



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
“CIENCIAS DE LA TIERRA” UNIDAD TICOMÁN
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“ANÁLISIS PETROGRÁFICOS PARA CARACTERIZAR
MACIZOS ROCOSOS: CASO DE ESTUDIO LAS
CRUCES, NAYARIT”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN
DE LOS RECURSOS NATURALES
P R E S E N T A**

MIGUEL ÁNGEL RUVALCABA SEPÚLVEDA

DIRECTORES DE TESIS:



**DIRECTOR INTERNO: M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán
DIRECTOR EXTERNO: Dr. José María Chávez Aguirre**

MÉXICO, D. F.

ENERO 2016



SIP-13-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
 SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
 Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 12 de Octubre del 2015

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. Ticomán en su sesión Ordinaria No. 7 celebrada el día 29 del mes de Septiembre conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

Ruvalcaba
 Apellido paterno

Sepúlveda
 Apellido materno

Miguel Ángel
 Nombre (s)

Con registro:

B	1	3	1	1	3	8
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
"Análisis petrográficos para caracterizar macizos rocosos: caso de estudio Las Cruces, Nayarit"

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

El análisis petrográfico en láminas delgadas de rocas

Toma de microfotografías de las láminas delgadas

Resultados y discusión de resultados

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:

M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán (Director Interno) y Dr. José María Chávez Aguirre (Co-Director)

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en:
 Fuentes bibliográficas, medios electrónicos y trabajos de investigación de referencia.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán

Aspirante

C. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda



Dr. José María Chávez Aguirre

Presidente del Colegio

Ing. Francisco Javier Escamilla López



SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
 SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 18:00 horas del día 4 del mes de Diciembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. U. Ticomán para examinar la tesis titulada:
"Análisis petrográficos para caracterizar macizos rocosos: caso de estudio Las Cruces, Nayarit"

Presentada por el alumno:

RUVALCABA

Apellido paterno

SEPÚLVEDA

Apellido materno

MIGUEL ÁNGEL

Nombre(s)

Con registro:

B	1	3	1	1	3	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA
 Directores de tesis

M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán	Dr. José María Chávez Aguirre
Dr. Arturo Ortiz Ubilla	Dr. Francisco Estrada Godoy
Dr. Daniel Romo Rico	



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Ing. Francisco Javier Escamilla López



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 7 del mes de Diciembre del año 2015, el que suscribe Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda, alumno del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, con número de registro B131138, adscrito al Programa de Estudios de Posgrado de la ESIA-Ticomán, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección interna del M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán y externa del Dr. José María Chávez Aguirre y cede los derechos del trabajo titulado “Análisis Petrográficos para Caracterizar Macizos Rocosos: Caso de Estudio Las Cruces, Nayarit”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: amruvalcaba@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MIGUEL ÁNGEL RUVALCABA SEPÚLVEDA



Agradecimientos

Al personal de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad, por las facilidades y concesiones para la planeación, realización y análisis de información con las que se realizó este proyecto, a mi amigo y asesor externo Dr. José María Chávez Aguirre por su gran apoyo y la ingrata actividad de revisión continua del trabajo y sugerencia a lo largo del proyecto y la culminación de la tesis.

Quiero agradecer al M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán (director interno de tesis) y al Dr. Francisco Estrada Godoy por todo su apoyo, sugerencias y comentarios, comprensión y regaños, ausencias, momentos de estrés y amistad, que desde el inicio y a lo largo de toda la maestría me han brindado. Su compañía y guía me han forjado como un estudiante y me han encaminado por el a veces incomprensible pero divertido camino de la ciencia.

Para mis sinodales: Dr. Arturo Ortiz Ubilla y Dr. Daniel Romo Rico por sus atinados comentarios, sugerencias y críticas, las cuales sin duda ayudaron a focalizar y mejorar esta tesis.

A todos mis profesores y compañeros por sus enseñanzas y amistad, así como al personal administrativo de la SEPI por su apoyo durante los trámites administrativos durante mi estancia en el Politécnico.

De forma especial a Don Leovigildo Javier Cepeda Dávila quien me enseñó que con esfuerzo, dedicación y voluntad se logra el éxito, gracias Leo por haber sido mi maestro, guía, profesor y amigo.

Con mucho amor para honrar la memoria de mis padres Pablo Leandro Ruvalcaba Ávila y Celia Sepúlveda Hernández por ser un ejemplo, forjarme en el trabajo y la perseverancia para alcanzar metas, pero también por enseñarme a soñar.

Con cariño a mis hermanos, Lourdes Antonia, Leopoldo, María de los Ángeles, María del Refugio, Benito, Soledad, José Luis Ramón, Cecilia Salome, Cristina y Susana, por su apoyo, comprensión y enseñanzas a lo largo de la vida.

A mis hijos Jesús Miguel, Luis Ángel y Kevin Alberto por su comprensión y apoyo, ya que siempre me animaron y confiaron en mí.

En forma muy especial a quien debo el logro de esta meta, por sostenerme, ayudarme durante la realización de la tesis y finalmente por motivarme a no desistir hasta alcanzar el objetivo.

A mi esposa Alma Rosa



ÍNDICE

	Pág.
Resumen	xi
Abstrac	xii
Capítulo I. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos	3
1.5 Localización	3
1.6 Vías de acceso	3
1.7 Clima	4
1.8 Características de la zona de estudio	4
1.8.1 Tectónica regional	4
1.8.2 Fisiografía	8
1.8.3 Geología Regional	8
Capítulo II. Metodología	10
2.1 Obtención de la información del sitio	10
2.2 Metodología para la elaboración de láminas delgadas	10
2.2.1 Corte de rocas	11
2.2.2 Desbaste y Pulido de la sección de roca	11
2.2.3 Tratamiento, etiquetado y terminación de la lámina delgada	11
2.3 Estudios y toma de fotografía de las rocas en lámina delgada con el microscopio petrográfico	11
2.3.1 Obtención de microfotografías y datos estructurales	12
2.3.2 Análisis estadísticos de los datos obtenidos	12
2.4 Obtención de familias de fracturas y parámetros en láminas delgadas	13
2.4.1 Microfotografías de las familias de fracturas	13
2.4.2 Parámetros obtenidos	13
Capítulo III Exploración Geológica	13
3.1 Geología Local	13
3.2 Litología	14
3.2.1 Unidad Las Cruces (Tm-ic)	15
3.2.2. Unidad Corapan (Tm-c)	17
3.2.3. Rocas intrusivas	18
3.2.4. Depósitos no consolidados	19



Capítulo IV. Geología Estructural	20
4.1 Recopilación de datos estructurales	21
4.1.1. Fallas	22
4.1.1.1. Falla PHC-1	24
4.1.1.2. Falla PHC-2	24
4.1.1.3. Falla PHC-3	24
4.1.1.4. Falla El Portal	24
4.1.1.5. Falla El Cantil	24
4.1.1.6. Falla El Mango	25
4.1.2. Socavón exploratorio	25
4.1.2.1 Fallas – Dique	25
4.1.2.2. Fallas	25
4.1.2.3. Fracturas	26
4.1.3. Zonas potencialmente inestables	28
4.1.3.1. Zona 1	29
4.1.3.2. Zona 2	29
4.1.3.3. Zona 3	29
4.1.3.4. Zona 4	30
4.1.3.5. Zona 5	30
4.2 Análisis Estadísticos	31
4.3 Geodinámica	37
4.3.1 Geodinámica Actual que afecta el sitio del proyecto	38
4.3.2. Microsísmica en socavones 1 y 2 MI	42
4.3.2.1. Socavón 1	38
4.3.2.2. Socavón 2	40
4.3.3 Efecto de la Geodinámica regional	42
4.3.4. Cocientes espectrales	45
4.3.5. Roca de Mala Calidad	47
4.3.6. Descripción de las plantas horizontales por elevaciones	49
4.3.6.1. Planta a la elevación 160	49
4.3.6.2. Planta a la elevación 180	49
4.3.6.3. Planta a la elevación 200	49
4.3.6.4. Planta a la elevación 220	50
4.3.6.5. Planta a la elevación 240	50
4.3.7. Bloques estructurales	50
4.3.8. Estabilidad de las laderas	52
Capítulo V. Alteraciones y Muestreo	55
5.1. Alteraciones en el proyecto	55
5.2 Descripción de las alteraciones	56



5.3	Estilos y Tipos de Alteración Hidrotermal	56
5.3.1	Estilos de Alteración	57
5.3.2	Tipos de Alteración	58
5.4	Muestreo	64
5.4.1	Muestreo de afloramientos y excavaciones	64
5.4.2	Muestreo de sondeos	64
VI.	Resultados y Discusión	65
6.1	Resultados de la exploración geológica	65
6.2	Parámetros de discontinuidades obtenidos en campo	66
6.2.1.	Fallas	66
6.2.1.1.	Falla Los Bueyes	67
6.2.1.2.	Falla El Cantil	68
6.2.1.3.	Falla Las Cruces	69
6.2.1.4.	Falla Bordones	70
6.2.1.5.	Falla PHC-2	71
6.2.2.	Fracturas	73
6.2.3.	Seudoestratificación	75
6.2.4.	Contactos geológicos	76
6.3	Resultados obtenidos de los análisis petrográficos	77
6.4	Parámetros obtenidos del análisis de las fotomicrografía	80
6.4.1.	Abertura de la fractura, análisis de la densidad y conductividad	83
6.5	Resultados y discusión de los análisis petrográficos	85
VII.	Conclusiones	87
VIII.	Bibliografía	88



Lista de figuras

	Pág.
1. Mapa de ubicación y accesos al P.H. Las Cruces, Nayarit.	4
2. Configuración actual de México.	5
3. Tectónica de la provincia geológica mexicana.	6
4. Subducción de la Placa Oceánica Farallón.	7
5. Provincias y Subprovincias Fisiográficas de México.	8
6. Equipo petrográfico utilizado para realizar este trabajo.	12
7. Columna litológica del P.H. Las Cruces.	15
8. Unidad Las Cruces coronada por la unidad Corapan en M.I.	16
9. Ignimbrita Las Cruces, aguas abajo del eje de boquilla.	16
10. M.I. Unidad Corapan, cubriendo a Las Cruces, en zona boquilla.	18
11. Dique diabásico totalmente alterado con espesor de 1,20 m.	19
12. Lineamientos Zona Norte aguas arriba de la zona de estudio.	20
13. Lineamientos Zona Centro y Sur del embalse P. H. Las Cruces.	21
14. Distribución de fracturas y fallas normales principales en la zona de la boquilla.	23
15. Principales fallas y lineamientos en la zona de la Boquilla.	27
16. Fallas y lineamientos en la zona del PH Tecarita.	28
17. Estereograma de fracturas MI, alternativa Rancho Viejo.	31
18. Estereograma de fracturas MD, alternativa Rancho Viejo.	31
19. Estereograma de la estratificación MD, alternativa Rancho Viejo.	32
20. Estereograma de la estratificación MI, alternativa Rancho Viejo.	32
21. Fallas geológicas en zona de boquilla y zona de obras.	33
22. Diagrama de rumbos de fallas y fracturas en zona de obras.	34
23. Estereograma general de fallas.	36
24. Resultados en el socavón 1 con método petite sismique.	40
25. Resultados del socavón 2 con el método petite sismique.	41
26. Sismicidad registrada por la Red Analógica.	44
27. Gráficas de los eventos registrados en las estaciones El Bálsamo y Agua Aceda.	44
28. Gráficas de los eventos registrados en las estaciones Presidio y Guaybel.	45
29. Registros de las estaciones analógicas Guaybel y Presidio febrero 20, de 2013.	45
30. Registros de las estaciones analógicas Presidio y Guaybel abril 12, de 2013.	45
31. Cocientes espectrales de M.D.	47
32. Cocientes espectrales de M.I.	47
33. Esquema estructural del proyecto Las Cruces, Nayarit.	51
34. Bloques estructurales 1 y 2.	51
35. Cantiles en donde se desplantará la cortina.	52
36. Ubicación muestras colectadas en la zona de interés.	64
37. Falla Los Bueyes, aguas abajo del eje.	67
38. Falla Los Bueyes.	67



39. Falla El Cantil en la porción media de la ladera M.I.	68
40. Corte en balcón CB-9, donde se observa material arcilloso.	69
41. Falla Las Cruces vista desde la M.D. del río.	70
42. Falla Bordones a la altura del puerto.	71
43. Representación estereográfica del fallamiento en la zona de la boquilla.	72
44. Representación estereográfica del fallamiento.	74
45. Estereogramas de Fracturamiento M.I. P.H. Las Cruces.	74
46. Estereogramas de la pseudoestratificación P.H. Las Cruces.	76
47. Línea de exploración para definir número y apertura de los sistemas de fracturas.	80
48. Fotomicrografías con luz natural y nicoles cruzados.	81
49. Comparativo de la densidad del fracturamiento en el área de estudio.	83
50. Intensidad del fracturamiento normalizado de la distribución de fractura acumulativa para fractura del set 2 y 3.	85
51. Ranking de familias de fracturas.	86
52. Gráfico que muestra la secuencia del macizo rocoso.	87

Lista de Tablas

	Pág.
1. Volumen de Obra realizada para el proyecto Las Cruces.	14
2. Principales fallas alternativa Rancho Viejo	22
3. Datos estructurales de las fallas-dique	25
4. Discontinuidades que afectan al socavón	26
5. Orientación preferencial de las fallas en la zona de obras.	35
6. Orientación preferencial de las familias de fallas en la zona de obras.	36
7. Fallas importantes en el socavón 2 MI.	37
8. Valores de módulos elásticos dinámicos socavón 1 M.I., y velocidades de onda S y P.	39
9. Valores de módulos elásticos dinámicos del socavón 2 M.I.	42
10. Sismicidad enero-septiembre 2013. Las Cruces por la red sismológica analógica.	43
11. Sismicidad registrada por cada una de las estaciones del P.H. las Cruces.	44
12. Eventos registrados por los equipos instalados en ambas márgenes del proyecto.	46
13. Valores de velocidad de onda compresional.	47
14. Espesores de roca de mala calidad en margen izquierda.	48
15. Espesores de roca de mala calidad en margen derecha.	48
16. Caracterización de los tipos de alteración con el uso de símbolos.	57
17. Relación de las principales fallas que afectan a la zona de la boquilla.	73
18. Resumen de parámetros de los Análisis Petrográficos.	77

ANEXO

ESTUDIOS PETROGRÁFICOS Y MICROFOTOGRAFÍAS	91
---	----



RESUMEN

Con el análisis al trabajo de petrografía y microfotografías se logró obtener la conductividad de las discontinuidades, obteniendo los parámetros de la densidad del fracturamiento, porosidad, conectividad y calidad conductora del macizo rocoso del P.H. Las Cruces, Nayarit, el cual fue el propósito principal de este trabajo. La metodología fue la petrografía y microfotografías en láminas delgadas de muestras de roca colectadas en la zona de estudio, su análisis estadístico de las imágenes donde se obtuvo parámetros del microscopio para medir la abertura de las discontinuidades encontradas. Los resultados son los siguientes: Los estudios petrográficos indican un origen de las rocas que varía de extrusivo a intrusivo predominando el primero, su estructura es masiva de fluidal, compacta, amigdaloides a vesicular o porosa, con texturas que van de eutaxítica a piroclástica en las rocas extrusivas a porfídica pilotaxítica a equigranular holocristalina en las intrusivas hipabisales a plutónicas, la alteración, es meteórica, representada por oxidación, argilitización, carbonatación, cloritización y uralitización que provocan porosidad secundaria y cambian la dureza y resistencia al debilitar al material; aunque la desvitrificación y silicificación hace más dura y resistente a la roca; también los estudios indicaron la presencia de cuatro sistemas de discontinuidades, pero solo las set3 y set2 son los principales conjuntos conductores, no así los sistemas set1 y set4; esto debido a procesos tectónicos y magmáticos los que cerraron los canales conductores con material de dureza considerable constituido por sílice y feldespatos a estos sistemas.

Las fracturas set1 tiene orientación E-W, con discontinuidades lineales, completamente cerradas por material cementante criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato, la ondulación indica probablemente movimientos de rumbos sinextrales durante su precipitación, apertura medida de 0.02 a 1.9 mm, con densidad y porosidad ausente. Fracturas de la familia set2, con dirección NE70°SW, están abiertas de 0.001 a 0.34 mm con una abertura conductiva de 0.009 mm una densidad de 270 y presentan porosidad visible de 13% a una porosidad total equivalente de 0.26% e indicando alta conductividad de fluidos y corresponden a la dirección principal en las fallas encontradas en la boquilla y en margen izquierda. La familia de fracturas set3 con similar orientación que la familia set2 pero con porosidad remanente y fluidos indicando alta conductividad con aberturas medidas de 0.01 a 3.4 mm, apertura mínima conductiva de 0.02 mm, densidad de 50, porosidad equivalente de 5.55% y porosidad total equivalente de 0.11%; se observa también la familia set4 sellada con orientación NW20°SE, el cementante es material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato cerrando la porosidad total.

La familia de fracturas con mejor característica de acuerdo al análisis de conductividad son los conjuntos set2 y set3, en tanto que los conjuntos set1 y set4 son no conductivos. Por lo que podemos concluir que las fracturas con tendencias NE-SW son los que son los mejores conjuntos conductivos, mientras que los de dirección NW-SE y E-W son los cerrados y por tanto no conductivos.



ABSTRACT

By analyzing the work of petrography and photomicrographs, it will be able to obtain the conductivity of discontinuities, obtaining parameters of fracture density, porosity, and connectivity and driving quality of the rock mass of PH Las Cruces, Nayarit, which was the main purpose of this work. The methodology was the petrography and photomicrographs in thin sections of rock samples collected in the study area, statistical analysis of the parameters of the microscope images that was obtained measuring the opening of discontinuities found. The results are as follows: Petrographic studies indicate an origin of rocks ranging from extrusive to intrusive dominate the first, its structure is massive fluidal, compact, porous or vesicular amygdaloidal, with textures ranging from a pyroclastic in eutaxítica porphyritic extrusive to pilotaxítica to equigranular holocrystalline in hypabyssal intrusive to plutonic rocks, The alteration, is meteoric, represented by oxidation, argilitización, carbonation, causing uralitización chloritization and secondary porosity and change the hardness and resistance to weaken the material; although devitrification and silicification gets tougher and resistant rock. Studies also indicated the presence of four sets of discontinuities, but only the set3 and set2 are the main drivers sets, not set1 and set4 systems; this due to tectonic and magmatic processes that closed the channel drivers with substantial hardness material consisting of silica and feldspar to these systems.

The fracture has set1 EW orientation, with linear discontinuities, completely closed by cementing material composed of cryptocrystalline quartz and feldspar, probably it indicates ripple movements sinextrales directions during precipitation, openness measure .02 to 1.9 mm, density and porosity absent. Set2 fractures family, NE70°SW direction, are open from 0.001 to 0.34 mm with a conductive opening 0.009 mm and a density of 270 have visible porosity of 13% to a total equivalent porosity of 0.26%, indicating high conductivity of fluids and correspond to the primary address on the flaws found in the nozzle and left margin. Family set3 fractures set2 similar orientation to the family, but indicating remaining porosity and high conductivity fluids, measures openings 0.01 to 3.4 mm with a conductive minimum opening 0.02 mm, 50 equivalent density and porosity of 5.55% equivalent total porosity of 0.11% and also shows the orientation sealed. Family set4 NW20°SE, the cementitious materials is comprised cryptocrystalline quartz and feldspar closing total porosity.

The family-fracture conductivity best feature according to the analysis are the set2 and set3 sets. Sets set1 and set4 are nonconductive. Therefore, we can conclude that fractures with NE-SW trends are those that are the best conductive joint, while the NW-SE and EW are closed and therefore nonconductive.



CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Desde inicios del siglo XX una de las principales actividades económicas a nivel mundial junto con la industria minera y petrolera ha sido la exploración geotécnica en la ingeniería civil. La capacidad de generar energía a muy bajos costos impulsó el progreso económico, científico, tecnológico y social de algunas regiones del planeta, así como la gran explosión demográfica del siglo pasado. El incremento demográfico desencadenó a su vez una exageración en la demanda de servicios así como de energía, lo cual ha exigido a la comunidad industrial y científica a perfeccionar técnicas de exploración y producción más efectivas y bajar los costos de las mismas. Una de las estrategias de la geotecnia es la profundidad en el conocimiento de los mecanismos de deformación, permeabilidad y resistencia de las masas rocosas, involucrándose en proyectos multidisciplinarios junto con centros de investigación universitarios y organismos de gobierno, buscando mejorar la comprensión de los controles geológicos involucrados.

La actividad Geotécnica en el caso de México y, el conocimiento de la evolución geológica se ha centrado esencialmente en la comprensión de los procesos de deformación, permeabilidad y resistencia a nivel del conocimiento de los afloramientos de los macizos rocosos y su caracterización, sin considerar la microestructura y la petrografía como herramientas poderosas en el estudio de estas propiedades.

En los últimos años, la aplicación del conocimiento adquirido por décadas sobre la petrografía y su aplicación en la ingeniería civil ha permitido el desarrollo de técnicas analíticas nuevas y más precisas, que aplicadas al estudio de la caracterización de las masas de roca han permitido profundizar en el conocimiento sobre el origen y la evolución petrológica de las rocas y sus parámetros índice y mecánicos. Los fluidos que interactúan en el macizo rocoso desde su génesis hasta su afloramiento, “alteran” las condiciones físicas y químicas originales por donde pasan y afectan las propiedades índice y mecánicas sobre todo su grado de alterabilidad, deformabilidad, permeabilidad, porosidad y resistencia, dejando rastros de su presencia bajo la forma de cambios texturales, físicos y/o químicos. La determinación de estos cambios y el estudio de los cementos y la porosidad, producto de los mismos, permiten entender los procesos hidrodinámicos que afectaron las rocas regionalmente. Estos estudios a detalle hacen posible trazar la evolución de los fluidos atrapados.

En el transcurso de este trabajo se expondrán las técnicas y metodologías petrológicas de punta que se utilizan para el estudio de las rocas colectadas en las Cruces, Nayarit, así como los resultados obtenidos del estudio petrográfico a 29 especímenes de rocas seleccionadas de sondeos y de afloramientos en recorridos de campo del área de Las Cruces, en el estado de Nayarit, que caractericen los macizos rocosos con fines de aplicación a la ingeniería civil.



1.2. Antecedentes

La primera mitad de la década de los ochentas fue el tiempo en el que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de su Residencia de Estudios de los ríos Baluarte y Presidio efectuó en 1982 la geología regional de la porción inferior del río San Pedro, destacando las características geológicas generales de los estrechamientos Ixcatán, Tecarita, Las Cruces, El Limón, Pozolillo y Platanares. En 1983 se concluyó la etapa de evaluación geológico-geotécnica de gran visión de los mismos, donde se recomendó Tecarita como mejor opción, en tanto que en 1984 se efectuó el análisis geológico de Las Cruces y se estableció el marco geológico regional de una porción de las cuencas de los Ríos San Pedro y Acaponeta, donde se dan a conocer, a nivel de gran visión, las características de los estrechamientos San Blasito, Ixcatán I y Las Malpas. (CFE, 1984).

Más tarde en 1995, la CFE, a través de la Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte, realizó el estudio geológico de prefactibilidad del P.H. Pozolillo, Nay., en el cual están integrados los resultados de los trabajos geológicos de semidetalle obtenidos en las alternativas Platanares, Pozolillo I y Pozolillo II (El Limón). (CFE, 1996). Para 1997 se establece como parte integral de los estudios del P.H. Pozolillo, la ejecución de la prefactibilidad geológica de la alternativa Las Cruces en donde, de acuerdo con los estudios de integración y análisis geológico-geofísico, se estimó que el sitio presenta características favorables para alojar las posibles obras civiles. Los trabajos de exploración geológica y geofísica relativos a los períodos 1997, 1998 y 2001, tuvieron por objeto conocer con detalle las condiciones geológicas del sitio, para facilitar la ubicación del posible eje de la obra de contención del proyecto y establecer las necesidades de exploración directa para el mejor conocimiento de las características del macizo rocoso involucrado. (CFE, 2001).

Desde mediados del 2009 al 2013 derivado de los estudios realizados a semidetalle y detalle en el PH Las Cruces se da la factibilidad de la alternativa Rancho Viejo, tomando en cuenta los datos del anteproyecto es probable que en la alternativa, se requiera de una obra adicional en la margen izquierda para ejecutar el cierre hidráulico, por presencia de zonas de elevación limitada. Por lo que respecta a la estanqueidad del vaso, existen estructuras que sugieren problemas de permeabilidad, sobre todo en la margen izquierda. A partir de 1984 se han realizado análisis petrográficos a muestras de rocas colectadas en los estudios de la geología regional, así como de la zona del PH las Cruces; identificando rocas volcánicas de composición ácida a básica y rocas ígneas intrusivas plutónicas e hipabisales (CFE, 1984, 1996, 2001, 2013).

1.3. Justificación

Mediante el presente trabajo se aporta un esquema de la importancia de los estudios de las estructuras geológicas a través de su análisis en estudios petrográficos y microfotografías.



Se apoya en diversas disciplinas de las Ciencias de la Tierra y principalmente en la Petrografía, lo cual permite una percepción geológica imparcial global tendiente a la exploración de los macizos rocosos. Es además primordial la descripción de las discontinuidades tales como poros, microcavidades, grietas o fracturas para definir las posibles familias presentes y valorar su anchura y longitud, tipo de discontinuidad, orientación, distribución y posibles rellenos.

Los estudios de caracterización de Macizos Rocosos naturalmente fracturados en general omiten el impacto de los procesos que les dan origen y que afectan a los sistemas de fracturas, dando como resultado modelos de fractura los cuales no están totalmente calibrados, con datos reales de campo. Para la aplicación de las normas de calidad se solicitan análisis petrográficos en rocas, materiales y concretos como una herramienta que ayude a determinar la potencialidad de reactividad álcali-cemento, grado de alteración, índice Schimacek y porosidad entre otros parámetros que auxilian en el diseño geotécnico de las obras civiles.

1.4. Objetivos

- Determinar características del Macizo Rcoso mediante la obtención de la conductividad de las discontinuidades en rocas colectadas en el macizo rocoso de Las Cruces, Nayarit, mediante su análisis en estudios petrográficos y fotomicrografías.
- Obtener parámetros de las fracturas (densidad, porosidad, conectividad, y calidad conductora entre otras) de la masa de roca en estudio.

1.5. Localización

El P.H. Las Cruces se ubica en la porción central del estado de Nayarit, en la parte baja de la cuenca del río San Pedro, a 65 km, a N30°E de la ciudad de Tepic, con las siguientes coordenadas cartesianas del Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM): E (X)= 505 063,42 m y N (Y)= 2 442 628,23 m. (CFE, 2013).

1.6. Vías de acceso

El recorrido al proyecto se efectúa a partir de la ciudad de Tepic, Nayarit, la duración del mismo es de aproximadamente 2,5 horas, tomando la autopista federal Tepic-Mazatlán (figura 1) desviándose aproximadamente en el km 54,5, donde se encuentra la caseta de cobro denominada estación Ruiz, hasta el entronque con la carretera estatal pasando por las poblaciones de San Lorenzo, El Venado y El Pozolillo, hasta llegar a los poblados de San Pedro Ixcatán y Presidio de los Reyes con un recorrido de 35 km, a partir de este último poblado se transita por una brecha de penetración y como a 9 km se llega al sitio de la boquilla. (CFE, 2013).



Figura 1. Mapa de ubicación y accesos al P.H. Las Cruces, Nayarit. (CFE, 2013).

1.7. Clima

En general el ambiente es cálido subhúmedo con lluvias en verano que incide en el 66.06% de la geografía municipal y el semicálido subhúmedo con lluvias en verano que beneficia al 33.94% restante. Se observa una concentración de lluvias del 91.05% en los meses de julio a octubre. De acuerdo a INEGI la región del Estado de Nayarit se encuentra dentro de la clasificación de Climas templados subhúmedos lluviosos que varían de muy seco, a muy cálidos y cálidos, con temperaturas de 19° a 24° C y en promedio de 21.1°C y precipitación de 1,121 mm en promedio anual. (INEGI, 2010).

1.8. Características de la zona de estudio

La Geología de la República Mexicana es el resultado de múltiples procesos tectónicos que la han afectado durante toda su evolución; para explicarlos en la zona de estudio se requiere conocer el Marco Geológico con sus características estructurales (tectónica), ubicación fisiográfica y las unidades litológicas (Geología regional) que se presentan en la zona.

1.8.1. Tectónica regional

La configuración geográfica actual de México es consecuencia de la interacción del bloque continental con las provincias oceánicas que lo circundan. Es decir, la Península de Baja California se está separando del resto del continente con un movimiento hacia el noroeste; en el Pacífico sur de México, desde Cabo Corrientes en el estado de Jalisco hacia Centroamérica, la placa oceánica de Cocos es asimilada por la Placa Norteamericana; tal subducción ocurre a lo largo de una fosa oceánica a la que se conoce como “*Trinchera de Acapulco o Mesoamericana*”.

Por otro lado, en las provincias geológicas del Golfo de México y del Caribe, se tienen esfuerzos tectónicos de separación cortical, identificados también como de tensión o distensivos, que están actuando en los márgenes continentales; éstos, a su vez, avanzan sobre los fondos más profundos de las cuencas oceánicas, como consecuencia del desplazamiento de la placa tectónica continental de Norteamérica hacia el poniente, y de la del Caribe hacia el oriente.

La conformación presente de México se debe al movimiento simultáneo de las cuatro placas tectónicas: a) Norteamérica, con desplazamiento hacia el suroccidente; b) Pacífico oriental, hacia el noroeste; c) Cocos, hacia el noreste, y d) la del Caribe, hacia el oriente franco (figura 2). Los procesos geodinámicos que son aún más complejos se pueden describir con relativa facilidad de una forma general.

En términos globales, su influencia es muy importante por la contribución al conocimiento universal sobre el origen y evolución de nuestro planeta.

A su vez, este entendimiento es básico en la prospección de recursos minerales, hidrotermales y petrolíferos que se generan y acumulan en el interior de la corteza de la Tierra, como consecuencia de su evolución geotectónica.

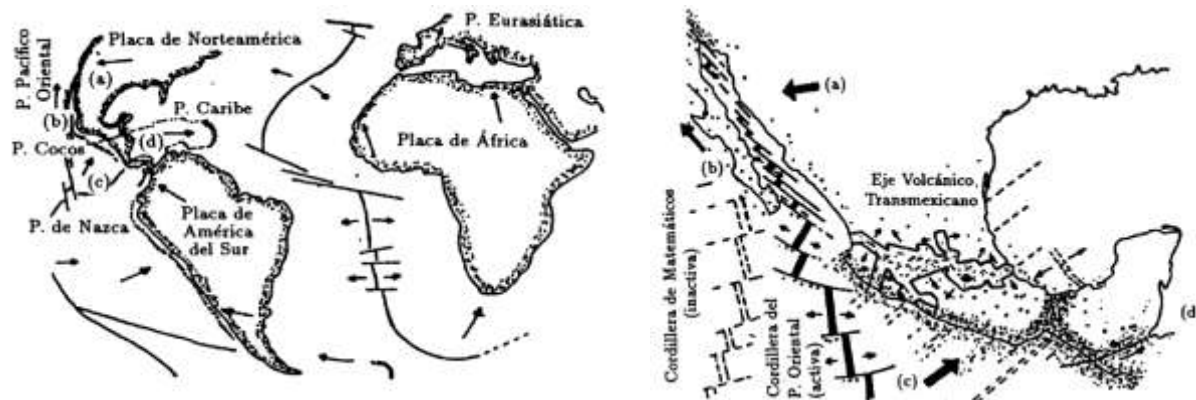


Figura 2. Configuración actual de México. (Aguayo y Trápaga, 1996).

La identificación de las provincias y su caracterización son fundamentales cuando se planifican nuevos centros de población, ya que para fundarlos es necesaria la disponibilidad de recursos como el agua y la ubicación de los sectores de alto riesgo sísmico que afectan drásticamente a las porciones noroccidental y sur de México, así como a la zona intermedia, que ha recibido numerosos nombres (López, 1981) desde “Zona Eruptiva” por Ordoñez (1896); “la Sierra de los Volcanes” por Garfías y Chapin, (1949); “Neovolcanic Plateau” por E. Raisz (1969); “Faja Volcánica Transmexicana” por Mooser y M. Maldonado K., (1967); “Eje Neovolcánico” (López Ramos y otros, 1972-1974) y finalmente “Eje Neovolcánico Transmexicano” por A. Demant y otros, (1976), también conocida como *Cinturón Volcánico Transmexicano* (CVT) que cruza el país desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México.

La placa continental de Norteamérica, en el transcurso de su migración hacia el noroccidente y el occidente, asimiló progresivamente, en el pasado geológico, a las oceánicas Farallón y Kula, lo que dio como consecuencia que el arco magmático desarrollado durante el Jurásico Superior migrara hacia el noreste en el interior del continente, seguido por otros arcos magmáticos del Cretácico.

Debido a la subducción de la Placa de Cocos y a la efusión del magma hacia la superficie, los primeros esfuerzos fueron compresivos y produjeron estratovolcanes generalmente de composición variable: andesitas, riolitas y dacitas.

Durante este proceso la provincia tectónica del CVT siguió su desarrollo y pasó por etapas sucesivas de distensión con vulcanismo, erosión y sedimentación aluvial, fluvial y lacustre. Cuando los bloques de origen distensivo se conformaron escalonadamente hacia la porción central del CVT, se presentaron otros episodios volcánicos de tipo explosivo con lavas y piroclastos de composición básica a intermedia (figura 3).

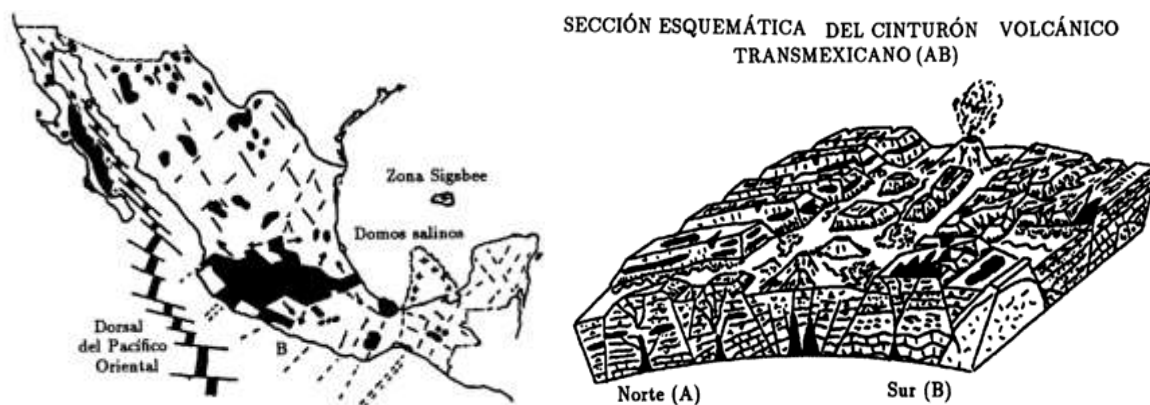


Figura 3. Tectónica de la provincia geológica mexicana. (Aguayo y Trápaga, 1996).

En la ilustración se manifiestan rocas volcánicas del Plio-Cuaternario (zonas negras), que están asociadas con el gran fracturamiento que afecta a todo el país. En el esquema derecho se ilustra el abombamiento del Cinturón Volcánico Transmexicano, constituido por sistemas de bloques limitados por fracturas y fallas de tensión; el conjunto rocoso es volcánico.

La composición de las rocas volcánicas a lo largo del "CVT" varía de acuerdo con la lejanía y el ángulo de incidencia con la Trinchera de Acapulco. Por ejemplo, en la parte occidental del "CVT" (Tepic-Chapala) se identificaron rocas de composiciones muy variables y sin embargo relacionadas con la subducción de la Placa Rivera. A los productos del vulcanismo de las porciones central y oriental del "CVT" se les asocia con la subducción de la Placa de Cocos; entre ellos se han identificado algunas variaciones químicas de los magmas, debidas a los cambios en ángulos de incidencia y al espesor de la placa oceánica; ésta es cada vez más antigua a medida que se avanza hacia el oriente (con más de 4 millones de años).

También se ha determinado la dirección de los mecanismos focales de los sismos someros de 0-76 km de profundidad, en las costas del Pacífico en México (Delgado, 1998) y se ha concluido que la Placa de Cocos tiende a avanzar hacia el noreste, con ángulos de inclinación que varían normalmente entre 31° y 41° . Así se ha conocido que los ángulos de inclinación de la placa oceánica ampliamente asimilada bajo el continente también son variables; por ejemplo, en las cercanías del volcán de Colima, el ángulo es de 30° ; entre Toluca, Estado de México, hasta San Andrés Tuxtla, Veracruz, el ángulo es de 20° en contraste, en las inmediaciones del volcán Chichón, en Chiapas, la zona está inclinada más de 40° . En síntesis, de acuerdo con el conocimiento actual que se tiene sobre el origen del "CVT" y su evolución, éste manifiesta diferentes condiciones tectónicas y estructurales a lo largo y a lo ancho de todo su sector de emplazamiento. Estas diferencias se deben definitivamente al desplazamiento diferencial que existe entre las placas de Norteamérica y la del Caribe, y que está afectado, a su vez, por la subducción de las placas de Cocos y de Rivera desde el Mioceno tardío (figura 4).

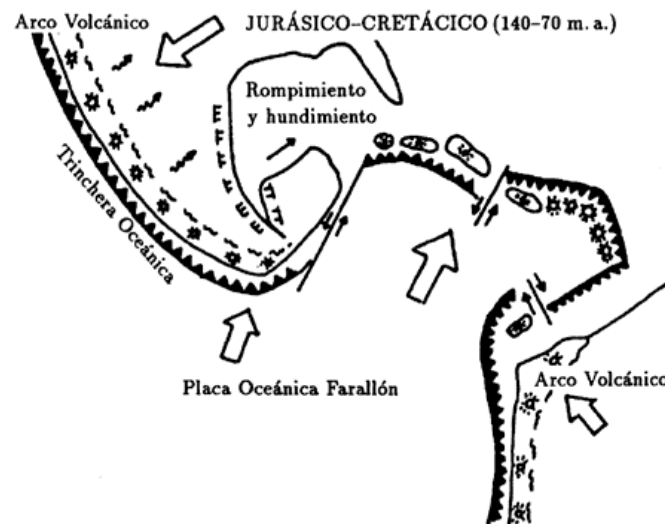


Figura 4. Subducción de la Placa Oceánica Farallón. (Aguayo y Trápaga, 1996).

Durante el Jurásico Superior (140 m. a.) y el Cretácico Superior (70 m. a.) el continente asimiló la placa oceánica de Farallón, generándose así el Arco Volcánico Marginal en el borde occidental de México y del noroeste de Sudamérica; la corteza oceánica del antiguo Océano Pacífico también estaba en colisión con el fondo oceánico del ancestral Océano Atlántico, y en su unión se formaron los arcos volcánicos insulares de la región caribeña.

A pesar de que la máxima actividad tectónica e ígnea del Cinturón Volcánico ocurrió durante el Plio-Cuaternario y el Reciente, el fracturamiento y fallamiento se inició previamente, durante el Mioceno Medio, cuando la antigua dorsal del Pacífico oriental fue asimilada por el margen occidental de la placa continental, o sea, hace 13 millones de años.

1.8.2. Fisiografía

El área de estudio se encuentra cerca del límite de la vertiente oeste de la Sierra Madre Occidental (figura 5) y, de acuerdo con la división fisiográfica de Raisz E. (1964), pertenece a la subprovincia denominada Sierras de Pie de Monte, la cual se ubica entre la Meseta Riolítica y los deltas de la Costa de Sinaloa y Nayarit

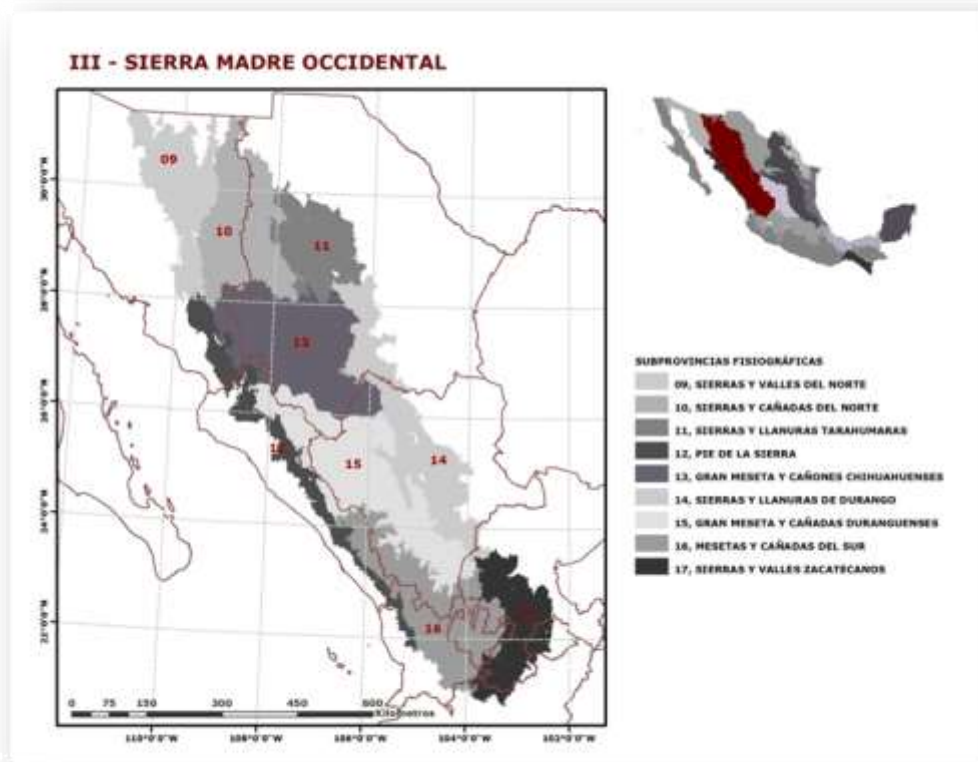


Figura 5. Provincias y Subprovincias Fisiográficas de México. (INEGI, 2014).

1.8.3. Geología Regional

Regionalmente afloran rocas ígneas y depósitos sin consolidar. La unidad litológica más antigua aflora en las rancherías El Verano de Ricardo y La Lagunita, en el río San Pedro, representada por andesitas basálticas, andesitas porfídicas y brechas de composición andesíticas se encuentran afectadas por alteración hidrotermal moderada a intensa generando propilitización y cambio de propiedades físicas de las rocas. Descansando sobre éstas discordantemente, se tienen rocas ígneas extrusivas denominadas Secuencia Ignimbrítica del Nayar compuesta por dos paquetes de rocas de composición ácida, la primera constituida por ignimbritas líticas de composición riolítica e ignimbritas líticas de composición dacítica expuestas al NE y NW de la alternativa rancho viejo en margen izquierda y derecha del río San Pedro y la otra representada por una



intercalación de ignimbritas y tobas riolíticas que afloran en las partes altas del sitio y en ambas márgenes del río San Pedro. Son afectadas por fallamiento de tipo normal. La edad de las andesitas se correlacionan con la obtenida por datación radiométrica K^{40}/Ar^{40} en andesitas colectadas y datadas en la presa Agua Milpa y varía del Oligoceno superior al Mioceno inferior (Moreno y Soto, 1994). Por otra parte, las rocas ígneas intrusivas varían en su composición de cuarzomonzonitas, granodiorita, pórfido andesítico y dique diabásico. Estas unidades litológicas afloran en diversas áreas del proyecto, al SSE de la Ranchería El Chinacate y sobre el cauce del río San Pedro, NW de la boquilla y poblado El Bálsamo, NW de la boquilla y arroyo Rosario Viejo así como cauce del río San Pedro respectivamente. Existen descansando discordantemente e interrumpiendo continuidad sobre las unidades litológicas anteriores domos riolíticos considerados como las últimas manifestaciones extrusivas de composición ácida de la zona y son expuestas al norte del proyecto de la boquilla.

Las unidades litológicas mencionadas anteriormente están cubiertas discordantemente en la zona del proyecto por sedimentos poco consolidados, que se asocian a diferentes ambientes de depósito. Se considera la dirección de flujo de las corrientes y niveles piezométricos para establecer el ambiente sedimentario fluvial. Se apreciaban dos facies de depósito. La primera son depósitos fluviales que se encuentran en márgenes del río San Pedro y en sus afluentes, redondeados y mal clasificados en matriz limo-arcillosa con espesor aproximado de 2,0 a 4,0 m y en partes del cauce hasta 10,0 m. Los constituyentes varían en composición y coloración del pardo hasta el verde y con tamaños de gravas a sedimentos areno-limosos y areno-arcillosos. En tanto que en las zonas distales se forma de materiales que provienen de las partes altas y se acumulan en las laderas labradas por el río San Pedro con cambios de pendiente, estos depósitos se encuentran al occidente del área de estudio y se constituyen por material de talud con líticos de composición diversa; los cuales tienen baja redondez y alta esfericidad, su tamaño varía de las gravas a las arcillas. El espesor varía de 2,0 a 8,0 m aproximadamente. (CFE, 2013).

El análisis contextual sugiere que la tectónica de la zona es muy compleja y que el marco geológico que comprende el área de la alternativa Las Cruces está representado por una secuencia de rocas volcánicas, afectadas por cuerpos intrusivos granodioríticos, riolíticos, andesíticos y diabásicos. Las principales discontinuidades presentes en el área son fallas, fracturas y pseudoestratificación.

El fallamiento es muy frecuente, pero poco importante y está representado por fallas normales con rumbo preferencial NW-SE y buzamiento al SW con tendencia a la vertical, de estas estructuras sólo a las fallas El Cantil, Los Bueyes, Las Cruces, Bordones y la PHC-2, se les considera como importantes, por su continuidad, zona de influencia y posible relación con las obras proyectadas respectivamente y se pudo comprobar que las zonas de falla tienen espesores que varían entre 5 y 7 m.



CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La historia de las rocas en el proyecto desde su origen hasta la actualidad ha demostrado ser muy compleja. La interacción de varios sistemas hidrogeoquímicos o fluidos que se traslapan en el tiempo y el espacio, complican la comprensión de la evolución geológica de cualquier área.

Un cuerpo que se originó por procesos magmáticos como una roca volcánica, con el paso del tiempo y por mediación de distintos procesos, puede cambiar sus propiedades índice y mecánicas o transformarse casi por completo en otros materiales por diversas alteraciones meteóricas o por desarrollo de discontinuidades, borrando casi la totalidad de sus características originales.

Estos distintos fluidos graban su paso por la roca, dejando evidencias de sus características así como del entorno en el que se produjeron. Una de las herramientas que más se utilizan por su importancia para entender las relaciones petrológicas y geológicas son la Petrografía y geometría de las masas de roca.

2.1. Obtención de la información del sitio

Se realizó lo siguiente:

- Recopilación de información cartográfica y bibliográfica del área de estudio.
- Recorridos de campo por la zona de estudio, con brújula y posicionador satelital (GPS). para recabar datos petrológicos y estructurales.
- Recolección, ubicación y clasificación preliminar de 29 muestras, para su envío al Laboratorio de petrografía de CFE para su estudio.
- Tomas fotográficas de estructuras geológicas y de afloramientos.
- Transcripción a mapas, en el gabinete, de los datos obtenidos en campo y de los resultados de laboratorio.
- Selección de muestras para elaborar laminas delgadas y su estudio en petrográfico
- Análisis e interpretación de los datos obtenidos.
- Redacción e integración de la información en la elaboración del presente trabajo

2.2. Metodología para la elaboración de láminas delgadas

La metodología para elaborar las láminas delgadas fue siguiendo el procedimiento de la guía elaborada por la Comisión Federal de Electricidad 10000-85 al respecto de los estudios de petrografía y para la obtención de parámetros con el Método de Clotilde Prieto (2012).

Para la realización de los estudios petrográficos se necesita obtener una sección o lámina delgada de muestras de afloramientos y de barrenos, ya que en éstas estarán contenidas las características del material a investigar.

2.2.1. Corte de rocas

Para la obtención de la lámina delgada se requiere efectuar un corte de roca de 2 cm de diámetro, con una maquina cortadora que puede ser manual o automática y como refrigerante de estos equipos se utiliza agua o diésel.

2.2.2. Desbaste y Pulido de la sección de roca

La sección de roca obtenida en el corte se desbasta y pule hasta alcanzar un espesor de 0,03 mm, se monta y se adhiere con un cemento (termoplástico o bálsamo de Canadá) a un portaobjetos de vidrio de 7,5 x 2,5 cm x 1 mm, protegido por un cubreobjetos de mica transparente de 2,2 cm por lado y 0,05 mm de espesor.

2.2.3. Tratamiento, etiquetado y terminación de la lámina delgada

El tratamiento que se le hace a la lámina delgada es en primer lugar una identificación por medio de un grabador eléctrico, con el cual se dibuja un símbolo en el vidrio portaobjetos, en seguida se le pega la laja obtenida con cemento termoplástico o bálsamo de Canadá, posteriormente se coloca en un vidrio de 2 cm de espesor para su desbaste y pulido; una vez alcanzado un espesor de aproximadamente 3 micras se coloca el cubreobjetos, el material que sobresalga del cubreobjetos se elimina con alcohol y con una navaja se limpia perfectamente, se coloca la lámina en la parrilla para quitar todas las burbujas de aire atrapadas.

Se limpia otra vez la parte externa del cubreobjetos y, por último, se le pone una etiqueta con los datos: número de muestra, con mes, año y proyecto y, ya para finalizar, se recorta con navaja o cúter el sobrante de la etiqueta.

2.3. Estudios y toma de fotografía de las rocas en lámina delgada con el microscopio

Los estudios petrográficos y las microfotografías de las rocas son un apoyo muy valioso para los trabajos de geología; proporcionan información que ayuda a la interpretación geofísica, sismológica y complementan las descripciones de núcleos o muestras de canal recuperados en la perforación. Definen con precisión las características internas y externas de un macizo rocoso y contribuyen al conocimiento geológico de una región en todas sus etapas, desde la regional hasta la de detalle. Esta herramienta también se conoce como “microscopio petrográfico”. Se emplea para determinar propiedades ópticas de los minerales y de las rocas mediante su examen en láminas delgadas y para la interpretación de texturas y relaciones de varias de las sustancias naturales o artificiales. Utiliza indistintamente luz polarizada plana y luz con los planos de polarización cruzados. Las láminas delgas se sujetan a la platina giratoria mediante unas mordazas de muelle o una prensa móvil denominada “carro”. Contiene un lente polarizador

similar al usado en ciertos tipos de anteojos para el sol; la luz que pasa a través de la lámina delgada se polariza. El mineral o minerales en la lámina tienen estructuras cristalinas que influyen a la luz polarizada en formas medibles, con lo que se identifican sus diferentes propiedades. El microscopio consta de dos lentes, un polarizador y un analizador, situados respectivamente abajo y arriba de una platina giratoria, lentes Amici-Bertrand y varios accesorios como los compensadores: láminas de mica, de yeso, cuña de cuarzo; también algunos constan de una cámara fotográfica integrada al cuerpo del microscopio para efectuar tomas fotográficas con diversos objetivos y oculares.

2.3.1. Obtención de microfotografías y datos estructurales

Para obtener las fotomicrografías de las láminas delgadas, se usó un microscopio Karl Zeiss Pol 25 con cámara integrada Linux (figura 6), seleccionando 63 fotografías con el polarizador solo (luz natural) y la misma cantidad con el polarizador y el analizador (nicoses cruzados) y con objetivos 2,5x y 10x (anexo petrográfico y de fotomicrografías).



Figura 6. Equipo Petrográfico utilizado para realizar este trabajo. (Laboratorio de Petrografía, CFE).

Los datos estructurales se colectan de las imágenes a las cuales se les realiza un análisis digital principalmente para determinar orientación de las discontinuidades que afectan los parámetros geotécnicos.

2.3.2. Análisis estadísticos de los datos obtenidos

El análisis estadístico se realizó con 126 fotomicrografías de 29 estudios petrográficos y su obtención de datos estructurales de las imágenes digitales correspondientes a los planos de las fracturas de las unidades de rocas, determinando la presencia de cuatro sistemas de fracturas principales.



2.4. Obtención de familias de fracturas y parámetros en láminas delgadas

Las familias de fracturas se obtuvieron del análisis efectuado a un total de 126 imágenes digitales tomadas con la cámara fotográfica del microscopio petrográfico, estas microfotografías analizadas en las láminas delgadas de 29 estudios petrográficos de roca intacta, arrojaron los siguientes parámetros: la conductividad, la abertura de las familias, la alteración, relleno y rugosidad de las paredes de las fracturas.

2.4.1. Microfotografías de las familias de fracturas

La distribución de las familias representativas encontradas en el análisis digital de 126 imágenes y representadas principalmente por cuatro familias de fracturas que varían de conductivas a no conductivas (anexo de microfotografías), incide en las propiedades de la roca intacta de las familias conductivas al aumentar porosidad y bajar su resistencia.

2.4.2. Parámetros obtenidos

Se obtuvo la conductividad, que incide en elevar la porosidad y permeabilidad así como inversamente en la resistencia del material, determinándose en las cuatro familias, parámetros conductivos, parcialmente conductivo a no conductivos.

CAPÍTULO III. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA

Para el desarrollo de este capítulo se realizaron recorridos de campo y seleccionaron párrafos de informes inéditos de CFE, los trabajos de exploración geológica y de geofísica que se mencionan más adelante relativos a los períodos 1997, 1999, 2001 y 2013, tuvieron por objeto conocer con detalle las condiciones geológicas del sitio, para facilitar la ubicación del posible eje de la presa (obra de contención) del proyecto y establecer las necesidades de exploración directa, para el mejor conocimiento de las características del macizo rocoso involucrado.

