

UNIVERSIDAD DE SONORA
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología.

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE
MACIZOS ROCOSOS EN LA ZONA
CARBONÍFERA DE SAN JAVIER, SONORA
CENTRO-ESTE, MÉXICO.**

TESIS

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE GEÓLOGO.**



PRESENTA:

CALEB HUMBERTO RUIZ ARCE
SIMEI ANDRÉS SAUCEDO GARCÍA

Hermosillo, Sonora a 5 de Agosto de 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a mi madre Beatriz Arce, por su apoyo incondicional y respaldo en todo momento, gracias por tu confianza y enseñarme a no rendirme.

A mi padre Humberto Ruiz por su apoyo y buenos consejos, mi admiracion y gratitud por enseñarme a salir adelante.

Con cariño, su hijo Caleb.

Dedicada a mis padres, Miguel Saucedo y Laura Queruel. Muchas gracias por todo.

Los quiere mucho su niño, Simei.

*"Dulces son los frutos de la adversidad, los cuales como un sapo feo y venenoso,
portan una preciada joya sobre su cabeza"*

William Shakespeare.

AGRADECIMIENTOS

EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS SE LO AGRADECEMOS A LA UNIVERSIDAD DE SONORA POR HABERNOS DADO LA OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR Y FORMARNOS EN ELLA.

A NUESTRO DIRECTOR DE TESIS, **DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA** POR SU APOYO, ESFUERZO Y DEDICACIÓN, SUS CONOCIMIENTOS Y SU PACIENCIA NOS AYUDO A CULMINAR ESTE TRABAJO DE TESIS.

A NUESTRO APRECIADO Y QUERIDO ASESOR **DR. ROGELIO MONREAL SAAVEDRA**, QUE GRACIAS A SU REVISIÓN, SUGERENCIAS Y COMENTARIOS DE ESTE TRABAJO, PUDIMOS REALIZARLO.

Y A NUESTRO MUY ESTIMADO PROFESOR **DR. INOCENTE GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO**, POR LA REVISIÓN Y SUGERENCIAS DE ESTA TESIS, ASI COMO TAMBIÉN SU APOYO EN EL TRABAJO DE CAMPO.

AL ESTIMADO **DR. KINARDO FLORES** POR SU APOYO EN EL TRABAJO DE CAMPO.

AL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA POR EL APOYO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO DE TESIS.

Y A TODAS LAS PERSONAS QUE PARTICIPARON EN ESTE PROCESO YA SEA DE MANERA DIRECTA O INDIRECTA PARA LA REALIZACION DE ESTA TESIS.

RESUMEN

Las rocas del Mesozoico en la zona central del estado de Sonora están representadas en parte por rocas sedimentarias del Triásico superior constituidas por areniscas, lutitas, conglomerados polimícticos, limolitas, areniscas, lutitas carbonosas y pedernal, que en conjunto representan al Grupo Barranca, integrando de la base a la cima por las Formaciones Arrayanes, Santa Clara y Coyotes.

La Formación Arrayanes está constituida por arenisca de cuarzo y conglomerado polimíctico en contacto transicional con arenisca y lutita carbonosa de la Formación Santa Clara. Sobreyaciendo discordantemente a ésta última unidad se tiene la unidad de conglomerado polimíctico y arenisca de la Formación Coyotes.

El presente trabajo se realizó sobre la Formación Santa Clara, constituida por la alternancia de arenisca y lutita, incluyendo lutitas carbonosas que contienen capas de carbón y es en esta formación donde se encuentran las obras mineras de extracción de carbón antracítico.

Actualmente esta actividad se desarrolla por pequeños mineros, que con maquinaria y equipo limitado logran extraerlo de obras directas principalmente sub-superficiales, las cuales se ubican en las localidades de San Javier, Suaqui Grande y San Antonio de la Huerta.

El problema de las condiciones de seguridad, principalmente de estabilidad dentro de estas minas, no son las más adecuadas, aunque no han ocurrido accidentes de magnitudes que lamentar; además, las normas actuales establecen que se debe contar con estudios técnicos que avalen, en la medida de lo posible, la seguridad en estas obras mineras. En este contexto, el presente estudio permitirá contar con información suficiente para que los pequeños mineros identifiquen las zonas de mayor problemática estructural, y poder iniciar con trabajos a detalle en cada obra minera.

Para ello se realizó la caracterización geotécnica de macizos rocosos en zonas aledañas a obras mineras, con el fin de aportar información base para futuros trabajos ingenieriles en la zona, llevando a cabo el análisis estructural de discontinuidades (fracturas, fallas, planos de estratificación, foliación, etc.) para cada una de las zonas y obtener información

geológico-estructural para cada una de las zonas carboníferas que sirvan como base para estudios geotécnicos de estabilidad de taludes y/o mecánica de rocas más particulares.

El análisis de los diferentes estereogramas de la red de Schmidt permitió establecer 3 diferentes familias que representan al conjunto de discontinuidades mayores que afectan los macizos rocosos estudiados en los sitios dentro de la zona carbonífera de San Javier. Se mencionan las características de las intersecciones de discontinuidades, dado que es un punto muy importante al momento determinar su estabilidad cuando se desarrollan obras civiles en macizos rocosos. Por otro lado, también se incluye la clasificación JGS para los macizos rocosos estudiados que se obtuvo a partir de analizar sus características geotécnicas.

La justificación del uso de la clasificación de los macizos de rocosos esta en base de sus características fundamentales con las cuales se determina específicamente el ambiente del macizo rocoso. La aplicación de los resultados de la clasificación JGS puede ser usada para entender el estado actual del macizo rocoso, compartir información acerca del macizo rocoso a diferentes campos de la ingeniería, estimar las propiedades geotécnicas en investigaciones preliminares para determinar el diseño de parámetros y para determinar análisis de modelos.

Si bien es cierto que la mayoría de las discontinuidades están dominadas por diaclasas y los planos de estratificación en las unidades litológicas de la Formación Santa Clara, también se encuentran fallas normales con desplazamientos menores a los 80 cm afectando los macizos rocosos. Dichas estructuras se contemplaron como parte de las discontinuidades totales en cada uno de los sitios estudiados.

INDICE

Contenido	Página
Dedicatoria	
Resumen	<i>i, ii</i>
I. Introducción	1
I.I. Justificación	5
I.II. Area de estudio	6
I.III. Objetivo	6
I.IV. Metas	7
I.V. Metodología	7
I.VI. Trabajo de gabinete previo	7
I.VII. Trabajo de campo	7
I.VIII. Discontinuidades	9
I.IX. Espaciamiento entre fracturas	11
I.X. Apertura de fracturas	11
I.XI. Rugosidad	12
I.XII. Trabajo de gabinete final	13
I.XIII. Trabajos previos	17
II. Marco geológico regional	19
III. Estratigrafía de la zona San Javier	25
III.I. Unidad Sedimentaria Paleozoica (pzus)	26
III.II. Formación Arrayanes (trsa)	27
III.III. Formación Santa Clara (trssc)	28

III.IV. Formación Coyotes (trsc)	29
III.V. Formación Tarahumara (kst)	30
III.VI. Complejo Intrusivo Inferior (kstpagr-gd)	32
III. VII. Complejo Intrusivo Superior (topqmz)	33
III.VIII. Formación Báucarit (tmbt)	34
III.IX. Unidad Volcánica Superior (tmuv)	35
III.X. Unidad Sedimentaria Neógena (qpus)	36
III.XI. Aluvión (qal)	36
IV. Estructuras regionales	37
V. Análisis geológico-estructural en los sitios	38
V.I. Sitio la Pizarrina	38
V.II. Sitio el Refugio	43
V.III. Sitio San Agustín	47
V.IV. Sitio el Refugio II	53
V.V. Sitio Margarito Gracia	58
V.VI. Sitio mina Sentimiento I	63
V. VII. Sitio el Tonelada	68
VI. Resultados	73
VII. Conclusiones	80
VIII. Bibliografía	83
Anexo 1	87
Anexo 2	102

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Localización general del área carbonífera estudiada.....	6
Figura 2. Vista panorámica de la distribución de obras mineras de extracción de carbón (flechas) seleccionadas en el área San Javier. Vista hacia el SE.....	8
Figura 3. En este afloramiento del sitio Mina Sentimiento 1, se identifican dos tipos de familias principales de fracturas.....	10
Figura 4. Medición de rumbo y echado en fracturas del sitio mina Margarito Gracia.....	10
Figura 5. Medición del espaciamiento entre fracturas pertenecientes al mismo tipo de familia. En el sitio mina La Pizarrina.....	11
Figura 6. Se muestra la apertura que presenta esta fractura en el sitio mina La Pizarrina.....	12
Figura 7. Izquierda: superficie escalonada rugosa. Derecha: superficie ondulada suave.....	13
Figura 8. Interfaz del programa Stereonet v. 9, utilizado para mostrar los diagramas en este trabajo.....	15
Figura 9. Geología y columna estratigráfica generalizada del área San Javier. Modificada de Servicio Geológico Mexicano (2004a).....	26
Figura 10. Afloramiento de la Formación Santa Clara en la localidad del rancho La Barranca. Vista hacia el Este.....	29
Figura 11. Afloramiento del conglomerado de la Formación Coyotes en las inmediaciones del sitio Mina Margarito Gracia.....	31
Figura 12. Afloramiento del aglomerado andesítico que forma parte de la Formación Tarahumara en las inmediaciones del rancho La Barranca.....	32
Figura 13. Afloramiento de un apófisis diorítico que afecta a las rocas de la Formación Santa Clara en las inmediaciones del sitio Mina Margarito Gracia.....	33
Figura 14. Localización de sitios de levantamiento estructural en el área San Javier.....	38
Figura 15. Fotografía del afloramiento del Segmento 2 del sitio La Pizarrina mostrando la litología dominante. A) Detalle en el sitio mostrando las diferentes discontinuidades identificadas.....	39
Figura 16. A) Diagrama de Red de Schmidt que muestra en general la actitud estructural de los planos de las diferentes discontinuidades medidas en el sitio La Pizarrina. B) Diagrama de roseta que muestra la orientación preferencial de los planos medidos en el sitio La Pizarrina.....	40
Figura 17. Diagrama de Red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades identificadas en el sitio La Pizarrina. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.....	41
Figura 18. A) Diagrama de Red de Schmidt que muestra los polos de las 3 familias de discontinuidades y el polo principal para cada una. B) polos y planos de las familias resultantes en el sitio La Pizarrina. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	43

Figura 19. Segmento 3 del sitio El Refugio se muestra la litología dominada por areniscas y las diferentes familias de discontinuidades en este sitio (A).....	44
Figura 20. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio El Refugio. B) Diagrama de roseta en la que se aprecian las orientaciones de los planos medidos en el sitio El Refugio.....	45
Figura 21. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades que conforman el sitio El Refugio. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.....	46
Figura 22. A) Diagrama de red de Schmidt que muestra los polos de las 3 familias de discontinuidades y el polo principal para cada una. B) polos y planos de las familias resultantes en el sitio El Refugio. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	47
Figura 23. Se muestra la litología dominante en el sitio San Agustín, que corresponde a una capa de lutitas en la base y estratos gruesos de arenisca en la cima.....	49
Figura 24. Detalle del deslizamiento de rocas en el sitio San Agustín donde se puede apreciar los bloques de rocas deslizados interrumpiendo el camino.....	49
Figura 25. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio San Agustín. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las 62 orientaciones de los planos medidos en el sitio en la que se aprecian las orientaciones de los planos medidos en el sitio San Agustín.....	50
Figura 26. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades que conforman el sitio San Agustín. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.....	51
Figura 27. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	52
Figura 28. Sitio El Refugio II muestra una litología de arenisca. Se aprecia una discontinuidad importante en el margen centro izquierdo de la imagen.....	54
Figura 29. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio El Refugio II. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en el sitio El Refugio II...	55
Figura 30. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades que conforman el sitio El Refugio II. Línea punteada representan los planos de estratificación.....	56
Figura 31. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	57
Figura 32. Afloramiento dominado por 2 capas de arenisca y un estrato de lutita en el sitio Margarito Gracia, y las diferentes familias de discontinuidades en este sitio (A).....	59
Figura 33. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio Margarito Gracia. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en este sitio.....	60
Figura 34. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 14 datos estructurales de las familias de discontinuidades en el sitio Margarito Gracia. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.....	61

Figura 35. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de discontinuidades principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	62
Figura 36. Afloramiento del segmento 1 en el sitio Mina Sentimiento I donde se muestra una capa gruesa de lutitas carbonosas en la base y de areniscas en la parte superior, así como también una obra minera abandonada (esquina inferior izquierda de la fotografía). En (A) se muestran las diferentes familias de discontinuidades identificadas en este sitio.....	64
Figura 37. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio Mina Sentimiento I. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en este sitio..	65
Figura 38. Diagrama de red de Schmidt que muestra las direcciones de las familias de diaclasas en el sitio Mina Sentimiento I. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.....	66
Figura 39. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de discontinuidades principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	67
Figura 40. A) De manera general se observan dos familias de diaclasas (F1, F2), los planos de estratificación (P) que se indica por la línea punteada indica el contacto entre la arenisca y la lutita.....	69
Figura 41. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio El Tonelada. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en este sitio.....	70
Figura 42. Diagrama de red de Schmidt que muestra las direcciones de las familias de diaclasas en el sitio El Tonelada. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.....	71
Figura 43. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de discontinuidades principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.....	72
Figura 44. Nomenclatura JGS para los sitios muestreados.....	78
Figura 45. Diagramas estereográficos de los macizos rocosos estudiados en la zona de San Javier.....	81

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Clasificación cualitativa de rugosidad JGS (2004).....	13
Tabla 2. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio El Tonelada.....	73
Tabla 3. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio El Refugio.....	74
Tabla 4. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio La Pizarrina.....	74
Tabla 5. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio San Agustín.....	75
Tabla 6. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio Sentimiento I.....	75
Tabla 7. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio Margarito Gracia.....	76
Tabla 8. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio El Refugio II.....	76
Tabla 9. Nomenclatura JGS para los sitios muestreados.....	77
Tabla 10. Comportamiento de las direcciones de las familias de diaclasas en los sitios.....	82

I. INTRODUCCIÓN

El término de Ingeniería Geológica o Geotecnia puede ser definido como la aplicación de la geología a la práctica ingenieril (Bell, 2007); se refiere a la identificación de aquellos factores geológicos que tienen una influencia directa en la localización, diseño, construcción y mantenimiento de obras civiles. Dado que una amplia variedad de obras civiles se llevan a cabo sobre un macizo rocoso, es también importante saber que éste se considera un complejo natural “in situ” de determinada composición litológica, el cual presenta una estructura definida y un cierto grado de conservación (Abril, 2013).

En este contexto, una parte importante en la caracterización geotécnica de un macizo rocoso es determinar el tipo de roca que lo compone, ya que de entrada, los diferentes tipos significan una determinada resistencia, donde de manera general se puede decir que las rocas graníticas son más resistentes que las rocas sedimentarias. En lo que respecta a su estructura, es importante definir aquella primaria, indicando si es masiva, estratificada, o esquistosa, ya que en los dos últimos casos, representan elementos de debilidad que afectan su resistencia; además, se debe de identificar alguna modificación de su estructura original (secundaria o deformación), determinada ésta por la presencia de fracturas y/o pliegues. Finalmente, el grado de conservación de la roca tiene que ver con el grado de intemperismo que la afecte, ya que el hecho de que aunque éste afecte a algunos minerales débiles del macizo rocoso, puede generar un debilitamiento en general del conjunto (Abril, 2013).

Para cualquier tipo de intervención ingenieril (túneles, edificaciones, carreteras, etc.) sobre un macizo rocoso, es necesario de algún modo llevar a niveles cuantitativos las condiciones

naturales que geológicamente se pueden observar en éstos, lo que ayudará a que el ingeniero civil pueda relacionar ciertas magnitudes y operaciones, con la finalidad de llegar a calcular y dimensionar las partes de las obras civiles. Es por ello que debe procurarse una tipificación numérica, y por lo tanto objetiva de los macizos rocosos (Abril, 2013).

No cabe duda que dentro de lo que es la estructura de un macizo rocoso, uno de los principales elementos que influyen en su resistencia es la presencia de planos de debilidad en las rocas, que pueden ser primarios o secundarios, ya que las hace discontinuas estructuralmente, y a los cuales de manera general se les conoce como discontinuidades. Es por esto que realmente, el macizo rocoso está definido tanto por las características de la roca como por un ensamble de bloques de material rocoso separado por varios tipos de discontinuidades, tales como fallas, pliegues, fisuras, diaclasas, juntas, planos de estratificación y otras características estructurales que pueden tener una influencia en su respuesta ingenieril. Esto último nos ayuda a establecer que para caracterizar un macizo rocoso, es necesario identificar las propiedades de la roca intacta entre las discontinuidades, así como las propiedades mismas de éstas últimas.

La roca intacta debe ser considerada como un sólido continuo y policristalino que consiste de un agregado de minerales o granos; mientras que desde la perspectiva de un macizo rocoso, éste es un material litológico discontinuo que es afectado por discontinuidades. Por un lado, en la descripción de la primera deben definirse parámetros como el nombre de la roca, la composición mineral, el color, la textura, el grado de intemperismo y otras características cualitativas que puedan influenciar su resistencia; y por el otro, en el

segundo es importante determinar el tipo, el espaciamiento, la orientación y otras características de las discontinuidades presentes (Bell, 2007).

Existen varios esquemas de clasificación geotécnica de macizos rocosos, entre los más importantes están los propuestos por Terzaghi (1946), Deere (1967), Bieniawski (1976 y 1989), y el desarrollado por el Instituto Geotécnico Noruego a partir de estudios en casos históricos de Barton *et al.* (1974). La descripción geotécnica en el presente trabajo se basó principalmente en el sistema de clasificación JGS presentado por Osada *et al.* (2005), el cual de manera sencilla identifica al macizo rocoso en base a sus características ingenieriles fundamentales.

Las proyecciones estereográficas son una herramienta muy eficiente para la representación gráfica de estructuras planas y tridimensionales, representando la orientación e inclinación de los planos. Son de gran ayuda porque nos permiten reconocer el comportamiento que presentan las estructuras en un afloramiento.

Algunos tipos de estructuras planares son la estratificación que es visible en la gran mayoría de las rocas sedimentarias el cual es un rasgo de estructura primaria en la que se representa el momento de deposición y disposición de las capas, este rasgo también se ve representado en rocas de carácter ígneo conociéndose como estratificación ígnea primaria.

Las diaclasas son estructuras planares que vienen representando fracturas en las rocas tales estructuras no han presentado ningún tipo de desplazamiento en el macizo rocoso, por el contrario las fallas son planos que si han tenido un desplazamiento a lo largo del macizo rocoso en la cual un lado de la roca es desplazada con respecto al otro.

