                |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Toma Siquirres | <b>Muestra No.</b>    | 2                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008     | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>    | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5        | 7,49                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0          | 3,16                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0           | 1                     | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0          | 8,64                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0           | 4,51                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0          | 2,1                   | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0          | 0,56                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0           | 0,2                   | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |                |                       |                  |

**Comunidad de San Antonio**

La comunidad de San Antonio cuenta con un acueducto que se alimenta de varias nacientes. La naciente principal que está siendo captada (fotografía 7.5.2.2), se ubica hacia la parte alta de la comunidad y surge cerca del valle o depresión angosta de una quebrada. Anteriormente el agua de esta naciente era almacenada en un tanque de concreto, sin embargo el socavamiento por parte del agua de la quebrada provocó la salida de operación de dicha estructura y actualmente se protege por medio de un cobertor plástico. El servicio cuenta con varios tanques de distribución, que funcionan independientemente.

**Fotografía 7.5.2.2.**  
**Captación del acueducto de la comunidad de San Antonio.**



El análisis químico efectuado a una muestra de agua tomada el día 7 de mayo del año en curso, considerando los iones mayoritarios, potencial de hidronio (pH) y nitratos indica que el agua es potable (cuadro 7.5.2.7). Se recomienda la construcción de una captación que brinde protección contra la contaminación.

**Cuadro 7.5.2.7**  
**Química del agua en la captación de San Antonio**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |             |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | San Antonio | <b>Muestra No.</b>    | 5                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008  | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b> | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5     | 7,46                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0       | 5,39                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0        | 1,54                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0       | 10,7                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0        | 4,55                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0       | 1,12                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0       | 1,18                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0        | 0,92                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |             |                       |                  |

### **Comunidad de Florida**

La comunidad de Florida cuenta con una población de 1359 habitantes, de los cuales 620 son usuarios y 123 de ellos se ubican en Florida centro. Se estima un consumo de agua de 20 385 l/d y de 2,3 l/s. Debido al aumento de la demanda y a eventos de estiaje prolongados e intensos se planea la ampliación del acueducto con manantiales ubicados en la parte alta de San Antonio y la naciente la Macadamia (fotografía 7.5.2.3).

**Fotografía 7.5.2.3.**  
**Naciente la Macadamia con caudal mayor a 5 l/s**



Tomando en cuenta esto, se realizaron muestreos y análisis químicos de agua de estas nacientes considerando los iones mayoritarios, potencial de hidronio y nitratos. El resultado de los análisis químicos indica que el agua de la naciente ubicada en la parte alta de San Antonio es de buena calidad (cuadro 7.5.2.8).

**Cuadro 7.5.2.8.**

| <b>Química del agua en la naciente para acueducto Florida</b> |                                          |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|------------------|
| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |                                          |                       |                  |
| <b>Naciente:</b>                                              | Florida (Nac. Parte alta De San Antonio) | <b>Muestra No.</b>    | 6                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008                               | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>                              | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5                                  | 6,64                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0                                    | 5,06                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0                                     | 1,54                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0                                    | 11,7                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0                                     | 3,86                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0                                    | 1,71                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0                                    | 0,53                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0                                     | 1,5                   | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |                                          |                       |                  |

No obstante el análisis de la muestra de agua de la naciente la Macadamia, que cuenta con un caudal mayor de 5 L/s, indica que el agua no es potable debido a un potencial de hidronio ligeramente más bajo que lo permitido por la norma (cuadro 7.5.2.9).

**Cuadro 7.5.2.9.**

| <b>Química del agua en naciente La Macadamia</b>              |                     |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |                     |                       |                  |
| <b>Naciente:</b>                                              | Florida (Macadamia) | <b>Muestra No.</b>    | 7                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008          | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>         | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5             | 6,14                  | NO POTABLE       |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0               | 5,06                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0                | 0,84                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0               | 9,9                   | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0                | 3,22                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0               | 1,56                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0               | 0,37                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0                | 3,77                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |                     |                       |                  |

**Comunidad de La Alegría**

Los manantiales principales del acueducto de la comunidad de La Alegría de Siquirres, se ubican sobre la carretera principal, a 300 metros de la escuela de la misma comunidad, rodeadas por una finca sembrada con plantaciones de Macadamia. El acueducto cuenta con varios tanques de distribución que son independientes, por lo tanto, el suministro de agua continúa funcionando mientras se realizan las labores de mantenimiento (fotografía 7.5.2.4).



**Fotografía 7.5.2.4. Toma de agua en la naciente F2 de la comunidad de La Alegría.**

La demanda de agua de la Alegría de Siquirres, considerando una población de 1487 habitantes, con 330 usuarios registrados se calcula en 2,8 l/s, para una demanda diaria de 223 050 l/d. El análisis químico de agua a partir de una muestra tomada el día 8 de mayo del año en curso indica que el agua tiene un potencial de hidronio bajo, más allá de lo permitido por la norma (cuadro 7.5.2.10).

**Cuadro 7.5.2.10.****Química del agua en la naciente F2, La Alegría**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |               |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | La Alegría F2 | <b>Muestra No.</b>    | 8                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008    | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>   | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5       | 5,54                  | NO POTABLE       |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0         | 3,28                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0          | 0,75                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0         | 5,44                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0          | 2,15                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0         | 2,01                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0         | 0,55                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0          | 1,27                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |               |                       |                  |

**Comunidad de Coco y Moravia**

La captación de agua de la comunidad del Coco y Moravia, se ubica a un lado de la carretera principal de Turrialba y Siquirres (fotografía 7.5.2.5), siendo construida en 1977 y cuenta con un sistema de protección adecuado, que incluye, tanques de concreto y una cerca de alambre que impide el paso de animales. Las comunidades del Coco y Moravia cuentan con una población de 759 y 301 personas respectivamente, con 310 usuarios del servicio de agua, para un consumo de 159000 l/d y 1,8 l/s.

**Fotografía 7.5.2.5.**  
**Captación del acueducto Moravia y El Coco de Siquirres**



El análisis químico de una muestra de agua recolectada el día 6 de mayo de 2008 y analizada en el laboratorio químico del ICE, indican que la calidad del agua tomando en cuenta los iones mayoritarios, potencial de hidronio y nitratos está dentro de los valores establecidos en el reglamento de calidad del agua (cuadro 7.5.2.11).

**Cuadro 7.5.2.11.**  
**Química del agua en la naciente Orlando Moya El Coco-Moravia**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |              |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Coco-Moravia | <b>Muestra No.</b>    | 1                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008   | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>  | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5      | 6,75                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0        | 3,33                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0         | 0,69                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0        | 12,2                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0         | 7,54                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0        | 2,12                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0        | 0,9                   | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0         | 1,15                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |              |                       |                  |

### **Comunidad de Alto Guayacán**

La comunidad de Guayacán actualmente no cuenta con acueducto, por lo que las familias ubicadas a las orillas de la carretera principal (que va desde Turrialba a Siquirres), procuran abastecerse de la lluvia o de nacientes ubicadas en fincas cercanas, sin embargo buscan alternativas para disponer de una fuente segura de agua. Al pie de la vertiente norte del cerro Guayacán existe una naciente que se podría usar, pues presenta un caudal suficiente para abastecer la demanda aún en la época de estiaje y la calidad es satisfactoria (fotografía 7.5.2.6). Para llevar el agua a la población se requiere un sistema que impulse el agua desde aproximadamente 100 m de altura. Esta comunidad tiene una población de 304 personas y se estima que la demanda de agua es de 45600 l/d o 0,5 l/s. La habilitación de la naciente mencionada podría ser un elemento clave para suplir esta demanda.

**Fotografía 7.5.2.6. Naciente al pie del cerro Guayacán, con potencial para suplir la demanda de la población.**



La calidad del agua de la naciente en consideración tomando en cuenta el potencial de hidronio (pH), iones mayoritarios y nitratos es buena (cuadro 7.5.2.12). Es conveniente proteger las partes altas de la zona de recarga para evitar la contaminación y realizar análisis bacteriológicos para tener mayor certeza de la calidad del agua.

**Cuadro 7.5.2.12.****Química del agua en naciente al pie del Cerro Guayacán**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |               |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Alto Guayacán | <b>Muestra No.</b>    | 3                |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008    | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>   | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5       | 7,46                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0         | 5,39                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0          | 1,54                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0         | 10,7                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0          | 4,55                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0         | 1,12                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0         | 1,18                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0          | 0,92                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |               |                       |                  |

**Comunidad de Santa Marta**

La comunidad de Santa Marta utiliza el agua de las nacientes denominadas El Moro y El Apache. Además se tiene pensado utilizar el agua de dos nacientes ubicadas en la finca Kinderson y Enrique Mora. Esta comunidad está constituida por una población de 379 personas, con 112 usuarios registrados y se estima un consumo de agua de 56 850 l/d, es decir 0,6 l/s.

El análisis químico de una muestra de agua tomada el día 7 de mayo en la naciente de la Finca Kinderson tomando en cuenta el potencial de hidronio, iones mayores y nitratos indica que la condición del agua es potable (cuadro 7.5.2.13). Se recomienda la protección de las partes altas de la zona de recarga y la protección con una captación adecuada.

**Cuadro 7.5.2.13.****Química del agua en naciente de Finca Kinderson**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |               |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Fca.Kinderson | <b>Muestra No.</b>    | 10               |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008    | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>   | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5       | 7,05                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0         | 15,5                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0          | 0,69                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0         | 53,2                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0          | 5,1                   | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0         | 1,66                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0         | 10,6                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0          | 0,57                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |               |                       |                  |

Por su parte el agua muestreada en la naciente ubicada en la finca Enrique Mora, muy cerca de la vía principal que comunica hacia Siquirres, muestra un valor de calcio que supera la norma de calidad (cuadro 7.5.2.14), lo que indica que en este parámetro el agua no es potable.

**Cuadro 7.5.2.14.****Química del agua en naciente de Finca Enrique Mora**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |                    |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Finca Enrique Mora | <b>Muestra No.</b>    | 11               |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008         | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b>        | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5            | 6,87                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0              | 47,4                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0               | 7,76                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0              | 116                   | NO POTABLE       |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0               | 8,61                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0              | 2,3                   | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0              | 12,6                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0               | 0,72                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |                    |                       |                  |

Las nacientes principales que están siendo captadas para suplir de agua a la población, corresponden a la naciente de la Finca El Moro con un caudal aproximado de 0,2 l/s (fotografía 7.5.2.7) y la naciente El Apache, que dispone de un tanque de concreto para su protección (fotografía 7.5.2.8) y un caudal mayor de 0,5 l/s.

**Fotografía 7.5.2.7.**  
**Captación de la naciente finca el Moro con un caudal 0,2 l/s.**



El análisis químico de una muestra de agua recolectada el día 7 de mayo del año en curso, analizando el potencial de hidronio, iones mayores y nitratos indica que el agua es potable (cuadro 7.5.2.15). Para mantener la calidad en un nivel adecuado se recomienda la reforestación de la zonas de protección inmediata y de recarga.

**Cuadro 7.5.2.15.**

**Química del agua en naciente de Finca El Moro**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |             |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | El Moro     | <b>Muestra No.</b>    | 12               |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008  | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b> | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5     | 6,97                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0       | 1,77                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0        | 0,58                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0       | 58,7                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0        | 1,76                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0       | 1,44                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0       | 3,65                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0        | 0,72                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |             |                       |                  |

**Fotografía 7.5.2.8.**  
**Captación naciente el Apache, acueducto Santa Marta.**



Otra muestra de agua de este acueducto fue analizada considerando potencial de hidronio, iones mayores y nitratos, obteniéndose resultados satisfactorios en cuanto a su calidad (cuadro 7.5.2.16).

**Cuadro 7.5.2.16.**  
**Química del agua en Naciente El Apache**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |             |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Nac. Apache | <b>Muestra No.</b>    | 13               |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008  | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b> | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5     | 7,09                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0       | 3,05                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0        | 0,67                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0       | 71,5                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0        | 3,49                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0       | 1,52                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0       | 4,48                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0        | 0,81                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |             |                       |                  |

**Comunidad de Bajo 52 Millas**

La comunidad de Bajo 52 Millas está formada por una población de 369 personas, cuenta con 43 usuarios del servicio de agua y el acueducto tiene una toma principal (fotografía 7.5.2.9).

**Fotografía 7.5.2.9.**  
**Toma de agua de la comunidad de Bajo 52 Millas**



Se estima que el consumo de agua de la población es de 55 350 l/d, o 0,6 l/s. La captación del acueducto tiene una alta vulnerabilidad acuífera, pues está ubicada en materiales calcáreos que muestran grietas y cavernas de tamaño métrico y además, está amenazada por sembradíos en las partes altas. El día 09 de mayo del año en curso se tomaron dos muestras de agua para analizar la calidad físico-química, tomando en cuenta el potencial de hidronio, iones mayoritarios y nitratos. Los resultados de los análisis realizados en el laboratorio químico del ICE, indican que las concentraciones de los elementos analizados están dentro de la norma del reglamento de calidad del agua (cuadros 7.5.2.17 y 7.5.2.18).

**Cuadro 7.5.2.17.****Química del agua en naciente de Bajo 52 Millas**

| <b>Análisis de potabilidad del agua</b> |             |                       |                  |
|-----------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                        | Bajo 52     | <b>Muestra No.</b>    | 14               |
| <b>Fecha muestreo</b>                   | 09/05/2008  | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                        | <b>VMA*</b> | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                      | 6,5-8,5     | 7,34                  | POTABLE          |
| Na (mg/l)                               | 200,0       | 8,4                   | POTABLE          |
| K (mg/l)                                | 10,0        | 1,87                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                               | 100,0       | 70,5                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                               | 50,0        | 8,69                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                               | 250,0       | 2,24                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                  | 250,0       | 11,1                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                  | 50,0        | 2,34                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                |             |                       |                  |

**Cuadro 7.5.2.18.****Química del agua en naciente de Bajo 52 Millas (Muestra 2)**

| <b>Análisis de potabilidad del agua según Reglamento 2005</b> |             |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------|
| <b>Naciente:</b>                                              | Bajo 52     | <b>Muestra No.</b>    | 15               |
| <b>Fecha muestreo</b>                                         | 07/05/2008  | <b>Fecha análisis</b> | 12/05/2008       |
| <b>Parámetro</b>                                              | <b>VMA*</b> | <b>Valor real</b>     | <b>Condición</b> |
| pH                                                            | 6,5-8,5     | 7,3                   | POTABLE          |
| Na (mg/l)                                                     | 200,0       | 8,23                  | POTABLE          |
| K (mg/l)                                                      | 10,0        | 1,72                  | POTABLE          |
| Ca (mg/l)                                                     | 100,0       | 70,5                  | POTABLE          |
| Mg (mg/l)                                                     | 50,0        | 8,61                  | POTABLE          |
| Cl (mg/l)                                                     | 250,0       | 2,22                  | POTABLE          |
| SO <sub>4</sub> (mg/l)                                        | 250,0       | 11,7                  | POTABLE          |
| NO <sub>3</sub> (mg/l)                                        | 50,0        | 2,27                  | POTABLE          |
| * Valor máximo admisible                                      |             |                       |                  |

El consumo de agua de las comunidades San Joaquín, Lomas, Pascua, Bonilla y El Llano –Casorla, ubicadas también alrededor del proyecto varía de 0,09 a 0,3 l/s (cuadro 7.5.2.19), siendo las comunidades con el consumo de agua menor.

**Cuadro 7.5.2.19.**

**Consumo de agua en comunidades alrededor del proyecto**

| Comunidad        | Población | Cantidad de viviendas | Cantidad de usuarios registrados <sup>1</sup> | Consumo (l / d –l/s) |
|------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------------------------|----------------------|
| San Joaquín      | 89        | 23                    | 42 usuarios                                   | 13 350 / 0,15        |
| Lomas            | 160       | 40                    | no hay datos                                  | 24 000 / 0,3         |
| Pascua           | 65        | 37                    | 40 usuarios                                   | 9750 / 0,1           |
| Bonilla          | 56        | 20                    | 40 usuarios                                   | 8400 / 0,09          |
| El Llano-Casorla | 76        | 28                    | No hay datos                                  | 11 400 / 0,1         |

Fuente de información de usuarios: Ing. Samantha Camacho, P.H. Reventazón.

**7.5.2.11. Consideraciones finales**

Las unidades hidrogeológicas presentes en el área del proyecto presentan características hidrogeológicas variables, con fracturamiento y porosidad variable lo que induce permeabilidad y almacenamiento variables. Así mismo es posible encontrar desde acuíferos confinados, acuíferos libres, colgados y unidades de pobre rendimiento considerados como acuitardos.

La profundidad del nivel freático del agua subterránea en el área del proyecto es variable, sin embargo hacia las márgenes del cauce del río Reventazón, así como en la zona baja de la finca La Plywood es posible encontrar el nivel freático muy cercano a la superficie. Algunas nacientes se encuentran cercanas al trazado del túnel o en la margen izquierda del sitio de presa y corresponden al nivel freático de acuíferos colgados y no están siendo captadas por los acueductos de las comunidades cercanas al proyecto.

Los acueductos ubicados alrededor del proyecto son vulnerables a la contaminación y a las variaciones de la precipitación que a su vez influyen directamente sobre el caudal utilizado. El abastecimiento se logra por medio de la captación de manantiales y no se utilizan pozos perforados, pues la demanda es relativamente baja. Las concentraciones de los iones mayoritarios analizados para varios acueductos están dentro de las normas de potabilidad del reglamento de calidad del agua del año 2005. La comunidad de Alto Guayacán no tiene un suministro de agua seguro, debido a las condiciones de ubicación topográfica, y por problemas de contaminación de nacientes cercanos que no se pueden utilizar.

La mayor vulnerabilidad a la contaminación se presenta sobre los acuíferos constituidos por los materiales aluvionales, constituidos por arenas y gravas bien seleccionadas, que se ubican en o cerca del cauce del río Reventazón, mientras que los materiales sedimentarios o volcánicos constituidos por granulometrías finas son de baja vulnerabilidad y se constituyen en sellos hidrogeológicos. Las zonas de recarga de los principales acuíferos en el área del proyecto incluyendo el embalse se encuentran distantes de las obras principales y no se verán afectadas por estas. Además las principales obras civiles del proyecto están ubicadas a varios kilómetros (2-3km) de distancia de las captaciones de las comunidades, por lo que es poco probable su afectación.

## **7.6 Calidad de la atmósfera**

### **7.6.1. Ruido ambiental**

El ruido ambiental es aquel que afecta nuestro entorno, incluye ruido de construcción, ruido de maquinarias, ruido del transporte y ruido de trabajadores.

En Costa Rica el ruido está legislado según el Decreto 78718-S Reglamento para el control de la contaminación por ruido, del 14 de agosto del 2000.

El ruido y el sonido no son sinónimos. Un ruido es un tipo de sonido indeseable, desagradable, pero el sonido no es un ruido. El ruido tiene efectos negativos sobre la salud humana y sobre la tierra. De todos los contaminantes presentes en el ambiente el ruido es el más relacionado con el ser humano, puede emitirlo como percibirlo; se puede disminuir parcialmente en la noche, pero en la mañana puede aparecer de nuevo y generar mucho malestar hasta llegar a poner en peligro la salud y bienestar de la humanidad, además de ser el contaminante más común que existe.

El ruido puede causar en el receptor una variedad de estímulos de molestias o perturbaciones a su tranquilidad, descanso o salud, porque puede ocasionar, entre otras situaciones, problemas de “stress”, mal estado de ánimo, dolor de cabeza, pérdida de la sensibilidad auditiva y del sueño, convirtiéndose en un serio obstáculo para la comunicación efectiva. Los sonidos y ruidos altamente amplificados o de gran potencia también pueden generar daños como la pérdida parcial o total de la audición, entre otros.

La unidad básica para medir el nivel sonoro es el decibel (dB). Algunos documentos analizan el nivel sonoro equivalente (Leq), que se define como la media del nivel de ruido promediado en el tiempo de medida. Se usa cuando el nivel de ruido varía con el tiempo (ICE. 2001. Estudio de impacto ambiental P. H. Cariblanco, Tomo 2.1.131).

### **7.6.2. Fuentes emisoras de ruido**

Se clasifican en tres categorías: Fuentes fijas, móviles y puntuales.

- Fuentes fijas son permanentes en su ubicación no en sus actividades ni en el tiempo.
- Fuentes móviles son todos los medios de transporte: terrestre, aéreo y acuático; entre ellos los más comunes son los autobuses, automóviles, motocicletas, camiones y trenes y
- Fuentes puntuales se refiere a las ferias o turnos.

En obras de construcción, para el caso del ICE con proyectos de generación, por la maquinaria que se usa en las diferentes actividades, estos equipos de hecho funcionan como fuentes emisoras de ruido, los niveles que alcanzarán son dañinos para el oído humano en este caso, para el sistema auditivo de los trabajadores de las obras, y como impacto paralelo causa alteración acústica a las áreas periféricas o comunidades en el entorno de la construcción.

**Cuadro 7.6.1.**  
**Clasificación de las fuentes emisoras del sonido**

| Fuentes que Emiten Sonido |                         |                         |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Fijas                     | Móviles                 | Puntuales               |
| Industrias                | Maquinaria agrícola     | Ferias                  |
| Discotecas                | Maquinaria construcción | Turnos                  |
| Bares                     | Transporte terrestre    | Fiestas especiales      |
| Restaurantes              | Transporte aéreo        | Actividades recreativas |
| Comercios                 | Transporte acuático     | Actividades deportivas  |
|                           | Otro tráfico vehicular  | Construcciones          |

Fuente: Elaboración Geóg. Gerardina Araya Astorga adaptado de El ruido como contaminante, 2002. 6 p.

### 7.6.3. Control de la Contaminación por Ruido en Costa Rica

Los niveles de ruido permitidos en Costa Rica, se indican en el Cuadro 7.6.2, Reglamento para el Control de la Contaminación por Ruido (Decreto 78718-S, del 14 de agosto del 2000.

**Cuadro 7.6.2.**  
**Niveles de presión sonora permitidos para Costa Rica**

| Fuente emisora   | Zonas receptoras |                 |               |                 |               |                 |               |                 |
|------------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
|                  | Residencial      |                 | Comercial     |                 | Industrial    |                 | Tranquilidad  |                 |
|                  | Día<br>dB (A)    | Noche<br>dB (A) | Día<br>dB (A) | Noche<br>dB (A) | Día<br>dB (A) | Noche<br>dB (A) | Día<br>dB (A) | Noche<br>dB (A) |
| Zona residencial | 65               | 45              | 65            | 55              | 70            | 60              | 50            | 45              |
| Zona comercial   | 65               | 45              | 65            | 55              | 75            | 65              | 50            | 45              |
| Zona industrial  | 65               | 45              | 70            | 65              | 75            | 75              | 50            | 45              |

Fuente: Reglamento para el control de la contaminación por ruido Decreto 78718-S, 14 de agosto 2000.

### 7.6.4. El ruido ambiental y el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón

El ruido en el proyecto es la consecuencia de la presencia de fuentes de sonidos que operan todos a la vez, tanto fuentes puntuales como móviles en cada una de las áreas donde se concentran las actividades constructivas. El Proyecto contribuye a mantener un ambiente sonoro cargado de sonidos y ruidos que, de una manera u otra afecta a la población y al medio ambiente por su presencia continua y la magnitud de los niveles emitidos. De igual manera, representa un problema que puede reducir el nivel de calidad de vida de la población y la privacidad en el hogar.

La fuente de contaminación móvil de ruido más común durante la construcción del Proyecto Reventazón según el cuadro 7.6.1. es el tráfico vehicular, por tránsito de pesado y de vagonetas, traslado de escombros y de materiales así como por maquinaria pesada y otros vehículos de uso continuo y diarios.

Otras fuentes sonoras son las fijas asociadas a la maquinaria que se utiliza en todas las obras de construcción, acopio de materiales, excavaciones y extracción de materiales del río.

Los principales factores que influirán en el nivel del ruido son: la forma de conducir (velocidad), el estado que incluye el mantenimiento y tipo de vehículo si es pesado o liviano, el diseño vial (alineamiento geométrico, pendiente, peralte, banda de rodamiento, tipo de construcción: asfaltada, lastre, tierra y estado de la superficie que se refiere al mantenimiento); otro elemento importante es la intensidad del tráfico.

Otras variables como la topografía, vegetación, dirección y velocidad del viento, presencia de nieblas, presencia o ausencia de obstáculos y/o barreras naturales o artificiales, determinan la propagación del ruido. (ICE. 2001. Estudio de impacto ambiental P. H. Cariblanco, Tomos 1 y 2, p. 23 y 132; García Senchermes, A.).