3.1. GEOLOGÍA LOCAL

El ambiente geológico que enmarca al proyecto está representado por rocas ígneas extrusivas e intrusivas del Terciario, que en forma parcial las cubren los depósitos no consolidados del Reciente. La base de la secuencia litológica está constituida por rocas de composición andesítica, las cuales son cubiertas por ignimbritas riolíticas de la unidad Las Cruces, la que subyace a tobas e ignimbritas de composición ácida de la unidad Corapan, sobre la cual fue depositado un potente paquete de ignimbritas riolíticas de la denominada unidad La Soyamichera.

Las rocas intrusivas se refieren al emplazamiento de cuerpos de composición granodiorítica, riolítica, andesítica y diabásica. Los depósitos no consolidados corresponden a la acumulación de suelo residual, aluvi3n y materiales de talud.

En la zona de estudio los rasgos estructurales est3n representados por fallas normales, lineamientos, fracturas y emplazamientos de intrusivos de diferente composici3n, cuyos efectos motivaron el basculamiento de las unidades volc3nicas hacia el noreste.

La mayoría de estas estructuras se orientan al NW-SE, mientras que de manera poco frecuente existen algunas con rumbo general N-S, E-W y NE-SW. En la tabla 1 se presenta el volumen de obra realizado para el proyecto Las Cruces.

Tabla 1. Volumen de Obra realizada para el proyecto Las Cruces. (CFE, 2013).

ACTIVIDAD	UNIDAD	VOLUMEN DE OBRA
Integraci3n de fotos a3reas e im3genes de sat3lite	Ha	75
Geología de detalle	km ²	2,2
Geología de semidetalle	km ²	25
Localizaci3n y estimaci3n de bancos de materiales	Banco	6
Levantamiento geol3gico de cortes en balc3n	Ha	2
Realizaci3n de pruebas Lugeon	prueba	84
Descripci3n de muestras de n3cleos	M	543,20

3.2. LITOLOGÍA

Las rocas expuestas en la zona de influencia de la boquilla est3n representadas por las ignimbritas riolíticas de la unidad Las Cruces (Tm-ic1-3) y por las tobas (Tm-ct1-4) e ignimbritas (Tm-ci1-3) de la unidad Corapan.

Afectando a la primera aparecen algunos diques diab3sicos (Tmp-dd) de reducidas dimensiones, en tanto que emplazado en la segunda y en forma de manto (sill) se tiene a un p3rfido andesítico (Tm-pa); por 3ltimo, cubriendo parcialmente a las rocas antes mencionadas, se encuentran los dep3sitos no consolidados como aluvi3n (Qal), suelo residual (Qsr) y dep3sitos de talud (Qt) (figura 7).

ERA	PERIODO	ÉPOCA	NOMENCLATURA	LITOLOGÍA	EDAD (Ma)
CUATERNARIO	HOLOCENO		Qal	Depósitos de aluvión, Suelo residual y Depósitos de talud.	0,01
			Qsr		
			Qdt		
CUATERNARIO	PLISTOCENO		DISCORDANCIA	Tm-dd: Dique diabásico de tono gris oscuro a verdoso, textura porfídica, estructura compacta, duro y denso, presenta hematización, cloritización y silicificación.	5,30
TERCERARIO	MIOCENO		Tm-gd	Tm-gd: Cuerpos intrusivos de composición graniodiorítica y textura porfídica.	23
			Tm-s	Tm-pa: Dique pórfido andesítico de tonos violáceos, altera a un tono oscuro con fenocristales blanquecinos, textura porfídica, estructura tabular o en dique estrato.	
			Tm-c	Tm-r: Domos y derrames de composición riolítica. Secuencia Ignimbrítica del Nayar	
			Tm-ic	Tm-s: Unidad La Soyamichera. Potentes paquetes de Ignimbritas liticas y vesiculares de composición riolítica.	
CUATERNARIO	PLISTOCENO		Tm-ata	Tm-c: Unidad Corapan. Intercalación de paquetes de Ignimbrita y Tobas vitrolíticas de composición riolítica.	23
				Tm-ic: Unidad Las Cruces. Riolitas fluidales e ignimbritas liticas y vesiculares de composición riolítica.	
				Tom-ata: Unidad andesítica constituida por lavas, tobas y brechas.	

Figura 7. Columna litológica del P.H. Las Cruces. (CFE, 2013).

3.2.1 Unidad Las Cruces (Tm-ic)

Constituye el basamento a nivel local (figura 8) y está compuesta por un potente paquete de ignimbritas riolíticas con características de soldamiento diferencial y cambios texturales notables, por lo que ha sido dividida en tres miembros, precisamente de acuerdo con esas variaciones.



Figura 8. Unidad Las Cruces coronada por la unidad Corapan en M.I. (CFE, 2013).

El miembro inferior (Tm-ic1) corresponde a la base de este paquete ignimbrítico y está constituido por rocas de color rosa grisáceo, seudoestratificadas a masivas, compactas y muy resistentes, de textura piroclástica de grano fino, caracterizadas por formar lajas, las cuales se separan a través de los planos de fluidez (figura 9).



Figura 9. Ignimbrita Las Cruces, aguas abajo del eje de boquilla. (CFE, 2013).

El intemperismo y la erosión en estas rocas originan un material blanquecino deleznable con espesor menor a los 50 cm. Cabe aclarar que debajo de esta cobertura la roca es de buena calidad.

Las rocas del miembro inferior se distribuyen en la parte baja de ambas márgenes, inmediatamente aguas abajo del eje de cortina. El miembro medio (Tm-ic2) es una ignimbrita de color rosa grisáceo, que intemperiza igual que las rocas del miembro anterior, es decir a un material blanquecino deleznable, pero de espesor no mayor a los 30 cm, pues esta roca es masiva muy compacta, resistente, con textura piroclástica de grano medio, siendo la característica principal de este miembro los desarrollos de oquedades drusiformes y vacuolas por desvitrificación de hasta 5 cm de diámetro. Este horizonte igualmente aflora en ambas márgenes, aunque en mayor proporción en la margen derecha; se distribuye aguas abajo del Cerro Partido bordeando las porciones medias de ambas laderas. El espesor aproximado para este miembro

varía de 65 a 100 m. El miembro superior (Tm-ic3) constituye la cima y está formado por una ignimbrita riolítica con alto grado de soldamiento. Es una roca con estructura compacta masiva, densa, de alta tenacidad y mecánicamente muy competente. Su textura es piroclástica eutaxítica y su coloración varía de gris rosáceo en fractura fresca a pardo y gris oscuro al intemperismo; presenta lentes rojizas y blanquecinas. La diferencia con el miembro medio es que exhibe menos cantidad de cavidades y oquedades provocadas por desvitrificación, pero en cambio presenta abundantes “fiammes” riolíticas y pumicíticas con longitud y espesor variables de hasta 40 y 5 cm, respectivamente, predomina en la margen derecha coronando las partes altas; su contacto inferior es transicional, observándose un espesor aproximado de 150 m. Cabe mencionar que todo el macizo rocoso tiene un basculamiento promedio de 25° al noreste.

3.2.2. Unidad Corapan (Tm-c)

Se encuentra en la margen izquierda cubriendo concordantemente a la unidad Las Cruces. Está constituida por la alternancia de cuatro horizontes de tobas riolíticas con tres paquetes de ignimbritas de la misma composición, de los cuales el horizonte Tm-ct4 de las tobas queda fuera de la zona de la boquilla.

En conjunto este paquete de origen piroclástico presenta una gran variedad de grados de soldamiento, compacidad, texturas, alteraciones y competencia mecánica. Los miembros tobáceos (Tm-ct1-4), cuando la roca está sana, son compactos, bien consolidados, de densidad regular a alta y de buena competencia mecánica. Las tobas tienen textura piroclástica, variando de grano fino a grueso con fenocristales de feldespatos, cuarzo, máficos (hornblenda y biotita) y óxidos de hierro, en una matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato por desvitrificación. La coloración varía de gris violáceo a rojizo. Es muy frecuente la alteración por hematización, que afecta a estos horizontes a tal grado que en ocasiones se observan espesores importantes de material arcillo-arenoso cubriendo a la roca sana; también es notable que en zonas donde convergen fracturas o fallas importantes, las tobas se reducen como roca intacta a fragmentos de escasos centímetros de diámetro, tal es el caso del horizonte Tm-ct1, donde atraviesan las fallas Las Cruces y El Cantil, pues se encuentra superficialmente muy fragmentado debido en parte a su menor competencia mecánica comparada con las ignimbritas.

En el área de la boquilla aparecen los primeros tres horizontes a lo largo de toda la margen izquierda con espesores de 25 a 40 m en promedio. El horizonte Tm-ct1 corresponde a la base de la unidad Corapan y es el que se encuentra cubriendo a la unidad Las Cruces. Se caracteriza por estar afectado por las fallas Las Cruces, El Cantil y El Mango; estas dos últimas, ubicadas aguas abajo del eje, en la margen izquierda, zona donde ocasionan en dicho horizonte un escalón que da la impresión que se divide en dos. El horizonte Tm-ct2 se distribuye en forma paralela a la falla Los Bueyes, presenta las mismas características mecánicas que los otros y alcanza un espesor aproximado de 25 m. Finalmente el horizonte Tm-ct3 se encuentra en el límite oriente del área cartografiada, donde exhibe intercalado en forma de manto a un pórfido andesítico de 10

a 15 m de espesor. La toba de este horizonte se encuentra hematizada como consecuencia precisamente de la intrusión del pórfido antes mencionado, lo que ha disminuido en gran medida su calidad de roca, pero que se estima sin consecuencias para el proyecto, pues queda fuera de la zona de las posibles obras. El horizonte Tm-ci1 es el que se encuentra más ampliamente distribuido, formando partes planas o inclinadas de acuerdo a su buzamiento; es notable la mayor resistencia a la erosión con respecto a las tobas entre las que se encuentra intercalado, pues su amplia exposición comparada con estas últimas es muy marcada. El horizonte ignimbrítico Tm-ci2 igualmente se encuentra formando una parte plana y escalonada, aunque un poco menos expuesto que el anterior, se localiza al este de la falla Los Bueyes y en forma paralela a esta misma. Por último, el miembro Tm-ci3 aflora parcialmente en el extremo noreste del área de estudio. Las rocas de la unidad Corapan están basculadas al noreste con una inclinación de 20° a 25°. Topográficamente forman escalones debido a la diferente resistencia a la erosión entre tobas e ignimbritas (figura 10).



Figura 10.M.I. Unidad Corapan, cubriendo a Las Cruces, en zona boquilla, (CFE, 2013).

3.2.3. Rocas intrusivas

Con relación a las rocas intrusivas que afectan la zona de la boquilla, el cuerpo pórfido andesítico (Tm-pa) que se observa emplazado en forma de diquestrato dentro del horizonte tobáceo Tm-ct3, corresponde a una roca de estructura compacta, masiva, muy densa, de alta dureza y resistencia mecánica. Presenta hematización, propilitización y silicificación; tiene textura afanítica a porfídica y es de color gris verdoso a rojizo. Diques diabásicos (Tm-p-dd) son cuerpos tabulares con actitud vertical a subvertical emplazados en las rocas piroclásticas antes descritas.

Dentro del área de la boquilla se encuentran tres en la margen izquierda. El primero de ellos se ubica en el miembro Tm-ic3 de la unidad Las Cruces, aflorando aproximadamente a lo largo de

400 m con un espesor promedio de 1,50 m. Se observa compacto, denso, de color gris oscuro a verdoso y textura afanítica; ocasionalmente muestra alteración propilítica. Su orientación es casi norte-sur con una inclinación de 88° al oeste. El segundo se encuentra en el horizonte tobáceo Tm-ct3 de la unidad Corapan, mide aproximadamente 250 m de longitud y tiene 1,50 m de espesor; es una roca compacta, muy resistente, densa, de textura afanítica y coloración gris oscura a verdosa; presenta un rumbo $N20^\circ W/75^\circ NE$. El tercer dique se ubica en el extremo sur del corte en balcón No. 9 afectando al miembro Tm-ic3 de la unidad Las Cruces, con un rumbo $N15^\circ W$ y 87° de inclinación al SW; se observa aflorando en un tramo de aproximadamente 50 m con espesor de 1,20 m; aparece muy alterado y presenta una coloración gris verdosa, superficialmente es deleznable, poco compacto y de textura afanítica a porfídica (figura 11).



Figura 11. Dique diabásico totalmente alterado con espesor de 1,20 m. (CFE, 2013).

3.2.4. Depósitos no consolidados

Respecto a los depósitos no consolidados, el aluvión (Qal) está formado por fragmentos de diferente composición y tamaño variable que va desde material limo-arenoso hasta bloques gigantes subredondeados de 2 a 3 m de diámetro. Se distribuye en ambas márgenes del río San Pedro, aguas arriba y abajo del eje de la boquilla, con espesores no mayores a los 8 m. El suelo residual (Qsr) está compuesto por material arcillo-arenoso, originado por la desintegración in situ de las rocas expuestas en la zona; es de color rojizo o blanquecino, dependiendo de la roca de origen.

Se encuentra depositado principalmente en las partes planas de la margen izquierda, aguas abajo del eje de la boquilla, con espesores que no rebasan los 3 m. Por último, los depósitos de talud (Qt) se refieren a fragmentos líticos angulosos a subangulosos, de tamaños variables que van desde fragmentos de 5 cm hasta bloques de algunos metros de diámetro, empacados en una matriz arcillo-arenosa. Se encuentran distribuidos en ambas márgenes principalmente en las porciones medias de las laderas con espesores de 1 a 4 m.

CAPÍTULO IV. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El PH Las Cruces se caracteriza por estructuras con orientación N-S a NNW-SSE y basculan al ENE como los semigrabens Álica, Pajaritos y Jesús María y las fallas normales de Pochotitán y San Pedro que son el resultado de un desplazamiento extensional con dirección ENE-SW y se pueden considerar parte de la Península de Baja California.

Las discontinuidades que afectan el PH Las Cruces, consisten de fallas normales, lineamientos estructurales, contactos geológicos de diques y domos, y zonas de rompimientos o fracturas con orientaciones NW-SE, NE-SW, N-S y E-W. Las discontinuidades principales del embalse consisten de fallas normales, intrusiones, domos y fracturas (figuras 12 y 13).

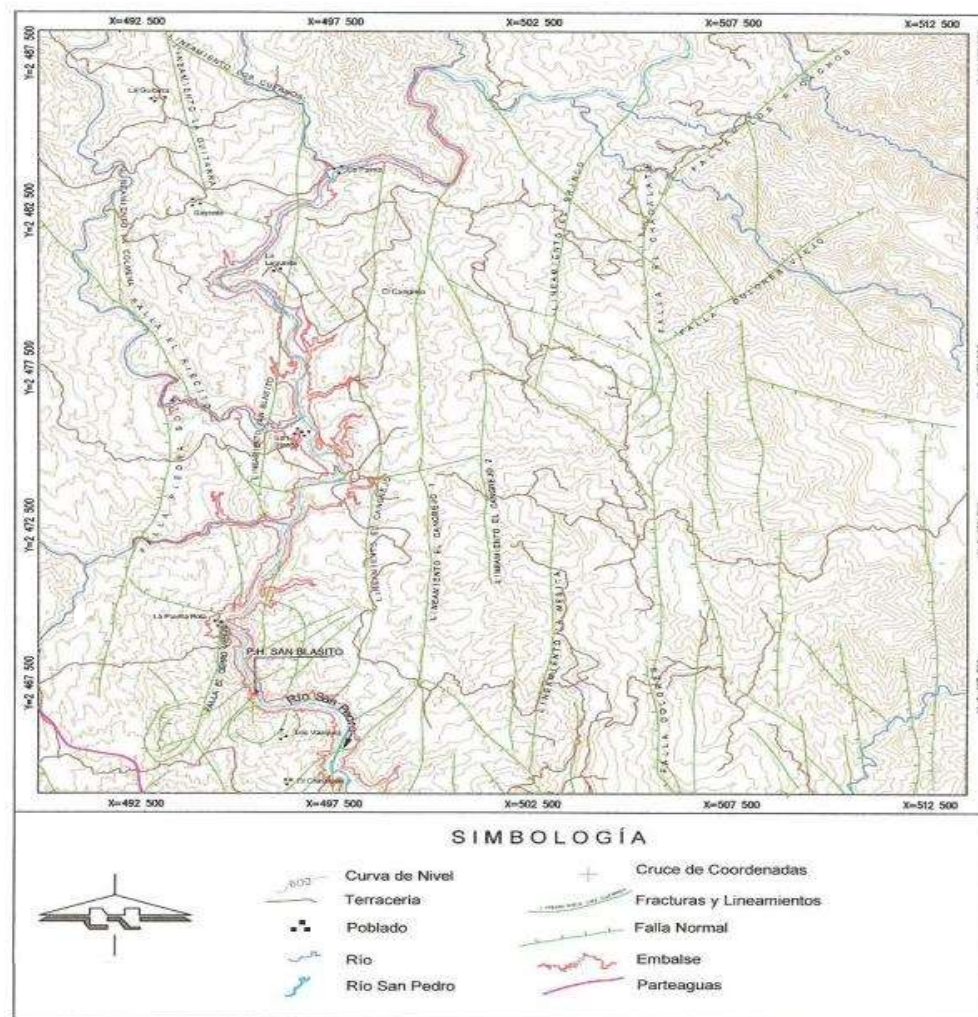


Figura 12. Lineamientos Zona Norte aguas arriba de la zona de estudio. (CFE, 2013).

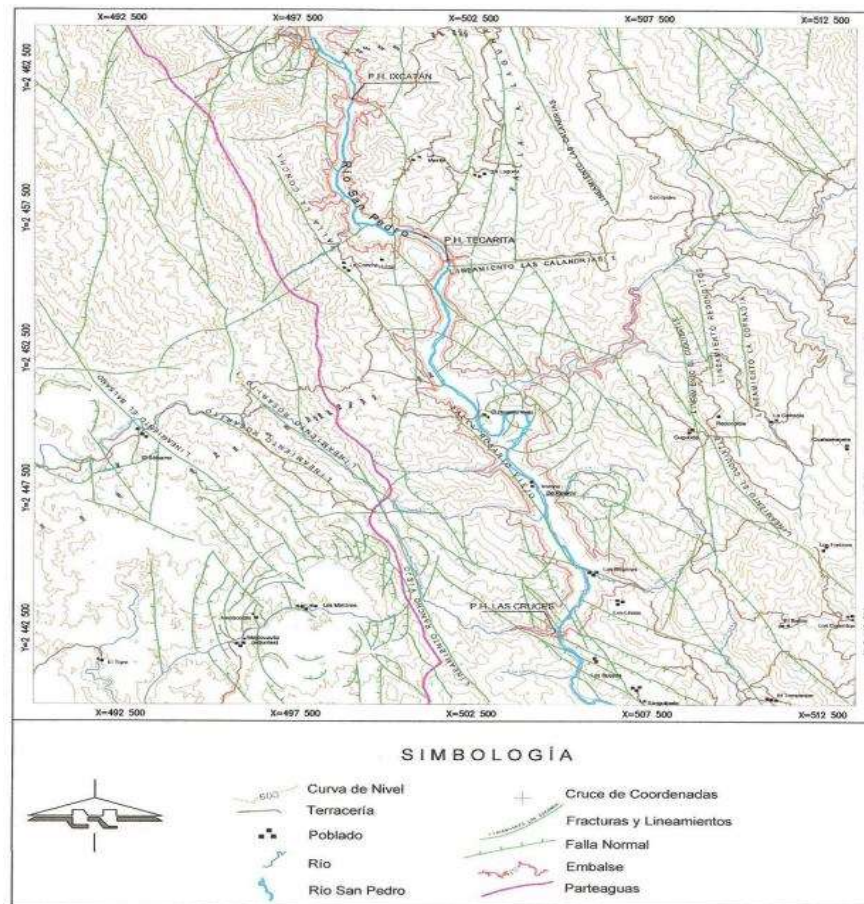


Figura 13. Lineamientos Zona Centro y Sur del embalse PH Las Cruces. (CFE, 2013).

En la zona predominan las fallas normales y lineamientos, cuya actitud está acorde con dos patrones principales. Las principales discontinuidades en el área de la boquilla son fallas, fracturas y seudoestratificación. El fallamiento es frecuente, y está representado por fallas normales con rumbo NW-SE y buzamiento al SW con tendencia vertical, sólo las fallas El Cantil, Los Bueyes, Las Cruces, Bordones y la PHC-2, se les considera como importantes, por su continuidad, zona de influencia y posible relación con las obras proyectadas; sin embargo, las 3 primeras fueron exploradas por los barrenos PHC-2, PHC-3 y CRI-3 respectivamente y se pudo comprobar que las zonas de falla son de poco espesor, y que varían entre 5 y 7 m.

4.1 Recopilación de datos estructurales

Las principales estructuras geológicas que afectan a las unidades de roca expuestas en la alternativa Rancho Viejo son fallas y fracturas, producto de la tectónica regional, que dio origen a una serie de bloques escalonados; adicionalmente se tienen discontinuidades asociadas a planos de estratificación y contactos geológicos.

4.1.1. Fallas

En la zona existe un marcado patrón estructural de orientación general NW-SE, que corresponde con las principales fallas geológicas que la afectan, en la tabla 2 se presentan las principales características de esas estructuras.

Tabla 2. Principales fallas alternativa Rancho Viejo (CFE, 2013).

Falla	Rumbo y echado	Descripción
PHC-1	NW22°SE/65°SW	Traza irregular en MD y cauce del Río San Pedro. Zona de cizalla en superficie, a profundidad tiene emplazado un dique diabásico.
PHC-2	NW25°SE/75°SW, NW58°SE/68°SW y NW30°SE/75° SW	Estructura alabeada que afecta la MD. En la zona de falla se identificó un dique diabásico..
Escarpe	N-S/75°E, NW15°SE/78°NE	Traza irregular, contacto roca a roca y en tramos zona de falla con relleno de arcilla.
Las Cruces	NW13°SE/85°SW	Estructura alabeada irregular, afecta ambas márgenes, dique diabásico emplazado en la margen izquierda, ha sido erosionado, dejando expuesta la abertura de 4,20 m.
El Portal	NW30°SE/70°SW a NW11°S/78°SW	Traza irregular, con dique emplazado en la zona de falla.
El Cantil	NW60°SE/70-80°SW	Afecta la margen izquierda y tiene emplazado un dique de composición diabásica.
Los Bueyes	NW20°SE/72-85°SW	Principalmente afecta la margen izquierda, en la derecha su echado varía de 60 a 75°; tiene emplazado un dique diabásico.

Las principales estructuras geológicas que afectan la zona de la cortina son las Fallas Zacatal, Las Cruces, Escarpe y PHC-1, de las cuales destaca por su extensión y características la Falla Las Cruces, cuya traza corta el eje propuesto para la cortina con rumbo general NW-SE; en esta estructura se encuentra alojado un dique diabásico. Las condiciones geológicas son favorables para el desplante de la cortina en el sitio Rancho Viejo, y es posible garantizar el cierre hidráulico, aunque existe permeabilidad secundaria en zonas de falla y de alto fracturamiento, las fallas están selladas por diques diabásicos. Sin embargo, en la parte superior de la margen

derecha el pie de la presa se ubica muy cercano a una gran cañada (que descarga al arroyo Rancho Viejo) con una pendiente pronunciada, asociada a la falla PHC-1, cuyas implicaciones a la estructura requieren ser evaluadas a detalle. Existen materiales de cobertura y roca descomprimida que podría presentar problemas de desprendimiento de bloques, entre las cotas 90 a 120 m., influenciado por el fracturamiento y la estratificación de la ignimbrita descomprimida. Para ambos túneles de desvío sus problemas podrían presentarse en el dique diabásico de la Falla Las Cruces y sus fracturas asociadas. Para el caso del portal de salida, podría tener deslizamientos de bloques en los taludes ya que esta zona muestra un intenso fracturamiento provocado por las Fallas El Cantil, El Portal, Falla El mango y la Falla PHC-1, lo que ha provocado la formación de bloques. Para la alternativa Las Cruces de ECC, las estructuras que afectan, son: Falla PHC-1, Falla PHC-2, Falla PHC-3, Falla El Portal, Falla El Cantil, Falla Las Cruces y Falla El Mango. Los sistemas de fallas principales presentan un rumbo (1) NW 50° a 60° SE y (2) NW 20° a 25° SE (figura 14), al primero corresponde las siguientes fallas: Bordones, Piedra parada, El Risco (falla secundaria o conjugada a la Falla Bordones), El Cantil, El Mango, Soyamichera y Los Limos; al segundo pertenecen las fallas como son: Los Bueyes, Las Cruces, PHC-1, PHC-2, y PHC.3. Ambos sistemas de fallas se formaron por el basculamiento de bloques del terreno volcánico, que provocaron fallas de tipo normal inclinados al SW.

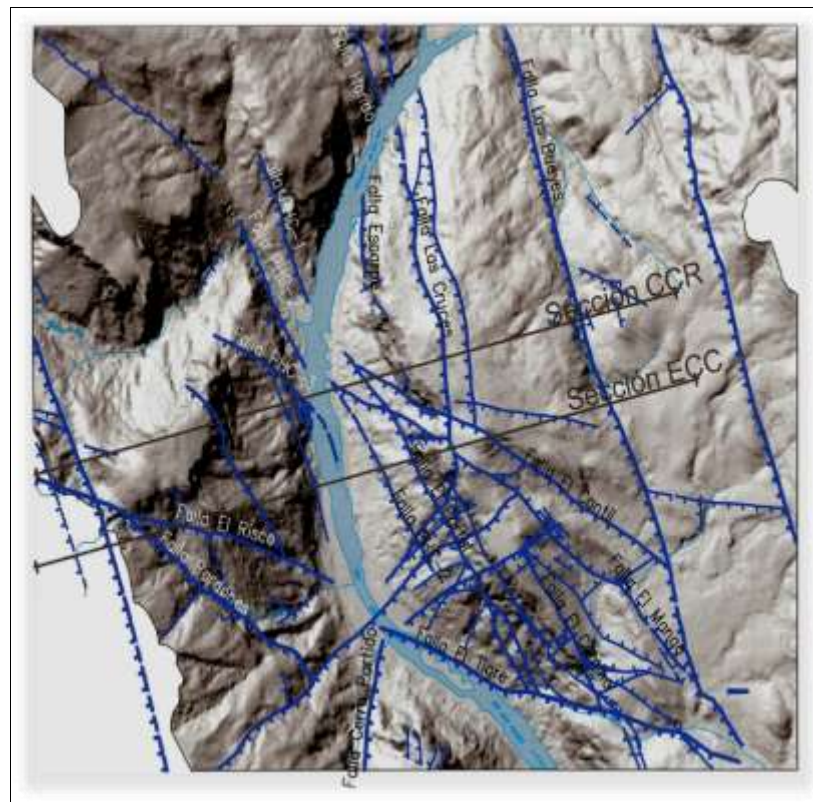


Figura 14. Distribución de fracturas y fallas normales principales en la boquilla. (CFE, 2013).

Las secuencias ignimbríticas de las formaciones Las Cruces y Corapan se inclinaron al NE con 20°; contemporáneo al sistema de fallas se produjo un sistema de fracturas y fallas normales de longitud pequeña y con un rumbo de NE30°SW que controlan la dirección del río aguas arriba de la cortina, así como los quiebres que tiene el arroyo Rancho Viejo, ubicado frente al portal de entrada de la tubería de presión en la margen derecha. La dirección del río se originó por la conjugación de los sistemas de fracturas NW20° a 25° SE y NE30°SW. La descripción de estructuras es la siguiente:

4.1.1.1. Falla PHC-1

Afecta al macizo rocoso en la margen derecha y cruza la obra de contención a los 280 m a partir del cauce, tiene una longitud de aproximadamente 600 m y un rumbo NW22°SE e inclinación de 65° a 75° al SW. En esta se encuentra emplazado un dique de composición diabásica.

4.1.1.2. Falla PHC-2

El rasgo de la falla normal PHC-2 se identifica principalmente en la margen derecha, con una longitud aproximada de 550 m y una orientación general NW25°SE con echado de 75°SW hacia el macizo rocoso. Esta falla es cortada por los barrenos BLC-4 y BLC-6, en ambos barrenos se distingue el emplazamiento de un dique diabásico, se infiere que dicha estructura continúa por el cauce del río.

4.1.1.3. Falla PHC-3

La falla normal PHC-3, se identifica sólo en la margen derecha, con longitud aproximada de 220 m y forma curva, con una orientación NW47°SE con echado de 63° al SW, a la altura del nivel del río a unos 60 m ladera arriba gira y cambia de orientación a NW67°SE con 62°SW, continúa con este rumbo unos 150 m más, hasta los depósitos de talud que se formaron sobre la margen derecha del arroyo Rancho Viejo. Esta falla se distingue por el material de molienda de falla y el emplazamiento de un dique de composición diabásica.

4.1.1.4. Falla El Portal

La falla se localiza en la entrada del socavón 1 exploratorio de la margen izquierda y termina al SE cuando se acuña o topa con la Falla El Tigre. Tiene un rumbo NW37°SE y un buzamiento de 70° hacia el SW. Su extensión es de aproximadamente de 760 m. Esta falla fue explorada con el barreno BLC-15 y en la cual se encuentra emplazado un dique diabásico, que se encuentra expuesto a la entrada del socavón exploratorio 1.

4.1.1.5. Falla El Cantil

Cruza en forma diagonal a los ejes de cortina. En superficie tiene un rumbo general de NW 65°SE y buzamiento de 70° a 80° al SW, su longitud es de 500 m, va desde la zona acantilada y hacia el Este se interrumpe por la Falla Los Bueyes. La falla se exploró con barrenos en donde se encontró arcilla de color rojo a amarillo ocre con fragmentos del tamaño de las gravas de ignimbrita, con alteraciones hidrotermales (sericita y clorita) y supergénica (hematita).

Dentro de la Falla El Cantil se encontró un cuerpo intrusivo diabásico de 6 m de espesor intensamente fracturado y fallado. En el socavón exploratorio 1 se determinó la presencia de una secuencia mineralógica de caolinita-micas-esmectita. Esta falla se considera importante por el espesor del dique y el salto mayor a 10 m, en unión con la Falla El Mango y la Falla Camino, generan un conjunto de fallas que provocan una zona de una fosa tectónica (*graben*), al SW de la Falla El Cantil.

4.1.1.6. Falla El Mango

La discontinuidad es paralela a la Falla El Cantil con un rumbo NW50° SE y con una inclinación de 88° al NE. Esta falla forma junto con la Falla El Cantil una fosa tectónica (*graben*) de 580 m de longitud y 90 m de espesor. La falla fue cortada por el barreno BLC-15 y BLC-1 en donde se encontró un dique diabásico de color verde a negro.

4.1.2. Socavón exploratorio

La excavación atravesó diferentes discontinuidades durante su desarrollo, y se identificaron tanto en el túnel principal como en el crucero, las siguientes: Falla –Dique, fallas y fracturas.

4.1.2.1 Fallas – Dique

Las fallas diques (tabla 3), que fueron cortadas por la excavación son diques diabásicos muy fracturados con alteración propilítica y presencia de arcillas de color pardo semiplásticas al alto y bajo del dique, al alto es mayor el espesor de arcillas. El rumbo promedio es de NW47°SE con echado de 68° al SW y con espesores que varían de 2 a 9,5 metros.

Tabla 3. Datos estructurales de las fallas-dique. (CFE, 2013).

Falla – Dique	Rumbo	Echado	Espesor
El Portal	NW15° a 38° SE	60° a 80° SW	7,5 a 3,8 m
Los Marcos	NW42° a 58° SE	64° a 74° SW	6,9 a 9,5 m
Las Cruces	NW20° a 22° SE	75 a 80° SW	2,00 a 2,80 m
El Mango	NW61° a 43° SE	80° a 62° SW	6,60 a 5,80 m
El Crucero	NW89° a 86° SE	77° a 70° SW	0,40 m
El Triunfo	NW46° a 31° SE	87° a 76° SW	0,90 a 1,20 m

4.1.2.2. Fallas

Son estructuras con planos de superficies de lisas a onduladas y en ocasiones rugosas con apertura de 0,005 a 0,05 m, rellenas de arcilla que va de plástica a semiplástica de color pardo y gris, con impregnaciones de calcita, hematita y clorita. El espaciamiento entre fallas varía de 1 a 30 metros.

4.1.2.3. Fracturas

Por otra parte, las fracturas son la segunda discontinuidad más importante en la zona de la boquilla, para establecer los patrones de comportamiento en la margen derecha se llevó a cabo un análisis estereográfico con 535 datos estructurales, tomados en los miembros de las unidades Las Cruces y Corapan, lográndose definir cuatro sistemas preferenciales de fracturas, que en orden de importancia son:

El primer sistema presenta un rumbo e inclinación de NW35°SE con 74° al SW; el segundo aparece con una tendencia al NE50°SW con 84° al SE, para el tercero una dirección NW09°SE con 87° al SW y el cuarto sistema con dirección NW83°SE con 76° al SW. Estas discontinuidades tienen planos con superficies planas a rugosas con finas películas de calcita y hematita, con abertura 0,005 m a cerradas, el relleno consta de arcillas de tonos pardos que varía de poco plástica a no plástica, y están secas, no existe humedad. Los estereogramas de las fallas, fracturas y estratificación dan como resultado que existen cinco sistemas que afectan el área del socavón. Los más importantes son las familias 1 y 2 que pertenecen a la orientación de las fallas que afecta la región. Las familias 3 y 4 muestran un sistema de fracturas como resultado de los esfuerzos resultantes de las fallas y el sistema 5 que es la orientación de los planos de la pseudoestratificación de la Ignimbrita de composición riolítica (Tm-ic2), (tabla 4).

Tabla 4. Discontinuidades que afectan al socavón. (CFE, 2013).

Familia	Rumbo y echado
F1	NW24°SE/73°SW
F2	NW31°SE/73°SW
F3	NW03°SE/69°SW
F4	NE49°SW/86°SE
F5	NE49°SW/87°NW
F6	NE15°SW/06°SE

Desde el punto de vista estructural la margen derecha se encuentra afectada por discontinuidades como son: fallas, fracturas y estratificación. Dentro de las fallas que por su extensión y continuidad pudieran ocasionar un riesgo para las obras civiles son: Falla Bordones, Falla PHC-2 y Falla El Risco, las fallas son de tipo normal con un dirección preferencial NW-SE y con buzamiento hacia el SW. Asimismo, la margen izquierda se encuentra afectada por fallas de importancia como son: Falla Los Bueyes, Falla El Cantil y Falla Las Cruces son de tipo normal con un rumbo preferencial NW-SE e inclinación hacia el SW. Las discontinuidades estructurales que afectan el área del embalse del PH Las Cruces, consisten de fallas de tipo normal, lineamientos estructurales, diques, domos, algunas estructuras circulares y fracturas; las direcciones preferenciales o principales conservan orientaciones NW-SE, NE-SW, N-S y E-W.

Las discontinuidades principales del embalse consisten en fallas de tipo normal, diques, domos y fracturas. Existen lineamientos paralelos entre sí con orientación N-S como los denominados Cangrejo, Cangrejo 1, Cangrejo 2 y lineamiento San Blasito, este último se encuentra cortando parte de la zona del embalse aguas arriba del PH San Blasito hacia la cola de dicho embalse. Con esta misma orientación se tienen las fallas Dolores y El Chacalate. Todos estos lineamientos a pesar de la extensión de algunos de ellos, no implican riesgo para el embalse. Por otro lado, los lineamientos Las Calandrias 1 y Los Gatos presentan direcciones relacionadas a los sistemas E-W; el primero se ubica aguas abajo de la alternativa PH Tecarita y se mantiene paralelo al arroyo del mismo nombre y el segundo se ubica a 500 m aguas abajo del poblado San Blasito. Existen fallas importantes aledañas al área de estudio y estas son: Los Cuernos, El Riecito, La Laguna, La Concha, El Bálsamo, Rosarito, Rosarito 2, El Cuguixtle, Redonditos y La Cofradía que se relacionan al sistema de discontinuidades con dirección NW-SE y con posible buzamiento hacia el SW, se asocian al trazo que lleva la falla Rosario Viejo. Desde el punto de vista geológico, destacan las fallas normales y lineamientos por su relativa frecuencia y marcada tendencia estructural al noroeste-sureste, con buzamiento hacia el suroeste, tal y como se puede observar en las figuras 15 y 16. De las principales fallas identificadas en la zona, se deduce que existen dos sistemas principales, uno orientado de manera preferencial al NW30°SE con buzamientos al SW y el segundo al NW60°SE con buzamientos de igual forma al SW.

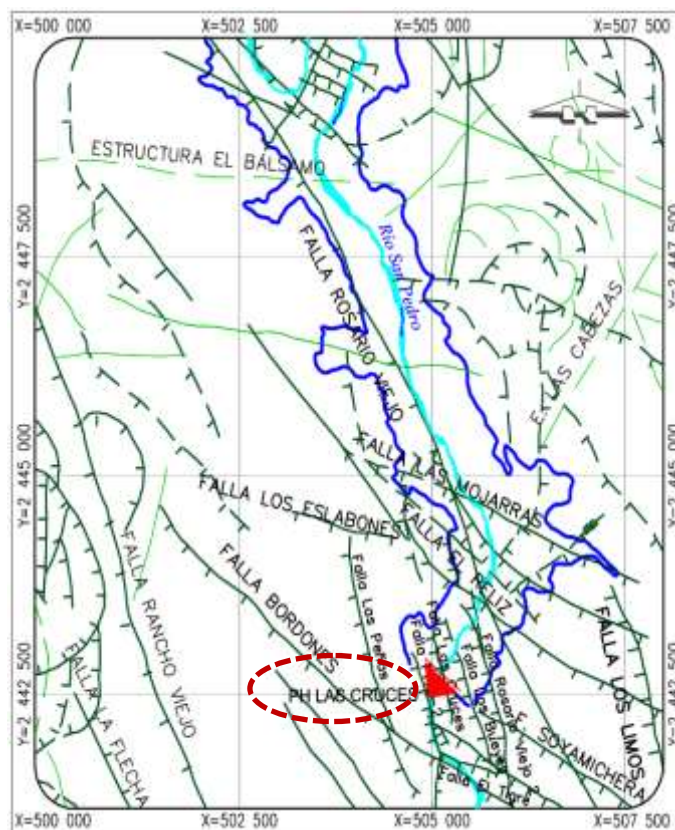


Figura 15. Principales fallas y lineamientos en la zona de la Boquilla.

Al primer sistema pertenecen las fallas Agua Amarilla, Rosario Viejo, Las Peñas, Los Limos, Los Bueyes, Las Cruces, PHC-2, Rosario Viejo2, La Concha y los lineamientos Rancho Viejo y Cuguixtle, en tanto que al segundo sistema pertenecen las estructuras Bordones, La Soyamichera, Los Elotes, El Reliz, Las Mojarras y el lineamiento Rosarito y varios más. También se observan un tercer sistema de fallas no tan frecuentes pero si importante con orientación casi Norte-Sur principalmente observado en la zona del PH Tecarita. Por lo general, estas estructuras muestran en superficie una traza irregular, cuya expresión más notable se refiere a zonas de espesor variable de roca triturada, con planos de falla alabeados de tendencia vertical.

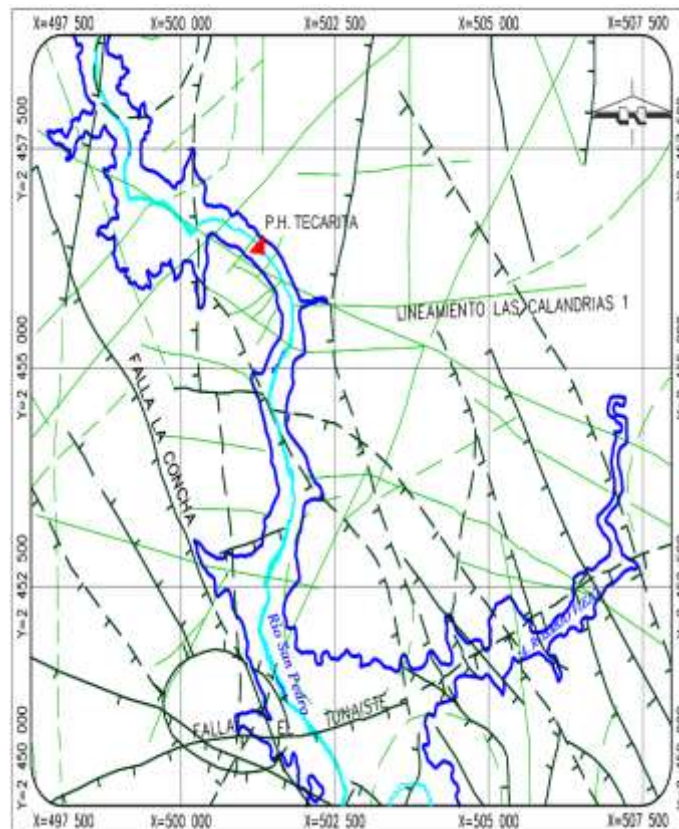


Figura 16. Fallas y lineamientos en la zona del PH Tecarita.

4.1.3. Zonas potencialmente inestables

Tomando como base el trabajo realizado en agosto del 2012 y de acuerdo al nivel de estudio que guarda actualmente el proyecto, motivó la revisión y análisis de las condiciones geológicas en el área del embalse, con el fin de identificar zonas con taludes inestables y visualizar su posible impacto en el proyecto. Se consideró necesario incluir las zonas inestables identificadas hasta aproximadamente 15 km aguas arriba de la boquilla. A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas.

4.1.3.1. Zona 1

Se localiza al NE de la obra de contención como a 2,3 km en línea recta y sobre la margen derecha del arroyo Mojarras, a 1 km aguas arriba de la confluencia de este con el río San Pedro. Se encuentra constituida por ignimbritas líticas riolíticas de la unidad Soyamichera. Lo relevante de esta zona, es que se ubicó un bloque de roca de las siguientes dimensiones: 42 m de largo por 20 m de ancho y 20 m de alto, el cual está formado por la combinación de una falla con un fracturamiento con relleno de arcilla sobre un plano muy inclinado, aunado a lo anterior, el agua del embalse estará al pie de dicho bloque y por lo tanto, el apoyo del mismo se espera que se sature y erosione, quedando éste en una posición muy inestable ya que en un momento puede colapsar.

4.1.3.2. Zona 2

Se ubica sobre la margen derecha del río San Pedro a 2.5 km aguas arriba del eje de la cortina. Sus coordenadas UTM son: X- 505 055 E; Y- 2 445 187 N. La roca que se observa es una roleta de color rojiza de estructura masiva textura porfídica. El posible mecanismo de deslizamiento es el de falla tipo cuchara y sus límites son: unas fracturas paralelas al cauce del río y dos fallas geológicas perpendiculares al mismo. Las dimensiones de la zona inestable son de un ancho de 170 m en la base y 110 m en la cima. Cuando el embalse este a su máxima capacidad, cubrirá permanentemente esta zona. Sin embargo, se considera riesgoso en las primeras etapas del llenando, ya que este material se saturará y muy probablemente colapsara esta zona, con posibilidad de formar un tapón natural sobre el cauce del río.

4.1.3.3. Zona 3

Se encuentra a 6,3 km aguas arriba del eje de cortina, siguiendo el cauce del río San Pedro, sobre la margen izquierda. Las coordenadas son: 504 208 E; 2 448 441 N y se ubica entre las cotas 260 y 340 msnm. Se trata de una ladera con inestabilidad en su base, ya que en ésta se encuentra el contacto de los derrames riolíticos de la unidad (Tm-r) con las ignimbritas líticas de composición riolítica de la unidad Soyamichera (Tm-s).

Las ignimbritas han sufrido alteración por argilitización, por lo que la roca tiene poca cohesión y se encuentra en proceso de convertirse en arena y arcillas blancas. En la ladera se presenta un cambio de pendiente en la zona del contacto entre estas dos unidades, y es precisamente donde quedará el NAME del embalse, por lo que se prevé que la variación del nivel de agua empezará a erosionar y/o a cavitarse la parte baja de las ignimbritas alteradas, lo que puede provocar que se deslave el soporte del talud, iniciando un movimiento de masa por medio de una falla tipo cuchara.



En años anteriores, ocurrió un deslizamiento de menor proporción, el cual dejó como característica un afloramiento que permite observar la alteración de la roca. El frente del talud identificado, tiene una dimensión aproximada de 150 m y su longitud lateral es de 90 m, con estos datos se calcula que la superficie a deslizarse podría ser de 1,35 ha. Sin embargo, no se tiene conocimiento del espesor de la roca alterada por lo que por el momento no se puede calcular el volumen de material a deslizarse.

4.1.3.4. Zona 4

Se ubica a 9 km en línea recta del eje de cortina sobre la margen izquierda del río San Pedro. Esta zona también se considera sobre la margen izquierda del arroyo Rosario Viejo, a unos 1700 m de la confluencia de dicho arroyo con el río principal. Sus coordenadas UTM son: X= 503 848 (E); Y= 2 451 641 (N). Está constituida por un pilar de ignimbrita lítica riolítica de la unidad Soyamichera de color rosa a gris, de textura eutaxítica, con estructura compacta, masiva formada de una sola pulsación ignimbrítica. Este pilar está dividido por fracturas paralelas de 70° de inclinación; formando bloques con caras de hasta 40 m de altura, y algunos de ellos pueden deslizarse a través de una fractura de bajo ángulo localizada en este macizo.

4.1.3.5. Zona 5

Se encuentra en la confluencia del arroyo las Calandrias con el Río San Pedro sobre la margen izquierda, a 500 m aguas abajo del PH Tecarita y a 12 km en línea recta del eje de cortina, en las coordenadas: X= 502 000 E; Y=2 454 000 N y Z= 220 msnm. Se trata de una estructura tabular, constituida de ignimbritas líticas, de color rosa claro a blanco, de textura eutaxítica y estructura masiva y compacta; se encuentra basculada al NE siguiendo el mismo patrón que se encuentra en el estrechamiento las Cruces, lo que ayuda o mantiene la estabilidad del escarpe. La erosión que ha generado el cauce del río ha ido labrando la pendiente hasta formar una ladera de 70° a 80° en donde se aprecia la estratificación de las ignimbritas. Se determinó que las fracturas en la pared de la margen izquierda, no generan bloques inestables, ya que su buzamiento es hacia el macizo rocoso y son casi verticales. Además, la pseudostratificación es de bajo ángulo y buza hacia el NE, generando un plano de estabilidad en el cual descansa cualquier bloque que se pudiera generar.

En esta zona solo se identificó un bloque aislado que tiene posibilidades de deslizarse sobre la margen izquierda del río San Pedro. Se trata de un filón o punta de ignimbrita lítica que forma un cuerpo tabular, de cuatro caras al que segmenta una fractura de bajo ángulo, por la cual se puede deslizar en dirección del río. Si consideramos la cota que tendrá el embalse, este quedará en la base de la fractura mencionada, por lo que se le considera a este bloque como potencialmente inestable. Las dimensiones del bloque son: 30 m de altura, 15 m de frente y 10 m de espesor, por lo que nos da un volumen de 4 500 m³.

4.2 Análisis Estadísticos

El análisis estadístico de la margen izquierda se realizó con 592 datos estructurales correspondientes a los planos de las fracturas de las unidades Las Cruces y Corapan, se determinó la presencia de tres sistemas de fracturas principales.

El primer sistema tiene un rumbo NE46°SW con inclinación de 86° al NW; el segundo sistema se orienta al NW10°SE con inclinación de 84° al SW y por último el tercer sistema presenta un rumbo NW58°SE con buzamiento de 81° al SW (figura 17), mientras que en la margen derecha el análisis de fracturas se efectuó con 535 datos estructurales determinando cuatro sistemas de fracturas principales. El primero con orientación NE50°SW/84°SE; el segundo se orienta al NW9°SE/87°SW.

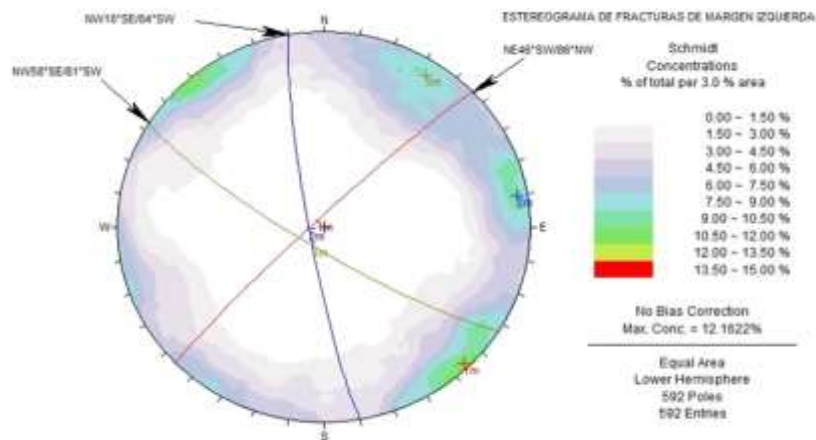


Figura 17. Estereograma de fracturas MI, alternativa Rancho Viejo.

El tercero NW35°SE/74°SW y el cuarto sistema con rumbo NW83°SE/76°SW (figura 18).

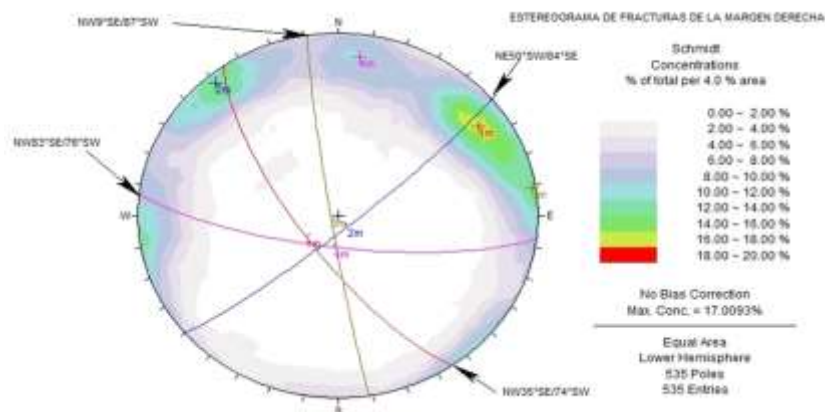


Figura 18. Estereograma de fracturas MD, alternativa Rancho Viejo.

Finalmente, el comportamiento de la estratificación (64 datos estructurales para la margen derecha y 19 para la margen izquierda) la cual se manifiesta principalmente en los miembros tobáceos de la unidad Corapan y tiene la misma dirección e inclinación de las estructuras de flujo de la unidad Las Cruces. En la margen derecha la dirección e inclinación promedio es NW49°SE/22°NE, mientras que en la izquierda se tiene un rumbo y echado de NW55°SE/18°NE (figuras 19 y 20).

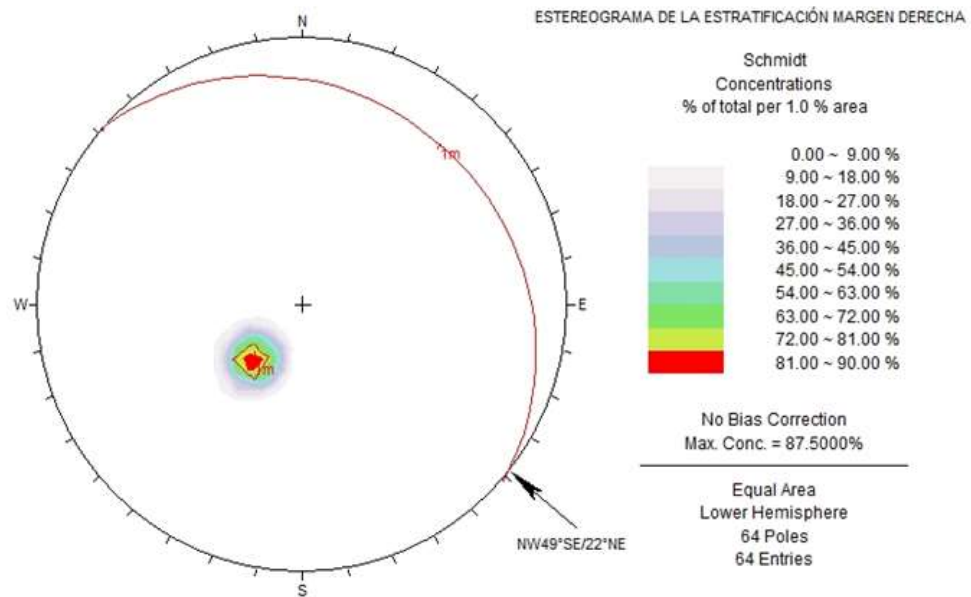


Figura 19. Estereograma de la estratificación MD, alternativa Rancho Viejo.

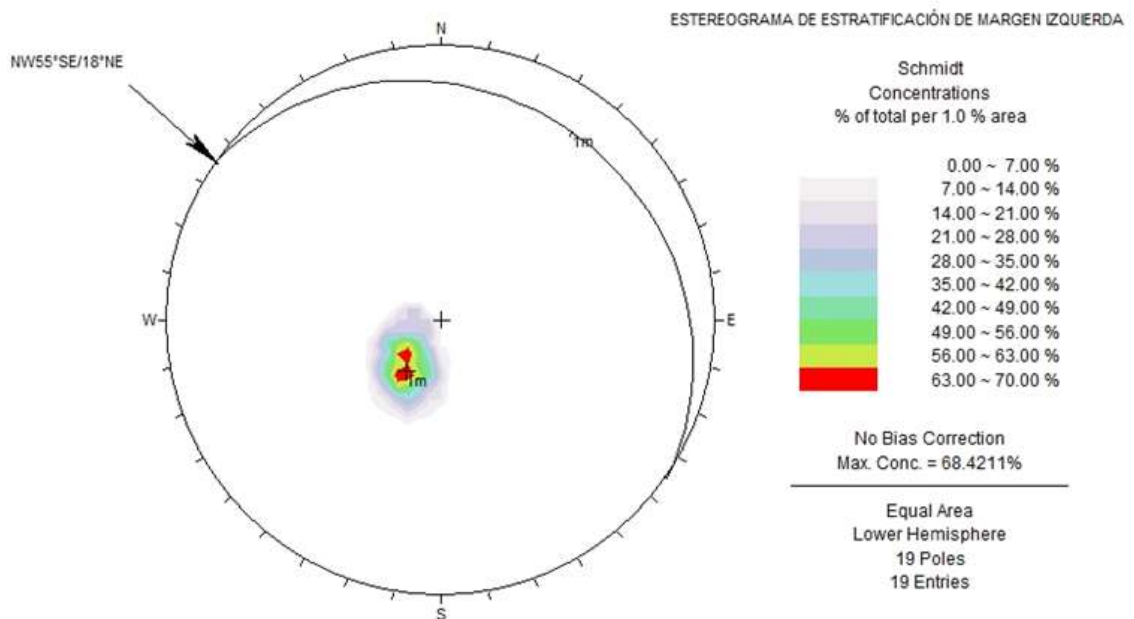


Figura 20. Estereograma de la estratificación en MI, alternativa Rancho Viejo.