Para graficar la orientación de las estructuras planares es necesario medir la dirección y buzamiento de éstas. El rumbo es la intersección entre el plano medido y el plano horizontal, esta línea horizontal se encuentra por medio de un nivel (clinómetro) que sirve para medir ángulos y el rumbo se mide con la brújula. El echado es el ángulo o pendiente que tiene el plano que se está midiendo, el ángulo varía de 0 que es un plano horizontal hasta 90 que representa un plano vertical, este dato se obtiene a partir del clinómetro de la brújula. La dirección del buzamiento es la dirección del ángulo o pendiente del plano medido y se representa por los puntos de la brújula (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

Existen dos tipos de proyecciones estereográficas la falsilla de Wulff y falsilla de Schmidt. La primera mantiene las relaciones angulares, es empleada generalmente en la solución de problemas estructurales, es decir, donde es importante las relaciones angulares. La red de Schmidt es la proyección de igual área, una unidad de área en toda la proyección representa la misma fracción del área total del hemisferio de referencia. Esta característica de proyectar con un área igual es ventajosa en una investigación estadística. Una desventaja de esta proyección es su distorsión, la cual es mayor hacia el círculo de referencia

La proyección estereográfica de Schmidt conocida como equiareal, no distorsiona las áreas, es práctica para analizar gráficos estadísticos en base a las concentraciones de los polos de los planos graficados así como en geología estructural para el análisis estadístico de datos espaciales

I.I. JUSTIFICACIÓN

La explotación del Carbón en Sonora inició a principios de los años 40's y se ha mantenido, a diversas escalas hasta nuestros días. Actualmente esta actividad se desarrolla por pequeños mineros, que con maquinaria y equipo limitado logran extraerlo de obras directas principalmente sub-superficiales, las cuales se ubican en las localidades de San Javier, Suaqui Grande y San Antonio de la Huerta, en la porción centro-oriental del estado.

Si bien es cierto que las minas de carbón en Sonora eventualmente no presentan el problema de la emisión de gas metano por ser un carbón antracítico limpio de dichas emisiones, el problema de las condiciones de seguridad, principalmente de estabilidad dentro de estas minas no son las más adecuadas, presentándose ya algunos accidentes aislados de magnitudes que lamentar. Además, las normas actuales establecen que se debe de contar con estudios técnicos que avalen, en la medida de lo posible, la seguridad en estas obras mineras.

En este contexto, el presente trabajo busca ofrecer información suficiente para que los pequeños mineros identifiquen las condiciones geotécnicas de los macizos rocosos en zonas aledañas a varias obras mineras, de tal forma que se tengan elementos para poder iniciar con trabajos a detalle de mecánica de rocas y de estabilidad de obras en los sitios.

I.II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza a unos 4 km al SW del poblado de San Javier en el centro-este del estado de Sonora, donde se ubican la mayoría de las obras mineras de donde se extrae carbón mineral en la región (Figura 1). Parra llegar a ésta, se toma la carretera federal No.4 desde la ciudad de Hermosillo, y al llegar al entronque en el km 145, se toma la desviación hacia el norte que lleva al poblado de San Javier.



Figura 1. Localización general del área carbonífera estudiada.

I.III. OBJETIVO

Realizar la caracterización geotécnica de macizos rocosos en zonas aledañas a obras mineras, con el fin de aportar información base para futuros trabajos ingenieriles en la zona.

I.IV. METAS

Para el logro del objetivo propuesto se tuvieron las siguientes metas:

- 1) Definir el entorno geológico-estructurales de la región.
- 2) Identificar sitios cercanos a las obras mineras donde se pudiera realizar el levantamiento de información estructural.
- 3) Llevar a cabo el levantamiento estructural de discontinuidades y sus principales elementos geotécnicos en campo, al menos en 5 de los sitios identificados.
- 4) Analizar la información estructural utilizando proyecciones estereográficas en el software Stereonet.
- 5) Caracterizar geotécnicamente los macizos rocosos estudiados, utilizando en lo posible el esquema de clasificación JGS.

I.V. METODOLOGÍA

El presente trabajo se realizó en tres fases:

- 1) I.VI. Trabajo de gabinete previo: Durante esta fase se llevó a cabo la recopilación de información geológica del área estudiada, así como también de aquella necesaria para complementar y fortalecer la metodología que se emplea en trabajos geotécnicos en general.
- 2) I.VII. Trabajo de campo. En una primera etapa de este trabajo de campo se identificaron los sitios para el levantamiento de datos estructurales en el área de San Javier, los cuales fueron: Mina La Pizarrina, Mina Sentimiento 1, Mina Margarito

Gracia, Mina Refugio, Mina El Refugio II, Mina El Tonelada, Mina San Agustín
(Figura 2).

En cada uno de estos sitios se registró la siguiente información:

- Localización (GPS) y descripción litológica.
- Caracterización de orientación, longitud y altura del afloramiento.
- Obtención de datos estructurales de las discontinuidades (rumbo, echado, dirección del echado, espaciamiento, apertura, rugosidad y persistencia).



Figura 2. Vista panorámica de la distribución de obras mineras de extracción de carbón (flechas) seleccionadas en el área San Javier. Vista hacia el SE.

Se realizaron levantamientos de secciones estructurales a detalle en los diferentes sitios, identificando las principales características de las familias de discontinuidades que afectan a los macizos rocosos de la secuencia sedimentaria de la Formación Santa Clara del Grupo Barranca, donde se encuentran los yacimientos de carbón y obras mineras.

Se eligieron afloramientos estratégicos en las zonas de las obras mineras de carbón de San Javier, iniciando con la identificación de las diferentes familias de fracturas y tipos de discontinuidades. En cada uno de los sitios, se llevó a cabo la medición de sus rumbos y echados, así como también algunas características que aportaran información geotécnica que sirviera de base para futuros trabajos de mecánica de rocas, tales como el espaciamiento entre discontinuidades y su apertura, su rugosidad y extensión de éstas en el afloramiento.

I.VIII. Discontinuidades

Con base en la disposición estructural de las diferentes discontinuidades que afectan al macizo rocoso en cada uno de los sitios, se determinaron cualitativamente las familias preponderantes (Figura 3) a las cuales se les tomaron sus datos estructurales de rumbo y echado, utilizando una brújula Brunton (Figura 4). En general, estas discontinuidades fueron identificadas principalmente como fracturas y planos de estratificación. Eventualmente en algunos sitios fue posible identificar fallas normales



Figura 3. En este afloramiento del sitio Mina Sentimiento 1, se identifican dos tipos de familias principales de fracturas.



Figura 4. Medición de rumbo y echado en fracturas del sitio mina Margarito Gracia.

I.IX. Espaciamiento entre fracturas

Uno de los elementos geotécnicos que se incluyó en estos levantamientos es el espaciamiento o la distancia entre una fractura y la siguiente de la misma familia, para lo cual se utilizó una cinta métrica de campo (Figura 5).



Figura 5. Medición del espaciamiento entre fracturas pertenecientes al mismo tipo de familia. En el sitio mina La Pizarrina.

I.X. Apertura de fracturas

El espacio presente, si existe, entre las caras de las discontinuidades se le conoce con el término de apertura (Figura 6). Para cada una de las discontinuidades medidas en los sitios, se tomó también este dato con la ayuda de una cinta métrica.



Figura 6. Se muestra la apertura que presenta esta fractura en el sitio mina La Pizarrina.

I.XI. Rugosidad

El parámetro de rugosidad representa el grado de irregularidad superficial de una discontinuidad, identificado éste a lo largo de la pared principal, y en general determina la aspereza de dicha superficie (Figura 7). Entre más irregular sea la superficie de la discontinuidad, ésta tendrá una mayor resistencia al movimiento. En este trabajo se utilizó la tabla de clasificación cualitativa de rugosidad JGS (2004) (Tabla 1) que nos permitió identificar este parámetro a una gran y pequeña escala.



Figura 7. Izquierda: superficie escalonada rugosa. Derecha: superficie ondulada suave.

Tabla 1. Clasificación cualitativa de rugosidad JGS (2004).

Pequeña escala (10 cm) Gran escala (1-2 m)	Rugosa: r	Ligeramente rugosa: m	Suave: s
Escalonada: s	Γ_{sr}	Γ_{sm}	Γ_{ss}
Ondulada: w	Γ_{wr}	Γ_{wm}	Γ_{ws}
Plana: p	Γ_{pr}	Γ_{pm}	Γ_{ps}

3) I.XII. Trabajo de gabinete final

Para este estudio se empleó el tipo de proyección equiareal o red de Schmidt. Hay que recordar que en las proyecciones estereográficas las estructuras planas se grafican como

líneas circulares las cuales también se pueden graficar como polos, y se representan como puntos en la proyección estereográfica.

Los datos estructurales fueron graficados digitalmente utilizando el software Stereonet v. 9, esta versión es compatible con todos los sistemas operativos modernos y tiene una interfaz moderna, emplea como método de ingreso los datos de dirección y buzamiento (Figura 8).

En esta etapa se procesaron y analizaron los datos obtenidos en campo (Anexo 1), para lo cual se utilizaron los programas Excel y Stereonet. El primero se utilizó para conformar las bases de datos de cada sitio y en el segundo se analizaron los datos de dirección y buzamiento de las discontinuidades levantadas en campo, con el fin de agruparlas en familias y obtener algunos indicadores importantes, y se llevó a cabo lo siguiente:

- Diagramas de Schmidt con círculos mayores para visualizar en primera instancia las diferentes familias de discontinuidades.
- Diagrama de roseta para identificar la dirección preferencial de las diferentes familias de discontinuidades.
- Diagramas de Schmidt con los polos para tener una mejor visión de las proyecciones dentro del estereograma, así como el rumbo que tienen las estructuras. Utilizando el software se calculó el vector principal que representa a cada familia, y con éste se identificó el plano principal que define a cada una de las familias. Tanto la proyección de los polos y el diagrama de roseta se hizo con una proyección de igual área, con un mayado de intervalos de 10° .
- Diagramas de Schmidt con los planos principales de las familias para identificar la actitud de las intersecciones entre éstas.

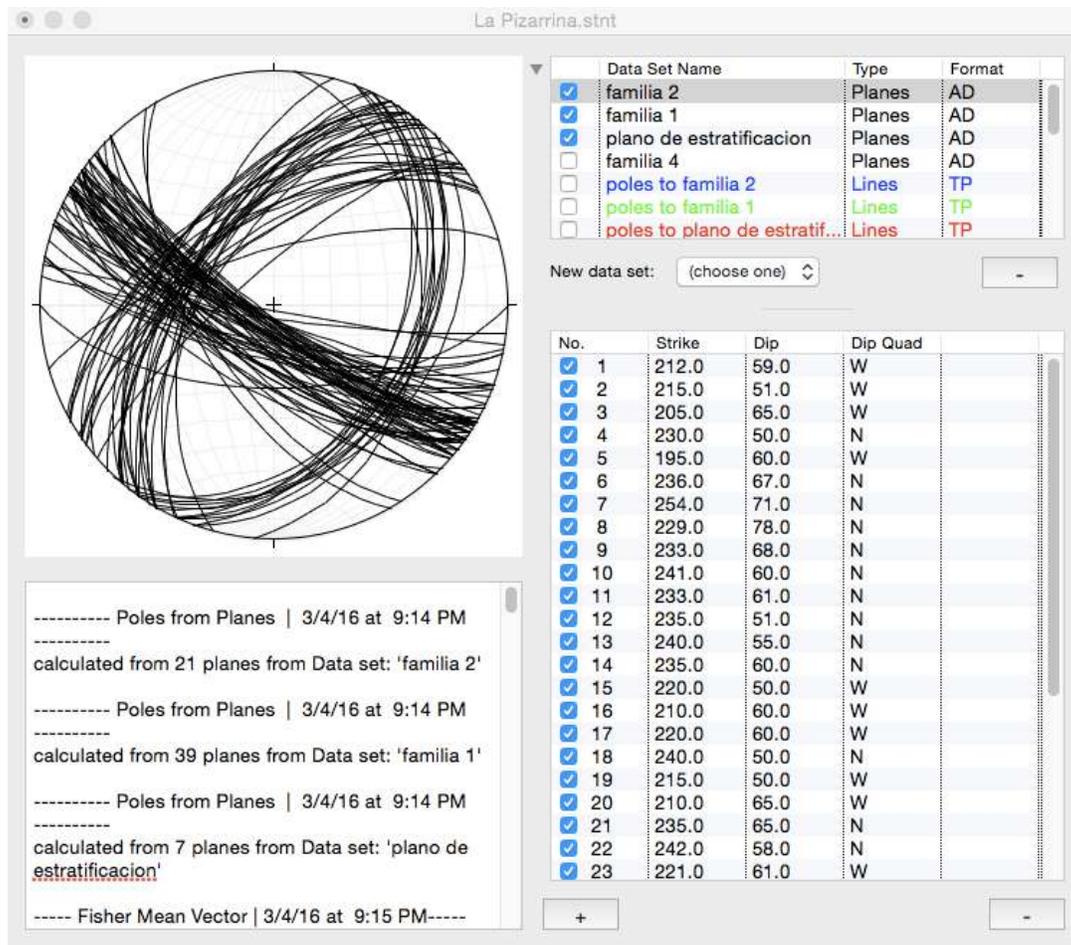


Figura 8. Interfaz del programa Stereonet v. 9, utilizado para mostrar los diagramas en este trabajo.

Así mismo, en esta etapa se caracterizaron los diferentes macizos rocosos bajo el esquema de clasificación JGS (Osada *et al.*, 2005), bajo los siguientes pasos (Anexo 2):

- 1) Identificar inicialmente si el macizo rocoso se comporta como un elemento compacto (H) o suelto (S).
- 2) Caracterizar el macizo rocoso con base en su estructura, para el caso de macizos compactos, o en el tamaño de grano para los macizos sueltos. En el primero de los casos, los macizos pueden ser masivos (M) o foliados (F); mientras que para los

sueltos, son clasificados como masivos (M), gruesos (R) si hay fragmentos y matriz, y en interestratificados (B) si los constituyentes están en capas delgadas.

- 3) Clasificar el macizo rocoso considerando los índices de clases que se obtienen a partir de una combinación de parámetros geotécnicos que gobiernan sus propiedades ingenieriles (Anexo I). En este trabajo se utilizaron los promedios de dichos parámetros en cada uno de los sitios seleccionados.

Con respecto al último punto referente a la clasificación del macizo rocoso, se llevó a cabo siguiendo 3 pasos recomendados: 1) el primer paso es identificar si el afloramiento está constituido por roca dura (H), o corresponde a sedimentos blandos (S); 2) este paso se basa en la estructura de la roca o el tamaño de grano, por lo que una masa rocosa dura puede clasificarse en masiva (M) y foliada (F) dependiendo de la estructura de la roca; mientras que los sedimentos suaves se clasifican como masivos (M) si el material que la constituye es homogéneo, gravosos (R) si el material está constituido de fragmentos y matriz, y en interestratificados (B) si ésta se da en capas delgadas; y 3) este paso es fundamental e indispensable, ya que es donde el macizo rocosos es clasificado considerando los índices de clases, desde la combinación de los parámetros de clasificación gobernando las propiedades ingenieriles.

Por último se analizaron los resultados obtenidos y se dispuso a elaborar el manuscrito final.

I.XIII. TRABAJOS PREVIOS

Desde finales del siglo XIX la extracción de carbón y grafito ha sido una actividad económica importante para diversos poblados asentados en la porción centro-este del estado de Sonora, y por este motivo, la mayoría de los estudios geológicos previos en esta región han estado enfocados al estudio de las secuencias estratigráficas triásicas que contienen los mantos de estos materiales.

El primer reporte de estas rocas con mantos de carbón fue hecho por Rémond de Corbineau en 1866 (en Burckhardt, 1930), en el cual se menciona la abundancia de plantas fósiles que contienen. El primero en agrupar a estas rocas desde el punto de vista estratigráfico fue Dumble (1900), quien designó con el nombre de “División Barranca” a una secuencia de areniscas y lutitas con estratos de carbón y grafito que afloran en las inmediaciones del rancho La Barranca, localizada al sureste del poblado de San Javier, dividiéndola en 4 miembros. Posteriormente, King (1939) definió a esta secuencia sedimentaria como una unidad litoestratigráfica, denominándola Formación Barranca; identificando otras localidades de afloramiento en la región como Sierra de Cobachi, Sierra de Tecoripa, Sierra de las Moradillas, y otras más.

Wilson y Rocha (1949) reportan también a esta formación y la dividen en 3 partes, donde la inferior y la superior son secuencias detríticas gruesas, mientras que la porción media la caracterizaron como una alternancia de areniscas y lutitas que incluía lutitas carbonosas y mantos de carbón. Fue Alencáster (1961) quien con base en estudios geológico-paleontológicos en la Sierra de San Javier elevó el rango de esta unidad, denominándola

Grupo Barranca, nomenclatura que hasta la actualidad se sigue utilizando en la bibliografía geológica de Sonora; este mismo autor designa una edad del Triásico Tardío al Jurásico Temprano para esta unidad. El Grupo Barranca está actualmente constituido por las formaciones Arrayanes en la base, Santa Clara en la porción media (contiene los mantos de carbón) y Coyotes en la cima. Stewart y Roldán (1991) estimaron un espesor de 3000 m para este grupo, en un trabajo donde estudiaron su estratigrafía, proveniencia tectónica y ambientes de depósito

Adicionalmente se tienen algunos trabajos relacionados con las características paleontológicas de la Formación Santa Clara, entre los que destacan Silva-Pineda (1961), Weber (1980, 1985), y Weber *et al.* (1980). Desde el punto de vista geológico-estructural, la sierra de San Javier y sierras aledañas han sido estudiadas por Potter y Cojan (1985), Soto y Navarro (1987), Barrera y Domínguez (1987), Radelli *et al.* (1987) y Bartolini (1988). Montijo (2007) enfocó su trabajo estratigráfico en la Formación Santa Clara que aflora en las inmediaciones del poblado de San José de Moradillas, y la cual contiene los mantos de grafitos de minas como La Lourdes y La Cumbre. Finalmente, Corona *et al.* (2007) hacen un compendio general de la geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón en México, incluyendo los depósitos del Grupo Barranca en Sonora.

II. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Dentro de la porción centro-este del estado de Sonora, región en donde se encuentran las áreas estudiadas, se tienen aflorando una serie de secuencias sedimentarias, volcanosedimentarias e ígneas, cuyas edades varían entre el Paleozoico y el Cuaternario. Esta variedad litológica es producto de una serie de eventos tectónicos y de sedimentación que han edificado la geología de esta porción del estado.

En la sierra El Aliso localizada al oeste y noroeste del poblado de San Antonio de la Huerta, se tienen los principales afloramientos de una secuencia sedimentaria paleozoica. En esta localidad, Bartolini *et al.* (1989) reportan rocas del Ordovícico, Devónico, Misissípico, Pensilvánico (?) y del Pérmico.

Las rocas ordovícicas consisten en una secuencia detrítica de lutitas con graptolitos, areniscas y arenisca de cuarzo en la base; 100 m de espesor en la parte media de arenisca de cuarzo resistente, sobreyacida por lutitas con graptolitos, caliza, arenisca y pedernal; mientras que la cima está representada por una alternancia de estratos delgados de caliza, lutita y pedernal. Las rocas del Devónico consisten en unos 80 m de arenisca y caliza turbídicas en la base, sobreyacidas por 50 m de espesor de pedernal con radiolarios.