#### **Cuadro. 7.6.3.**

##### **Resumen de factores que influyen en el nivel de ruido móvil**

| <b>Factores que ayudan a la propagación de nivel de ruido</b> |                            |                                   |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Diseño vial</b>                                            | <b>Vehículo/tránsito</b>   | <b>Ambientales</b>                |
| Alineamiento geométrico                                       | Velocidad                  | Topografía                        |
| Pendiente                                                     | Estado (mantenimiento)     | Vegetación                        |
| Peralte                                                       | Tipo (liviano, pesado)     | Dirección del viento              |
| Ancho de carriles                                             | Forma de conducir          | Velocidad del viento              |
| Pavimento                                                     | Intensidad del tráfico     | Presencia de nieblas              |
| Estado de la superficie                                       | Distancia a vías de acceso | Barreras naturales o artificiales |

Fuente: Elaboración Geóg. Gerardina Araya Astorga, adaptado de García Senchermes, A.

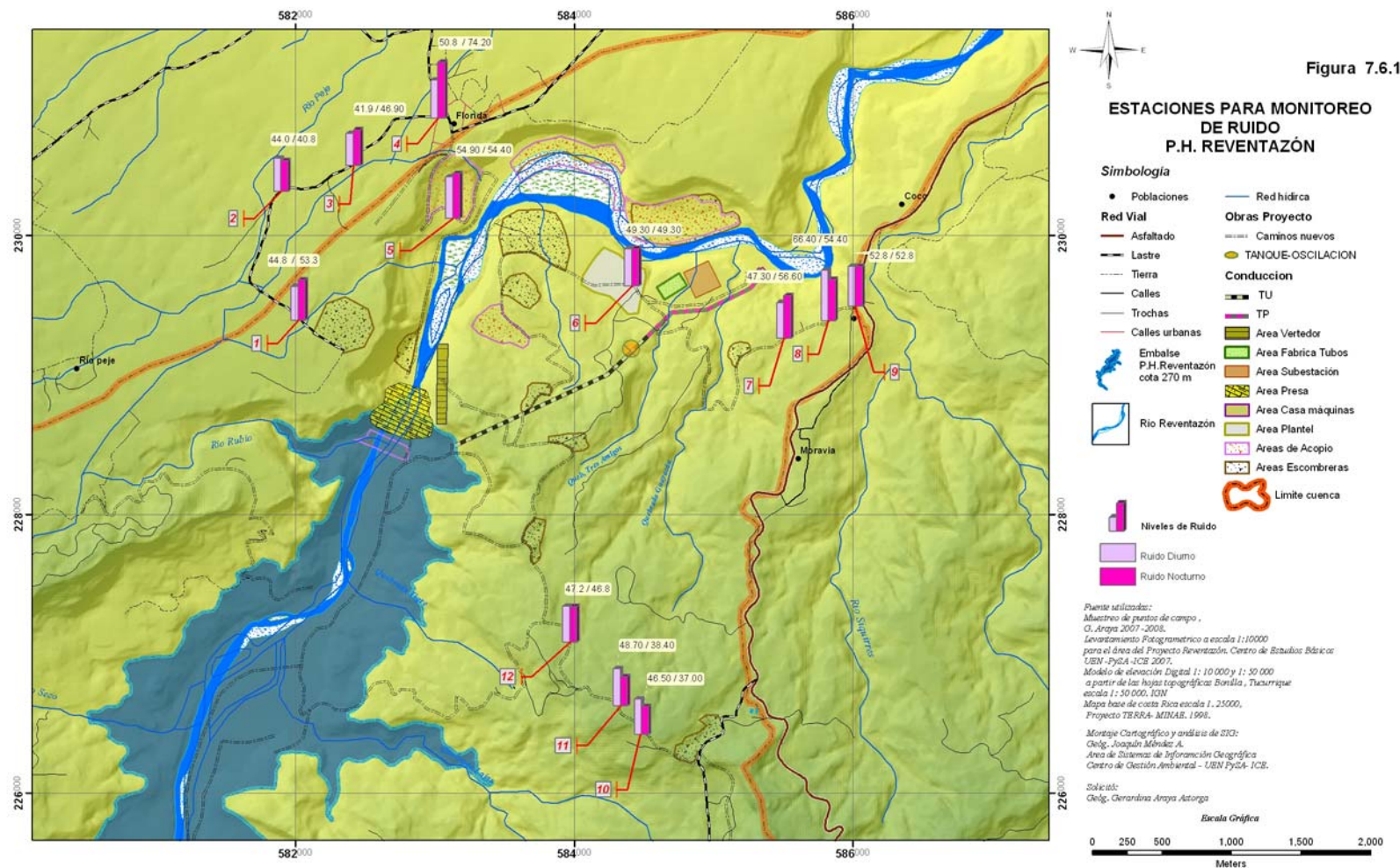
#### **7.6.5. Monitoreo de ruido en el AID del Proyecto**

Como parte de las investigaciones del diagnóstico se realizaron mediciones de ruido de fondo tanto diurnos como nocturnos, en algunos casos ruido de pico al momento de pasar algún vehículo, por animales, por habitantes en viviendas, por comercios y en la calle. Las mediciones se hicieron en sitios estratégicos del área del proyecto que se escogieron porque son zonas con poblaciones o al menos hay casas dispersas y serán los lugares por donde habrá flujo vehicular durante la construcción del proyecto, ver figura 7.6.1, Cuadros 7.6.4. y 7.6.5 los lugares seleccionados: el Barrio Calle Nubes en Florida, Calle Q. Lajas, El Coco y Finca Plywood en este último se ubicarán la mayoría de las obras del Proyecto.

Todos los puntos de monitoreo se referenciaron topográficamente y se dejó un monumento, para continuar con las mediciones en estos mismos puntos durante la etapa constructiva si así se considere, también se podrían agregar otros sitios de monitoreo cuando se requieran, esta labor es competencia del Servicio de Seguridad Ocupacional del P.H. Reventazón, área que dispone de ingenieros especializados en el área de Seguridad Laboral e Higiene Industrial.

Estas mediciones son necesarias a fin de tener una base del ruido de fondo antes de la construcción del proyecto, y se debe continuar con el monitoreo para conocer los niveles de exposición de la población a ruidos en ambientes exteriores que genera el proyecto por las actividades que se ejecuten durante la construcción. Los sitios seleccionados se presentan en la figura siguiente:

**FIGURA 7.6.1**  
**Puntos de monitoreo de ruido**



**Cuadro 7.6.4.**  
**Puntos de mediciones promedio de ruido de fondo diurno en el AID del P.H.**  
**Reventazón**

Fecha: 15 enero 2008

| <b>Mediciones de ruido en dB (A)</b> |              |                      |                            |                            |                                                                                                           |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Punto</b>                         | <b>Hora</b>  | <b>Prome<br/>dio</b> | <b>Coordenad<br/>a (N)</b> | <b>Coordenad<br/>a (O)</b> | <b>Observaciones</b>                                                                                      |
|                                      |              |                      |                            |                            | <b>Margen Izquierda R. Reventazón</b>                                                                     |
| <b>1</b>                             | <b>8:31</b>  | <b>44.8</b>          | <b>582 018</b>             | <b>229 391</b>             | Calle Nubes, últimas dos casas cerca escombrera 7, ruido de radio                                         |
| <b>2</b>                             | <b>8:50</b>  | <b>44.0</b>          | <b>581 895</b>             | <b>230 315</b>             | Calle Nubes, casas , finca con pastizales y ganadería                                                     |
| <b>3</b>                             | <b>9:10</b>  | <b>41.9</b>          | <b>582 413</b>             | <b>230.502</b>             | Calle Nubes, lechería, viviendas a ambos lados                                                            |
| <b>4</b>                             | <b>9:30</b>  | <b>50.8</b>          | <b>583.021</b>             | <b>230 839</b>             | Intersección con Florida y Calle Nubes, casas, comercio. Ruido de radio, y quebrador                      |
| <b>5</b>                             | <b>9:45</b>  | <b>54.9</b>          | <b>583 127</b>             | <b>230 122</b>             | Lechería y casa en terraza del R. Reventazón, ruta a Presa embalse, ruido de aves                         |
|                                      |              |                      |                            |                            | <b>Margen Derecha R. Reventazón</b>                                                                       |
| <b>6</b>                             | <b>10:45</b> | <b>49.3</b>          | <b>584.412</b>             | <b>229.638</b>             | Finca Plywood, cerca del futuro Campamento, ruido del río y chapeadora                                    |
| <b>7</b>                             | <b>11:25</b> | <b>47.3</b>          | <b>585 503</b>             | <b>229 261</b>             | El Coco, casa azul/blanco de Isabel González)                                                             |
| <b>8</b>                             | <b>11:35</b> | <b>66.4</b>          | <b>585 823</b>             | <b>229 389</b>             | El Coco, frente a casa de Agustín Ardón, niños jugando futbol muy cerca de la medición                    |
| <b>9</b>                             | <b>12:00</b> | <b>52.8</b>          | <b>586 016</b>             | <b>229 492</b>             | Casa izquierda en la entrada de la intersección carretera El Coco/Siquirres                               |
| <b>10</b>                            | <b>15:15</b> | <b>46.5</b>          | <b>584 471</b>             | <b>226 420</b>             | En el camino al Cubano, frente a la casa del Cubano                                                       |
| <b>11</b>                            | <b>15:45</b> | <b>48.7</b>          | <b>584 330</b>             | <b>226 626</b>             | Calle del Cubano, frente a casas verdes y corral de ganado. Ruido de perros ladrando                      |
| <b>12</b>                            | <b>16:15</b> | <b>47.2</b>          | <b>583.968</b>             | <b>227 083</b>             | Calle del Cubano, frente a casa con bambú en el portón, ruido por viento fuerte que movió árbol de bambú. |

Nombre Del Equipo: Sonómetro Integrador tipo 2, Fabricante: QUEST Technologies, Modelo: 2800, Número de serie: Hs 9010029 No. de activo: 227948, Normativa que cumple: ANSI S1.4 – 1983 - IEC 651 – 1979 y IEC 804 - 1985, Precisión del Sonómetro: Se considerará un error de + / - 1 ó 2 dB, Cuando se utilice instrumentos de tipo 2 como el descrito antes Nombre del equipo: Calibrador, Fabricante: QUEST Technologies Modelo: QC-10, Número de serie: QE8100294, Nombre del equipo:Filtro de bandas de octava. Fabricante: QUEST Technologies, Modelo:OB – 100, Número de serie: HW8110030

**Fuente:** Trabajo de campo, equipo utilizado GPS, colaboró personal de Seguridad Industrial, de la Dirección Administrativa Gestión Ambiente Laboral del ICE, Sabana.

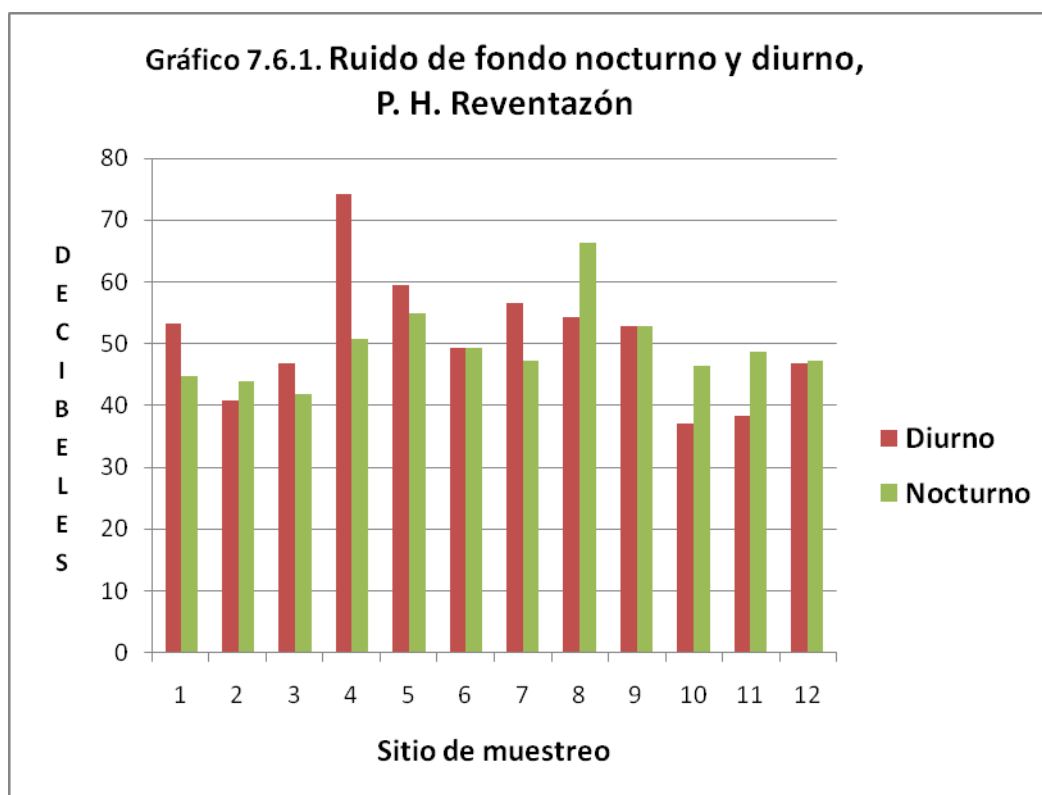
**Cuadro 7.6.5.****Puntos de mediciones promedio de ruido de fondo nocturno en el AID del P.H. Reventazón**

Fecha: 26 y 27 febrero 08

| <b>Mediciones de ruido en dB (A)</b> |              |                 |                       |                       |                                                                                                  |
|--------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Punto</b>                         | <b>Hora</b>  | <b>Promedio</b> | <b>Coordenada (N)</b> | <b>Coordenada (O)</b> | <b>Observaciones</b>                                                                             |
|                                      |              |                 |                       |                       | <b>Margen Izquierda R. Reventazón</b><br>Mediciones 27 de febrero                                |
| <b>1</b>                             | <b>18:02</b> | <b>53.3</b>     | <b>582 018</b>        | <b>229 391</b>        | Calle Nubes, últimas dos casas cerca escombrera 7, ruido de aves, carro y personas               |
| <b>2</b>                             | <b>18:17</b> | <b>40.8</b>     | <b>581 895</b>        | <b>230 315</b>        | Calle Nubes, finca ganadería, casas, perro ladrando fuerte a 2 m                                 |
| <b>3</b>                             | <b>18:30</b> | <b>46.9</b>     | <b>582 413</b>        | <b>230.502</b>        | Calle Nubes, lechería, viviendas a ambos lados, personas hablando                                |
| <b>4</b>                             | <b>18:45</b> | <b>74.2.</b>    | <b>583.021</b>        | <b>230 839</b>        | Intersección con Florida y Calle Nubes, casas, comercio, karaoke fuerte en Bar Las Brisas y moto |
| <b>5</b>                             | <b>19:02</b> | <b>59.4</b>     | <b>583 127</b>        | <b>230 122</b>        | Lechería y casa en terraza del R. Reventazón, ruta a Sitio Presa, ruido del río y bichos".       |
|                                      |              |                 |                       |                       | <b>Margen Derecha R. Reventazón</b><br>Mediciones 26 de febrero                                  |
| <b>6</b>                             | <b>19:20</b> | <b>49.3</b>     | <b>584.412</b>        | <b>229.638</b>        | Finca Plywood, cerca del futuro Campamento, ruido del río Reventazón                             |
| <b>7</b>                             | <b>19:50</b> | <b>56.6</b>     | <b>585 503</b>        | <b>229 261</b>        | El Coco, casa azul/blanco de Isabel González) ruido de perros ladrando y niños                   |
| <b>8</b>                             | <b>20:00</b> | <b>54.4</b>     | <b>585 823</b>        | <b>229 389</b>        | El Coco, frente a casa de Agustín Ardón ruido de perros                                          |
| <b>9</b>                             | <b>20:10</b> | <b>52.8</b>     | <b>586 016</b>        | <b>229 492</b>        | Casa izquierda en la entrada e intersección El Coco/Siquirres a 46 m de distancia                |
| <b>10</b>                            | <b>18:35</b> | <b>37.0</b>     | <b>584 471</b>        | <b>226 420</b>        | En el camino al Cubano, frente a la casa del Cubano                                              |
| <b>11</b>                            | <b>18:22</b> | <b>38.4</b>     | <b>584 330</b>        | <b>226 626</b>        | Calle del Cubano, frente a casas verdes, corral ganado                                           |
| <b>12</b>                            | <b>18:05</b> | <b>46.8</b>     | <b>583.968</b>        | <b>227 083</b>        | Calle del Cubano, frente a casa con bambú en el portón, perros ladrando                          |

Nombre Del Equipo: Sonómetro Integrador tipo 2, Fabricante: QUEST Technologies, Modelo: 2800, Número de serie: Hs 9010029 No. de activo: 227948, Normativa que cumple: ANSI S1.4 – 1983 - IEC 651 – 1979 y IEC 804 - 1985, Precisión del Sonómetro: Se considerará un error de + / - 1 ó 2 dB, Cuando se utilice instrumentos de tipo 2 como el descrito antes Nombre del equipo: Calibrador, Fabricante: QUEST Technologies Modelo: QC-10, Número de serie: QE8100294, Nombre del equipo:Filtro de bandas de octava. Fabricante: QUEST Technologies, Modelo:OB – 100, Número de serie: HW8110030

**Fuente:** Trabajo de campo, equipo utilizado GPS, colaboró personal de Seguridad Industrial, de la Dirección Administrativa Gestión Ambiente Laboral del ICE, Sabana.



De las mediciones efectuadas es importante señalar que los datos cuyos promedios arrojaron valores con rangos entre 37.0 y 74.2 dB(A) en el día y 44.0 y 66.4 dB(A) en la noche, son mediciones en forma momentánea con ruidos generados por diferentes fuentes como se describe.

Según datos del cuadro 7.6.4 y gráfico 7.6.1. en 12 sitios que se midió ruido de fondo diurno, solo el punto 9 sobrepasó el valor permisible establecido en el Cuadro 7.6.2., cuyo valor es de 65dB(A) para zona residencial y comercial; se puede concluir que la razón fue el ruido causado por los niños que estaban jugando fútbol en un patio al lado de la casa, a solo 46 m de distancia de donde se hizo la medición. El resto de datos indican un valor base de ruido más bajo de los dispuestos en el Reglamento.

Mientras que para las mediciones nocturnas, Cuadro 7.6.5. solo 3 sitios de los 12 estuvieron por debajo del valor permitido que es de 45 dB(A), los niveles sonoros se ven afectados por ruidos de diferentes fuentes en el área de medición. Al momento de hacer el monitoreo hubo varias fuentes de ruido: perros ladrando, aves, niños jugando, el ruido del río Reventazón, ruido fuerte por el viento, por ejemplo el caso cuyo valor alcanzó 74.2 dB(A) la razón fue el sonido amplificado de un karaoke del bar Las Brisas en Florida a solo 75 m del sitio de medición.

Además vale rescatar que los resultados que fueron alterados dando niveles más altos se midieron en las “aceras” de las casas del Barrio Calle Nubes, donde la población está alineada y muy cerca de la calle; las casas muy cercanas entre sí, por ser zona semirural hace que haya mucha interacción entre los vecinos lo que permite que se intercambien conversaciones entre los adultos, sonidos amplificados de radios y televisores, juegos entre los niños; y por otro lado los perros al llegar extraños salen a ladrar, todo lo anterior altera bastante las mediciones de ruido.

Como se nota en el mapa las mediciones se realizaron en poblaciones lineales por donde se espera habrá incremento de tránsito vehicular trasladando materiales hacia escombreras, según información de la Figura Vías de Acceso Caminos internos y externos a utilizar, agosto 2007, a continuación los lugares:

- Ruta a quebrada Lajas
- Ruta El Coco a la Plywood
- Ruta Sitio Presa hasta el final del Barrio Calle Nubes, pasando por Florida.

De todos los lugares, las calles a quebrada Lajas y hacia sitio presa tienen pocas viviendas, le sigue la calle denominada el Coco-Plywood con 24 viviendas y una longitud de 1.1. km hasta la escombrera 1, y por último la más poblada es la Calle Nubes con 36 viviendas (incluye fincas de recreo y casas de habitación) su longitud es de 2.9 km. Es interesante considerar que por estas calles hay un paso de vehículos despreciable, lo que haría más vulnerable la población al ruido por el paso y aumento de vehículos pesados si eventualmente las vagonetas tuvieran que transitar por esas calles, lo que es improbable porque la obras a construir estarán ubicadas en la terraza de la finca Plywood y el traslado de materiales hacia y desde los diferentes sitios se prevee sea siempre en la margen derecha, a excepción de la presa que estaría en las dos márgenes. Brevemente las más afectadas son la Calle Nubes donde también hay poca cantidad de vehículos circulando pero será el paso permanente de vehículos como automóviles, microbuses, pick ups, otros, hacia el campamento, la población de Calle Nubes será afectada si se utilizara la escombrera 7, la que se tiene solo para una eventualidad de acopio de escombros con vagonetas convencionales.

Si comparamos los niveles de ruido diurnos con los nocturnos son menores los primeros, una de las razones es porque algunas casas durante el día están solas debido a que la población sale a trabajar y a estudiar, en cambio durante la noche las personas ya han regresado al hogar a sus actividades cotidianas, el uso de radios y otros equipos con sonidos amplificados generan ruidos y alteran los niveles según los resultados que disponemos en el Cuadro 7.6.5.

#### **7.6.6 Descargas atmosféricas**

La figura 7.6.2 y figura 7.6.3, muestran la densidad de descargas atmosféricas. Este mapa se realizó para la zona donde se ubica el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón y sus alrededores, para el año 2005 y para el año 2006. Los mapas de densidad se preparan con las descargas tipo Nube – Tierra, localizadas con mayor precisión por el sistema. Se incluyen ambos años ya que la densidad se brinda en forma anual y dado que existe una variabilidad año con año se desea mostrar ambos casos. El análisis se realiza sobre rejillas cuadriculares de 10 km x 10 km (100 km<sup>2</sup>). Los flash incluyen todas las descargas o rayos que caen en un segundo en una área de 10km alrededor del mismo.

Para determinar la severidad en los rangos de densidad con los flash, se utiliza la siguiente clasificación:

| <b>Rango (flash/km<sup>2</sup>/año)</b> | <b>Severidad</b> |
|-----------------------------------------|------------------|
| 0 a 5                                   | Leve             |
| 5 a 10                                  | Moderada         |
| 10 a 15                                 | Severa           |
| Mas de 15                               | Muy severa       |

Esta clasificación es subjetiva, pero es importante para clasificar los valores de densidad. Las densidades indican que para el año 2005, en la zona donde se ubica el P.H. Reventazón, las densidades están en el rango de 0.5 flash/km<sup>2</sup>/año como se observa en la parte sur de la cuenca hasta alcanzar valores máximos de 6.0 flash/km<sup>2</sup>/año, en la parte este y noreste donde se ubica el Sitio Presa. De acuerdo a la clasificación de la densidad estas zonas se ubicarían en un rango de severidad leve a moderada.