Se efectuó el análisis de las principales características estructurales del sitio. Donde se tienen que la unidad Las Cruces (Tm-ic2) consiste de rocas de buena a excelente calidad no obstante está afectada por diversas fallas (figura 21), principalmente con dirección NW-SE que cruzan al río San Pedro al nivel de la cortina, (Fallas F-120, F-88, F-89, Cascabel, Las Cruces, El Escarpe, PHC-1), además de otras en dirección transversal al río que atraviesan ambas márgenes y que también afectan a algunas partes del proyecto.

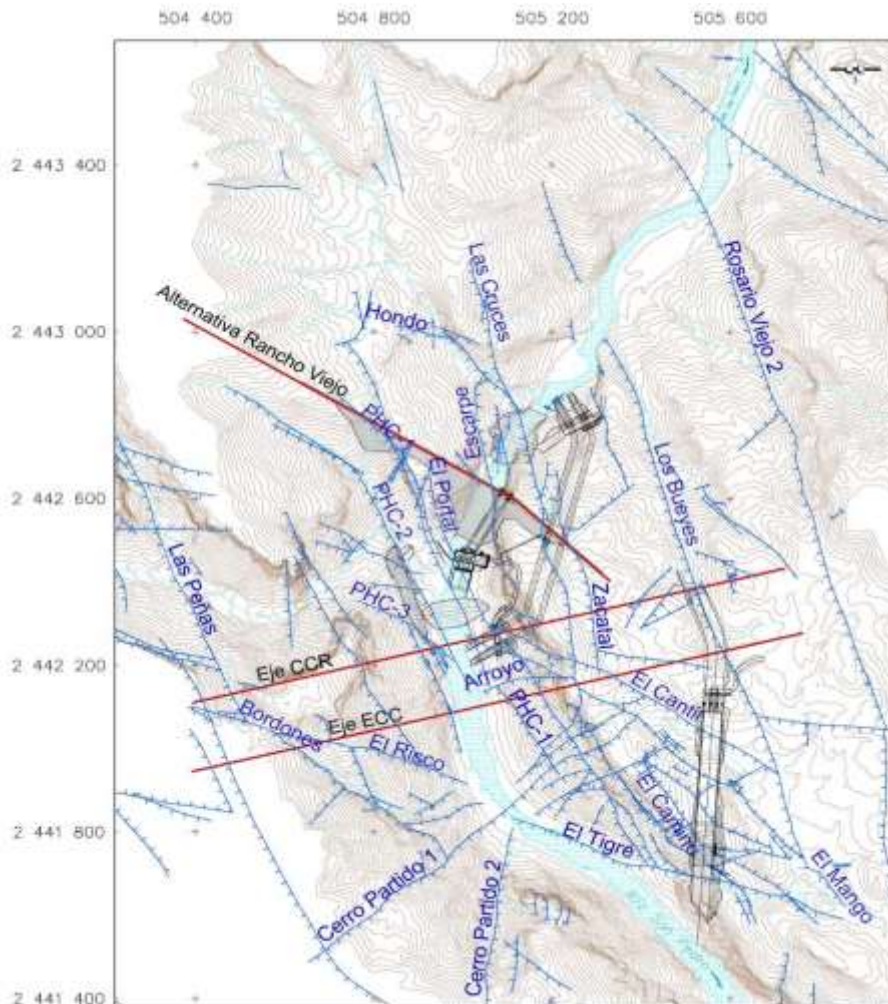


Figura 21. Fallas geológicas en zona de boquilla y zona de obras. (CFE, 2013).

Estas estructuras consisten de fallas normales, diagonales o de transcurrancia que presentan franjas delimitadas de afectación, con fracturamiento y material cataclástico que tienden a disminuir las condiciones mecánicas y de permeabilidad, lo que implica que será necesario el tratamiento e impermeabilización, pero afortunadamente en muchas de las ocasiones están emplazadas con intrusivos diabásicos que mejoran notablemente las condiciones de la masa rocosa a profundidad. Estos sectores están restringidos y se concentran a las zonas de falla, sin afectar al resto del macizo rocoso como se pudo comprobar en los dos socavones exploratorios

de la margen izquierda. Un sistema de soporte adecuado podrá evitar inestabilidades en las obras subterráneas y cortes superficiales y con un tratamiento de inyecciones disminuir las posibles filtraciones en fallas y zonas de fracturas. Se identificaron cinco familias de discontinuidades principales que corresponden a la estratificación (S0); y cuatro a fallas y fracturas (S1, S2, S3 y S4). Con base en los análisis de estabilidad no se anticipan problemas importantes de inestabilidades, sin embargo, en la zona del embalse, se constataron algunos deslizamientos (pequeños y grandes), los cuales se han asociado a rocas meteorizadas y fracturadas de baja resistencia que han fallado a favor de la inclinación del terreno, por lo que se requiere de una definición del impacto y solución que pudieran ocasionar. También, se presentan en ambas márgenes de la boquilla, bloques potencialmente inestables formados entre la pseudoestratificación y los otros sistemas de discontinuidades por lo que se deberá contar con un análisis detallado de estabilidad y amacice de estos bloques.

Con base en el levantamiento de fallas y fracturas realizado en la zona del proyecto por los geólogos de la CFE, las orientaciones se vaciaron en una roseta de distribución de rumbos (figura 22) en la que definió cuatro familias preferenciales. La familia S1 corresponde a la más persistente y de mayor continuidad por lo que se considera como la más importante y primaria; la S2 como secundaria, de menor abundancia, y la S3 y S4 como terciarias por su mínima frecuencia.

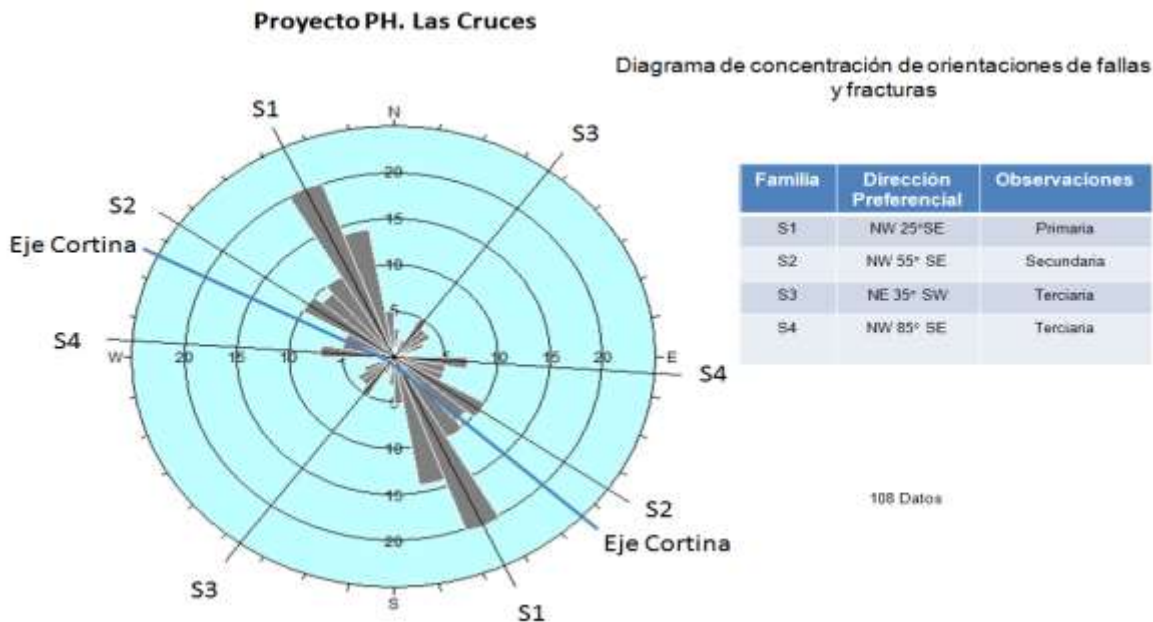


Figura 22. Diagrama de rumbos de fallas y fracturas en zona de obras. (CFE, 2013).

Con base en este diagrama de concentración de tendencias estructurales se determinó claramente la dirección preferencial de la familia S1 con respecto a las otras tres familias de fracturas y fallas.

Por otro lado, la actitud de las unidades Las Cruces y Coparan se incluyen en un diagrama estereográfico que muestra la concentración de polos y orientación preferencial del rumbo y echado de la estructura de flujo y pseudoestratificación de la riolita fluidal y miembros tobáceos levantados respectivamente. En la margen derecha se determinó una rumbo preferencial NW49°SE con 22° de echado al NE y para la margen izquierda de NW55°SE con 18° al NE.

Para fines prácticos se pueden considerar que estas dos concentraciones de discontinuidad son iguales. Según los levantamientos la mayoría de las fallas cartografiadas son de tipo normal, pero se observaron en visita de campo (De la LLata, marzo 2013) algunas de transcurrancia y de desplazamientos diagonales.

Como se puede apreciar, la mayoría de las fallas y fracturas tienen rumbos preferenciales hacia el NW-SE con echado al SW, seguidas por las NE-SW con echados al SE como al NW. La figura 23 muestra las fallas levantadas en que se aprecia su relación con la zona de obras (extensión y dirección de ocurrencia).

Con base en los resultados de los trabajos de perforación y la exploración geofísica, se han podido comprobar la continuidad de las fallas en el subsuelo y determinar sus características, además de poder confirmar que muchas se encuentran emplazadas por diques diabásicos o andesíticos.

Según los levantamientos geológicos realizados se definieron tres familias de fallas, donde la orientación preferencial se muestra en el diagrama estereográfico. En la tabla 5 se marcan las familias principales de discontinuidades que se forman, las orientaciones preferenciales y las fallas relacionadas.

Tabla 5. Orientación preferencial de las fallas en la zona de obras. (CFE, 2013).

Familia	Orientación		Fallas asociadas
	Rumbo	Echado	
S1	NW 25°SE	76° SW	Las Peñas, PHC-1, PHC-2, El Portal, Escarpe, Las Cruces, Zacatal, Los Bueyes y Rosario Viejo 2,
S2	NW 61°SE	73° SW	El Cantil, PHC-3, El Mango y Bordones
S3	NE 67° SW	86° SE	Cerro Partido 1 y 2 y otras de pequeño desarrollo

Al igual que las fallas, también se presentan diagramas estereográficos de las fracturas, donde se aprecia que existe similitud entre los diagramas de ambos márgenes, con excepción que en la margen derecha existe una familia de fractura adicional (familia NW58°SE/81°SW). También, al comparar los diagramas de las fracturas con el de las fallas (figuras (17), (18) y (23)), se observa de igual forma la similitud que existe entre la orientación de estas discontinuidades.

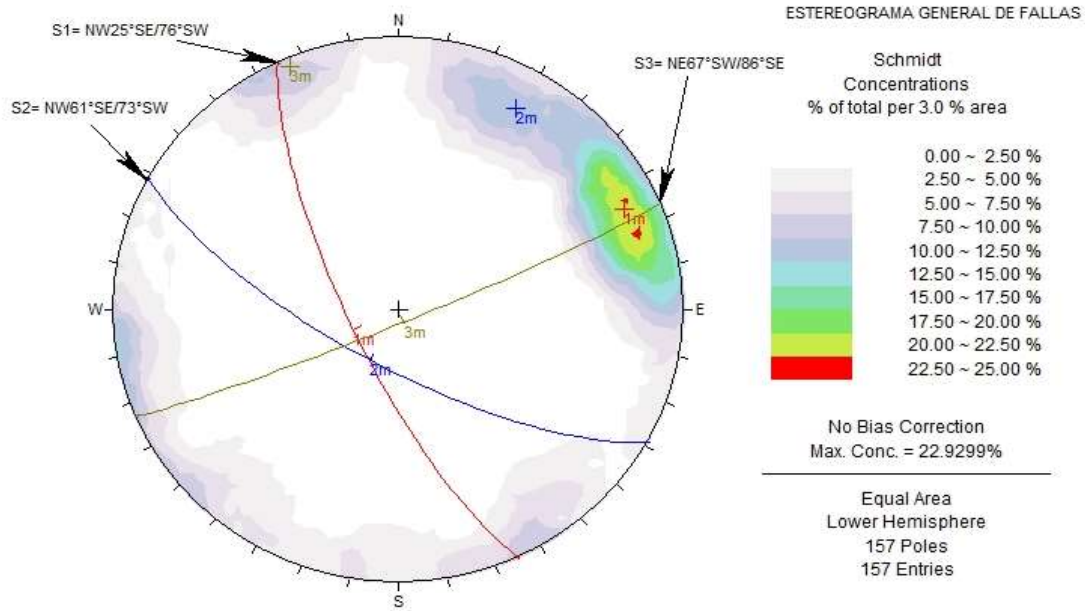


Figura 23. Estereograma general de fallas. (CFE, 2013).

Por lo que se puede concluir que en la zona de obras existen cinco familias de discontinuidades, una asociada a la pseudoestratificación y cuatro a familias de fracturas y fallas (tabla 6).

Tabla 6. Orientación preferencial de las familias de fallas en la zona de obras. (CFE, 2013).

Familia	Orientación		Observaciones
	Rumbo	Echado	
So	NW 49 a 55° SE;	18 a 22° NE	Pseudoestratificación
S1	NW 09 a 25° SE	76 a 87° SW	Fracturas y fallas
S2	NW 35 a 61°SE	73 a 81° SW	Fracturas y fallas
S3	NE 46 a 67° SW	84 SE a 86° NW	Fracturas y fallas
S4	NW 83° SE	76° SW	Fracturas y fallas

En el apéndice 2 del informe geológico de la CFE (2012) presentan una relación de las fallas más importante que afectan al proyecto, cortadas por los barrenos y en la tabla 7 una descripción de

las fallas levantadas en el socavón 2 de la margen izquierda en la que se aprecia las condiciones de las zonas de falla. La zona del cauce está afectada por cinco familias de discontinuidad, cuyas fallas más importante son la Escarpe, El Portal, PHC-1 y PHC-2, que afectan a las márgenes del río, ocasionando inestabilidades de bloques. El sistema de fracturas, fallas y pseudoestratificación forman cuñas que puede provocar bloques inestables, que se manifiestan en el cauce del río de dimensiones que pueden ser mayores a los 20 m³. En la margen derecha, los bloques caídos se han depositado en su mayoría en el Arroyo Rancho Viejo, mientras que en la margen izquierda se han desprendido en dirección SW. Con la revisión de la información proporcionada del sitio se considera que se cuenta con un modelo geológico adecuado, el cual se ha venido constatando y mejorando durante los estudios posteriores, en el modelo conceptual regional y local, se identifica su marco estructural, identificando las discontinuidades más importantes. El proyecto Las Cruces en su alternativa Arroyo Rancho Viejo se considera un sitio geológicamente bueno, adecuado y viable para la construcción de una central hidroeléctrica.

Tabla 7. Fallas importantes en el socavón 2 MI. (CFE, 2013)

Fallas	Rumbo	Echado	Longitud (m)	Abertura (m)	Humedad	Relleno	Comentarios	
PRIMARIA	Las Cruces	NW 81°-89°SE	60°-89°NE	200	2,00 a 4,50	Húmeda	Arcilla, Dique diabásico	Presenta un dique cloritizado y fracturado, con calcita rellenando las fracturas, al alto y bajo de la falla el dique está muy alterado pasando la clorita a epidota. Al alto y bajo de la falla en contacto con la ignimbrita, se tiene arcilla semiplástica de color ocre con espesores que varían de 1 a 3 cm. Al alto del contacto dique diabásico, se presenta una franja de 20 a 40 cm. en donde están intercaladas bandas de calcita, clorita y arcilla.
	Escarpe	NW 80°-86°SE	67°-71°NE	200	0,001 a 0,40	Seca	Arcilla arenosa	Esta falla se encuentra en el portal de entrada y es seca, el relleno está constituido por arcilla de color crema y material de molienda de tamaño de arena fina.
	Escorpión	NW 75°SE	76°-71°SW	50	0,2 a 4,00	Húmeda	Arcilla, Dique diabásico	Está compuesta por un dique de composición diabásica, similar a la Falla Las Cruces, presentando un dique cloritizado fracturado y un bandeamiento de calcita, arcilla al alto y alteración del dique al alto y bajo, se tiene arcilla plástica en el contacto dique roca.
	Cascabel	NW 60° SE a NE 85° SW	78°SW 77-88°SW	50	0,80 a 1,00	Seca	Dique diabásico y arcilla	Está compuesta de un dique diabásico más sano aunque fracturado, no se ha colapsado como las Fallas Escorpión y Las Cruces.
	127	NE 41°-49°SW	73°-88°NW	50	0,10 a 0,40	Ligeramente húmeda	Arcilla y arena de molienda	Falla rellena de arcilla y material de molienda de tamaño de arena fina a gruesa, de color café.
SECUNDARIA	Alcante	NW 3°-15°SE	60°SW	20	0,001 a 0,025	Ligeramente húmeda	Arcilla arenosa	Compuesta por arcilla arenosa de color café a ocre ligeramente húmeda.
	Mamba	NW 25°-40°SE	80°-83°SW	50	0,01 a 0,02	Ligeramente húmeda	Arcilla	Está compuesta por arcilla ligeramente plástica de color ocre, se ven reliz de falla con movimiento lateral.
	8, 30, 56, 64 y 82	NW 39°-65°SE	64°-84°SW	20	0,001 a 0,025	Ligeramente húmeda	Arcilla	Arcilla que va de plástica a no plástica de color ocre.
	78, 88, 89, 97, 112, 120 y 134	NE 30°-60SW	70°-76° NW (112) 55° - 72° SE	20	0,001 a 0,025	Ligeramente húmeda	Arcilla	Arcilla que va de plástica a no plástica de color ocre, las Fallas 88, 89 y 97 presentan una zona de fracturamiento de aproximadamente 20 cm tanto al alto como al bajo, provocando pequeñas quedades en la tabla izquierda.

4.3. Geodinámica

La Geodinámica externa es la actividad de los agentes modificadores del relieve que se desarrollan externamente en la corteza terrestre, los cuales pueden ser agua, viento, cambios en la temperatura, nieve y acción de la gravedad.

Algunos ejemplos que ilustran la influencia de la geodinámica externa en la construcción de obras civiles son: erosión remontante o regresiva, por acción del choque del flujo de agua en obras de toma, túneles de desfogue y vertedores; cambios en el gradiente de una corriente fluvial, al construir un dique, por lo que aguas arriba se incrementa la actividad erosiva para que recupere su equilibrio original. Movimientos en masa del terreno, que si son rápidos se denominan avalanchas y deslizamientos y si son lentos, reptación (creep) y solifluxión. Mientras que la Geodinámica interna es la que tiene lugar en la superficie o bajo ella debido a la acción de procesos ígneos, sismos, rocas y suelos expansivos, así como las rocas explosivas. En regiones afectadas por fenómenos intrusivos o volcánicos pueden presentarse gases tóxicos durante la construcción de obras subterráneas; asimismo, el gradiente geotérmico es, con frecuencia, más elevado que en aquellas regiones donde no se presentan estos fenómenos. En áreas sísmicas es necesario realizar estudios sismotectónicos para calcular el riesgo a la que estará sometida una obra civil; algunos materiales pueden presentar fenómenos de expansión debido a su avidez de agua, como las anhidritas y bentonitas; el fenómeno de rocas explosivas se produce cuando están sometidas a una deformación elástica intensa, debido quizás a la permanencia de presiones horizontales, dejadas por procesos tectónicos no disipados.

4.3.1 Geodinámica actual que afecta el sitio del proyecto

La toma de decisiones en actividades relacionadas con la planeación en el diseño de construcción de presas, control de llenado y vaciado de embalses, prevención en zonas de asentamiento y/o agrietamiento del subsuelo, comportamiento del subsuelo ante la presencia de un sismo y estudios de ingeniería sísmica, requiere como parte fundamental, contar con estudios sismotectónicos que permitan el mejor conocimiento de las regiones donde la Comisión Federal de Electricidad (CFE) pretende construir obras civiles.

En este contexto, los estudios de microsismicidad que se han desarrollado desde 1987 por el Departamento de Sismotectónica y Exploración Geofísica (DSyEG) a lo largo de la cuenca del Río San Pedro, han contribuido al conocimiento de las estructuras geológicas principalmente en la porción norte y sur de la Fosa Tectónica Tepic-Chapala. Por otra parte en las obras se han realizado las siguientes actividades para definir la geodinámica del sitio de construcción de la presa “Las Cruces”.

4.3.2. Microsímica en socavones 1 y 2 MI

4.3.2.1. Socavón 1

Se tiene roca fracturada en los primeros metros del portal y entre los cadenamientos 0+005 al 0+014. Las zonas de falla se localizan en los cadenamientos de 0+022 a 0+032, 0+090 a 0+092, 0+094 a 0+096 y en el cruce 0+080 a 0+086 y finalmente, en los últimos 140 m del socavón

(Cadenamiento 0+098 al 0+230) la roca presenta menos fracturas. El valor de la velocidad de onda compresional es de 1 800 a 2 200 m/s (tabla 8) con un espesor que se calcula de 1,1 a 1,5 m; mientras que en el cruce, la parte de roca descomprimida tiene una velocidad sísmica un poco menor (1 700 a 2 100 m/s), el espesor mayor de roca descomprimida se observó en las zonas de falla y en las zonas próximas a éstas.

Tabla 8. Valores de módulos elásticos dinámicos socavón 1 M.I., y velocidades de onda S y P.

Petite sísmique	Socavón	cadenamiento (m)	Velocidad Vp [m/s]	Velocidad Vs [m/s]	Relación de Poisson (u)	Módulo de rigidez G [Mpa]	Módulo de Young E [Mpa]
1	MARGEN IZQUIERDA	0+230 a 0+194	1 900	970	0,32	2 258	5 978
			3 700	1 950	0,31	9 126	23 868
2		0+194 a 0+158	2 100	1 100	0,31	2 904	7 614
			3 550	1 850	0,31	8 214	21 580
3		0+158 a 0+122	2 200	1 050	0,35	2 646	7 157
			3 500	1 850	0,31	8 214	21 457
5		0+122 a 0+86	2 150	1 150	0,30	3 174	8 250
			3 700	1 900	0,32	8 664	22 889
6		0+122 a 0+050	2 200	1 100	0,33	2 904	7 744
			3 700	1 900	0,32	8 664	22 889
7		0+50 a 0+014	1 800	900	0,33	1 944	5 184
	3 600		1 900	0,31	8 664	22 647	
8	CRUCE MARGEN IZQUIERDA	0+123 a 0+087	1 700	850	0,33	1 734	4 624
			3 500	1 800	0,32	7 776	20 532
10		0+065 a 0+026	1 800	900	0,33	1 944	5 184
			3 300	1 750	0,30	7 350	19 174
11		0+026 a 0+000	2 100	1 000	0,35	2 400	6 496
			3 300	1 800	0,29	7 776	20 035

Los valores de tiempo total en los tendidos cortos realizados en el socavón, varían de 36 a 41 m/s y de acuerdo con la tabla de Schneider, los sitios de presas con estos valores, corresponden a rocas de buena calidad.

Por otra parte, la pseudofrecuencia de la onda transversal encontrada es de 600 Hz y mediante este valor se deduce un valor del módulo estático que va de 9 415 a 12 217 MPa.

El macizo rocoso sano dentro del socavón y en sentido perpendicular al río, presenta la velocidad longitudinal del orden de 3.5 a 3.7 Km/s, indicándose en tono naranja y la roca descomprimida se indica en tono amarillo en la figura 24; mientras que en sentido paralelo al mismo disminuye de 3.5 a 3.3 Km/s.

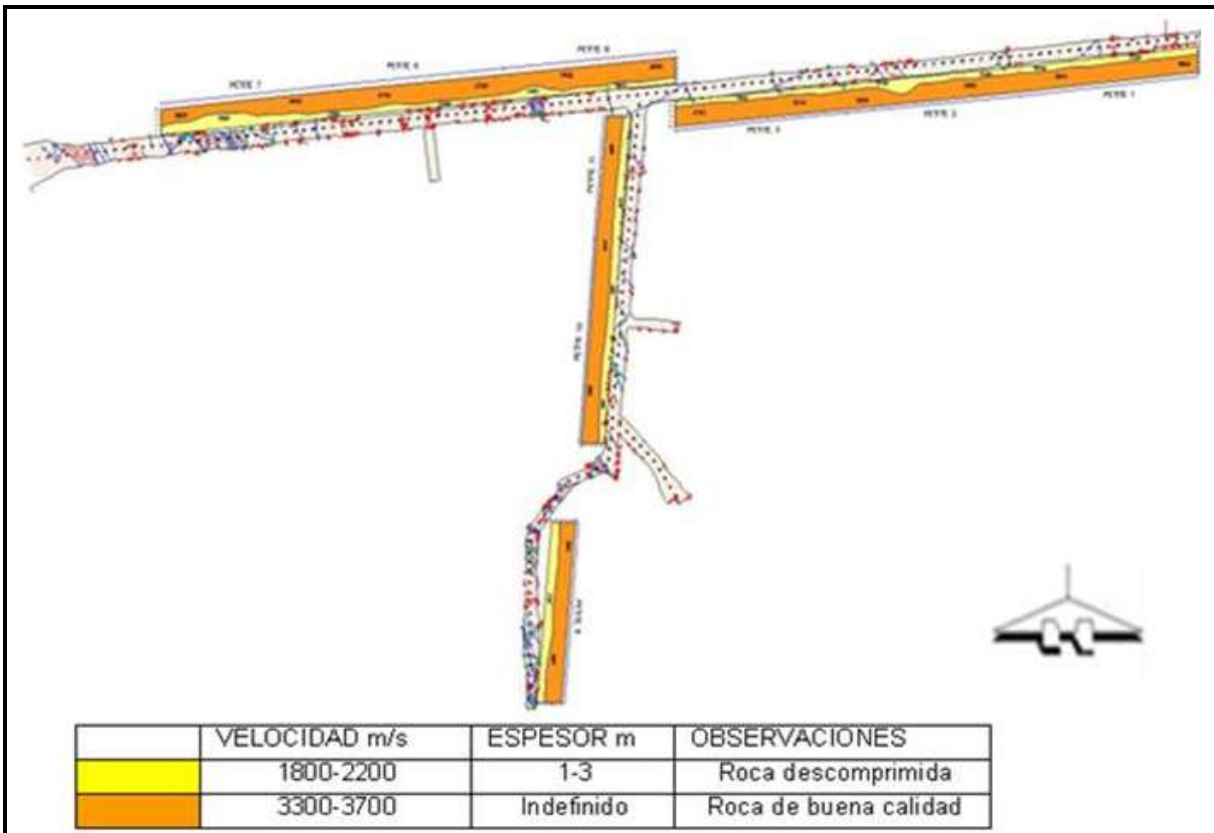


Figura 24. Resultados en el socavón 1 con método petite sismique. (CFE, 2013).

4.3.2.2. Socavón 2

En la entrada del socavón entre las estacas 0+000 al 0+006 se observa roca fracturada y por la deflexión que presenta fue imposible levantarla, el fracturamiento se le asocia al paso de la falla Escarpe así como a estructuras secundarias; sin embargo a partir del cadenamiento 0+006 al 0+060 se determinaron espesores de roca descomprimida de 0,5 a 1,8 m.

En la figura 25 se indica en tono amarillo la roca descomprimida y en naranja la roca sana, definidos con velocidades de onda compresional de 1250 m/s, mientras que la roca fresca no descomprimida presenta velocidades de 3217 m/s y del cadenamiento 0+060 a 0+096 aumentaron las velocidades de la roca descomprimida a 1988 m/s y espesores máximos de 1.9 m; mientras que la velocidad de la roca sana en ese tramo fue de 3542 m/s, valores que asocian a una roca de buena calidad. Por otra parte, el desarrollo del socavón principal inicia en el cruce, definido con la estaca 0+000, que se bifurca hacia ambos lados de forma lateral, en la parte izquierda sólo tiene 44 m de longitud y fue estudiado con el petite 7, el cual arroja espesores máximos de roca descomprimida de 2,0 m con velocidades de 2067 m/s en la roca descomprimida y la roca sana de 3739 m/s.

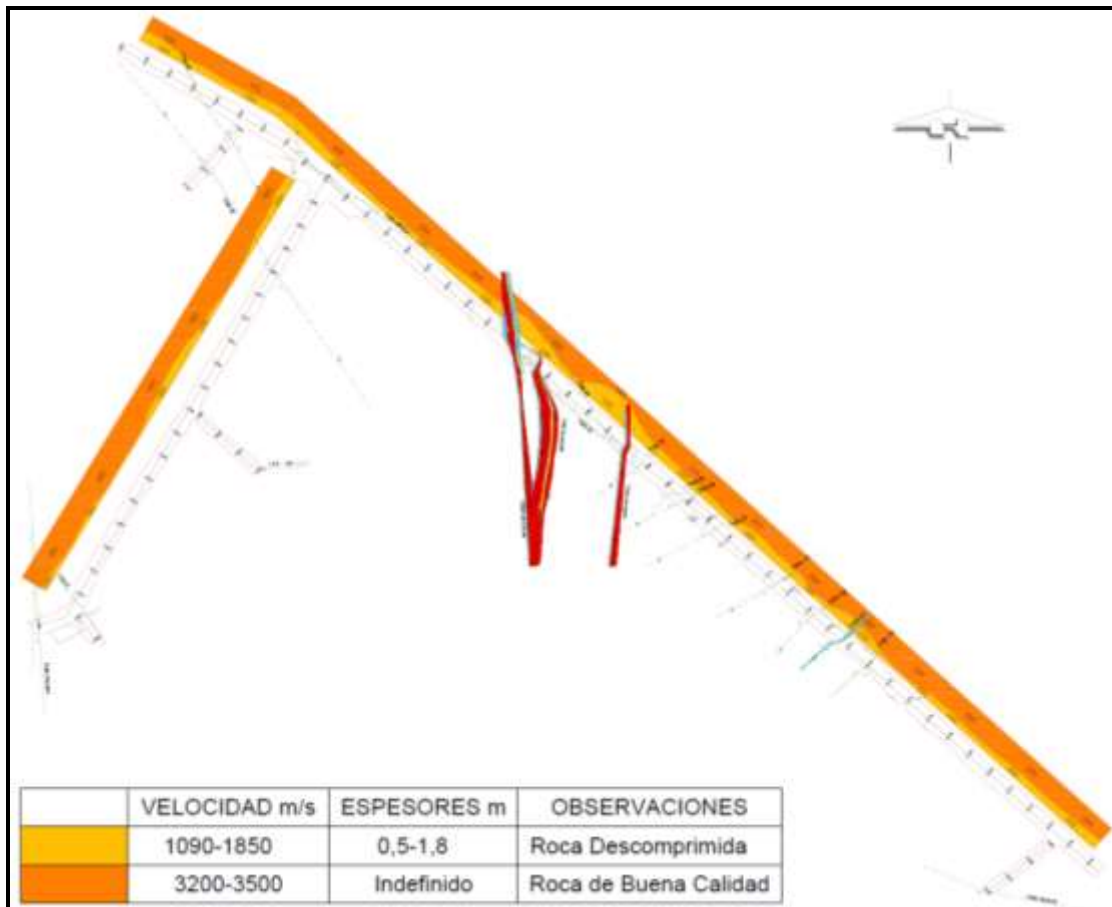


Figura 25. Resultados del socavón 2 con el método petite sismique. (CFE-2013)

En el lado derecho del crucero, el socavón tiene una longitud de 192.70 m que se describe a continuación: de la estaca 0+000 al 0+036 se determinaron espesores de roca descomprimida de 1,4 m con velocidades de onda transversal de 2190 m/s y para la roca no descomprimida se establecieron velocidades de onda longitudinal de 3465 m/s.

Del cadenamamiento 0+036 inicia un tramo de fallas-dique hasta el cadenamamiento 0+082, intervalo que por la misma influencia de las estructuras se determinaron espesores máximos de roca descomprimida de hasta 4,0 m definidos con velocidades de onda longitudinal de 1597 m/s y para la roca fresca no descomprimida, se dedujeron velocidades de 2450 a 2725 m/s, valores que indican que la roca está fracturada.

Del cadenamamiento 0+082 al 0+136, el macizo rocoso se observa medianamente fracturado, definiendo a la roca sana con velocidades sísmicas de 3000 a 3100 m/s y para la roca descomprimida, se calcularon velocidades de 1300 a 2000 m/s, observando los máximos espesores en las zona de falla.

Finalmente de la estaca 0+136 hasta la parte final del socavón, la roca mejora en cuanto a su calidad, arrojando velocidades de onda longitudinal para roca sana de 3241 m/s y para la descomprimida velocidades de 2027 m/s con un espesor promedio de 1,0 m.

Los valores de tiempo total para este socavón varían de 24 a 35 ms, que de acuerdo con la tabla de Schneider, los sitios de presas con estos valores corresponden a una roca de regular a buena calidad.

La pseudofrecuencia de la onda transversal más predominante para el socavón 2 fue de 500 Hz que en base a ella, se estimó un módulo estático de 6919 MPa. La tabla 9 muestra los valores de los módulos elásticos dinámicos calculados para este socavón, así como sus velocidades de onda S y P.

Tabla 9. Valores de módulos elásticos dinámicos del socavón 2 M.I. (CFE, 2013).

Petite sismique	sitio	Cadenamiento (m)	Densidad (g/cm ³)	Velocidad Vp (m/s)	Velocidad Vs (m/s)	Relación de Poisson	Módulo de rigidez G [Mpa]	Módulo de Young E [Mpa]
1	Socavón Principal 0+000-0+192	0+153 a 0+192	2.2	3241.47	1783.20	0.28	6996	10031
2		0+129 a 0+155	2.2	3136.24	1713.39	0.29	6459	9206
3		0+103 a 0+129	2.2	3499.57	1975.57	0.27	8586	12603
4		0+064 a 0+103	2.2	3447.49	1917.10	0.28	8086	11705
		Zona de Falla (0+064 a 0+076)	2.2	2725.15	1378.65	0.33	4181	5620
5		0+038 a 0+064	2.2	3354.02	1831.63	0.29	7381	10517
6	0-001 a 0+038	2.2	3465.73	1908.75	0.28	8015	11505	
7	Socavón Principal 0+000 - 0+040	0+001 a 0+040	2.2	3739.60	2159.03	0.25	10255	15383
8	Entrada Socavón 0+006-0+096	0+057 a 0+096	2.2	3391.00	1910.23	0.27	8028	11759
9		0+018 a 0+057	2.2	3542.04	2020.45	0.26	8981	13312
10		0+006 a 0+026	2.2	3217.00	1759.78	0.29	6813	9722

4.3.3 Efecto de la Geodinámica regional

Del periodo comprendido del mes de enero al mes de septiembre de 2013, la red sismológica analógica del PH Las Cruces registró un total 27 eventos entre las 5 estaciones que monitorean la sismicidad en esa zona.

La sismicidad anterior, se clasificó de acuerdo a la distancia de ocurrencia tomando como centro la cortina del proyecto.

El criterio de clasificación fue la diferencia de arribo en tiempo de la onda S con respecto a la onda P, de esta forma se consideraron como sismos locales aquellos que tuvieran una diferencia de S - P menor a 4 segundos (32 km.), como regionales con diferencia de 4 a 10 segundos (33 a 80 km.) y, telesismos con una S - P mayor a 10 segundos (más de 80 km.).

En la tabla 10 se listan estos eventos, especificando la hora de ocurrencia, las coordenadas geográficas, la profundidad, la magnitud y el tipo, en la figura 26 se muestran los epicentros de estos eventos.

Tabla 10. Sismicidad enero-septiembre 2013. Las Cruces por la red sismológica analógica.

Fecha	Hora	Coordenadas		Profundidad (Km)	Magnitud	Tipo
	Local	Latitud	Longitud			
21-ene-13	00:00:26	21.83	-104.81	6.1	2.9	Regional
04-feb-13	19:58:45	20.99	-106.18	5	3.9	Telesismo
20-feb-13	13:07:40	21.98	-104.88	10	1.38	Local
20-feb-13	14:58:45	22.07	-104.91	10	2.01	Local
20-feb-13	15:23:11	18.6	-104.04	5	5.6	Telesismo
04-abr-13	19:58:48	17.08	-100.82	17	5.3	Telesismo
09-abr-13	00:44:24	20.38	-105.23	25	3.8	Telesismo
11-abr-13	22:45:09	17.78	-101.58	35	5.2	Telesismo
12-abr-13	16:55:31	22.04	-104.87	13.37	1.66	Local
21-abr-13	04:45:43	18.45	-107.25	10	4.3	Telesismo
21-abr-13	20:16:34	17.87	-102.19	10	5.8	Telesismo
22-abr-13	21:06:52	19.3	-107.19	5	4.2	Telesismo
04-may-13	06:12:54	19.26	-105.14	16	4.2	Telesismo
04-may-13	21:52:22	19.97	-105.37	16	4.6	Telesismo
04-may-13	23:12:08	19.96	-105.33	16	4	Telesismo
12-may-13	17:04:46	19.91	-105.29	22	4.2	Telesismo
02-jun-13	14:13:32	17.84	-100.84	54	4.6	Telesismo
15-jun-13	02:23:53	21.01	-105.28	16	4.2	Telesismo
16-jun-13	00:19:03	18.04	-99.25	60	5.8	Telesismo
19-jun-13	17:23:58	22.01	-104.74	5.01	2.51	Local
30-jul-13	14:31:10	18.39	-104.2	20	4.6	Telesismo
21-ago-13	07:38:30	16.79	-99.56	20	6	Telesismo
21-ago-13	08:02:18	16.73	-99.7	11	5	Telesismo
06-sep-13	19:13:28	14.34	-92.26	69	6.1	Telesismo
14-sep-09	05:25:36	32.48	-115.15	1	4.2	Telesismo
21-sep-13	07:16:12	27.79	-105.78	3	5.4	Telesismo
21-sep-13	07:42:15	27.8	-105.78	2	4.9	Telesismo

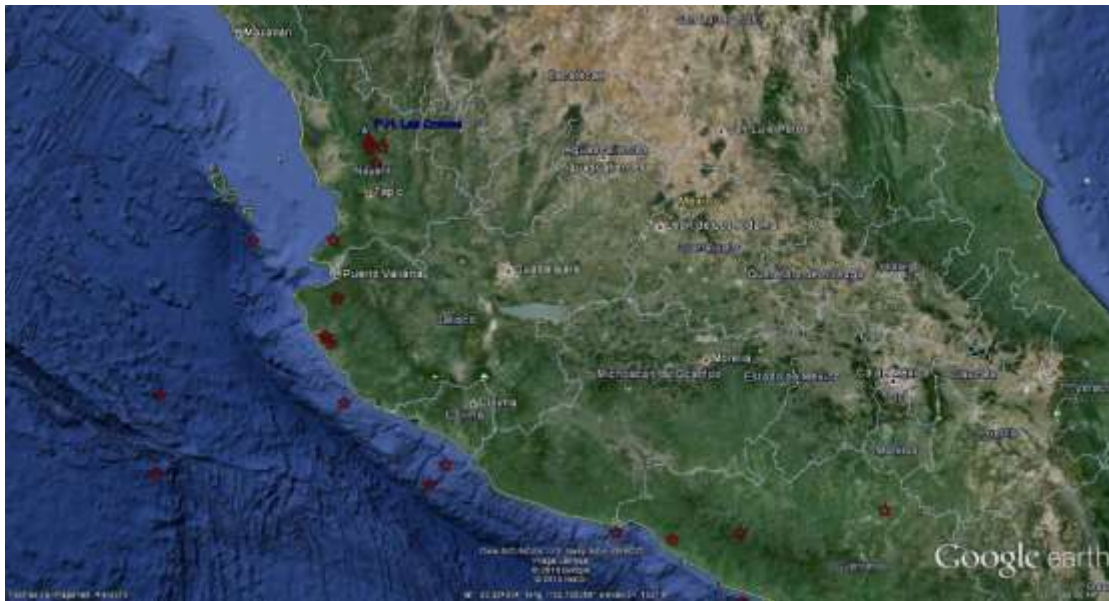


Figura 26. Sismicidad registrada por la Red Analógica.

Como puede apreciarse solo se registran cuatro eventos en las cercanías del proyecto. El resto de ellos se localizaron en las costas de Jalisco, Colima y Guerrero. Los eventos registrados en las cercanías del proyecto, presentan magnitudes menores a 3 grados. En la tabla 11 se presenta la información registrada por cada una de las estaciones sismológicas analógicas y las figuras 27 y 28 muestran la sismicidad registrada en cada una de las estaciones.

Tabla 11. Sismicidad registrada por cada una de las estaciones del P.H. las Cruces.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE EVENTOS		
	LOCAL	REGIONAL	TELESISMO
El Bálsamo	2	1	10
Agua Aceda	3	3	13
Presidio	6	3	15
Guaybel	4	1	20

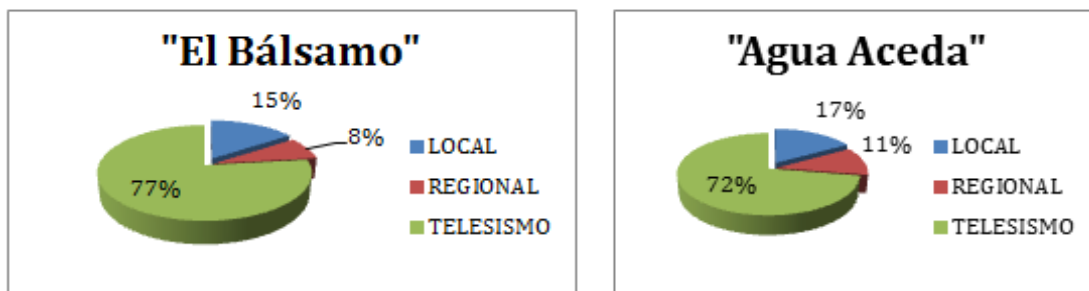


Figura 27. Gráficas de los eventos registrados en las estaciones El Bálsamo y Agua Aceda.

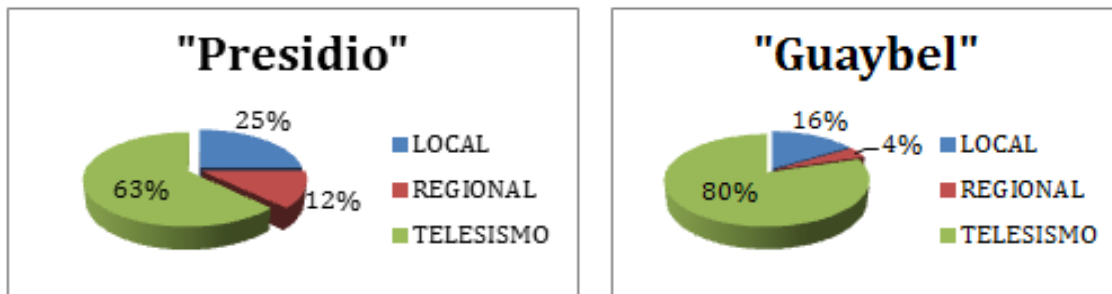


Figura 28. Gráficas de los eventos registrados en las estaciones Presidio y Guaybel.

De la sismicidad localizada en el P.H. Las Cruces a continuación se muestran algunos registros de las estaciones de la red sismológica analógica, ocurridos en diferentes fechas del presente año en las estaciones el Guaybel y Presidio (figuras 29 y 30).

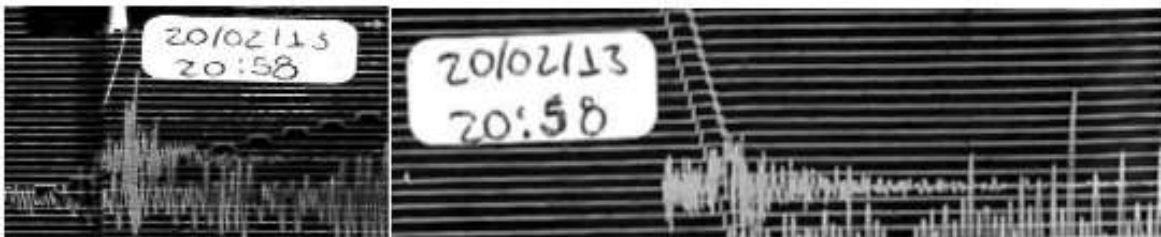


Figura 29. Registros de las estaciones analógicas Guaybel y Presidio febrero 20, de 2013.

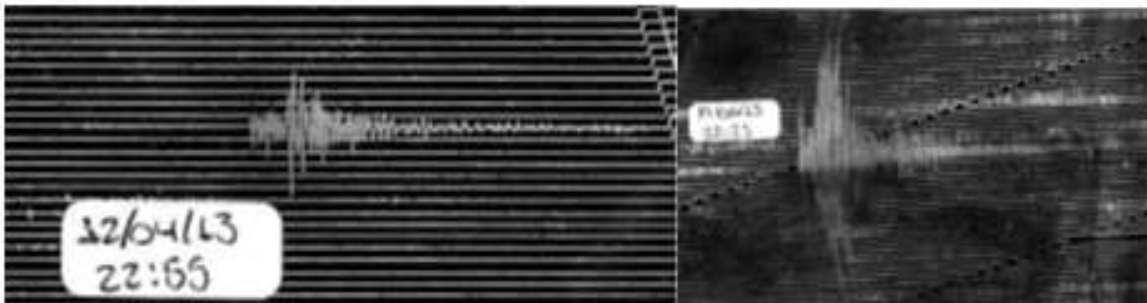


Figura 30. Registros de las estaciones analógicas Presidio y Guaybel abril 12, de 2013.

4.3.4. Cocientes espectrales

Nakamura (1989) postula que las ondas que causan las vibraciones ambientales registradas en la superficie del suelo son de dos tipos: ondas superficiales (ondas de Rayleigh específicamente) y ondas de cuerpo (ondas P y S). Esta hipótesis de que las vibraciones ambientales se deben a dos tipos de ondas permitiría explicar por qué el método del cociente H/V puede ser usado cuando las causas de las vibraciones son sismos. Si alguna fuente superficial genera ondas de cuerpo en un medio formado por una capa elástica sobre una roca con una gran diferencia de impedancia, estas ondas se propagan siguiendo un patrón complejo, que depende de cuál es la fuente específica que les dio origen y de su localización.

Debido a las reflexiones que ocurren en la interfaz suelo-roca, parte de las ondas P y S se mueven desde el basamento hacia la superficie libre donde pueden ser registradas por un sensor.

La técnica del cociente espectral Horizontal/Vertical (H/V), inicialmente estudiada y aplicada por Nogoshi e Igarashi (1970) y posteriormente popularizada por Nakamura (1989 y 2000), consiste básicamente en realizar el cociente de las amplitudes espectrales de Fourier entre la componente horizontal y la componente vertical del registro de vibración ambiental obtenido para un mismo sitio. Muchos autores han concentrado su esfuerzo en estudiar y comparar los resultados obtenidos por la técnica del cociente espectral H/V, empleando tanto registros de movimiento fuerte como de microtemores (ruido sísmico). Los parámetros que generalmente se comparan son la frecuencia fundamental ω_0 y el factor de amplificación A_0 . La mayoría concluye que el empleo de microtemores provee una buena estimación de la frecuencia fundamental del sitio, no así para el factor de amplificación, el cual suele ser inferior al obtenido a partir de registros de movimiento fuerte.

Las dos estaciones digitales instaladas en ambas márgenes del proyecto, registraron cuatro eventos, el equipo de margen derecha, y tres el de margen izquierda. La tabla 12 muestra los eventos registrados así como las aceleraciones obtenidas.

Tabla 12. Eventos registrados por los equipos instalados en ambas márgenes del proyecto.

Fecha	Hora	Aceleración (Gal)			Equipo
		E-W	N-S	VER	
15/06/2013	07:24:19	0.5	0.3	0.1	MD
16/06/2013	05:21:04	0.1	0.3	0.1	MD
16/06/2013	05:22:26	0.1	0.1	0.1	MD
19/06/2013	22:23:51	1.2	1	0.7	MD
06/09/2013	14:08:38	0.3	0.3	0.3	MI
21/09/2013	12:18:58	0.1	0.1	0	MI
21/09/2013	12:45:03	0.1	0.1	0.1	MI

Con los eventos registrados en cada margen se calcularon los cocientes espectrales utilizando el método de Nakamura, con la finalidad de conocer el comportamiento en cada margen. Las figuras 31 y 32 muestran este comportamiento.

Como puede apreciarse en las figuras, ambas márgenes vibran en la misma frecuencia (5 Hz), presentándose una amplificación de 3 en la margen derecha, mientras que la margen izquierda amplifica 2.7 veces.

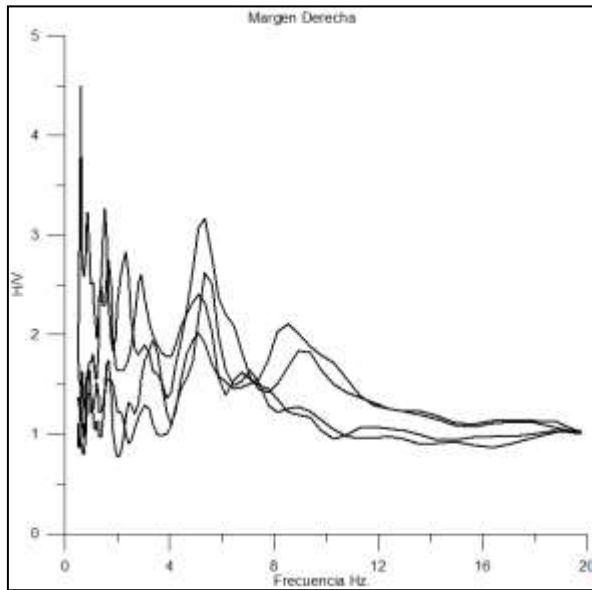


Figura 31. Cocientes espectrales de M.D.

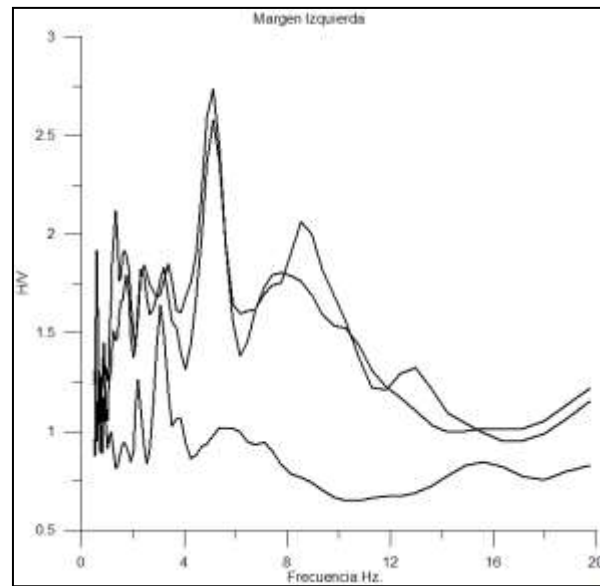


Figura 32. Cocientes espectrales de M.I.

4.3.5. Roca de Mala Calidad

Con el objeto de establecer diferencias en la calidad del macizo rocoso, se consideraron los siguientes valores basados en la velocidad de onda compresional V_p (tabla 13).

Tabla 13. Valores de velocidad de onda compresional

$V_p < 2000$ m/s	Suelo residual, depósitos de talud, roca alterada y roca descomprimida muy fracturada.
V_p 2000 a 3000 m/s	Roca fracturada, con alteración incipiente, roca descomprimida < 2 mm.
V_p 3000 a 4500 m/s	Roca compacta, poco fracturada, sin alteración, con relleno arcilloso < 2 mm.

Durante el análisis en ambos márgenes se realizaron secciones geológicas horizontales cada 20 m, partiendo de la elevación 160 hasta la cota 240. Con finalidad de determinar la profundidad de la capa descomprimida en el sentido horizontal, dato que servirá para evaluar el proyecto de excavación de la obra de contención por cada nivel y por cada margen, en dichas secciones se incluyó la información de barrenos, estructuras geológicas relevantes y la información geofísica; respecto a esta última, se consideraron los tendidos de refracción sísmica de la actual campaña de exploración.

Para la margen izquierda los espesores de roca descomprimida con velocidades $V_p < 2000$ m/s son del orden de 0 a 10 m en la elevación 160 msnm; hacia cotas superiores entre las elevaciones 160 a la 240 msnm, esta se incrementa de 33 a 57 m (tabla 14). Lo anterior, debido a la presencia de las tobas e ignimbritas de la unidad Corapan, las cuales tienen un bajo índice de calidad de

roca, así como la incidencia de las diversas discontinuidades en el macizo rocoso que han deteriorado en forma importante la calidad de la roca. Por debajo de esta capa, las velocidades oscilan entre 3,0 y 4,0 km/s. De la cota 80 a la 160, no se realizó geofísica debido a lo acantilado de la zona aunque la roca es de buena calidad dado que en algunas secciones cercanas alcanza hasta los 4000 m/s.

Tabla 14. Espesores de roca de mala calidad en margen izquierda.

ELEVACIÓN	ESPESOR ROCA DESCOMPRIMIDA (m)	VELOCIDADES PROMEDIO DE ROCA DESCOMPRIMIDA (km/s)
160	Máx. 7- Mín. 1	1.6
180	Máx.33- Mín. 23	1.4-1.6
200	Máx.20- Mín.10	1.4-1.5
220	Máx.39- Mín. 35	1.4
240	Promedio 57	1.4

Las estructuras en el macizo rocoso que han deteriorado la calidad de la roca son principalmente las fallas geológicas, porque han sido emplazadas por diques de composición diabásica y han sufrido alteraciones hidrotermales como la argilitización, sobre todo en las partes inmediatas a las fallas.