Las rocas del Misissípico y del Pensilvánico son una alternancia de estratos delgados de caliza localmente turbidítica que contiene niveles bioclásticos, y de un conglomerado con pedernal. Finalmente la secuencia pérmica consiste en un afloramiento de caliza turbidítica con fusulínidos del Wolfcampaniano. Estos autores mencionan que los contactos entre las diferentes unidades son principalmente estructurales, y regionalmente, estas rocas

paleozoicas son consideradas como parte de un alóctono eugeosinclinal que cabalga a secuencias pérmicas de plataforma (Radelli *et al.*, 1987; Pool *et al.*, 2005; Hernández-Gracia, 2011).

En la porción oeste y centro-este de la región estudiada aflora una secuencia sedimentaria triásica (Dumble, 1900; King, 1939; Wilson y Rocha, 1947) denominada Grupo Barranca (Alencaster, 1961; Stewart y Roldán-Quintana, 1991), dentro de la cual se tienen los yacimientos de carbón estudiados en este trabajo.

De manera general, el grupo Barranca está constituido por tres formaciones, que de la base a la cima son: 1) Formación Arrayanes que consiste de areniscas de grano grueso a muy grueso de color gris a gris pardo en superficie fresca, con granos sub-angulosos a sub-redondeados medianamente clasificados de cuarzo y en menor cantidad de feldespato, así como de estratos de conglomerado con clastos de cuarcita y pedernal. 2) Formación Santa Clara conformada por lutitas, areniscas, limolitas y lutitas carbonosas, con horizontes de conglomerados, carbón y grafito. Las lutitas y limolitas son de color gris verde a gris oscuro y negras; mientras que las areniscas son de color gris amarillento y verde pálido, llegando a presentar rizaduras de corriente. Para esta unidad se tienen reportados hasta 1400 m de espesor (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). 3) Formación Coyotes que la constituye una secuencia detrítica de grano grueso dominada por conglomerados de guijarros a guijas de estratificación gruesa, cuyos clastos son de angulosos a sub-redondeados de cuarcita y pedernal, y pueden llegar a tener 20 cm de eje mayor, pero predominan aquellos de 3 a 5 cm.

Las características litológicas de esta unidad y la determinación de plantas fósiles encontradas en lutitas de la Formación Santa Clara (Alencaster, 1961), sugieren que fueron depositadas bajo condiciones de ambientes fluviales, lacustres y fluvideltaicos durante el Triásico Tardío (García –Cortez y Aldana-Hernández, 2003).

A finales del Mesozoico en el NW de México se desarrolla un arco magmático continental producto de la subducción de la placa farallón bajo Norteamérica, conocido también como “Arco Laramide”, que en la región se representa por una serie de intrusiones de composición granítico-granodiorítica que se tienen afectando a las rocas pre-terciarias, incluyendo a su cobertura volcánica andesítico-dacítica.

Los afloramientos más ampliamente distribuidos en la porción central y centro-este corresponden a una secuencia volcanosedimentaria del Cretácico superior, originalmente nombrada como Formación Tarahumara por Wilson y Rocha (1949).

Esta unidad consiste de tobas andesíticas y tobas líticas en la base, intercaladas con capas de areniscas líticas y limolita, así como con aglomerados y brechas volcánicas; en la porción media presenta un miembro sedimentario, dominado por areniscas volcánicas y calizas lacustres con pedernal y restos de madera fósil; la cima de esta secuencia son flujos andesíticos a dacíticos muy alterados que son coronados por tobas riolíticas con pómez. La edad de la unidad se tiene determinada por fechas U-Pb entre 89.9 y 69.7 Ma (McDowell *et al.*, 2001). La Formación Tarahumara forma parte del magmatismo del denominado “Arco Laramide” el cual representa los últimos productos de la subducción mencionada anteriormente entre el Cretácico Tardío y el Eoceno.

A lo largo de toda la región estudiada se tienen afloramientos de una serie batolitos, stocks y apófisis de rocas intrusivas graníticas a intermedias, que de manera general, también forman parte de la actividad magmática relacionada al desarrollo del arco Laramide, y que en este trabajo son denominadas informalmente como complejo intrusivo inferior. El batolito no presenta variaciones mineralógicas importantes, y va de granito, granodiorita hasta cuarzomonzonita. Presenta textura fanerítica equigranular y es de color gris claro, con una mineralogía dominada por cristales de plagioclasa sódica, feldespatos potásicos, cuarzo, y biotita, mostrando alteraciones locales de cloritización y seritización principalmente. Como parte de esta actividad intrusiva también se incluyen dentro de la región stocks y apófisis de rocas porfídicas de composición riolítica y andesítica, cuyas edades van hasta el Eoceno-Oligoceno, y que son aquí denominadas como complejo intrusivo superior.

En el marco de un patrón de migración del arco magmático mencionado en párrafos anteriores, la cual es hacia el interior del continente con su posterior regreso hacia la trinchera, y que ha sido reconocida desde hace tiempo para el suroeste de la Cordillera Norteamericana entre el Cretácico Tardío y el Terciario (Damon *et al.*, 1983), se genera como producto principal el volcanismo de la Sierra Madre Occidental desde el Eoceno y hasta el Mioceno Temprano. Estos productos dentro de la región estudiada están representados principalmente por rocas piroclásticas félsicas de esta edad.

El Supergrupo Volcánico Superior es una unidad originalmente definida por McDowell y Keizer (1977) para caracterizar ignimbritas silíceas que fueron emplazadas en dos pulsos principales, uno del Oligoceno Temprano y otro del Mioceno Temprano (Ferrari *et al.*,

2005); dentro del área, esta unidad tiene afloramientos restringidos y locales en el límite oriental y en la porción central. Son rocas volcanoclásticas representadas por tobas riolíticas y andesíticas, presentan una coloración café crema a rojizo, con textura masiva y piroclástica, así como con un intenso fracturamiento y con pocos elementos de estratificación. Esta secuencia volcánica se relaciona con las fases finales de la subducción en el noroeste de México, que también incluye una gran cantidad de rocas ácidas originadas a partir de numerosas calderas y extrusiones (García –Cortez y Aldana-Hernández, 2003).

La actividad tectónica más importante a la que ha estado sujeta esta región del norte y noreste de Sonora durante el Terciario Medio y hasta el Holoceno es la extensión intraplaca. Los productos más importantes que generó este evento extensional son una serie de cuencas continentales limitadas por fallas normales, cuyo relleno sedimentario, para aquellas desarrolladas en la región, está representado por las secuencias conglomeráticas que incluyen actividad volcánica sincrónica dentro de éstas.

En este marco, la Formación Báucarit representa el relleno sedimentario de estas cuencas extensionales, y dentro del área estudiada está representada por una secuencia detrítica constituida por conglomerados polimicticos con clastos mal clasificados, sub-angulosos a sub-redondeados de andesita, toba, granito, cuarcita y pedernal principalmente, en una matriz arenosa gruesa de color pardo claro localmente tobácea; además presenta intercalaciones de areniscas líticas de grano grueso, tobas félsicas y basaltos o andesitas basálticas. Los afloramientos más importantes de esta unidad se tienen en el valle que define el Río Yaqui en el límite oriental de la región estudiada. Roldán y McDowell (1992) ubican a la Formación Báucarit en el Mioceno Inferior a Medio con edades de 20.2 y 14.1 Ma, respectivamente.

A finales del Mioceno, después de los 12 Ma, una reactivación de la extensión provoca el basculamiento de las rocas del relleno sedimentario antes mencionado y la reactivación del volcanismo (Ferrari *et al.*, 2005; Henry y Aranda-Gómez, 2000). Finalmente, los procesos de erosión y depósito dentro de cuencas continentales actuales permiten el depósito de sedimentos en ambientes predominantemente continentales.

En este evento extensional se genera una actividad volcánica que en este trabajo se representa por la unidad volcánica superior. Esta unidad está compuesta por riolitas y tobas riolíticas que presentan un color gris claro a rosado y pardo rojizo, una estructura compacta y tobácea, y cuyos constituyentes en muestra de mano consisten de vidrio, fragmentos de roca, cuarzo, ortoclasa y minerales arcillosos. De acuerdo con sus características litológicas y posición estratigráfica esta unidad volcánica se correlaciona con la Formación Lista Blanca que aflora en la sierra del mismo nombre en la porción central del Estado, donde ha sido fechada por el método K-Ar en 10.4 ± 0.2 Ma (Bartolini *et al.*, 1991). Estas rocas también se incluyen como parte de un episodio volcánico que se emplazó en valles tectónicos, relacionado con los procesos de adelgazamiento de la litosfera, precursores de la apertura del Golfo de California (Vidal-Solano *et al.*, 2007).

La secuencia detrítica de la unidad sedimentaria Neógena se incluye para caracterizar una serie de sedimentos gruesos, gravas y arenas, cuyos afloramientos se tienen ampliamente distribuidos. Son sedimentos continentales de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consisten de grava, arena y lodo, que en algunos afloramientos se presentan con estratificación débilmente marcada. Estos sedimentos se presentan rellenando

valles orientados noroeste-sureste, norte-sur, y zonas de pie de monte. Por otro lado, el aluvi3n cuaternario se encuentra cubriendo los cauces de r3os y arroyos principales, y consiste de material suelto constituido de grava, arena, limo y arcilla, que resultan de la erosi3n de rocas preexistentes. Estos materiales son transportados por las corrientes fluviales y depositados sobre el cauce de los r3os y en las planicies de inundaci3n.

III. ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA SAN JAVIER

Las rocas que afloran dentro de la zona San Javier est3n representadas por una secuencia detr3tico-carbonatada paleozoica (unidad sedimentaria paleozoica), por secuencias detr3ticas y volcanosedimentarias mesozoicas (Formaciones Arrayanes, Santa Clara y Tarahumara), intrusiones del Cret3cico Superior al Eoceno (Complejos intrusivos inferior y superior), as3 como por secuencias volc3nicas y sedimentarias m3s j3venes (Formaci3n Baucarit y Unidad volc3nica superior) (Figura 9). Para la caracterizaci3n de estas unidades estratigr3ficas se incluyeron descripciones realizadas en campo y aquellas definidas por el Servicio Geol3gico Mexicano (2004).

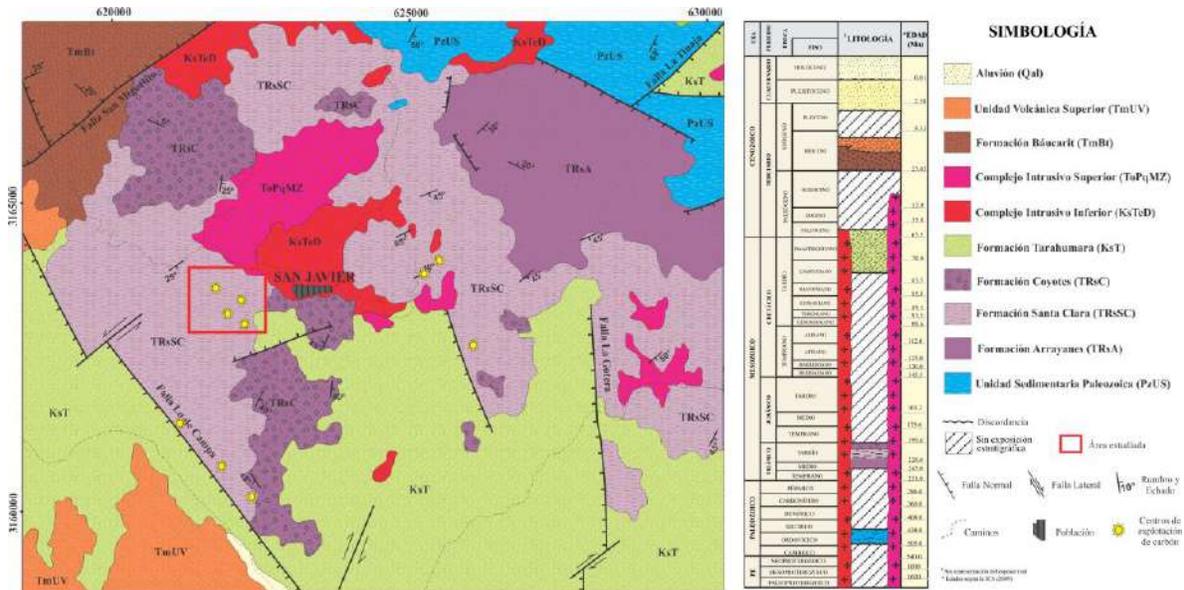


Figura 9. Geología y columna estratigráfica generalizada del área San Javier. Modificada de Servicio Geológico Mexicano (2004a).

III.I. Unidad Sedimentaria Paleozoica (PzUS)

Esta unidad se propone para incluir una serie de afloramientos de rocas sedimentarias detrítico-carbonatadas del Paleozoico que afloran hacia la porción noreste del área San Javier, en la denominada Sierra El Aliso.

La base de esta unidad está compuesta por areniscas de grano medio a grueso bien clasificadas, subarcóscicas y calcáreas, calizas con niveles de pedernal y lutitas; mientras que la porción superior la representan areniscas de cuarzo y estratos medios de lutitas y calizas. En general la unidad se presenta de color gris claro con tonos rojizos de intemperismo, estratificación gruesa a muy gruesa, y las rocas se encuentran parcialmente metamorfizadas en el contacto con intrusivos de los complejos intrusivos post-Cretácico

Tardío que se describen más adelante, originando localmente meta-areniscas, meta-calizas y cuarcitas.

Se considera que esta unidad fue depositada en ambientes de plataforma, y la edad asignada es del Ordovícico por Barrera y Domínguez (1987), con base a varios géneros de graptolitos biserials encontrados en lutitas negras.

III.II. Formación Arrayanes (TRsA)

La Formación Arrayanes representa la unidad basal del Grupo Barranca (Alencaster, 1961), y de manera general es una secuencia detrítica que aflora principalmente en la porción sur de la sierra El Aliso.

Está representada por una alternancia de areniscas de cuarzo y conglomerado polimítico con intercalaciones de capas delgadas de lutita. Las areniscas son de grano medio a grueso, con un color pardo rojizo en superficie de intemperismo, y color pardo claro en superficie fresca; sus granos son sub-angulosos a sub-redondeados de cuarzo con cantidades menores de feldespatos. Los conglomerados tienen una matriz arenosa rojiza y presentan clastos de cuarcita, pedernal y cuarzo blanco, sub-redondeados, con diámetros entre 1 y 6 cm, y con estratificación gruesa de 1 metro promedio de espesor. Las lutitas son de color rojizo, deleznales, con estratificación delgada a mediana y muy físeles.

Por su posición estratigráfica discordante sobre la secuencia paleozoica y concordante con la Formación Santa Clara, a esta unidad se le considera del Triásico Tardío.

III.III. Formación Santa Clara (TRsSC)

Dentro de estas áreas, los afloramientos más importantes de la Formación Santa Clara se tienen en la porción sur de la Sierra El Aliso, y se tienen asociados a los afloramientos que presentan de otras unidades del Grupo Barranca. Está representada por una intercalación detrítica de areniscas, lutitas, lutitas carbonosas, mantos de carbón y/o grafito, así como algunas capas de conglomerados polimícticos.

Las areniscas tienen un color de intemperismo pardo rojizo y en superficie fresca son de un color gris claro, se presentan en estratos medianos a gruesos (.5 – 1 m), son de grano fino a medio y localmente se puede observar estratificación gradual inversa y cruzada. Las lutitas son de color gris claro a negro, presentan estratificación delgada a mediana, y algunas capas se observan con una fuerte fisilidad, llegan a ser muy deleznales en muestra de mano; además incluye capas con impresiones de plantas de helechos en los planos de estratificación y de fisilidad. Las lutitas carbonosas que se intercalan tienen una gran cantidad de materia orgánica. Esta unidad también presenta intercalaciones de conglomerados polimícticos y lutitas de color gris verdoso a amarillento. Localmente las lutitas negras carbonosas tienen una fisilidad mejor desarrollada, mantos de carbón, e impresiones de plantas; además, se encuentran capas donde estas rocas presentan un color de intemperismo gris verdoso a amarillento. El afloramiento más importante se tiene sobre la carretera Federal No.14 a la altura del rancho La Barranca (Figura 10).



Figura 10. Afloramiento de la Formación Santa Clara en la localidad del rancho La Barranca. Vista hacia el Este.

La edad de esta formación está definida en base a su contenido fosilífero (plantas), siendo asignadas al Triásico Tardío por Alencaster (1961).

III.IV. Formación Coyotes (TRsC)

La Formación Coyotes representa la cima del Grupo Barranca (Alencaster, 1961) y en general está constituida por una secuencia detrítica gruesa que aflora principalmente en la porción centro-norte del área San Javier.

Los conglomerados polimícticos presentan un color gris oscuro en superficie fresca y pardo rojizo a amarillento en superficie de intemperismo; sus clastos son de sub-angulosos a sub-redondeados de cuarcita y pedernal (Figura 11), en una matriz arenosa de grano fino a gruesa, localmente presenta clastos de entre 20 y 50. El Servicio Geológico Mexicano (2004) reporta en otras localidades cercanas, clastos de caliza de más de 20 cm de diámetro con fragmentos de fusulínidos dentro de este conglomerado. Intercaladas en esta secuencia se tienen capas de areniscas y lutitas de color gris amarillento de intemperismo, en estratos delgados a medianos; así mismo se tienen areniscas de grano medio a fino con más del 90% de cuarzo, de color gris claro en superficie fresca y gris rojizo de alteración.

Con base a su posición estratigráfica dentro del Grupo Barranca, esta unidad es considerada del Triásico Tardío (Alencaster, 1961).

III.V. Formación Tarahumara (KsT)

Esta unidad aflora ampliamente en la porción centro sur del área San Javier. En general es una secuencia volcánica y volcanosedimentaria de composición andesítica-dacítica.



Figura 11. Afloramiento del conglomerado de la Formación Coyotes en las inmediaciones del sitio Mina Margarito Gracia.

Está caracterizada por coladas y tobas de composición andesítica así como por aglomerados y brechas volcánicas muy mal clasificadas de color gris verdoso y localmente gris-morado, que presenta clastos de andesitas de hasta 30 cm de espesor. Específicamente en el área de San Antonio de la Huerta, al este del área de estudio, el mayor espesor de la Formación Tarahumara está constituido por aglomerados andesíticos en la base (Figura 12) y tobas riodacíticas y riolíticas en la cima, que desarrollan morfológicamente lomeríos suaves de poca altura.

Como ya se mencionó, la Formación Tarahumara se considera de una edad que va del Cretácico Tardío al Paleoceno (McDowell *et al.*, 2001).



Figura 12. Afloramiento del aglomerado andesítico que forma parte de la Formación Tarahumara en las inmediaciones del rancho La Barranca.

III.VI. Complejo Intrusivo Inferior (KsTpaGr-Gd)

En el área de San Javier esta unidad incluye a intrusivos de composición granodiorítica a diorítica, que afloran en diversas localidades, principalmente en la porción central.