Las densidades para el año 2006 en el P.H. Reventazón son menos intensas, estas varían entre 0.5 a 3.5 flash/km<sup>2</sup>/año, ubicando las mismas en el rango de severidad leve, como se muestra en la figura 7.6.2

**Figura 7.6.2**  
**Densidades para el año 2006 en el PH Reventazón.**

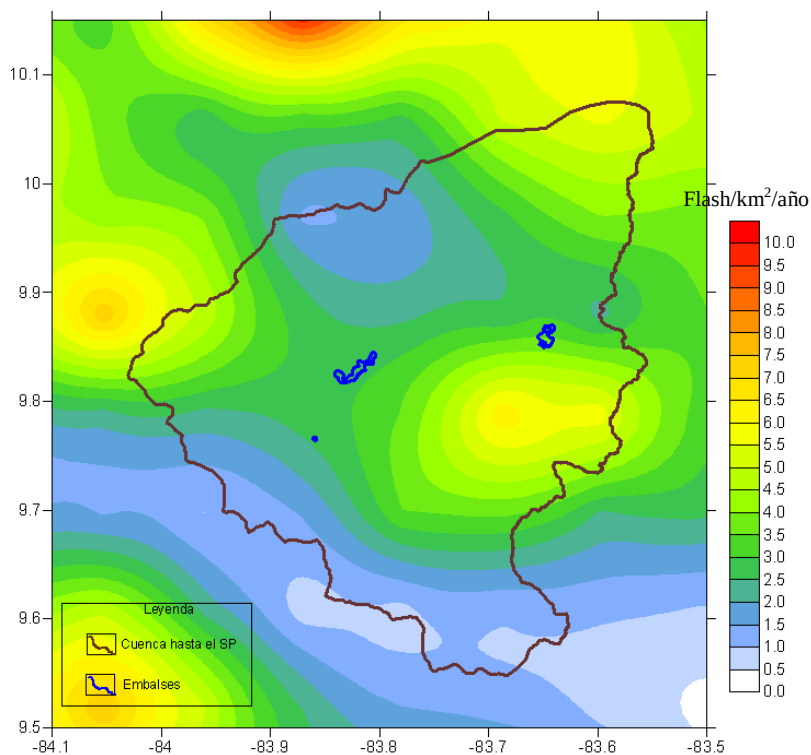
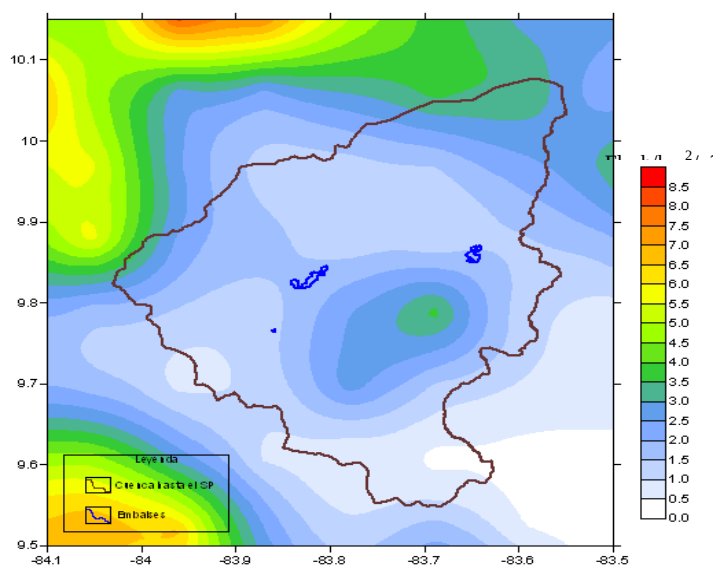


**Figura 7.6.3 Mapa de Densidad de Descargas Atmosféricas para el año 2006 en el PH Reventazón y sus alrededores.**



**Fuente:** Global Atmospherics Inc. – IMPACT ESP Advanced Lightning Direction Finder. 2000 USA

Base de Datos de Descargas Atmosféricas Instituto Costarricense de Electricidad.

## 7.7 Amenazas naturales

El presente estudio sismológico y de amenaza sísmica para el P.H. Reventazón tiene como finalidad el presentar las características sísmicas y sismo-tectónicas, tanto regionales como locales, que inciden en el proyecto, así como cuantificar su efecto, por medio de la estimación de la amenaza sísmica, la cual estará representada por diferentes niveles de intensidad sísmica (aceleración), especialmente en el sitio de presa.

El proyecto se localiza en la región de Siquirres, Provincia de Limón, la cual presenta condiciones sismológicas importantes, ya que en ella se localizan varios sistemas de fallas que han presentado actividad en tiempos recientes. Esta es una condición generalizada en el país, ya que el mismo se encuentra localizado en una zona tectónicamente activa, caracterizada por la ocurrencia periódica de eventos sísmicos de magnitud moderada ( $M < 6,5$ ). Estas condiciones adversas deben ser enfrentadas por medio del adecuado diseño sismo-resistente de las obras que involucre el proyecto.

Las obras del P.H. Reventazón consistirán principalmente de una gran presa con una elevación máxima de 275 m.s.n.m., un túnel de 2343 km de longitud, un embalse de 6,86 km<sup>2</sup> y una casa de máquinas de 3 unidades con capacidad de generar 300 MW, obras de gran envergadura que ameritan un adecuado y riguroso análisis de la amenaza sísmica, que permita un adecuado balance costo-seguridad del diseño sísmico de las obras civiles de este gran proyecto

### 7.7.1 Marco Tectónico

La condición tectónica de Costa Rica es muy compleja pues se sitúa en un borde convergente activo de placas (Figura 7.7.1.1), haciendo de ésta una región expuesta a la ocurrencia de fenómenos sísmicos y otras amenazas naturales adversas. El desarrollo de importantes caracteres geomorfológicos a través del país se debe a un sistema tectónico de esfuerzos compresivos originados por la interacción de las placas tectónicas Coco y Caribe (Figura 7.7.1.2), que definen una zona sísmica continua e inclinada hacia el NE que se denomina zona de Wadati-Benioff, y a la vez genera complejos sistemas de fallas hacia el interior del país. Estas características tectónico-geológicas determinarán, en buena medida, el régimen de sismicidad presente en la región. Otros rasgos tectónicos importantes son: la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), que separa en forma de falla transcurrente la placa del Coco con la placa de Nazca, y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), que tiene su expresión en Costa Rica en forma de fallas inversas de gran longitud, a una de las cuales se le asocia el terremoto de abril de 1991 ( $M_w$  7,7) (Montero *et al.*, 1994), así como el sistema de Guápiles-Siquirres-Matina (SGSM). Otro rasgo regional importante es la falla Longitudinal de Costa Rica (FLCR), que comprende un extenso fallamiento que se extiende desde Panamá, casi paralelo a la costa pacífica y llega casi hasta la zona de Turrubares. Se considera como una falla inversa producto del empuje de la Placa del Coco (Mora, 1979), aunque más hacia el NW presenta movimientos de tipo dextral (Arias y Denyer, 1991). López (1999) considera que con el régimen actual de esfuerzos, este sistema presenta una geometría de compresión pura.

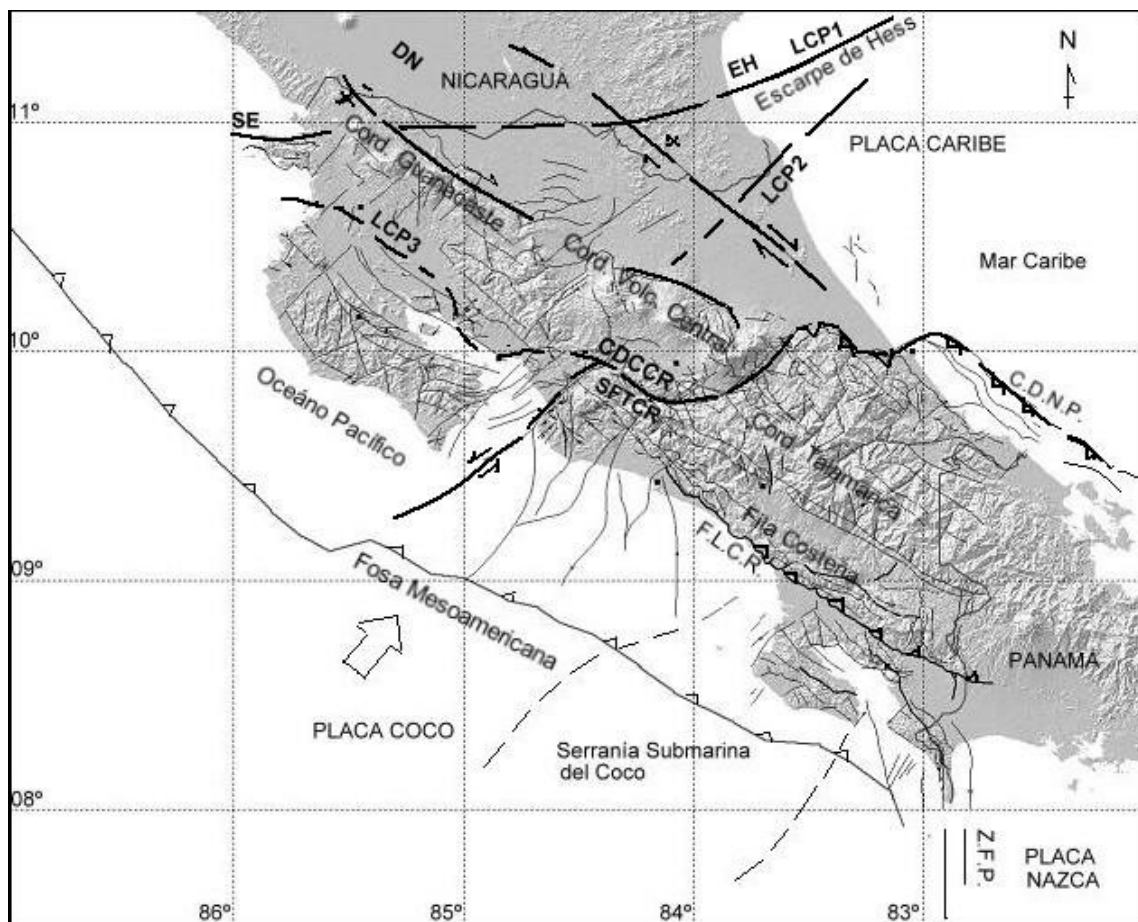
Diversos autores han delineado la existencia de una falla o estructura transversal al arco costarricense, cortándolo en su parte central (de Boer, 1979; Montero y Dewey, 1982), aunque sus evidencias eran pobres o apenas insinuantes en dichos trabajos. Posteriormente, Astorga *et al.* (1991) definen una “Zona de Falla Transcurrente de Costa Rica”, de tipo sinistral y activa desde el Eoceno Superior, que atraviesa nuestro país transversalmente basándose en: a) existencia de cuencas transtensivas (“pull-apart”), b) por tener historias geológicas diferentes: historia del relleno de la cuenca, intensidad y estilo de deformación estructural, y magmatismo, c) diferencias morfológicas, d) existencia de fallas que obedecen al sistema propuesto. Dicho sistema fue rebatido por Fernández y Pacheco (1998). Luego y como una posición intermedia entre ambas posiciones, fue propuesto una zona de deformación ancha constituida por varios sistemas de fallas con diferentes tipos de deslizamientos y que denominó “Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR)” (Montero, 2001). El mismo actuando como el límite oeste de la microplaca de Panamá con la placa Caribe. Incluye las fallas ubicadas entre el borde pacífico al este de la fosa Mesoamericana y las de la parte central del arco interno hasta que el sistema se une en el Caribe con el CDNP.

A nuestro parecer el trabajo de Astorga *et al.* (1991), adolece de no aportar las evidencias de detalle sobre la existencia de dichas cuencas transtensivas, sino que se da por sentada su existencia. Por otro lado, las historias geológicas diferentes (amén del magmatismo) podrían deberse a que se desarrollaron sobre bloques o contextos tectónicos diferentes. Por ejemplo, todavía está en discusión la ubicación del límite del bloque Chortis con el Chorotega. Mientras que la mayoría de los autores lo ponen como aquel dado por el Escarpe de Hess-Santa Elena (p.ej. Astorga *et al.*, 1991, entre otros previos), para otros el límite es más complejo y justamente podría semejarse al límite propuesto para la FTCCR, dividiendo el bloque Chortis del Chorotega en forma lineal desde el Escarpe de Hess hasta la salida del golfo de Nicoya (Burbach *et al.*, 1984) o bien como

un límite contorneado (Hauff *et al.*, 2000). La figura 7.7.1.1 muestra no solo los principales grandes rasgos estructurales neógenos, sino los tres límites propuestos para la separación de los bloques Chortis-Chorotega.

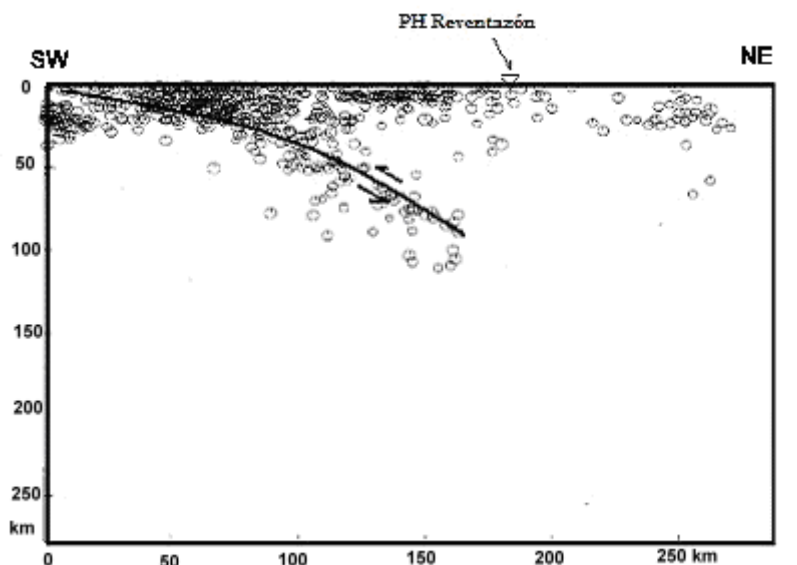
**Figura 7.7.1.1.**

**Marco tectónico regional. LPC1: Límite de Chortis propuesta 1 (p.ej. Astorga *et al.*, 1991) LPC2: Límite de Chortis propuesta 2 (p.ej. Burbach *et al.*, 1984), LPC3: Límite de Chortis propuesta 3 (p.ej. Hauff *et al.*, 2000). DN: depresión de Nicaragua, CDCCR: Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, SFTCR: Sistema de falla transversal de Costa Rica, EH: escarpe de Hess, CNDP: Cinturón Deformado del Norte de Panamá, FLCR: Falla Longitudinal de Costa Rica, ZFP: Zona de Fractura de Panamá.**



Aunque las evidencias sismológicas y de fallamiento reciente soportan una faja de deformación tal y como lo plantea Montero (2001), esto no implica que exista otra zona de difusión de esfuerzos importantes en la parte trasera del arco, tal y como se observa en la figura 7.7.1.1 mencionada. Nosotros favorecemos más la existencia de una zona de deformación-fallamiento tal y como la plantea Montero, más que una gran falla transversal al arco. En tal caso de existir dicho límite o uno parecido, más bien se debe al contacto de bloques tectónicos.

**Figura 7.7.1.2. Subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe en la región central del país.**



### Contexto tectónico regional del P.H. Reventazón

El P.H. Reventazón se ubica dentro de la cuenca del río del mismo nombre, en una región de una geología compleja, compuesta principalmente por rocas volcánicas y sedimentarias del Paleógeno y Neógeno (últimos 65 millones de años) en su mayoría, con cuerpos hipoabisales subordinados (diques, sills, stocks), localmente cubiertos por gruesos espesores de aluviones y de deslizamientos. La compleja actividad tectónica se traduce en complejos sistemas de fallas, muchos de los cuales no han sido estudiados en detalle, y en pliegues con ejes predominantes NW-SE. Lo anterior está en concordancia con la zona de deformación CDCCR. Resulta claro que durante el Mioceno Superior se dio una compresión NE-SW que generó una serie de pliegues anticlinales y sinclinales ubicados a lo largo del Reventazón (Masseta y Umaña, 1969), y que una compresión en sentido ENE-WSW incluso afectó a las lavas alcalinas del Plioceno Inferior tardío, plegándolas y basculándolas.

Una de las primeras referencias geológicas corresponde con el trabajo de Dóndoli y Torres (1954), quienes realizaron un mapa geológico de la región oriental del Valle Central. Masseta y Umaña (1969) realizaron igualmente un trabajo encomiable al confeccionar un mapa geológico con notable grado de detalle. Dentro de los trabajos geológicos del área, sobresalen los de Madrigal (1985), Sáenz (1985), Fernández (1987) y Campos (1996). En cuanto al ambiente geotectónico de detalle del área, en realidad son pocos los trabajos conocidos. Granados *et al.* (1983) hacen un resumen del ambiente estructural de la zona asociado al levantamiento de la Cordillera de Talamanca y presentan un mapa con alineamientos, pliegues y fallas. Montero (1994, 2001), Campos (1996), López (1999) y Linkimer (2003) delimitan una serie de fallas y alineamientos estructurales de interés sísmico y neotectónico.

Los sistemas principales de fallas son principalmente de tipo transcurrente con alguna componente normal o inversa y con orientaciones predominantes NW-SE y NE-SW, como por ejemplo las fallas Navarro (NE), Tucurrique, Turrialba, Atirro, Bajo Pacuare, Kabébata (NW), entre otras. Otro sistema de fallas importante, es el Sistema de Guápiles-Siquirres-Matina, el cual se extiende en la zona del Caribe de nuestro país a lo largo de la base del arco magmático y que pertenece al Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) (figura 7.7.1.3).

En este último sistema de fallas se tiene registro de actividad sísmica en 1916 y en abril de 1991 (terremoto de Limón), que por su enorme extensión, resultan importante considerarlos. La presumible continuidad de algunas de estas fallas hacia la base norte de la cordillera volcánica, y el hecho de que son potencialmente activas, pues presentan evidencias de movimiento durante el Pleistoceno Medio (0,78-0,1 Ma), e inclusive se ha registrado actividad sísmica reciente que podría estar relacionada con ellas, ameritan igualmente un apartado de estudio particular, tal y como se presentará más adelante.

En términos muy generales, en las imágenes radar y en los mapas geológicos regionales, se observa cómo claramente los ríos principales (Reventazón, Turrialba, Pejibaye, Atirro y Pacuare) delimitan dominios geomorfológicos, estructurales y geológicos, todos con historias geodinámicas complejas.

Para los principales sistemas de fallas de la región de estudio se seleccionaron mecanismos focales que fueran representativos de la tectónica local en cada caso (Cuadro 6.1). Estos se escogieron luego de revisar mecanismos de diferentes publicaciones (Barquero, 1990; Barquero y Rojas, 1992; Barquero y Rojas, 1994; Barquero y Peraldo, 1993; Barquero, 1995; Fernández, 1995, Linkimer, 2003).

#### Fallas Tucurrique-Turrialba-Atirro:

Este sistema está conformado por importantes fallas de rumbo principalmente NW-SE que ejercen un fuerte control estructural en la zona SE de Turrialba. Se reconocen 5 trazas de falla principales que son las fallas Atirro, Turrialba, Tucurrique, Campano y Azul (Montero, 2003). Estas fallas son las que más actividad han presentado en tiempos recientes, como las de noviembre de 1987 y julio de 1993, que se describen más adelante. Los mecanismos focales seleccionados para la parte sur-sureste de este sistema, muestran soluciones de tipo transcurrente dextral (figura 7.7.1.3, cuadro 7.7.1.1). Los planos más apropiados para seleccionar serían los de rumbos NW.

#### Fallas Navarro y Navarro Oriental:

La falla Navarro y Navarro NE son un sistema muy prominente que se extiende con rumbo que varía desde E-W hasta NE, desde el sur de la población de Cervantes hasta el río Bonilla, al norte de la población de Lajas. En la zona al NW de Turrialba su extensión es de 27 km, no obstante es mucho mayor hacia el SW en donde ha sido identificada en trabajos previos, al sur de la ciudad de Paraíso y a lo largo del valle de los ríos Navarro y Estrella (Linkimer, 2003). Presentan actividad sísmica que demuestran que son efectivamente fallas activas. De especial interés para el P.H. Reventazón es la Navarro NE dado que se extiende hacia la zona del proyecto. El mecanismo focal seleccionado (No. 4) muestra una solución de tipo transcurrente (figura 7.7.1.3, cuadro 7.7.1.1).

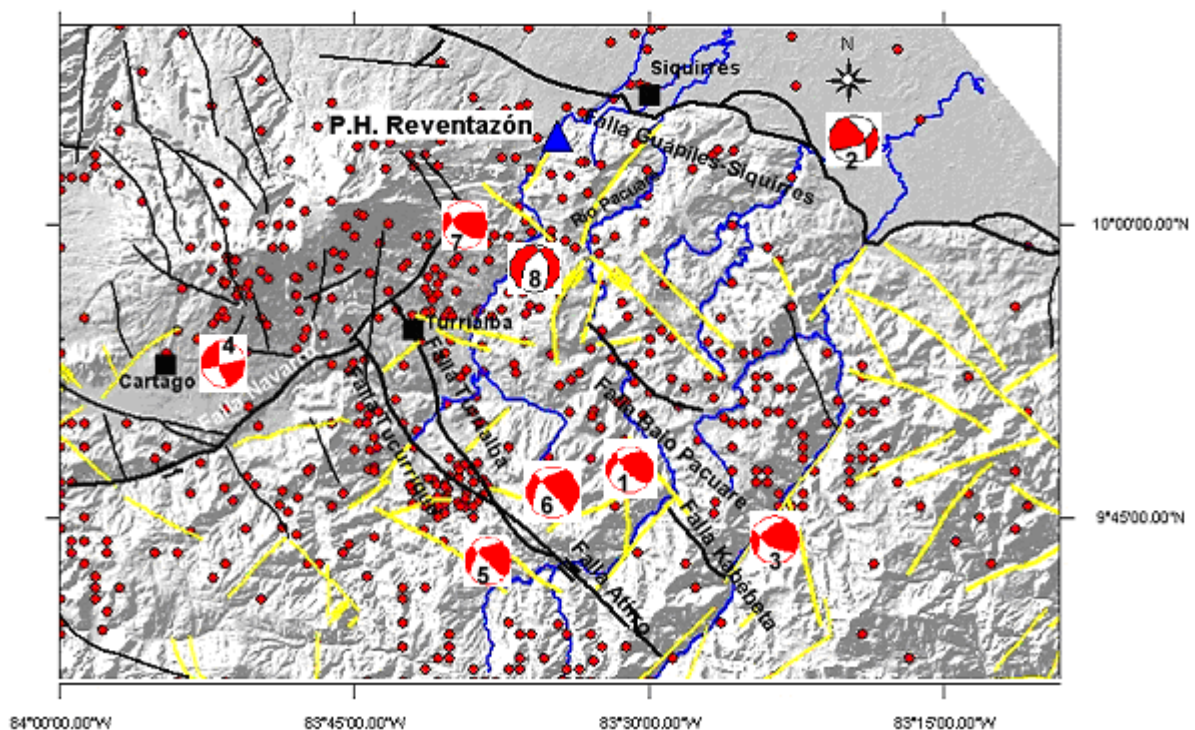
Falla Kabébete y Bajo Pacuare:

Sistema conformado por fallas de rumbo NW-SE muy prominentes (figura 7.7.1.3). La falla Kabébete se extiende por 30 km desde la Suiza hasta el río Chirripó con rumbo N50°W, es de tipo dextral. La falla Bajo Pacuare presenta un rumbo predominante N-S y NW, localizada en el río Pacuare. Es también de tipo dextral (Linkimer, 2003). Se observa cierta actividad sísmica que puede estar asociada a estas fallas, especialmente un enjambre sísmico en Pacuare en 1976 y algunos sismos en 1991, luego del terremoto de Limón. Este sistema presenta un rumbo general NW y los mecanismos focales presentan soluciones de tipo sinistral inverso (figura 7.7.1.3, cuadro 7.7.1.1).

Sistema Guápiles-Siquirres-Matina

Corresponde a una serie de fallas expresadas en forma de escarpes y pliegues antiformes, de rumbo WNW y este-oeste, que se extienden desde el sur de Guácimo hasta Matina (figura 7.7.1.3). En el sector de Siquirres está caracterizado por una falla inversa que se extiende al pie del frente montañoso (Soulas, 1989). Este sistema es considerado como extensión del Sistema de Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP). De acuerdo con el mecanismo focal seleccionado para esta fuente (No. 2, cuadro 7.7.1.1) es un fallamiento de tipo inverso con componente de rumbo sinistral.