El análisis de roca descomprimida en la margen derecha (tabla 15), mediante las secciones geológicas horizontales, indica que la profundidad de roca descomprimida se comporta de dos formas.

Desde la cota 160 a 180, el espesor de la roca descomprimida es de 1 a 9 m, alcanzando la roca sana y a partir de la elevación 200 y hasta la 240 cota m, se tienen espesores de 45 m y se alcanza la roca sana a una profundidad mayor en el miembro Tm-ci1 de la unidad Corapan.

Tabla 15. Espesores de roca de mala calidad en margen derecha.

ELEVACIÓN	ESPESOR ROCA DESCOMPRIMIDA (m)	VELOCIDADES PROMEDIO DE ROCA DESCOMPRIMIDA (km/s)
160	Máx. 4- Mín.1	1,0
180	Máx.9 - Mín. 3	1,8
200	Máx. 35- Mín. 25	1,2-1,6
220	Máx.45. –Mín. 25	1,4
240	Promedio 25	1,4

4.3.6. Descripción de las plantas horizontales por elevaciones

4.3.6.1. Planta a la elevación 160

Margen izquierda

A partir de la superficie de la ladera, se observa que el espesor de la roca descomprimida hacia el interior de la ladera se acuña es decir parte de 0 hasta 10 m. En la parte posterior a esta, se tiene roca de buena calidad de la Tm-ic2 con una velocidad sísmica de 3,2 km/s. De acuerdo con la geometría de la excavación en este nivel, se observa que el corte se excavará en roca sana.

Margen derecha

El corte proyectado para este nivel quedará en roca sana con velocidades de 3,6 km/s en el miembro Tm-ic2 de la unidad Las Cruces, una parte de la excavación se efectuará en roca con una $V_p = 2,6$ km/s clasificándose como una roca fracturada con poca alteración.

4.3.6.2. Planta a la elevación 180

Margen izquierda

La excavación para el empotramiento quedará alojada en roca poco fracturada con alteración incipiente, con V_p de 2,6 a 2,8 km/s. Debido a la influencia de la Falla Las Cruces, la parte del bajo de la falla se excavará en una roca descomprimida con una velocidad sísmica de 1,4 km/s.

Margen derecha

La excavación para el empotramiento de la cortina de la parte norte quedará en roca sana con velocidades de 3,2 a 3,6 km/s en el miembro Tm-ic2 de la unidad Las Cruces.

4.3.6.3. Planta a la elevación 200

Margen izquierda

El corte se efectuará en los miembros Tm-ct1 y Tm-ci1 de la Unidad Corapan en donde ambos tienen V_p de 1,4 km/s. De acuerdo al proyecto de excavación, será retirada la capa alterada del miembro Tm-ct1, por lo que el empotramiento quedará en el miembro Tm-ci1, con una velocidad sísmica en el respaldo de 2,8 km/s, que se clasifica como una roca de regular calidad.

Margen derecha

En esta margen se llevarán a cabo dos cortes horizontales. El primer corte en la zona del cantil se efectuará en el miembro Tm-ic2 de la unidad Las Cruces en roca fracturada con velocidades sísmicas de 2,4 a 2,8 km/s.

El segundo corte está proyectado en la zona alta en donde se construirá el muro que forma parte de la cortina. El corte que está hacia el oriente se efectuará en roca fracturada con velocidades de 2,2 km/s en donde está el bajo de la falla El portal; mientras hacia la parte posterior de la falla el corte se efectuará en roca sana de velocidades de 3,4 km/s. Para el corte poniente este se efectuará en roca moderadamente fracturada con velocidades de 2,4 km/s del miembro Tm-ci1 de la unidad Corapan. Para esta parte se recomienda profundizar el corte hacia el macizo para garantizar un desplante en roca sana.

4.3.6.4. Planta a la elevación 220

Margen izquierda

El corte está proyectado en el miembro Tm-ci1 de la unidad Corapan en donde se obtuvieron espesores horizontales de roca de 39 m con velocidades de onda compresional de 1,4 a 2,4 km/s; en la parte posterior, se tiene la roca sana con un $V_p = 3,2$ km/s.

Margen derecha

Todo el corte se efectuará en la ignimbrita del miembro Tm-ci1 de la unidad Corapan que registra velocidades de 1,4 a 2,0 km/s caracterizándola como una roca descomprimida. En este corte se tendrá que hacer un tratamiento para el desplante de la cortina.

4.3.6.5. Planta a la elevación 240

En este caso en ambas márgenes el corte se realizará en la ignimbrita del miembro Tm-ci1 de la unidad Corapan que registra velocidades de 1,4 en la zona descomprimida mientras que la roca poco fracturada con alteración incipiente es de 2,6 km/s.

4.3.7. Bloques estructurales

La zona que involucra las obras del Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, se encuentra afectada principalmente por fallas de orientación NW-SE, buzando hacia el SW, con echados que tienden a la vertical, que dentro del marco tectónico regional, como ya se indicó anteriormente, se ubica dentro del sistema de Fallas San Pedro. Localmente en el área de estudio, las fallas presentan indicadores cinemáticos que las clasifican como fallas normales con desplazamiento lateral izquierdo (la mayoría), hasta fallas con estrías casi horizontales o del tipo transcurrente, de las cuales, las de mayor importancia por su continuidad y espesor, frecuentemente se encuentran emplazadas por diques diabásicos y forman los siguientes bloques estructurales: Rosario Viejo, Los Bueyes, Las Cruces y Las Peñas-Bordones, los cuales se observan en la figura 33.

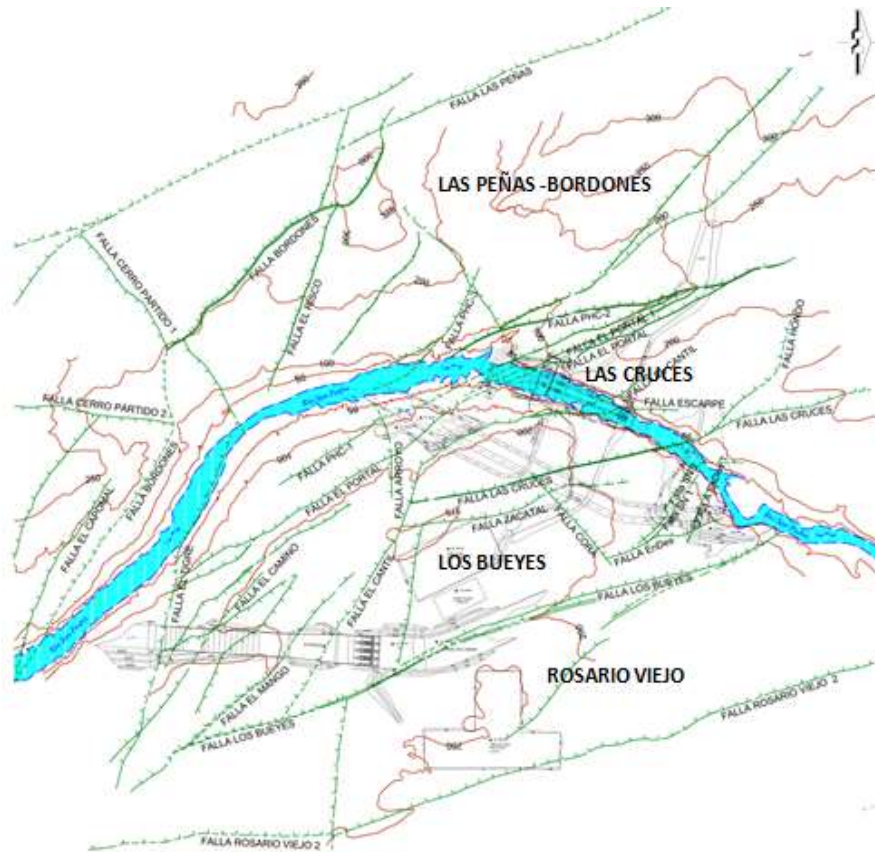


Figura 33. Esquema estructural del proyecto Las Cruces, Nayarit.

En la margen izquierda en la zona de la boquilla, se diferenciaron dos bloques estructurales de roca con características mecánicas distintas. El bloque 1 (Las Cruces), delimitado por la Falla Las Cruces y el cauce del río; mientras que el bloque 2 (Los Bueyes), está delimitado por la misma Falla Las Cruces y la Falla Los Bueyes, como se muestra en la figura 34.

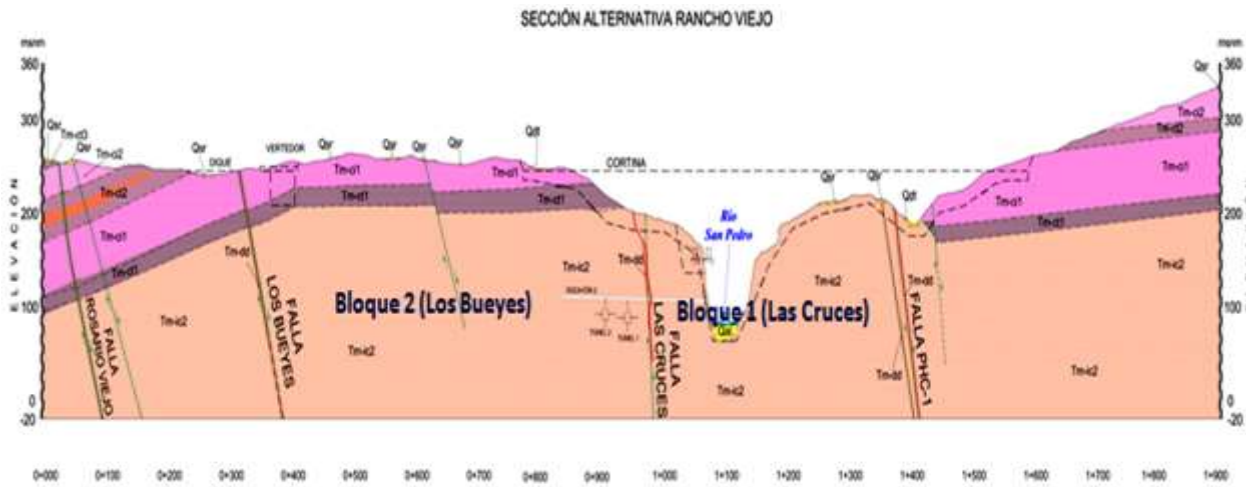


Figura 34. Bloques estructurales 1 y 2.

En el bloque estructural 1, la roca alterada tiene un espesor de 10 m, después del cual mejora su calidad relativa, ya que las velocidades V_p se incrementan hasta valores de 4,0 km/s, velocidad que corresponde a un macizo rocoso de buena calidad con alteración incipiente. A niveles inferiores de la cota 150 hacia el nivel del río, no se tienen valores de geofísica; sin embargo, la roca forma cantiles casi verticales que evidencian la buena calidad de la misma. En el bloque estructural 2, la roca alterada tiene espesores de 8 a 20 m, después se obtienen valores de velocidades V_p de 2,6 km/s en promedio, que corresponden a un macizo rocoso descomprimido, debido a la falta de continuidad topográfica hacia aguas abajo, lo que propició el relajamiento del bloque 2 y a las numerosas fallas localizadas entre la Falla Las Cruces y Zacatal, tal y como se observó en el interior del socavón 2. Por debajo de la cota 230 m, el macizo rocoso mejora notablemente en los valores de velocidades V_p , alcanzando hasta 3,8 km/s en la unidad Corapan; se halla comprimido pero fracturado, como lo muestran los valores de 60 a 75 % de RQD en los barrenos PHC-1, BRV-97 y BRV-79B. Por lo que se concluye, que el bloque estructural 1 es de mejor calidad de roca que el bloque 2, para el empotramiento de la cortina.

4.3.8. Estabilidad de las laderas

Debido al carácter masivo del miembro ignimbrítico de la unidad Las Cruces (Tm-ic2) se prevén problemas de estabilidad de laderas en la zona del corte para el desplante de cortina. La evidencia es que debido a su resistencia mecánica ha sido menos susceptible a la erosión, por lo cual, forma cantiles casi verticales, en donde las fracturas son escasas y se pierden en el macizo rocoso como se muestra en la figura 35. Para corroborar esta apreciación se ejecutaron los barrenos BRV-125 y BRV-115 uno por cada margen sobre el eje de la cortina e inclinados 70° hacia el cantil. Los resultados fueron que se obtuvo un índice de calidad de roca del 93% y de 97%, respectivamente después de los primeros 5 m.



Figura 35. Cantiles en donde se desplantará la cortina.



Con geofísica y con el apoyo de la barrenación, se determinó que el espesor de roca descomprimida en la zona de obras va de 3,0 a 30,0 m, el cual varía de una unidad a otra, siendo de menor magnitud los presentes en la unidad Las Cruces y mayores en la unidad Corapan. Los espesores máximos antes comentados están asociados a las cercanías de las zonas de fallas. Con el esquema de obra proporcionado para este estudio, no se prevén condiciones geológicas desfavorables de importancia, sólo inestabilidad en las zonas de falla que cortarían el túnel de desvío y predesvío, respectivamente, y en las excavaciones a cielo abierto para emportalar los portales de entrada y salida, lo cual puede ser solucionado con un tratamiento de soporte adecuado. En el área de desplante de la presa en el cauce pueden encontrarse fallas emplazadas por diques diabásicos de menor competencia que la ignimbrita encajonante, los cuales requerirán de tratamientos geotécnicos específicos; es importante revisar las condiciones del macizo rocoso y la estabilidad del desplante de la presa cerca de la Falla Las Cruces en la ladera izquierda. La margen derecha se encuentra segmentada por el Arroyo Rancho Viejo, hacia aguas abajo, y otro arroyo tributario de éste, que se ubica hacia al interior de la ladera (al poniente) y perpendicular al eje de la cortina, por lo que el talud de aguas abajo de la presa debe conformarse bajo estas consideraciones.

La casa de máquinas se alojará en el cauce del río, al pie de la cortina, donde se identificaron 12 m de espesor de aluvión y de 5 a 10 m de roca descomprimida; la zona está afectada por fallas del sistema Las Cruces, entre las que destacan las fallas El Portal y PHC-1, en las que se emplazaron diques diabásicos. El aspecto geológico y geotécnico que debe evaluarse es la estabilidad de los bloques de roca existentes en ambas márgenes del río para definir su tratamiento. La Falla Las Cruces es la estructura geológica de mayor influencia en las obras proyectadas, en la margen izquierda de la boquilla, esta estructura se ubica a más de 100 m de distancia del cauce y cruzará la zona de la cortina, los túneles de desvío y el acceso a casa de máquinas, sin que esto represente un riesgo importante al aplicar los tratamientos convencionales a la roca.

Para el banco El Tigre solo se tienen trabajos de geología y geofísica en la zona de la cubeta deflectora del vertedor, por lo que se recomienda realizar levantamiento geológico de detalle, trabajos de exploración geofísica y barrenación aguas abajo de esta zona, para determinar espesores de roca descomprimida y caracterizar el macizo rocoso a profundidad. En la poligonal 2 del banco Cerro Partido, se debe de considerar en caso de ser necesario, realizar trabajos de exploración geológica y geofísica, para determinar espesores de materiales de cobertura, de la roca descomprimida y caracterizar a las rocas de la riolita fluidal que aflora en esta zona, ya que no se cuenta con información suficiente.

Desde el punto de vista sísmico el proyecto se encuentra situado en una región activa, la estructura geológica que representa mayor peligro para el proyecto es la Falla Rosario Viejo, la cual se asocia al cálculo del espectro de diseño para el SMC.



El espectro de diseño obtenido con la metodología determinista para el sitio de interés muestra valores de 0,12 y 0,32 g para la aceleración pico del terreno y la meseta espectral respectivamente. Y para el espectro probabilista el valor calculado es de 0,05 y 0,10 g para la PGA y meseta espectral respectivamente, asociado con un período de retorno de 200 años.

La región se ubica dentro del marco tectónico de las fallas San Pedro que se originaron durante el Terciario medio, por lo que es importante definir el régimen sísmico y de esfuerzos principales que se desarrollan en torno al P.H Las Cruces. De la LLata considera, que en el informe del proyecto (CFE, 2012) se muestran los lineamientos más sobresalientes de la zona del embalse cartografiadas por los ingenieros de la CFE, que consisten de fallas y fracturas.

Estas discontinuidades corresponden en su mayoría al sistema de fallas de San Pedro, que cortan o se alinean en diferentes partes del Río San Pedro con dirección preferencial NW-SE. Los depósitos no consolidados cubren de manera parcial a las unidades más antiguas y se dividen de acuerdo con su origen en depósitos: aluviales (Qal), talud (Qdt) y suelos residuales (Qsr). Los depósitos de aluvión (Qal) se ubican en el cauce del río, los sondeos en este reportan espesores que varían de los 3, a 20 metros.

Estos depósitos están constituidos por fragmentos de roca de distintos diámetros, desde limos y arenas hasta bloques de 8 metros, generalmente de formas subredondeadas.

En la zona del eje de la cortina, se identificaron espesores de 20 m y van disminuyendo hacia aguas arriba donde presentan el menor espesor. Los depósitos de talud (Qdt), se ubican en las dos márgenes del río, sobre todo en los cambios de pendiente con los cantiles y laderas. En la zona de los portales de salida de los túneles de desvío, también se encuentran estos depósitos. Están constituidos por fragmentos, desde gravas a bloque de más de 10 m de diámetro, empaquetados total o parcialmente en una matriz areno arcillosa y bloques de menor tamaño, además de algo de materia orgánica.

Los depósitos de suelo residual (Qsr), también se disponen en ambas márgenes, con mayor presencia en la margen derecha, aunque los afloramientos más extensos se ubiquen en la izquierda. Los espesores de los suelos son variables, pero en general menores a los 4 metros. Están constituidos por limos, arcillas y arenas, producto de la desintegración y disgregación de las rocas del área; principalmente de las rocas de la Unidad Corapan.

La mayor parte de la cortina, casa de máquinas, y túnel de desvío estarán cimentados en la Unidad Las Cruces, subunidad (Tm-ic2) y el resto de la cortina en las subunidades inferiores de la Unidad Corapan. Lo que implica, que ambas unidades y sus subunidades Tm-ic2, Tm-ct1 y Tm-ci1 respectivamente se hayan estudiado detalladamente a través de exploraciones directas e indirectas superficialmente como en subsuelo.



CAPÍTULO V. ALTERACIONES Y MUESTREO

En los estudios geológicos se analizan las características físicas visuales de las rocas como el color, textura, mineralogía, contenido fósil, compacidad, dureza, lustre, estratificación, pliegue y fracturamiento, de las capas geológicas que se encuentran en la superficie o en el subsuelo (cuyas propiedades se observan en las obras mineras o en los núcleos de roca recuperados con barrenación). En las actividades de geotecnia, con énfasis hacia los trabajos de cimentaciones o excavaciones superficiales o subterráneas, se requiere la descripción y cartografía de las alteraciones hidrotermales para conocer la calidad del macizo rocoso que soportará la obra civil por construir, con el fin de evitar su inestabilidad.

5.1 Alteraciones en el Proyecto

La alteración hidrotermal cambia los minerales y la fábrica de las rocas, dando lugar a condiciones de debilidad en las mismas. Es muy importante en la minería y en la operación de túneles. La argilitización es la más significativa de las muchas formas de alteración hidrotermal, desde el punto de vista de la construcción, puesto que representa la conversión de una roca sólida a arcilla. Cuando se le encuentra en túneles, la arcilla se comprime por la excavación debido a presiones de expansión muy altas y su control puede ser muy difícil. Si este producto final lo encontramos en un estado saturado, puede exhibir las propiedades de compresión o expansión.

Las propiedades específicas del producto alterado dependen de diversos factores que incluyen el tipo de mineral arcilloso que se formó durante el proceso de alteración. La experiencia indica que la propiedad de expansión o hinchamiento de los granitos alterados es más frecuente encontrarla en las zonas que estuvieron sujetas a las alteraciones hidrotermales. La compresión en las arcillas se manifiesta propiamente como un flujo viscoso lento del material hacia la excavación del túnel, con un contenido casi constante de agua. Es menos frecuente que la compresión se deba a un incremento del contenido de agua del material, asociada con expansión. Si la compresión de una roca alterada se debe principalmente a la expansión, la roca se considera como expansiva o que se hincha. Las arcillas y rocas que se expanden probablemente ejercen mayores presiones sobre las paredes y techo de los túneles que las arcillas y rocas sin una tendencia marcada a la compresión.

La capacidad de expansión de las arcillas y rocas alteradas depende de diversos factores, que incluyen el tipo de minerales arcillosos que lleguen a contener. Las tendencias de expansión más frecuentes se encuentran en las arcillas y rocas alteradas que contienen un alto porcentaje de minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita son conocidos como bentonitas. La alteración interna de algunas rocas ígneas de color oscuro, como la diabasa y las peridotitas, se asocia con la formación de un mineral verdoso conocido como serpentina. Por lo general la presencia de grandes cantidades de serpentina en una roca puede ser asociada con presiones muy



altas sobre el techo o soporte de un túnel. Esta asociación resulta del hecho de que la alteración a serpentina involucra un volumen de expansión, el cual origina grandes esfuerzos internos en el macizo rocoso sujeto a la alteración. Las rocas que se comprimen son rocas que contienen una cantidad considerable de arcilla, la cual puede estar presente originalmente, como en las lutitas, o pueden ser producto de alteración y estar constituida por los miembros inocuos del grupo de la caolinita o por los nocivos de la montmorillonita. Por lo tanto las propiedades de las rocas que se comprimen son susceptibles de variación en un amplio intervalo como en las arcillas. La roca puede estar intacta mecánicamente, fracturada, o triturada. La trituración combinada con la alteración química puede originar un material comparable con un limo suave, ya que los fenómenos de presión en algunas rocas ígneas alteradas y esquistos son semejantes a las que se encuentran en las arcillas duras expansivas. Si una roca que se comprime es suave y no requiere del empleo de dinamita, se utilizan los mismos métodos empleados comúnmente cuando se excava un túnel en arcillas con una consistencia similar. Cuando un túnel se excava a través de rocas alteradas la construcción se dificulta por lo general con el incremento de la capacidad de expansión de la roca. De acuerdo a la toma de muestras realizadas por los ingenieros de la Comisión Federal de electricidad y a los estudios petrográficos realizados de rocas del estudio de caso, se tienen en el proyecto alteraciones del tipo hidrotermal y alteración meteórica representada por silicificación, argilitización, sericitización y oxidación como se indica en los estudios petrográficos.

5.2 Descripción de las alteraciones

La descripción se basó en la guía realizada por la CFE en el 2000. En los trabajos con una orientación hacia la minería, las alteraciones hidrotermales son de gran importancia porque constituyen guías mineralógicas para la exploración de los yacimientos de rendimiento económico. En trabajos geológicos de superficie o subterráneos que la Comisión ejecute y donde se requiera hacer la descripción y cartografía de las alteraciones hidrotermales, tanto en proyectos internos como externos a la institución, con el fin de conocer la calidad de roca para las obras civiles o como guías mineralógicas en la búsqueda de los depósitos minerales. La alteración hidrotermal es un proceso muy complejo que involucra cambios mineralógicos, químicos y texturales, que resultan de la interacción de fluidos acuosos calientes, bajo ciertas condiciones físico-químicas, con las rocas que atraviesan. La alteración tiene lugar bajo condiciones magmáticas por la acción e infiltración de fluidos muy calientes dentro de una masa rocosa. A temperaturas y presiones bajas, la mezcla de gases y fases acuosas constituyen los fluidos hidrotermales los cuales actúan sobre las rocas circundantes, produciendo cambios que resultan del desequilibrio, debido principalmente al H^+ y OH^- y otros volátiles (por ejemplo, B, CO_2 , F).

5.3. Estilos y Tipos de Alteración Hidrotermal

Los términos que se utilizan para describir y clasificar la alteración hidrotermal pueden

expresarse en función: (1) del reconocimiento de asociaciones minerales y (2) de los cambios químicos. El reconocimiento de las asociaciones minerales características y específicas se efectúa en principio a través de amplios estudios de láminas delgadas y superficies pulidas. Esto conduce a una relación de minerales en orden de abundancia, o a un término descriptivo general que refleje la asociación mineralógica dominante como la argílica, potásica y sericítica. Los cambios químicos indican el tipo de fluidos involucrados en los procesos de alteración que deben incluir los metasomatismos del ion hidrógeno, el alcalino, y el del flúor y boro. Además, el estilo de alteración toma en cuenta su intensidad, forma y carácter. En esta etapa la terminología llega a confundirse un poco por su subjetividad inherente. Términos, como débil, moderada, fuerte, extensa, profunda, no profunda, son bien conocidos y se utilizan con frecuencia. Estos términos se refieren a la etapa de preservación de la roca original, hasta qué punto los procesos de alteración han avanzado, tanto a escala de un simple mineral como a escala regional, y a toda la geometría del halo de alteración (tabla 16). Se recomienda una clasificación empírica cuyo propósito es el uso de símbolos para determinar el tipo de alteración. Estos símbolos son:

Tabla 16- Caracterización de los tipos de alteración con el uso de símbolos

Tipo de Alteración	Símbolo
Greisen	G
Potásica	P
Propilítica	PR
Silicificación	S
Fílica	F
Argílica	A
Argílica avanzada	AA
Skarn	SK

5.3.1. Estilos de Alteración

Los principales estilos de alteración son “profunda”, “profunda selectiva” y “no profunda”. La alteración profunda se caracteriza por el reemplazamiento de la mayoría o de todos los minerales que forman la roca original. De esto resulta la destrucción o cambio de las texturas originales. La alteración profunda selectiva se refiere al reemplazamiento de minerales originales específicos,

como por ejemplo la sustitución de la biotita por la clorita, o de las plagioclasas por la sericita. En este caso se conservan las texturas originales. La alteración no profunda significa que sólo ciertas partes de la roca fueron afectadas por los fluidos hidrotermales. Finalmente, como lo implica el nombre, la alteración hidrotermal está confinada a una cierta distancia de una veta o una fractura.

5.3.2 Tipos de Alteración

Se examinan en forma general los tipos de alteración que resultan de la interacción de las soluciones hidrotermales con las paredes de las rocas.

Los tipos de alteración en el orden de la disminución de la relación aK^+/aH^+ (incremento del metasomatismo del H^+) son: (1) metasomatismo alcalino y alteración sílico-potásica, (2) alteración propilítica; (3) alteración fílica o sericítica, y greisenización; (4) alteración argílica intermedia; (5) alteración argílica avanzada.

1) Metasomatismo Alcalino, Alteración Sílico-Potásica

De la interacción entre una fase fluida residual y una masa ígnea en proceso de consolidación se generan diversos cambios post-magmáticos, o subsólidos, tanto dentro del cuerpo ígneo como de la roca encajonante, cuando están fracturados (sistema abierto). Estos fluidos de alta temperatura, en el intervalo de 800 a 600 °C, se derivan de las últimas etapas de cristalización del magma y conducen al crecimiento de nuevos minerales mediante procesos que incluyen: (1) reacciones de intercambio en los feldespatos, especialmente Na por K, o K por Na, (2) cambios en la estructura de los feldespatos; (3) albitización; (4) microclinización, (5) crecimiento de micas tri-octaedrales. En ambientes tectónicos anorogénicos los cambios mineralógicos pueden incluir una serie de anfíboles ricos en Na y asociaciones ricas en flúor y boro. Basta decir que de los fluidos alcalinos o altamente salinos desarrollados durante las etapas finales de consolidación de una masa ígnea, resulta una amplia alteración potásica o sódica. Asimismo, el metasomatismo alcalino involucra el reemplazamiento de cuarzo por feldespato K (microclinización) o albita (albitización). Estas características se pueden identificar fácilmente bajo el microscopio, por ejemplo por la presencia de vestigios de núcleos de plagioclasas circundadas por feldespato K, o por vetillas delgadas entrelazadas de feldespato K en la plagioclasa. En el caso de la albitización, son comunes la macla de la albita en los feldespatos K, la albita en los bordes de los granos y las vetillas de albita. La albitización de los feldespatos puede en algunos casos estar acompañada por muscovitización de las biotitas.

La alteración potásica se genera por la introducción de potasio en rocas con silico-aluminatos, viene acompañada con frecuencia por sulfuros (calcopirita, pirita, molibdenita). Los feldespatos K son por lo general de color rojizo debido a las pequeñas inclusiones de hematita.



La alteración sílico-potásica se forma como un reemplazamiento de la plagioclasa y de los silicatos máficos, a temperaturas de 650 a 400 °C. Las asociaciones comunes son feldespato K-biotita-cuarzo, feldespato K-clorita, feldespato K-biotita-magnetita, acompañadas por cantidades variables de otros minerales como la albita, sericita, anhidrita, apatito, y también ocasionalmente rutilo, derivado de la destrucción de la biotita.

2) Alteración Propilítica

La propilita es un término antiguo que se emplea para describir las rocas volcánicas alteradas. La alteración propilítica se caracteriza por la adición de H₂O y CO₂, y localmente S, sin un apreciable metasomatismo del H⁺. Los minerales típicos son epidota, clorita, carbonatos, albita, feldespato K y pirita. En algunos lugares se pueden encontrar también la sericita, óxidos de Fe, montmorillonita y zeolita. La estabilidad de los campos de presión y temperatura puede ser bien definida por el grupo de minerales de las zeolitas que son importantes indicadores de la temperatura y profundidad. La alteración propilítica tiende a ser más profunda hacia la fuente del calor hidrotermal. En superficie la alteración propilítica gradúa en las rocas sanas, o, donde el metamorfismo está presente, en las rocas de las facies esquistos verdes con las cuales es equivalente.

3) Alteración Fílica (Sericítica) y Greisenización

Se tipifica por la asociación cuarzo-sericita-pirita, gradúa al tipo potásico por el incremento de feldespato K o biotita, al tipo argílico por el aumento de minerales arcillosos y al tipo greisen por el incremento de topacio, turmalina, cuarzo y zunyita. La sericita se refiere a micas blancas dioctaedrales de grano fino (muscovita, paragonita, fengita, fuchsita, roscoelita). Sin embargo, las sericitas no son marcadamente diferentes de las muscovitas, se reportan que tiene un alto contenido de SiO₂, MgO y H₂O, y un bajo contenido de K₂O. Bajo el microscopio petrográfico la sericita se diferencia de la muscovita sólo por su menor tamaño y se puede confundir con la pirofilita, o con la flogopita, por lo que se requiere hacer análisis de rayos X o de la microsonda electrónica para poderla identificar correctamente. La alteración sericítica proviene esencialmente de la desestabilización de los feldespatos en presencia del H⁺, OH⁻, K y S, para formar cuarzo, mica blanca, pirita y algo de calcopirita (con un contenido de sulfuros por encima del 20 % en volumen). En el proceso tiene lugar la lixiviación del Na, Mg, Ti, Fe y K.

Greisen, es un término minero antiguo de Cornualles, Inglaterra, que se refiere a una asociación de grano fino de cuarzo-muscovita con cantidades variables de topacio, turmalina, fluorita, óxidos (casiterita, hematita), wolframita, scheelita, sulfuros de Fe, Cu, Mo, Bi y sulfosales de Cu-Bi-Pb. Sin embargo, la alteración de greisen es común en los depósitos porfiríticos, su ambiente más favorable es un tronco (stock) granítico emplazado dentro de una secuencia argilo-arenácea, y asociada con la mineralización de Sn y W. En estas circunstancias el greisen está precedido usualmente por el metasomatismo del Na (albita), durante el cual se producen los



iones de H^+ y se inicia el proceso de greisenización. Esto involucra desestabilización y destrucción de feldspatos y biotitas para formar la asociación cuarzo + muscovita. Los procesos pueden ser más complejos en depósitos minerales que hubo introducción de B, F, Li. De esto resultan diversas reacciones para formar el topacio, la turmalina, y los óxidos. La silicificación puede acompañar al greisen durante y después a la alteración lo que se pone en evidencia por la abundancia de cuarzo en las rocas alteradas. De preferencia la muscovita reemplaza a la biotita.

EL greisen de cuarzo + muscovita puede estar acompañado por etapas progresivas de metasomatismo del F- o del B-, y en el último caso con desarrollo abundante de turmalina, con un dominio simultáneo de las asociaciones de cuarzo-turmalina. Después de la alteración de greisen, pueden proseguir los tipos sericíticos y argílicos debido al incremento de la actividad metasomática del H^+ .

4) Alteración Argílica

Se caracteriza por formación de minerales arcillosos debido al intenso metasomatismo del H^+ (lixiviación ácida) a temperaturas entre 100 y 300 °C. Esta alteración gradúa internamente dentro de las zonas fílicas, mientras que al exterior se pierde dentro del terreno propilítico. Los ambientes epitermales se caracteriza por una extrema lixiviación ácida, y por lo tanto la alteración argílica proporciona una guía muy útil para la mineralización. La lixiviación de los silico-aluminatos da lugar al enriquecimiento de la sílice, de modo que la alteración argílica gradúe en las zonas con material rico en sílice. Los minerales arcillosos reemplazan a las plagioclasas y los silicatos máficos (hornblenda, biotita). Las arcillas amorfas como el alófono reemplazan a los silico-aluminatos.

La alteración argílica intermedia se define por presencia de montmorillonita, illita, clorita, el grupo del caolín (caolinita, dickita, halloysita, alófono) y en menor cantidad sericita, mientras que el feldespato K puede permanecer sin alteración, y sin que se lixivien completamente el K, Ca, Mg y Na.

5) *La alteración argílica avanzada* se debe al intenso ataque ácido a la lixiviación completa de los cationes alcalinos con la destrucción total de los feldspatos y silicatos máficos. La dickita, caolinita, pirofilita, barita, alunita y diáspora son las fases minerales típicas de este tipo de alteración. La lixiviación por encima de los 300°C produce asociaciones que contienen pirofilita, andalucita, cuarzo, topacio y pirita, con cantidades menores de sericita, diáspora, caolinita, rutilo, anhidrita, corindón, zunyita, dumortierita y cloritoide. Las arcillas amorfas (por ejemplo alófono) son comunes en ambiente supergénico. La alteración argílica avanzada se encuentra en yacimientos de pórfidos cupríferos, en zonas internas de las vetas hidrotermales con metales preciosos y es típica de los depósitos epitermales ricos en sulfuros. La alteración alunítica es parte de la alteración argílica avanzada y, como ya se mencionó, en presencia de abundantes iones de sulfatos y protolitos ricos en Al puede llegar a ser una fase dominante.

Otros Tipos de Alteración

Algunas alteraciones que no se relacionan con el hidrógeno son la turmalización, alteración talco-carbonato, serpentización, silicificación, silicatación, fenitización, hematización y alteración de Fe, dolomitización y carbonitización.

a) Turmalinización

En general, las turmalinas ricas en Fe se asocian a los greisens, mientras que las turmalinas ricas en Mg se encuentran en los yacimientos de sulfuros masivos y en los estratiformes de W. La “turmalinita” es el nombre que se le da a las rocas que contienen más del 15% de turmalina, y se asocia a los depósitos de minerales exhalativos en un ambiente de rift o distensivo.

En los depósitos de Sn-W de afinidad greisen y en las chimeneas brechadas son comunes la turmalinización profunda a profunda selectiva. En muchos casos las rocas circundantes a las cúpulas o coronas greisenizadas de los granitos tienen turmalina diseminada, la cual tiende a ser particularmente abundante en las zonas de fracturamiento. Las chimeneas brechoides con turmalina pueden estar asociadas a la cristalización de magmas graníticos bajo altas presiones de volátiles que exceden la carga litostática; los datos de las inclusiones fluidas indican que provienen de soluciones ricas en sales que se forman a profundidades que fluctúan entre 1 y 3 km y a temperaturas que exceden los 300°C.

b) Alteración de Talco-Carbonato y Talco Clorita

La alteración de talco-clorita-carbonatos se considera que se origina por los fluidos metamórficos que fueron canalizados a lo largo de las fracturas principales y resultan del reemplazamiento y alteración de las rocas confinantes metavolcánicas y metasedimentarias. La introducción de grandes cantidades de H₂O y CO₂ dentro de las fracturas principales (zonas de cizalla) es quizás la causa principal de la amplia alteración a escala regional en los ambientes del Arqueano. A lo largo de estas fracturas se observa cualquiera de las etapas de reemplazamiento y alteración por sericitización, albitización, esteatitización (talco) y carbonatos (dolomita, ankerita, magnesita), junto con la concentración local de piritita, arsenopiritita y oro.

c) Serpentinización

Este es el tipo de alteración más común de las rocas ultramáficas. Los minerales de serpentina (antigorita, crisotilo y lizardita) provienen de la alteración del olivino y piroxenos por la introducción de H₂O y CO₂. Sin embargo, la simple hidratación es la reacción más probable, sin cambio de volumen y con remoción del MgO y SiO₂, la serpentización puede ocurrir a temperaturas tan altas como los 500 °C, pero en los ambientes de las crestas oceánicas o dorsales las temperaturas son de alrededor de los 250°C. Las rocas ultramáficas en crestas oceánicas experimentan la serpentización como resultado de penetración y reacción con el agua de mar.

Este fenómeno a una escala más amplia y regional es tal que la serpentinización se considera como un proceso metamórfico regional. El transporte tectónico de complejos máficos-ultramáficos de las crestas oceánicas a las márgenes continentales ocasiona deformación y presiones altas relacionadas con los procesos metamórficos, dando lugar a las rocas denominadas ofiolitas. Las serpentinitas de las rocas ofiolíticas contienen la asociación de la lizardita+crisotilo+brucita \pm magnetita. La última es un subproducto común de la serpentinización y es propio de la expulsión y oxidación del Fe de la estructura de los silicatos. Otros subproductos importantes de la serpentinización son los provenientes de los procesos metasomáticos tales como la albitización, y la formación de rocas peculiares conocidas como rodingitas.

d) Silicificación

Este tipo de alteración hidrotermal es tal vez uno de los más comunes y mejor conocido. Las formas ordinarias comunes de la sílice son el cuarzo α , de baja temperatura, el cuarzo β , de alta temperatura, (573°C), así como la tridimita, cristobalita, calcedonia y el ópalo. El cuarzo α es la forma más común; la cristobalita y tridimita se encuentran en rocas volcánicas y esta última por lo general es un producto de la desvitrificación de los vidrios volcánicos, que da lugar a intercrecimientos con los feldespatos alcalinos. El ópalo $\{\text{SiO}_2(\text{H}_2\text{O})\}$ que es submicroscópico, se asocia con los depósitos de sinter y forma costras coloformes en cavidades de rocas volcánicas. La calcedonia es el componente principal del pedernal y el jaspe, y su color habitual es rojo o café rojizo. En secciones delgadas, la calcedonia aparece fibrosa o con texturas típicas radiales o bandeadas. Durante los procesos hidrotermales la sílice puede ser introducida por los fluidos circulantes, o depositada en forma de sílice residual después de la lixiviación de los cationes. La solubilidad de la sílice se incrementa con la presión y temperatura, y disminuye cuando experimenta una expansión adiabática, de tal manera que en regiones de temperatura y presiones bajas precipita fácilmente, la sílice puede reemplazar todo tipo de roca, siendo tal vez la más común la silicificación de rocas carbonatadas.

e) Silicatación

El reemplazamiento de rocas carbonatadas por silicatos es la silicatación, generalmente a través de la adición de sílice. La silicatación resulta en los skarns, se genera por la adición de grandes cantidades de sílice que da lugar a una amplia variedad de minerales de calco-silicatos. Las asociaciones de minerales de alteración de los skarns incluyen silicatos de Ca, Fe, Mg, Mn, como la epidota, clinozoisita, granate, clinopiroxeno, wollastonita, diópsida, vesuvianita, tremolita-actinolita, andradita, grosularita, flogopita y biotita. Los skarns se desarrollan en el contacto entre los plutones y las rocas circundantes, estas últimas por lo general son carbonatos y menos frecuentes son las rocas silicatadas ricas en Ca. La génesis de los skarns involucra principalmente al metamorfismo de contacto y al metasomatismo, debido a las emanaciones de un plutón en enfriamiento.



f) Fenitización

Este tipo de alteración se genera en las aureolas de carbonatitas y complejos alcalinos. Es un proceso de desilicatación acompañado de la introducción de Na, K, CO₂, CaO, y Al₂O₃, se caracteriza por el desarrollo de piroxenos alcalinos, como la aegirina, anfíboles alcalinos, como la riebeckita, y feldespatos alcalinos (ortoclasa, microclina y albita). Estos últimos con frecuencia tienen un color rojo propio de la presencia de hematita. Las rocas afectadas se llaman “fenitas”, término proveniente de las carbonatitas de Fen (Noruega) donde este tipo de alteración se documentó primeramente.

Los fluidos están en un fuerte desequilibrio con las rocas circundantes, y de los productos de la alteración resultan halos que en algunos casos pueden parecerse a las rocas ígneas primarias. La fenitización se considera, como una transformación propia de los complejos ígneos debidos a la expulsión de volátiles calientes y altamente reactivos y a su posterior infiltración dentro de las rocas circundantes.

g) Hematización y Alteración Rica en Fe

La hematita, los carbonatos de Fe (ankerita, siderita), la clorita rica en Fe y los anfíboles ricos en Fe son a menudo los productos de alteración dominantes en un número importante de yacimientos minerales. Las impregnaciones, diseminaciones y vetillas de hematita están asociadas con las últimas etapas de la actividad hidrotermal en depósitos de Sn-W de afiliación greisen.

h) Carbonatización y Dolomitización

La alteración de los carbonatos de las rocas ricas en Ca y silicatos involucra dos procesos básicos: dolomitización y carbonatización. La primera es un tipo de alteración muy común en calizas, en las cuales el Mg²⁺ sustituye al Ca²⁺, y el CaCO₃ llega a ser CaMg(CO₃)₂. Desde el punto de vista de la mineralización, es importante considerar que las reacciones de dolomitización involucran pérdida de volumen (entre el 6 y 13 %), lo que mejora la porosidad de la roca y la hace más receptiva a los fluidos mineralizantes y está asociada de modo importante a muchos tipos de yacimientos hidrotermales, por lo general a los de baja temperatura, en donde precede y tal vez favorece la precipitación de minerales de sulfuros.

Permanece incierto el origen de la dolomitización a gran escala de las fajas de mármol y tal vez está relacionado a la liberación del CO₂ durante el metamorfismo.

La carbonitización de las rocas máficas es un tipo común de alteración de las fajas de rocas verdes del Arqueano, que contienen vetas de cuarzo aurífero.

5.4 Muestreo

Se solicitó el apoyo al personal de campo que está en el Proyecto Las Cruces del Departamento de Geología de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad que realizara un muestreo de diferentes excavaciones, afloramientos y sondeos para la obtención de ejemplares de materiales para la realización de sus análisis petrográficos correspondientes.

5.4.1. Muestreo de afloramientos y excavaciones

Se obtuvieron de afloramientos, bancos de materiales y de excavaciones del Proyecto Las Cruces figura 36 un total de 29 muestras, las cuales fueron orientadas, marcadas, etiquetadas y descritas en su área de exposición, para su análisis petrográfico correspondiente. Las muestras ya se están trabajando para su análisis correspondiente, algunos resultados que se tienen, fueron utilizadas (5) cinco muestras para definir tipos de alteraciones presentes en el proyecto.

5.4.2 Muestreo de sondeos

Se solicitó al personal del proyecto Las Cruces la obtención de un total de 18 muestras de algunos sondeos de diversos sitios del proyecto, las cuales fueron orientadas, marcadas, etiquetadas y descritas en la ubicación del barreno, así como el uso del escáner para tener su orientación (rumbo y echado) en su área de exposición, para su análisis petrográfico correspondiente.

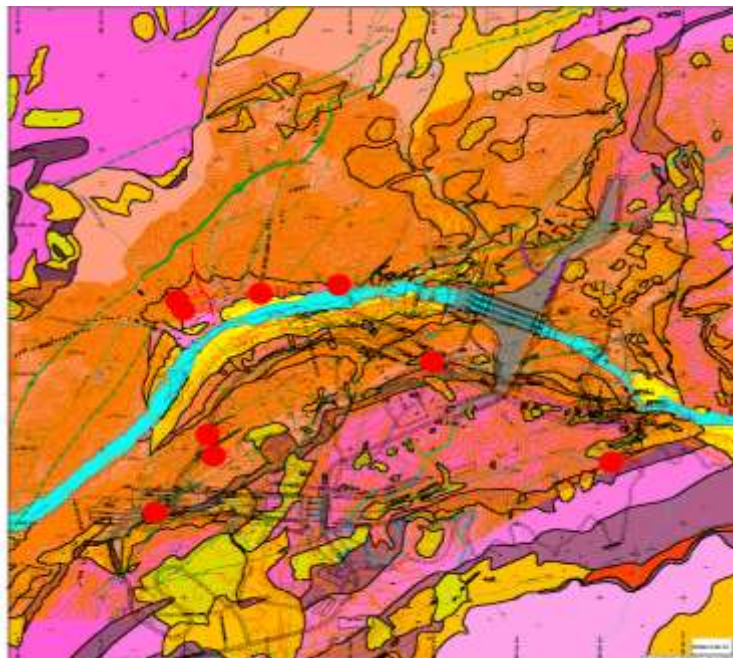


Figura 36. Ubicación muestras colectadas en la zona de interés.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Resultados de la exploración Geológica y Parámetros de discontinuidades obtenidos

El área de la boquilla corresponde a un estrechamiento asimétrico formado por las ignimbritas de la unidad Las Cruces, la cual fue dividida en tres miembros, de acuerdo con sus variaciones texturales y grado de soldamiento. En la margen izquierda afloran además tobas e ignimbritas riolíticas de la unidad Corapan, en donde se encuentra emplazado en forma de manto un pórfido andesítico. Adicionalmente están presentes diques diabásicos alojados tanto en la unidad Las Cruces como en la Corapan, además de materiales de aluvión, suelo residual y talud. Las fallas más importantes que inciden en la zona de la boquilla son Los Bueyes, El Cantil, Las Cruces, Bordones y PHC-2, todas ellas de rumbo general NW-SE, con planos subverticales y lados caídos hacia el SW, excepto la falla Bordones que muestra un plano de 45 a 52° de inclinación. El fracturamiento del macizo rocoso presenta un comportamiento similar al de estas estructuras. La seudoestratificación de las unidades volcánicas en promedio tiene un rumbo de N 48°W/24°NE.

Mediante 7 barrenos ejecutados en el proyecto se alcanzaron 543,20 m de perforación, de los cuales 424,65 m fueron en la margen izquierda y 118,55 m en el cauce del río. En la primera se obtuvo una recuperación de 90,24% y un RQD de 50,85%, mientras que en el cauce fue 89,46% de recuperación y 50,85% de RQD, siendo en consecuencia una roca de regular calidad. A 5 de los 7 barrenos perforados se les practicó pruebas de permeabilidad tipo Lugeon, de donde se obtuvo un promedio de 9 a 10 U.L., lo que equivale a un macizo rocoso poco permeable.

La aplicación de los métodos indirectos permitió identificar tres unidades geofísicas (U1, U2 y U3), que de acuerdo con sus características se correlacionan con las unidades litológicas expuestas en la zona de la boquilla. La U1 se asocia con los depósitos no consolidados, mientras que las unidades U2 y U3 se relacionan con las unidades litológicas Corapan y Las Cruces, respectivamente. Estas dos últimas a su vez se dividieron en subunidades tomando en cuenta las características que presenta la roca. De acuerdo con lo observado las fallas con dirección E-W son las más probables de producir un sismo y en consecuencia las que en un momento dado pueden presentar un cierto riesgo para el proyecto. Se recomienda utilizar como coeficiente de diseño sísmico la aceleración máxima del terreno obtenida a partir de leyes de atenuación en la estructura geológica graben Los Brasiles, la cual presenta mayor peligro sísmico en el proyecto, al otorgarle un valor tentativo de 0,1 g. Con respecto a los bancos de préstamo de material impermeable, se estima que en la zona es posible obtener alrededor de 1 400 000 m³ de este material. Para terminar la factibilidad geológica del sitio se requiere continuar con el programa de barrenación, en particular en la margen derecha y excavar dos socavones, uno en cada margen, a la altura del eje propuesto para cortina. Los rasgos estructurales que muestra el conjunto de rocas volcánicas expuestas en el área de estudio corresponden a fallas de tipo normal, lineamientos, fracturas y emplazamientos de cuerpos intrusivos de diferente composición. La combinación de sus efectos provocó el basculamiento de las unidades litológicas hacia el noreste, con una intensidad muy variable en la inclinación de sus capas, entre

5 y 58°. Desde el punto de vista geológico, destacan las fallas normales y lineamientos por su relativa frecuencia y marcada tendencia estructural al noroeste-sureste, con buzamiento hacia el suroeste, tal y como se puede observar en la figura 13, donde de acuerdo con el análisis estereográfico de 41 datos de las principales fallas identificadas en la zona, se deduce que existen dos sistemas principales, uno orientado de manera preferencial al N 28°W/78°SW y otro de rumbo N 54°W/80°SW. La zona de falla Rosario Viejo y las fallas Los Limos, Los Bueyes, Las Cruces, Hondo, PHC-1 y el lineamiento Las Peñas, forman parte de la Familia I, en tanto que a la Familia II pertenecen las estructuras La Soyamichera, Piedra Parada, PHC-4, PHC-5, PHC-6, El Cantil, El Risco y Bordones, entre otras de menor importancia. Son escasas las estructuras de orientación general N-S, E-W y NE-SW. La Falla Cerro Partido representa al primer patrón estructural, mientras que la falla Los Eslabones forma parte del segundo, en tanto que el último se identifica por algunos lineamientos. Por lo general, estas estructuras muestran en superficie una traza irregular, cuya expresión más notable se refiere a zonas de espesor variable de roca triturada, con planos de falla alabeados de tendencia vertical. Esta disciplina llevó a cabo levantamientos geológicos a detalle y semidetalle en la zona de la boquilla a escalas 1:2 000 y 1:10 000, respectivamente. Además, se efectuaron levantamientos en los cortes en balcón y se localizaron y estimaron 6 bancos de materiales, así como la realización de 84 pruebas Lugeon y la descripción de 543,20 m de muestras de núcleos. También es importante mencionar que como trabajo de gabinete se interpretaron fotografías aéreas e imágenes de satélite a diferente escala.

6.2. Parámetros de discontinuidades obtenidos en campo

Las discontinuidades más importantes que afectan al macizo rocoso en el que estarán alojadas las diferentes obras civiles del proyecto, están representadas por fallas, fracturas, pseudoestratificación y contactos geológicos. Se llevó a cabo un análisis de estas discontinuidades con el objeto de evaluar geotécnicamente a la masa rocosa, para ello se recabaron 627 datos estructurales, obteniéndose de cada uno de ellos su rumbo y echado; posteriormente esta información se graficó por medio del paquete de computación Rockwork, determinándose las mayores concentraciones de polos y en consecuencia la definición de los principales sistemas de fallamiento, fracturamiento y pseudoestratificación. A continuación se describen las características y resultados obtenidos en cada caso.

6.2.1. Fallas

El fallamiento presente en el área de interés es muy frecuente, pero poco importante, está representado por fallas normales con rumbo preferencial NW-SE.

De estas estructuras sólo se considera a 5 de ellas como las más importantes, de acuerdo con su continuidad y zona de influencia, tales estructuras son las fallas Los Bueyes, El Cantil, Las Cruces, Bordones y la PHC-2. Las características de estas fallas se dan a conocer con detalle en los siguientes párrafos y además se mencionan otras de menor importancia.

6.2.1.1. Falla Los Bueyes

Esta falla se encuentra alineada en forma longitudinal al río siguiendo una depresión topográfica en la parte alta de la margen izquierda; sus límites quedan fuera del área de la boquilla, presentando ligeras variaciones en su actitud (N 15-30° W/72-80° SW); en la parte sur del área se manifiesta como una fractura cerrada estando el contacto roca - roca, mientras que en la parte norte, aguas arriba de la sección CR-II se observa continua y bien definida, representada por relices separados entre sí, hasta por 6 m y en ocasiones alcanzan los 8 m de altura (figura 37).



Figura 37. Falla Los Bueyes, aguas abajo del eje. (CFE, 2013).

El espacio entre paredes a veces está relleno por fragmentos de diferente tamaño y en otras ocasiones se observa descubierto con superficies sin estrías ni material de falla, erosionado por el arroyo Los Bueyes que se desplaza en gran parte por esta falla (figura 38).



Figura 38. Falla Los Bueyes.

Esta estructura fue explorada mediante el barrenos PHC-3 en un punto localizado entre las secciones CR-III y C-C', tal barrenos cortó a esta falla en el intervalo que va de 40,50 a 47,00 m y se caracteriza por estar emplazada por un dique diabásico, el cual se encuentra muy fragmentado, alterado y en ocasiones material brechoide en una matriz arcillosa de color rojo oscuro. No se nota un salto estructural; sin embargo, se determinó por métodos geométricos durante la integración de las secciones geológico-geofísicas un salto menor a los 5 m (Planos PHC-03 a 08/2001); de acuerdo con los datos geofísicos (sección geofísica S-2), el mayor espesor de la zona de influencia es de 15 m de ancho. En general esta estructura se presenta en forma de fracturamiento paralelo sin estrías y con planos lisos o ligeramente ondulados y alabeados. A la altura de la sección del eje se une con otra falla de menor importancia con orientación variable de N 20-30° W y buzamiento de 77 a 80° al SW; está representada por un plano con una continuidad aproximada de 550 m, aunque en el tramo de la sección “B” a la CR-I se comporta como una fractura cerrada, pero en ambos extremos muestra una abertura entre planos de 2 a 3 m, sin notarse movimiento. Los planos son lisos y en ocasiones rugosos u ondulados. Con los resultados geofísicos no se observa una zona de influencia importante.