Son granitos y granodioritas de color gris claro con textura fanerítica de grano medio, cuya mineralogía está dominada por cristales de plagioclasa sódica, feldespato potásico, cuarzo, biotita alterada a clorita y sericita. Localmente algunos fenocristales de plagioclasa y feldespato potásico están alterados parcialmente a montmorillonita. Además se tiene una diorita de color gris oscuro de textura fanerítica de grano medio, con una mineralogía dominada por feldespato, biotita, hornblenda, cuarzo y óxidos de fierro. Se encuentran

intrusionando a las rocas paleozoicas, a las unidades detríticas del Grupo Barranca (Figura 13) y a la secuencia volcanosedimentaria de la Formación Tarahumara. Se considera que estas rocas ígneas forman parte del denominado “Batolito Laramide de Sonora” propuesto por Damon *et al.* (1983), cuyas edades varían del Cretácico Tardío al Eoceno.



Figura 13. Afloramiento de un apófisis diorítico que afecta a las rocas de la Formación Santa Clara en las inmediaciones del sitio Mina Margarito Gracia.

III.VII. Complejo Intrusivo Superior (ToPqMZ)

Dentro de esta unidad se incluyen afloramientos de intrusivos que afloran al norte del poblado de San Javier.

Es un intrusivo de composición cuarzomonzonítica de color gris verdoso en superficie fresca y un color pardo rojizo con tonos amarillentos al intemperismo; tiene una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa en matriz de grano grueso con biotita, hornblenda y cuarzo; esta roca en los afloramientos se presenta muy deleznable. Este intrusivo es considerado como del Oligoceno por el Servicio Geológico Mexicano (2004).

III.VIII. Formación Báucarit (TmBt)

La Formación Báucarit en el área San Javier se restringe a la esquina noroeste de ésta. Originalmente propuesta por Dumble (1900) y formalizada por King (1939), la Formación Báucarit es la unidad litoestratigráfica detrítica mayormente documentada en la literatura geológica del Terciario sedimentario de Sonora. En el área de Tecoripa II se tienen amplios afloramientos en el valle central al sur del poblado de Tecoripa.

La Formación Báucarit está constituida por una secuencia de conglomerados polimícticos, de color gris oscuro a claro en superficie fresca, y un color pardo rojizo a amarillento al intemperismo. La matriz arenosa gruesa cuarzo-feldespática, presenta clastos de sub-angulosos a sub-redondeados, de entre 1 y 45 cm de diámetro, dominando una composición de clastos derivados de rocas andesíticas, riolíticas, areniscas, lutitas, granitos, granodioritas y pedernal. Tiene estratificación mediana a gruesa con espesores de 0.5 hasta 1.5 m. también incluye intercalaciones de capas de areniscas de grano fino a medio, de color gris claro a gris oscuro, con un color de intemperismo pardo rojizo.

La Formación Báucarit se interpreta como el depósito de cuencas desarrolladas durante el período de distensión continental en Sonora entre los 26 y 16 Ma (Ferrari *et al.*, 2005), por lo que su rango de edad es del Mioceno Temprano a Medio. Así mismo, González-León *et al.* (2010) reportan para esta formación en la cuenca de Arizpe de Sonora, una serie de edades Ar/Ar entre 24.2 ± 0.2 Ma y 18.6 ± 0.2 Ma.

III.IX. Unidad Volcánica Superior (TmUV)

Esta unidad aquí se propone para designar a una secuencia volcánica de intermedia a félsica del Mioceno que se tiene aflorando hacia la porción suroeste del área San Javier.

Está constituida principalmente por andesitas y tobas riolíticas, incluyendo lavas riolíticas, dacíticas y tobas líticas. En muestra de mano presenta un color gris oscuro a crema, y un color pardo rojizo con tonos amarillentos al intemperismo. La mayoría de estas rocas tienen una textura tobácea y son muy deleznable, masiva a deleznable por su alteración a arcillas.

A esta unidad volcánica se le correlaciona con la Formación Lista Blanca, y se considera del Mioceno a partir de fechamientos isotópicos obtenidos en afloramientos que se tienen más hacia el sur del área estudiada, en el municipio de Suaqui Grande, de entre 17.2 y 12 Ma. (McDowell, 1991).

III.X. Unidad Sedimentaria Neógena (QpUS)

Esta unidad se propone para incluir aquellas secuencias sedimentarias del Cuaternario que están representadas por gravas y limos, gravas y arenas, y arenas y limos que se tienen principalmente hacia los valles de ambas áreas estudiadas.

Generalmente son secuencias gravosas polimícticas no consolidadas con las cuales se intercalan capas de limos y arenas. Morfológicamente aparecen como terrazas fluviales y depósitos aluviales, y son producto de la erosión de las secuencias rocosas que afloran en la región. Se consideran del Pleistoceno (Servicio Geológico Mexicano, 2004a).

III.XI. Aluvión (Qal)

Estos materiales que se consideran del Cuaternario se encuentran principalmente cubriendo los cauces de ríos y arroyos. Es material suelto constituido por algunos cantos, gravas, arena, limo y arcilla, como resultado de la erosión de rocas preexistentes, y que es transportado por corrientes fluviales, y depositado sobre el cauce de los arroyos principales del área.

IV. ESTRUCTURAS REGIONALES

En el área San Javier, las principales estructuras regionales están representadas por fallas normales y algunas fallas de desplazamiento lateral.

La Falla La Gotera es la más representativa, tiene un rumbo NNW-SSE con un buzamiento hacia el WSW y pone en contacto por falla a las Formaciones Santa Clara y Tarahumara (Figura 9).

El segundo sistema son fallas orientadas NE-SW que se encuentran principalmente hacia la porción norte dentro de ambas áreas. En el área San Javier está la Falla San Miguelito en la porción NW, con un buzamiento hacia el NW como un contacto estructural de la Formación Báucarit con la Formación Arrayanes y un intrusivo diorítico del Complejo Intrusivo Inferior; también se tiene la Falla La Tinaja en la porción NE, con un buzamiento hacia el SE y como contacto estructural entre las rocas paleozoicas y la Formación Tarahumara.

Un tercer sistema de estructuras se puede determinar en el área San Javier, el cual tiene una orientación NW-SE y buzamientos hacia el SW, siendo la más representativa la Falla Lo de Campa, la cual pone en contacto a la secuencia detrítica de la Formación Santa Clara con la Formación Tarahumara.

Las fallas La Gotera y Lo de Campa son desplazadas por fallas de corrimiento lateral dextral en la primera, y sinistral en la segunda.

V. ANÁLISIS GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL EN LOS SITIOS

Zona San Javier

Para el área San Javier los sitios estudiados fueron los siguientes: La Pizarrina, El Refugio, San Agustín, El Refugio II, Margarito Gracia, Sentimiento I y El Tonelada (Figura 14).

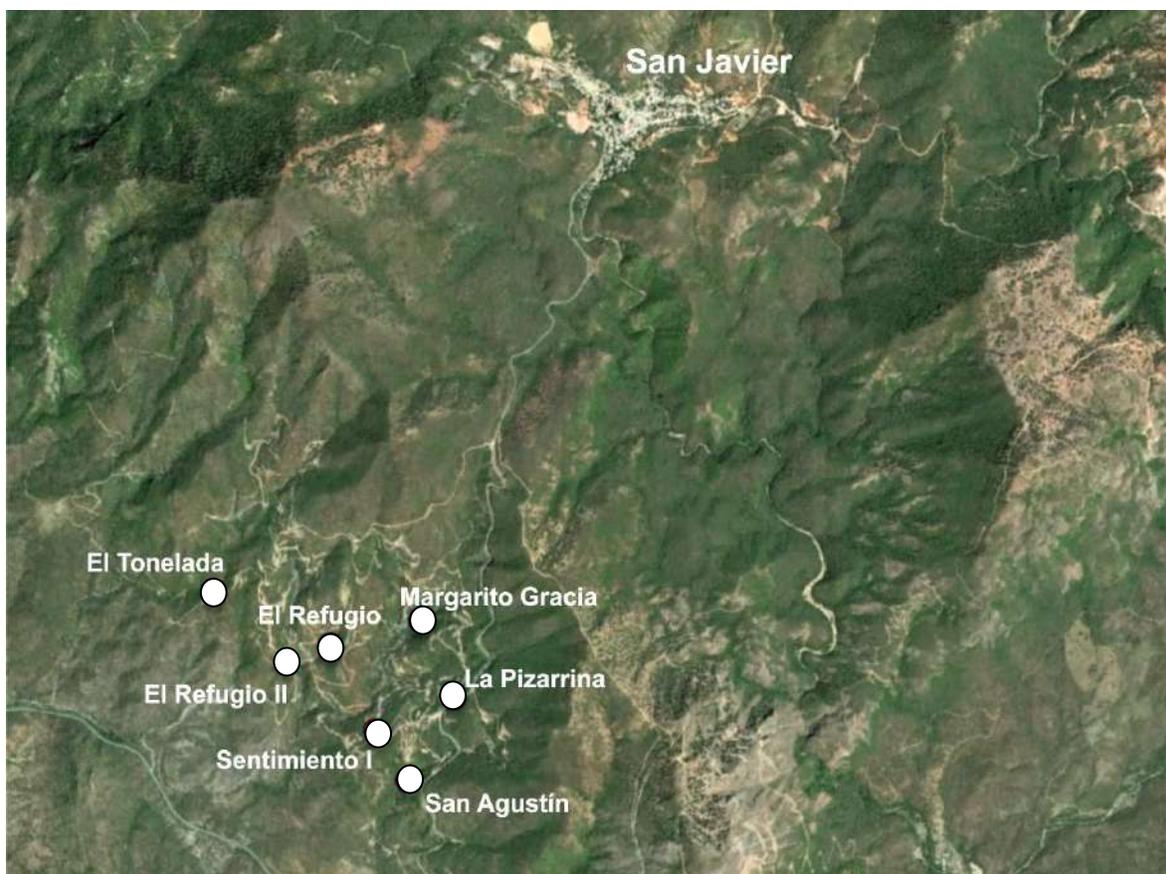


Figura 14. Localización de sitios de levantamiento estructural en el área San Javier.

V.I. Sitio La Pizarrina

El macizo rocoso en esta localidad consiste del afloramiento de estratos medianos a gruesos de arenisca de grano medio a grueso de color rojizo en superficie de intemperismo y gris verdoso en superficie fresca, que se intercalan con estratos medianos de lutita de color gris verdoso a oscuro en superficie fresca, con laminaciones, nódulos arenosos y una fisilidad

muy desarrollada (Figura 15). La longitud del afloramiento fue de 41.70 m distribuida en 3 segmentos, el primero de 13.20 m con una orientación de 240° y 5° de inclinación al SW, el segundo fue de 18.50 m al azimut 228° e inclinado 5° al SW, y el tercero de 10.00 m al 225° y 10° al SW de inclinación. La altura promedio del afloramiento es de 3 m. Las Coordenadas UTM para este sitio son: Latitud 3161310 y Longitud 622246.

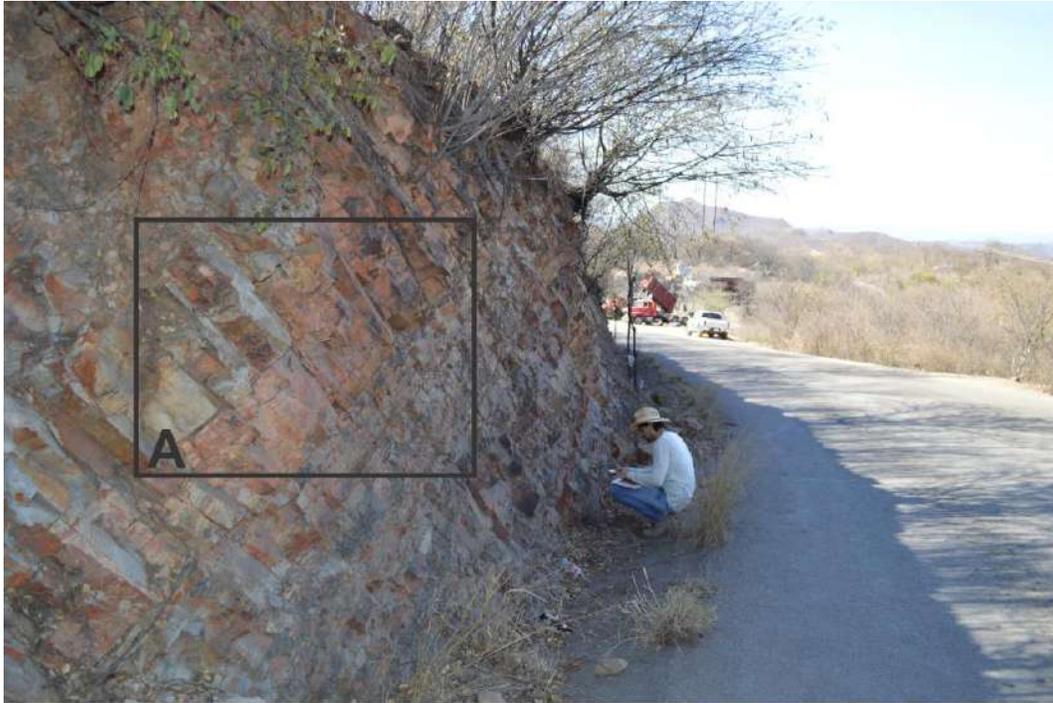


Figura 15. Fotografía del afloramiento del Segmento 2 del sitio La Pizarrina mostrando la litología dominante.
A) Detalle en el sitio mostrando las diferentes discontinuidades identificadas.

Dentro de este sitio se tomaron un total de 70 datos estructurales de las diferentes familias observadas de manera visual (Figura 16A). A partir de analizar el diagrama de rosetas para los datos utilizados, se determinó la presencia de 3 familias principales que tienen la siguiente orientación: Familia 1: 90° - 150° , Familia 2: 195° - 254° , y la Familia 3: 5° - 43° (Figura 16B).

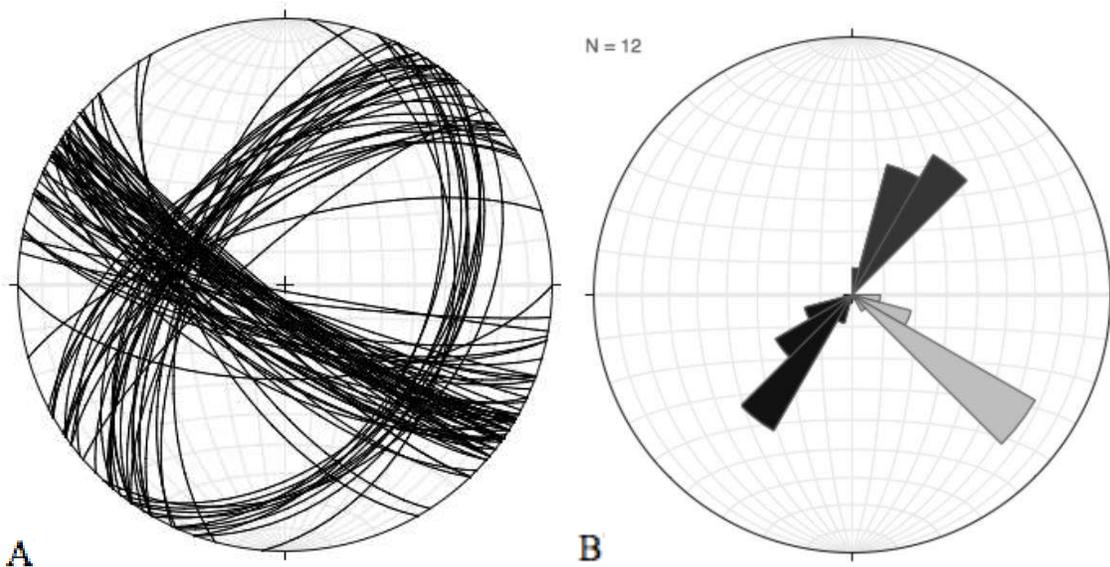


Figura 16. A) Diagrama de Red de Schmidt que muestra en general la actitud estructural de los planos de las diferentes discontinuidades medidas en el sitio La Pizarrina. B) Diagrama de roseta que muestra la orientación preferencial de los planos medidos en el sitio La Pizarrina.

Con el análisis completo del diagrama de rosetas y de los datos estructurales de campo, se definieron las características de cada una de las 3 familias dominantes en este sitio (Figura 17):

- La familia 1 corresponde a diaclasas con un rumbo azimuthal dentro del rango de 90° a 150° , con un echado que varía entre 60° y 88° al SW; presentan un espaciamiento promedio de 30 cm, una extensión máxima de 5 m, aberturas de hasta 5 mm, y superficies predominantemente onduladas ligeramente rugosas (wm).

- La Familia 2 también son diaclasas caracterizadas por una orientación azimutal de 195° a 254° y echados entre 50° y 78° al NW. Estas fracturas presentan un rango de espaciamiento entre 10 y 30 cm, una extensión promedio de 2.30 m, con una abertura promedio de 1 mm, y superficies planas y onduladas ligeramente rugosas (pm, wm).
- La familia 3 representa los planos de estratificación, cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 5° y 43° , con un echado promedio de 40° al SE; tienen hasta 6 m de extensión, espaciamiento entre 40 y 110 cm, superficies cerradas y onduladas de rugosas a ligeramente rugosas.

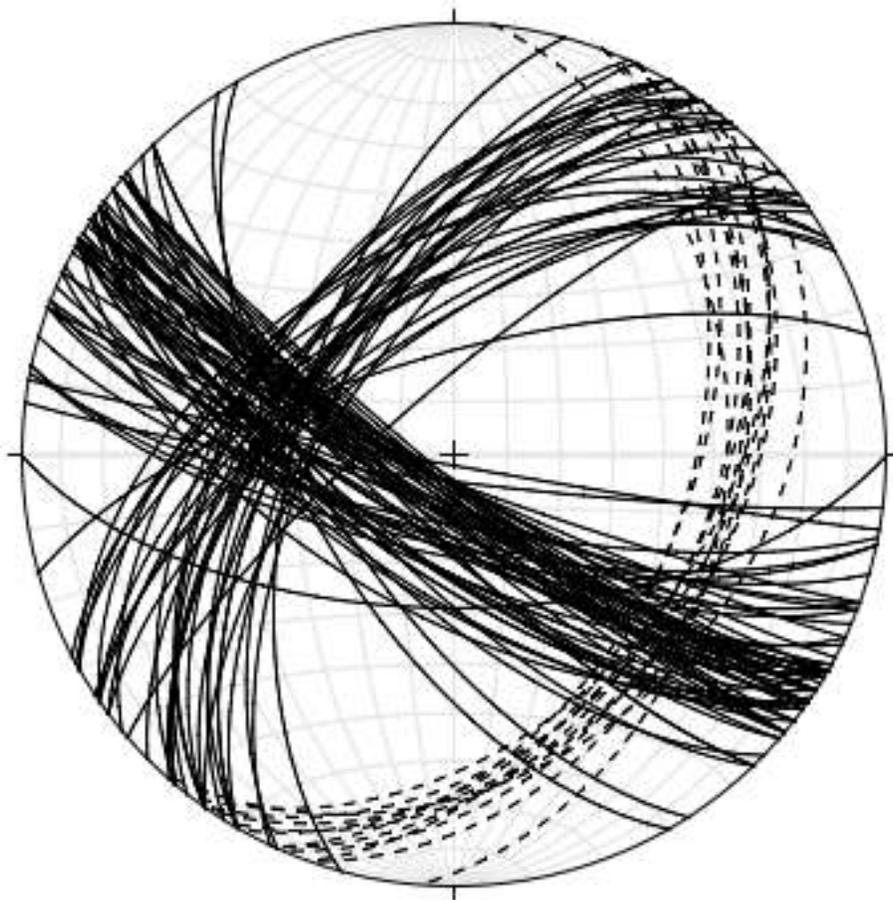


Figura 17. Diagrama de Red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades identificadas en el sitio La Pizarrina. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.