**Figura 7.7.1.3.**  
**Marco tectónico regional, sismicidad y mecanismos focales para el P.H. Reventazón.**



**Cuadro 7.7.1.1.**  
**Mecanismos focales seleccionados por su calidad**

| No. | Fecha      | M <sub>d</sub> | Prof. km | P1   | Buz 1 | P2   | Buz 2 | Mec. Foc.                                                                           | Sistema de fallas asociado  |
|-----|------------|----------------|----------|------|-------|------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 01  | 1991-04-25 | 4,7            | 13,7     | 112° | 80°   | 217° | 34°   |  | Kabébeta-Bajo Pacuare       |
| 02  | 1991-04-27 | 5,2            | 22,0     | 74°  | 82°   | 342° | 76°   |  | Guápiles-Siquirres          |
| 03  | 1991-04-27 | 4,0            | 14,4     | 103° | 60°   | 226° | 47°   |  | Kabébeta-Bajo Pacuare       |
| 04  | 1992-11-02 | 3,6            | 7,0      | 260° | 87°   |      |       |  | Navarro                     |
| 05  | 1993-07-08 | 4,9            | 13,6     | 312° | 89°   | 221° | 45°   |  | Tucurrique-Atirro-Turrialba |
| 06  | 1993-07-10 | 5,3            | 13,2     | 219° | 88°   | 185° | 45°   |  | Tucurrique-Atirro-Turrialba |
| 07  | 1999-01-13 | 3,8            | 8,0      | 237° | 66°   |      |       |  | Norte de Turrialba          |
| 08  | 2000-09-09 | 2,9            | 15,4     | 229° | 47°   |      |       |  | Norte de Turrialba          |

### Tectónica local

Varios estudios neotectónicos a nivel local, con grados de detalle apreciables se han realizado recientemente en la zona de interés del proyecto, entre ellos los de Alvarado *et al.* (1998), López (1999), Montero (2001) y Linkimer (2003). La geología local realizada por Cervantes & Rojas (2004; y en el presente volumen) y el trabajo de Linkimer (2003) son los más detallados al respecto en lo que concierne al proyecto Reventazón. Un reconocimiento de campo adicional fue realizado para este informe, con algunas acotaciones importantes para la neotectónica. En este trabajo, realizamos un resumen de los sistemas de fallas o fallas individuales más importantes (longitud  $\geq 10$  km) del área de estudio, que tuvieran implicaciones dentro del marco de la amenaza sísmica para el proyecto. Los sistemas principales poseen claramente tres rumbos predominantes, prácticamente ortogonales entre sí, que por su tipo de fallamiento los agrupamos en tres grandes grupos (NW-SE, NE-SW; WNW-ESE), que serán descritos a continuación; dos sistemas menores (N-S; E-W) complementan la complejidad tectónica del área. Cervantes & Rojas (2004) identifica una serie de alineamientos con rumbos NE-SW y NW-SE así como a un sistema de fallas normales bien delimitadas con rumbos similares NNE-SSW (bloque caído al este) y NW-SE (bloque caído al SW) (figura 7.7.1.4).

#### Sistema dextral NW-SE:

Representados por grandes y complejos sistemas de fallas (N30-60°W) propuestas bajo los nombres de Río Blanco, Carazo, Guayacán (Montero, 1994, 2001; Alvarado *et al.*, 1998; Linkimer, 2003; Cervantes & Rojas, 2004). Muchas de estas fallas tienen claras

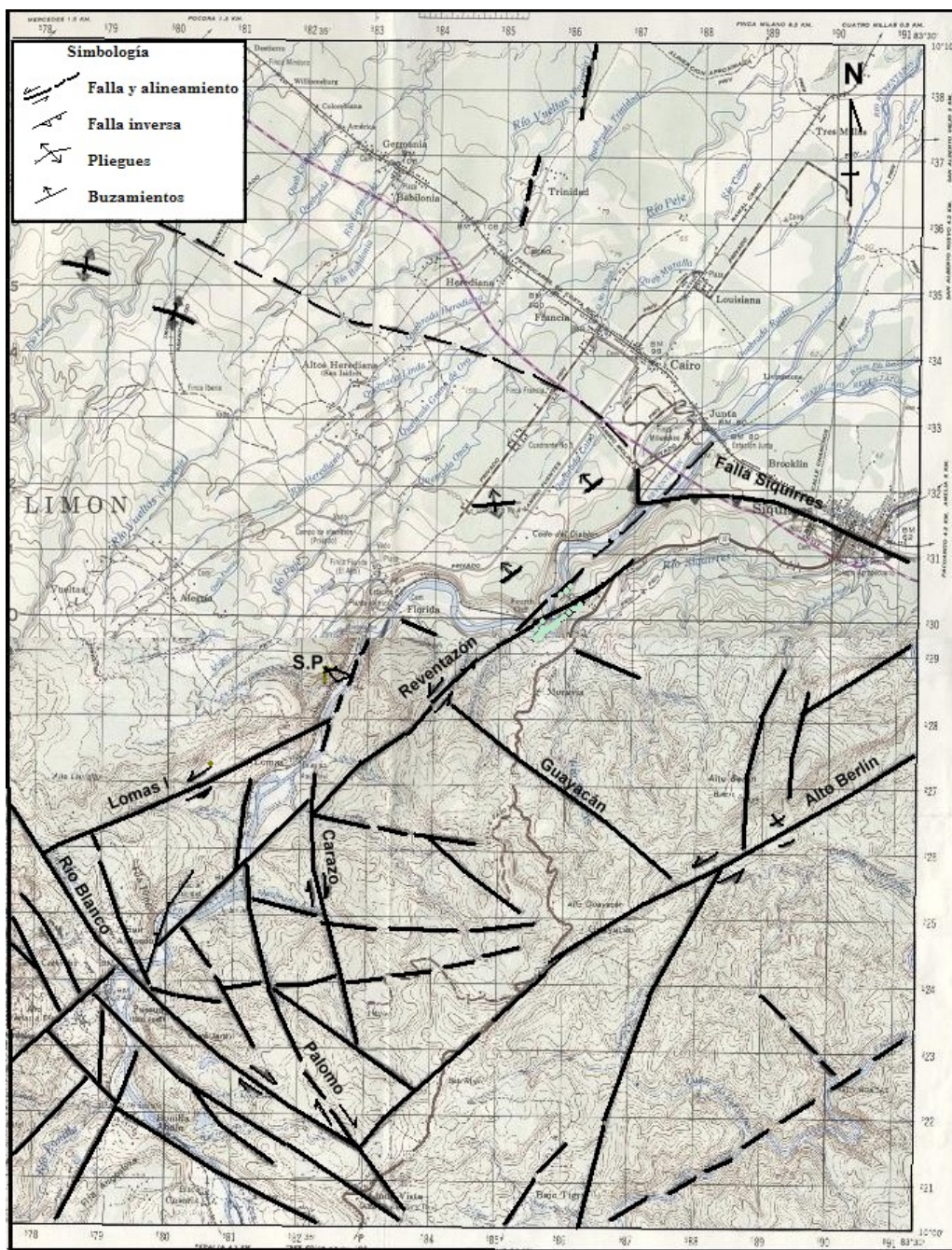
evidencias de movimientos recientes (quebradas desplazadas, terrazas aluviales levantadas, desplazamientos de sedimentos recientes) y sismicidad asociada. Estas fallas tienen potencial de generar sismos entre 5,1 y 6,0. La falla Río Blanco presenta sillars de falla desarrolladas en rocas muy alteradas y removidas (deslizamiento) por lo que es indicio de su actividad reciente. De ellas, tan solo la falla Carazo se orienta en dirección al sitio de Presa, por lo que se discutirá su importancia en un apartado posterior.

En adición a las evidencias descritas por los autores previamente citados, nuevas evidencias se encontraron, justo en el camino que conduce a los Altos de Pascua (San Isidro, 780 m.s.n.m.), en donde al cruzar la quebrada Hermosa, se observó una brecha lávica profundamente meteorizada (autobrecha? convertida en suelo), afectada por dos sistemas de fallas, el más relevante, del tipo inverso-dextral de alto ángulo (N35-50°W; 40-60°SW) y el otro de rumbo N75°E; 80°NW. Dado que dichas fallas se presentan en un antiguo campo de lavas del Turrialba, posiblemente del Pleistoceno Medio, se considera que dichas fallas son cuaternarias y potencialmente activas.

#### Sistema sinistral NE-SW:

El sistema NE-SW está conformado por fallas de tipo sinistral, con una fuerte componente inversa de bajo y alto ángulo (p. ej. fallas Lomas I, Reventazón), o normal-sinistral como la falla Lajas. El movimiento de las fallas inversas de bajo ángulo es, a grosso modo, hacia noroeste. Dichas fallas afectan con seguridad a las rocas del Mioceno (Fms. Uscari, Río Banano) y quizás aún a rocas más recientes (Plioceno Inferior), e inclusive rocas volcánicas del Pleistoceno Inferior o Medio. El sector oriental de la falla Navarro (figura 7.7.1.3) sería la continuación de este sistema de fallamiento sinistral.

**Figura 7.7.1.4. Principales fallas en las cercanías del sitio de presa del P.H. Reventazón (modif. de Cervantes & Rojas, 2004)**



Particularmente, la falla Lomas I definida por Cervantes & Rojas (2004) [no confundir con la falla Lomas de Alvarado *et al.*, 1998 y Linkimer, 2003], parece ser la continuación estructural de las fallas Guayabo y sobre todo de la falla Navarro Oriental, las cuales se consideran como activas por Montero (2004) y Linkimer (2003). Mientras que Cervantes & Rojas (2004) encuentra claras evidencias de campo (estructurales) sobre la existencia de la falla Lomas I, los estudios neotectónicos por su parte no encuentran evidencias de su continuidad y actividad reciente hacia el proyecto (Alvarado *et al.*, 1998; Montero, 2001;

Linkimer, 2003). Para la presente investigación, igualmente las evidencias fotogeológicas y sobre todo de evidencias neotectónicas fueron igualmente pobres. No obstante, en la región en donde se encuentran estas fallas, tal y como se mencionó antes, en el camino que conduce a los Altos de Pascua (San Isidro, 780 m.s.n.m.), al cruzar la quebrada Hermosa, se observó una falla (N75°E; 80°NW), que probablemente afecta a lavas del Pleistoceno Medio. Sin embargo, ni en este sector ni en el campo de lavas entre las poblaciones de la Alegría-Vueltas-Río Peje, las fotografías aéreas muestran alineamientos fotogeológicos ni escarpes menores. Claramente, unos de los mayores problemas con este fallamiento NE-SW, es que las fallas mayores mapeadas se ubican en sectores altamente inestables y sujetos a activa erosión fluvial y remoción de masas, fenómenos que pueden borrar con facilidad las evidencias paleo-sismológicas. Estas fallas tienen potencial de generar sismos  $M_w$  entre 5,3 hasta 7,0, siendo lo más probable de 6,5.

#### Sistema del frente de montaña WNW-ESE:

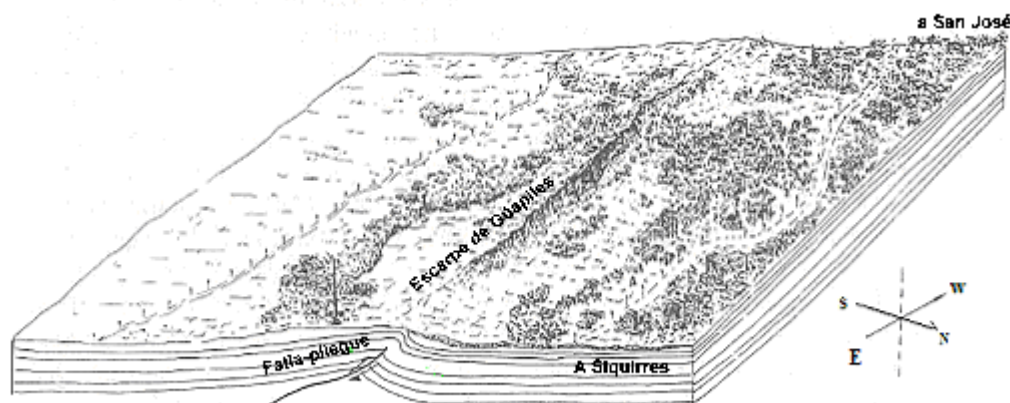
Representado localmente por las fallas Guápiles-Siquirres; aunque no poseen una continuidad comprobada entre ambas, posee un rumbo local WNW-ESE y un movimiento inverso asumido, pero nunca observado directamente en los trabajos anteriores. En el presente trabajo se encontraron evidencias contundentes de una falla inversa cerca del frente de montaña, su contexto se explicará en párrafos posteriores.

El segmento denominado falla Guápiles (E-W, 6 km), que se extiende en sentido E-W en el frente montañoso de la Cordillera Volcánica Central (Borgia *et al.*, 1990), y se extiende hacia el occidente con dirección NW-SE por varios kilómetros más (Denyer *et al.*, 2004), no ha presentado evidencias de actividad sísmica histórica o reciente. Sin embargo, entre Guápiles y Siquirres no hay claros indicios de escarpes (con excepción de un promontorio anómalo a 4 km al sur de Pocora, en el río Perla) por un espacio de casi 35 km, que vuelve a presentarse a partir de Siquirres, con una gran longitud de unos 100 km. Para este sistema se ha postulado un posible fallamiento de tipo inverso (Soulas, 1989).

El primer reconocimiento del frente de montaña de Guápiles-Siquirres como un escarpe de falla fue dado a conocer por Kesel (1985), pero fue Soulas (1989), y reproducido por Boschini (1989), quienes lo interpretan como inverso, al igual que Borgia *et al.* (1990), quien lo deduce como un pliegue-falla de propagación (cuadro 7.7.1.2). Soulas evidencia una serie de escarpes en rocas sedimentarias Neógenas y aluviones antiguos, así como cuñas de fallas que él interpretó como inversas, y que las extendió hasta más allá de Limón. Con base en ello, Boschini (1989) plantea que dicho sistema de fallas no debe de considerarse inactivo y que poseen un potencial de activación que no debe despreciarse.

En 1990, el ICE llevó a cabo una trinchera con el fin de constatar la existencia de dicha falla y eventuales movimientos recientes. Los resultados, sin embargo, fueron infructuosos. Lo anterior muy probablemente se debió a que dicha falla se trata de un pliegue falla (falla de progradación), por lo que en su parte frontal, el escarpe es el resultado del plegamiento y no representa, en el sentido estricto, un escarpe de falla (figura 7.7.1.5). Es por ello que se interpreta que al realizar la trinchera, las probabilidades de encontrar la traza de falla fueron nulas (fotografía 7.7.1.1). Cerca del escarpe de falla de Guápiles, en el río Costa Rica, se observaron fracturas con posible movimiento dextral con rumbos N10-30°E; 60-89°SE y un posible par conjugado con rumbo N5-25°W; 50-60°NE. El mismo podría interpretarse como las fallas o fracturas de relajación de la parte superior y más reciente (en brechas epiclásticas sub-recientes) del pliegue-falla propuesto.

**Figura 7.7.1.5.**  
**Modelo esquemático de fallamiento inverso (falla-pliegue) sin ruptura superficial, posiblemente como lo es el escarpe de Guápiles.**



En la margen derecha del río Reventazón, unos 300 m aguas arriba del puente principal sobre la carretera que conduce a Siquirres (587861-231532) se observa una zona de fallamiento inverso cuyo rumbo local en dicha margen (N45°E; 10°NW) corresponde posiblemente con una de las trazas de las fallas inversas proyectadas siguiendo la regla de la V, y que con gran probabilidad debe de corresponder con la falla del frente de montaña (Fotografía 7.7.1.2). Tres sistemas de estrías están presentes en el plano de falla inverso principal con una migración antihoraria de más antigua a más joven: (1) N65°E, (2) N90°E y (3) S50°W. Dicha falla se presenta entre el contacto de una unidad del Río Banano rica en cantos rodados y sin estructura (estratificación) y conglomerados inferiores de la Fm. Suretka. A unas centenas de metros de allí aguas arriba, aflora la Fm. Doán (583 533-231 351). Dicho fallamiento y otros menores asociados, no parecen afectar a los depósitos aluviales subrecientes (8-10 m espesor) sobreyacientes, al menos en dicho sector.

**Cuadro 7.7.1.2. Síntesis sobre las principales propuestas históricas de las fallas del Frente de Montaña Trasero del Arco de Costa Rica.**

| Segmento aproximado            | Nombre Local                   | Long. (km) | Tipo de falla                     | Referencia                                                  | Comentarios asociados                                                                                 |
|--------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Peñas Blancas-Upala            | Graben de Nicaragua            | 60         | Normal                            | Dengo (1962); Dóndoli <i>et al.</i> (1968)                  |                                                                                                       |
|                                | Caño Negro                     | 50         | Normal-rumbo o inverso?           | Barquero (1990)                                             | Aunque en el trabajo se prefiere la opción normal, no se excluye el inverso                           |
|                                | Caño Negro y otra indenominada | 60         | Normal e inversa, respectivamente | Denyer <i>et al.</i> (2003)                                 | Definen dos fallas, en ambas descende el bloque NE                                                    |
| Upala-Venado                   | ?                              | 30         | Inversa                           | Denyer <i>et al.</i> (2003)                                 | Desciende bloque NE                                                                                   |
| Florencia-Santa Clara          |                                | 7          | Normal                            | Bergoeing (1978)                                            | Primera vez que se cartografía                                                                        |
|                                | San Miguel                     |            | Inversa                           | Borgia <i>et al.</i> (1990)                                 |                                                                                                       |
|                                | San Miguel                     |            | Inversa                           | Soto (1999); Arroyo & Alvarado (2002)                       |                                                                                                       |
|                                | San Miguel                     | 60         | Inversa                           | Denyer <i>et al.</i> (2003)                                 |                                                                                                       |
| Santa Clara-Guápiles-Siquirres | Guápiles (Frente de Montaña)   | 6          | Normal                            | Kessel (1985)                                               | Primera vez que se cartografía                                                                        |
|                                |                                | 7-9,5      | Inversa                           | Soulas (1989); Boschini (1989); Borgia <i>et al.</i> (1990) |                                                                                                       |
|                                |                                | 50         | Inversa                           | Linkimer (2003); Denyer <i>et al.</i> (2003)                |                                                                                                       |
|                                | Frente de Montaña              |            | Inversa                           | Soulas (1989); Boschini (1989)                              | Primeros en reconocer el frente como tal con un potencial neotectónico e inclusive de no considerarlo |

|      |                                                     |       |                 |                                                                                                                  |                                          |
|------|-----------------------------------------------------|-------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|      |                                                     |       |                 |                                                                                                                  | inactivo                                 |
|      | Siquirres                                           | 40    | Inversa         | Montero (1994)                                                                                                   |                                          |
|      | -                                                   | 50-60 | Inversa         | Fernández (1997)                                                                                                 |                                          |
|      | Siquirres-Matina                                    | >125  | Inversa-dextral | Denyer <i>et al.</i> (2003)                                                                                      |                                          |
| ZDNP | Faja de fallamiento-plegamiento del Norte de Panamá | 700   |                 | Bowin (1976); Pennington (1981)                                                                                  | Primeros en definirlo                    |
|      |                                                     | >>50  |                 | Goes <i>et al.</i> (1993); Suárez <i>et al.</i> (1995); Ponce <i>et al.</i> (1994); Montero <i>et al.</i> (1994) | Le asocian el terremoto de Limón de 1991 |

Morfológicamente, el escarpe de Guápiles y su continuidad al oriente, después del río Chirripó (confluencia de los ríos General, Patria y Sucio), puede ser un pliegue simple, o inclusive hasta triple, tal y como se puede deducir de los mapas y perfiles topográficos (caso al norte de los poblados de Corinto y Flores). Dicha morfología está desarrollada en lavas cubiertas localmente por debris flows y debris avalanches (cuadro 7.7.1.3).

En el caso del segmento ubicado en Siquirres, el escarpe antiguo parece ser simple, pero se complica al observarse hasta dos y quizás tres escamas tectónicas más recientes entre los poblados de Monteverde y Veintiocho Millas (Soulas, 1989). Tal y como se mencionó antes, entre Siquirres y el escarpe de Guápiles, existe una brecha de claros indicios de escarpes por espacio de casi 35 km. Sin embargo, existe un promontorio anómalo a 4 km al sur de Pocora, que produce claros desplazamientos del río Perla de hasta un kilómetro, tanto aguas arriba como aguas abajo del citado promontorio. Dicho promontorio está constituido por depósitos fluviales del tipo debris flow y brechas de escombros de lavas. El mismo se eleva hasta 90 m sobre el nivel del río Perla y fue interpretado por Linkimer (2003) como un pliegue con rumbo N70°W. Linkimer (2003) describe otras anomalías entre el río Destierro y el Reventazón, pero son difíciles de ubicar dado que no presenta un mapa de las mismas. Probablemente, éstas corresponden con posibles pliegues y basculamientos menores observados en las fotografías aéreas por los autores y delimitados en el mapa.

Para determinar la edad de la falla, al menos en el sector de Guápiles-Siquirres, tenemos una serie de argumentos indirectos. Una lava datada por medio de Ar-Ar en el río Siquirres, muy cerca de la ciudad del mismo nombre, dio una edad de 1 Ma (datación inédita por P. Gans). De igual modo, una lava datada por medio de K-Ar en el río Costa Rica a unos 6 m de profundidad resultó ser de una edad de 450 000 años  $\pm$  100 000 años (Niewenhuyse *et al.*, 2000). Las lavas están cubiertas localmente por un gran deslizamiento volcánico (debris avalanche). La colada del río Parismina por su parte, sobreyace a un lahar sin un suelo aparente entre ellos, remontándose la edad del flujo

lahárico a unos 18 190 años  $\pm$  130 años. Dicha colada se adapta parcialmente a un relieve al parecer producto de la actividad tectónica. Finalmente, la colada de lava de río Jiménez posee una edad estimada en unos 2000 años con base en dataciones radiocarbónicas y de correlación estratigráfica (i.e. Reagan, 1987; Niewenhuyse *et al.*, 2000). Dichas coladas pueden estar perfectamente enmascarando movimientos subrecientes de dicha falla. Claramente, la edad del escarpe ha de estar entre la roca más joven que corta y las que no afecta. Dada la relativa juventud morfológica que muestra el escarpe (frente de montaña), las edades arrojadas por las dataciones radiométricas de las lavas andesíticas, y el bajo grado de alteración de los aluviones y del debris avalanche, así como su comparación relativa con otros aluviones de edad relativa conocida (i.e. Marshall *et al.*, 2003; Bullard, 1995), sugieren una edad máxima del escarpe en el sector de Siquirres y de Guápiles de unos 100 000 años o menos.

#### Cuadro 7.7.1.3.

##### Evidencias neotectónicas del Frente de Montaña entre Guápiles y Puerto Viejo (modificado de Soulas, 1989; Boschini, 1989; Denyer *et al.*, 2003).

| Tramo                                     | Evidencias morfológicas                                                                                                 | Altura escarpe (m) | Evidencias Cuaternarias y de paisaje sísmico                                         | Grado de actividad                                                                                  |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Siquirres-Guápiles-Santa Clara (40-45 km) | Frente de montaña. Escarpe de falla simple a complejo.                                                                  | 50-80              | Sedimentos aluviales elevados 50-80 m en Guápiles y posibles pliegues sub-recientes. | Moderada con sismicidad de fondo dispersa                                                           |
| Corina-Siquirres (25-30 km)               | Frente de montaña; hay dos escamas tectónicas entre Monteverde y Veintiocho Millas                                      | 100-120            | Sedimentos aluviales del Cuaternario Medio afectados                                 | Baja a mediana. Sismicidad de fondo dispersa                                                        |
| Limón-Corina (25-30 km)                   | Frente de montaña, escarpe complejo en rocas Plio-Pleistocenas                                                          | 10-50              | Arrecifes levantados unos 40 m                                                       | Posible sismo de 1953 asociado (?) y levantamiento del continente (cerca de Búfalo) de hasta 4,46 m |
| Limón-Puerto Viejo                        | Escarpe simple, cortando rocas miocénicas, y con evidencias del fallamiento por medio de geofísica y geología petrolera | 70-80              | Ninguna                                                                              | Baja a nula                                                                                         |

Fallas E-W: Se trata de fallas pequeñas ( $\leq 6$  km) con componente de un desplazamiento menor comparado con las anteriores (p. ej. falla Tigre). No hay evidencias neotectónicas descritas ni en la literatura ni encontradas durante el desarrollo de la presente investigación.

Fallas N-S: Consisten en fallas con movimientos compuestos (normal y de rumbo tanto dextral como sinistral) que igualmente afectan a rocas del Plioceno, pero con longitudes normalmente menores a 8 km. Han sido cartografiadas tanto por Alvarado *et al.* (1998); López (1999), Linkimer (2003) y Cervantes & Rojas (2004). Las evidencias morfotectónicas son en mayoría alineamientos, escarpes y contraescarpes, terrenos cenagosos, enmascarados por deslizamientos. En depósitos, al WNW de Nueva Gales (585 925-239 797, hoja Guácimo) se observaron claras micro-fallas de rumbo dextral (N10°E-N10°W; 75-85°W) con un desplazamiento horizontal muy pequeño (milímetros a centímetros). Puesto que los sedimentos fluviales no son muy antiguos, dicho fallamiento ha de ser muy reciente. En las fotografías aéreas se observa que el río Vueltas, entre Trinidad y Nueva Gales, posee dos alineamientos menores (long. <1 km) con rumbo NNE (figura 7.7.1.6), que podrían ser parte de este fallamiento de poca monta o incipiente.