6.2.1.2. Falla El Cantil

Esta estructura se localiza en la margen izquierda cruzando en forma diagonal al eje de la cortina, siendo su límite al oeste y a la altura del cauce del río la falla PHC-2, pues no se ve continuidad en la margen derecha, en tanto que hacia el este se interrumpe con la falla Los Bueyes, alcanzando una longitud aproximada de 800 m; tiene un rumbo general NW-SE con variaciones de 65 a 80° y buzamiento que va de 70 a 80° al SW (figura 39); es de traza ondulada ligeramente convexa al NE.



Figura 39. Falla El Cantil en la porción media de la ladera M.I. (CFE, 2013).

En el área de confluencia con la falla Las Cruces y donde interrumpe a esta última, existe una zona de fracturamiento paralelo entre sí, de 25 m de ancho y en ocasiones se observa también

material triturado o brecha de falla de 2 m de espesor. En las inmediaciones de los cortes en balcón CB-9 y CB-3, aflora el primer miembro tobáceo de la unidad Corapan, notándose en forma muy marcada el mayor efecto del fallamiento sobre esta roca, debido a que los horizontes tobáceos son menos resistentes a los esfuerzos que los ignimbríticos (figura 40).



Figura 40. Corte en balcón CB-9, donde se observa material arcilloso. (CFE, 2013).

En esta zona la roca intacta no rebasa los 20 cm de diámetro. El extremo que da al cauce del río no se observa, debido a que se encuentra cubierto por depósitos no consolidados, pero por métodos geofísicos (sección geofísica S-6) se detectó que continúa todavía al nivel del playón. Por lo que respecta al extremo opuesto, se desplaza sobre la toba Tm-ct1 de la unidad Corapan, observándose únicamente la alteración de la roca, pero no la traza de la falla; sin embargo, con las secciones geofísicas S-3 y S-5 se determinó su continuidad. Cabe mencionar que por medio del barreno PHC-2 se observaron sus características en los tramos de 43,00 a 45,50 m y de 48,50 a 54,00 m. El primer intervalo se asocia a una estructura secundaria paralela a la falla El Cantil, en tanto que el segundo corresponde a esta última; en ambas estructuras se observa material muy fragmentado, triturado con estrías y en ocasiones material arcilloso por hematización. La mayor zona de influencia superficial se observó en el corte CB-3 de 25 a 30 m de ancho, en tanto que en la sección CR-II se encuentra la de mayor profundidad con 26 m de espesor. En la parte acantilada y en el corte CB-3 muestra planos estriados, ondulados a rugosos, con un salto estructural que no rebasa los 5 m. En forma paralela a ésta, existe otra falla de menor importancia.

6.2.1.3. Falla Las Cruces

Se localiza en su mayor parte en la margen izquierda, aunque en su extremo norte atraviesa el río y pasa a la margen derecha; su orientación es N 20° W con buzamiento de 85° al SW. En ambas márgenes, al nivel del río, se considera como la zona principal, con 5 y 7 m de ancho. En la margen derecha exhibe estructuras variables en forma y actitud, con superficies planas a onduladas y rugosas, además de una zona de brecha tectónica de 70 cm de espesor; en cambio en

la margen izquierda esta estructura a nivel del cauce se observa abierta con un máximo de 4,20 m de ancho, disminuyendo hacia el interior a 2,30 m (figura 41). Se encuentra rellena por bloques de tamaño variable hasta material areno-arcilloso, muestra una forma irregular, alabeada y planos ondulados con rumbo general N 6-13° W. En el corte en balcón CB-1 se manifiesta por un pequeño arroyo con orientación N 8-11° W/82-85° SW y en ella está emplazado un dique diabásico de 0,5 a 1 m de espesor.



Figura 41. Falla Las Cruces vista desde la M.D. del río. (CFE, 2013).

La falla en ese sitio muestra una zona cataclástica de 60 a 80 cm de espesor, siendo su traza de forma sinuosa y la zona de influencia de aproximadamente 15 m sobre la ignimbrita de la unidad Las Cruces.

En la porción alta, en el corte en Balcón CB-2, se observa como una fractura de 1 m de ancho, afectando al primer horizonte tobáceo de la unidad Corapan, el cual se encuentra sumamente alterado. El extremo sur de esta falla queda interrumpido por la falla El Cantil, a la altura del corte en balcón CB-9. El extremo sur de esta falla queda interrumpido por la falla El Cantil, a la altura del corte en balcón CB-9.

6.2.1.4. Falla Bordones

Esta falla se ubica en la parte alta de la margen derecha, entre las secciones del eje y la D-D', tiene un rumbo general N 60°-80° W y una inclinación de 45° a 52° al SW; a lo largo de varios metros coincide con la depresión del arroyo El Fortín. Se observó cerrada con una zona de falla de 1 a 3 m de espesor, en ocasiones con material de falla de 1 a 2 m. En el cruce con la sección del eje se observa un relíz de 3 m de alto, plano rugoso, con rumbo N 80° W e inclinación de 48° al SW. Muestra un relleno de material arcilloso de 50 cm de espesor, pero en su mayor parte el contacto es roca-roca. Su traza es sinuosa, pues localmente cambia de rumbo. Su salto estructural no fue posible determinarlo, ya que se carece de horizontes índice (figura 42).



Figura 42. Falla Bordonos a la altura del puerto. (CFE, 2013).

6.2.1.5. Falla PHC-2

El rasgo de la falla PHC-2 se identifica principalmente en la margen derecha, con una longitud aproximada de 550 m y una orientación general N 35° W/75° SW. Cerca del cruce con la sección A-A' se observa el reliz de la falla poco rugoso y ondulado con rumbo N 30° W con 75° de buzamiento al SW, siendo el contacto roca-roca.

En el extremo norte se encuentra cubierta por depósitos de talud, en tanto que en la parte sur atraviesa en forma diagonal al cauce del río, y se infiere su continuidad de acuerdo con el barreno CR-1 por el cual fue cortada; además con esta misma perforación fue atravesado un dique diabásico emplazado posiblemente en dicha estructura.

Debido a la cobertura de material aluvial, no se tienen evidencias de su continuidad en la margen izquierda, ya que ni con los levantamientos geofísicos realizados fue detectada en esa zona.

Por otra parte, de acuerdo con el análisis estereográfico de 47 datos estructurales de fallas recabados en la zona del eje, se determinaron 5 familias, de las cuales la F1 es la predominante y más importante, pues concentra hasta 7 polos, en tanto que de la F2 a la F4 reúnen 3 y la F5 solamente uno.

En la figura 43 se muestra la configuración de polos y los 5 sistemas resultantes.

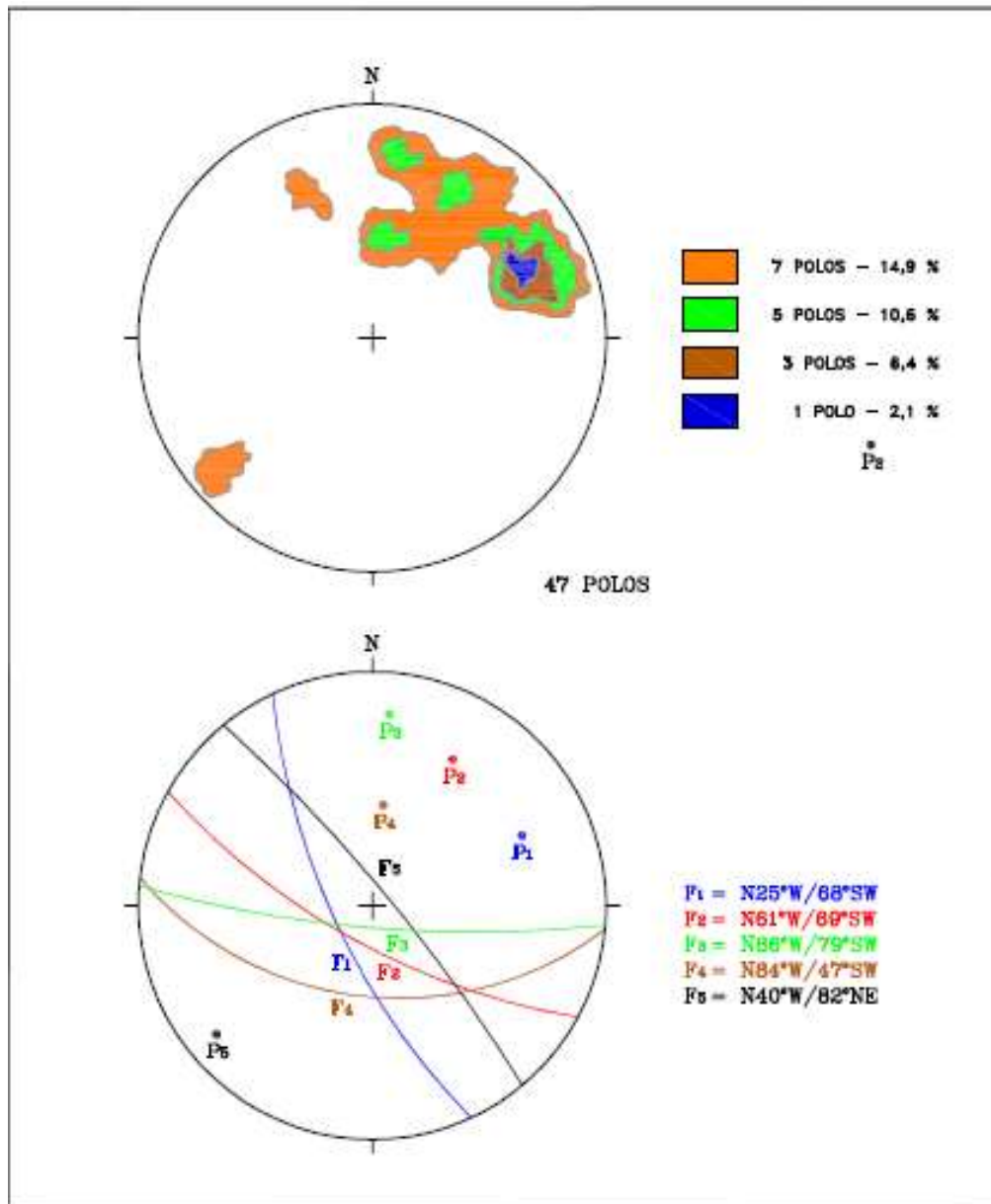


Figura 43. Representación estereográfica del fallamiento en la zona de la boquilla. (CFE, 2013).

En la tabla 17 se indican de manera resumida las características de las fallas que afectan al macizo rocoso en la zona de la boquilla.

Tabla 17. Relación de las principales fallas que afectan a la zona de la boquilla.

Falla	Ubicación	Rumbo	Espesor máximo (m)	Relleno	Longitud (m)	Características generales
Los Bueyes	Margen izquierda	N15-30°W/ 72-80°SW	15	Roca triturada	550	Superficialmente se observa sin estrias en forma de fracturamiento paralelo con planos lisos y en ocasiones rugosos.
El Cantil	Margen izquierda	N65-80°W/ 75-80°SW	25	Roca triturada	800	Es de traza sinuosa, con paredes onduladas y estrias.
Las Cruces	Margen izquierda	N20°W/ 80-85°SW	15	Roca triturada	850	Alcanza aberturas hasta de 4 m con relleno de material arcilloso o grava-arena de origen fluvial.
Bordones	Margen derecha	N60-80°W/ 45-52°SW	4	Roca triturada	500	Se observa sin relleno, siendo el contacto roca-roca.
PHC-1	Margen derecha	N30°W/ 75°SW	1 - 2	-	400	Se encuentra cerrada estando el contacto roca-roca.
PHC-2	Margen derecha	N30-35°W/ 68-75°SW	5	Roca triturada	550	Fue cortada por el barrenado CR-1, encontrándose roca muy triturada.
PHC-3	Margen derecha	N48°W/ 62-70°SW	2	-	300	No se observan estrias ni material de falla.
Escarpe	Margen izquierda	N10°W/ 70-75°NE	2	Roca triturada	150	El plano de falla tiene espejos y estrias verticales. Esporádico material de falla.
Cerro Partido	Margen derecha	N5-25E°/ 68-85°SW	1 - 2	Roca triturada	200	Presenta material triturado como relleno. Tiene un rumbo variable.
El Mango	Margen izquierda	N50°W/ 88°NE	1 - 2	Roca triturada	400	Forma un aparente graben en conjunto con la falla El Cantil.
El Risco	Margen derecha	N60-70°W/ 70-76°SW	1	Roca triturada	270	Ocasionalmente presenta relleno de material de falla.

6.2.2. Fracturas

En la zona de la boquilla se llevó a cabo un levantamiento de rumbo y echado del fracturamiento existente, totalizando 297 datos en la margen derecha y 253 en la margen izquierda. En la primera, la toma de datos fue sobre Las Cruces, mientras que en la segunda fue en Las Cruces y Corapan, en esta última fue en proporción menor. De acuerdo con la información obtenida el fracturamiento en el sitio es muy persistente, tiene una continuidad a rumbo de 10 a 30 m en promedio, aunque en ocasiones hay algunas fracturas que alcanzan hasta 100 m de longitud y otras que no rebasan 10 m, estas dos últimas se manifiestan en un porcentaje muy bajo. En general la frecuencia es de 1 a 2 estructuras por metro, de traza regular plana a irregular con superficies onduladas rugosas; sus aberturas varían de 2 a 8 cm con relleno de suelo y fragmentos de roca. También existe fracturamiento con planos cerrados en contacto roca-roca. Los datos se analizaron separadamente por cada margen, en primer término en la margen derecha se logró el aislamiento de los sistemas siguientes (figura 44): F1= N 28° W / 78° SW; F2= N 69° W / 80° SW. En esta margen se definió claramente un sistema principal (F1) y otro secundario (F2). El primero es el sistema estructural representativo del área, pues es el mismo que también resultó para las fallas. Este fracturamiento es predominante con una continuidad de 10 a 30 m, espaciamiento de 1 a 2 planos por metro, de traza irregular y de superficie ondulada rugosa.

El F2 es menos persistente, de continuidad variable, 2 a 3 fracturas por metro, traza regular a irregular y muestra superficies onduladas rugosas.

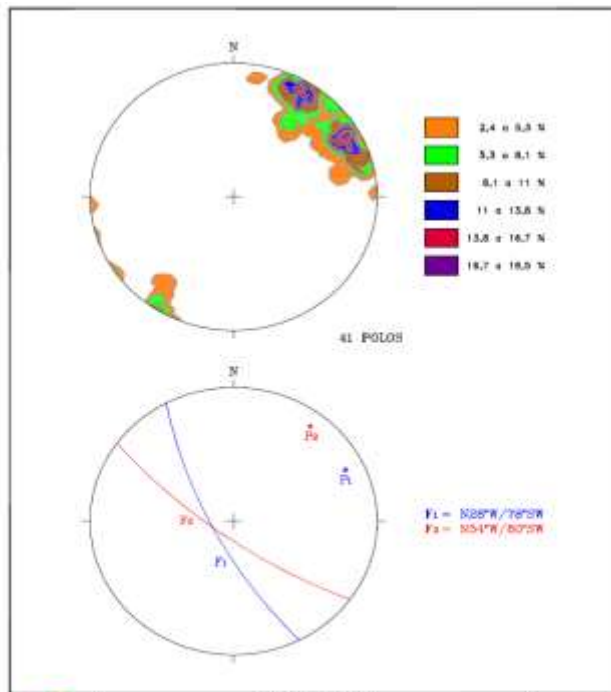


Figura 44. Representación estereográfica del fallamiento. (CFE, 2013).

En la margen izquierda los sistemas preferenciales de fracturamiento que se determinaron observan el siguiente comportamiento (figura 45):

F1= N04°W/86°SW; F2= N60°W/83°SW

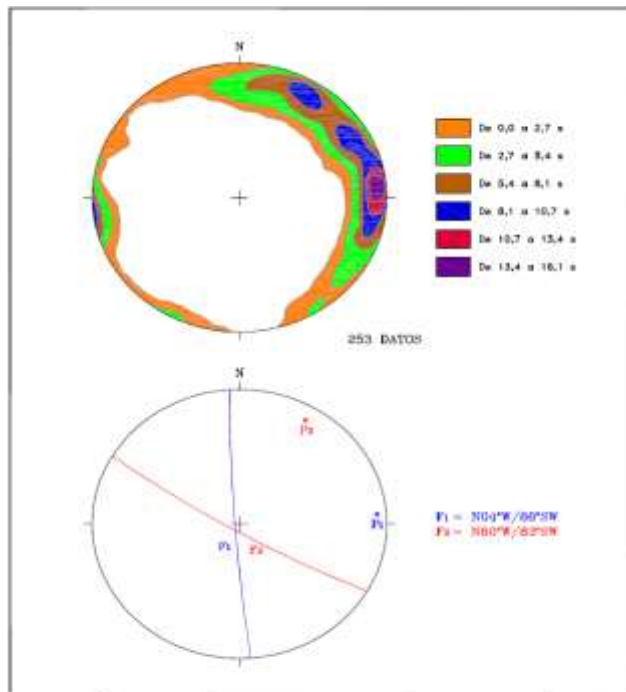


Figura 45. Estereogramas de Fracturamiento M.I. P.H. Las Cruces. (CFE, 2013).



En esta margen la actitud de los dos sistemas tiene aproximadamente la misma tendencia que los de la margen derecha; varía un poco el sistema F1 respecto al anterior, pero hay que tomar en cuenta el menor número de polos y que gran cantidad de ellos fueron tomados sobre la unidad Corapan, lo que de alguna manera influyó en la variación.

Por lo que respecta a las características del fracturamiento de esta margen, son muy semejantes a las de la margen anterior, incluyendo las que se localizan sobre la unidad Corapan.

Es notable dentro de esta unidad un fracturamiento (F1) con una continuidad de hasta 120 m, aguas arriba de la sección “A” (Plano PHC-02/2001), paralelo a la falla Los Bueyes; tal fracturamiento es consecuencia de esta última, observándose en su mayor parte cerrado y rara vez con aberturas de 0,5 a 1 cm, rellenas por suelo; tienen forma regular con planos lisos ondulados.

Como ya se hizo mención, ambas márgenes presentan gran similitud en sus sistemas de fracturamiento, así como en sus características físicas.

6.2.3. Seudoestratificación

Otra característica muy importante del macizo rocoso en el que estarán implantadas las diferentes obras civiles es la seudoestratificación, la cual es más notable en la unidad Corapan, debido a que sus horizontes son más delgados, de 0,5 a 3 m, predominando esta variación en los horizontes tobáceos; en cambio la unidad Las Cruces es masiva, excepto el miembro Tm-ic1, que presenta una seudoestratificación delgada a gruesa que varía de 15 cm a 3 m de espesor, mientras que en los otros miembros va de 5 a 25 m.

Cabe hacer mención que en la margen izquierda se nota un arqueamiento en los paquetes del miembro Tm-ic3 de la unidad Las Cruces, siendo la parte más alta la que está entre las secciones CR-II y CR-III. Hacia aguas arriba se va clavando hasta desaparecer a la altura de la falla Los Bueyes, al nivel del río, mientras que hacia aguas abajo su inclinación es menor al interrumpirse con la depresión ocasionada por el arroyo El Tigre. A nivel local todos los seudoestratos siguen la tendencia de dicho abombamiento, originado seguramente por los cuerpos intrusivos cercanos al sitio.

Con la finalidad de definir la orientación preferencial, se recabaron 32 datos de rumbo y echado, para después graficarse en redes estereográficas, obteniéndose una concentración de polos bien marcada, a partir de la cual se definió el sistema preferencial, el cual tiene una actitud N 48° W/24° NE. La configuración de polos y el sistema preferencial resultante se pueden observar en la figura 46.

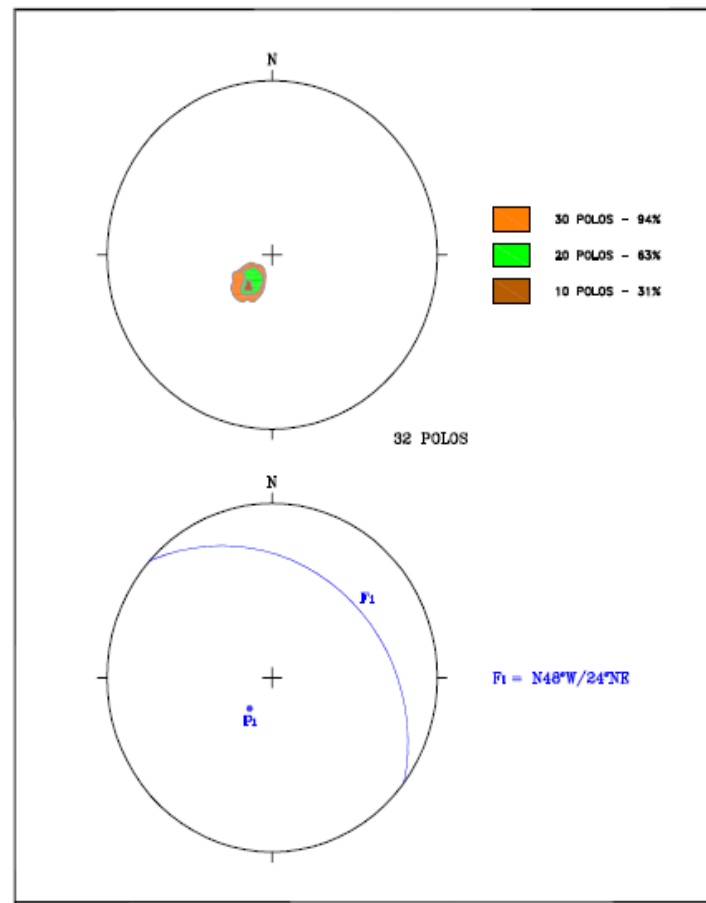


Figura 46. Estereogramas de la pseudoestratificación P.H. Las Cruces. (CFE, 2013).

6.2.4. Contactos geológicos

En la margen izquierda de la zona de la boquilla aparecen todos los contactos de los horizontes tobáceos e ignimbríticos de las unidades Las Cruces y Corapan, así como el pórfido andesítico y los diques diabásicos, mientras que en la derecha se observa únicamente la unidad Las Cruces, sólo con sus cambios texturales. De acuerdo con lo anterior se deduce que la margen izquierda es la que en un momento dado pudiera tener alguna desventaja en lo que respecta a infiltraciones, pero en varios puntos se pudo constatar que dichos contactos están sellados y sin desarrollo de suelo o material de arrastre. También es importante mencionar que el eje de cortina corta en forma perpendicular el rumbo de los contactos, lo que pudiera facilitar la fuga de agua del embalse; sin embargo, mediante las pruebas de permeabilidad tipo Lugeon realizadas en la margen izquierda, se comprobó que las zonas de contacto resultaron ser poco permeables a impermeables por lo que se estima que no habrá problema alguno, además tomando en cuenta la gran cantidad de material arcillo-limoso que contienen las unidades litológicas, ayudará en gran medida a que esta discontinuidad tienda a ser impermeable.

6.3. Resultados obtenidos de los análisis petrográficos

Los análisis petrográficos (Anexo petrográfico y microfotografías) dieron como resultado que todas las rocas son de origen ígneo; extrusivas clasificadas como tobas de composición acida (riolitas) variando a composición intermedia (andesitas) e ignimbritas riolíticas a intrusivas plutónicas dioritas a hipabisales pórfidos andesíticos. En estas se presentan alteraciones principales como oxidación, argilitización desvitrificación y silicificación y en menor grado cloritización, serpentización y uralitización. La orientación de las discontinuidades es diversa según se puede observar en la tabla 18.

Tabla 18. Resumen de parámetros de los Análisis Petrográficos. (CFE, 2014)

N° MUESTRA	LOCALIDAD	COORDENADAS	ESTRUCTURA	TEXTURA	ORIGEN	CLASIFICACIÓN	ALTERACIÓN	ORIENTACIÓN DISCONTINUIDADES
PHLC-Tmic2-BRV-133 (1)	PH Las Cruces, Nay.	X= 505 166 Y= 2442397 Barreno BRV-133 88.94-89.14	Masiva Amigdaloides	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita de composición riolítica oxidada	Oxidación, argilitización desvitrificación	E-W abierta, cerrada, N40°E abierta
PHLC-S2MI-1 (2)	PH Las Cruces, Nay.	Socavón 2 MI	Masiva Amigdaloides	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita de composición riolítica oxidada	Oxidación, argilitización desvitrificación	E-W abierta, cerrada, N40°E abierta
PHLC-S-1 (3)	PH Las Cruces, Nay.	MI aguas abajo 7 m de entrada socavón 2	Masiva Amigdaloides	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita de composición riolítica	Oxidación, argilitización desvitrificación	E-W cerrada, N60°W, N25°W, cerradas y a
M-1 (4)	PH Las Cruces, Nay.	X= 505 571 Y= 2441730	Masiva Compacta Amigdaloides	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita riolítica densamente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	N70°E, cerradas
M-2 (5)	PH Las Cruces, Nay.	X= 505 485 Y= 2441803	Masiva fluidal	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita riolítica moderadamente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	N-S, E-W, N60°W, N15°E, cerradas y abiertas
M-3 (6)	PH Las Cruces, Nay.	X= 505 364 Y= 2441857	Masiva Compacta Amigdaloides	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita riolítica moderadamente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	N-S, E-W, N60°W, N15°E, cerradas y abiertas
E-3 (7)	Embalse MI PH Las Cruces, Nay.	X= 506 451 Y= 2443868 Z= 218	Masiva Compacta	Eutaxítica hipocristalina	Piroclástico	Ignimbrita riolítica de biotita débilmente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	N40°W, N-S, E.W abiertas
E-6 (8)	Embalse MD PH Las Cruces, Nayarit	X= 501 410 Y= 2452665	Masiva Compacta	Porfídica intersertal	Ígneo intrusivo	Pórfido andesítico de piroxenos	Oxidación, argilitización cloritización serpentización	N-S, N45°E Cerradas
E-11 (9)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 505 308 Y= 2444748	Masiva Compacta	Piroclástica	Piroclástico	Toba riolítica brechoide	Oxidación, desvitrificación	N-S, N45°E cerradas



E-1 (10)	Embalse MI PH Las Cruces, Nayarit	X= 505 781 Y= 2444320	Compacta Fluidal	Piroclástica epiclásica	Vulcano - sedimentario	Toba cristalina de composición andesítica carbonatada	Silicificación Oxidación, desvitrificación argilitización carbonatación	N30°E cerradas
E-2 (11)	Embalse MI PH Las Cruces, Nayarit	X= 506 264 Y= 2443913	Masiva brechoide	Eutaxítica	Ígneo extrusivo o explosivo (Piroclástico)	Ignimbrita riolítica Moderadamente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	N65°W cerradas
E-4 (12)	Embalse MI PH Las Cruces, Nayarit	X= 505 236 Y= 2445287	Masiva compacta	Eutaxítica	Ígneo extrusivo o explosivo (Piroclástico)	Ignimbrita riolítica Argilitizada densamente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	N75°W cerradas
E-5 (13)	Embalse MI PH Las Cruces, Nayarit	X= 504 205 Y= 2448228	Masiva Compacta	Piroclástica	Ígneo extrusivo o explosivo (Piroclástico)	Toba vítrea desvitrificada	Oxidación desvitrificación silicificación	N55°E cerradas
E-7 (14)	Embalse MD PH Las Cruces, Nayarit	X= 501 758 Y= 2453732	Masiva Compacta	Porfídica Pilotaxítica	Ígneo intrusivo o Hipabisal	Andesita porfídica propilitizada	Oxidación, cloritización carbonatación silicificación	N-S, E.W cerradas
E-8 (15)	Embalse MD PH Las Cruces, Nay.	X= 501 799 Y= 2455195	Masiva Compacta	Piroclástica	Piroclástico	Toba lítica desvitrificada riolítica	desvitrificación silicificación carbonatación	N35°E cerradas
E-9 (16)	Embalse MD PH Las Cruces, Nay.	X= 501 799 Y= 2455195	Masiva Compacta	Piroclástica	Piroclástico	Toba lítica oxidada de composición andesítica	Oxidación, desvitrificación	N35°E cerradas
E-10 (17)	Embalse MI PH Las Cruces, Nayarit	X= 503 936 Y= 2451317	Masiva Compacta	Piroclástica	Ígneo extrusivo o explosivo (Piroclástico)	Toba lítica andesítica oxidada	Oxidación, argilitización desvitrificación carbonatación	N75°W cerradas
E-12 (18)	Embalse MD PH Las Cruces, Nayarit	X= 505 113 Y= 2445121	Masiva fluidal	Eutaxítica	Ígneo extrusivo o explosivo (Piroclástico)	Ignimbrita riolítica ligeramente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación silicificación	N-S abiertas, n43°E abiertas, e-w cerradas
E-13 (19)	Embalse MD PH Las Cruces, Nayarit	X= 504 756 Y= 2445850	Masiva Compacta	Porfídica	Ígneo intrusivo o Hipabisal	Andesita porfídica argilitizada- sericitizada- hematizada	Oxidación argilitización carbonatación	N-S, cerradas N75°W abierta



E-14 (20)	Embalse MD PH Las Cruces, Nay.	X= 503 948 Y= 2447936	Masiva Compacta	Eutaxítica	Piroclástico	Ignimbrita brechoide	Oxidación desvitrificación	N70°W Abiertas N48°E cerradas
Arroyo (21)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 530 Y= 2438464	Masiva Compacta	Holocristalina glomeroporfídica	Ígneo extrusivo	Andesita de piroxenos	Uralitización oxidación argilitización carbonatación	N48°E Cerradas
PCR-2 (22)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 474 Y= 2438814	Masiva Compacta	Porfídica intersertal	Ígneo intrusivo o Hipabisal	Andesita porfídica de piroxenos	Oxidación, argilitización cloritización	
PCR-4 (23)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 451 Y= 2438356	Masiva Compacta	Holocristalina hipidiomórfica	Ígneo intrusivo	Diorita de piroxenos	Oxidación, silicificación	
MP4 (24)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 305 Y= 2438412 Barreno PCR05C 26.10-26.18	Compacta amigdaloides	Eutaxítica	Ígneo extrusivo explosivo (Piroclástico)	Ignimbrita lítica amigdaloides densamente soldada	Oxidación, argilitización desvitrificación	Amígdalas
MP6 (25)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 305 Y= 2438412 Barreno PCR05C 52.85-52.95	Compacta con poros	Hipocristalina	Piroclástico	Toba andesítica amigdaloides cloritizada	Cloritización argilitización desvitrificación	Amígdalas
MP-1 (26)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 305 Y= 2438412 Barreno PCR-5C 9.30-9.40	Compacta con poros	Piroclástica	Piroclástico	Ignimbrita ligeramente alterada	Oxidación, argilitización desvitrificación carbonatación	N60°E Abiertas
MP-2 (27)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 305 Y= 2438412 Barreno PCR05C 15.05-15.10	Compacta masiva con poros	Piroclástica	Piroclástico	Toba riolítica	Oxidación, argilitización desvitrificación	N60°E Cerradas
MP-3 (28)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 305 Y= 2438412 Barreno PCR05C 23.13-23.18	Compacta masiva con poros	Piroclástica Esferulítica	Piroclástico	Toba riolítica	Oxidación, argilitización desvitrificación	N-S, E-W Abiertas
MP-5 (29)	PH Las Cruces, Nayarit	X= 507 305 Y= 2438412 Barreno PCR05C 46.50-46.58	Compacta masiva	Piroclástica	Piroclástico	Toba riolítica	Oxidación, argilitización desvitrificación	N24°E Abiertas

6.4. Parámetros obtenidos del análisis de las fotomicrografías

Utilizando una línea de exploración se pudo determinar las propiedades de los elementos a considerar sobre todo el número de fracturas perpendiculares a esta línea de exploración para de esta forma obtener sus propiedades de apertura (figura 47).

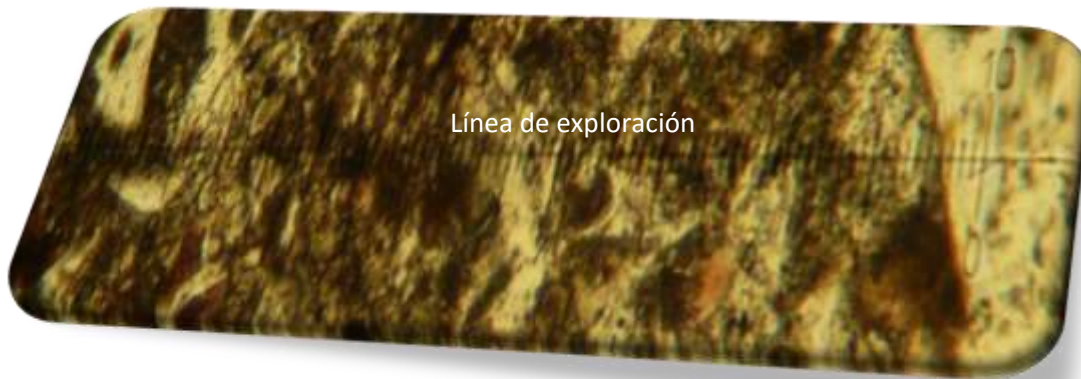


Figura 47. Línea de exploración para definir número y apertura de los sistemas de fracturas. (CFE, 2015).

Los resultados obtenidos se dan en base a la medición de los datos estructurales de los planos de fractura de veinte y nueve secciones delgadas orientadas de muestras de afloramiento y de núcleos de pozos.

La selección de muestras y de núcleos de roca consideró el número de conjuntos identificados de acuerdo con la metodología de Monroy (Monroy, 2009).

También se seleccionaron secciones delgadas de las muestras de corte que fueron revisadas en los intervalos de interés. Se muestran algunas imágenes representativas de las discontinuidades encontradas y sus parámetros obtenidos, también se observan atributos de familias de fracturas de un macizo rocoso.

Del análisis de las fotomicrografías (figura 48) con luz natural y con nicols cruzados se puede mencionar lo siguiente:

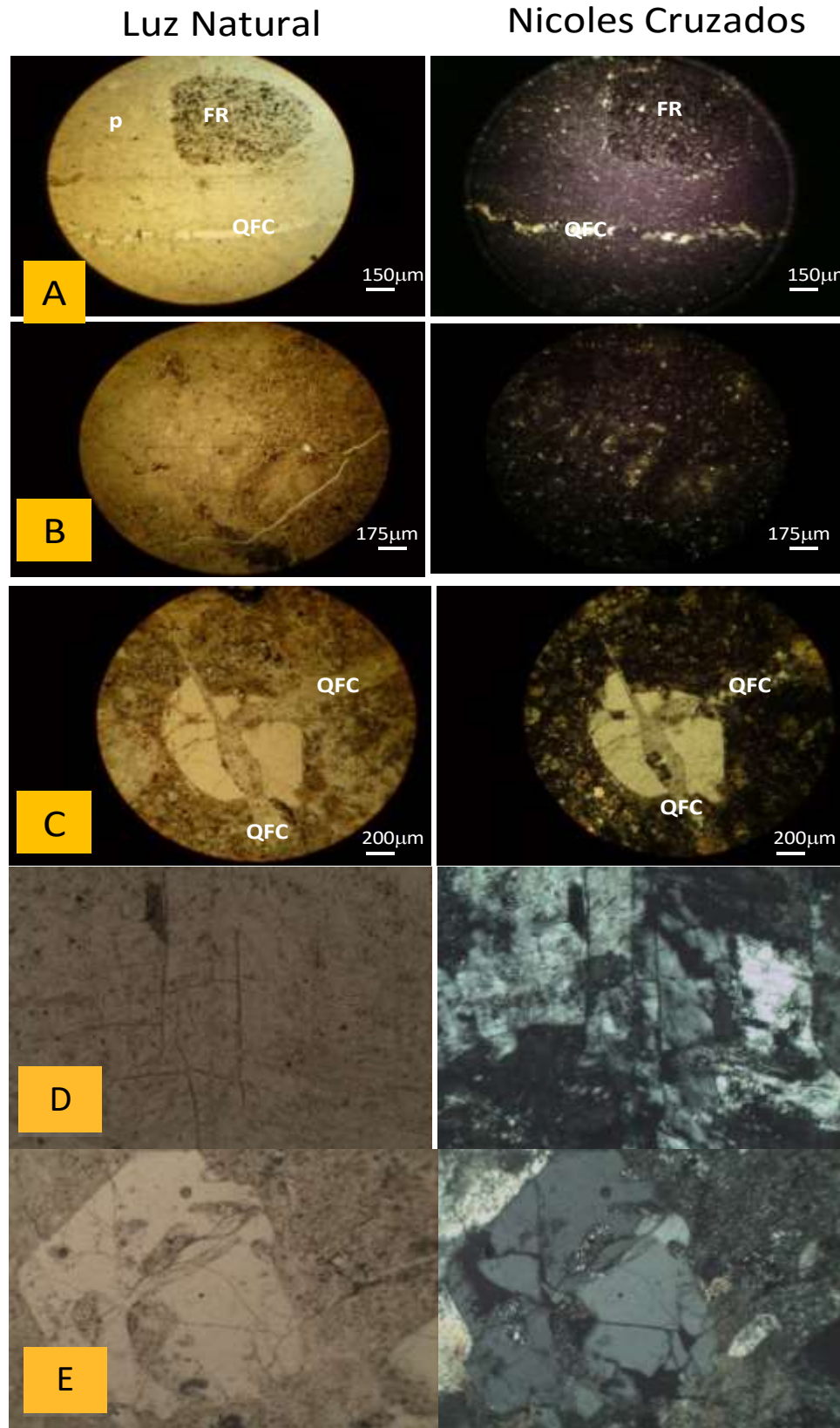


Figura 48. Fotomicrografías con luz natural y nicoles cruzados. (CFE, 2014)

Fotomicrografías A. La familia de fracturas 1 tiene orientación E-W, caracterizada por discontinuidades lineales, completamente cerradas cementadas por material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato, la ondulación indica probablemente movimientos de rumbos sinextrales durante su precipitación. Fracturas de esta familia presentan porosidad remanente con evidencias de migración de fluidos.

Fotomicrografías B. Fracturas de la familia 2, con dirección NE70°SW, están abiertas y presentan porosidad visible e indicando alta conductividad de fluidos.

Fotomicrografías C. Familia de fracturas 3 con similar orientación que la familia 2, pero con porosidad remanente y fluidos indicando alta conductividad. Note el material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato cerrando la discontinuidad y se observa también la Familia 4 con una gran fractura sellada NW20°SE, el cementante es material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato casi cerrando la porosidad total. Note que las microfracturas rellenas de cuarzo son postcinemáticas.

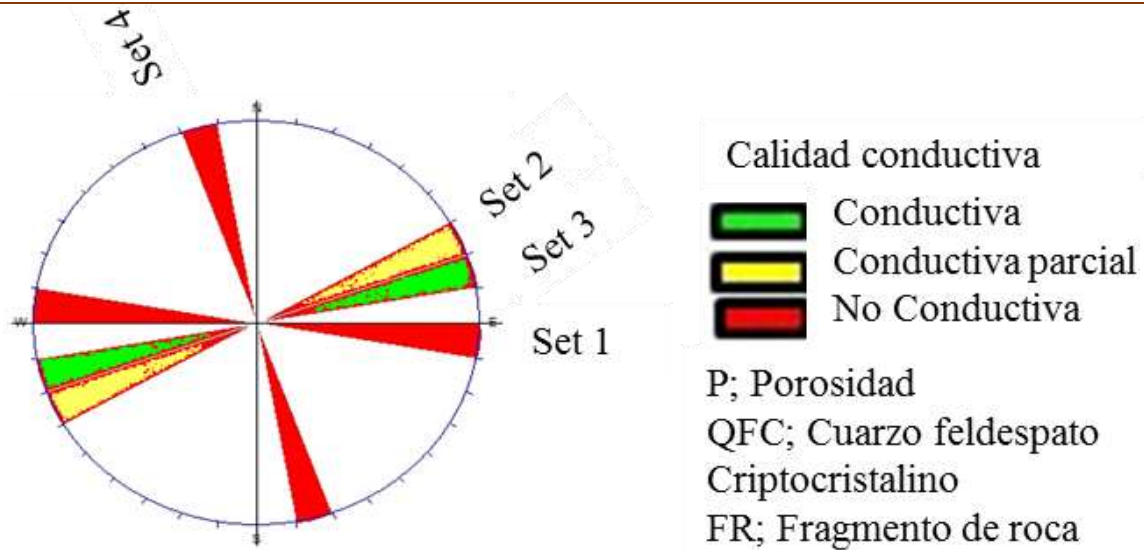
Fotomicrografías D. Las fotomicrografías tomadas con el objetivo 10x pol exhiben cristales de plagioclasas con microfracturas y alteradas a incipientemente a minerales arcillosos, así como fragmentos de roca con textura microlítica alterados a hematita-limonita.

Fotomicrografías E. Por otra parte, las fotomicrografías tomadas con el objetivo 4x pol exhiben cristales de cuarzo corroídos y con fracturas, así como cristales de feldespatos alterados e incluidos en la matriz vítrea.

La figura 49 muestra que las Fracturas de las familias 3 y 2 son los principales conjuntos conductores, el cemento de cuarzo y feldespato bajan en gran parte la porosidad de fractura como cemento postcinemático, y esta es un comparativo de la densidad del fracturamiento y abundancia en núcleos y secciones delgadas de muestras colectadas en el área de estudio, todas las orientaciones de familias de fracturas son incluidas.

El número de fracturas en secciones delgadas incluyeron fracturas conductivas, parcialmente conductivas y no conductivas.

Note que la densidad de fracturamiento depende de la escala. Por esta razón, las medidas de fracturas conductivas de apertura mínima es muy importante para estimar la densidad de fractura para aquellas fracturas que impactan en el macizo rocoso.



Datos obtenidos de la Comisión Federal de Electricidad (Laboratorio de Petrografía, noviembre 2014)
Figura 49. Comparativo de la densidad del fracturamiento en el área de estudio.

6.4.1. Abertura de la fractura, análisis de la densidad y conductividad

Se calcularon las aberturas y la densidad de las fracturas. Las aberturas de las fracturas y la separación de las fracturas se midieron directamente sobre secciones delgadas utilizando el método de líneas de exploración (líneas de medición), de acuerdo con el criterio de Marrett et al. (1999). Todas las líneas de exploración fueron tomadas perpendiculares a las fracturas.

Las aberturas de las fracturas para un conjunto se representan en una escala logarítmica-logarítmica, donde un fenómeno que sigue una ley de potencias, es representado por una línea recta.

Para hacerlo, se trazaron las aberturas en contra de su frecuencia acumulada, la identificación de los valores máximo y mínimo de apertura, así como el tamaño de la abertura conductora mínima observada.

Las Frecuencias acumuladas se normalizaron de acuerdo con la longitud de la línea de exploración, y la intensidad de fractura o densidad calculados (número de fracturas / metro).

En el gráfico log-log, la intensidad de los sistemas de fractura calculada es el número de fracturas por unidad de longitud de un valor específico de tamaño de apertura o superior. Debido a que el cálculo de la densidad de fractura depende del tamaño de la (tamaño de la abertura en este caso) de atributo, en este estudio se utilizó para este cálculo, la abertura mínima conductora (AMC) de tamaño, que se determina mediante inspección visual bajo el microscopio de esas fracturas más pequeñas con el resto de la porosidad y de evidencias de migraciones (Monroy, 2009).

Este atributo de fractura es importante porque puede establecer el intervalo de aberturas que se puede empezar a considerar en el cálculo de la intensidad de la fractura.

La Densidad de Fractura calculado por este método en secciones delgadas, nos permite comparar de un conjunto a otro, y para decidir cuál de ellos tiene mayor densidad; y también nos permite comparar conjuntos de una unidad de flujo a otro, conjuntos de una parte del depósito a otro, o conjuntos de un campo a otro.

Se calculó también el espacio promedio entre las fracturas, utilizando la longitud de la línea de exploración, para distribuir todas las fracturas en el espaciamiento regular (Gale et al., 2004; Gómez y Laubach, 2006; y Ortega et al., 2006). El cálculo tanto de la abertura de la fractura como de la separación se llevó a cabo para todos los conjuntos de fractura.

La conectividad, de acuerdo con Robinson (1983), es el número de intersecciones de fractura dividida por el número de fracturas. Sin embargo, la conectividad de un sistema de fracturas (uno o varios conjuntos) puede variar desde un punto de vista estático a dinámico para el flujo de fluidos.

Las fracturas en un sistema pueden ser abiertas o parcialmente abierta pero poco conectado, o conectado, pero sellada.

En términos prácticos, si las fracturas en el análisis, están parcialmente o totalmente abierta, podemos establecer una clasificación, utilizando la ecuación del Robinson s para el núcleo y la escala sección delgada, para definir la conectividad de fracturas en alto (> 1), media (0,5 a 1,0) y baja ($< 0,5$) (Monroy, 2009). Estos criterios *pueden ser extrapolados para un sistema en el que varios conjuntos interactúan en un depósito. Se estimó una fractura de conectividad cuantitativa para comparar la diferencia.*

Ploteos log-log de apertura contra la intensidad para fracturas conductivas más alta. Los sistemas de fractura 2 y 3 tienen buena conductividad, sin embargo el set 3 tiene más alta intensidad que la fractura del set 2 (figura 50).

Estos ploteos son poderosas herramientas para comparar la densidad de la fracturas, en este caso si nosotros tomamos una apertura conductiva mínima de 0.009 mm, la intensidad de la fractura del set 2 es cerca de 270 fracturas por metro, mientras que el set 3 la densidad de la fractura es de 150 fracturas por metro, indicando que la densidad de la fractura es mucho mayor en el set 2. Puntos de Colores rojos significan fracturas cerradas de este set, verde significa fractura abierta y amarilla parcialmente abierta.

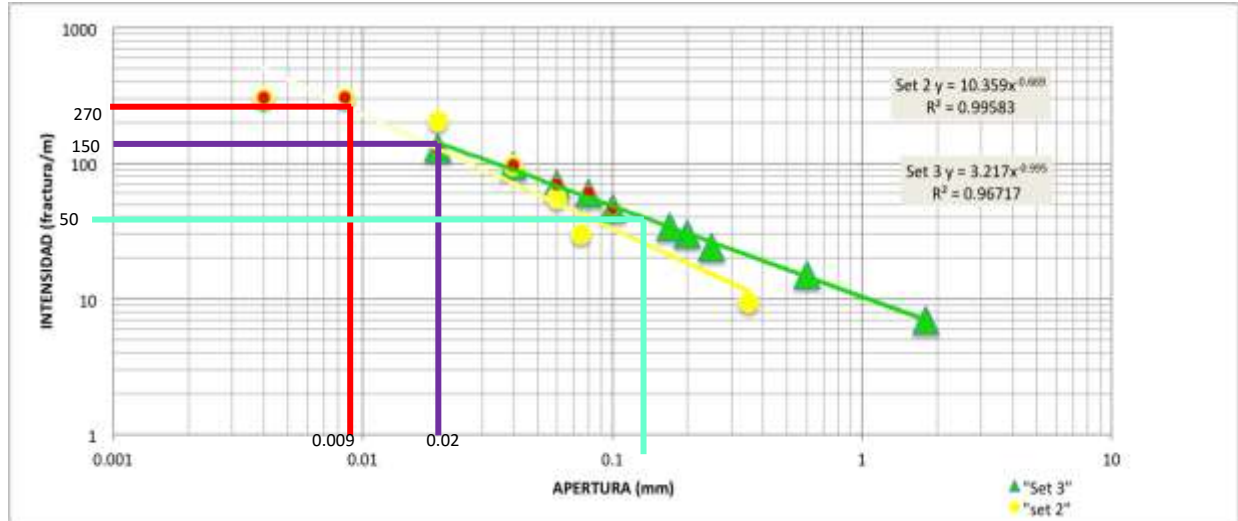


Figura 50. Intensidad del fracturamiento normalizado de la distribución de fractura acumulativa para fractura del set 2 y 3.

Los atributos del fracturamiento para todos los conjuntos permiten su clasificación de estos desde las mejores conductoras a las que están cerradas y son no conductoras. La familia de fracturas con mejor característica de conductividad son los conjuntos 3 y 2. Observe que los conjuntos 1 y 4 son no conductoras. Por lo que podemos decir que las fracturas con tendencias NE-SW son los que son los mejores conjuntos conductoras, mientras que los de dirección NW-SE y E-W son los cerrados o no conductoras.

6.5. Resultados y discusión de los análisis petrográficos

Los resultados de la aplicación de un estudio petrográfico estructural, a lo largo de la fractura y el cálculo de sus atributos, permite la identificación de los principales conjuntos de fracturas conductoras y parcialmente conductoras de los macizos rocosos en boquillas y embalses de una presa como es el caso del PH Las Cruces, Nayarit.

Para masas de rocas ígneas naturalmente fracturadas, de porosidades muy bajas (de menos del 2% o menor) este análisis es muy importante, ya que nos permite interpretar las direcciones de fracturas conductoras y la dirección principal del flujo de fluidos. Además, nos permite extrapolar la información para predecir la calidad en otras zonas de interés, así como para calcular el volumen de fluido almacenado en las fracturas. El estudio también permitió el ranking (figura 51) de los conjuntos de fracturas conductoras a conjuntos cerrados, lo cual es muy importante para obtener parámetros geotécnicos.

Set	Rumbo	Conductividad	Cementos		Apertura (mm)	Apertura mínima conductiva	Densidad > (apertura conductiva)	Porosidad total Remanente	Porosidad total equivalente
			syncine matico	postcine matico					
1	E-W	No Conductivo	Cuarzo, feldespato	Cuarzo, feldespato	0.02-1.9	0	0	0	-
2	NE-SW	Parcialmente conductivo	Cuarzo, feldespato	Cuarzo, feldespato	0.001-0.34	.009	270	13	0.26
3	NE-SW	Conductivo	Cuarzo, feldespato	Cuarzo, feldespato	0.01-3.4	.02	150	5.55	0.11
4	NW-SE	No conductivo	Cuarzo, feldespato	Cuarzo, feldespato	.004-1.2	0	0	0	-

Figura 51. Ranking de familias de fracturas.

El Ranking de familias de fracturas encontradas en los análisis realizados nos indican que, las fracturas set1 tiene orientación E-W, con discontinuidades lineales, completamente cerradas por material cementante criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato, la ondulación indica probablemente movimientos de rumbos sinextrales durante su precipitación, apertura medida de .02 mm a 1.9 mm, con densidad y porosidad ausente.

Fracturas de la familia set2, con dirección NE70°SW, están abiertas de 0.001mm a 0.34 mm con una abertura conductiva de 0.009 mm una densidad de 270 y porosidad visible de 13% a una porosidad total equivalente de 0.26% e indicando alta conductividad de fluidos, que corresponden a la dirección principal de fallas encontradas en la boquilla y en margen izquierda.

La familia de fracturas set3 con similar orientación que la set2, pero con porosidad remanente y fluidos indicando alta conductividad con aberturas medidas de 0.01mm a 3.4 mm con una apertura mínima conductiva de 0.02 mm, una densidad de 50, porosidad equivalente de 5.55% y porosidad total equivalente de 0.11%, se observa también la familia set4 sellada con orientación NW20°SE, el cementante es material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato cerrando la porosidad total.

La familia de fracturas con mejor característica de conductividad son los conjuntos set2 y set3. Los conjuntos set1 y set4 son no conductivos. Por lo que podemos concluir que las fracturas con tendencias NE-SW son los que son los mejores conjuntos conductivos, mientras que los de dirección NW-SE y E-W son los cerrados y por tanto no conductivos.

La figura 52 muestra la posible secuencia de eventos en la zona de estudio



Figura 52. Gráfico que muestra la secuencia del macizo rocoso.

VII. CONCLUSIONES

Mediante análisis petrográficos y de microfotografías se estableció las características del macizo rocoso de las Cruces Nayarit, al obtener la conductividad de cuatro familias de discontinuidades principales encontradas y de los parámetros densidad, porosidad, conectividad y la calidad conductora. El análisis concluyo del macizo rocoso de las Cruces, Nayarit:

- origen ígneo de las rocas que varía de extrusivo a intrusivo predominando el primero
- estructura masiva y varía de fluidal, compacta, amigdaloides a vesicular o porosa
- las texturas van de eutaxítica a piroclástica en las rocas extrusivas a porfídica pilotaxítica a equigranular holocristalina en las intrusivas hipabisales a plutónicas
- la alteración, es meteórica, representada por oxidación, argilitización, carbonatación, cloritización y uralitización que generan porosidad secundaria y cambian la dureza y resistencia al debilitar al material
- la desvitrificación y silicificación hace más dura y resistente a la roca
- Las fracturas set1 tiene orientación E-W, con discontinuidades lineales, completamente cerradas por material cementante criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespatos, la ondulación indica probablemente movimientos de rumbos sinextrales durante su precipitación, apertura medida de 0.02 mm a 1.9 mm, con densidad y porosidad ausente.
- Fracturas de la familia set2, con dirección NE70°SW, están abiertas de 0.001 a 0.34 mm con una abertura conductiva de 0.009 mm, densidad de 270 y presentan porosidad visible de 13% a una porosidad total equivalente de 0.26% e indicando alta conductividad de fluidos.