Para cada una de las discontinuidades se graficaron sus polos (Figura 18A), y a partir de la concentración de éstos en la red de Schmidt se obtuvo el vector principal que determina la actitud promedio de cada familia (Figura 18B), resultando que los polos de estas familias tienen una orientación e inclinación de: Familia 1 = $31.2^{\circ}/13.3^{\circ}$; Familia 2 = $133^{\circ}/30.9^{\circ}$; y Familia 3 = $297.5^{\circ}/52.3^{\circ}$. De esta forma, los planos resultantes de las discontinuidades que caracterizan a este sitio tienen las siguientes actitudes estructurales:

-Familia 1: 121.2° SW 76.7°

-Familia 2: 223° NW 59.1°

-Familia 3: 27.5° SE 37.7°

Se obtuvieron también los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que presentan cada una de las familias de diaclasas, ya que éstas representan eventuales discontinuidades a lo largo de las cuales puede haber deslizamiento de bloques de roca, dando los siguientes datos:

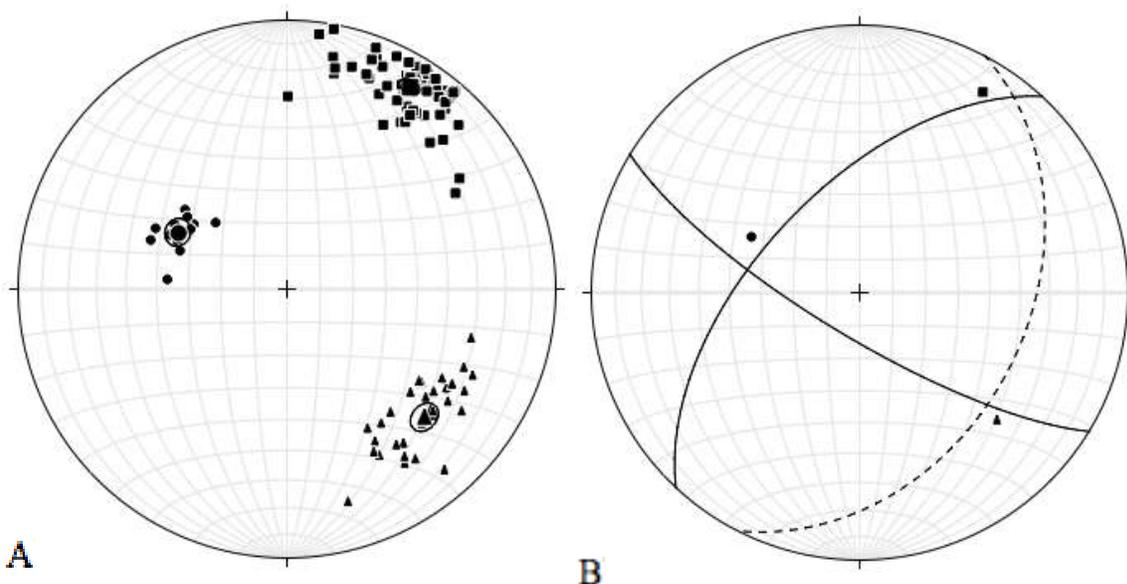


Figura 18. A) Diagrama de Red de Schmidt que muestra los polos de las 3 familias de discontinuidades y el polo principal para cada una. B) polos y planos de las familias resultantes en el sitio La Pizarrina. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

Familias 1 y 2: $281^{\circ}/55^{\circ}$

Familias 1 y 3: $132^{\circ}/37^{\circ}$

Familias 2 y 3: $38^{\circ}/08^{\circ}$

V.II. Sitio El Refugio

El macizo rocoso de este sitio está conformado por un afloramiento donde dominan capas de arenisca de grano medio a grueso de estratificación gruesa de hasta 2 m de espesor, que presentan un color gris medio en superficie fresca y pardo rojizo en superficie de intemperismo. Se encuentra intercalada con capas delgadas de lutita de color gris oscuro en superficie fresca con espesores de entre 10 y 15 cm de espesor (Figura 19).

La longitud del afloramiento es de casi 37 m distribuida en 3 segmentos, el primero consta de 6.30 m, el segundo de 9.80 m, y el tercero de 20.60 m. La altura promedio del

afloramiento es de 4 m. Las Coordenadas UTM para este sitio son: Latitud 3160980 y Longitud 621127.

Dentro de este sitio se analizaron un total de 80 datos estructurales que se obtuvieron de los 3 segmentos (Figura 20A). Una vez caracterizado el diagrama de rosetas de los datos graficados se obtuvo que las 3 familias principales tienen las orientaciones siguientes: Familia 1: 105° - 176° , Familia 2: 190° - 286° , Familia 3: 2° - 96° (Figura 20B).



Figura 19. Segmento 3 del sitio El Refugio se muestra la litología dominada por areniscas y las diferentes familias de discontinuidades en este sitio (A).

Con base al diagrama de roseta se determinaron 3 familias principales en el sitio El Refugio (Figura 21), que presentan las siguientes características:

- La familia 1 pertenece a diaclasas cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 105° y 176° , con un echado que varía entre 55° y 88° al SW: muestran un espaciamiento promedio de 30 cm, una extensión que varía de 1 m a 4 m, con una abertura máxima de 5 mm, y superficies planas que van de rugosas a ligeramente rugosas (pr, pm).
- La familia 2 corresponden a diaclasas con un rumbo azimutal dentro del rango de 105° y 176° , con un echado que vara entre 55° y 88° al NW: presentan un espaciamiento promedio de 30 cm, una extensión promedio de 2 m, presentan aberturas de 1 mm, y superficies planas que varías de rugosas a ligeramente rugosas (pr, pm).
- La familia 3 representa los planos de estratificación, cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 2° y 96° , con un echado promedio 44° al SE, tienen una abertura promedio de 1 mm, espaciamientos que van de 30 cm hasta 2 m, extensión de hasta 8 m, y superficies que van de planas a onduladas ligeramente rugosas (pm).

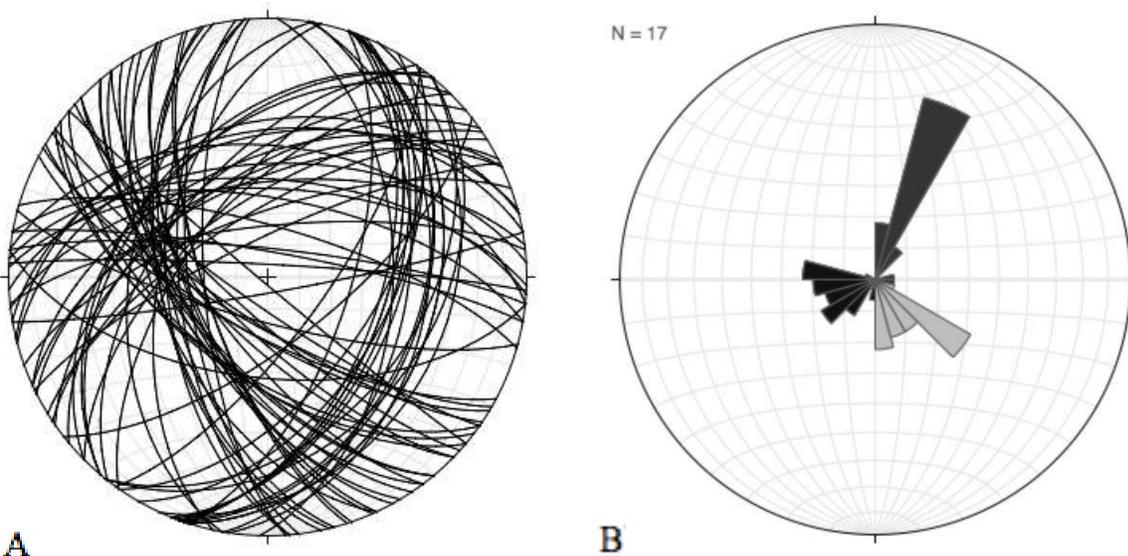


Figura 20. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio El Refugio. B) Diagrama de roseta en la que se aprecian las orientaciones de los planos medidos en el sitio El Refugio.

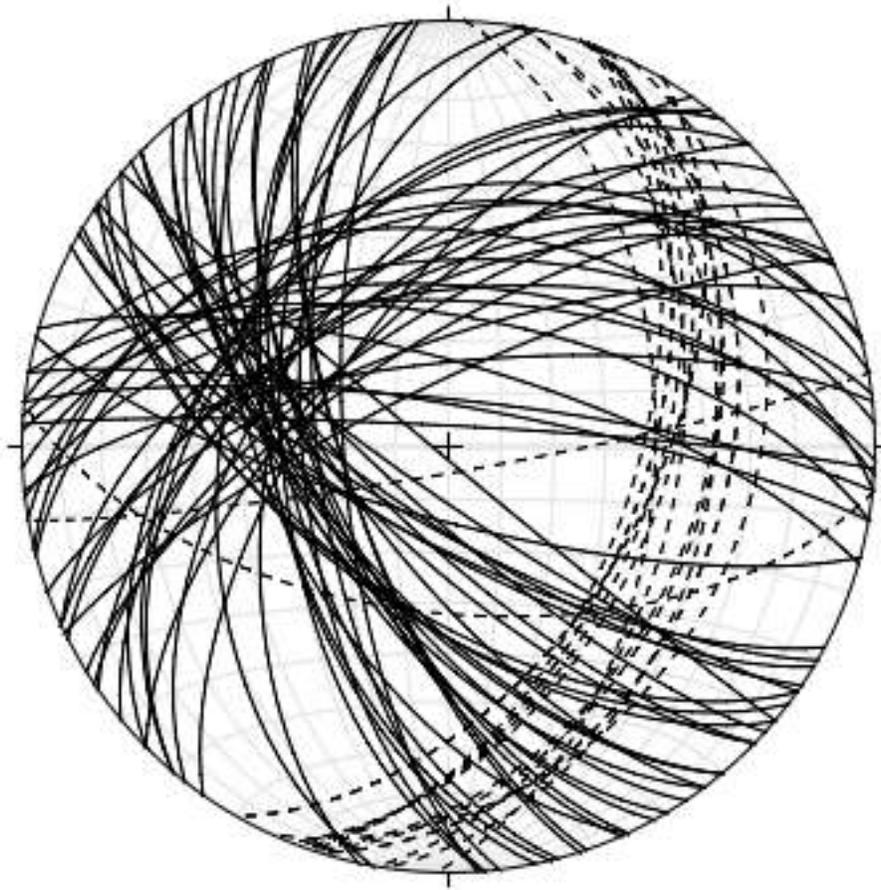


Figura 21. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades que conforman el sitio El Refugio. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.

Se obtuvo el vector principal que determina la actitud promedio de cada familia a partir de graficar los polos como se ve en la Figura 22A, resultando una orientación e inclinación de: Familia 1 = $53.9^{\circ}/24.3^{\circ}$; Familia 2 = $158.3^{\circ}/32.4^{\circ}$; y Familia 3 = $297.7^{\circ}/45^{\circ}$. En la Figura 22B se aprecian los polos y el plano derivado de las diaclasas que caracterizan al sitio, los datos estructurales son:

-Familia 1: 143.9° SW 65.7°

-Familia 2: 248.3° NW 57.6°

-Familia 3: 27.7° SE 45°

Se calcularon también los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que se presentan entre cada una de las familias de discontinuidades, dando los siguientes datos:

Familia 1 y 2: $293^{\circ}/48^{\circ}$

Familia 1 y 3: $162^{\circ}/35^{\circ}$

Familia 2 y 3: $53^{\circ}/23^{\circ}$

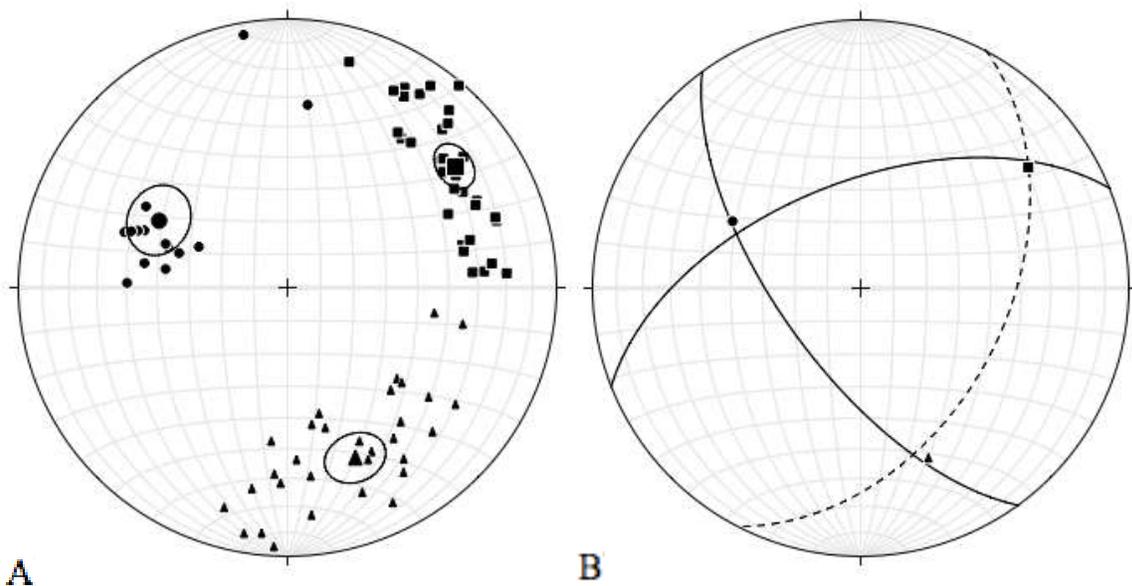


Figura 22. A) Diagrama de red de Schmidt que muestra los polos de las 3 familias de discontinuidades y el polo principal para cada una. B) polos y planos de las familias resultantes en el sitio El Refugio. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

V.III. Sitio San Agustín

El macizo rocoso de esta localidad está conformado por un afloramiento dominado por capas de areniscas de estratificación gruesa con espesores de alrededor 2 m; son de grano medio a grueso y de color pardo rojizo. En la parte inferior del afloramiento las areniscas se encuentran intercaladas con horizontes delgados de lutitas de color verde oscuro con un espesor promedio de 15 cm (Figura 23).

Es importante mencionar que en este sitio se tienen evidencias del desarrollo de un deslizamiento de rocas reciente, el cual claramente aprovechó como zona de debilidad el plano de una discontinuidad. En comunicación personal con trabajadores de la obra minera, especificaron que este deslizamiento se dio después de un día lluvioso, y dado que se tenía como un talud casi vertical al lado de un camino de terracería, éste fue interrumpido por los bloques de roca caídos (Figura 24). La longitud del afloramiento es de 13.80 m. La altura promedio del afloramiento es de alrededor 5 m. Las Coordenadas UTM para este sitio son: Latitud 3160944 y Longitud 621997.

En este sitio se obtuvieron un total de 62 datos estructurales los cuales se graficaron estereográficamente en una red de Schmidt (Figura 25A). Se generó un diagrama de roseta (Figura 27B) que después de analizarlo se determinó que las tres principales familias tienen las orientaciones siguientes: Familia 1: 136° - 205° , Familia 2: 206° - 335° , Familia 3: 22° - 78° .



Figura 23. Se muestra la litología dominante en el sitio San Agustín, que corresponde a una capa de lutitas en la base y estratos gruesos de arenisca en la cima.



Figura 24. Detalle del deslizamiento de rocas en el sitio San Agustín donde se puede apreciar los bloques de rocas deslizados interrumpiendo el camino.

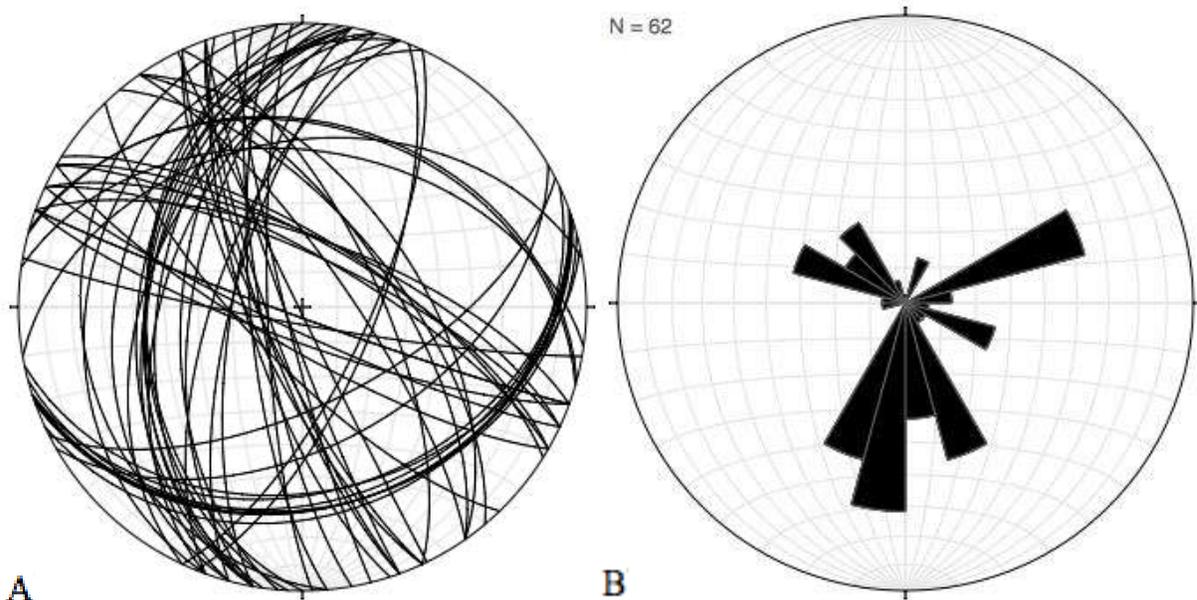


Figura 25. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio San Agustín. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las 62 orientaciones de los planos medidos en el sitio en la que se aprecian las orientaciones de los planos medidos en el sitio San Agustín.