#### Fotografía 7.7.1.1.

Trinchera excavada en la falla Guápiles-Siquirres en 1990. (A) detalle y (B) vista general



**Fotografía 7.7.1.2.** Evidencias del fallamiento inverso del frente de montaña en el río Reventazón.



**Fotografía 7.7.1.3.**  
**Cauces aluviales abandonados al norte de La Herediana**



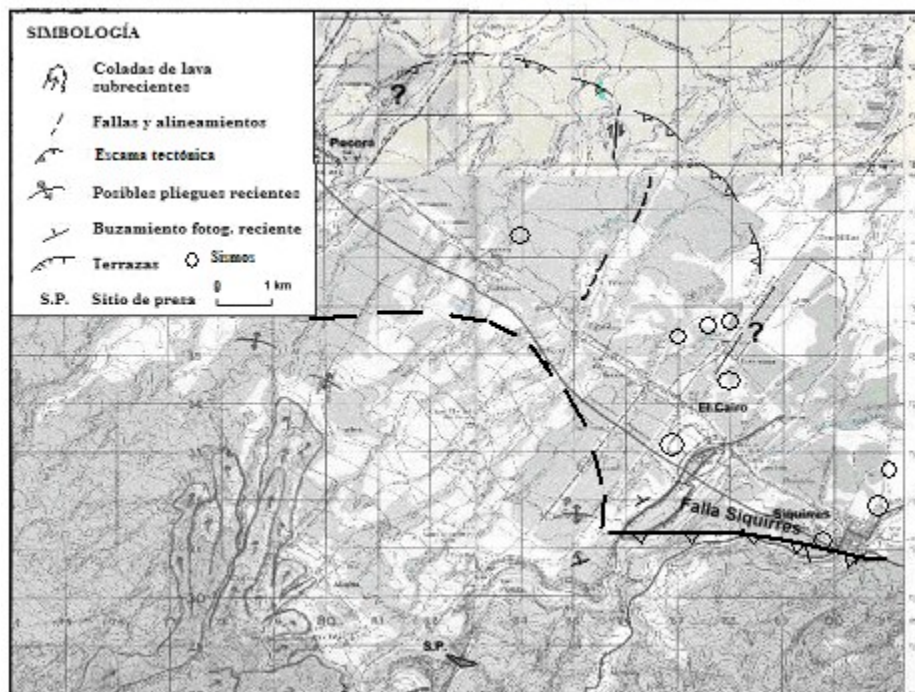
*¿Existe una escama tectónica incipiente y activa frente a El Cairo de Siquirres?*

La zona de las llanuras del Caribe (zona tras-arco) muestra cierta sismicidad superficial ( $P < 25$  km) más o menos aleatoria que no es posible asociar con precisión con algún sistema de fallamiento en particular, sobre todo porque la calidad de estos eventos, por ser pequeños y no haber buena cobertura con estaciones sismológicas, no es muy buena (Soulas, 1989; Boschini, 1989; Linkimer, 2003). El día 8 de julio de 1999 se localizó un sismo de M 3,7 en El Cairo de Siquirres, el cual fue sentido en esa zona.

Entre el sector de Cacao (a 1,5 km al NE del conocido Hotel Montana, en la Herediana), la Josefina Peje y la Hacienda Milano, se observan varios cauces abandonados afluentes de la quebrada Trinidad, y de los ríos Vueltas, Cairo, Peje, Germania, Estrella y Destierro, los cuales presentan evidencias anómalas en sus sistemas de drenaje tales como meandros encajados, rejuvenecimiento de valles, ríos entrelazados y abandonados, evidencias indirectas de un levantamiento tectónico (fotografía 7.1.1.3). Además, los sedimentos fluviales relativamente antiguos que afloran, son claramente sedimentos de grano fino a medio, típicos de llanura de inundación con subordinados de abanicos de pie de monte (debris flows). Los mismos, aunque estructuralmente horizontales, están cortados por un sistema fluvial, que ha profundizado varios metros (hasta casi 10 m), indicios de haber sufrido un rejuvenecimiento. Todas estas evidencias y la actividad sísmica mencionada, podrían indicar la presencia de fallas ciegas asociadas al sistema Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) tal y como se muestra en la figura 7.7.1.6.

**Figura 7.7.1.6.**

**Algunas evidencias de fallamiento NNE en sedimentos Cuaternarios, observadas en el campo y el trazo supuesto de una escama tectónica ciega. Se muestra además la sismicidad dispersa.**



### Sismología

En esta sección se presenta un recuento general de la sismicidad histórica y actualización de la sismicidad reciente (1985-2004) ocurrida en la zona del proyecto, su distribución y su relación con la tectónica presente en la región. Para ello se contó con los siguientes bancos de datos (cuadro 7.7.1.4).

**Cuadro 7.7.1.4.**  
**Bancos de datos sismológicos disponibles**

| Banco datos       | Periodo               |
|-------------------|-----------------------|
| Datos Históricos  | Siglos XVIII, XIX, XX |
| RSN:ICE-UCR       | 1985-2004             |
| Red PH Siquirres  | 1987-1989             |
| Red PH Reventazón | 2002-2004             |
| Linkimer (2003)   | 1992-2002             |

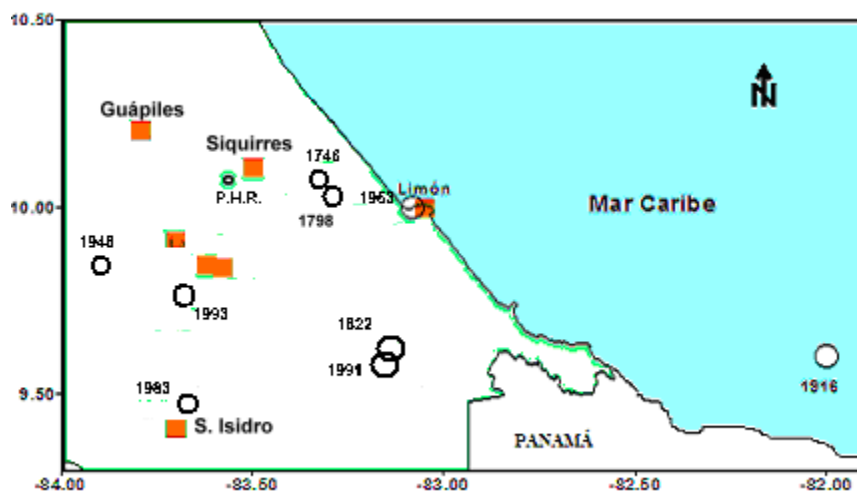
### Sismicidad histórica de eventos mayores

Durante los últimos tres siglos se contabilizan unos ocho terremotos importantes en la región Caribe (Boschini, 1989) que son los siguientes (cuadro 7.7.1.5, figura 7.7.1.7):

**Cuadro 7.7.1.5.**  
**Terremotos históricos más importantes**

| Fecha      | Lat.   | Long.  | Mag.               | Io<br>MM | Dist.<br>Km |
|------------|--------|--------|--------------------|----------|-------------|
| 05-1746    | *      | *      | *                  | VI       | 25 ?        |
| 02-1798    | *      | *      | *                  | VI       | 25 ?        |
| 07-05-1822 | 09,63° | 83,16° | M <sub>s</sub> 7,5 | VI       | 60          |
| 26-04-1916 | 09,60° | 82,00° | M <sub>s</sub> 7,3 | VI       | 175         |
| 19-11-1948 | 10,00° | 83,50° | M <sub>b</sub> 7,0 | V        | 25          |
| 07-01-1953 | 09,98° | 83,20° | M <sub>s</sub> 5,2 | V+       | 50          |
| 03-07-1983 | 09,51° | 83,67° | M <sub>s</sub> 6,2 | VI       | 70          |
| 22-04-1991 | 09,61° | 83,16° | M <sub>s</sub> 7,6 | VII      | 65          |

**Figura 7.7.1.7.**  
**Sismos históricos región Caribe**



Mayo de 1746: Montero (1989) menciona una serie de sismos de regular intensidad que afectaron la población de San Fernando de Matina. Su ubicación preliminar es cerca de Matina (Boschini, 1989).

Febrero de 1798: González (1910) menciona un enjambre de sismos en San Fernando de Matina, textualmente dice “*El gobernador Acosta comunicó el hecho al Presidente de la Audiencia el 4 de marzo, y el 29 de abril le manifiesta que con motivo de haber cesado los temblores de Matina, los vecinos no han tenido que abandonar sus haciendas y ha vuelto a quedar todo en su estado normal*”. Preliminarmente se ubicó cerca de Matina (Boschini, 1989).

Mayo 7, 1822: Terremoto de San Estanislao. Montero (1986) lo asocia probablemente a la subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe en la región de Osa, estimándose una magnitud  $M_s$  7,5 y le asigna una intensidad de VII a VIII en Matina, en donde González (1910) reporta sacudidas violentas, agrietamientos y fenómenos de licuefacción.

Abril 25, 1916: Terremoto asociado al Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP). Causó severos daños en Almirante y Bocas del Toro con intensidades de VIII y IX. En Limón y Sixaola fue muy fuerte y largo. Su magnitud fue  $M_s$  7,3. En la zona de Siquirres también se sintió (Boschini, 1989).

Noviembre 19, 1948: Temblor de profundidad intermedia (70 km) asociado a la subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe. Tuvo una magnitud  $M_s$  7,0. Se sintió muy fuerte en Turrialba y alrededores, pero sin causar daños mayores. Su ubicación es entre Cartago y Turrialba (Boschini, 1989).

Enero 7, 1953: Terremoto de magnitud  $M_s$  5,2 que se sintió muy fuerte en todo el territorio nacional. Causó severos daños en la ciudad de Limón y daños tanto en la línea férrea como en puentes y viviendas. La intensidad máxima estimada para este sismo fue de VII (MM), aunque localmente pudo alcanzar VIII en lugares como Liverpool, Moín, Cinco Millas, Sandoval y el centro de Limón. En cuanto a las posibles fuentes que originaron este sismo se citan el sistema de fallamiento inverso del frente de montaña del Caribe en la Cordillera de Talamanca, la tectónica compleja de los alrededores de la ciudad de Limón o las fallas frente a la costa Caribe, al NE de las bocas de los ríos Parismina y Pacuare (Boschini, 1989).

Julio 3, 1983: Fuerte sismo ocurrido en la zona al norte de San Isidro de Pérez Zeledón, se asocia con la falla Buenavista. Tuvo una magnitud  $M_s$  6,2 y se sintió muy fuerte en Pérez Zeledón donde se reportaron intensidades de VIII y IX (MM), en el Valle Central y aunque fue en la región pacífica de la cordillera de Talamanca, en la región Caribe se sintió muy fuerte con intensidades de VI (Barquero y Rojas, 1994).

### **Sismicidad reciente (1976-2004)**

Dentro de la zona de Turrialba-Siquirres el ICE ha realizado algunas campañas de auscultación microsísmica como fueron las de los proyectos Angostura en 1980 (Ávila, 1980), Guayabo en 1983 (Climent, 1985), Siquirres 1987-1989 (Boschini, 1989) (figura 7.7.1.8) y Reventazón 2003-2004 (presente informe). La actividad registrada durante esas campañas presenta cierta dispersión que no permite determinar con precisión posibles fallas activas. Sin embargo, algunos periodos de actividad más importante pueden coincidir con fallas ubicadas en la zona como la de Atirro y Pacuare (Climent, 1989). De la RSN se cuenta con datos del periodo 1985-2004 (figura 7.7.1.3).

Para el monitoreo de la sismicidad en la zona del P.H. Reventazón, se llevó a cabo la instalación de 4 estaciones sismológicas temporales de tres componentes, además de dos estaciones permanentes ICR (Irazú) y URSC (Urasca) de la Red Sismológica Nacional (RSN) (cuadro 7.7.1.6).

Entre mayo y noviembre de 2002 se instalaron las estaciones de Tres Equis, Atirro y Verbena y en mayo de 2003 entró en operación la estación Alegría. La red de Reventazón operó hasta el mes de julio del 2004 (cuadro 7.7.1.6 y figura 7.7.1.8). También se contó,

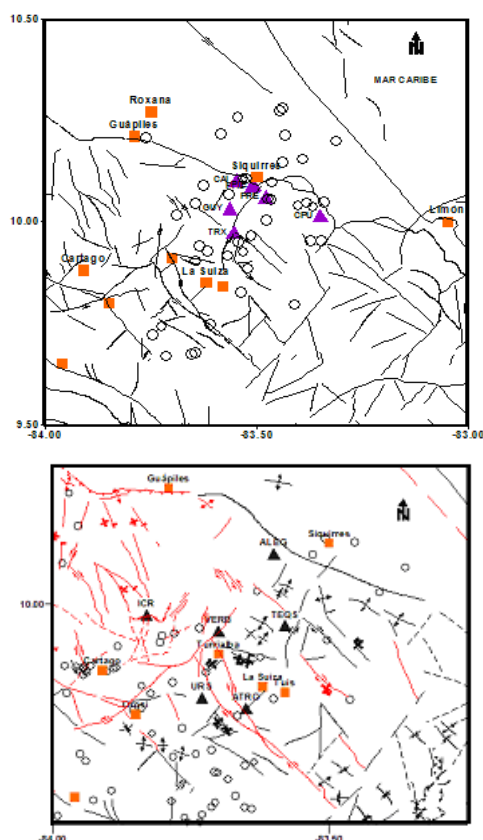
para el monitoreo sísmológico de la región Caribe, con los registros de la Red Sísmológica Nacional que van desde 1985 hasta el 2004 (figura 7.7.1.3).

**Cuadro 7.7.1.6.**  
**Estaciones de la Red Sísmológica de PH Reventazón**

| Nombre     | Código | Latitud    | Longitud   | Elevación<br>m. s.n.m. |
|------------|--------|------------|------------|------------------------|
| Tres Equis | TEQS   | 09° 57,56' | 83° 34,53' | 733                    |
| Verbena    | VERB   | 09° 56,89' | 83° 41,67' | 1177                   |
| Atirro     | ATRO   | 09° 47,94' | 83° 38,49' | 0815                   |
| Alegría    | ALGR   | 10° 05,48' | 83° 36,26' | 397                    |
| Iraza      | ICR    | 09° 58,84' | 83° 49,85' | 3305                   |
| Urasca     | URS    | 09° 50,10' | 83° 43,69' | 1500                   |

El registro de eventos sísmicos durante el periodo 2002-2004 dentro de la zona de cobertura de esta red fue desafortunadamente escaso. La mayoría de sismos localizados (80 eventos) se ubican más hacia el sur y suroeste de Turrialba y algunos pocos hacia el este y norte (figura 7.7.1.8). Esto nos indica el bajo nivel de sismicidad actual en la región donde se ubica el P.H. Reventazón.

**Figura 7.7.1.8.**  
**Red del P.H. Siquirres (1987-1989) y Red sísmológica P.H. Reventazón (2002-2004) y los sismos localizados en ambos periodos.**



## Principales secuencias sísmicas desde 1976

### Octubre de 1976

En octubre de 1976 se registró un enjambre sísmico cuyo evento mayor fue un sismo de magnitud 4,1 y profundidad < 15 km; este temblor se sintió bastante fuerte en la ciudad de Turrialba, estimándose una posible intensidad de V (MM); sin embargo, no produjo daños materiales de importancia. Entre los días 20 y 21 de marzo de 1980, la red de estaciones portátiles del ICE, ubicada en la zona de Turrialba, detectó un enjambre sísmico en la misma zona del temblor de 1976, que es en las cercanías de la falla Bajo Pacuare (Climent, 1985).

### Sismo de 1987

El 19 de noviembre de 1987 un sismo de magnitud 4,9 y una profundidad de 8,9 km, que se ubicó 20 km al sur de Turrialba. Este afectó la región de Turrialba con intensidades de V (MM); el mecanismo focal de este evento indica un desplazamiento normal de una falla con rumbo N62°W, que coincide con el de la falla Atirro (Boschini, 1987).

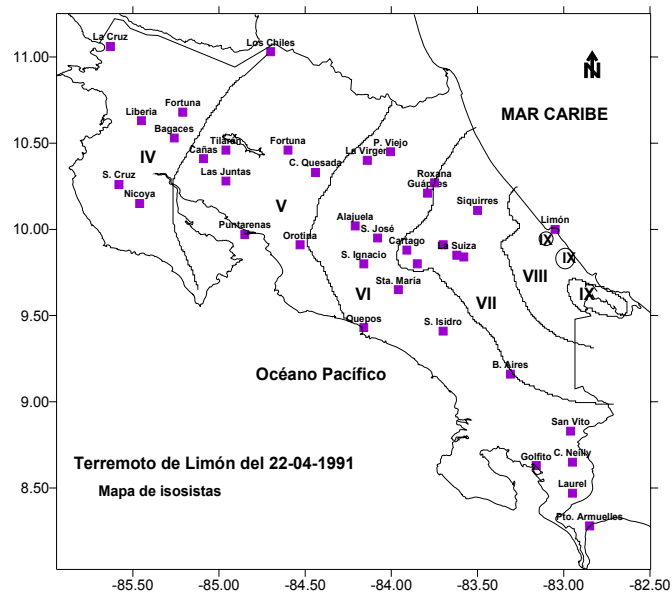
### Sismos de 1988

Durante el año 1988 ocurrieron 3 sismos importantes en la región de Turrialba, de los cuales el del 31 de enero de ese año fue el de mayor magnitud ( $M_s$  5,0), generando intensidades de V en Juan Viñas y Turrialba, sin embargo, no produjo daños importantes. Estos sismos se localizaron al SE y E de Orosi y pueden estar relacionados con la falla Navarro (Barquero y Rojas, 1989).

### Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991

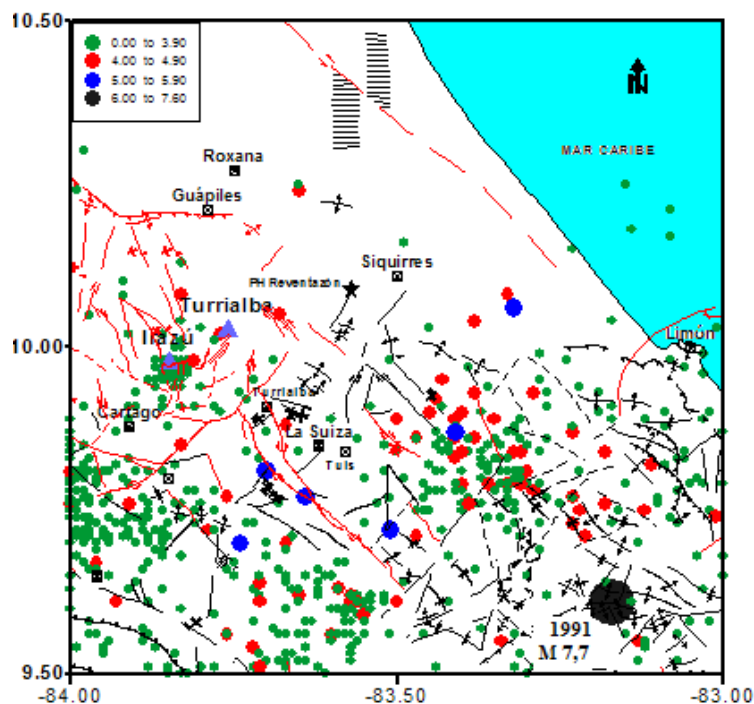
El 22 de abril de 1991, un fuerte terremoto de magnitud  $M_w$  7,7 sacudió prácticamente todo el país y parte de Panamá. Su epicentro se ubicó en el Valle de la Estrella, región Caribe, 40 km al sur de Limón, a una profundidad entre 17 y 20 km. Se estableció su origen en una falla inversa asociada al sistema de Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP). El terremoto provocó severos daños en carreteras y puentes de la provincia de Limón, así como destrucción de viviendas y edificios en la ciudad de Limón. Gran cantidad de deslizamientos de gran magnitud se observaron en las estribaciones de la cordillera de Talamanca, principalmente a lo largo de las cuencas de los ríos tales como el Chirripó, Pacuare, Estrella, Sixaola, etc. En la zona del P.H. Reventazón se estimó una intensidad (MM) de VII (figura 7.7.1.9).

**Figura 7.7.1.9.**  
**Mapa de intensidades MM del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991.**



Luego del terremoto de Limón, hubo reactivación principalmente en algunas fallas de la región sur, sur-este y sur-oeste de Turrialba con muchas réplicas y algunos eventos de magnitudes entre 4 y 5 (Barquero y Rojas (1994) (figura 7.7.1.10), pero se registraron sismos cercanos al P.H. Reventazón.

**Figura 7.7.1.10.**  
**Terremoto de Limón del 22/04/1991 y actividad sísmica asociada**



El terremoto de Limón tuvo una profundidad hipocentral de 10 km según la red mundial del NEIC y el primer reporte de la Red Sismológica Nacional, o de 24 km (20-25 km) acorde con las redes locales (Montero *et al.*, 1994; Ponce *et al.*, 1994; Suárez *et al.*, 1995). Utilizando ondas superficiales, se determinó una profundidad de entre 10 y 20 km o más precisamente a  $22 \pm 8$  km (Goes *et al.*, 1993). De dichos trabajos se desprende que la profundidad de dicho sismo no está bien establecida, variando en los trabajos entre 10 y 30 km, para un “promedio” de unos 16,5 km. Como comentario adicional, resulta interesante el señalar que si la interpretación de los perfiles de geofísica del lado caribe son correctos (i.e., Fernández *et al.*, 1994 en su fig. 2 C-C’), lo mismo que los perfiles geológicos (i.e. Rivier, 1985), entonces a una profundidad superior a los 15 km, la ruptura del terremoto de Limón debió prácticamente darse en su totalidad en las rocas ofiolíticas del basamento y en la corteza inferior. Esto igualmente trae a colación el problema que la mayoría de las personas interpretan la faja de empuje-plegamiento del Caribe como producto de un despegue (“detachment”) entre las rocas sedimentarias más antiguas y las rocas del basamento (Rivier, 1985, Fernández *et al.*, 1994), por lo que para poderlo explicar y hacerlo calzar con los perfiles geosísmicos, sería más conveniente que la profundidad hipocentral fuese a unos 10 km dentro de la corteza superior.

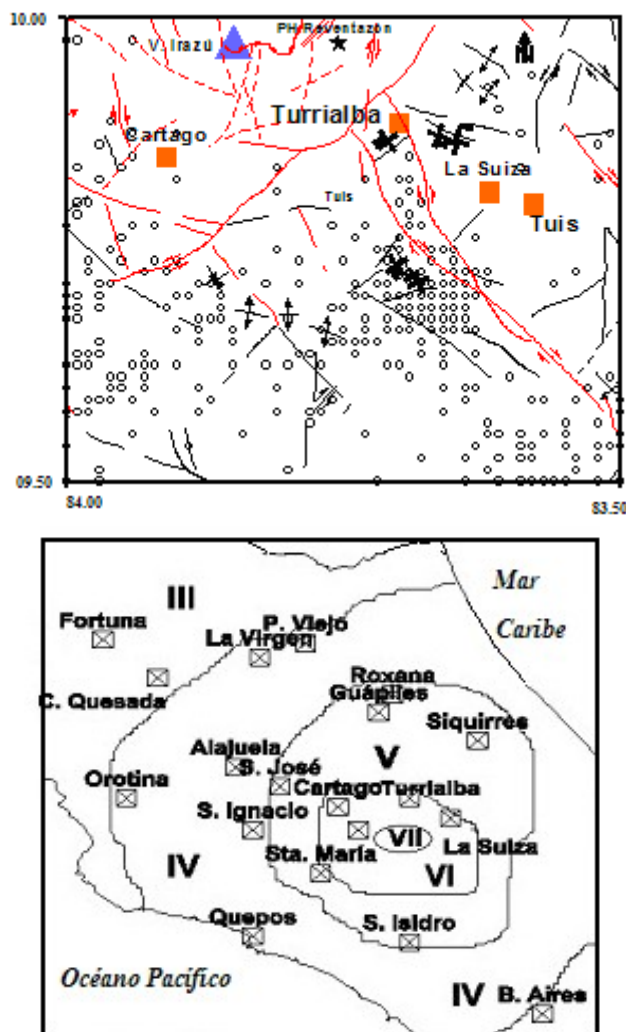
El mecanismo focal por su parte, correspondió con una falla inversa oblicua (dextral) con un buzamiento preferencial entre 15 y 25° ( $17 \pm 14^\circ$ ) según datos de Goes *et al.* (1993) y Montero *et al.* (1994). La ruptura con base en las réplicas fue de 85 x 45 km (3825 km<sup>2</sup>) y el mecanismo de ruptura fue complejo, pudiéndose identificar al menos 5 sub-eventos (Montero *et al.*, 1994; Suárez *et al.*, 1995).