- Familia de fracturas set3 con similar orientación que la familia set2, pero con porosidad remanente y fluidos indicando alta conductividad con aberturas medidas de 0.01mm a 3.4 mm con una apertura mínima conductiva de 0.02 mm, densidad de 150, porosidad equivalente de 5.55 % y porosidad total equivalente de 0.11%
- Familia set4 sellada con orientación NW20°SE, el cementante es material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespatos cerrando la porosidad total.
- La familia de fracturas con mejor característica de conductividad son los conjuntos set2 y set3. Los conjuntos set1 y set4 son no conductivos.
- Por lo que podemos concluir que las fracturas con tendencias NE-SW son los que son los mejores conjuntos conductivos, mientras que los de dirección NW-SE y E-W son los cerrados y por tanto no conductivos.
- Estos resultados comparados con los obtenidos en campo, nos indican que si es posible utilizar la petrografía como una herramienta que nos ayuda a determinar la caracterización de una masa de roca de origen ígneo, que por tectónica y/o magmatismo puede volver resistente o no al cerrar con material de cuarzo y feldespatos la conductividad de algunos sistemas de discontinuidades.
- Se recomienda que el personal que realice los análisis sea una persona que tenga experiencia y siga los métodos que permitan reducir los errores de medición e interpretación.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. **Aguayo C. E., y Trápaga M. R., (1996).** *Geodinámica de México y Minerales del Mar. Fondo de Cultura Económica*
2. **Comisión Federal de Electricidad (CFE), (1984).** *Análisis geológico del estrechamiento Las Cruces, Río San Pedro y Marco Geológico Regional de una porción de las cuencas del San Pedro y del Acaponeta, estado de Nayarit, Residencia de Estudios Geológicos de los ríos Baluarte y presidio, informe anual, SEZPN, CFE. REGRBP. Inédito.*
3. **Comisión Federal de Electricidad (CFE), (1996).** *Informe de prefactibilidad del P.H. Pozolillo, Nayarit, México, Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Guadalajara. Inédito.*
4. **Comisión Federal de Electricidad (CFE), (2000).** *Descripción de las Alteraciones Hidrotermales. Guía CFE 10100-52. Inédito.*
5. **Comisión Federal de Electricidad (CFE), (2001).** *Informe de avance en la etapa de factibilidad geológica de la alternativa Las Cruces. México. Inédito*
6. **Comisión Federal de Electricidad (CFE), (2013).** *Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces. Inédito.*
7. **Comisión Federal de Electricidad (CFE), (2013).** *Informe de avance en la etapa de factibilidad geológica de la alternativa Las Cruces. México. Inédito.*



8. **Comisión Federal de Electricidad (CFE)**, (2013). *Informe Geológico a Nivel de Ingeniería Básica de la Alternativa Rancho Viejo. P.H. Las Cruces. Inédito*
9. **Chávez A., Ruvalcaba S., y González F.**, (1991). *Metamorfismo de Contacto en el Área de Casa de Máquinas del P.H. Zimapán, Hgo. Convención sobre la Evolución Geológica de México. Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Hidalgo del 23 al 28 de junio.*
10. **Chávez Aguirre José María**, (2006). *Geotecnia, México. Comisión Federal de Electricidad, p. 31 – 71.*
11. **De la LLata Romero Rolando**. 2013. *Dictamen Geológico del P.H. Las Cruces. Inédito.*
12. **Delgado, V., M. A., Sánchez, A. E., Vázquez, R. R., y López, G. G.**, (1996). *Informe sismotectónico regional proyecto hidroeléctrico Las Cruces, Edo. de Nay., C.F.E. Inédito.*
13. **Delgado V., Vázquez R., Sánchez A., y Malagón M.**, (1999). *Informe del enjambre sísmico del 28 de octubre de 1988, asociado a la C.H. Aguamilpa (solidaridad). México. Inédito.*
14. **Demant, A., y Robin, C.**, (1975). *Las fases del volcanismo en México; una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. Revista del Instituto de Geología. UNAM. 75(1) p.p. 70-83.*
15. **Demant A.**, (1978). *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Revista del Instituto de Geología. UNAM, v.2, No. 2, p.p. 172-187.*
16. **Gale, J.F.W., S.E. Laubach., R. Marrett., J.E. Olson., J. Holder, and M.R. Reed.**, (2004). *Predicting and characterizing fractures in dolostone reservoirs: using the link between diagenesis and fracturing: The Geological Society of London, Special Publications, 235, p. 177-192.*
17. **Gastil, G.R., and Jensky W.**, (1973). *Evidence for strikeslip displacement beneath the Trans-Mexican volcanic belt. Stanford Univ. Publ. Geol. Sci., v 13, p.p.171-180.*
18. **Gómez, L.A., and S.E. Laubach.**, (2006). *Rapid digital quantification of microfracture populations: Journal of Structural Geology, v. 28, p. 408-420.*
19. **Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)**, (2010). *Anuario.*
20. **Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)**, (2014). *Recursos Naturales.*
21. **Laubach S.E., R. Marrett, and J. Olson.**, (2000). *New directions in fracture characterization: The Leading Edge, p. 704-711.*
22. **López Ramos, E.**, (1981). *Geología de México. 2a edición. México D.F. Edición escolar, 3 volúmenes. Tomo III. p.p. 22-39.*
23. **Marrett, R.**, (1996). *Aggregate properties of fracture populations: Journal of Structural Geology, v. 18, p. 169–178.*
24. **Marrett, R., O. Ortega, and C. Kelsey**, (1999). *Extent of power-law scaling for natural fractures in rock: Geology, v. 27/9, p. 799-802.*



25. **McDowell, F. W., Clabaugh, S. E.,** (1979). *The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of western México*; UNAM, Instituto de Geología. Rev., vol. No. 2, p. 195-206.
26. **Monroy, S.F.,** (2009). *Una metodología práctica en la caracterización de yacimientos naturalmente fracturados: Congreso Mexicano del Petróleo. Resúmenes con Programa, Veracruz, México.*
27. **Monroy, S.F.,** (2010). *SDPS A Practical Methodology to Reservoir Characterization in Naturally Fractured Carbonates: SPE/AAPG Joint Workshop, Naturally Fractured Reservoirs, Vail, Colorado. USA.*
28. **Mooser, F.,** (1975). *Historia Geológica de la Cuenca de México. In memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, tomo1. DDF, p.p. 7-38.*
29. **Morán D. J., y colaboradores,** (1985). *Geología de la República Mexicana. Coedición por convenio entre el INEGI y la UNAM. 2ª edición: México, D.F.*
30. **Moreno J. y Soto M.A.,** (1994). *Resultados de los Análisis radiométricos realizados a rocas volcánicas de la Presa Aguamilpa. CFE-GEIC. Inédito.*
31. **Negendank, J. F.W.,** (1972). *Volcanics of the Valley of Mexico. N. Jb. Miner. Abh., 116, p.p. 308-320.*
32. **Orozco, G. V. M., Vázquez R. R., Martínez C. H.,** (1997). *P.H. Pozolillo, Nay., Informe de prefactibilidad geológica de la alternativa Las Cruces. C.F.E. Inédito.*
33. **Ortega, O., R., Marrett, and S.E. Laubach,** (2006). *A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 90/2, p. 193-208.*
34. **Prieto Ubaldo Clotilde, Monroy Santiago Faustino, and Olaéz Ahedo Norma,** (2012). *New Methodology for Fracture Attributes Determination Based on Petrographic Analyses, and its Application in Two Naturally Fractured Carbonate Reservoirs of Southeastern Mexico. Search and Discovery Article #40922 (2012) Adapted from extended abstract in conjunction with poster presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California, p.183-199*
35. **Residencia de Estudios Geológicos de los Ríos Baluarte y Presidio,** (1983). *Evaluación geológica- geotécnica de gran visión de los estrechamientos Platanares, Pozolillo, El Limón, Cruces y Tecarita. Río San Pedro, estado de Nayarit. SEZPN, CFE.*
36. **Robinson, P.C.,** (1983). *Connectivity of fracture systems-a percolation theory approach: Journal of Physics A: Mathematical and General, v. 16/3, p. 605.*
37. **Urrutia, J., y Castillo, L.,** (1977). *Un modelo del Eje Volcánico Mexicano. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 38 p.p. 18-28.*
38. **Urrutia J.,** (1983). *On the tectonic evolution of Mexico: Paleomagnetic constraints. Am. Geophysics. Union, Geodynamics Series.*
39. **Urrutia J. y Morán, D. J.,** (1984). *Resultados preliminares paleomagnéticos para el sur de México y sus implicaciones tectónicas. Resúmenes de la VII Convención Geológica Nacional, Sociedad Geológica Mexicana, p5.*



ANEXO PETROGRÁFICO Y MICROFOTOGRAFICO



ESTUDIO PETROGRÁFICO 1

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: PHLC-Tmic2-BRV-133

Colector: Ing. Juan Bernardo Miranda Ramos

Localidad: P.H. Las Cruces, Nayarit. Barreno BRV-133, localizado en margen izquierda, en el eje del túnel de oscilación de la unidad 3 de la propuesta 18 realizada por Thecnoproject.

Coordenadas: X: 505 166,78 Y: 2 442 397,22

Descripción del afloramiento: La muestra fue tomada del barreno BRV-133, entre el intervalo de profundidad de 88.94 m al 89.14 m es un tramo de núcleo de 20 cm; color gris claro con tonos rosados, estructura y textura piroclástica; minerales observables: cuarzo, feldespatos y líticos.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa pálido (10R 6/2) con tonos rosáceos anaranjado-grisáceo (10R 8/2); Carta de Colores de Munsell para Rocas.

Estructura y Textura: Masiva-amigdaloides; piroclástica

Minerales observables: Cuarzo, líticos, máficos, hematita, magnetita y félsicos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

a) *Minerales esenciales:* Cuarzo 30%

Vidrio 22%

Feldespatos 35%

Líticos 10%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 3%

c) *Minerales secundarios:* Arcillas

d) *Matriz o cementante:* Matriz de microlitos de feldespato producto de alteración de vidrio.

e) *Caracteres especiales:* La matriz presenta alteración de estructuras en forma de ganchos (shards) a material cristalino de cuarzo y feldespato englobando a cristales, vidrio y fragmentos de rocas. Los cristales de feldespatos presentan alteración y disolución, se observan cavidades de parcial a totalmente rellenas de cuarzo y feldespato (amígdalas), también se observan esferulitas de feldespato potásico por desvitrificación. Los máficos se transforman en óxidos productos de alteración.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

V.- CLASIFICACIÓN Ignimbrita de composición riolítica

Fecha: 28/ agosto/2013

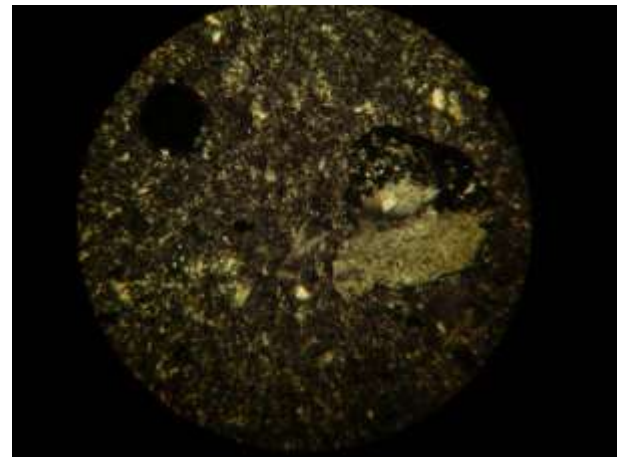
Petrografo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Microfotografías de muestras colectadas en el P.H. Las Cruces, Nayarit. Barreno brv-133, localizado en margen izquierda, en el eje del túnel de oscilación de la unidad 3 de la propuesta 18 realizada por Thecnoproject. Profundidad de 88.94 a 89.14 m.

Muestra No: PHLC-Tmic2-BRV-133. Coordenadas: X: 505 166,78 Y: 2 442 397,22



Se observa en el centro un megacrystal el cual presenta una aureola de alteración color amarillento producto de la oxidación, los feldespatos están alterados a arcillas, amígdala al centro y abajo vesícula, englobados en matriz de cuarzo y feldespato. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2.5x, microfotografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Se presenta en la derecha feldespato, opacos y arcillas relleno de una vesícula, arriba a la izquierda mineral opaco englobados en matriz desvitrificada mostrando los shards en la foto izquierda. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, microfotografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 2

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: PHLC-S2MI-1

Colector: Ing. Juan Bernardo Miranda Ramos

Localidad: P.H. Las Cruces, Nayarit. En el socavón 2 MI, localizado en la margen izquierda.

Descripción del afloramiento: La muestra fue tomada en el socavón de acceso en el cadenamamiento 0+040. El sitio donde se tomó la muestra no presenta fracturas ni fallas, la roca es muy competente y se pueden observar en toda la pared cavidades con cuarzo recristalizado, fiammes de color rojo y algunos fragmentos de roca; color: rosa con manchones blancos, estructura y textura: piroclástica, minerales observables: feldespatos y líticos.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Anaranjado rosado (10R 8/2); Carta de Colores de Munsell para Rocas.

Estructura y Textura: Masiva-amigdaloides; piroclástica

Minerales observables: Cuarzo, líticos, máficos y félsicos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

a) *Minerales esenciales:* Feldespatos 36%

Vidrio 35%

Cuarzo 10%

Líticos 13%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 4%

Piroxeno 2%

c) *Minerales secundarios:* Arcillas

Hematita

d) *Matriz o cementante:* Matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato por desvitrificación con presencia de abundantes óxidos.

e) *Caracteres especiales:* Presenta estructuras de desvitrificación en forma de ganchos (shards), cristales de feldespatos de forma tabular, líticos de composición andesítica, opacos y óxidos de hierro, el conjunto englobados en matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato por desvitrificación. Se observa fisura que cruza toda la lámina sin relleno.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

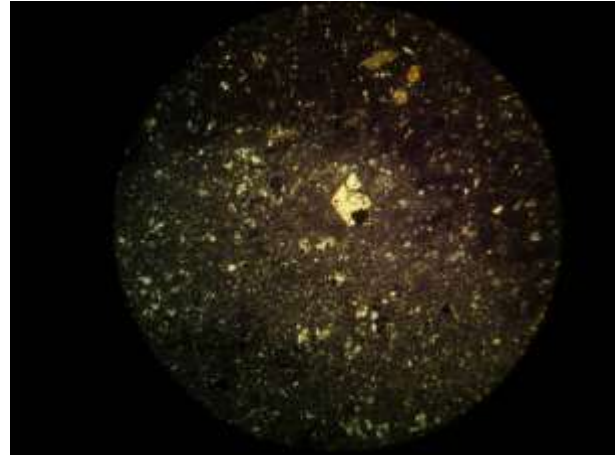
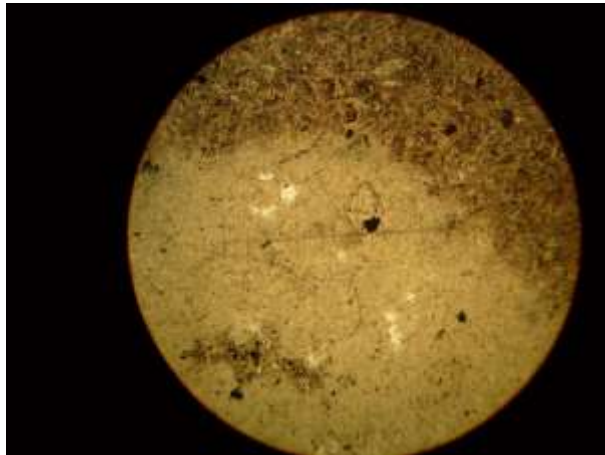
V.- CLASIFICACIÓN Ignimbrita de composición riolítica oxidada

Fecha: 28/ agosto/2013

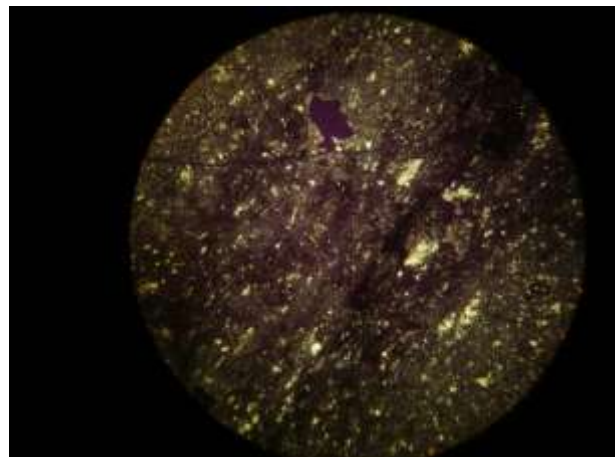
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Microfotografías de muestras colectadas en el P.H. Las Cruces, Nayarit. En el socavón 2 MI, en el cadenamiento 0+040.

Muestra No: PHLC-S2MI-1.



Se observa en la parte superior el contacto entre dos fragmentos de roca en forma de media luna, en la parte central se aprecia un cristal de feldespato, opacos de color negro y poros, el fragmento superior presenta textura eutaxítica característica de ignimbritas. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2.5x, microfotografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Se notan pequeños fragmentos de roca arriba a la derecha y abajo en una matriz desvitrificada y oxidada, en la parte superior se aprecia una amígdala y una fisura sin relleno. En la foto con nicoles cruzados se tienen feldspatos alterados y apreciando estructuras de flujo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, microfotografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 3

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: PHLC-S-1

Colector: Ing. Juan Bernardo Miranda Ramos

Localidad: P.H. Las Cruces, Nayarit. En la margen izquierda agua abajo del eje de cortina Rancho Viejo.

Descripción del afloramiento: La muestra fue tomada en el cantil de la margen izquierda a 7 metros de la entrada al socavón 2 MI, la roca presenta poco fracturamiento y extensión máxima de dos metros, el intemperismo es ligero, lo que ocasiona que la roca sea de color gris claro con tonos rosas, presenta estructuras de flujo con amígdalas y textura piroclástica, minerales observables: cuarzo, feldespatos y líticos.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Naranja rosado (5 YR 4/1), rosa grisáceo (5R 8/2), gris muy claro (8 N8); Carta de Colores de Munsell para Rocas.

Estructura y Textura: Masiva- amigdaloides; piroclástica

Minerales observables: Cuarzo, félsicos, máficos (hematita y magnetita)

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Feldespatos	40%
	Vidrio	15%
	Líticos	15%
	Cuarzo	16%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 14%

c) *Minerales secundarios:* Arcillas
Hematita

d) *Matriz o cementante:* Matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato por desvitrificación con presencia de abundantes opacos.

e) *Caracteres especiales:* Presenta fragmentos de roca inmersos en una matriz criptocristalina constituida de cuarzo y feldespato producto de alteración del vidrio, esta se observa alterada a arcillas, se aprecia una fractura rellena por cuarzo y feldespato.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

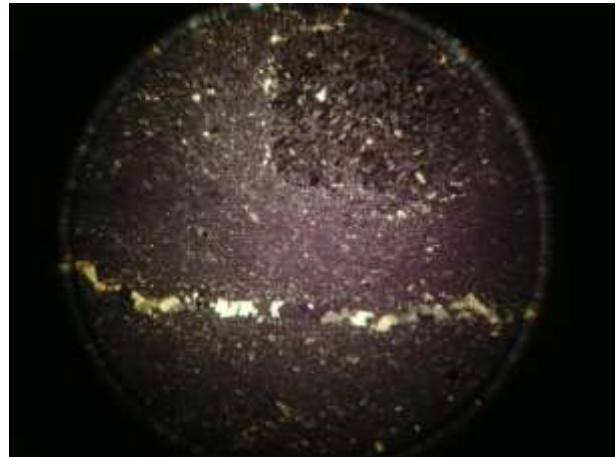
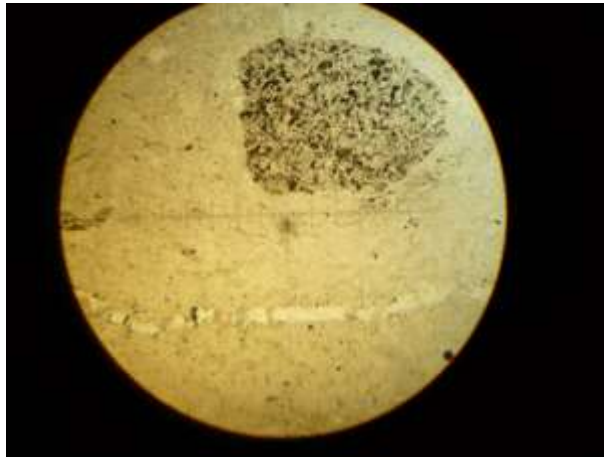
V.- CLASIFICACIÓN Ignimbrita de composición riolítica

Fecha: 14/ mayo/2013

Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Microfotografías de muestras colectadas en el P.H. Las Cruces, Nayarit en margen izquierda aguas abajo del eje de cortina rancho viejo.

Muestra No: PHLC-S-1.



Se observa un fragmento de roca ígnea andesítica con abundantes opacos en la parte superior, a la izquierda y abajo feldespatos de color de interferencia gris claro, casi al centro una fisura rellena de cuarzo y feldespato, englobados en una matriz criptocristalina por desvitrificación. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2.5x, microfotografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Material constituido por cuarzo y feldespato relleno una fisura, presencia de opacos alineados en la parte superior aunque también se presentan al centro y abajo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, microfotografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 4

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: M-1

Colector: Ing. Gerardo Mendoza Pérez

Localidad: P. H. Las Cruces, Nayarit.

Descripción del afloramiento: Roca de color gris parduzco claro, dura, compacta y densa, fluidal, de textura piroclástica y estructura masiva con fiammes de roca de 0,5 a 3,0 cm orientados generalmente con el flujo y fragmentos líticos angulosos y algunos de forma tabular de 2 mm a 4,0 cm, se observan algunos minerales de cuarzo y de feldespato con escaso minerales de óxido de hierro, la principal alteración que presenta es por silicificación, la roca presenta una costra de intemperismo de color amarillo ocre claro. La muestra se colectó en el corte del talud derecho a la orilla del camino que conduce a la zona de los socavones, con las siguientes referencias: X= 505 571; Y= 2 441 730. Roca probable: Ignimbrita.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa grisáceo (N 8)

Estructura y Textura: Compacta-masiva-fluidal; piroclástica.

Minerales observables: Félsicos, máficos, fragmentos de rocas y óxidos de hierro.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

- a) *Minerales esenciales:*

Vidrio	76%
Líticos	9%
Oligoclasa	7%
Andesina	6%
- b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 2%
- c) *Minerales secundarios:* Hematita, Arcillas, Sericita
- d) *Matriz o cementante:* matriz constituida por cristalitos, esquirlas y polvo vítreo de composición acida a intermedia ($N \leq B$), ligeramente alterada a arcillas.
- e) *Caracteres especiales:* Escasos fragmentos de rocas, plagioclasas de forma subedral y vidrio pumicítico; inmersos en una matriz desvitrificada a material de cuarzo y feldespato producto de alteración de vidrio acido constituido por esquirlas, cascotes, polvo y shards vítreos, con minerales opacos algunos alterando a hematita o formando coronas de reacción en fragmentos. En partes el material feldespático se observa alterado a sericita-arcillas.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA: Ígneo volcánico explosivo.

V.- CLASIFICACIÓN: IGNIMBRITA RIOLITICA DENSAMENTE SOLDADA

Fecha: enero 13, 2014

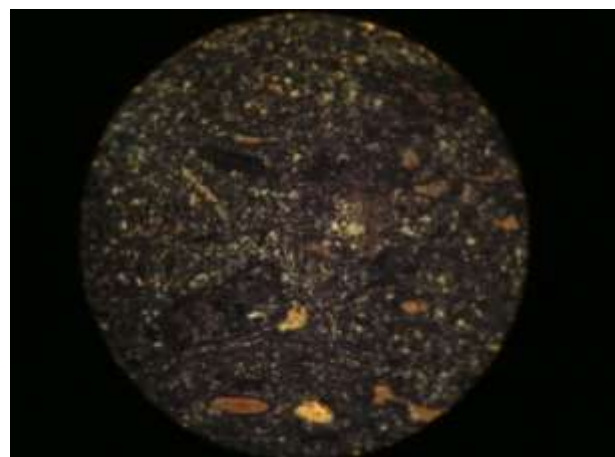
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el proyecto “P.H. Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: M-1, Coordenadas: X= 505 571; Y= 2 441 730



Se observan fragmentos de rocas color pardo oscuro centro derecha, arriba a la derecha e izquierda, minerales opacos extremo derecho; vidrio pumicítico en extremo inferior, englobados en una matriz microcristalina por desvitrificación. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Fenocristal de plagioclasa en la izquierda con color de interferencia gris oscuro, se observan estructuras vítreas (shards) en luz natural. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 5

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: M-2

Colector: Ing. Gerardo Mendoza Pérez

Localidad: P. H. Las Cruces, Nayarit

Descripción del afloramiento: Roca de color pardo rojiza, dura, compacta y densa, fluidal, de textura piroclástica y estructura masiva, presenta fragmentos líticos principalmente ácidos, son angulosos con tamaños de 2 mm a 4,0 cm y fiammes de roca con tamaños de 0,5 a 8,0 cm y orientados con el flujo y la presencia de cavidades con relleno de cuarzo y algo de óxidos de fierro. Los principales minerales que se observan son: cuarzo, feldespatos y algunas plagioclasas con algo de óxidos de fierro, la principal alteración es por silicificación. La muestra de roca se colectó en el corte del talud derecho, a la orilla del camino que conduce a la zona de los socavones, con las siguientes referencias: X= 505 485; Y= 2 441 803. Roca probable: ignimbrita.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo grisáceo (10R 2/2)

Estructura y Textura: Compacta- masiva-fluidal; piroclástica.

Minerales observables: Feldespatos, fragmentos de rocas, óxidos de hierro y minerales opacos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

- | | | |
|----------------------------------|---|-----|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Vidrio | 77% |
| | Oligoclasa | 8% |
| | Andesina | 7% |
| | Cuarzo | 6% |
| | Líticos | 1% |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Minerales opacos | 1% |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> | Hematita, Arcillas | |
| d) <i>Matriz o cementante:</i> | matriz constituida por cristalitos, esquirlas y polvo vítreo de composición acida a intermedia ($N \leq B$), ligeramente alterada a arcillas. | |
| e) <i>Caracteres especiales:</i> | Fenocristales escasos de cuarzo y plagioclasas intermedias (Oligoclasa-Andesina), líticos pumicíticos alterando a arcillas, líticos y minerales opacos; el conjunto se presenta englobado en una matriz vítrea desvitrificada constituida por relictos representada por cristalitos, esquirlas, polvo vítreo de composición acida a intermedia y presencia de óxido de hierro (hematita); el material feldespático altera ligeramente a arcillas. | |

IV.- ORIGEN DE LA ROCA: Ígneo volcánico explosivo.

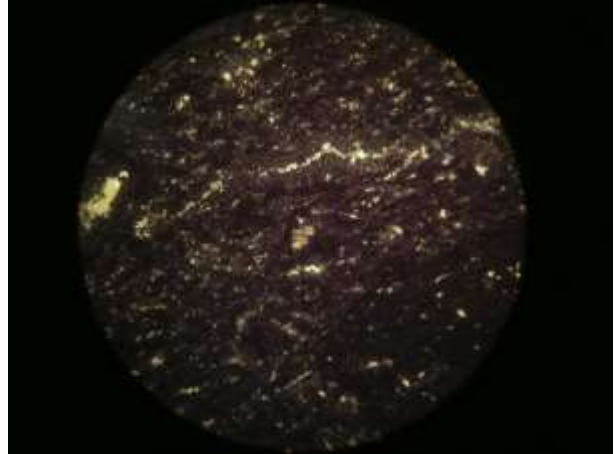
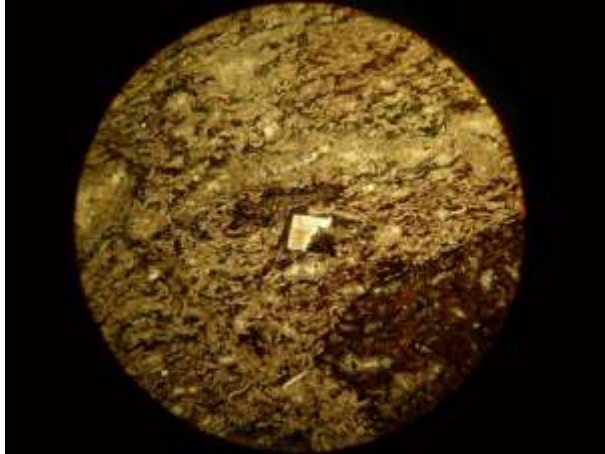
V.- CLASIFICACIÓN: **IGNIMBRITA RIOLITICA MODERADAMENTE SOLDADA.**

Fecha: enero 13, 2014

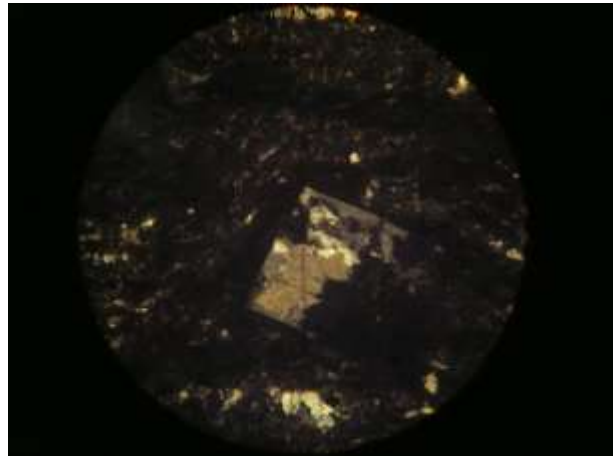
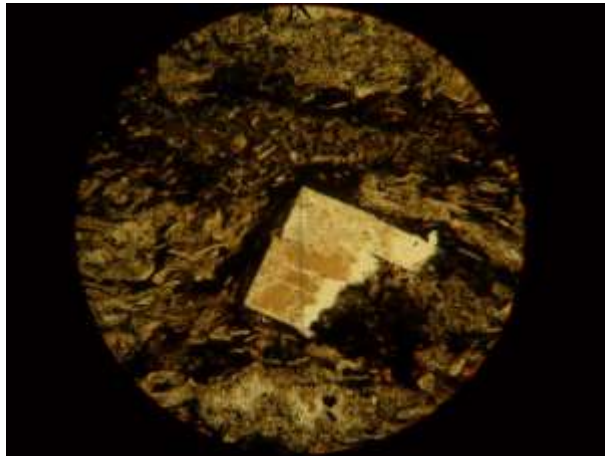
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el proyecto “P.H. Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: M-2, Coordenadas: X= 505 485; Y= 2 441 803.



Cristales de plagioclasas con color de interferencia blanco a gris claro al centro, lítico de color pardo- rojizo en la parte inferior izquierda y vesícula rellena por sílice extremo izquierda; inmersos en estructuras relictas constituidas por shards. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Fenocrystal de plagioclasa al centro con color de interferencia gris medio altera ligeramente a arcillas color amarillo; en una pasta microcristalina de cuarzo y feldespato producto de la desvitrificación, opacos color negro y óxidos color rojo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 6

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: M-3

Colector: Ing. Gerardo Mendoza Pérez

Localidad: P. H. Las Cruces, Nayarit.

Descripción del afloramiento: Roca de color pardo claro con tonalidades grises, es dura, compacta y fluidal, de textura piroclástica con fragmentos de roca de composición ácida, presenta cavidades rellenas de cuarzo y los fiammes que se observan son de roca que sigue la tendencia del flujo, los principales minerales que se observan son: cuarzo, feldespatos y escasas plagioclasas, la principal alteración es por silicificación. La muestra de rocas se colectó en el corte del talud derecho, del camino que conduce al área de los socavones, con las siguientes referencias: X=505 364; Y=2 441 857. Roca probable: ignimbrita.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo pálido (5R 6/2)

Estructura y Textura: Compacta-masiva-amigdaloides; piroclástica.

Minerales observables: Feldespatos, líticos, óxidos de hierro y minerales opacos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

- | | | |
|----------------------------------|---|--------|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Vidrio | 79% |
| | Oligoclasa | 8% |
| | Andesina | 7% |
| | Fragmentos de roca riolítica | 4% |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Minerales opacos | 1% |
| | Zircón | 1% |
| | Esfena | trazas |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> | Hematita, Epidota, Arcillas, Sericita | |
| d) <i>Matriz o cementante:</i> | Vítrea desvitrificada | |
| e) <i>Caracteres especiales:</i> | Fragmentos de roca riolítica, cuarzo de forma anedral, feldespatos alterando a sericita-arcillas, minerales opacos de color negro, cristales de epidota, zircón y esfena, englobados en una matriz vítrea desvitrificada a material microcristalino constituido por cuarzo y feldespato, las arcillas se encuentran relleno de fracturas, pequeños cristales de epidota y zircón. | |

IV.- ORIGEN DE LA ROCA: Ígneo volcánico explosivo.

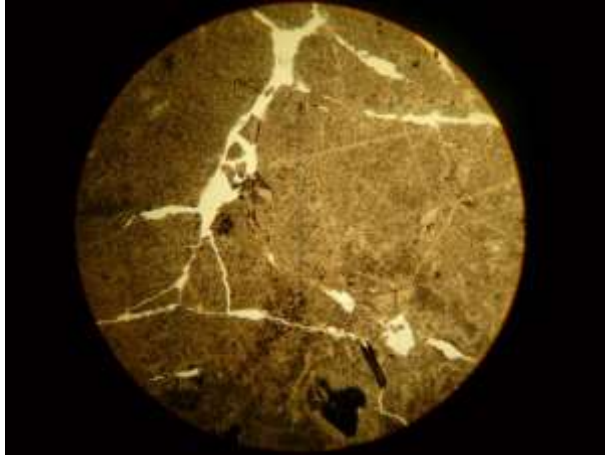
V.- CLASIFICACIÓN: **IGNIMBRITA RIOLITICA MODERADAMENTE SOLDADA.**

Fecha: enero 13, 2014

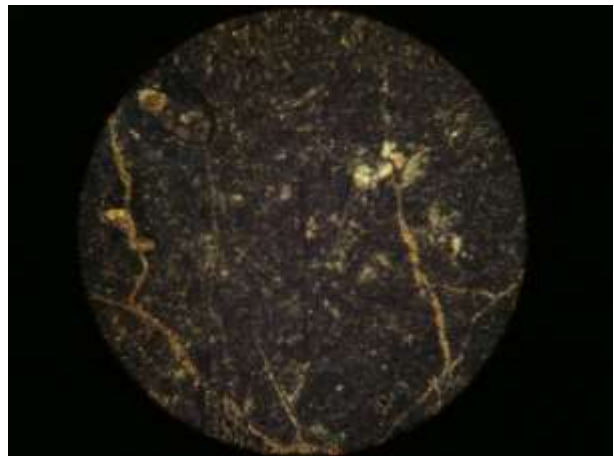
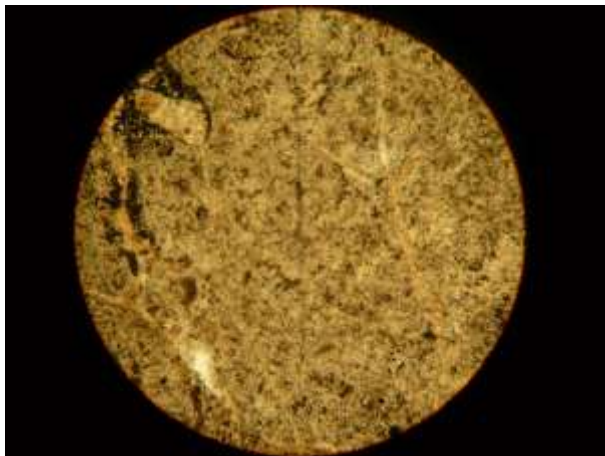
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el proyecto “P.H. Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: M-3, Coordenadas: X= 505 364; Y= 2 441 857.



Se observan fracturas rellenas por sericita-arcilla y algunas abiertas, minerales opacos color negro en la parte inferior; matriz relictas representada por cristalitas, esquirlas y polvo vítreo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Se presenta cristal de plagioclasa en la parte superior izquierda rodeado por minerales opacos con color negro, fracturas rellenas por sericita-arcilla en una matriz relictas de vidrio desvitrificado a material cristalino. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 7

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-3

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: P. H. Las Cruces, Nayarit. Margen izquierda del embalse, aguas abajo del arroyo Las Mojarras sobre la vereda del antiguo camino a los Limos. Con las coordenadas UTM X=506 451; Y=2 443 868; Z=218.

Descripción del afloramiento: Muestra de mano obtenida de un lomerío de bajas pendientes en donde se observa un alto intemperismo que forma granos de color blanco.

Descripción de la muestra.- Roca color gris con motas blancas y traslucidas, de textura porfídica, estructura masiva en donde se observan los minerales blancos alterándose a arcillas blancas, fragmentos cuarzo y minerales de color verde oscuro embebidos en una matriz feldespática. Roca probable: no se describió.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo grisáceo (10R 4/2) con granos blancos (N 9)

Estructura y Textura: Compacta-masiva; piroclástica.

Minerales observables: Feldespatos, cuarzo y fragmentos de rocas.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica hipocristalina

Mineralogía:

a) *Minerales esenciales:* Vidrio 79%

Feldespatos 9%

Cuarzo 8%

Líticos 2%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 1%

Biotita 1%

Apatito trazas

c) *Minerales secundarios:* Arcilla, Leucoxeno, Hematita

d) *Matriz o cementante:* matriz esferulítica vítrea desvitrificada

e) *Caracteres especiales:* Fenocristal de cuarzo y feldespatos de forma subedral corroídos, desgarrados, fracturados y desplazados, biotita de forma tabular con deformación en su crucero, apatito tabular, minerales opacos de color negro y líticos de forma angulosa en una mesostasis esferulítica por desvitrificación. Fracturas rellenas por arcillas y hematita color rojo; las segundas se observan bordeando y siguiendo la dirección de crucero de la biotita.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA: Ígneo volcánico o extrusivo.

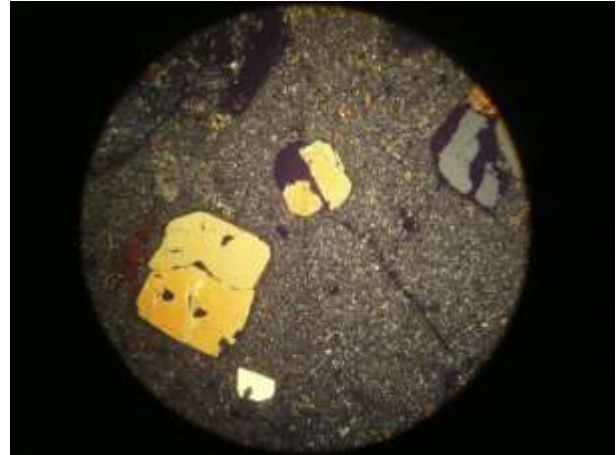
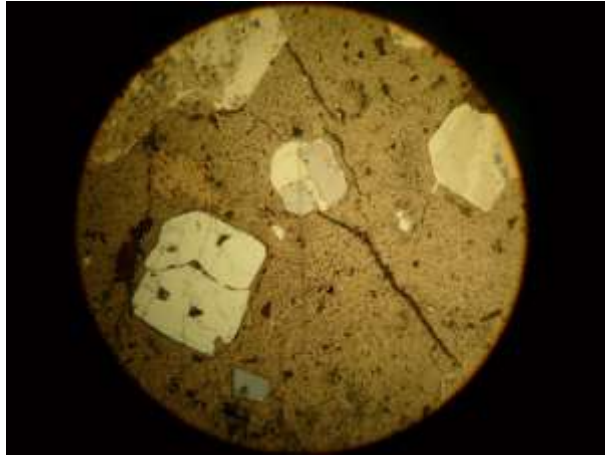
V.- CLASIFICACIÓN: **IGNIMBRITA RIOLITICA DE BIOTITA DEBILMENTE SOLDADA.**

Fecha: enero 13, 2014

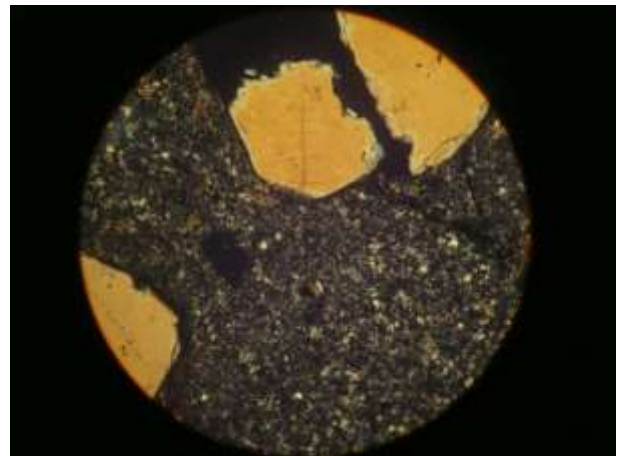
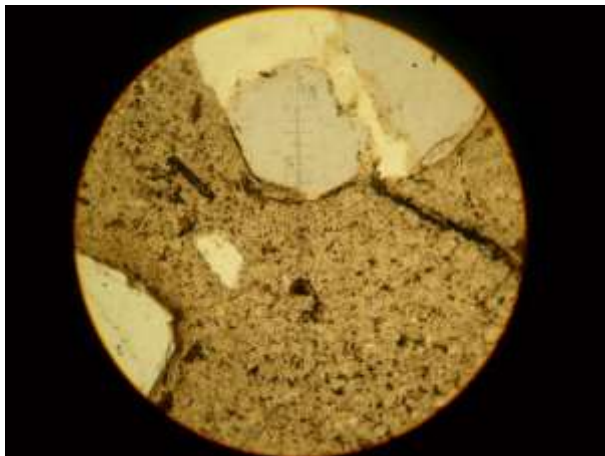
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el proyecto “P.H. Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-3, Coordenadas: X=506 451; Y=2 443 868; Z=218.



Cristales de cuarzo arriba a la izquierda y abajo a la derecha con color de interferencia gris y blanco, feldespatos fracturados y desplazados al centro y abajo a la derecha con color amarillo en nicoles cruzados; fragmentos de roca con color pardo amarillento a blanco en luz natural al centro a la derecha y arriba a la izquierda, matriz microcristalina feldespática alterada con tonos amarillo y gris en luz polarizada. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicles Cruzados (NX).



Fenocristales de feldespatos color amarillo en nicoles cruzados fracturado y desplazado en la parte superior e inferior derecha; biotita tabular color pardo oscuro centro derecha y matriz esferulítica vítrea desvitrificada color pardo claro en luz natural. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 8

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-6

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: P. H. Las Cruces, Nayarit. Embalse del PH Las Cruces, en los alrededores del arroyo las Narices, sobre la margen derecha del río San Pedro, a 2,35 km al NE58° del poblado de Rosarito Mpio. de Rosamorada, Nayarit. Sus coordenadas UTM son las siguientes: X= 501 410; Y=2 452 665.

Descripción del afloramiento: La roca se encuentra intrusionando de forma de dique estrato a tobas de composición riolítica.

Descripción de la muestra.- roca de color gris muy oscuro a negro y presenta oxidaciones de color negro y rojo, de alta densidad, muy compacta, dura al golpe del martillo, de textura porfídica de grano muy fino y estructura en dique estrato. Con la lupa se alcanzan a distinguir plagioclasas y minerales oscuros embebidos en una matriz muy fina de color rojo. Roca probable: No se describió.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo grisáceo (5R 4/2)

Estructura y Textura: Compacta-masiva; porfídica.

Minerales observables: Máficos y Félsicos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Porfídica en matriz intersertal

Mineralogía:

- | | | |
|---------------------------------|------------------|-----|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Andesina | 58% |
| | Oligoclasa | 30% |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Augita | 10% |
| | Minerales opacos | 1% |
| | Apatito | 1% |
- c) *Minerales secundarios:* Arcillas, Sericita, Hematita, Serpentina
- d) *Matriz o cementante:* matriz microcristalina de minerales opacos y óxidos de hierro.
- e) *Caracteres especiales:* Abundantes fenocristales de plagioclasas de forma tabular euedral alteradas moderadamente a sericita-arcillas y piroxenos alterados algunos fuertemente a serpentina, en una matriz microcristalina conformada por opacos y óxidos de hierro.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA: Ígneo intrusivo.

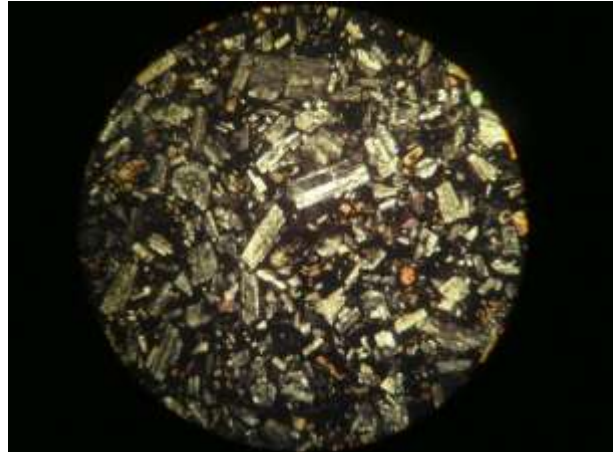
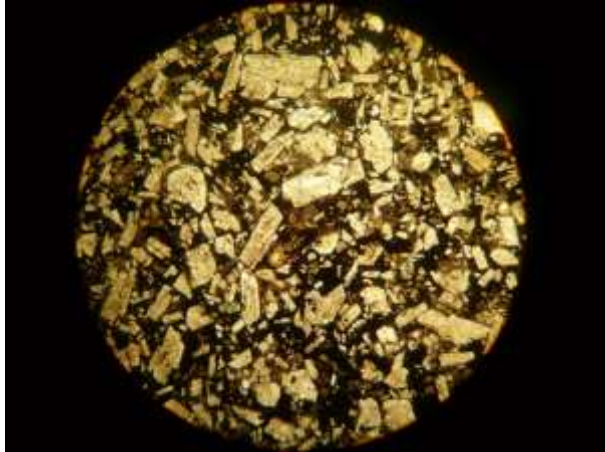
V.- CLASIFICACIÓN: PÓRFIDO ANDESÍTICO DE PIROXENO

Fecha: enero 13, 2014

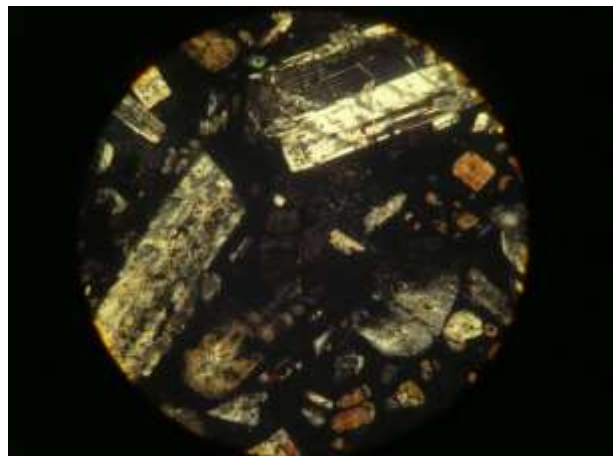
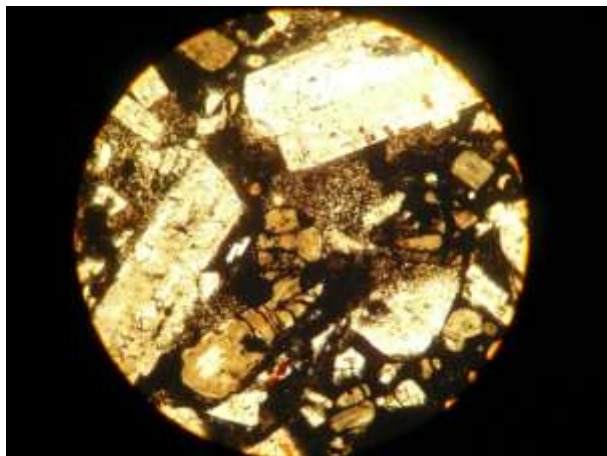
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el proyecto “P.H. Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-6, Coordenadas: X= 501 410; Y=2 452 665.



Plagioclasas de forma tabular eudral con colores gris y blanco en luz polarizada y tono blanco-amarillento en luz natural; minerales opacos color negro. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Cristales de plagioclasas de forma tabular con macla tipo albita arriba izquierda y derecha, piroxenos alterados a serpentina con color pardo amarillento y minerales opacos de color negro en toda la muestra en luz natural. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 9

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-11

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: P. H. Las Cruces, Nayarit. Margen derecha del embalse, a 250 m aguas arriba de la confluencia del arroyo Las Mojarras sobre margen del río San Pedro. Con las coordenadas UTM X=505 308; Y=2444748.

Descripción del afloramiento: Muestra de mano obtenida sobre una ladera pronunciada con un intemperismo avanzado, en donde la roca se altera a arenas blancas.

Descripción de la muestra.- Roca de color rosa a morado con motas de color blanco de estructura masiva de textura porfídica en donde se alcanzan a distinguir plagioclasas de color blanco embebidas en una matriz feldespática microcristalina. Roca probable: No se describió.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo pálido (5R 6/2)

Estructura y Textura: Compacta-masiva; piroclástica.

Minerales observables: Feldespatos, piritita, biotita, anfíboles y fragmentos de rocas.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Piroclástica brechoide

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Cuarzo	40%
	Ortoclasa peritítica	39%
	Vidrio	8%
b) <i>Minerales accesorios:</i>	Biotita	9%
	Minerales opacos	4%

c) *Minerales secundarios:* Sílice

d) *Matriz o cementante:* Vítreo desvitrificada

e) *Caracteres especiales:* Esferulitas de sanidino oxidadas, cristales angulosos de cuarzo y feldespatos cizallados, biotita en forma tabular euedral en una mesostasis vítrea que ha alterado a material microcristalino constituido por cuarzo y feldespato y a esferulitas de feldespato potásico oxidado.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA: Ígneo extrusivo sujeto a esfuerzos.

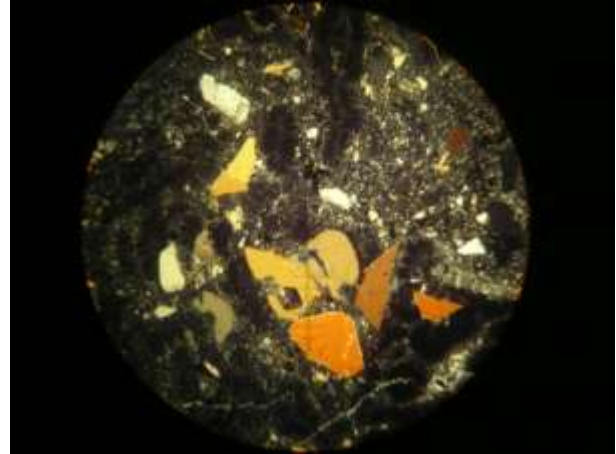
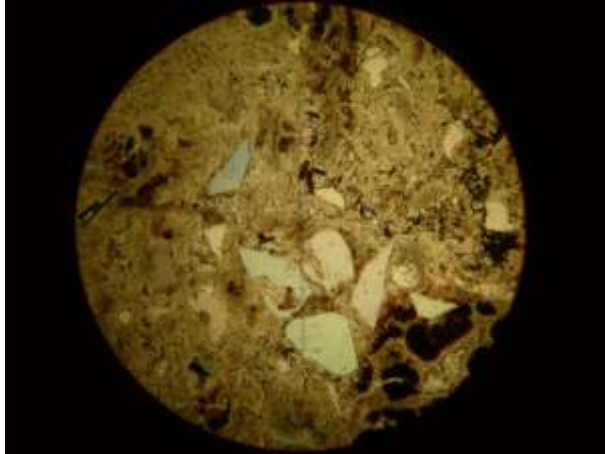
V.- CLASIFICACIÓN: TOBA RIOLITICA BRECHOIDE

Fecha: enero 13, 2014

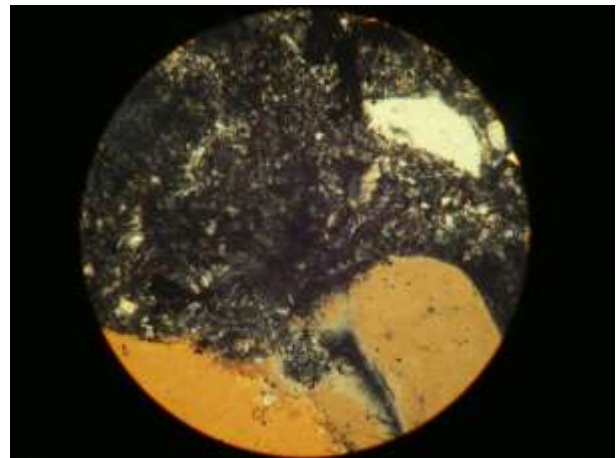
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el proyecto “P.H. Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-11, Coordenadas: X=505 308; Y=2444748.



Cristales de cuarzo con forma subedral y golfos de corrosión en tonos pardo amarillento a blanco en nicoles cruzados, se observan en toda la muestra rodeados por una matriz vítrea desvitrificada color pardo amarillento claro y abundantes estructuras esferulíticas oxidadas con color rojo oscuro en luz natural. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Biotitas de forma tabular y color rojo pardusco rodeadas por minerales opacos color negro en la parte superior de la imagen izquierda, cristales de cuarzo color amarillo y blanco, arriba a la derecha muestra ligera exsolución; matriz esferulítica oxidada por desvitrificación. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 10

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-1

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces, aguas abajo del arroyo las Mojarras, sobre la margen izquierda del río San Pedro. Coordenadas: X = 505 781; Y= 2 444 320.