En base al diagrama de roseta se determinaron 3 familias principales en el sitio San Agustín (Figura 26), las características que presentan son las siguientes:

- La Familia 1 corresponde a diaclasas cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 136° y 205° , con un echado que varía entre 23° y 89° al SW: muestran superficies ligeramente rugosas a suaves que van de onduladas a planas (pm, ps), muestran un espaciamiento promedio de 30 cm, una extensión que varía de 1.50 a 3 m, con una abertura promedio de 1 mm.
- La Familia 2 pertenece a diaclasas cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 260° y 335° , con un echado que varía entre 25° y 77° al NE: muestran superficies ligeramente rugosas a suaves que van de onduladas a planas (pm, ps),

muestran una extensión promedio de 4 m, un espaciamiento que varía de 20 a 30 cm, con una abertura promedio de .5mm.

- La Familia 3 representa los planos de estratificación, cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 60° y 78° , con un echado que va de 28° y 69° al SE, muestran superficies planas ligeramente rugosas (pm), con una abertura .5 mm, una extensión de 11 m.

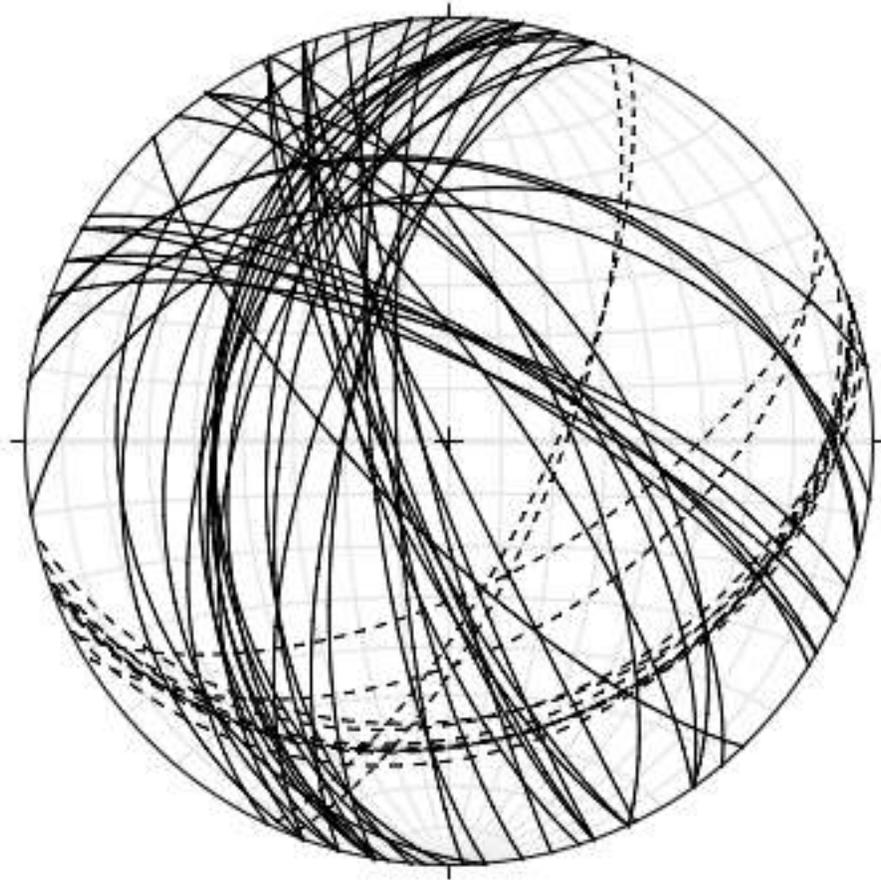


Figura 26. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades que conforman el sitio San Agustín. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.

Graficando los polos (Figura 27A) para cada familia de diaclasas, se obtuvo aquel que representa a éstas, resultando una orientación e inclinación de:

Familia 1 = $86.7^{\circ}/30.4^{\circ}$;

Familia 2 = $213.4^{\circ}/30.1^{\circ}$;

Familia 3 = $328.2^{\circ}/50.1^{\circ}$.

Además, a partir del vector principal de los polos se determinó cada uno de los planos que caracterizan al conjunto de discontinuidades presentes en el sitio San Agustín (Figura 27B), siendo caracterizado por los siguientes datos estructurales.

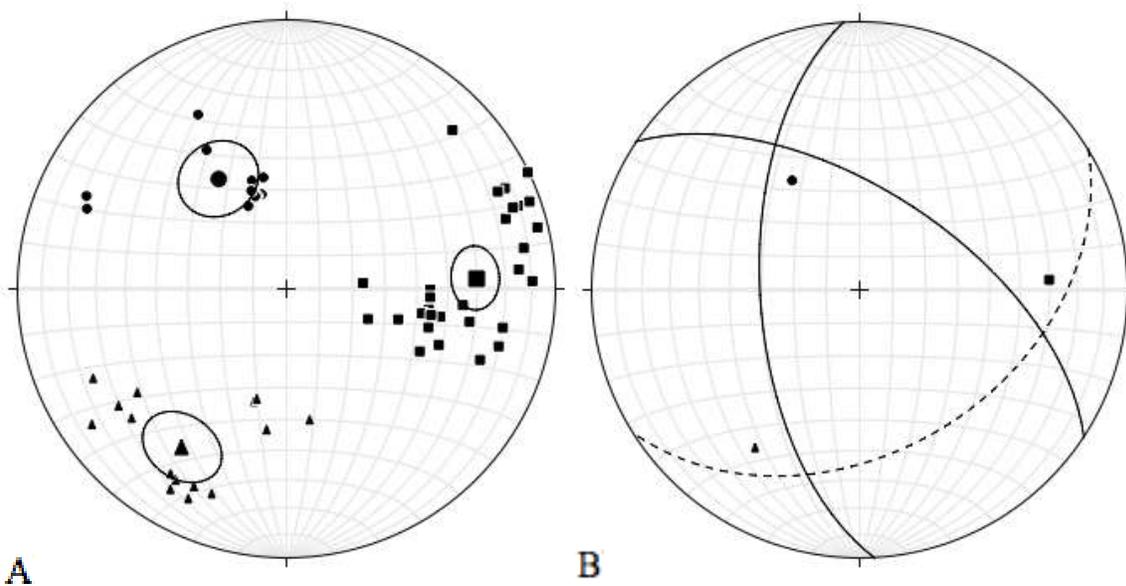


Figura 27. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

Familia 1: 176.9° SW 59.6°

Familia 2: 303.4° NE 59.9°

Familia 3: 58.2° SE 39°

Se determinaron los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que se presentan entre cada una de las familias de discontinuidades, resultando los siguientes datos:

Familia 1 y 2: $330^{\circ}/38^{\circ}$

Familia 1 y 3: $196^{\circ}/29^{\circ}$

Familia 2 y 3: $103^{\circ}/31^{\circ}$

V.IV. Sitio El Refugio II

El macizo rocoso en esta localidad consiste de una inter-estratificación de estratos delgados de arenisca y lutita. La arenisca es de grano fino a medio y presenta un color pardo claro en gris claro en superficie fresca y superficie de intemperismo. La lutita tiene una fisilidad muy desarrollada, y de gris a verde oscuro en superficie fresca y un color gris parduzco en superficie de intemperismo, Este sitio está afectado por una falla normal de ángulo relativamente bajo (Figura 28). La longitud del afloramiento fue de 9 m y su altura de alrededor de 2 m. Las Coordenadas UTM para este sitio son: Latitud 3161514 y Longitud 621491.



Figura 28. Sitio El Refugio II muestra una litología de arenisca. Se aprecia una discontinuidad importante en el margen centro izquierdo de la imagen.

Dentro de este afloramiento se levantaron un total de 26 datos estructurales de las diferentes familias de discontinuidades, las cuales se pudieron identificar de manera visual (Figura 29A). A partir de análisis el diagrama de roseta se pudieron identificar 3 familias de diaclasas representativas para el sitio El Refugio II, las 3 familias de diaclasas tienen las siguientes orientaciones: Familia 1: 100° - 105° , Familia 2: 225° - 245° , Familia 3: 335° - 1° (Figura 29B).

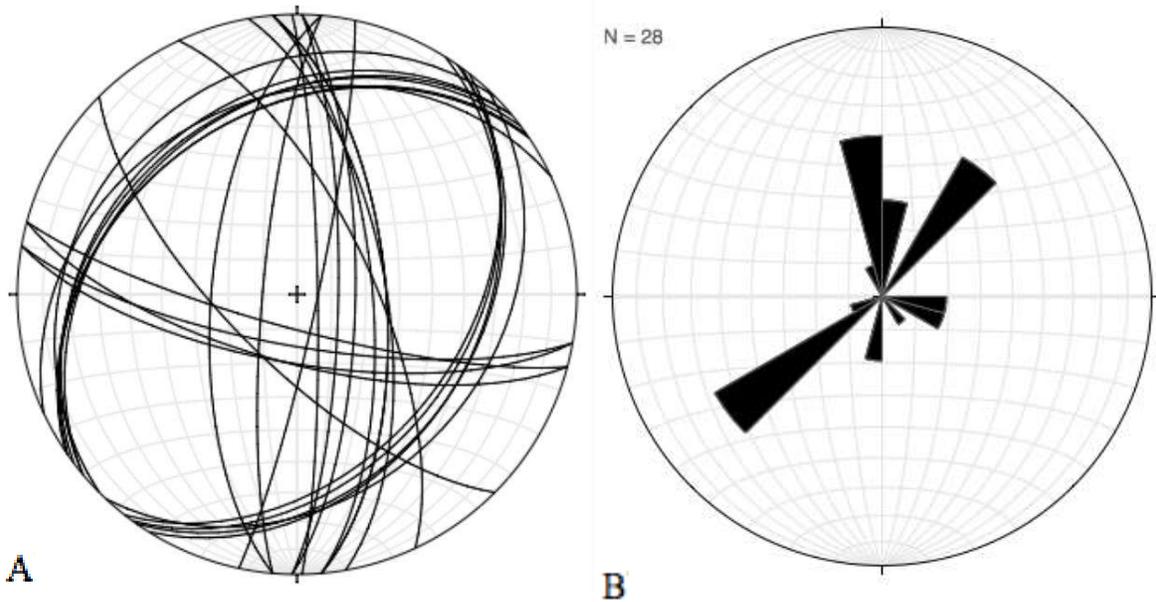


Figura 29. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio El Refugio II. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en el sitio El Refugio II.

Se determinaron 3 familias principales en el sitio El Refugio II (Figura 30) en base al diagrama de roseta, las características que presentan son las siguientes:

- La Familia 1 representa familias cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 100° y 105° , con un echado que varía entre 70° y 80° al SW: muestran superficies planas ligeramente rugosas (pm), muestran un espaciamiento promedio de 15 cm, una extensión que varía de 1 a 2 m con una abertura promedio de 1 mm.
- La Familia 2 pertenece a diaclasas cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 225° y 245° , con un echado que varía entre 22° y 45° al NW: muestran superficies planas que van de ligeramente rugosas a suaves (pm y ps), muestran una extensión promedio de 1.5 m, un espaciamiento que varía 10 cm, con una abertura promedio de 1 mm.

- La Familia 3 representa los planos de estratificación, cuyo rumbo tiene un rango de azimut entre 1° y 335° , con un echado que va de 30° y 84° al SE, muestran superficies planas ligeramente rugosas (pm), con una abertura de 1 mm y una extensión de 2 m.

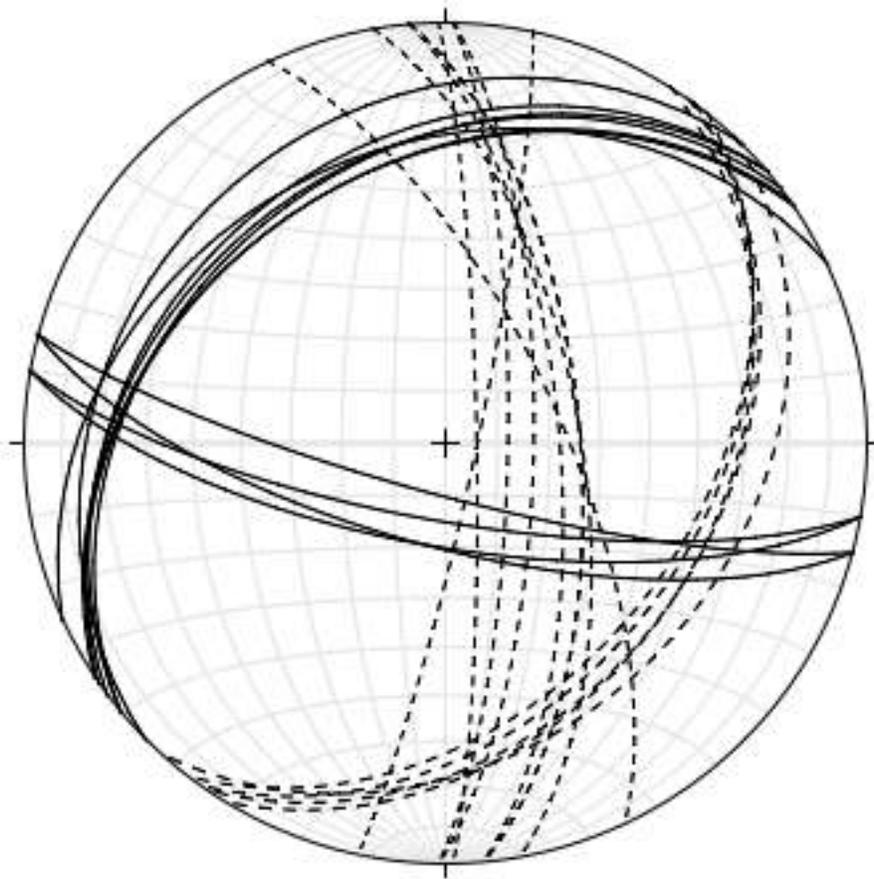


Figura 30. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 3 familias de discontinuidades que conforman el sitio El Refugio II. Línea punteada representan los planos de estratificación.

Con el graficado de los polos en una red estereográfica fue posible determinar aquel que representa para cada familia de discontinuidades (Figura 31A), resultando una orientación e inclinación de: Familia 1 = $12.5^\circ/13.3$; Familia 2 = $143.8^\circ/59.1^\circ$, Familia 3 = $276.3^\circ/32.5^\circ$

En la Figura 31B se muestra el vector principal de los polos y el plano derivado del conjunto de diaclasas que caracterizan al sitio El Refugio II, los datos que los caracterizan son los siguientes:

-Familia 1: 102.5° SW 73.7°

-Familia 2: 233.8° NE 30.9°

-Familia 3: 6.3° SE 57.5°

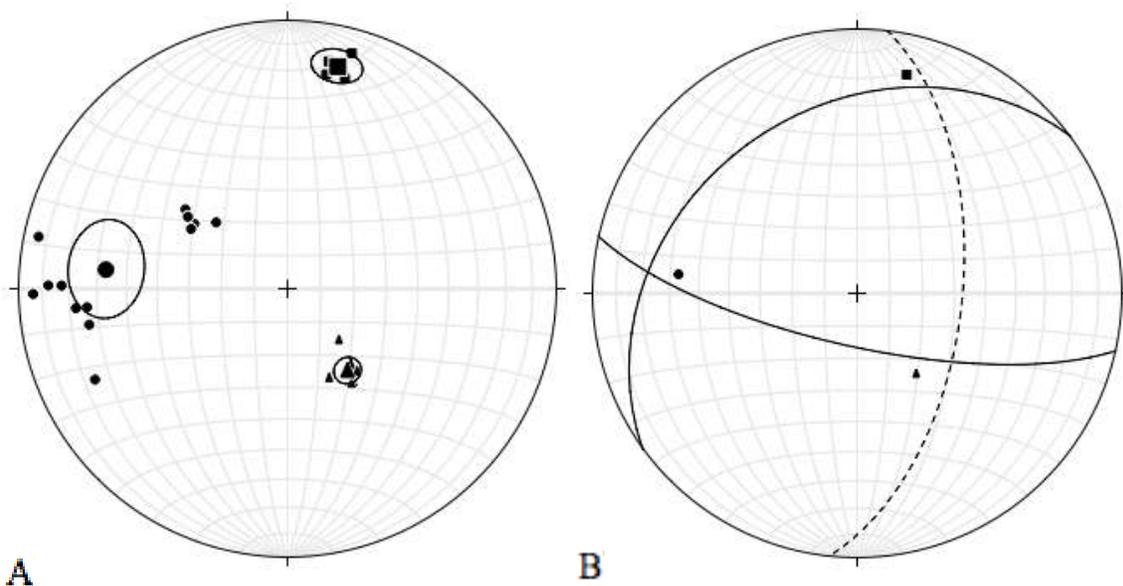


Figura 31. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de diaclasas principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

A partir de los resultados en la identificación de los 3 planos principales de la Figura 31B, se determinaron los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que presentan cada una de las familias de diaclasas, dando los siguientes datos:

Familia 1 y 2: 276°/22°

Familia 1 y 3: 126°/53°

Familia 2 y 3: 19°/19°

V.V. Sitio Margarito Gracia

El macizo rocoso en este sitio está representado por el afloramiento de 2 capas de arenisca de grano medio a grueso de color gris verdoso en superficie fresca y gris parduzco en superficie intemperizada, con estratificación gruesa (1.20 m), las cuales se intercalan con estratos de lutitas fósiles de color pardo rojizo a pardo verdoso en superficie fresca, y con un espesor promedio de 40 cm (Figura 32). La longitud del afloramiento fue de 12 m con una inclinación de 5° al azimut 190°. La altura del afloramiento es de 3.80 m.



Figura 32. Afloramiento dominado por 2 capas de arenisca y un estrato de lutita en el sitio Margarito Gracia, y las diferentes familias de discontinuidades en este sitio (A).

Se midieron un total de 14 datos estructurales de todas las familias de discontinuidades observadas de manera visual dentro del sitio (Figura 33A). A partir de analizar el diagrama de rosetas para los datos obtenidos, se observó que las 3 familias principales tiene la

siguiente orientación: Familia 1: 120°-130°, Familia 2: 245°-250°, y Familia 3: 35°-45° (Figura 33B).