#### Sismo de Pejibaye de julio 1993

La actividad sísmica de julio de 1993, se puede considerar como la más importante de la región de Turrialba después del terremoto de Limón de 1991. El día 8 de julio de 1993 se registró un primer sismo de magnitud 4,9 el cual fue localizado en la zona de Pejibaye de Turrialba. Este sismo alarmó a la población, especialmente de la zona de Turrialba, luego, el 10 de julio ocurrió en la misma zona un nuevo temblor de mayor magnitud (M 5,3) el cual se sintió en una región más amplia del país y provocó algunos daños en el área mesosísmica. Un tercer evento de M 4,8 se volvió a registrar el día 12 de julio en la misma zona (Barquero y Peraldo, 1993) y posteriormente continuaron muchas réplicas (figura 7.7.1.11). Esta actividad parece estar relacionada con el sistema de fallas Atirro-Turrialba-Tucurrique.

El temblor de Pejibaye del 10 de julio de 1993 (Barquero y Peraldo, 1993), generó daños en Pejibaye, Humo, Tuis y Turrialba. Se determinó una intensidad máxima Mercalli Modificada (MM) de VII en los poblados de Pejibaye y El Humo, en el área del P.H. Reventazón fue de V (figura 7.7.1.11).

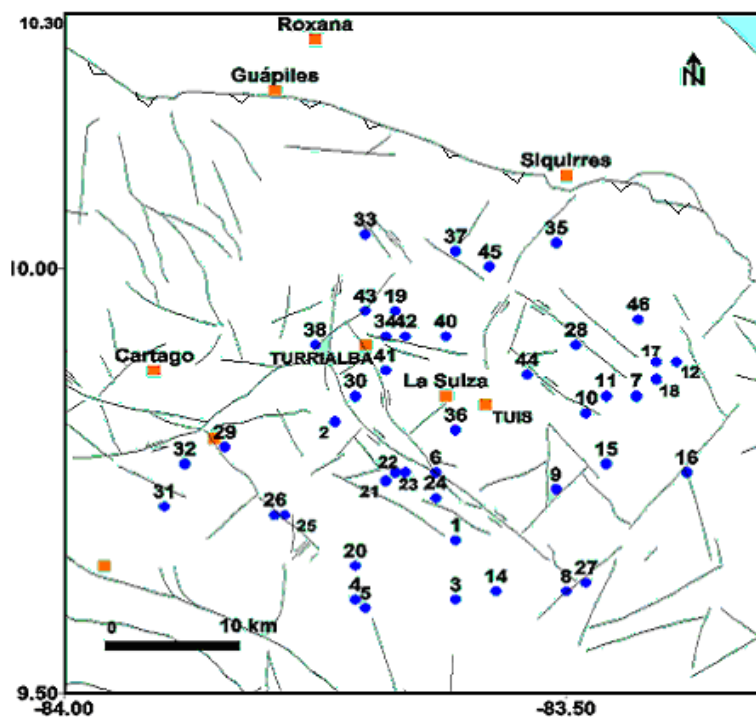
**Figura 7.7.1.11.**  
**Sismos registrados durante el año 1993 en la región de Turrialba y mapa de intensidades del sismo principal.**



#### **Sismos sentidos ubicados en la Región Caribe de Costa Rica (1985 -2004)**

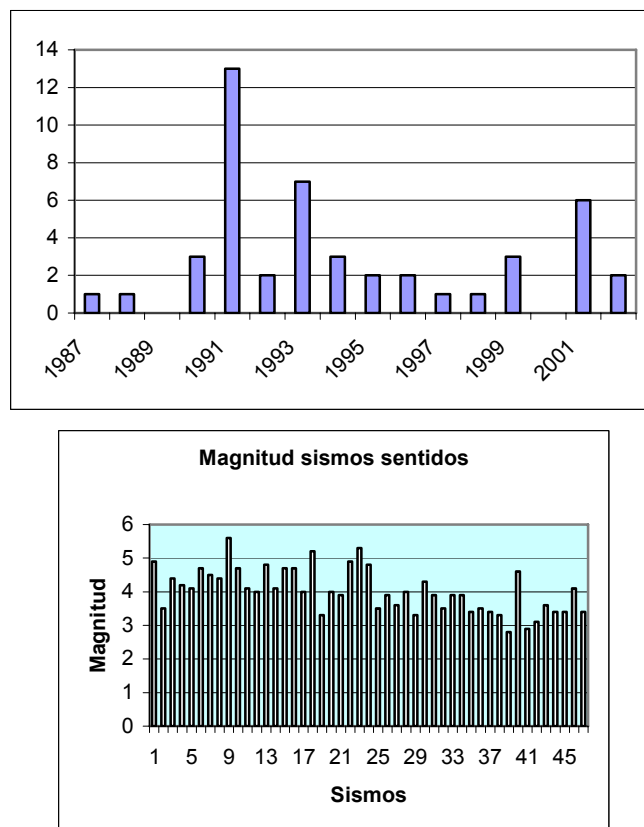
Los reportes de sismos sentidos de la RSN dan cuenta de 47 eventos de este tipo ubicados en la región de Turrialba-Siquirres (figura 7.7.1.12). Estos eventos sísmicos asociados a fallamiento local, son los más importantes de la región Caribe. Su distribución es más o menos homogénea pero dentro de un radio de unos 15-20 km alrededor de Turrialba. En la zona de las llanuras caribeñas no hay eventos.

**Figura 7.7.1.12.**  
**Sismos sentidos de la región Caribe (1987-2004).**



Las magnitudes de estos eventos son en promedio entre 3 y 4. Los eventos mayores han sido un sismo de M 5,6 ocurrido el 24 de abril de 1991, otro de M 5,2 el 10 de noviembre de 1991 ubicado en Moravia de Chirripó y el del 10 de julio de 1993 de M 5,3 en la zona de Atirro. El año que más eventos se tienen es en 1991, debido al terremoto de Limón del 22 de abril de ese año (figura 7.7.1.13).

**Figura 7.7.1.13.**  
**Gráficos de número de sismos sentidos y sus magnitudes sentidos por año**



### Consideraciones sismotectónicas para el proyecto

Con base en los estudios sismotectónicos de cierto grado de detalle (Linkimer, 2003; Montero, 2003; Cervantes & Rojas, 2004) y las mejores localizaciones de sismos obtenidas por la Red Sismológica Nacional (RSN) y redes locales (1985-2004), se trataron de definir las principales fuentes sísmicas que rigen la amenaza sísmica en la zona donde se encuentra el P.H. Reventazón

En la figura 7.7.1.3 se puede observar que en dicha zona, además de la sismicidad de fondo, se presentan nidos de sismos en varias áreas en donde se localizan sistemas de fallas importantes. Se han identificado 5 sistemas importantes relacionadas con sismicidad superficial que son: 1) Turrialba-Tucurrique-Atirro, 2) Bajo Pacuare- Kabébeta, 3) Guápiles-Siquirres-Matina, 4) Navarro-Navarro Este, y 5) el Sistema Sinestral NE-SW localizado muy cerca del proyecto. Estos sistemas están descritos dentro de los capítulos de *Tectónica Regional* y *Tectónica Local* del presente informe.

En el cuadro 7.7.1.7 se resumen algunas de las características de las principales fallas de estos sistemas y que incidirán en menor o mayor grado en el cálculo de la amenaza sísmica. De acuerdo a su potencial sísmico (extensión y grado de actividad), las evidencias neotectónicas que la soportan y a su cercanía con respecto a las obras del

proyecto, se considera que el sistema del Frente de Montaña y el NE-SW, controlan la amenaza sísmica en la zona del proyecto.

**Cuadro 7.7.1.7.**  
**Fallas importantes para la amenaza sísmica de P.H. Reventazón**

| Falla                                    | Long. (km) | Rumbo    | Tipo      | Sismo máx. Creíble | Referencias                  |
|------------------------------------------|------------|----------|-----------|--------------------|------------------------------|
| <b>Siquirres (Frente de Montaña)</b>     | 40         | N70°E    | Inversa   | 7,0                | Este informe                 |
| <b>Navarro Oriental</b>                  | 27         | N40°W    | Sinistral | 6,7                | Linkimer (2003)              |
| <b>Bajo Pacuare</b>                      | 14-28      | N10°W    | Sinistral | 6,5                | Climent <i>et al.</i> (2005) |
| <b>Turrialba</b>                         | 17         | N25°W    | Dextral   | 6,5                | Linkimer (2003)              |
| <b>Tucurrique</b>                        | 20         | N30-60°W | Dextral   | 6,6                | Idem                         |
| <b>Atirro</b>                            | 28         | N45°W    | Dextral   | 6,8                | Idem                         |
| <b>Reventazón, Lomas (sistema NE-SW)</b> |            | N50-65°W | Sinistral | 6,5                | Este informe                 |

En el caso del Frente de Montaña, cuyos segmentos individuales se han identificado con longitudes entre 25-30 y 40-45 km (cuadros 7.7.1.2 y 7.7.1.3), podemos con base en Ambraseys (1988) estimar un potencial sísmico para dicho tramo con magnitudes entre 6,5 y 7,5 (cuadro 7.7.1.8). Claramente, si la ruptura fuese mayor (p.ej., 15-20 X 100 km), la magnitud puede ser de 7,4 o inclusive tan grande como 8,1.

**Cuadro 7.7.1.8.**  
**Potencial sísmico y eventual recurrencia del Frente de Montaña**

| Longitud de la falla o segmento a romper     | Magnitud con base en la longitud de ruptura | Magnitud escogida | Recurrencia             |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Tramo Siquirres-Guápiles-Santa Clara (40 km) | 7,0-7,5                                     | 7,0               | Cientos a miles de años |
| Segmento hipotético de 100 km                | 7,4-8,1                                     | 7,5               | Miles de años           |

En el caso del sistema sinistral NE-SW, al cual pertenecen las fallas Lomas 1 y Reventazón, se les ha asociado un potencial sísmico de 6,5  $M_w$ , de acuerdo a las longitudes de las fallas y a las magnitudes máximas históricas reportadas en Costa Rica para sismos severos ocurriendo en este tipo de fallamiento.

### **Existe un fallamiento importante en el sitio de presa?**

Alvarado *et al.* (1998) proponen un alineamiento de rumbo N15°E y con una longitud aparente de unos 4 km que pasa justamente por el eje de presa, al que llaman falla Lomar (un error en vez de Lomas). Además, ponen otro alineamiento débil sin nombre en las cercanías. Los mismos, posteriormente son estudiados por Linkimer (2003) en su trabajo de tesis sobre la neotectónica de la región, en donde son denominadas fallas Carazo, Lomas (ambas forman parte del mismo sistema NNW) y la Palomo, del tipo dextral-normal y con longitudes pequeñas, inferiores a los 6,5 km. Considera Linkimer que la falla Lomas es activa, de tipo normal con el bloque occidental descendiendo con un potencial de generar un sismo 5,3  $M_w$ . Igualmente menciona evidencias neotectónicas únicamente en su extremo septentrional, mientras que el personal del proyecto Reventazón (p.ej. Cervantes & Rojas, 2004) la extiende al SSE con una extensión total de al menos 9 km. La otra falla propuesta es la Palomo (Linkimer, 2003) de unos 6,5 km de longitud y rumbo promedio de N20°W, posiblemente de tipo dextral. En tal caso, al considerar en conjunto estas fallas de rumbo N15°E-N20°W, poseen un potencial de generar sismos con magnitudes de 5,8-5,9 (Linkimer, 2003).

Las evidencias citadas por Linkimer (2003), tales como de actividad reciente (terrenos pantanosos, terrazas levantadas y basculadas, y cambios de pendiente en las mismas) son difíciles de evaluar si corresponden a la actividad de dichas fallas tan pequeñas, en particular justo en este sector del cañón, o si son producto de la complejidad tectónica justo a lo largo del río Reventazón, aunado al agresivo y cambiante medio fluvial y de inestabilidad de laderas. Sin embargo, en los estudios geológicos de detalle en el Sitio de Presa (Cervantes & Rojas, 2004) y geofísico (Leandro, 2004) no se encuentran suficientes evidencias para soportar la existencia de estos dos alineamientos propuestos. Pese a ello, Leandro (op. cit) encuentra tres zonas de baja velocidad de la onda primaria ( $V_p = 0,8-1,3$  km/s) en ambas márgenes y en el propio cauce del río, en claro contraste con las velocidades del medio circundante ( $V_p = 2,8-3,1$  km/s), en particular una hacia el propio cauce del río Reventazón y a las cuales no se ofrece explicación alguna. Por otro lado, en las perforaciones, se encontraron múltiples zonas estriadas entre las rocas incompetentes que se intercalan con las coladas de lava Pliocenas, pero que no afectan a las unidades epiclásticas más recientes (Formaciones Suretka y Doán).

Finalmente y como conclusión, en los estudios detallados llevados a cabo por los geólogos de Diseño (Valdés y Arias, com. verb., 2005), llegaron a la conclusión de que no existe ninguna falla importante que corte el eje de presa, lo cual es una conclusión muy favorable para el sitio de presa y desarrollo futuro de la obra desde el punto de vista de Amenaza Sísmica.

### **Estimación de la amenaza sísmica**

Los estudios de amenaza sísmica permiten cuantificar la sismicidad y la tectónica de una región bajo diferentes parámetros sísmicos. Los que reflejan la severidad de la posible sacudida sísmica a la cual estará expuesto un sitio en particular. Estos parámetros son utilizados generalmente para efectos de diseño sismo-resistente, así como para el análisis de la seguridad de obras civiles. Dos metodologías son utilizadas normalmente para realizar las estimaciones de amenaza sísmica: la probabilística y la determinística (ICOLD, 1989; Reiter, 1991; Mejía *et al.*, 2001), ambas fueron utilizadas en este informe,

lo cual contribuye a tener un panorama más claro y completo de la amenaza sísmica en el sitio de proyecto.

De acuerdo con el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 1989), los niveles de sacudida sísmica para los cuales una presa debe ser diseñada y evaluada, deben ser estimados con base en el Sismo Máximo de Diseño (MDE, *Maximun Design Earthquake*) y el Sismo de Operación Básico (OBE, *Operating Basis Earthquake*). En general, las presas son exigidas a soportar el MDE sin daños severos que produzcan un vaciado catastrófico del embalse. En el caso del OBE, las presas deben soportarlo con daños menores que no afecten la funcionalidad del proyecto.

El MDE normalmente es caracterizado por un nivel de sacudida sísmica, igual a la esperada en el sitio de presa de evaluar determinísticamente el Sismo Máximo Creíble (MCE, *Maximun Credible Earthquake*), que es el sismo más grande que razonablemente puede ser esperado en una fuente sísmica y estimado con base en el conocimiento actual de la geología, la sismología y la tectónica. Igualmente, el MDE puede ser determinado por el procedimiento probabilístico, entonces el evento sísmico está relacionado a un periodo de retorno muy largo, con una probabilidad del 50 % o mayor de que la intensidad sísmica no sea excedida en un periodo largo de años. Por otra lado, el OBE es significativamente menor que el MDE y puede ser determinado probabilísticamente, por ejemplo de considerar una probabilidad del 50 % que la intensidad sísmica no sea excedida en 100 años (ICOLD, 1989).

En el caso del análisis probabilístico, el ICOLD no especifica claramente los periodos de retorno que deben ser utilizados para efectos de diseño y/o revisión de la seguridad de la presa a la hora de definir el MDE, solamente recomienda que se seleccionen periodos de retorno muy largos (ICOLD, 1989; 2001; 2002). En otras normativas o guías relacionadas al tema (Mejia et al., 2001; Nelly, 2004; ACD, 1996; Amberg, et al., 2000), estos periodos de retorno se especifican de acuerdo al riesgo asociado a cada presa (potencial de consecuencias dada la falla de la presa). En el caso de aquellas clasificadas de alto riesgo, se recomienda que los periodos utilizados varíen entre los 3 000 y 10 000 años (Mejia et al., 2001). En el caso de los países europeos, aquellos que presentan un régimen de baja sismicidad por lo general recomiendan utilizar periodos de 10 000 años, tal es caso de Inglaterra, Austria y Suiza; en caso de países con mayor sismicidad como Italia o Rumania, se han utilizado 2500 y 800 años, respectivamente (Nelly, 2004). De lo anterior, se desprende que la decisión de la escogencia del periodo de retorno o probabilidad de excedencia que se escoja, con el fin de determinar las cargas sísmicas de diseño, resulta no ser una tarea sencilla. Al final, dependerá en buena medida del riesgo que se este dispuesto a tomar, con base en un adecuado balance de costo-seguridad. Por lo tanto, además de considerarse los resultados de ambas metodologías, la decisión final a la hora de seleccionar los sismos de diseño deberá ir acompañada del criterio ingenieril de los profesionales encargados del diseño o el análisis de seguridad de la presa en particular. Es opinión común en ingeniería que el incremento en la seguridad es mejor lograrlo por medio del incremento de los márgenes de diseño y redundancias, en vez de incrementar las cargas sísmicas sobre los niveles recomendados (Mejia et al., 2001)

### **Análisis probabilístico**

Esta metodología considera como elemento básico del análisis la estadística de la frecuencia de ocurrencia de los eventos sísmicos y su relación con la tectónica, la definición de fuentes sísmicas y la característica de atenuación de las ondas sísmicas en la región de interés (Cornell, 1968; McGuire, 1976; Reiter, 1991; Atkinson & Boore, 2004)

y asume que la ocurrencia de eventos sísmicos sigue el proceso de Poisson, que son independientes entre sí temporal y espacialmente, y que el modelo de recurrencia sísmica sigue la relación de Gutenberg & Richter (1954).

Para efectos de cuantificar e integrar todas las variables que participan en este tipo de análisis, se utilizó el programa NPRISK (NORSAR, 1998). Los efectos de todos los sismos en las diferentes fuentes sísmicas y con diferentes probabilidades de ocurrencia, son integrados en una curva que muestra la probabilidad de excedencia de diversos niveles de aceleración en el sitio de interés durante periodos específicos de tiempo (Reiter, 1991).

El programa utilizado permite el uso directo de la metodología de árbol de lógica para incluir el análisis probabilístico de la incertidumbre de los principales parámetros que participan en la estimación. En este caso, variabilidad de la ecuación de atenuación, magnitud máxima, profundidad focal, valor de  $b$  y la tasa de actividad sísmica.

Para efectos de la construcción del árbol de lógica, en el cual se debe incluir un valor central, un valor más alto y uno más bajo, los criterios que se siguieron se presentan en el cuadro 7.7.1.9.

**Cuadro 7.7.1.9.  
Parámetros y valores utilizados en el árbol de lógica**

| <b>Parámetro</b>                    | <b>Criterio</b>                                                                           | <b>Pesos</b>      |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $b$                                 | Valor central $\pm 0,10$                                                                  | 0,20; 0,60 y 0,20 |
| $N$                                 | Valor central dividido y multiplicado por 2                                               | 0,20; 0,60 y 0,20 |
| $M_{\text{máx}}$                    | Valor central $-0,3/+0,2$                                                                 | 0,25; 0,50 y 0,25 |
| Profundidad                         | Valor central y extremos fueron seleccionados de acuerdo a los rangos de las tablas 5 y 6 | 0,25; 0,50 y 0,25 |
| Atenuación<br>(desviación estándar) | Valor central 0,6<br>Extremos 0,5 y 0,7                                                   | 0,30; 0,40 y 0,30 |

### **Atenuación de la señal sísmica**

Para estimar la aceleración horizontal pico del terreno (sacudida sísmica), se decidió utilizar la ecuación espectral de atenuación sísmica desarrollada por Climent *et al.* (1994) para América Central (ecuación 7.1). Se consideró que esta ecuación representa adecuadamente el contexto sismo-tectónico de la región donde se encuentra localizada Costa Rica, ya que fue desarrollada con base en un banco de datos instrumental con eventos sísmicos ocurridos en la región centroamericana y con un 57 % de los mismos registrados en Costa Rica. Resultados similares son obtenidos de utilizar la ecuación general propuesta por Schmidt *et al.* (1997) para Costa Rica, aunque se obtienen valores mayores si se utiliza la ecuación obtenida para fallamiento superficial.

Es importante indicar que de acuerdo a los análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en la estimación de la amenaza sísmica, se ha notado la influencia importante que tiene la ecuación de atenuación sobre los niveles estimados de amenaza (Rojas *et al.*, 1998), de aquí la importancia de que cada región cuente con sus propias ecuaciones.

$$\ln A = -1,687 + 0,553 \cdot M_w - 0,537 \cdot \ln r - 0,00302 r + 0,327 \cdot s + \ln \varepsilon \quad (\text{ecuación 7.1})$$

La expresión (1) obtiene el valor de aceleración horizontal pico del terreno  $A$  en  $\text{m/s}^2$ ,  $M_w$  es la magnitud momento,  $r$  distancia hipocentral,  $\ln \varepsilon$  es el término relacionado con el error de estimación, y  $s$  está relacionado con el tipo específico de terreno a evaluar. En el caso de evaluar terreno firme o roca, su valor es 0, mientras que de 1 para suelo. La estimación de amenaza en este informe se realizó para condición de terreno firme o roca.

### **Banco de datos sísmológico**

Para la estimación de los parámetros que representan la sismicidad, se utilizó el banco de datos de la Red Sísmológica Nacional (RSN: ICE-UCR). Con base en éste se preparó una base de datos específica que incluyó el período 1980-2002. Se estimó que ésta base de datos está completa para eventos con magnitud mayor a 2,3  $M_w$ . La magnitud de los eventos sísmicos en la base uniformizada a magnitud momento ( $M_w$ ), la cual permite corregir problemas de saturación para magnitudes altas que presentan las demás escalas. La base también fue filtrada tanto, por software como manualmente, con el objetivo de eliminar el efecto de eventos dependientes o réplicas (en el tanto de lo posible). De la calidad del banco de datos que se utilice depende en buena medida la calidad de la estimación que se realice de los índices de sismicidad (Frohlich & Davis, 1993).

### **Definición de las fuentes sísmicas y sus características**

El análisis probabilístico fue realizado con base en una zonificación sísmica propuesta por el Área de Sismología y Vulcanología del ICE en el año 2002, para el estudio de amenaza sísmica del P.H. Boruca (Climent *et al.*, 2002) (figura 7.7.1.14). En esa zonificación se incluyen zonas o áreas fuente que representan una condición sísmica y tectónica particular. De acuerdo a ella, se definieron dos tipos de fuentes: a) superficiales y b) subducción profunda (no aparecen en la figura 7.7.14). Para cada una de las fuentes, que en total suman 15, con base en el catálogo sísmológico disponible, se asignó la sismicidad asociada con cada una de ellas (figura 7.7.15) y se calcularon los índices de sismicidad a y b y la tasa de ocurrencia anual ( $N$ ) de eventos con magnitud mayor o igual a 4,5, que fue el límite inferior escogido para el cálculo (cuadro 7.7.10 y 7.7.11) y a partir del cual la magnitud tiene interés ingenieril.

#### Zonas sísmicas superficiales

En este grupo, además de incluir las fuentes corticales superficiales (No. 3, 4, 5, 7, 8, 10 en el cuadro 7.7.1.10), a las cuales se les fijo una profundidad máxima de 25 km. Se incluyeron unas áreas fuente que mezclan la subducción somera y fuentes corticales superficiales (No. 2, 6, 9, 11, 12 en el cuadro 7.7.1.10), a las cuales se les fijó una profundidad máxima de 40 km y. De acuerdo a las condiciones antes expuestas, se delimitaron 12 zonas sísmicas, las cuales aparecen en la figura 7.7.1.14. En el cuadro 7.7.1.10 se presentan los parámetros sísmicos de cada una de ellas.