Descripción de la muestra: Roca de color verde claro al fresco y rojizo amarillento al intemperie, de estructura estratificada, de textura piroclástica, con bandas que se diferencian por diferentes tonalidades de color verde. Los componentes o minerales son del tamaño de las arenas finas y se encuentran compactadas, de los que se distinguen feldespatos, minerales máficos, minerales rojos y líticos de color pardo. Roca probable: Toba de composición andesítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Gris claro medio (N 6)

Estructura y Textura: Fluidal-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Minerales opacos, óxidos de hierro, calcita, feldespatos y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Piroclástica - Epiclástica

Mineralogía:

- a) *Minerales esenciales:*
- | | |
|------------|------|
| Oligoclasa | 40 % |
| Andesina | 37 % |
| Líticos | 15 % |
| Vidrio | 5 % |
- b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 3 %
- c) *Minerales secundarios:* Calcita, Óxidos de hierro, Sericita
- d) *Matriz o cementante:* matriz criptocristalina feldespática por desvitrificación.
- e) *Caracteres especiales:* Cristales de oligoclasa y andesina de forma angulosa a subangulosos con baja esfericidad algunas alteran ligeramente a sericita; líticos de composición intermedia, presencia de calcita, vidrio de color pardo de composición intermedia $N \leq B$ y abundantes minerales opacos color negro rodeando algunos cristales de feldespato y líticos; el conjunto esta englobado en una matriz criptocristalina feldespática.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Volcánica sedimentaria

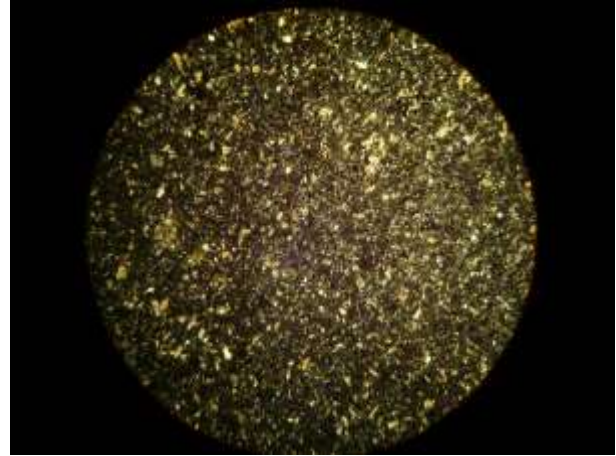
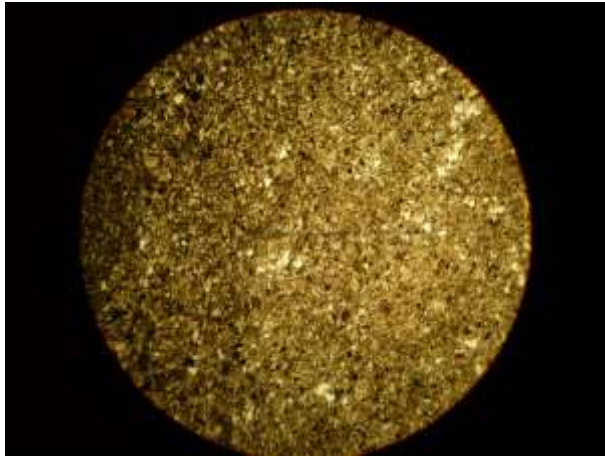
V.- CLASIFICACIÓN Toba Cristalina de Composición Andesítica Carbonatada

Fecha: junio 1, 2014

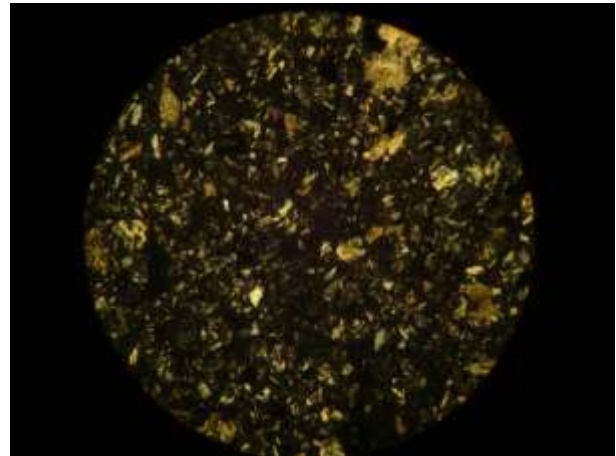
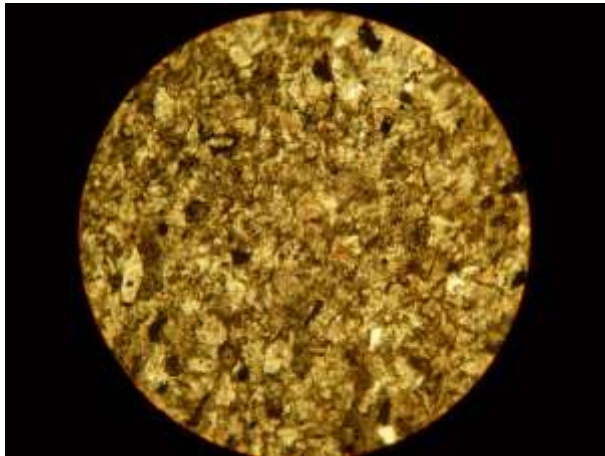
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-1, Coordenadas: X= 505 781; Y= 2 444 320.



Conjunto equidimensional de cristales de feldespatos angulosos con color de interferencia gris, gris oscuro y blanco y de calcita con tonos amarillento al centro izquierda y en el borde superior. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Feldespatos de forma angulosa con color de interferencia gris, gris oscuro y blanco, algunos presentan maclado; caliza con tono pardo amarillo se observan disgregados en el borde de la imagen y minerales opacos en la parte superior y periferia de la muestra. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 11

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-2

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces, antiguo camino a los limos, aguas abajo del arroyo Mojarras. Coordenadas: X= 506 264; Y= 2 443 913.

Descripción de la muestra: Roca de color rosa claro con motas blancas al fresco y rojo con negro a la intemperie de estructura masiva, compacta y dura. Se observan vidrio volcánico, plagioclasas y minerales oscuros en una mesostasis de color rosa, diferenciándose en zonas de color a café claro. Roca probable: Ignimbrita de composición riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa anaranjado grisáceo (5 YR 7/2)

Estructura y Textura: Masiva-brechoide-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Cuarzo, feldspatos, máficos y minerales opacos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Vidrio	45%
	Ortoclasa	20%
	Oligoclasa	15%
	Cuarzo	10%
	Líticos	5%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 5%

c) *Minerales secundarios:* Sericita-arcilla
Hematita

d) *Matriz o cementante:* matriz criptocristalina desvitrificada a cuarzo y feldspato

e) *Caracteres especiales:* Fenocristales de cuarzo subanguloso, cristales de ortoclasa y oligoclasa de forma tabular alterados fuertemente a sericita-arcilla, estos últimos rellenan fracturas y oquedades, fragmentos de roca ígnea de composición intermedia, minerales opacos color negro y hematita color rojo; englobados en una matriz desvitrificada constituida por cascos, relictos, polvo y shards. Presencia de fractura rellena por material constituido por cuarzo-feldspato-sericita-arcilla, cortando y desplazando a cristales de cuarzo.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA ígneo extrusivo

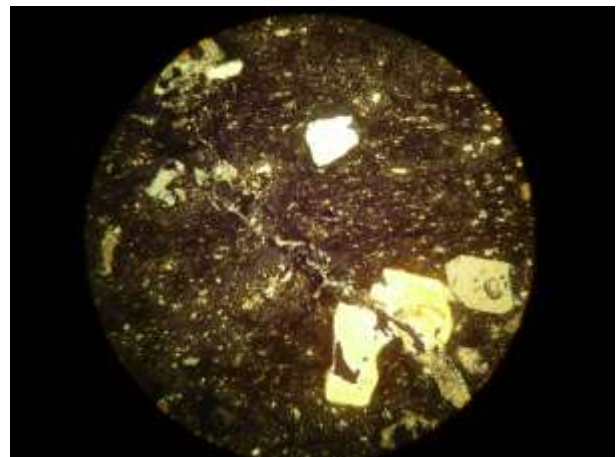
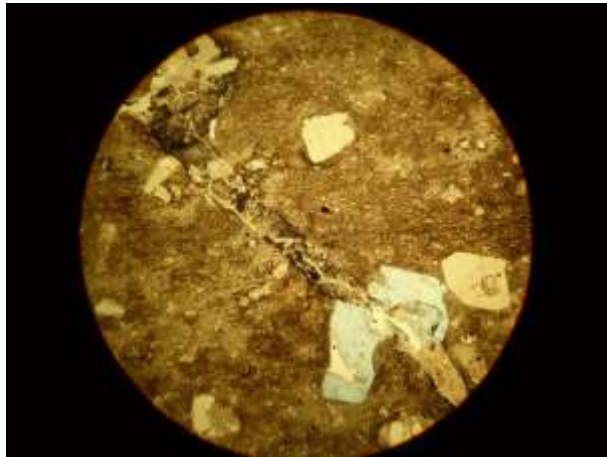
V.- CLASIFICACIÓN **Ignimbrita Riolítica Moderadamente Soldada.**

Fecha: junio 1, 2014.

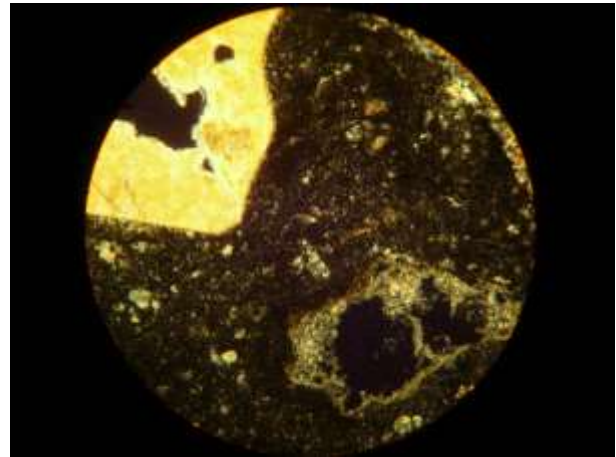
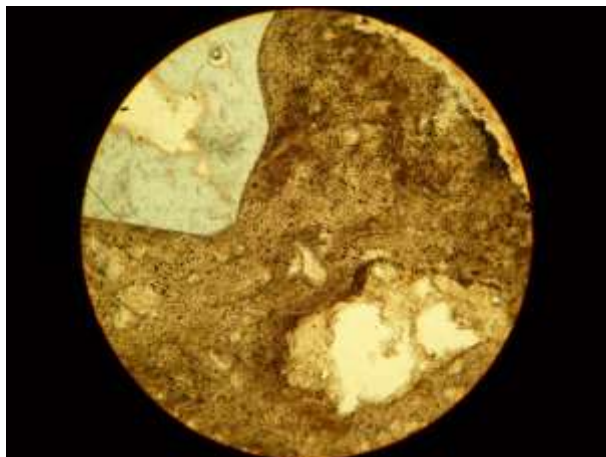
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-2, Coordenadas: X= 506 264; Y= 2 443 913.



Cristales de feldespatos en el extremo inferior derecho y el extremo superior izquierdo con color de interferencia gris claro y blanco amarillento separados por fractura rellena por cuarzo, feldespato y sericita, se observan cristales de cuarzo con golfos de corrosión al centro y extremo superior color blanco. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Cristales de feldespatos alterados con color de interferencia amarillo y gris claro, gris oscuro a negro; envueltos en una matriz desvitrificada a cuarzo y feldespato con tonos grises, pardo oscuro y negro. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 12

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-4

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces, sobre la margen izquierda del río San Pedro frente al verano de Leonardo. Coordenadas: X= 505 236; Y= 2 445 287.

Descripción de la muestra: Roca de color rojizo a violeta al fresco y de color violeta a negro al intemperismo, de estructura masiva, textura piroclástica con alineación o bandeamientos de minerales grises. Se observa un vidrio volcánico, pómez, plagioclasas y minerales oscuros en una mesostasis de grano muy fino de color rosa. Roca probable: Ignimbrita de composición riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa pálido (5R 6/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Líticos, feldespatos, óxidos de hierro, máficos y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

- a) *Minerales esenciales:*
- | | |
|-------------|-----|
| Feldespatos | 5% |
| Cuarzo | 15% |
| Vidrio | 40% |
| Líticos | 36% |
- b) *Minerales accesorios:*
- | | |
|------------------|----|
| Minerales opacos | 3% |
| Apatito | 1% |
- c) *Minerales secundarios:* Sericita-arcilla
Hematita
- d) *Matriz o cementante:* matriz criptocrystalina producto de desvitrificación representada por relictos, casco, polvo y deformaciones de media luna (shards).
- e) *Caracteres especiales:* Cristales de feldespatos fuertemente sericitizados-argilitizados, cuarzoes subanguloso, fragmentos de roca ignimbritica, minerales opacos color negro, apatito de forma tabular, vidrio con composición ácida N<B y óxidos de hierro (hematita) relleno de fisuras y formando coronas de reacción en feldespatos; en una matriz constituida por casco, relictos, polvo y shards alterados a material criptocrystalino representado por cuarzo y feldespato.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo

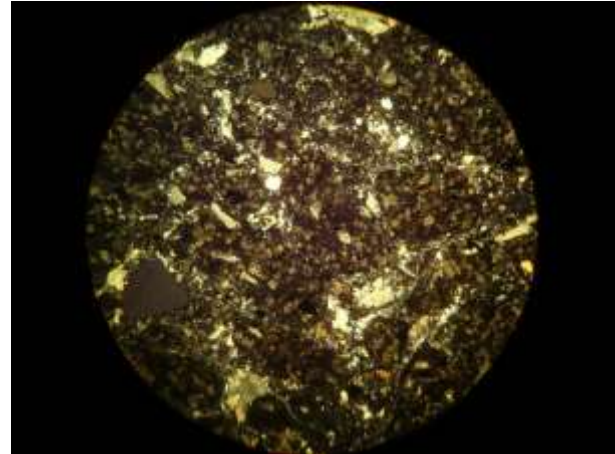
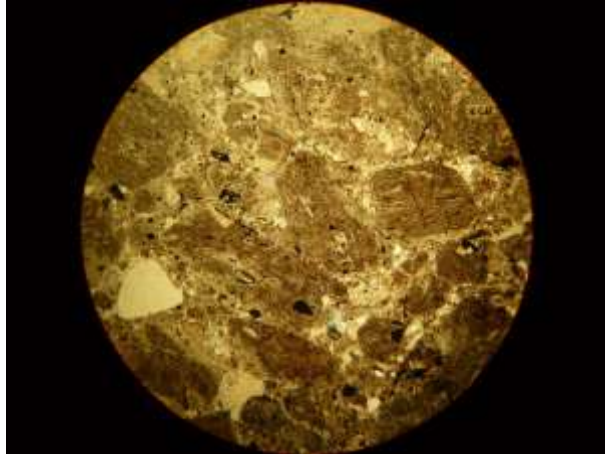
V.- CLASIFICACIÓN Ignimbrita Riolítica Argilitizada Densamente Soldada

Fecha: junio 1, 2014

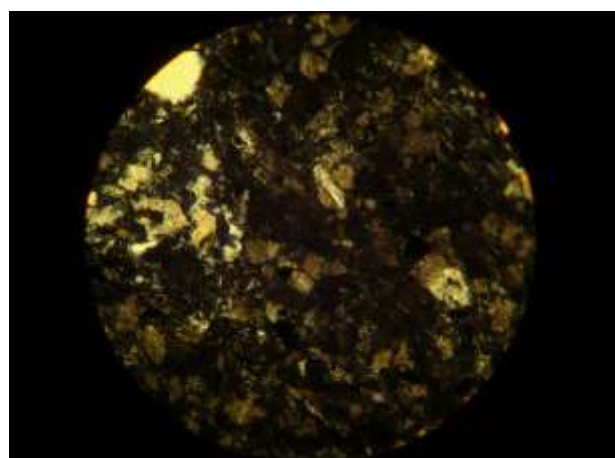
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-4, Coordenadas: X= 505 236; Y= 2 445 287



En luz natural se logra apreciar fragmentos de roca ígnea subangulosa con tonos pardo medio a pardo oscuro, cristal de cuarzo de forma angulosa color blanco en el extremo izquierdo de la imagen y algunos más pequeños que forman parte de la matriz constituida por cuarzo y feldespato que aglutina a fragmentos de roca; escasos minerales opacos con tono negro. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



En luz natural se observan dos fragmentos de roca ígnea color pardo amarillento con abundantes estructuras por desvitrificación en contacto con material representado por cuarzo y feldespato de tonos blanco, gris oscuro y negro, calcita de color amarillo pardusco en el extremo derecho (color de interferencia). Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 13

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-5

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen izquierda del río San Pedro, ladera debajo de la zona inestable 3. Coordenadas: X= 504 215; Y= 2 448 228.

Descripción de la muestra: Roca de color rosa con motas blancas al fresco y rosa con oquedades, a la intemperie de estructura masiva, compacta y textura vítrea. Se observan minerales de plagioclasas alterándose a arcillas embebidos en una mesostasis de color rosa de grano muy fino. Roca probable: Toba riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa pálido (10R 6/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Feldespatos, óxidos de hierro, polimetálicos y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

- | | | |
|----------------------------------|--|--------|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Feldespato | 10 % |
| | Cuarzo | 10 % |
| | Vidrio | 75 % |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Minerales opacos | 5 % |
| | Anfíbol | trazas |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> | Sericita | |
| | Hematita | |
| d) <i>Matriz o cementante:</i> | matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato por desvitrificación. | |
| e) <i>Caracteres especiales:</i> | Cristales de cuarzo, feldespatos de forma tabular algunos ligeramente alterados a sericita, abundante minerales opacos color negro y óxidos de hierro (hematita) con color rojo, material criptocristalino constituido por cuarzo y feldespato relleno de fracturas y conformando la matriz que soporta el conjunto. | |

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo

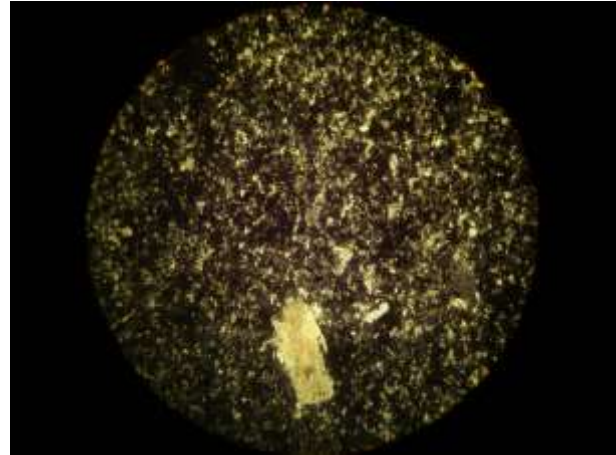
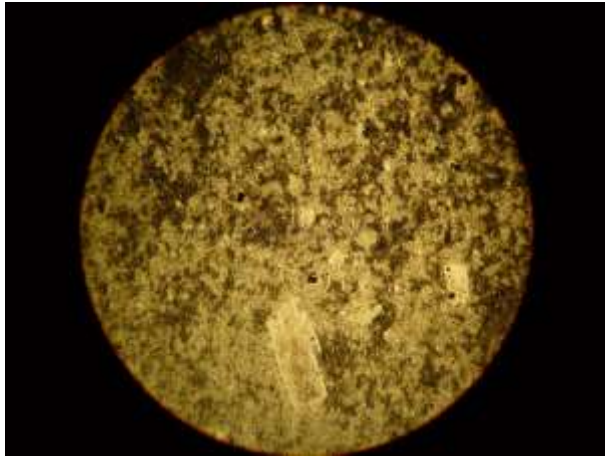
V.- CLASIFICACIÓN Toba Vítrea Desvitrificada

Fecha: junio 1, 2014

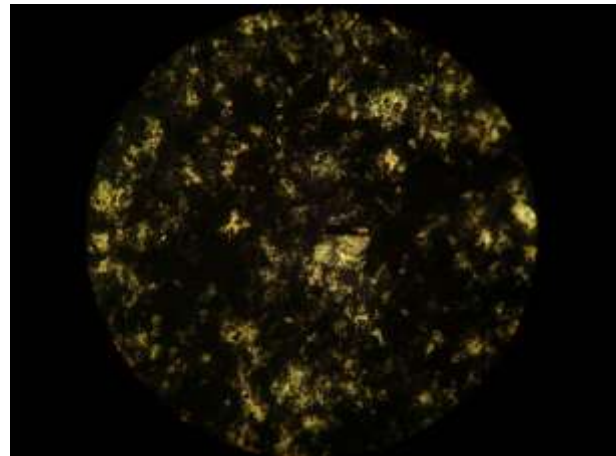
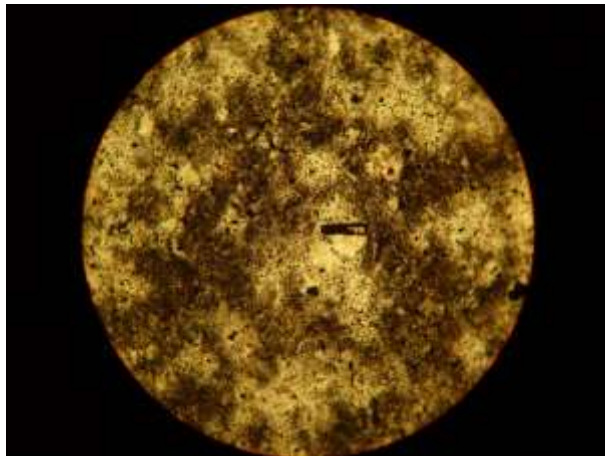
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-5, Coordenadas: X= 504 215; Y= 2 448 228



Cristal de plagioclasa tabular con color de interferencia gris amarillento en la parte inferior de la imagen, rodeado por cuarzo y feldespato criptocristalino con tonos grises, blanco, verde amarillento y negro. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Al centro de la imagen con luz natural anfíbol de forma tabular con borde o corona de reacción alterando a óxidos de hierro, minerales opacos color negro alterando a hematita, esta última se observa disgregada en toda la muestra con color pardo rojizo oscuro rellenando intersticios. Con color de interferencia gris claro a gris medio material criptocristalino constituido por cuarzo y feldespato y con tono amarillo verdoso sericita producto de alteración de los feldespatos. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 14

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-7

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen derecha del río San Pedro enfrente de la torre “el pingüino”. Coordenadas: X= 501 758; Y= 2 453 732.

Descripción de la muestra: Roca de color gris oscuro con cristales verde olivo al fresco y de color gris oscuro al intemperismo, de estructura masiva, de textura porfídica, dura al golpe del martillo, muy densa con oxidaciones de color rojo y negro. Se le observan minerales angulosos de color verde olivo y algunos minerales máficos en una mesostasis de grano muy fino de colores blanco y gris. Roca probable: Diorita con alteración propilítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Gris pardo (5 YR 4/1)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; porfídica.

Minerales observables: Máficos, feldespatos, polimetálicos y calcita.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Porfídica en matriz pilotaxítica

Mineralogía:

a) *Minerales esenciales:* Oligoclasa 50 %

Andesina 36 %

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 4 %

Augita-Diópsidica 9 %

Biotita 1 %

Apatito Trazas

c) *Minerales secundarios:* Hematita, Clorita, Calcita, Sílice

d) *Matriz o cementante:* matriz pilotaxítica

e) *Caracteres especiales:* Fenocristales tabulares de plagioclasas intermedias, algunos presentan alteración parcial por calcita, clorita, hematita y sílice; cristales de piroxenos representados por augita-diopsídica de forma tabular y prismática algunos alterados y remplazados por óxidos de hierro; el conjunto en una matriz de microlitos de cristales de plagioclasas tabulares cuyos intersticios son ocupados por minerales opacos algunos alterando a hematita y material criptocristalino feldespático. Fisuras de forma irregular rellenas por material criptocristalino compuesto por cuarzo, feldespato y calcita.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Intrusivo hipabisal (por descripción de campo)

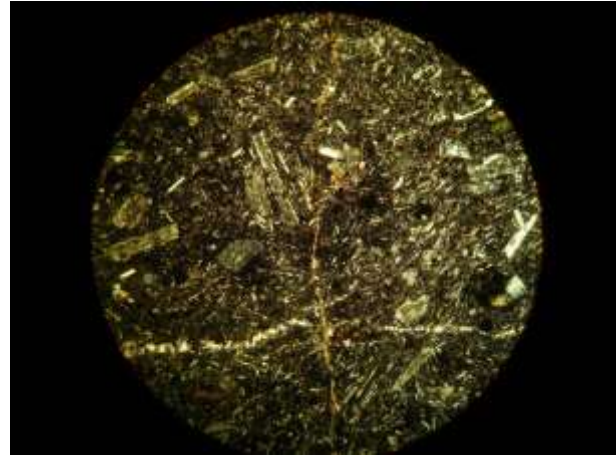
V.- CLASIFICACIÓN Andesita porfídica propilitizada

Fecha: junio 2, 2014

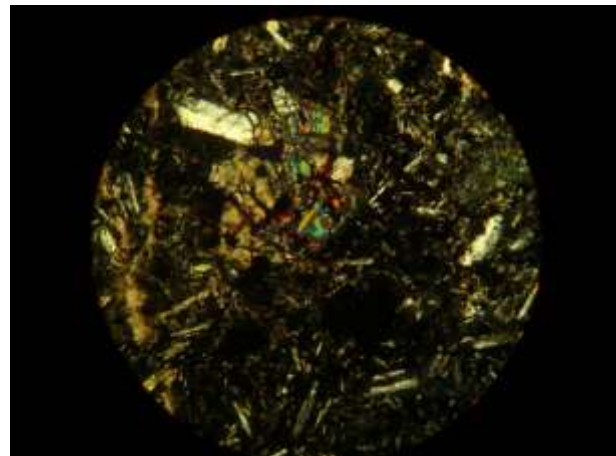
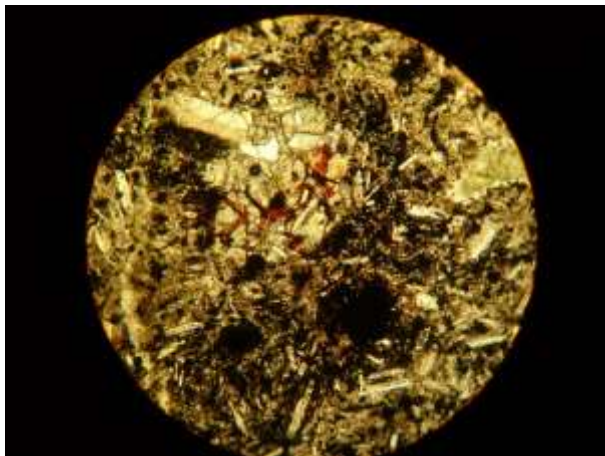
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: E-7, Coordenadas: X= 501 758; Y= 2 453 732.



Cristales tabulares de feldespato con color de interferencia gris oscuro a blanco los cuales presentan macla, inmersos en un matriz conformada por cristales de feldespatos, minerales de anfíboles con alta birrefringencia de primer y segundo orden (azul-verde- amarillo), se observan dos fracturas una vertical rellena por calcita y otra horizontal ocupada por cuarzo y feldespato criptocristalinos. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Cristal de Augita-Diopsídica al centro superior de la imagen con color de interferencia azul-verde-amarillo-anaranjado con alta birrefringencia de primer a segundo orden, cristales de feldespatos tabulares en tonos grises y blanco con macla tipo Carlsbad y Albita, calcita color pardo amarillento en el extremo izquierdo de la fotografía relleno una fisura con orientación vertical. En luz natural se observan abundantes minerales opacos color negro y hematita color rojo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 15

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-8

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen derecha del río San Pedro a 460 m aguas abajo del PH Tecarita en el sitio conocido como las casas.

Coordenadas: X= 501 799; Y= 2 455 195.

Descripción de la muestra: Roca de color gris claro con fragmentos oscuros al fresco y gris claro al intemperismo de estructura en estratos, de textura eutaxítica, de baja densidad con estructuras de flujo con líticos oscuros del tamaño de las gravas y arenas gruesas de formas subangulosas, mientras que la mesostasis es de grano muy fino de color gris blanquecino. Roca probable: Toba de composición riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa anaranjado rosáceo (10 R 8/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Calcita, líticos, feldespatos y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Cuarzo	20 %
	Fragmentos de roca	15 %
	Ortoclasa	15 %
	Vidrio	47 %
b) <i>Minerales accesorios:</i>	Minerales opacos	3%
c) <i>Minerales secundarios:</i>	Calcita	
	Sílice	

d) *Matriz o cementante:* matriz vítrea desvitrificada.

e) *Caracteres especiales:* Escasos cristales de ortoclasa xenomorfos, fragmentos de roca ígnea, abundantes minerales opacos color negro, envueltos en una matriz relictiva, constituida por cascotes, polvo y placas vítreas que alteran a material criptocristalino compuesto por cuarzo y feldespato con presencia de abundante calcita. Fractura con espesor aproximado de 4 mm de ancho y 20 mm de largo rellena completamente por una mezcla de calcita y sílice.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

V.- CLASIFICACIÓN Toba lítica Desvitrificada Riolítica

Fecha: junio 2, 2014

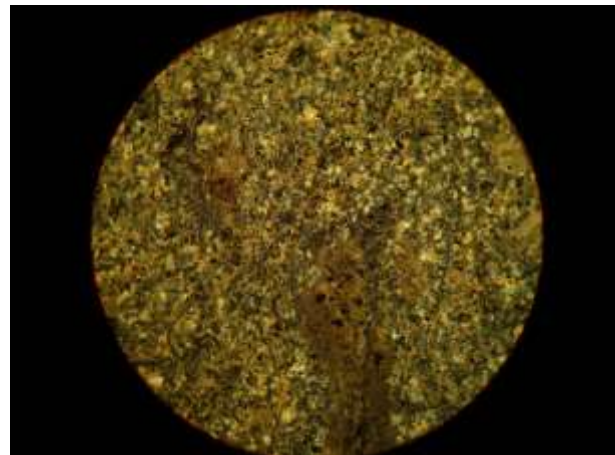
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No:E-8, Coordenadas: X= 501 799; Y= 2 455 195.



Fractura rellena por calcita color pardo oscuro y cuarzo con colores blanco, anaranjado y amarillo con nicoles cruzados; presencia de fragmentos de roca en el borde superior derecho y al centro extremo izquierdo con tonos pardo y rojizo oscuro acompañados de minerales opacos color negro y material vítreo desvitrificado color pardo amarillento claro observables con luz natural. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicles Cruzados (NX).



Material vítreo desvitrificado a material criptocristalino constituido por cuarzo y feldespato con colores blanco, gris y gris oscuro, minerales opacos color negro y abundante calcita disgregada en toda la muestra representada por el color pardo amarillento. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 16

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-9

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen derecha del río San Pedro a 460 m aguas abajo del PH Tecarita en el sitio conocido como las casas.

Coordenadas: X= 501 799; Y= 2 455 195.

Descripción de la muestra: Roca de color rojo con motas blancas al fresco y rojo al intemperismo de estructura en estratos, textura eutaxítica, de baja densidad con marcas de oxidación intensidad. Se observan minerales de cuarzo, plagioclasas y minerales máficos en una mesostasis de grano muy fino de color rojo. Roca probable: Toba de composición riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo pálido (5 R 6/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Líticos, feldespatos y óxidos de hierro.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Líticos	62 %
	Vidrio	15 %
	Ortoclasa	5%
	Andesina	10%
	Oligoclasa	5%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 3%

c) *Minerales secundarios:* Hematita

d) *Matriz o cementante:* matriz vítrea desvitrificada y hematita.

e) *Caracteres especiales:* Cristales de oligoclasa, andesina, ortoclasa y fragmentos de roca ígnea intermedia (andesita-riolita), minerales opacos alterando fuertemente a hematita, el conjunto esta englobado en una matriz constituida por vidrio desvitrificado y óxidos de hierro (hematita).

IV.- ORIGEN DE LA ROCA ígneo extrusivo explosivo

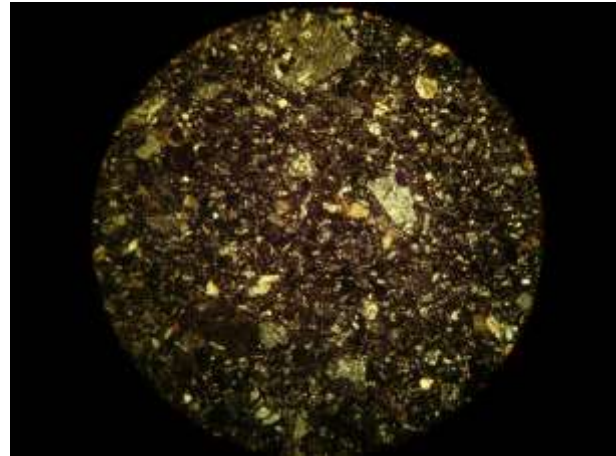
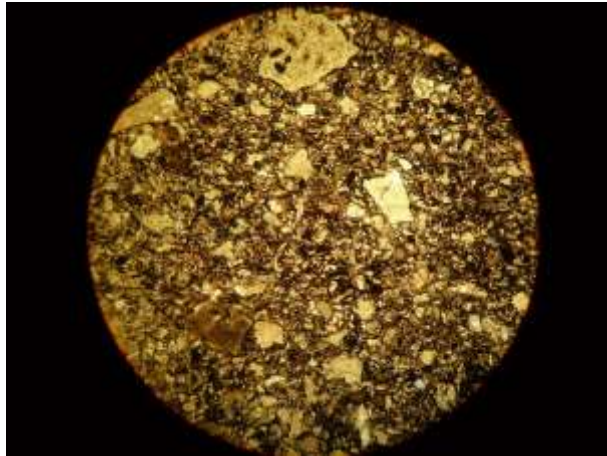
V.- CLASIFICACIÓN Toba lítica oxidada de composición andesítica.

Fecha: junio 2, 2014

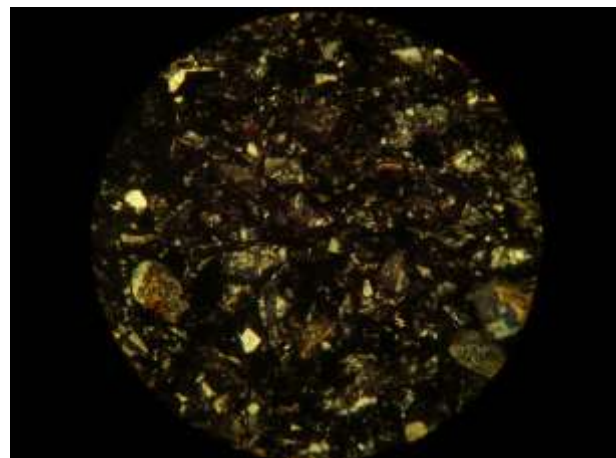
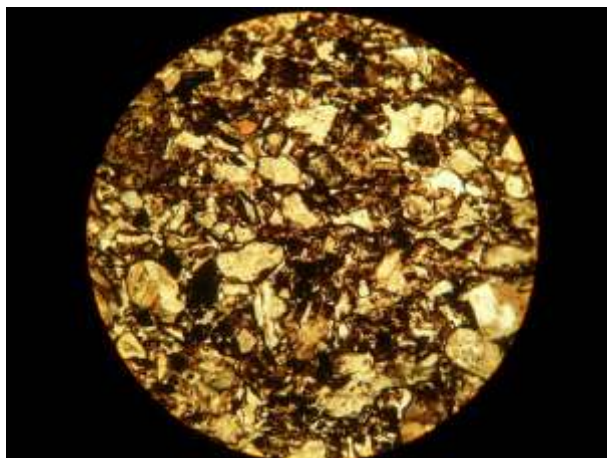
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No:E-9, Coordenadas: X= 501 799; Y= 2 455 195.



Se observan abundantes fragmentos de roca ígnea de forma angulosa, cristales de feldespatos color gris claro, minerales opacos color negro y hematita color rojo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



En luz natural se observan abundantes minerales opacos color negro relleno de intersticios y alterado a hematita color rojo; con nicoles cruzados feldespatos con tono gris, gris oscuro y blanco. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 17

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-10

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen izquierda del arroyo de Rosario Viejo a 300 m debajo de la zona inestable cuatro. Coordenadas: X= 503 936; Y= 2 451 317.

Descripción de la muestra: Roca de color rojo con machas blancas al fresco y rojo al intemperismo, de textura piroclástica, densa con oxidación avanzada. Se observan plagioclasas, vidrio y líticos de composición andesítica de forma redondeada en una mesostasis roja. Roca probable: Brecha riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rojo pálido (5 R 6/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Líticos, feldespatos, óxidos de hierro, máficos y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

- | | |
|--|------|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> Fragmentos de roca ígnea oxidada | 60 % |
| Vidrio | 28 % |
| Plagioclasas | 6 % |
| Cuarzo | 4 % |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> Minerales opacos | 2% |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> Biotita Hematita Sericita-arcilla Calcita | |
| d) <i>Matriz o cementante:</i> matriz constituida por una mezcla de hematita-sericita-arcilla. | |
| e) <i>Caracteres especiales:</i> Fragmentos de roca ígnea de composición intermedia constituidos por plagioclasas, hornblenda, biotita y minerales opacos algunos fuertemente oxidados; escasos cristales de plagioclasas tabulares variando de andesina a oligoclasa y en pocas partes entre los intersticios de la muestra se observa cuarzo con forma de sílice y calcita. El conjunto lo aglutinan principalmente una mezcla de hematita-arcilla-sericita, estos últimos son producto de alteración en feldespatos microcristalinos originados por desvitrificación. | |

El nombre de la roca podría variar a **Toba Brechoide** si el macizo rocoso lo constituyen más del 50 % de fragmentos de roca de forma angulosa y con diámetros mayores a 32 mm.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

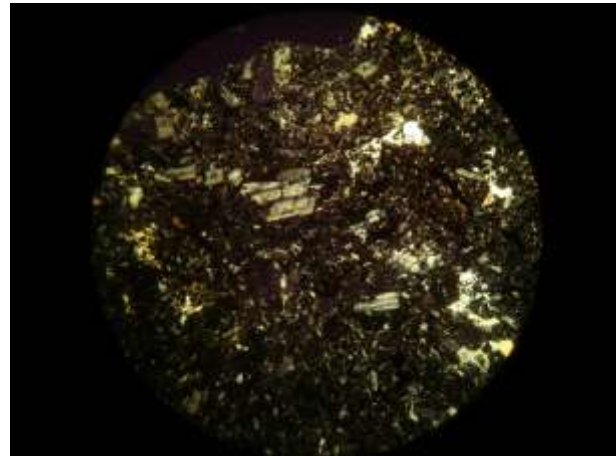
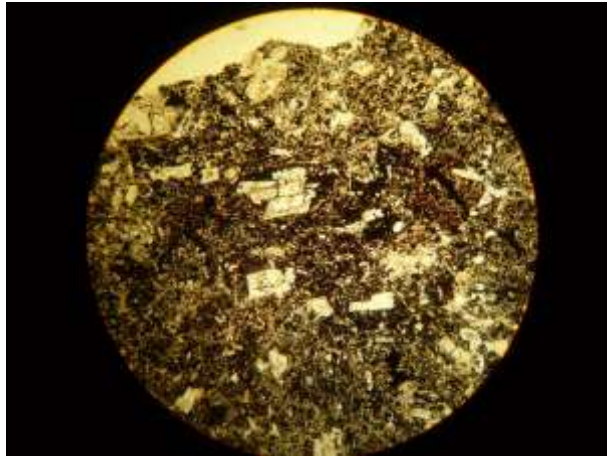
V.- CLASIFICACIÓN Toba lítica andesítica oxidada

Fecha : junio 3, 2014

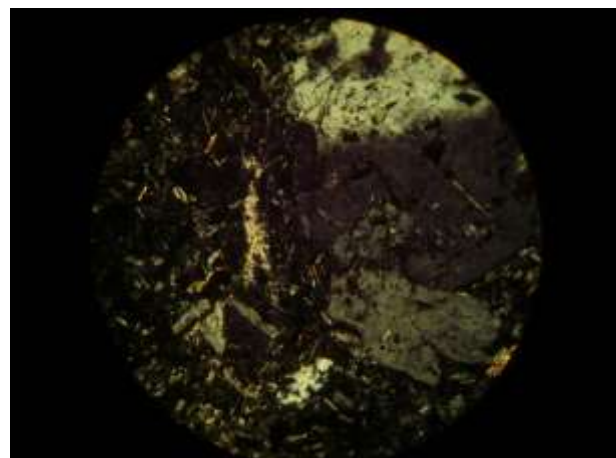
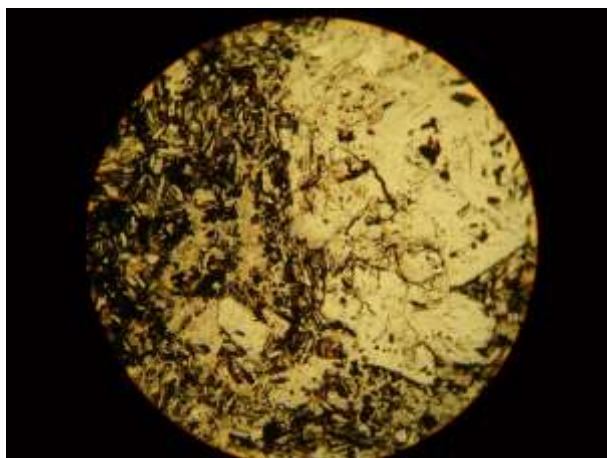
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No:E-10, Coordenadas: X= 503 936; Y= 2 451 317.



En color de interferencia gris claro a gris se observan cristales de plagioclasas de forma tabular con maclas tipo Albita y Carlsbad, sílice relleno intersticios con tono blanco, sericita al centro extremo izquierdo relleno intersticios con color pardo amarillento claro. En luz natural se aprecia abundantes minerales opacos color negro alterando a hematita color rojo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Con nicoles cruzado se observa cristal de plagioclase con macla de Carlsbad y tono gris claro-gris oscuro en el extremo derecho de la imagen, al centro calcita relleno fractura vertical y sílice color blanco centro del borde inferior. Con luz natural abundantes minerales opacos color negro relleno intersticios. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 18

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-12

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen derecha del Río San Pedro en la parte baja de la zona inestable dos. Coordenadas: X= 505 113; Y= 2 445 121.

Descripción de la muestra: Roca de color rosa claro con motas blancas de estructura masiva, textura piroclástica con plagioclasas, cuarzo, vidrio volcánico y líticos en una mesostasis de color rosa claro. Roca probable: Ignimbrita de composición riolítica.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa grisáceo (5 R 8/2)

Estructura y Textura: Masiva-fluidal; piroclástica

Minerales observables: Líticos, feldespatos, cuarzo y calcita

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

- | | | |
|---------------------------------|----------------------|-----|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Cuarzo | 10% |
| | Ortoclasa perthítica | 5% |
| | Oligoclasa | 4% |
| | Líticos | 18% |
| | Vidrio ácido (N<B) | 60% |
- b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 3%
- c) *Minerales secundarios:* Hematita
- d) *Matriz o cementante:* matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato por desvitrificación con abundantes estructuras de shards.
- e) *Caracteres especiales:* Cristales de cuarzo con golfo corrosión, ortoclasas perthíticas tabulares, oligoclasas subangulosas, escasos líticos, abundantes minerales opacos algunos alterando a hematita y presencia de sílice de composición ácida N<B; el conjunto esta englobado en una matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato resultado de desvitrificación. Se observan cuantiosas estructuras en forma de shards.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

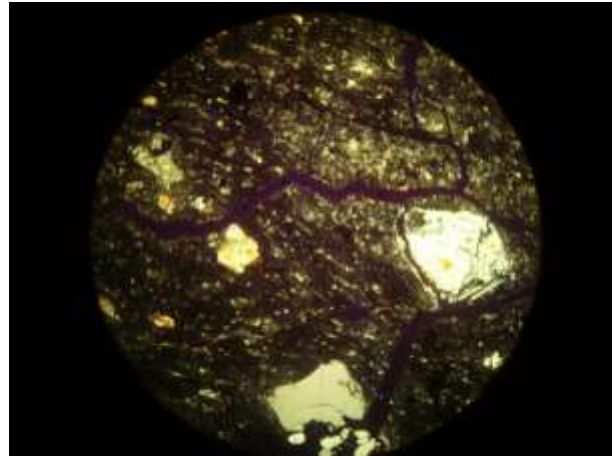
V.- CLASIFICACIÓN Ignimbrita riolítica ligeramente soldada

Fecha: junio 3, 2014

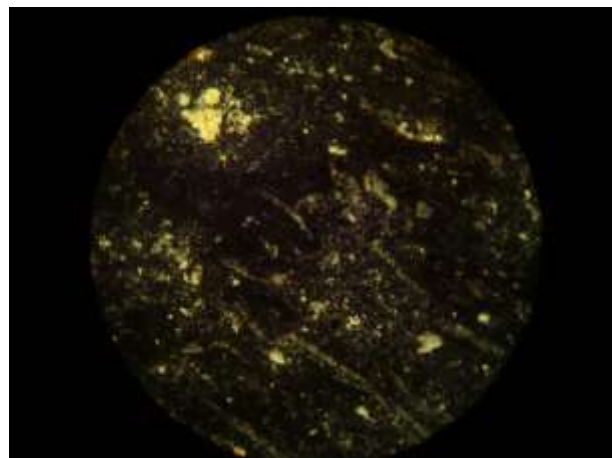
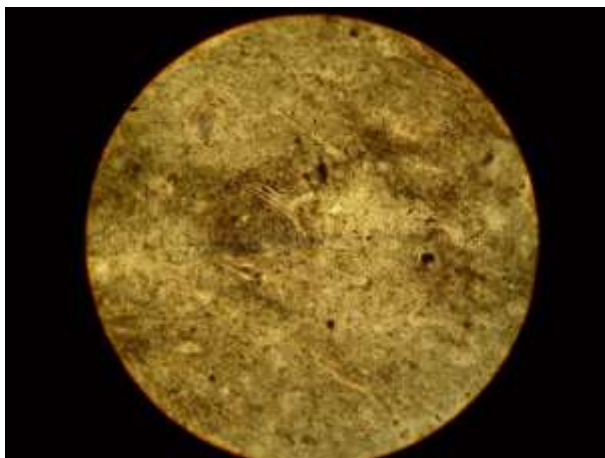
Petrografo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No:E-12, Coordenadas: X= 505 113; Y= 2 445 121.



En color de interferencia con color blanco se observa cristal de feldespato de forma angulosa en el extremo derecho de la imagen, cuarzo en el borde inferior, fragmento de roca en el borde izquierdo, matriz de cuarzo y feldespato representada con tonos grises; en luz natural se observan fracturas horizontales una en la parte superior de la imagen rellena por minerales opacos color negro y en la parte inferior ocupada por sílice. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



En luz natural se observa matriz criptocrystalina constituida por cuarzo y feldespato resultado de la desvitrificación de material vítreo, con color pardo amarillento claro se pueden notar estructuras de shards y placas vítreas, algunos minerales opacos color negro alterando a hematita color rojo. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 19

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-13

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre la margen derecha del río San Pedro sobre la falla Rosario Viejo. Coordenadas: X= 504 756; Y= 2 445 850.

Descripción de la muestra: Roca de color rojo a violáceo al fresco, rojo con blanco a la intemperie, de textura porfídica, estructura masiva, con minerales de cuarzo, plagioclasas tabulares y minerales alargados en una mesostasis de minerales rojos de grano fino. Roca probable: Pórfido riolítico.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa pálido (5 R 6/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; porfídica.

Minerales observables: Feldespatos, máficos, calcita y óxidos de hierro.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Porfídica

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Oligoclasa	50%
	Andesina	42%
b) <i>Minerales accesorios:</i>	Minerales opacos	3%
	Hornblenda	5%
	Apatito	Trazas
	Zircón	Trazas

c) *Minerales secundarios:* Sericita, Arcilla, Calcita, Hematita, Líticos

d) *Matriz o cementante:* matriz cristalina feldespática con hematita.

e) *Caracteres especiales:* Fenocristales de feldespatos con formas tabulares y prismáticas fuertemente alterados a sericita-arcilla, cristales de hornblenda de forma prismática y algunos tabulares con bordes de reacción de óxidos de hierro (hematita), presencia de apatito tabular, cristales prismáticos de zircón, algunos minerales opacos alteran a hematita, un solo fragmento de roca, calcita cubriendo algunos feldespatos y rellenando fracturas; el conjunto esta engloba por material feldespático criptocristalino con hematita.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo intrusivo hipabisal (por descripción de campo)

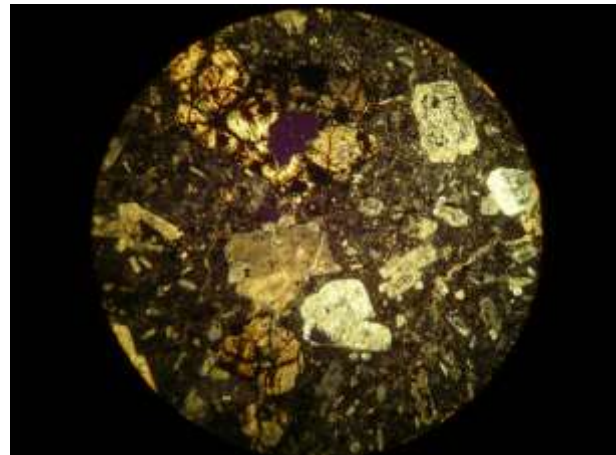
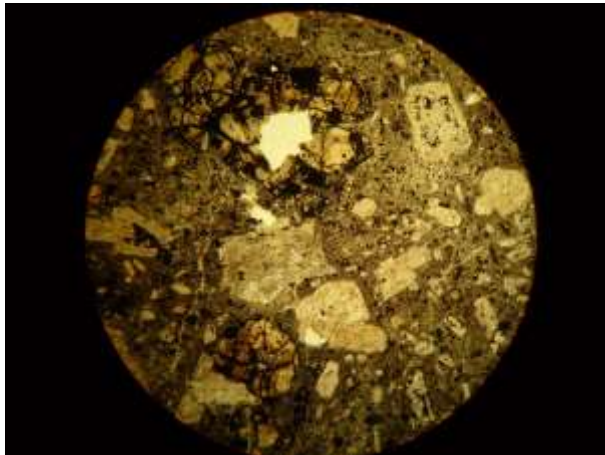
V.- CLASIFICACIÓN Andesita porfídica argilitizada-sericitizada-hematizada y carbonatada

Fecha: junio 3, 2014

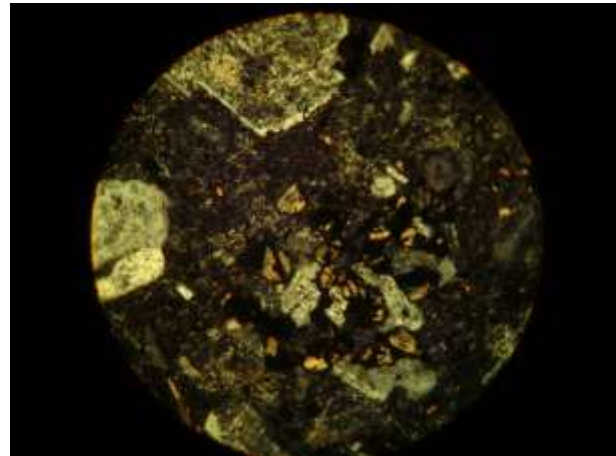
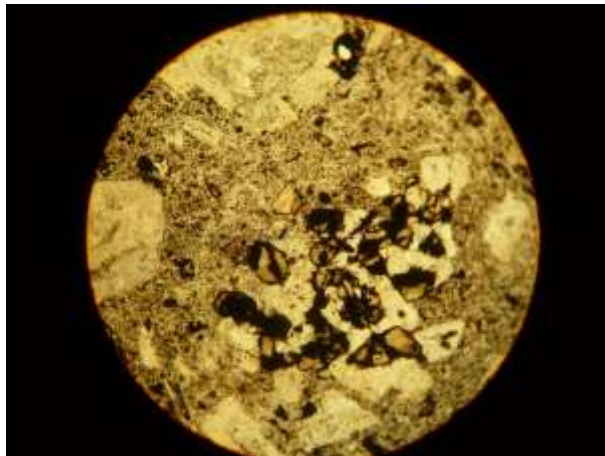
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No:E-13, Coordenadas: X= 504 756; Y= 2 445 850.



Cristales de feldespatos de forma tabular y con macla la cual se puede apreciar en nicoles cruzados, abundantes minerales opacos color negro, fenocristales de hornblenda en la parte superior y en el borde inferior de la imagen con tono pardo amarillento, color de interferencia de segundo orden y rodeados por minerales opacos. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



En luz natural cristales de hornblenda color pardo amarillento de alto relieve rodeados por minerales opacos color negro algunos alterando hematita color rojo al centro de la imagen; con nicoles cruzados los cristales de hornblenda presentan colores de birrefringencia de segundo orden. En el borde superior de la imagen cristal de feldespato con alteración de sericita. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 20

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: E-14

Colector: Ing. Adrián Vargas Godínez

Localidad: Embalse del PH Las Cruces sobre margen derecha del río San Pedro sobre la falla Rosario Viejo aguas abajo del verano de Lince. Coordenadas: X= 503 948; Y= 2 447 936.

Descripción de la muestra: Roca de color rosa con franjas blancas de estructura masiva con textura afanítica. Roca probable Riodacita.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Rosa grisáceo (5 R 8/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; piroclástica.

Minerales observables: Vidrio, feldespatos, líticos y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Líticos	20%
	Cuarzo	12%
	Plagioclasas	6%
	Vidrio	60%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 2%

c) *Minerales secundarios:* Hematita

d) *Matriz o cementante:* matriz criptocristalina de cuarzo y feldespato producto de la alteración del vidrio.

e) *Caracteres especiales:* Abundantes fragmentos de rocas ignimbrítica constituidos por material cuarzo, feldespatos, vidrio y abundantes estructura por desvitrificación (esferulitas, placas y shards), presencia de minerales opacos alterando a hematita y cristales de plagioclasas de forma prismática; el conjunto de materiales está englobado en matriz criptocristalina producto de la alteración del vidrio.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

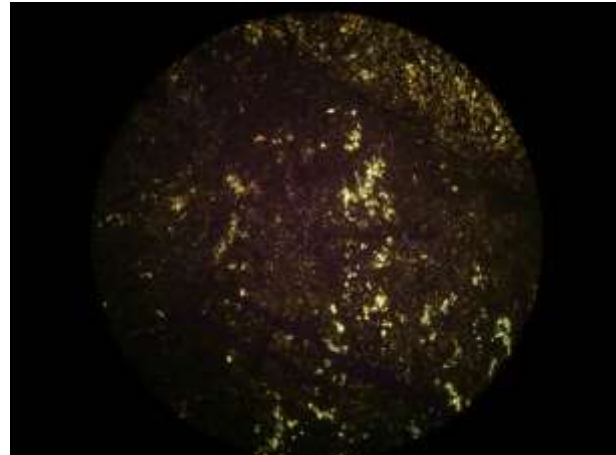
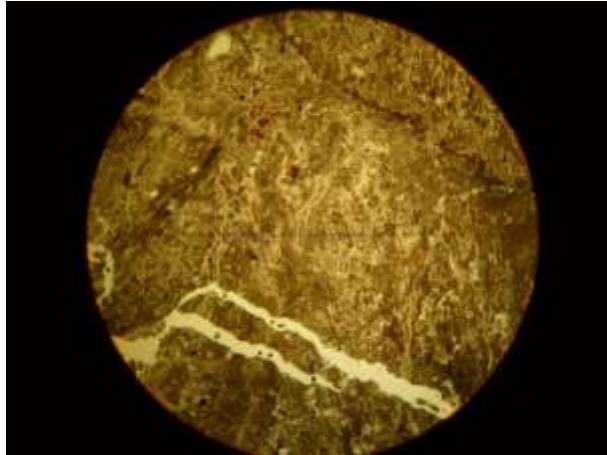
V.- CLASIFICACIÓN Ignimbrita brechoide

Fecha: junio 3, 2014

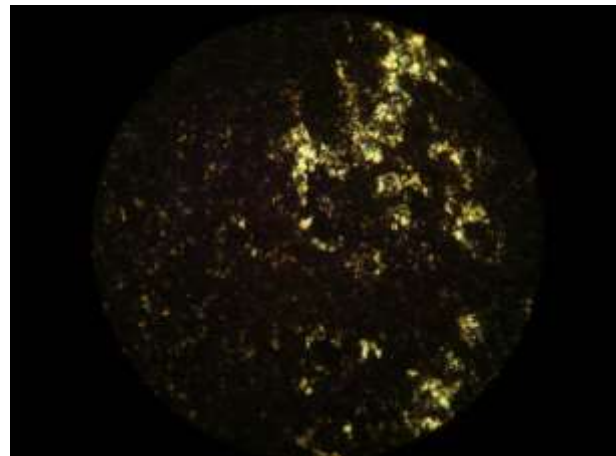
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Embalse del Proyecto Hidroeléctrico las Cruces, Nayarit”.