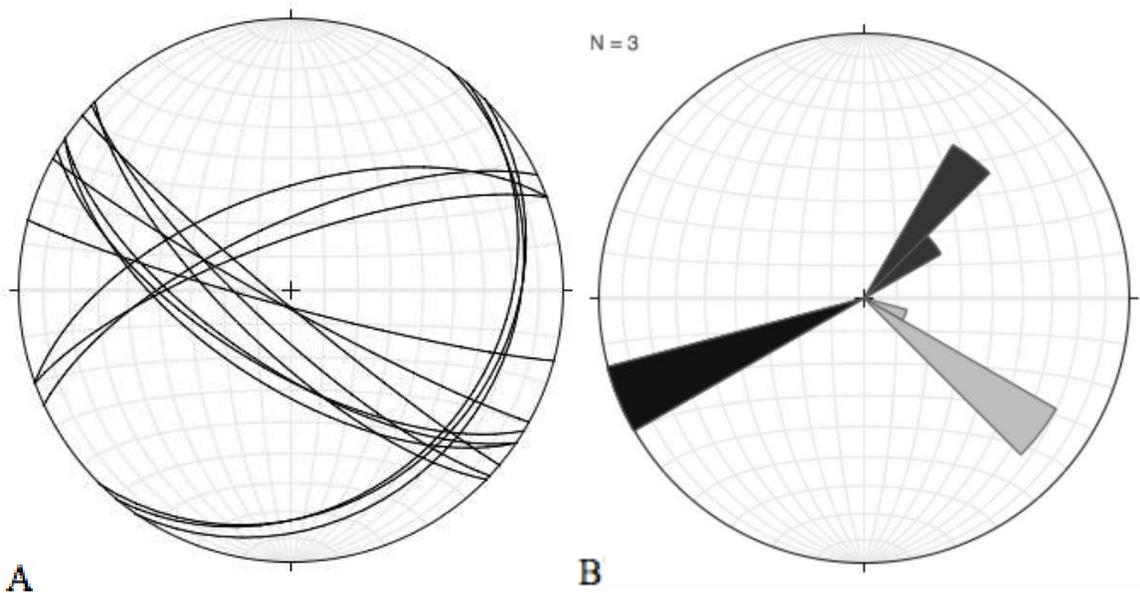


Figura 33. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio Margarito Gracia. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en este sitio.

En base de analizar el diagrama de roseta se determinaron 3 grupos de familias principales que caracterizan al sitio Margarito Gracia (Figura 34), las características que presentan son las siguientes:

- La Familia 1 pertenece a diaclasas que presentan rangos de azimut entre 119° y 134°, con un echado que presenta rangos entre 62° y 86° al SW: muestran superficies onduladas ligeramente rugosas (wm), muestran aberturas de 1 mm, un espaciamiento promedio de 30 cm, y una extensión máxima de 80 cm.
- La Familia 2 corresponden a diaclasas con rumbos azimutales que rondan los 250°, con echados que varían de 60° a 75° al NW, presentan superficies onduladas

ligeramente rugosas con aberturas de 1 mm, un espaciamento promedio de 30 cm, y una extensión de 50 cm en promedio.

- La Familia 3 corresponde a los planos de estratificación, cuyo rumbo tienen un azimut entre los 35° y 45° , con un echado que va desde 20° a 25° al SE: tienen superficies planas ligeramente rugosas (pm), no presentan aberturas, presentan espaciamentos que van de los 50 cm hasta 1.50 m, presentan extensiones de 4.60 m.

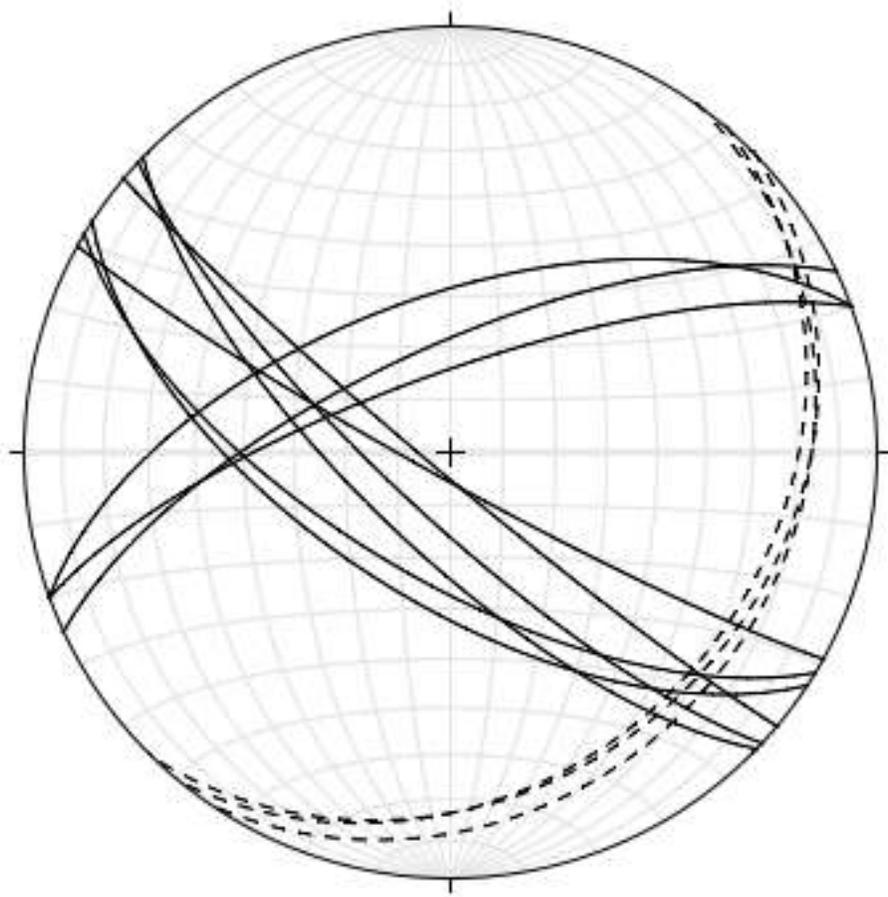


Figura 34. Diagrama de red de Schmidt que muestra las 14 datos estructurales de las familias de discontinuidades en el sitio Margarito Gracia. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.

Se obtuvo el vector principal que determina la actitud promedio de cada familia a partir de graficar los polos (Figura 35A), resultando una orientación e inclinación de: Familia 1 = $36.7^\circ/15.2^\circ$; Familia 2 = $158.3^\circ/21.7^\circ$; Familia 3 = $310.2^\circ/67.4^\circ$.

En la Figura 35B se aprecian los polos y el plano derivado de las diaclasas que caracterizan al sitio, los datos estructurales son:

-Familia 1: 126.7° SW 74.8°

-Familia 2: 248° NW 68.3°

-Familia 3: 40.2° SE 22.6°

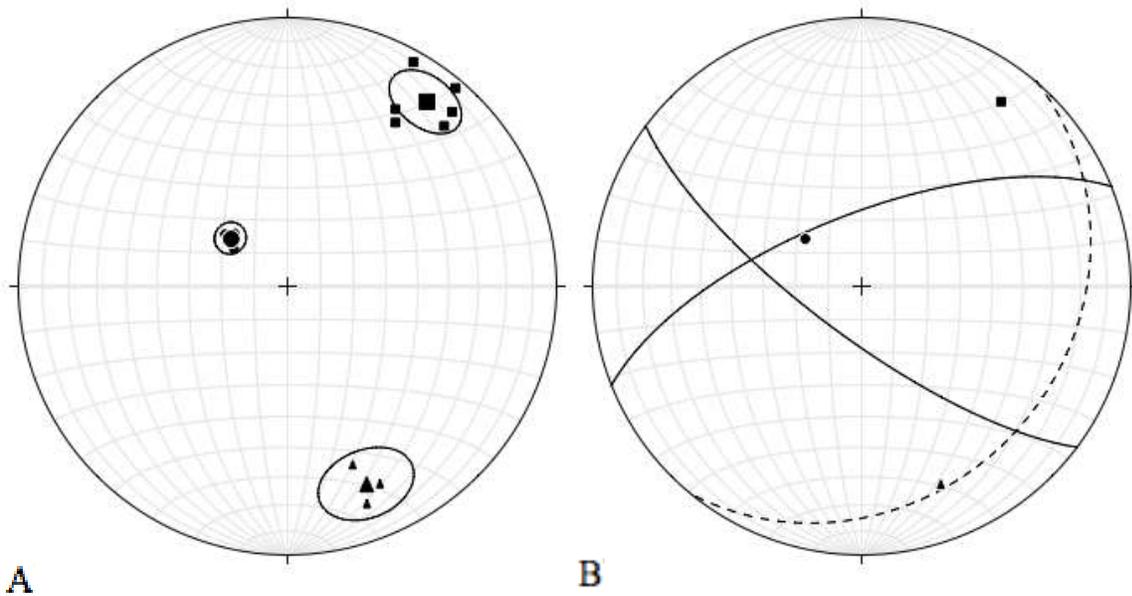


Figura 35. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de discontinuidades principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

Se obtuvo los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que presentan cada una de las familias de diaclasas dando los siguientes datos:

Familia 1 y 2: 283°/56°

Familia 1 y 3: 133°/23°

Familia 2 y 3: 65°/9°

V.VI. Sitio Mina Sentimiento I

El macizo rocoso en esta localidad consiste de un afloramiento de estratos gruesos de arenisca de grano grueso de color gris verdoso en superficie fresca y color pardo en superficie de intemperismo, las cuales se encuentran intercaladas con lutitas de color pardo y lutitas carbonosas con una fisilidad muy bien desarrollada (Figura 36). La longitud del afloramiento fue de 14 m distribuida en 3 segmentos, el primero 7 m, el segundo 4 m y el tercero 3 m. La altura promedio del afloramiento es de 2 m.

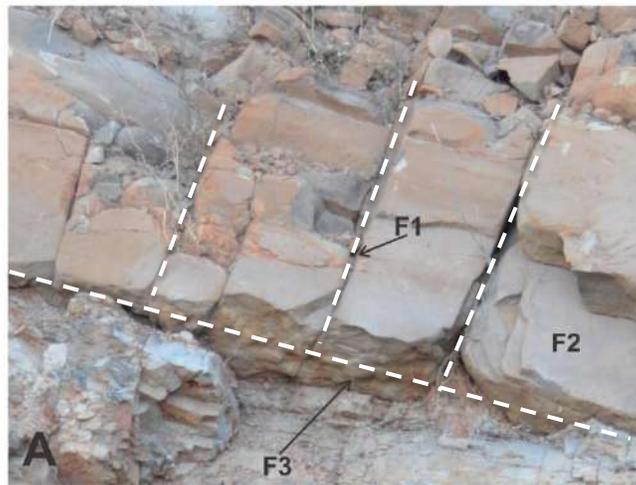


Figura 36. Afloramiento del segmento 1 en el sitio Mina Sentimiento I donde se muestra una capa gruesa de lutitas carbonosas en la base y de areniscas en la parte superior, así como también una obra minera abandonada (esquina inferior izquierda de la fotografía). En (A) se muestran las diferentes familias de discontinuidades identificadas en este sitio.

Dentro de este sitio se tomaron un total de 32 datos estructurales de las diferentes familias observadas de manera visual (Figura 37A). A partir de observar el diagrama de rosetas para

los datos obtenidos, se observó que las 3 familias principales tienen la siguiente orientación: Familia 1: 164°- 178°, Familia 2: 240°-°, y la Familia 3: 10°-35° (Figura 37B).

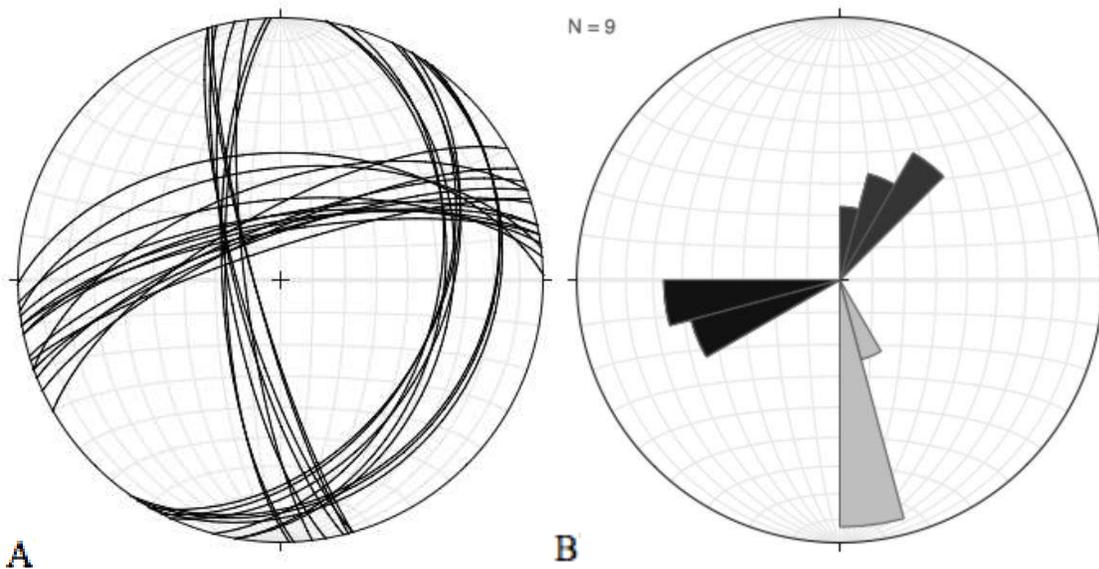


Figura 37. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio Mina Sentimiento I. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en este sitio.

Con el análisis del diagrama de roseta se determinaron 3 familias principales que caracterizan al sitio Sentimiento II (Figura 38), y cuyas características que las conforman son las siguientes:

- La Familia 1 corresponde a diaclasas con rangos de azimut entre 164° y 178°, con echados que van desde 72° hasta 82° al SW: muestran superficies planas ligeramente rugosas y onduladas ligeramente rugosas (pm, wm), presentan aberturas promedios de 1 mm, un espaciamiento de 30 cm en promedio, y extensiones de 1.30 m.

- La Familia 2 corresponde a diaclasas con rumbo azimutal de 240° y 269° , con un echado promedio de 70° al NW: muestran superficies onduladas ligeramente rugosas y onduladas rugosas (wm, wr), presenta aberturas de 1mm, un espaciamiento promedio de 30 cm, y una extensión de 1.50 m.
- La Familia 3 corresponde a los planos de estratificación, cuyo rumbo tienen azimut entre los 10° y 35° al SE: muestran superficies planas ligeramente rugosas (pm), una abertura promedio de 1 mm, un espaciamiento de 1.20 m, y extensiones de 5 m.

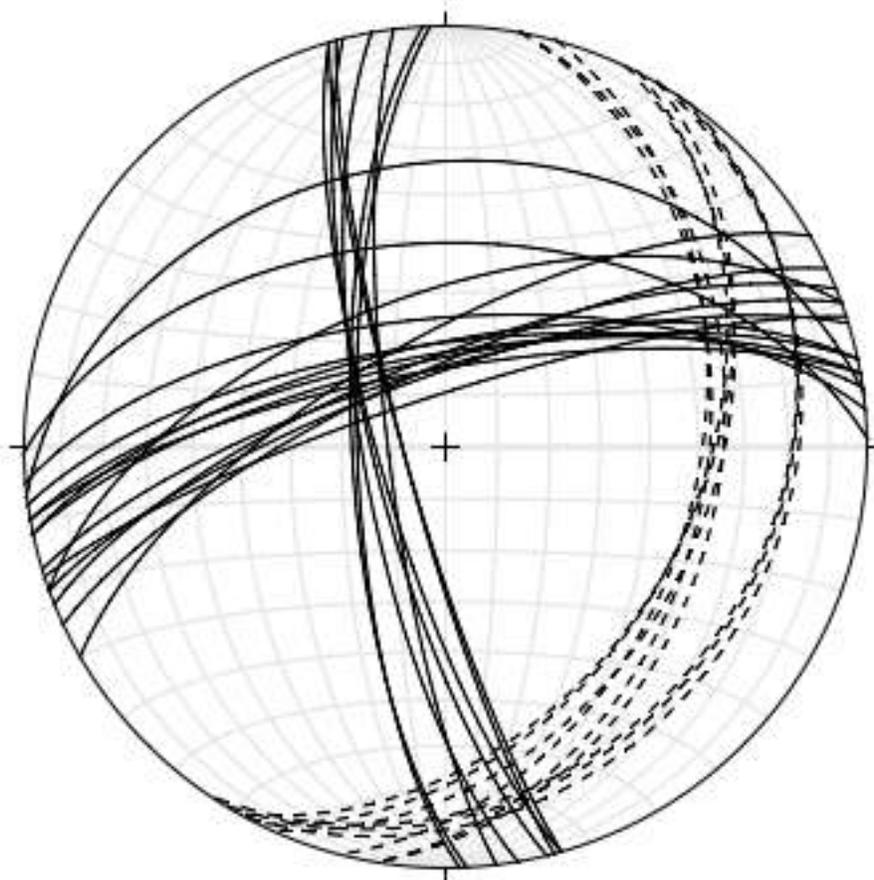


Figura 38. Diagrama de red de Schmidt que muestra las direcciones de las familias de diaclasas en el sitio Mina Sentimiento I. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.

Se obtuvo el vector principal que determina la actitud promedio de cada familia a partir de graficar los polos (Figura 39A), resultando una orientación e inclinación de: Familia 1 = $79.6^\circ/13.2^\circ$; Familia 2 = $165.1^\circ/22.3^\circ$; Familia 3 = $292.7^\circ/57.5^\circ$.

En la figura 39B se aprecian los polos y el plano derivado de las diaclasas que caracterizan al sitio, los datos estructurales son:

-Familia 1: 169.6° SW 76.8°

-Familia 2: 255.1° NW 67.7°

-Familia 3: 22.7° SE 32.5°

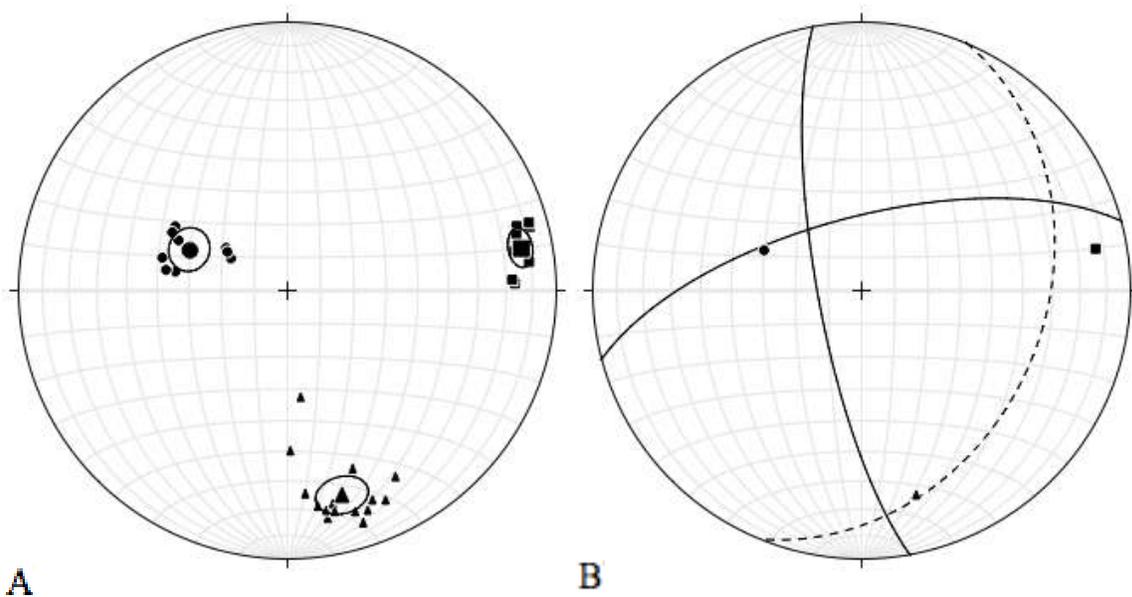


Figura 39. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de discontinuidades principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

Así mismo se obtuvieron los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que presentan cada una de las familias de discontinuidades, dando los siguientes datos:

Familia 1 y 2: $319^{\circ}/66^{\circ}$

Familia 1 y 3: $174^{\circ}/17^{\circ}$

Familia 2 y 3: $65^{\circ}/23^{\circ}$

V.VII. Sitio El Tonelada

Este sitio está representado por un macizo rocoso de areniscas de grano medio a grueso de color gris verduzco en superficie fresca y pardo con tonalidades rojizas en superficie intemperizada, tiene un espesor aproximado de 2 m, se encuentra en contacto con lutitas de color verde oscuro a pardo rojizo en superficie intemperizada, presentan una gran fisilidad y tienen un espesor aproximado de 2 m (Figura 40). El afloramiento tiene una altura promedio de 4 m y una longitud de 7 m.