**Cuadro 7.7.1.10.**  
**Parámetros de la actividad sísmica para fuentes superficiales**

| No. Fuente | Nombre           | N<br>( $M_w \geq 4,5$ ) | Valor de<br>$b$ | Valor de<br>$a$ | Max.<br>$M_w$ | Prof.<br>(km) |
|------------|------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 1          | Z.F. Panamá      | 9,02                    | 0,87            | 4,87            | 7,7           | 5-20          |
| 2          | Osa-Golfito      | 3,13                    | 0,79            | 4,05            | 7,7           | 5-30          |
| 3          | Talamanca        | 0,91                    | 0,92            | 4,10            | 6,7           | 5-20          |
| 4          | Limón            | 2,69                    | 0,76            | 3,85            | 7,8           | 5-20          |
| 5          | Pérez Zeledón    | 2,00                    | 0,88            | 4,26            | 6,7           | 5-15          |
| 6          | Quepos           | 4,73                    | 0,93            | 4,86            | 7,5           | 5-35          |
| 7          | N. Valle Central | 0,47                    | 0,87            | 3,59            | 7,0           | 5-15          |
| 8          | S. Valle central | 1,40                    | 0,85            | 3,97            | 6,5           | 5-15          |
| 9          | G. Nicoya        | 1,74                    | 0,80            | 3,84            | 7,5           | 5-30          |
| 10         | Guanacaste       | 0,97                    | 0,91            | 4,08            | 7,0           | 5-20          |
| 11         | Nicoya           | 3,05                    | 0,83            | 4,22            | 7,9           | 5-35          |
| 12         | Papagayo         | 4,52                    | 0,89            | 4,66            | 7,7           | 5-35          |

**Figura 7.7.1.14.**  
**Mapa de zonas sísmicas corticales sugeridas para Costa Rica**

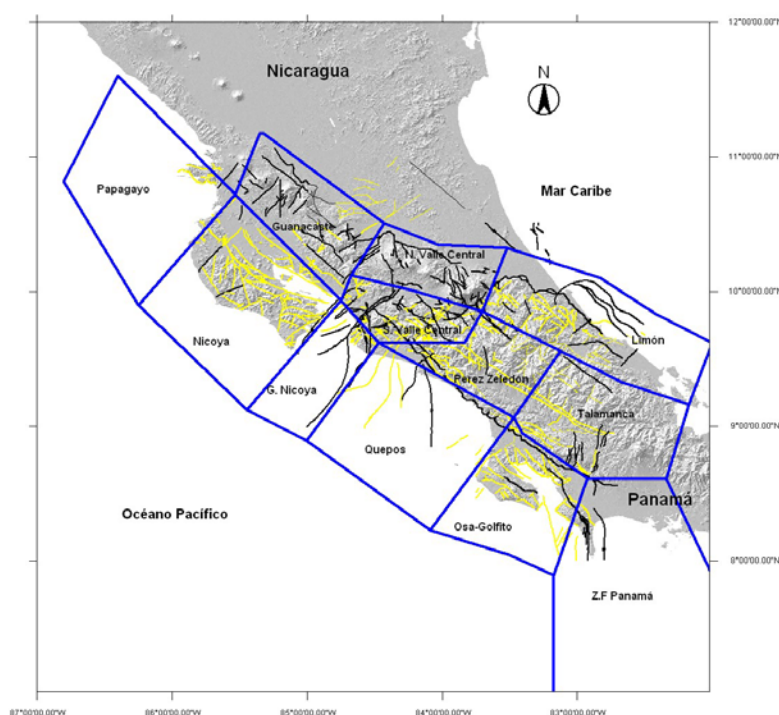
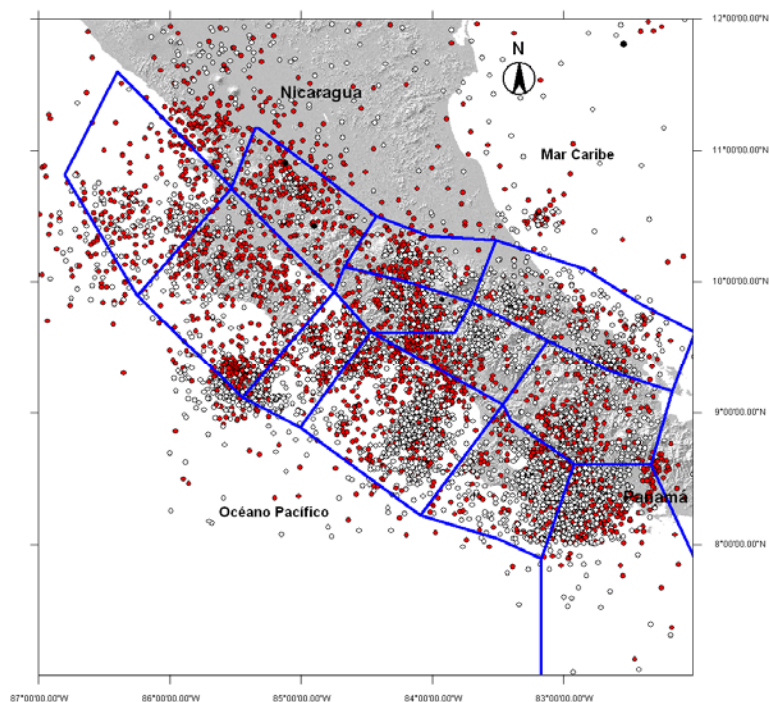


**Figura 7.7.1.15.**  
**Sismicidad de Costa Rica ( $M \geq 3,5$ ) para el periodo 1985-2001**



**Zonas sísmicas relacionadas a la subducción profunda**

Las zonas sísmicas asociadas con la subducción profunda presentan un comportamiento de generación de sismos un poco diferente al de la subducción superficial, que obedece al choque elástico de las placas de Cocos y Caribe. En este caso y en forma general se definieron tres grandes fuentes, las cuales están delimitadas por diferentes profundidades y espacialmente por la distribución de la sismicidad: a) fuente con profundidad entre 40 y 70 km, b) entre 70 y 110 km y c) entre 110 y 200 km. En el cuadro 7.7.1.11 se presentan los valores de los parámetros sismológicos (no se incluye figura de las mismas).

**Cuadro 7.7.1.11.**

**Parámetros de la sismicidad asociada a la subducción profunda.**

| Nº. Fuente | Nombre     | N ( $M_w \geq 4,5$ ) | Valor de b | Valor de a | Max. $M_w$ | Prof. (km) |
|------------|------------|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| 13         | Subducción | 1,40                 | 0,89       | 4,15       | 7,0        | 40-70      |
| 14         | Subducción | 0,87                 | 0,86       | 3,81       | 7,0        | 70-110     |
| 15         | Subducción | 0,98                 | 0,82       | 3,68       | 7,0        | 110-200    |

Se continúa con la numeración utilizada en el cuadro 7.7.1.10.

### Resultados del análisis

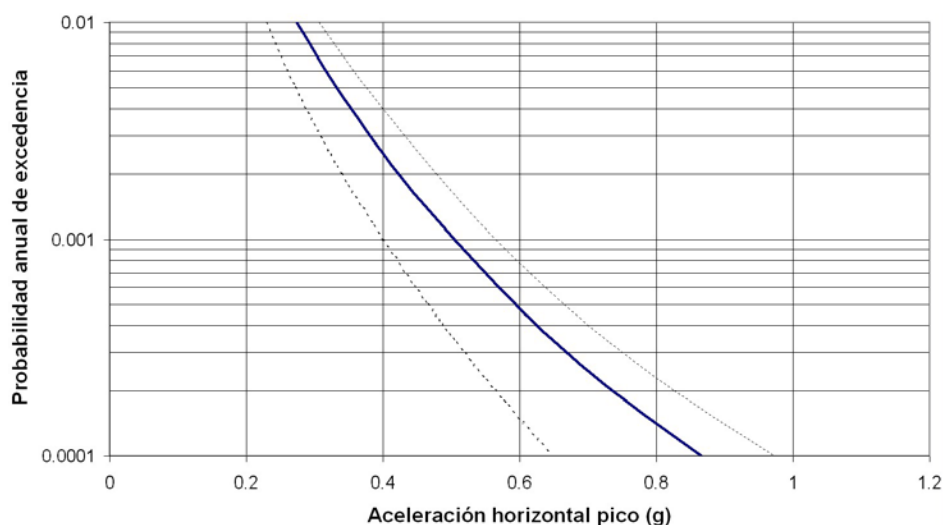
La amenaza sísmica probabilística fue estimada, en función de la aceleración pico del terreno (condición local de roca), para un punto correspondiente a las coordenadas donde se ubica el sitio de presa del P.H. Reventazón y generó como resultado relaciones entre niveles de aceleración horizontal pico del terreno (roca) y la probabilidad de excedencia asociada. Los resultados son para condición de sitio en roca o suelo firme, y probabilidades de excedencia que corresponden a periodos de retorno de 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 5 000 y 10 000 años. Estos resultados se muestran en el cuadro 7.7.1.10 el cual incluye valores de probabilidad de excedencia para diferentes valores de vida útil de las obras, y en la figura 7.7.1.16 se muestran en forma gráfica por medio de la curva de amenaza para aceleración pico (en  $\text{cm/s}^2$ ) incluyendo los límites para  $\pm$  una desviación estándar ( $\sigma$ ). En aquellos casos que se requiera obtener el valor en suelo, los valores del cuadro 7.7.1.12 deben ser multiplicados por 1,39 (Laporte *et al.*, 1994).

**Cuadro 7.7.1.12.**

#### Resultados de la amenaza sísmica probabilística para el P.H. Reventazón

| Probabilidad anual de Excedencia | Periodo de retorno (años) | Probabilidad de excedencia en un lapso L |         |         |          |          | Aceleración Pico % g |
|----------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------------------|
|                                  |                           | 30 años                                  | 50 años | 75 años | 100 años | 150 años |                      |
| 0,010                            | 100                       | 0,260                                    | 0,395   | 0,529   | 0,634    | 0,778    | 0,27                 |
| 0,005                            | 200                       | 0,139                                    | 0,222   | 0,313   | 0,394    | 0,528    | 0,33                 |
| 0,002                            | 500                       | 0,058                                    | 0,095   | 0,139   | 0,181    | 0,259    | 0,42                 |
| 0,001                            | 1000                      | 0,029                                    | 0,049   | 0,072   | 0,095    | 0,139    | 0,50                 |
| 0,0005                           | 2000                      | 0,015                                    | 0,025   | 0,037   | 0,049    | 0,072    | 0,59                 |
| 0,00033                          | 3000                      | 0,094                                    | 0,016   | 0,024   | 0,032    | 0,048    | 0,65                 |
| 0,0002                           | 5000                      | 0,006                                    | 0,010   | 0,015   | 0,020    | 0,030    | 0,74                 |
| 0,0001                           | 10000                     | 0,003                                    | 0,005   | 0,007   | 0,010    | 0,015    | 0,87                 |

**Figura 7.7.1.16.**  
**Curva de amenaza sísmica de aceleración horizontal pico estimada ( $\pm\sigma$ ) en el sitio de presa del P.H. Reventazón**



### Espectros de respuesta

Además del cálculo de valores de aceleración horizontal pico, se obtuvo el espectro de respuesta de amenaza uniforme para el sitio donde se ubica la presa del proyecto (figura 7.7.1.17). Para los cálculos se utilizó la atenuación espectral de atenuación para valores de pseudo-velocidad de Climent *et al.* (1994). En la figura 7.7.1.18 se presenta el espectro normalizado con respecto a la aceleración pico del terreno, y en el cual se puede observar mejor la forma espectral de los eventos sísmicos (diferentes distancias y magnitudes) que ocurren en el área centroamericana.

**Figura 7.7.1.17.**  
**Espectros absolutos de respuesta de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno en el sitio de presa del P.H. Reventazón**

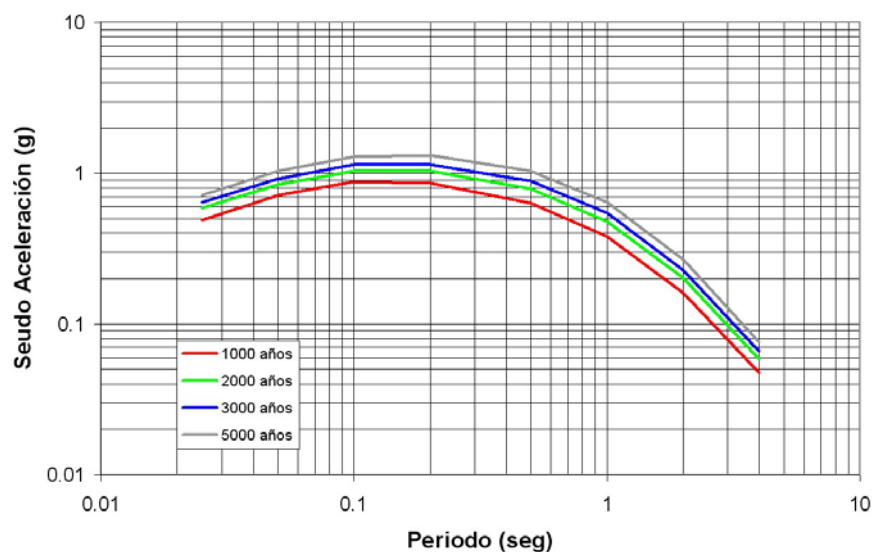
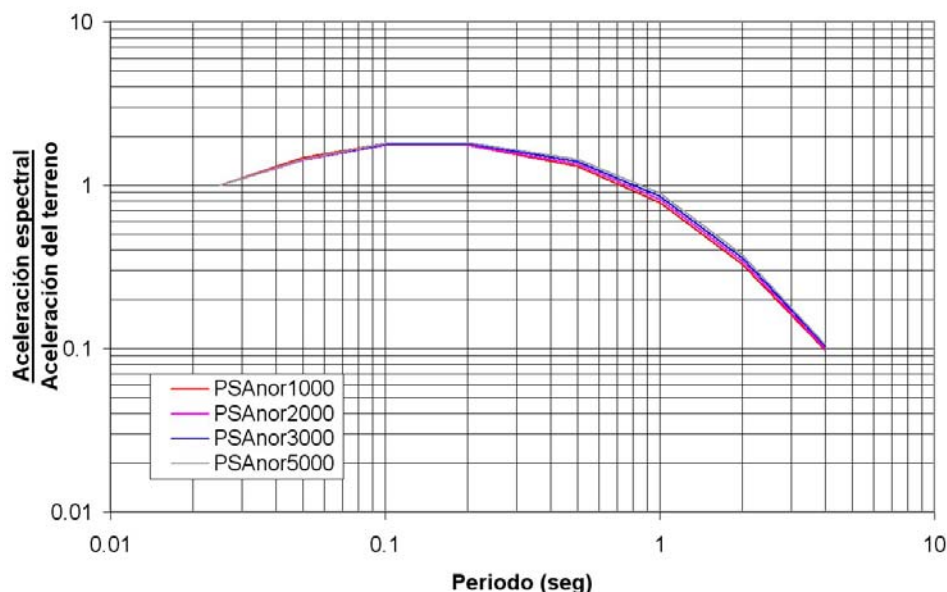


**Figura 7.7.1.18.**  
**Espectro normalizado de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno en el sitio de presa del P.H. Reventazón.**



### **Análisis determinístico**

Dicha metodología se basa en la determinación de los escenarios sísmicos que pueden afectar una región. Para establecer estos escenarios sísmicos es fundamental disponer de información procedente de estudios de neotectónica y sismicidad, que permitan definir en forma precisa las fuentes sísmicas que podrían afectar el proyecto en una forma severa. Además es necesario determinar el potencial sísmico (Sismo Máximo Creíble) de cada una de estas fuentes. Estos escenarios sísmicos, generalmente se postulan en términos de magnitud, profundidad de ocurrencia del evento y distancia entre la fuente sísmica y el sitio a evaluar.

En el caso del P.H. Reventazón, tal y como se indicó anteriormente, hay identificados una serie de fallas y rasgos estructurales de relevancia sismológica para el proyecto, tanto a nivel regional como local (figuras 7.7.1.3 y 7.7.1.4).

Al analizar cada una de estas estructuras con base en su potencial sísmico, sismicidad histórica y ubicación con respecto a las obras del proyecto, se consideró que dos de ellas estarían controlando la amenaza sísmica en la zona del proyecto: 1) El frente de montaña, relacionado con el sistema de fallas Guápiles-Siquirres-Matina y 2) el fallamiento superficial local cercano al sitio de proyecto y descrito en detalle anteriormente. En el caso de la zona de subducción, se consideró con una baja amenaza sísmica debido a la gran distancia que se encuentra con respecto al proyecto.

**Escenario sísmico en el Frente de Montaña:** De acuerdo a su morfología y evidencias de campo (cuadros 7.7.1.2 y 7.7.1.3) el frente de montaña en la zona de interés se presenta segmentado. El tramo que se extiende entre Siquirres y Matina, y conocido como falla

Siquirres, presenta un escarpe claramente observable en el campo. En el caso del tramo Guápiles-Siquirres aunque no hay claras evidencias de continuidad del escarpe, si presenta mayores evidencias de fallamiento reciente. Para efectos de plantear el escenario más adverso asociado con esta fuente, se decidió considerar que el frente de montaña tiene continuidad entre Guápiles y Matina y que el epicentro del evento sísmico se ubicaría de proyectar el mismo considerando la distancia más cercana al frente de montaña, la cual ha sido modelada como una falla inversa, y que se ha considerado en este informe, con un buzamiento similar al modelo propuesto por Ponce *et al.* (1994) para el terremoto de Limón del 22 de abril de 1990. Siendo así el evento sísmico que caracteriza a éste escenario, el mismo tendría su epicentro a 5 km del sitio de presa, una profundidad de 15 km y una magnitud de 7,0 (Sismo Máximo Creíble) de acuerdo a la estimación realizada.

Es importante indicar que no existe reportado ningún sismo histórico comprobadamente relacionado con esta falla.

Escenario sísmico en falla local en las cercanías del sitio de proyecto: Se consideró importante evaluar un sismo ocurriendo en el sistema de fallas sinistral NE-SW al cual pertenecen las fallas Lomas I y Reventazón (figura 7.7.1.4), entre otras. Este evento se modela ocurriendo a una profundidad de 10 km, el epicentro localizándose a 2 km del sitio de presa del proyecto y teniendo una magnitud de 6,5 de acuerdo al potencial sísmico descrito en las secciones anteriormente descritas.

Como se indicó anteriormente, para la estimación de los niveles de aceleración horizontal pico del terreno para cada uno de los escenarios planteados y en cada uno de los sitio seleccionados, se utilizó la ecuación Climent *et al.* (1994) Al evaluar estos escenarios, se obtuvieron los valores de aceleración horizontal pico mostradas en la cuadro 7.7.1.13.

**Cuadro 7.7.1.13.**

**Aceleración horizontal pico de acuerdo al escenario asociado a cada fuente.**

| Sitio             | Aceleración Horizontal pico (g) |
|-------------------|---------------------------------|
| Frente de Montaña | 0,41                            |
| Falla local       | 0,41                            |

De acuerdo con el cuadro 7.7.1.13, considerando la condición más adversa, en el sitio de presa del proyecto se esperaría, de acuerdo al análisis determinístico, que se presenten aceleraciones horizontales pico alrededor de 0,41 g debido a la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud 7,0 en el Frente de Montaña, o un sismo de magnitud 6,5 en el sistema de fallas Reventazón que pasan muy cerca de las obras del proyecto.

### **Sismicidad inducida**

Dadas las grandes dimensiones de la presa y el embalse que involucra este proyecto, es necesario indicar que el fenómeno de sismicidad inducida se puede presentar en la zona del embalse.

El problema de la sismicidad inducida asociada con grandes presas y embalses ha sido motivo de interés en la comunidad científica desde hace más de 30 años. En 1970 la UNESCO organizó un grupo de expertos para considerar este problema. Es así como la

ICOLD (International Commission of Large Dams) ha tratado este tema en numerosos congresos internacionales y se tiene una basta experiencia en el mismo.

Se denomina como sismicidad inducida en proyectos hidroeléctricos, aquella sismicidad que surge de manera anormal durante y después del llenado de un embalse. Su origen se asocia a varios factores como ajuste isostático por la carga de agua, cambios en la presión de poro, y condiciones de esfuerzos en estado crítico. Es una condición indispensable para que se genere sismicidad inducida la presencia de fallas activas o cercanas al límite de la ruptura. En muchos casos la actividad empieza luego del inicio del llenado del embalse y se incrementa con el aumento en el nivel del agua, la difusión de la presión de poro va a depender de la permeabilidad y la capacidad específica de la masa de roca. En otros se puede presentar varios años después y ser cíclica, según sean las propiedades locales a profundidad del medio rocoso y la tasa de permeabilidad. También el vaciado súbito del embalse puede ocasionar cambios en el patrón de sismicidad.

La frecuencia en el número de casos de sismicidad inducida por embalses en el mundo está bien documentada y se estima que existen al menos unos 66. La mayoría de estos se dan en presas con alturas mayores a los 100 m; aunque en un caso reciente en Brasil el embalse tenía apenas 36 m de profundidad, pero estaba atravesada por fallas regionales activas (ICOLD, 2004). El registro histórico mundial indica que la magnitud máxima que se ha presentado debido a sismicidad inducida es de 6,3 y en términos generales, las magnitudes más frecuentes han estado entre 4 y 5 grados. De las presas con altura mayor a los 100 m (aprox. unas 400 presas) a nivel mundial, solamente en 6 de ellas se han presentado sismos con magnitudes superiores a 5,7 (ICOLD, 2004), sismos de magnitudes frecuentes en Costa Rica y por ende, contemplados dentro del análisis de la amenaza sísmica.

La ICOLD recomienda para los proyectos con presas grandes, el reconocimiento detallado del régimen tectónico, tipos de fallamiento y estimación del estado de esfuerzos en la zona del embalse; también se deben conocer muy bien las condiciones geológicas, sismológicas e hidrogeológicas, pues estos elementos van a determinar la presencia o no de sismicidad inducida una vez que se inicie el llenado del embalse. En tal caso, el sismo máximo de diseño seleccionado para la presa es de 7,0  $M_w$ , por lo que cubriría en buena medida la magnitud máxima reportada por sismicidad inducida a nivel mundial, y que son muy normales y frecuentes en nuestro país. Otra recomendación es la instalación de una red de estaciones sismológicas que cubra los alrededores del embalse dos años antes del llenado del embalse.

### **7.7.2 Amenaza Volcánica**

#### **Marco vulcanológico general**

En el territorio nacional continental costarricense (51 100 km<sup>2</sup>) se han identificado unos 150 focos volcánicos cuaternarios entre volcanes compuestos, conos de piroclastos, cráteres, calderas, relictos volcánicos, domos de lava, escudos, etc. No obstante, solamente unos 20 volcanes poseen formas juveniles (edad menor o igual a 600 000 años) de tamaño respetable.

Los sistemas volcánicos más importantes son: Orosí – Cacao, Rincón de la Vieja – Santa María, Miravalles – Paleo Miravalles, Tenorio – Montezuma, Arenal – Chato, Platanar – Porvenir, Poás, Barva, Irazú y Turrialba. De estos volcanes, únicamente el Rincón de la Vieja, el Arenal, el Poás, el Irazú y el Turrialba han mostrado actividad explosiva en los pasados dos siglos. Desde 1723 a 2004 se han registrado unos 56 períodos eruptivos de

importancia debidamente comprobados. Sin embargo, en los últimos 11 000 años, los volcanes Miravalles, Chato, Hule y Barva también han presentado actividad eruptiva. Los volcanes Orosí, Tenorio, Platanar, Porvenir y Cacho Negro, entre otros, merecen más estudios geológicos para verificar si han tenido actividad en los últimos miles de años. Sin embargo, varios de ellos muestran aguas termales, fumarolas, volcancitos de lodo, actividad microsísmica y morfología juvenil (Alvarado, 2000).

Un total de 104 personas han fallecido por los efectos directos de la actividad volcánica y las pérdidas económicas se estiman en no menos de 100 millones de dólares desde 1963 hasta el 2001.

La gran mayoría de los grandes volcanes costarricenses son parques nacionales o áreas protegidas, lo cual ha puesto a disposición de los ciudadanos, áreas de enorme valor natural. Asimismo, muchas obras civiles e infraestructura en general, están situadas cerca de volcanes activos y “dormidos”. Por esta razón, el monitoreo y la investigación vulcanológica aplicada a la ingeniería adquieren día con día mayor relevancia.

El principal objetivo del monitoreo y estudio vulcanológico es el encontrar un sistema de alerta que permita a las instituciones de protección civil activar los mecanismos de mitigación y de prevención, para evitar la mayor cantidad de pérdidas humanas y económicas posibles. Este objetivo se concreta a través de realizar estudios de amenaza y riesgo volcánico más congruentes con la realidad geológica del sitio de interés. Para esto, en primer lugar, se debe conocer el comportamiento del volcán en el pasado, los tipos de erupciones que ha presentado y su periodicidad, pues cuanto más se conoce de un volcán, es mucho más factible el predecir su comportamiento futuro. Sin embargo, aún resta obtener mucha información, en especial de los volcanes que no han tenido actividad histórica, que son la mayoría.