Muestra No:E-14, Coordenadas: X= 503 948 Y= 2 447 936.



Material cuarzo y feldespato criptocristalino con colores de interferencia blanco, gris y pardo amarillento, se observan abundantes estructuras de shards, placas, cascos y formas de media luna, en el borde superior derecho y extremo izquierdo de la imagen fragmentos de rocas ígneas con tono gris, negro, blanco y pardo amarillento. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Rellenando fracturas en los cuadrantes superior derecho e inferior material criptocristalino constituido por cuarzo y feldespato con color de interferencia blanco a gris medio, en una matriz vítrea color negro. En luz natural se observan estructuras de cascos, media luna y shards típicos de una ignimbrita. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 21

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: Arroyo

Colectores: Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit. Coordenadas: X = 507 530; Y = 2 438 464.

Descripción del afloramiento: Roca de color verde oscuro, textura afanítica, cubre de forma discordante a tobas. Roca probable: Andesita.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Gris medio N 5

Estructura y Textura: masiva-compacta; Porfídica.

Minerales observables: Félsicos, máficos, óxidos de hierro.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Holocristalina glomeroporfídica.

Mineralogía:

- | | | |
|----------------------------------|------------------|--------|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Oligoclasa | 55 % |
| | Andesina | 30 % |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Minerales opacos | 5 % |
| | Apatito | trazas |
| | Diópsido | 3 % |
| | Augita-Egirina | 7% |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> | Uralita | |
| | Sericita | |
| | Calcita | |

d) *Matriz o cementante:* Matriz glomeroporfídica equigranular con microlitos de plagioclasas y piroxenos

e) *Caracteres especiales:* Fenocristales tabulares de plagioclasas zoneadas, cristales prismáticos de piroxenos alterados a uralita por hidrotermalismo y ligeramente a hematita, feldespatos alterados a sericita, fracturas rellenas por sericita y minerales opacos con formas prismáticas y color negro, cristales de apatito tabulares. Se observan abundantes estructuras glomeroporfídicas. El conjunto está englobado en una matriz de microcristales de plagioclasas y piroxenos. Presencia de calcita reemplazando cristales máficos.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA ígneo extrusivo

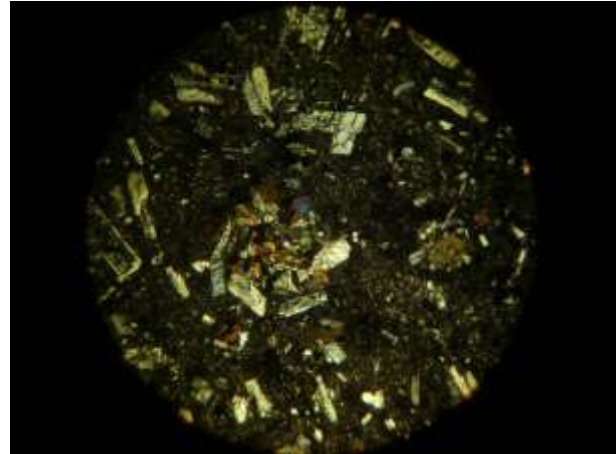
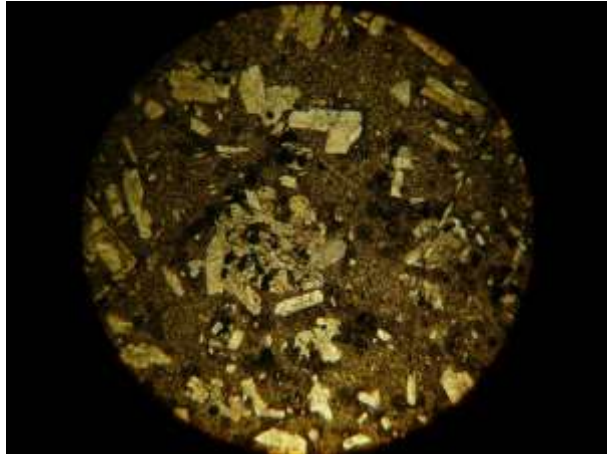
V.- CLASIFICACIÓN Andesita de Piroxenos

Fecha: septiembre 25, 2014

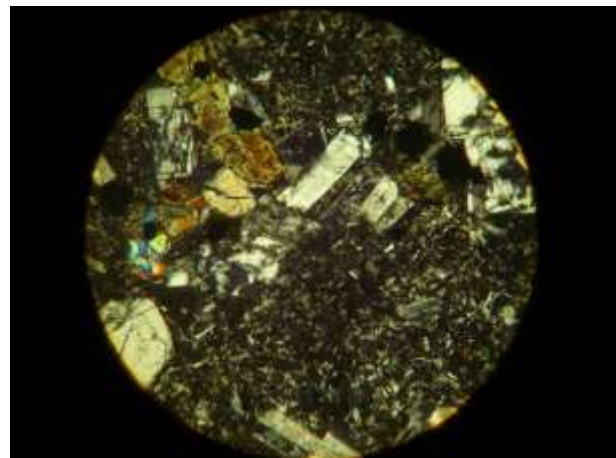
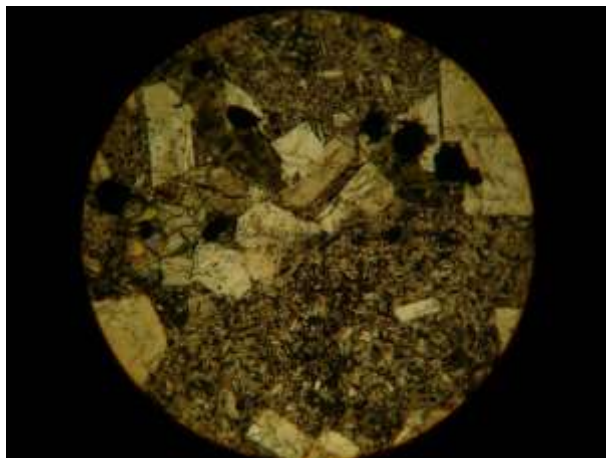
Petrografo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: Arroyo, Coordenadas: X = 507 530; Y = 2 438 464.



En luz natural abundantes minerales opacos color negro, fenocristales de feldespatos con color blanco y forma tabular englobados en una matriz color ocre conformada por microlitos de feldespatos. En luz polarizada, cristales de piroxenos en el centro de la imagen con colores de birrefringencia de segundo orden y feldespatos con tonos grisáceos. Centro de la imagen se observa estructura glomeroporfídica. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



En luz natural cristal de diópsido en el extremo izquierdo con alto pleocroísmo, cristal de augita-egirina color verde extremo superior verde oscuro con forma tabular, minerales opacos con color negro, cristales subedrales de forma tabular de feldespatos color blanco, envueltos en una matriz microcristalina de feldespatos y minerales opacos. En luz polarizada cristal de diópsido extremo izquierdo con colores de interferencia azul, amarillo y anaranjado, cristal de augita-egirina con tono verde amarillento-ocre. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 22

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: PCR-2

Colectores: Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez.

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit. Coordenadas: X = 507 474; Y = 2 438 814.

Descripción de la roca: color gris verdoso, textura porfídica, probable intrusivo. Roca probable: Pórfido Andesítico.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: Pardo amarillento pálido (10 YR 6/2)

Estructura y Textura: Masiva-compacta; porfídica.

Minerales observables: Feldespatos, minerales opacos, calcita, óxidos de hierro.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Porfídica en matriz intersertal

Mineralogía:

- | | | |
|----------------------------------|------------------|--------|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Oligoclasa | 40% |
| | Andesina | 50% |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Augita | 8% |
| | Minerales opacos | 2% |
| | Apatito | Trazas |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> | Hematita | |
| | Sericita | |
| | Arcillas | |
| | Clorita | |

d) *Matriz o cementante:* matriz de microlitos de plagioclasa, piroxenos y opacos cuyos intersticios los ocupan minerales secundarios.

e) *Caracteres especiales:* Fenocristales de feldespatos tabulares alterados a sericita-arcilla, cristales de piroxenos de forma prismática algunos ligeramente alterados a clorita, abundantes minerales opacos con forma prismática alterados a hematita y cristales de apatito tabulares, el conjunto esta englobado en una matriz traquíutica conformada por microcristales de piroxenos, plagioclasas y minerales opacos; sílice de composición ácida (N<B) rellenando intersticios.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo intrusivo hipabisal (por relación de campo)

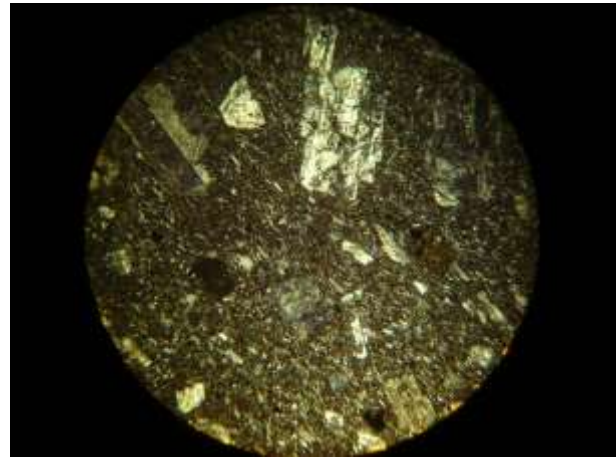
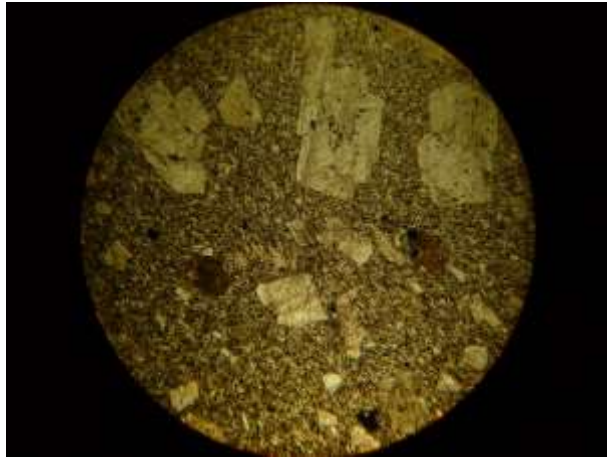
V.- CLASIFICACIÓN Andesita Porfídica de Piroxeno

Fecha: septiembre 25, 2014

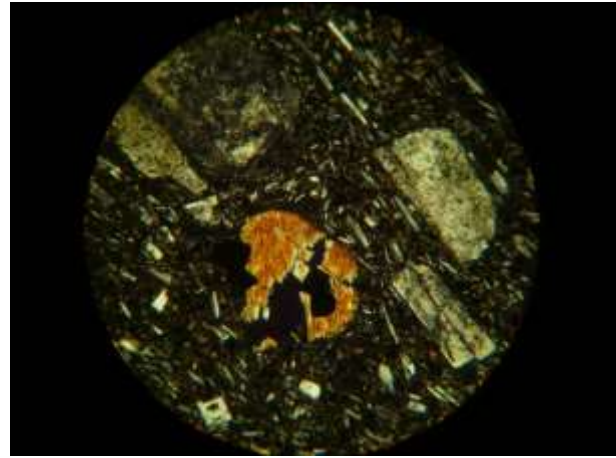
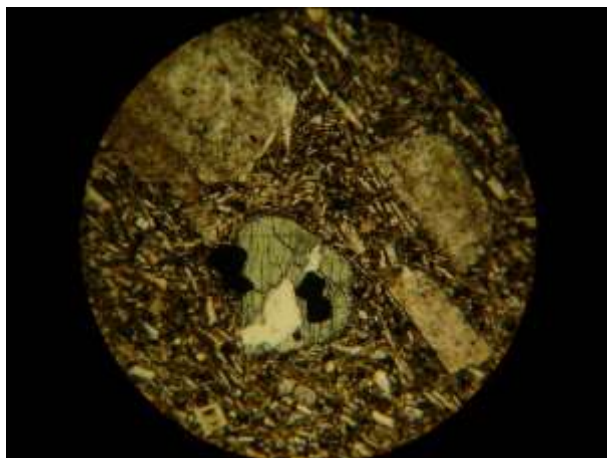
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: PCR-2, Coordenadas: X = 507 474: Y = 2 438 814.



En luz natural se aprecian cristales tabulares color blanco de feldespatos, pequeños minerales opacos color negro y dos cristales de augita color pardo oscuro en el extremo izquierdo y derecho del centro de la imagen. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



En luz natural, al centro de la imagen cristal de augita de forma prismática subedral color verde, feldespatos de forma tabular variando de subedral a euedral con tono blanco amarillento, envueltos en una matriz de pequeños cristales tabulares subedrales a euedrales. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 23

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: PCR-4

Colectores: Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit. Coordenadas: X = 507 451; Y = 2 438 356.

Descripción de la roca: color verde oscuro, textura porfídica, probable intrusivo. Roca probable: Pórfido Andesítico.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: gris claro (N 7)

Estructura y Textura: masiva-compacta; fanerítica.

Minerales observables: Óxidos de hierro, minerales opacos, máficos, félsicos, sulfuros de hierro y cuarzo.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Holocristalina hipidiomórfica.

Mineralogía:

a) *Minerales esenciales:* Ortoclasa pertítica 10%

Oligoclasa 80%

b) *Minerales accesorios:* Diópsido 7%

Minerales opacos 3%

Apatito Trazas

c) *Minerales secundarios:* Hematita

Sílice

d) *Matriz o cementante:*

e) *Caracteres especiales:* mosaico de cristales subedrales de plagioclasas intermedias y feldespato potásico pertítico, piroxenos de forma prismática subedral

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo intrusivo

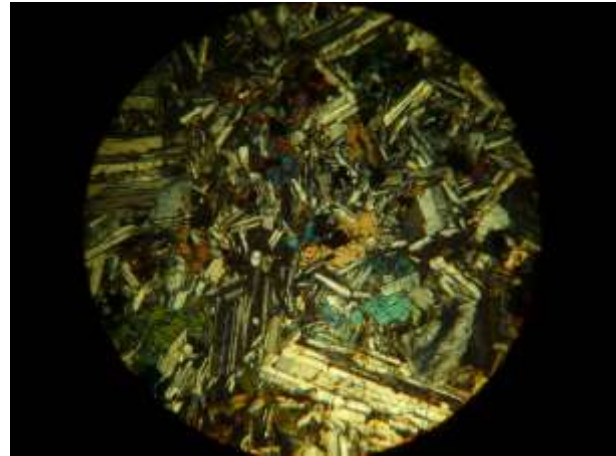
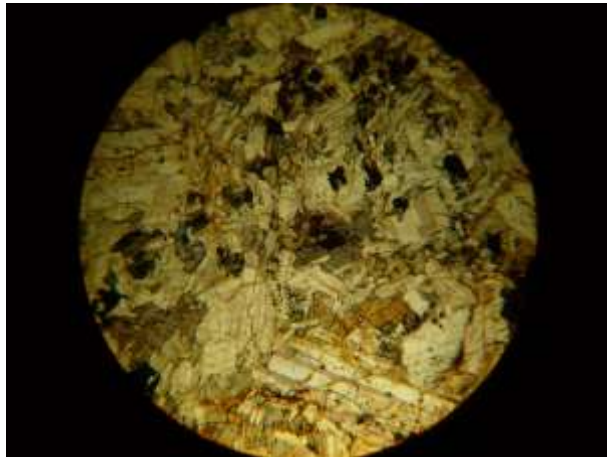
V.- CLASIFICACIÓN Diorita de piroxeno

Fecha: septiembre 25, 2014

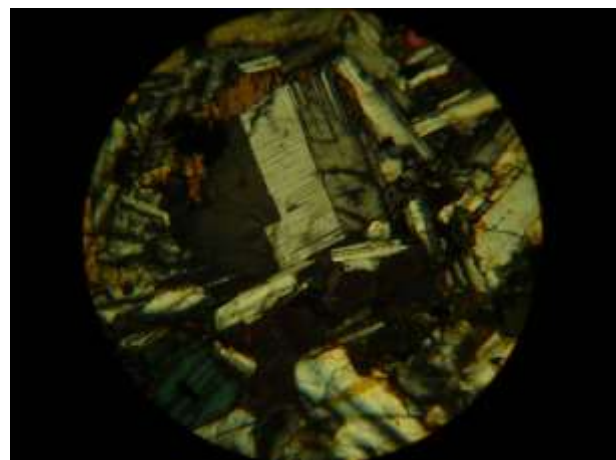
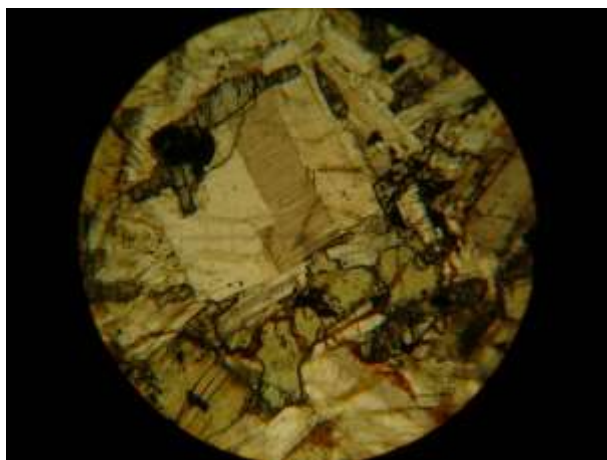
Petrografo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: PCR-4, Coordenadas: X = 507 451; Y = 2 438 356.



Se observa una textura holocrystalina equigranular con minerales tabulares de plagioclasas oligoclasa las que presentan maclas y una ligera alteración por oxidación de color amarillo, opacos de color negro y cristales de piroxenos de forma prismática con colores de interferencia violáceos, azules y pardos. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Se presenta un gran cristal de plagioclasa oligoclasa al centro de forma tabular y con color de interferencia gris a gris oscuro, a la izquierda y arriba se tienen piroxenos con altos colores de birrefringencia. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 24

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: MP4

Colectores: Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit. Coordenadas: X = 507 305; Y = 2 438 412, Profundidad: 26,10 a 26,18 m.

Descripción del núcleo de roca: color gris claro, textura piroclástica, se cortó en el barreno PCR-05. Roca probable: Toba lítica propilitizada.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: blanco azulado (5 B 9/1)

Estructura y Textura: Amigdaloides-compacta; piroclástica

Minerales observables: Feldespatos, máficos, óxidos de hierro, polimetálicos. Se observan abundantes oquedades.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: Eutaxítica

Mineralogía:

- | | | |
|----------------------------------|--|-----|
| a) <i>Minerales esenciales:</i> | Feldespatos | 25% |
| | Fragmentos de roca ígnea | 30% |
| | Oligoclasa | 5% |
| | Vidrio alterado a Sílice (N<B) | 35% |
| b) <i>Minerales accesorios:</i> | Minerales opacos | 3% |
| | Biotita | 2% |
| c) <i>Minerales secundarios:</i> | Hematita | |
| | Arcilla | |
| d) <i>Matriz o cementante:</i> | Matriz feldespática desvitrificada, con abundantes estructuras relictas placas, cascós, shards y estructuras amigdaloides. | |
| e) <i>Caracteres especiales:</i> | Cristales de plagioclasas alterados, los cuales se desprenden con facilidad dejando pequeños bordes y formando oquedades, fragmentos de roca ignimbrítica, presencia de abundantes vesículas ocupadas o rellenas por material feldespático generando estructura amigdaloides, algunas completamente selladas y otras parcialmente abiertas, minerales opacos color negro algunos alterados a hematita; englobados en una matriz félsica con abundantes estructuras relictas constituida por cascós, placas y shards. | |

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

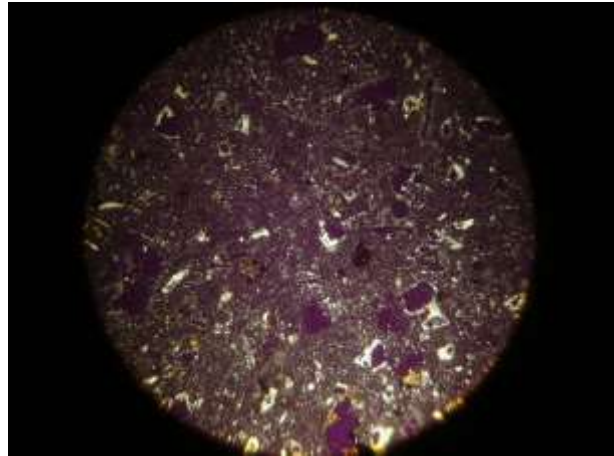
V.- CLASIFICACIÓN **Ignimbrita lítica amigdaloides densamente soldada**

Fecha: septiembre 25, 2014

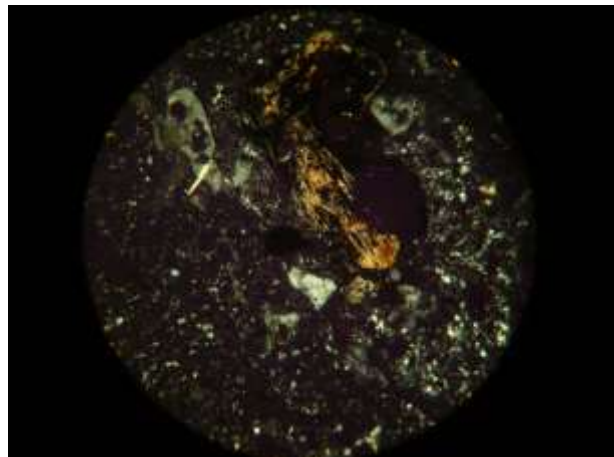
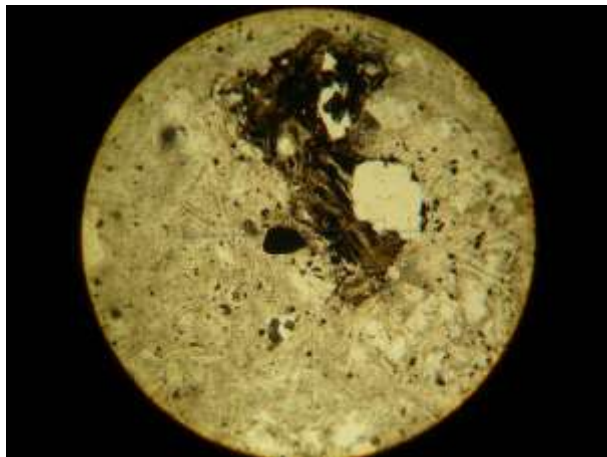
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: MP4, Coordenadas: X=507 305; Y=2 438 412, Profundidad: 26,10 a 26,18 m.



Se observan líticos, vidrio y cristales de feldespatos en una matriz vítrea alterada a material criptocristalino formado por cuarzo y feldespato. Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



Fragmento de roca ígnea con biotita, y material criptocristalino por desvitrificación. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nicoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 25

I.- DATOS DE CAMPO:

Muestra No: MP6

Colectores: Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit. *Coordenadas:* X = 507 305; Y = 2 438 412, *Profundidad:* 52,85 a 52,95 m.

Descripción del núcleo de roca: color gris verdoso, textura piroclástica, se cortó en el barreno PCR-05 C. Roca probable: Toba propilitizada.

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA

Color: gris azulado claro

Estructura y Textura: Masiva-compacta; afanítica

Minerales observables: Máficos y félsicos.

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCOPICA

Textura: hipocristalina

Mineralogía:

a) <i>Minerales esenciales:</i>	Ortoclasa	30%
	Vidrio alterado a Sílice (N<B)	30%
	Líticos	35%

b) *Minerales accesorios:* Minerales opacos 5%

c) *Minerales secundarios:* Clorita
Sericita

d) *Matriz o cementante:* criptocristalino formado por cuarzo y feldespato por desvitrificación

e) *Caracteres especiales:* Abundantes estructuras amigdaloides (vesículas rellenas por material desvitrificado, feldespatos y rodeado por clorita), fragmentos de roca de composición intermedia, vidrio de composición intermedia y cristales de feldespatos en una matriz vítrea alterada a material criptocristalino.

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Ígneo extrusivo explosivo

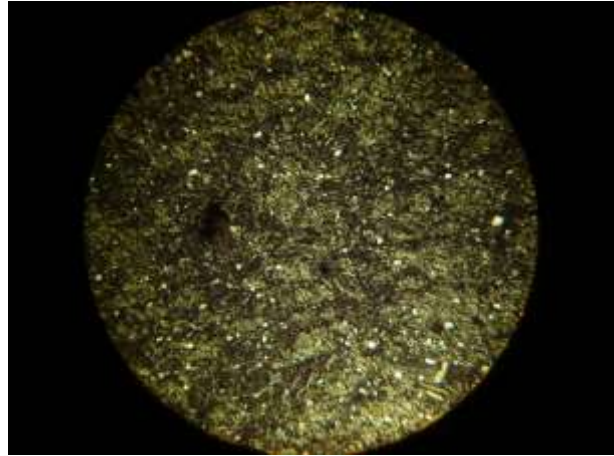
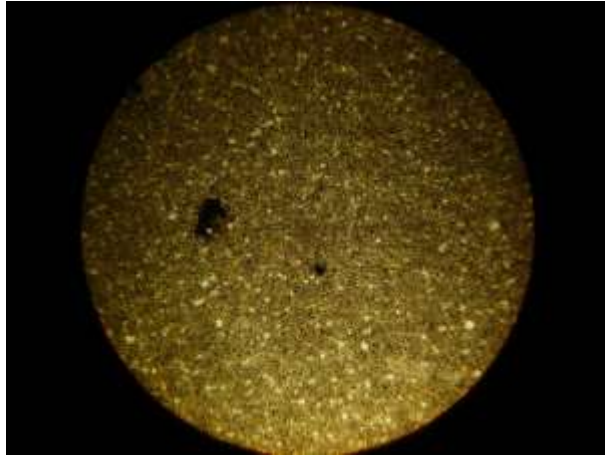
V.- CLASIFICACIÓN Toba andesítica amigdaloides cloritizada.

Fecha: septiembre 25, 2014

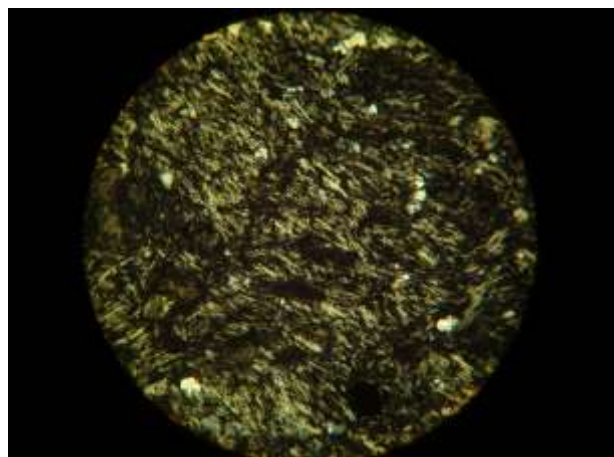
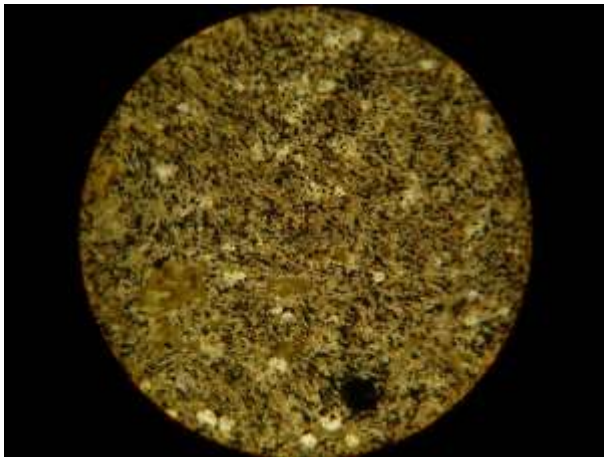
Petrógrafo: Ing. Miguel Ángel Ruvalcaba Sepúlveda

Fotomicrografías de muestras colectadas en el “Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Nayarit”.

Muestra No: MP6, Coordenadas: X=507 305; Y=2 438 421, Profundidad: 52,85 a 52,95 m.



Se observa un mosaico de cristales muy finos con un opaco oxidado color rojo al centro izquierda, sílice color blanco y feldespato con color de interferencia gris oscuro a blanco en una masa vítrea desvitrificada, Ocular 12,5x kpl, objetivo 2,5x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



Cristales tabulares o microlitos de plagioclasas intermedias, abundantes amígdalas rellenas de clorita (material color verde) en una matriz desvitrificada a material criptocristalino. Ocular 12,5x kpl, objetivo 10x, fotomicrografía izquierda en Luz Natural (LN) y derecha con Nícoles Cruzados (NX).



ESTUDIO PETROGRÁFICO 26

I.- DATOS DE CAMPO

Muestra N°: MP 1

Colectores: M.I. Alberto Sánchez De La Vega B.
Ing. Gerardo Mendoza, Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit.

Coordenadas: X= 507 305; Y= 2 438 412 Prof. 9.30 a 9.40 m

Descripción del afloramiento: Roca de color gris claro con textura piroclástica. Se cortó en el barreno PCR-05 C. Clasificación preliminar: Toba lítica propilitizada

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Color: blanco con puntos blancos y negros

Estructura y textura: Compacta con poros. Piroclástica

Minerales observables: Feldespatos, cuarzo, fragmentos de roca

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

- a) *Componentes primarios:* Cuarzo
Vidrio
Feldespatos
Fragmentos de roca
Ferromagnesianos alterados
Minerales opacos
- b) *Minerales secundarios:* Minerales arcillosos
Calcita
Hematita-limonita
Clorita

c) *Matriz o cementante:* Matriz vítrea alterada (desvitrificada)

d) *Caracteres especiales:* La roca está constituida por cristales de cuarzo que exhiben sus bordes angulosos a subredondeados y con sus contornos que varían de parcialmente desarrollados (subedrales) a mal desarrollados (anedrales), alguno de estos cristales muestran pequeñas fracturas y otros cristales tienen bordes corroídos por la matriz vítrea.

Los cristales de feldespatos exhiben formas irregulares, algunos con tendencia tabular, también exhiben bordes corroídos por la matriz así como alteración a minerales arcillosos y a clorita, estos componentes pertenecen a la familia de plagioclasas intermedias (andesina, oligoclasa). Algunos cristales se encuentran reemplazados por calcita.

Los fragmentos de roca exhiben formas irregulares con sus contornos redondeados y pertenecen a rocas volcánicas de probable composición ácida e intermedia con fuerte oxidación, están escasamente diseminados e incluidos en la matriz que presenta textura fluidal y alteración.

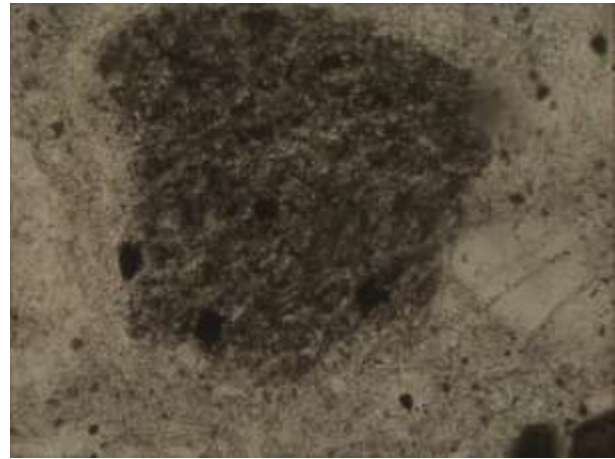
Se encuentran cristales de ferromagnesianos con alteración a hematita-limonita, algunos cristales muestran sus contornos parcialmente desarrollados (subedrales) y corroídos por la matriz vítrea, otros cristales tienen tendencias a formas tabulares (biotita). Existen microcristales de minerales opacos con formas irregulares, en ocasiones cuadradas y contornos que varían de mal desarrollados (anedrales) a bien desarrollados (euedrales). Estos cristales se encuentran diseminados aleatoriamente en la roca. Los componentes descritos se encuentran incluidos en una matriz vítrea que en ocasiones exhibe vestigios de una textura fluidal, se encuentra en proceso de desvitrificación y alterada a minerales arcillosos.

Proyecto: **P.H. Las Cruces, Nayarit.**

Muestra: MP 1. Las fotomicrografías fueron tomadas con 4x pol y 10x pol. Estas últimas muestran fragmentos de roca alterados a hematita-limonita, en donde se observan las texturas relictas de posibles rocas ácidas e intermedias respectivamente estos fragmentos se encuentran incluidos en la matriz vítrea desvitrificada.



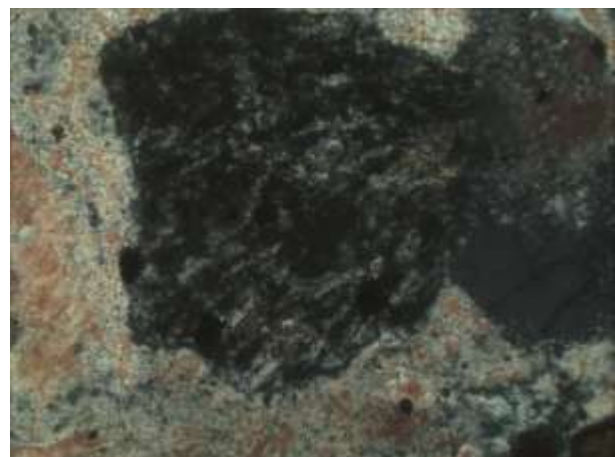
Objetivo 10x (luz natural).



Objetivo 10x (luz natural).

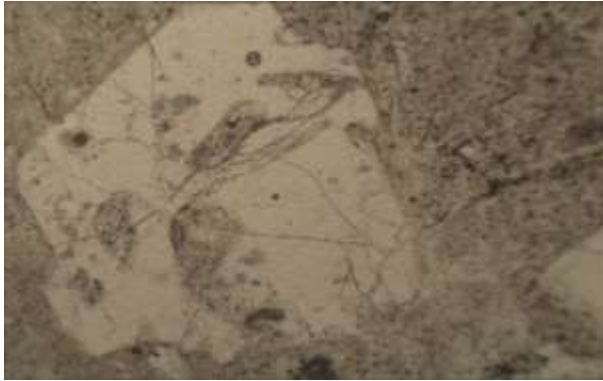


Objetivo 10x (nicos cruzados).



Objetivo 10x (nicos cruzados).

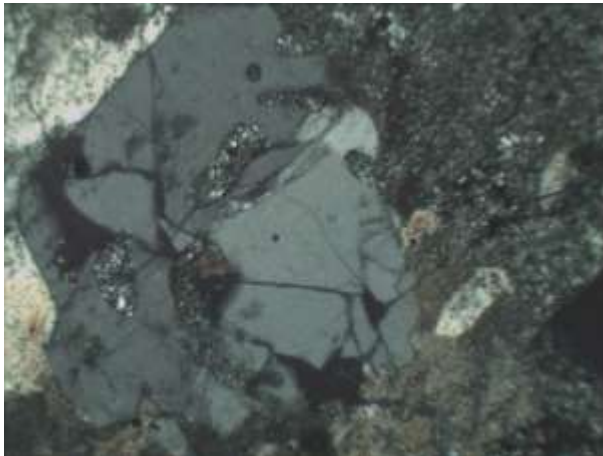
Por otra parte, las fotomicrografías tomadas con el objetivo 4x por exhiben cristales de cuarzo corroídos y con fracturas, así como cristales de feldspatos alterados e incluidos en la matriz vítrea.



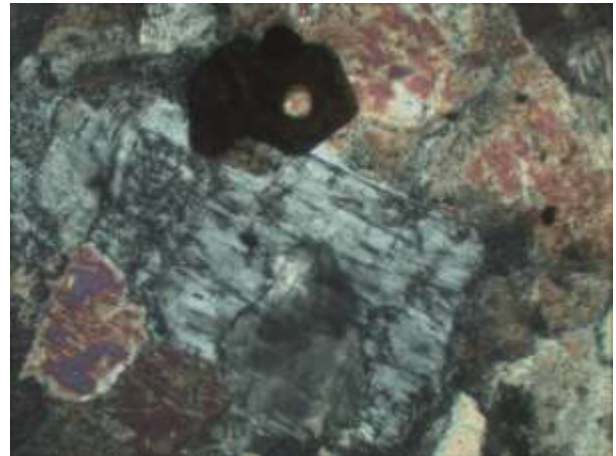
Objetivo 4x (luz natural).



Objetivo 4x (luz natural)



Objetivo 4x (nicos cruzados).



Objetivo 4x (nicos cruzados).

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Piroclástico

V.- CLASIFICACIÓN **Ignimbrita ligeramente alterada**

Fecha: 21 de noviembre de 2014

Petrógrafo: *Ing. Miguel Ildefonso Vera Ocampo*



ESTUDIO PETROGRÁFICO 27

I.- DATOS DE CAMPO

Muestra N°: MP 2

Colectores: M.I. Alberto Sánchez De La Vega B.
Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit

Coordenadas: X= 507 305, Y= 2 438 412. Prof. 15.05 a 15.10 m

Descripción del afloramiento: Roca de color gris claro con textura piroclástica. Se cortó en el barreno PCR-05 C. Clasificación preliminar: Toba lítica

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Color: Gris claro con puntos blancos, rosados y negros

Estructura y textura: Compacta-masiva con poros. Piroclástica

Minerales observables: Feldespatos, fragmentos de roca, minerales opacos

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

a) *Componentes primarios:* Feldespatos, Vidrio, Cuarzo, Fragmentos de roca

Ferromagnesianos alterados, Zircón, Minerales opacos

b) *Minerales secundarios:* Minerales arcillosos, Hematita-limonita, Clorita

c) *Matriz o cementante:* Matriz vítrea alterada (desvitrificada)

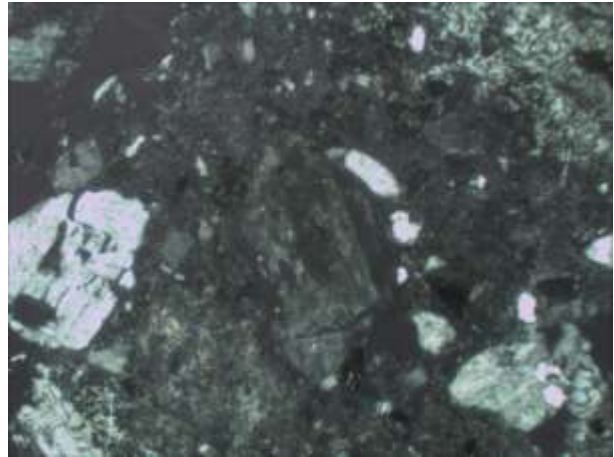
d) *Caracteres especiales:* La roca está compuesta esencialmente por fragmentos de roca de composición variada, algunos muestran texturas volcánicas de composición intermedia con fuerte alteración a hematita-limonita. Otros fragmentos poseen una fuerte alteración que no permite observar claramente la textura de los mismos. Los feldespatos presentes en esta roca pertenecen a la familia de composición intermedia (andesina, oligoclasa), exhiben formas con tendencia tabular con sus contornos que varían de parcialmente desarrollados (subedrales) a mal desarrollados (anedrales). Algunos cristales exhiben alteración a minerales arcillosos. Los cristales de cuarzo presentes en esta roca exhiben formas irregulares con sus contornos mal desarrollados (anedrales) y sus bordes que varían de angulosos a subangulosos, en general exhiben menor tamaño que las plagioclasas. La muestra contiene cristales de ferromagnesianos fuertemente alterados a clorita y hematita-limonita, algunos cristales tienen formas que sugieren una pertenencia a la familia de los anfíboles, sin embargo dado el grado de alteración no es posible observar las propiedades ópticas de los mismos. Existen cristales de minerales opacos de formas irregulares con sus contornos mal desarrollados (anedrales) y sus bordes que varían de angulosos a subredondeados, se encuentran diseminados aleatoriamente en la roca. Se tienen finos cristales de zircón con sus contornos mal desarrollados (anedrales) y se presentan como inclusiones en los feldespatos. Los constituyentes descritos se encuentran incluidos en una matriz vítrea en procesos de desvitrificación y con alteración a minerales arcillosos.

Proyecto: **P.H. Las Cruces, Nayarit.**

Muestra: MP 2. Las fotomicrográficas fueron tomadas con objetivos 4x pol y 10x pol. Las primeras muestran cristales de plagioclasas alteradas a minerales arcillosos, estos cristales se presentan angulosos con formas de tendencia tabular e incluidos en una matriz vítreo en proceso de desvitrificación alterada a minerales arcillosos.

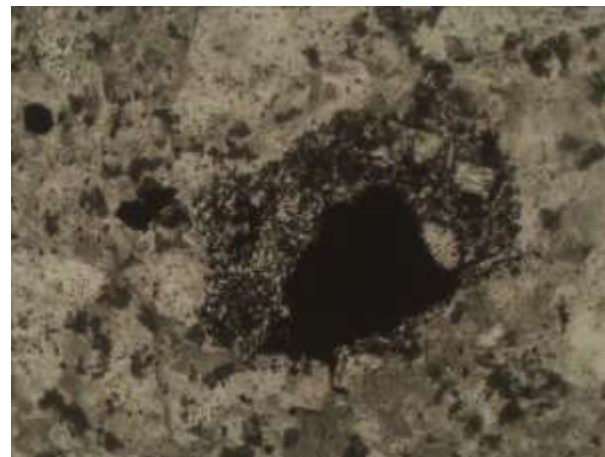


Objetivo 4x (luz natural).

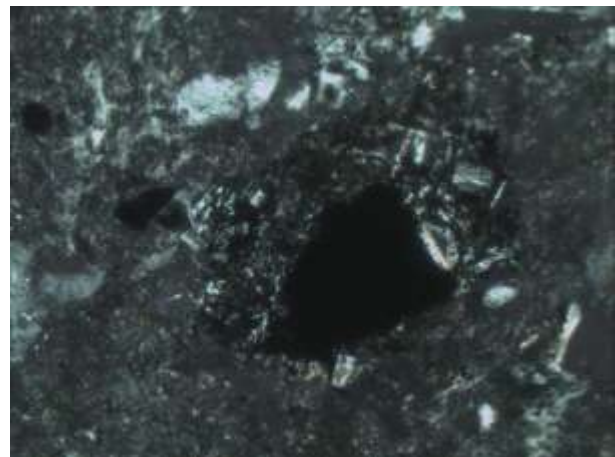


Objetivo 4x (nicos cruzados).

Las fotomicrográficas exhiben fragmentos de roca de formas irregulares con sus contornos angulosos y con alteración a hematita-limonita, así como presenta la inclusión de un mineral opaco, rodeado por la matriz vítreo en procesos de desvitrificación.



Objetivo 10x (luz natural).



Objetivo 10x (nicos cruzados).

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Piroclástico

V.- CLASIFICACIÓN **Toba riolítica**

Fecha: 21 de noviembre de 2014

Petrógrafo: *Ing. Miguel Ildefonso Vera Ocampo*



ESTUDIO PETROGRÁFICO 28

I.- DATOS DE CAMPO

Muestra N°: MP 3

Colectores: M. I. Alberto Sánchez De La Vega B.
Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit

Coordenadas: X= 507 305, Y= 2 438 412. Prof. 23.13 a 23.18 m. Bno. PCR-05C

Descripción del afloramiento: Roca de color gris claro con textura piroclástica. Se cortó en el barreno PCR-05 C. Clasificación preliminar: Toba lítica

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Color: Gris claro con puntos blancos, rosados y negros

Estructura y textura: Compacta-masiva con poros. Piroclástica

Minerales observables: Feldespatos, fragmentos de roca, ferromagnesianos

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura: Piroclástica esferulítica

Mineralogía

a) *Componentes primarios:* Vidrio, Feldespatos, Fragmentos de roca

Cuarzo, Ferromagnesianos alterados, Minerales opacos

b) *Minerales secundarios:* Minerales arcillosos, Calcita, Clorita, Hematita-limonita

c) *Matriz o cementante:* Matriz vítrea desvitrificada y alterada

d) *Caracteres especiales:* Los componentes de esta roca están aglutinados por una matriz vítrea de composición ácida en proceso de desvitrificación y con alteración a minerales arcillosos, y están constituidos por los siguientes materiales.

Feldespatos. Los cristales de este mineral en su mayoría tienen formas irregulares, sin embargo se tienen algunos cristales de formas con tendencia tabular y sus bordes varían de angulosos a subangulosos, están alterados a minerales arcillosos. Esporádicamente se llegan a observar cristales con microfracturas y pequeñas inclusiones de ferromagnesianos, estos feldespatos pertenecen a la familia de las plagioclasas de composición intermedia (andesina, oligoclasa).

Fragmentos de roca. Estos líticos exhiben formas irregulares ocasionalmente equidimensionales con sus contornos que varían de subangulosos a subredondeados, algunos exhiben texturas propias de rocas volcánicas de composición intermedia y con alteración a hematita-limonita.

Cuarzo. Este mineral se observa como pequeños cristales de forma irregular con sus bordes principalmente angulosos, aunque en ocasiones se observan los microcristales con bordes que varían de subangulosos a subredondeados. El tamaño de los cristales de cuarzo es menor al tamaño de las plagioclasas y los fragmentos de roca.

Ferromagnesianos. Los cristales de este componente presentan formas irregulares, algunos con tendencia tabular con sus contornos mal desarrollados (anedrales) y sus bordes que varían de subangulosos a subredondeados. Exhiben alteración a clorita, calcita y hematita-limonita.

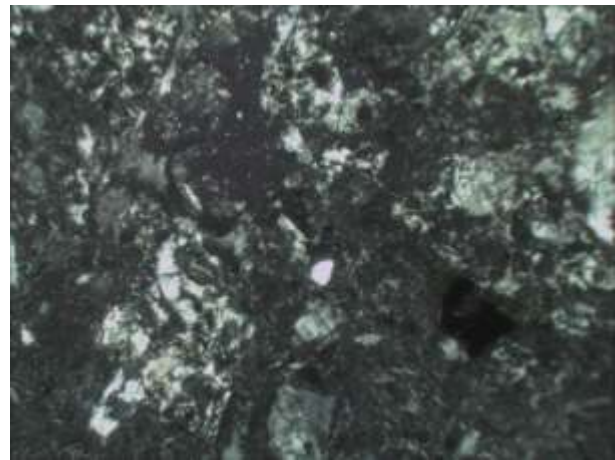
Minerales opacos. Se tienen microcristales de forma irregular y con sus contornos angulosos y subangulosos, distribuidos aleatoriamente en la matriz vítrea.

Proyecto: P.H. Las Cruces, Nayarit.

Muestra: MP 3. Las fotomicrografías fueron tomadas con objetivos 4x pol y 10x pol. Las primeras muestran la relación entre los microcristales y los cristales de plagioclasas, ambos incluidos en una matriz vítrea en proceso de desvitrificación.



Objetivo 4x (luz natural).



Objetivo 4x (nicos cruzados).

Las fotomicrografías tomadas con el objetivo 10x pol exhiben cristales de plagioclasas con microfracturas y alteradas a incipientemente a minerales arcillosos, así como fragmentos de roca con textura microlítica alterados a hematita-limonita.



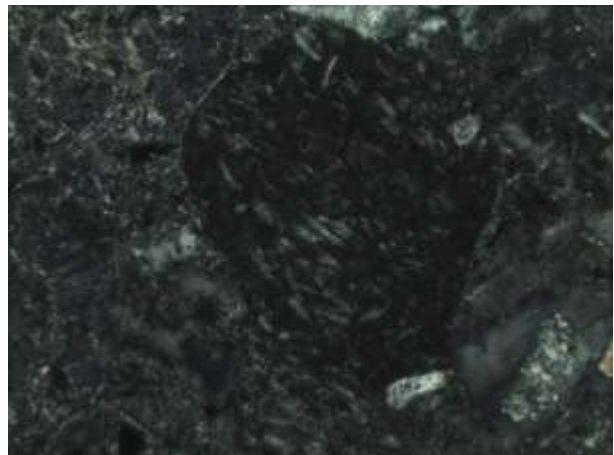
Objetivo 10x (luz natural).



Objetivo 10x (nicos cruzados).



Objetivo 10x (luz natural).



Objetivo 10x (nicos cruzados).

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Piroclástico

V.- CLASIFICACIÓN **Toba riolítica**

Fecha: 21 de noviembre de 2014

Petrógrafo: *Ing. Miguel Ildefonso Vera Ocampo*



ESTUDIO PETROGRÁFICO 29

I.- DATOS DE CAMPO

Muestra N°: MP 5

Colectores: M.I. Alberto Sánchez De La Vega B.
Ing. Gerardo Mendoza e Ing. Aarón Vázquez

Localidad: PH Las Cruces, Nayarit

Coordenadas: X= 507 305; Y= 2 438 412. Prof. 46.50 a 46.58 m. Bno. PCR-05 C

Descripción del afloramiento: Roca de color gris claro con textura piroclástica. Se cortó en el barreno PCR-05 C. Clasificación preliminar: Toba lítica

II.- DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

Color: Gris claro con puntos blancos, negros y rosados

Estructura y textura: Compacta masiva. Piroclástica

Minerales observables: Feldespatos, fragmentos de roca

III.- DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura: Piroclástica

Mineralogía:

a) *Componentes primarios:* Feldespatos, Cuarzo, Fragmentos de roca

Ferromagnesianos alterados, Minerales opacos

b) *Minerales secundarios:* Minerales arcillosos, Calcita, Clorita, Hematita-limonita

c) *Matriz o cementante:* Matriz vítrea alterada (desvitrificada)

d) *Caracteres especiales:* La muestra contiene feldespato potásico como uno de los principales constituyentes, en ocasiones se observa en crecimientos esferulíticos en conjunto con el vidrio, también se observan cristales en formas con tendencia tabular alterados notablemente por minerales arcillosos. Algunos cristales están totalmente reemplazados por calcita.

Otro constituyente frecuente en esta muestra son los fragmentos de roca que exhiben principalmente texturas microlíticas con alteración a hematita-limonita, la procedencia probable de estos constituyentes pueden ser rocas volcánicas de composición intermedia. También se tiene fragmentos de roca con textura vermicular propia de ignimbritas.

Se tiene la presencia de pequeño cristales de cuarzo con formas irregulares y contornos mal desarrollados (anedrales), así como con bordes que varían de subangulosos a subredondeados. El tamaño de estos constituyentes es menor al tamaño de los feldespatos y los fragmentos de roca.

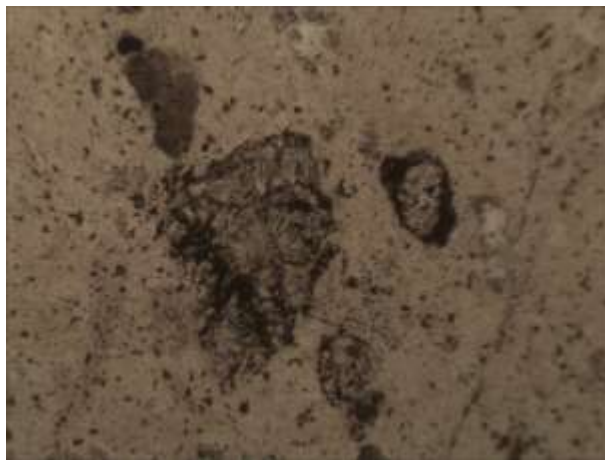
Los ferromagnesianos que se observan en esta roca tienen formas irregulares aunque esporádicamente se observan algunos cristales en formas de tendencia tabular, están fuertemente alterados a clorita y a hematita-limonita.

Se observan finos cristales de minerales opacos de formas irregulares y contornos angulosos diseminados aleatoriamente en la muestra. Los componentes mencionados están aglutinados por

una matriz vítrea de composición ácida en proceso de desvitrificación alterada a minerales arcillosos y ocasionalmente atravesada por finas fracturas rellenas de calcita.

Proyecto: P.H. Las Cruces, Nayarit.

Muestra: MP 5. Las fotomicrográficas fueron tomadas con objetivos 4x pol y 10x pol. Las primeras muestran fragmentos de roca de procedencia volcánica con textura microlítica y alterados a hematita-limonita., así como feldespatos potásicos de textura esferulítica con vidrio y alteración a minerales arcillosos.



Objetivo 4x (luz natural).



Objetivo 4x (nicos cruzados).



Objetivo 4x (luz natural).



Objetivo 4x (nicos cruzados).

Las fotomicrografías con el objetivo 10x pol muestran la relación entre los microcristales de cuarzo y los fragmentos de roca de procedencia volcánica rodeados por la matriz vítrea en proceso de desvitrificación.



Objetivo 10x (luz natural).



Objetivo 10x (nicos cruzados).



Objetivo 10x (luz natural).



Objetivo 10x (nicos cruzados).

IV.- ORIGEN DE LA ROCA Piroclástico

V.- CLASIFICACIÓN **Toba riolítica**

Fecha: 21 noviembre de 2014

Petrógrafo: *Ing. Miguel Ildefonso Vera Ocampo*