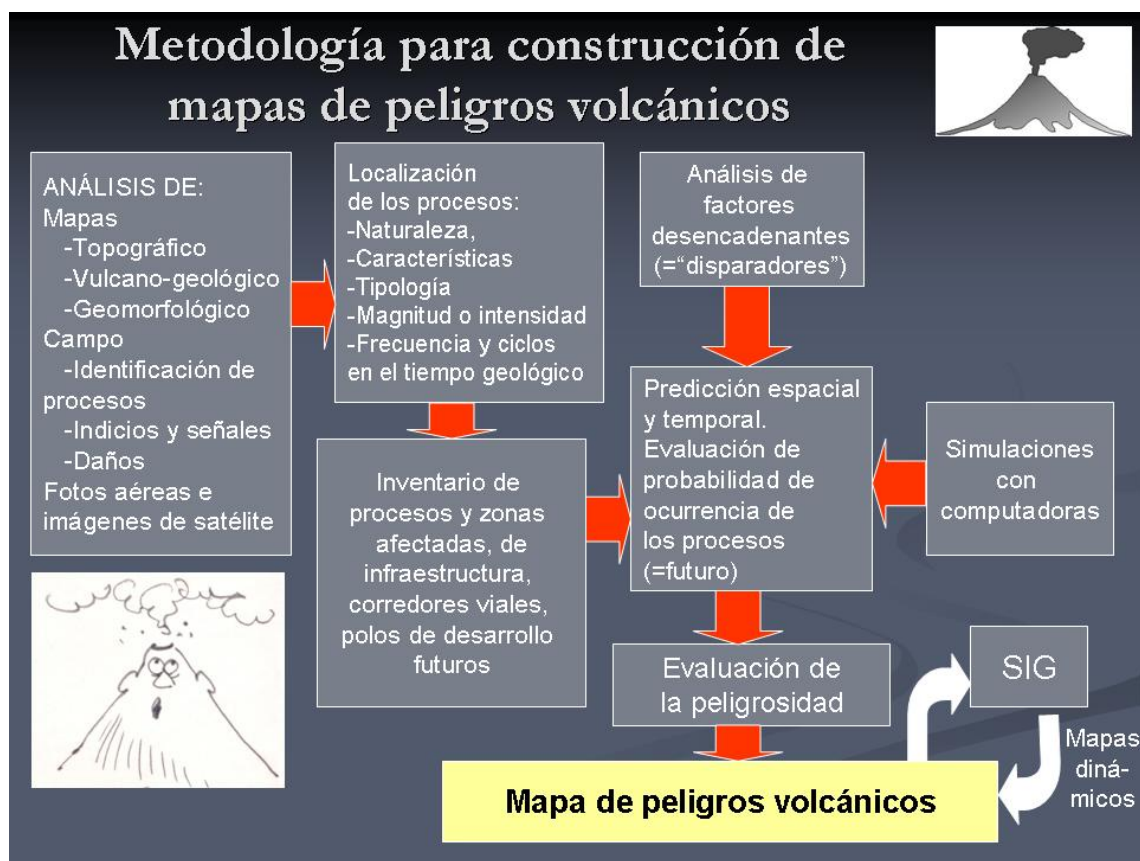
#### **7.7.2.1 Metodología**

Los estudios de peligro volcánico comprenden diferentes ramas de la geología ciencias afines (p.ej., geología de campo, geocronología, tefroestratigrafía, geoestadística, modelado computacional), por lo cual pueden llegar a ser generalizados a modo de reconocimiento o evaluación preliminar, presentándose generalmente los escenarios de máximo peligro. También pueden ser muy detallados, en los cuales no solo se presentan diferentes situaciones o escenarios y los sectores con mayor probabilidad de ser afectados ante cada tipo de peligro, sino además se incluyen recurrencia y probabilidad de erupción. Los estudios de detalle requieren de un buen soporte económico para poder realizar los trabajos necesarios que los sustenten.

Dependiendo de los grados de detalle requeridos o de los alcances esperados o de la aplicación directa en sitios muy cercanos al aparato volcánico, se pueden seguir varios pasos alternativos para el estudio y la producción de mapas detallados de peligros volcánicos, como se muestra en la figura 7.7.2.1.

Figura 7.7.2.1

**Diagrama de flujo metodológico para la construcción de mapas de peligros y el proceso de investigación. Los pasos pueden ser sustituidos o simplificados según el grado de detalle e información disponible**



Para el presente estudio se realizaron principalmente los siguientes pasos:

- 1) Identificación de los volcanes cercanos a las obras.
- 2) Recopilación de la literatura vulcanológica sobre dichos volcanes.
- 3) Búsqueda en los sitios de obras de unidades volcánicas recientes.
- 4) Establecimiento de los principales tipos de peligros, valoración de las amenazas y posibles períodos de recurrencia de los eventos explosivos y la posibilidad de que se puedan generar dentro de la vida de la obra arbitrariamente tomada como 100 años).

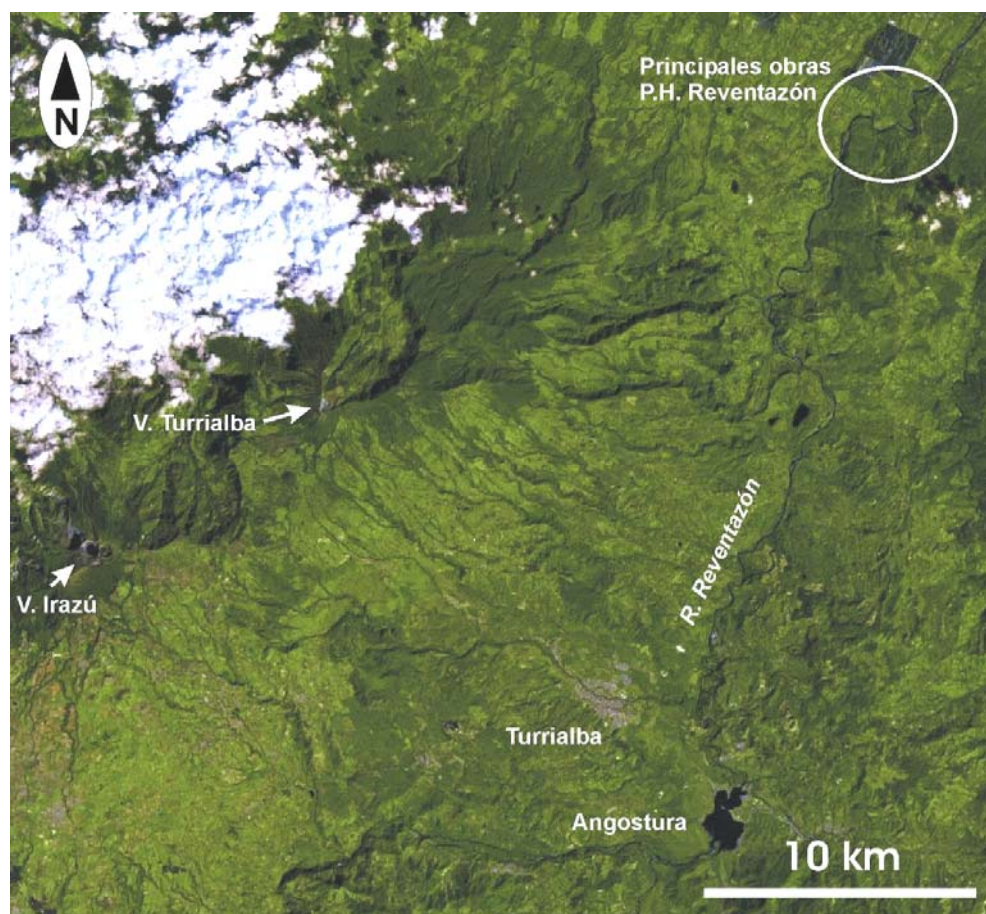
#### **Ubicación del proyecto, volcanes periféricos y antecedentes**

El Proyecto Hidroeléctrico Reventazón se ubica en la vertiente caribe, cuenca media del río Reventazón, cantón de Siquirres, provincia de Limón, aprox. 8 km al suroeste de la ciudad de Siquirres. Las obras planeadas se enmarcan dentro de las coordenadas

Lambert Costa Rica Norte 578-586 E y 221-231 N (hoja Bonilla del IGN), y la presa, túnel y casa de máquinas se centran en 584E - 229N.

**Figura 7.7.2.2**

**Imagen satelital del sector más oriental de la Cordillera Volcánica Central y la cuenca media del río Reventazón, mostrando la ubicación de las principales obras del P.H. Reventazón, los volcanes Irazú y Turrialba, la ciudad de Turrialba y el embalse de Angostura.**



Los dos volcanes más cercanos al Proyecto Hidroeléctrico Reventazón son el Irazú y el Turrialba (figura 7.7.2.2). El Irazú se encuentra unos 33 km al SW del proyecto, tras el macizo del Turrialba, de modo que los peligros volcánicos asociados son mínimos, por lo que se obvian. Por otra parte, el volcán Turrialba es el edificio eruptivo históricamente activo más cerca del proyecto Reventazón (unos 23 km al WSW). Por este motivo le dedicaremos gran parte del trabajo presente, con el fin de evaluar el peligro volcánico que representa.

Estudios generales de peligro volcánico en el Turrialba han sido realizados por Paniagua & Soto (1986, 1988), Reagan (1987), Jerez & Cline (1990), Soto & Paniagua (1992), Alvarado (2006) y Reagan et al. (2006).

Dado que el lector (ingeniero, geólogo, geógrafo o ambientalista en sus diversas especialidades), suele no estar familiarizado con la terminología, antecedentes y metodología sobre estudios geovulcanológicos y de riesgo volcánico, en cada apartado se dará una serie de antecedentes y definiciones relacionadas, y ejemplificadas con casos relacionados con el área de estudio, con el fin de crear una mejor comprensión del tema.

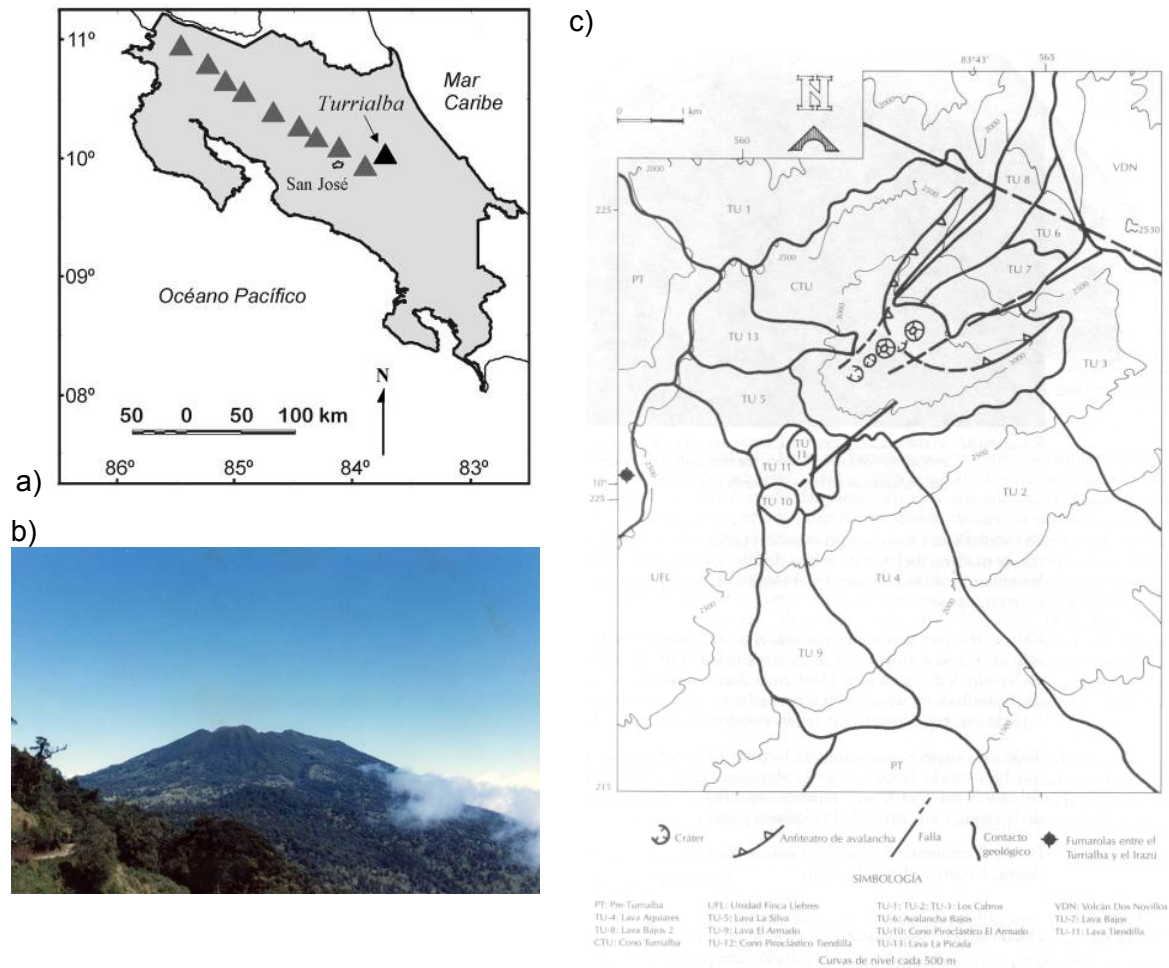
#### **7.7.2.2 Síntesis geovulcanológica del macizo del Turrialba**

##### **Aspectos generales sobre la geología del Macizo del Turrialba**

El eje volcánico de la Cordillera corre en dirección N60°W (definido por los volcanes Porvenir, Póas, Barva e Irazú), distanciado 150 km de la Fosa Mesoamericana, donde se subduce la Placa del Coco bajo la Caribe. El Turrialba, sin embargo, no forma parte de este eje, dado que se encuentra 10 km por detrás del eje volcánico, formando un segundo alineamiento de volcanes definidos por el Turrialba, Cacho Negro, Congo y Platanar. Los principales centros volcánicos de la Cordillera son de forma subcónica de amplias bases y cimas coronadas por estructuras complejas.

El volcán Turrialba (10°02'N - 83°46'W), es el más oriental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (figura 7.7.2.3a). Es un estratovolcán complejo (aprox. 3340 m s.n.m.) que comparte la misma base con el volcán Irazú, localizado 24 km al noroeste de la ciudad del mismo nombre.

**Figura 7.7.2.3: a) Ubicación regional del volcán Turrialba.  
b) Vista del volcán desde el suroeste.  
c) Geología de la parte de la cima (de Soto, 1988).**



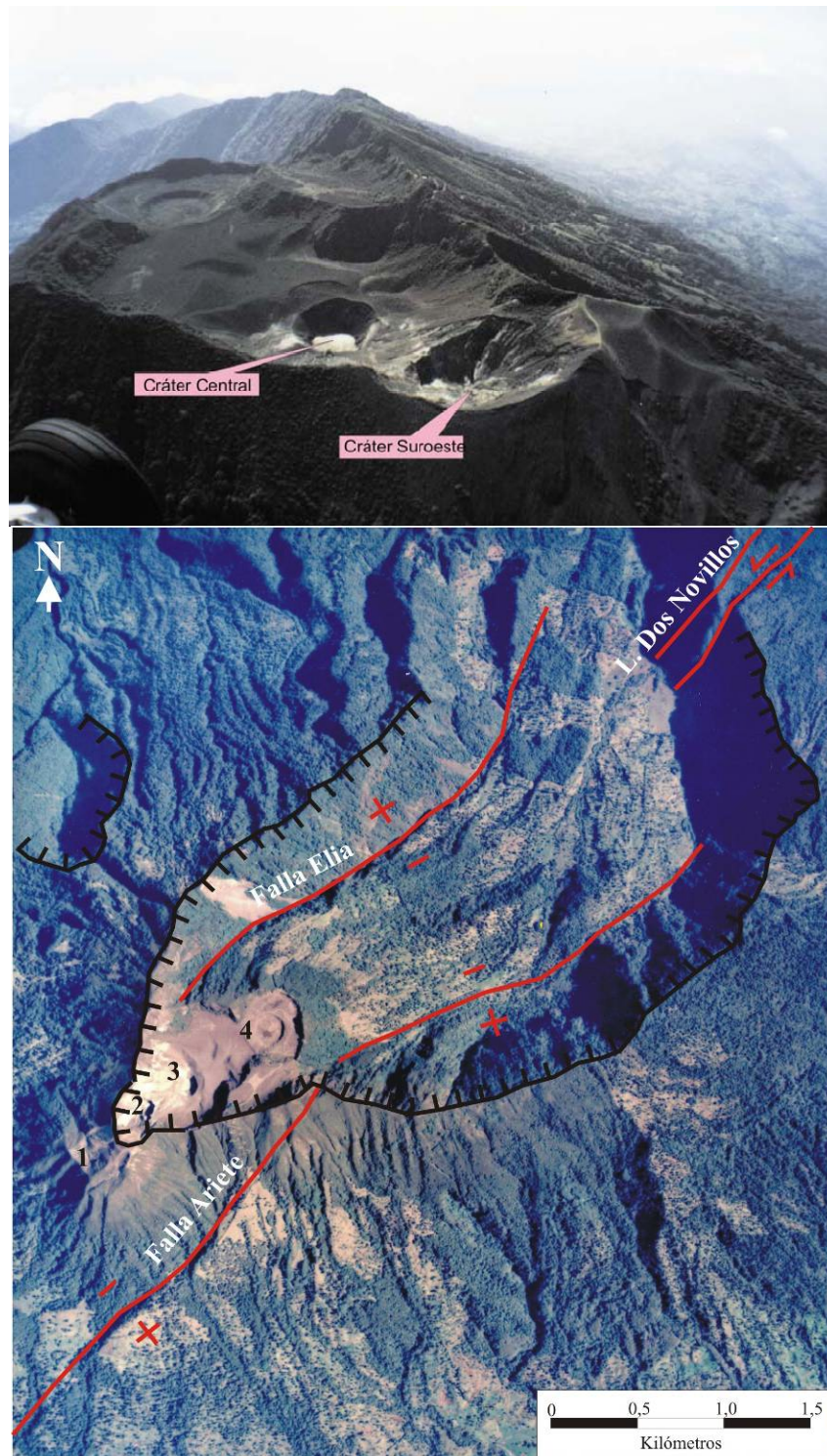
El macizo del Turrialba sobreyace a la compleja y espesa secuencia sedimentaria e ígnea deformada de la Cuenca de Limón, cuya colmatación sucedió en el Plioceno (Fernández, 1987). Durante el Pleistoceno Medio a Superior, se ha construido gran parte del edificio del Turrialba, de 1900 m de altura, 400 km<sup>2</sup> y 290 km<sup>3</sup> de volumen (Carr, 1984), coronado por el actual volcán Turrialba, cuya geología y estructura son detalladas por Soto (1988) y Reagan et al. (2006). Sobre el macizo volcánico Pre-Turrialba se instaló el estratovolcán Finca Liebres, cuyas lavas fluyeron al E y SE. Posteriormente se instala el Turrialba *sensu stricto*, cuyos productos coalescen, y en cuyo desarrollo son contemporáneas con el volcán Dos Novillos. El estratovolcán Turrialba es un cono alargado hacia el NE, con 3 km de radio máximo y 1,1 km de altura máxima en el NE, cuyas pendientes promedios son de 25° (figura 7.7.2.3b). Dos conos piroclásticos adventicios están adosados al flanco SW del cono principal: Cerros Tiendilla y El Armado (Soto, 1988).

## Estructura

Las estructuras volcánicas del Turrialba tienen una clara orientación en dirección NE, como los cráteres cuspidales (figura 7.7.2.4). Asimismo existen alineamientos morfológicos en esa dirección. La estructura cuspidal fue interpretada como una caldera (Alvarado, 1984; Paniagua, 1984), que hoy día se le llamaría, en parte, caldera de avalancha o sector sectorial de colapso. Dentro de ella hay evidencias del graben en la cúspide con paredes cortadas en ángulos de 50-70°. La instalación de los cuatro cráteres alineados confirma una zona de debilidad tensional orientada al NE. En el exterior del graben se ha cartografiado un depósito de avalancha volcánica, que se prolonga hasta por lo menos 3 km de la cima, pero que está recubierto en parte por otros depósitos del volcán Dos Novillos, hacia el norte. La avalancha (Avalancha Bajos) está sobreyacida por coladas de lava (Lavas Bajos 1 y Bajos 2). El evento de avalancha volcánica fue el producto del colapso de la pared nororiental de cono, facilitado por las zonas de debilidad del graben. Se estima un volumen de 1 km<sup>3</sup> deslizado. Posterior al evento de avalancha se ha construido de nuevo el cono en esa parte, con la eyección de las lavas mencionadas, flujos piroclásticos andesíticos y piroclastos de caída proximal. Asimismo, se reconocieron fallas normales sintéticas en piroclastos en la cima, en perfecto alineamiento con el escarpe de la Quebrada Ariete (figura 7.7.2.4). Este escarpe muestra actividad neotectónica, pues corta piroclastos (< 2000 años) y lavas recientes. Es fácilmente identificable en las fotografías aéreas (Soto, 1988). Parte de esta depresión cuspidal también podría haber estado afectada por erosión glacial (Reagan et al., 2006).

El Cerro Finca Liebres fue un estratovolcán de unos 500 m de altura sobre la meseta circundante, cuyos flujos lávicos principales se orientaron al E y SE (figura 7.7.2.4). La erosión ha actuado profusamente en su vertiente caribe, donde se ha abierto un anfiteatro, nominado “caldera de erosión Finca Liebres” por Alvarado et al. (1986).

**Figura 7.7.2.4 Vistas aéreas de la cima del Turrialba. Arriba, oblicua de los cráteres del Turrialba, viendo hacia el noreste. Abajo, su estructura: alineamiento de cráteres dentro de la gran depresión volcánica abierta hacia el caribe, producto del graben cuspidal, anfiteatro de avalancha volcánica y erosión (glaciar?), así como las principales fallas (tomada de Linkimer, 2003).**



En la ladera meridional del cono del Turrialba, los conos piroclásticos Tiendilla y El Armado se instalaron como conos adventicios orientados según la zona de fractura. La lava de Aquiares, propuesta como eyectada de una fractura (Dóndoli & Torres, 1954) parece efectivamente eruptada desde la fractura meridional SE (respecto al cono), alcanzando 8 km hacia el sur. Sobre ella se encuentra parte del cono y otras dos coladas, eyectadas desde la base de los conos adventicios Tiendilla y El Armado (figura 7.7.2.3c).

El Cerro Dos Novillos es un aparato volcánico disectado y erosionado, que se alinea con las estructuras descritas. Este aparato es cortado también por otra fractura en dirección WNW, que da fin al graben.

El trazo entre los volcanes Finca Liebres y Dos Novillos, con todas las estructuras en medio, tiene una longitud de 11 km para las fracturas propuestas. Güendel (1985) obtuvo los mecanismos focales de un par de enjambres sísmicos en la falda SE del volcán Irazú en junio y setiembre de 1982, resultando la falla de origen con una dirección N46°E, que sería una prolongación en profundidad y hacia el SW de las fracturas propuestas, aunque sin manifestaciones superficiales.

El control estructural en dirección NE es entonces el responsable de la instalación del conjunto volcán Turrialba y estructuras volcánicas adyacentes, previas y contemporáneas a él. Esto explicaría por qué el Turrialba está tras el eje volcánico definido por la Cordillera Central. Stoiber & Carr (1974) propusieron que el sistema Irazú-Turrialba tiene un origen en fracturas profundas de dirección N60°E, debido a tensiones resultantes de esfuerzos de cupla dextrales como resultado de un bajo corrimiento de menor velocidad en el tramo SE de la subducción de la Placa del Coco. Esto podría coincidir con la zona de fallamiento propuesta por varios autores, interpretado como un sistema de deformación del centro de Costa Rica.

Reagan & Gill (1989) en análisis de elementos trazas encontraron que los piroclastos de la erupción de 1864-66 muestran afinidades de basaltos intraplaca unos y calcoalcalinas otros, de modo que sus fuentes mantélicas subyacen al Turrialba simultáneamente.

### **7.7.2.3 Actividad volcánica en el Turrialba**

#### **Tipos de actividad volcánica en general**

El carácter de la actividad volcánica determina el tipo de morfología resultante, y el grado y alcance del peligro asociado. Conociendo una determinada geoforma (p.ej., la morfología de un cono o de una colada), se puede interpretar qué tipo de actividad le dio origen, su desarrollo espacial y temporal relativos. Por otro lado, si estudiamos los depósitos volcánicos, en particular los productos de explosiones, podemos conocer no sólo el tipo y el carácter de la erupción, sino también su evolución, extensión, volumen, energía y fecha de ocurrencia. Describiremos brevemente los principales tipos de actividad volcánica, recalcando que un volcán puede presentar distintos estilos eruptivos durante su historia, aun en un mismo período eruptivo.

Una erupción consiste en la salida de material volcánico (lava o piroclastos) por una boca eruptiva (cráter o fisura), de manera explosiva o no (colada de lava o derrumbe volcánico). Una explosión es la expansión súbita del material volcánico por efecto del gas magmático (explosión magmática o seca) o del vapor generado por una causa hidrogeotérmica (acumulación de vapor de agua) o hidromagmática (vapor que resulta de la interacción o contacto entre agua y magma). Los piroclastos o tefras son los productos fragmentarios de la actividad explosiva: cenizas (<2 mm), lapilli (2-64 mm), bombas y bloques (>64 mm).