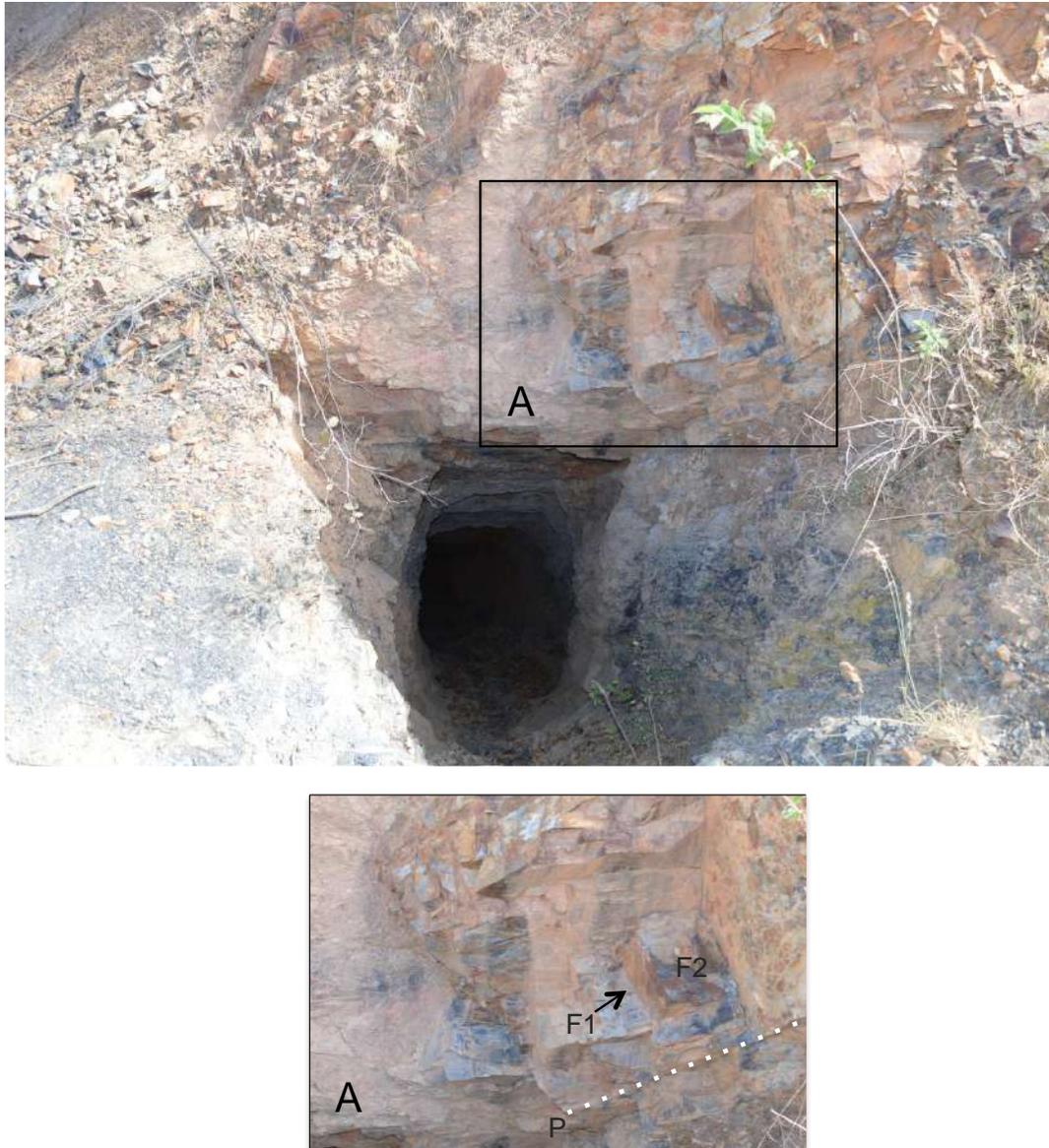


Figura 40. A) De manera general se observan dos familias de diaclasas (F1, F2), los planos de estratificación (P) que se indica por la línea punteada indica el contacto entre la arenisca y la lutita.

Dentro de este sitio se reconocieron 30 datos estructurales que corresponden a las diferentes familias de diaclasas, dichas estructuras se reconocieron de manera visual para después ser medidas (Figura 41A). Se lograron identificar 3 familias de diaclasas llevando a cabo el análisis del diagrama de rosetas como se muestra en la Figura 41B, en la cual se reconocieron las principales direcciones que presentan los planos para el sitio El Tonelada,

las orientaciones dominantes son: Familia 1: 142° - 235° , Familia 2: 265° - 298° , Familia 3: 5° - 55° .

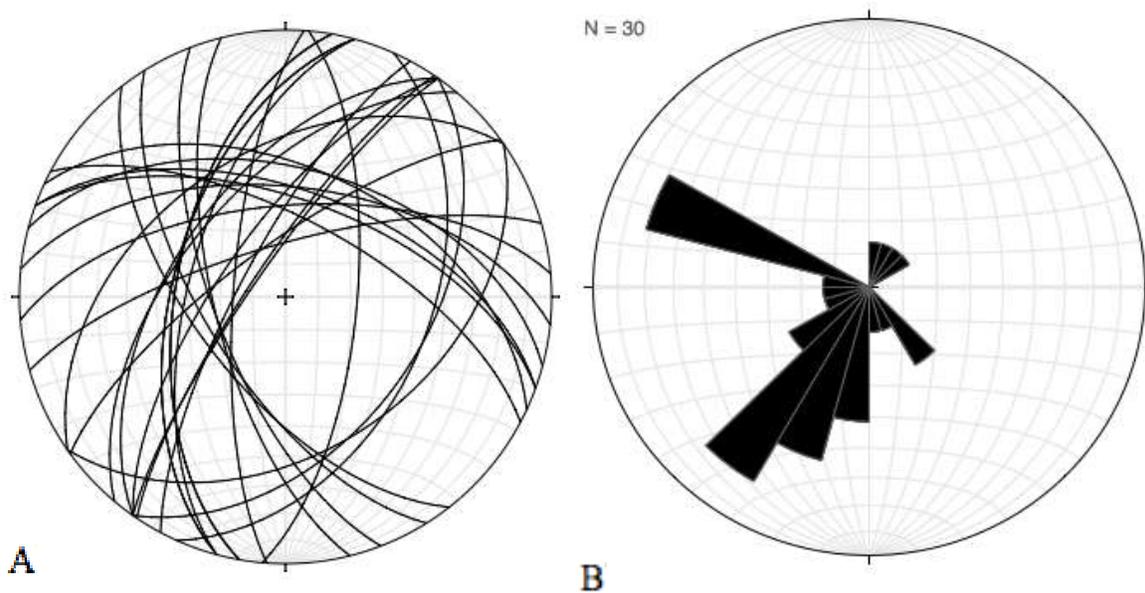


Figura 41. A) Diagrama de redes que muestra los planos obtenidos en el sitio El Tonelada. B) Diagrama de roseta en el cual se observan las orientaciones de los planos medidos en este sitio.

Para el sitio El tonelada se determinaron 3 familias principales de estructuras en base al diagrama de roseta (Figura 42), las cuales presentan las siguientes características.

- La Familia 1 pertenece a diaclasas cuyo rumbo tiene un azimut promedio de 190° , con un echado que varía de 45° a 80° al NW-SW: muestran un espaciamiento promedio de 30 cm, una extensión promedio de 1 m, una abertura promedio de .5 mm, y superficies planas ligeramente rugosas (pm).
- La Familia 2 corresponden a diaclasas con rumbo azimutal con un rango de 265° a 298° y con un echado que varía 50° y 66° al NE: presentan superficies planas ligeramente rugosas (pm), una abertura promedio de .5 mm, espaciamiento promedio de 1 m, y una extensión de 1 m en promedio.

- La Familia 3 corresponde a planos de estratificación, cuyo rumbo tiene un rango de azimut máximo de 55° con un echado que va de 42° a 68° al SE: presentan superficies planas ligeramente rugosas (pm), con una abertura de .5 mm, espaciamiento promedio de 50 cm, y una extensión de 3 m.

En la Figura 43A se tienen los polos y el plano derivado de las discontinuidades que caracterizan al sitio a partir del vector principal que determina la actitud promedio de cada familia, resultando una orientación e inclinación de: Familia 1 = $103.3^\circ/28.8^\circ$; Familia 2 = $194^\circ/33.2^\circ$; y Familia 3 = $297.6^\circ/41.3^\circ$ (Figura 43B).

En la Figura 43B se aprecian los polos y el plano derivado de las diaclasas que caracterizan al sitio, los datos estructurales son:

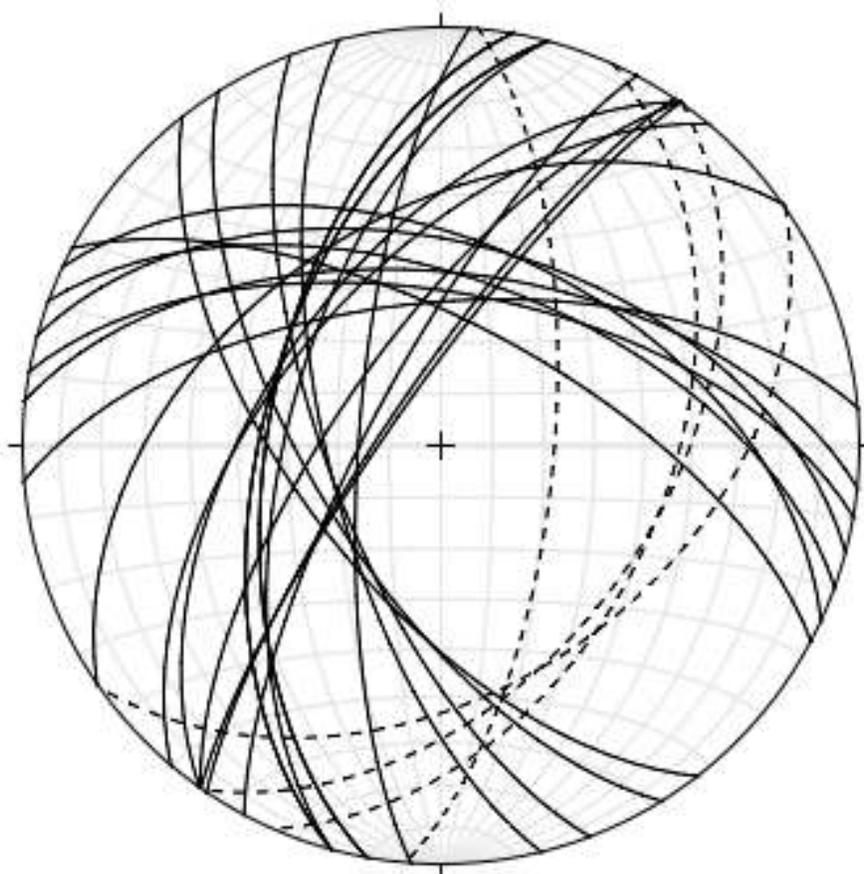


Figura 42. Diagrama de red de Schmidt que muestra las direcciones de las familias de diaclasas en el sitio El Tonelada. Línea punteada corresponde al plano de estratificación.

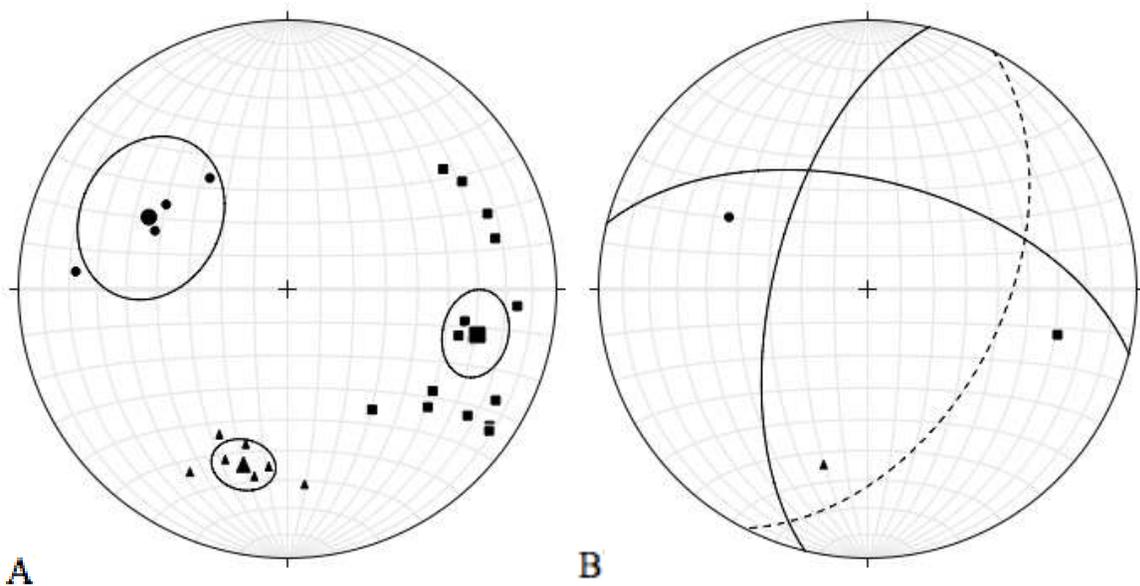


Figura 43. A) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los polos de las 3 familias de discontinuidades principales así como su polo principal. B) Diagrama de Schmidt donde se aprecian los planos de las 3 familias de principales así como su polo principal. Cuadrados = Familia 1, triángulos = Familia 2, círculos = plano de estratificación.

-Familia 1: 193.3° NW 61.2°

-Familia 2: 284° NE 56.8°

-Familia 3: 27.6° SE 48.7°

Se obtuvieron también los valores de orientación e inclinación de las intersecciones que presentan cada una de las familias de diaclasas dando los siguientes datos:

Familia 1 y 2: $334^{\circ}/80^{\circ}$

Familia 1 y 3: $199^{\circ}/10^{\circ}$

Familia 2 y 3: $73^{\circ}/39^{\circ}$

VI. RESULTADOS

El análisis de los diferentes estereogramas de la red de Schmidt permitió establecer 3 diferentes familias que representan al conjunto de discontinuidades mayores que afectan los macizos rocosos estudiados en los sitios dentro de la zona carbonífera de San Javier. En este apartado se mencionan las características de las intersecciones de discontinuidades, dado que es un punto muy importante al momento determinar su estabilidad cuando se desarrollan obras civiles en macizos rocosos. Por otro lado, también se incluye la clasificación JGS para los macizos rocosos estudiados que se obtuvo a partir de analizar sus características geotécnicas.

Para el sitio El Tonelada se tienen dos familias que corresponden a diaclasas, mientras que la Familia 1 tiene una dirección de 193.3° y buzamiento de 61.2° al NW, la Familia 2 está orientada al azimut 284° y un buzamiento de 56.8° al NE. La Familia 3 corresponde a los planos de estratificación de la secuencia detrítica de la Formación Santa Clara y tiene una dirección de 27.6° y un buzamiento de 48.7° al SE. La obtención de las intersecciones entre estas familias permitió establecer que aquella entre las familias 1 y 2 es que presenta la mayor inclinación (80°) hacia el NW (Tabla 2).

Tabla 2. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio El Tonelada.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	334°	80°
Familia 1 y 3	199°	10°
Familia 2 y 3	73°	39°

El macizo rocoso en el sitio El Refugio está conformado por 3 familias de discontinuidades, la Familia 1 tiene una dirección de 143.9° y un buzamiento de 65.7° al SW, mientras que la Familia 2 tiene una dirección de 248.3° y un buzamiento de 57.6° al NW. La Familia 3 que representa el plano de estratificación tiene una orientación de 27.7° y un buzamiento de 45° al SE. La intersección entre dos planos en la cual se tiene el valor más alto de inclinación entre dos familias de diaclasas, está dada por la intersección de las familias 1 y 2 (Tabla 3).

Tabla 3. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio El Refugio.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	293°	48°
Familia 1 y 3	162°	35°
Familia 2 y 3	53°	23°

Para el sitio La Pizarrina se obtuvo que las diaclasas corresponden a la Familia 1 con dirección preferente de 121.2° y un buzamiento de 76.7° al SW, y a la Familia 2 que tiene una dirección 223° y un buzamiento de 59.1° al NW. Los planos de estratificación (Familia 3) presentan una dirección de 27.5° y un buzamiento de 37.7° al SE. La inclinación mayor en lo que se refiere a las intersecciones entre planos está dada por las familias 1 y 2 con 55° (Tabla 4).

Tabla 4. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio La Pizarrina.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	281°	55°
Familia 1 y 3	132°	37°
Familia 2 y 3	38°	08°

En el sitio San Agustín la Familia 1 tiene una dirección de 176.9° y un buzamiento de 59.6° al SW, y la Familia 2 se orienta al azimut 303.4° y con echado de 59.9° al NE,

ambas representando a diaclasas en el macizo rocoso. La Familia 3 tiene una dirección de 58.2° y un buzamiento de 39° al SE. La intersección entre dos planos en la cual se tiene el valor más alto de inclinación entre dos familias de diaclasas está dada por la intersección de las familias 1 y 2 (Tabla 5).

Tabla 5. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio San Agustín.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	330°	38°
Familia 1 y 3	196°	29°
Familia 2 y 3	103°	31°

En el sitio Sentimiento I, el plano resultante de la familia 1 tiene una dirección de 169.6° y un buzamiento de 76.8° al SW, mientras que la familia 2 tiene una dirección de 255.1° y un buzamiento de 67.7° al NW. Los planos de estratificación que corresponden a la familia 3 presentan una dirección de 22.7° y un buzamiento de 32.5° al SE. La intersección entre dos planos que presenta el valor más alto de inclinación es entre las familias de diaclasas 1 y 2 (Tabla 6).

Tabla 6. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio Sentimiento I.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	319°	66°
Familia 1 y 3	174°	17°
Familia 2 y 3	65°	23°

Margarito Gracia está conformado por tres familias de discontinuidades, la primera de las cuales corresponde a la Familia 1 con un plano de dirección preferente de 126.7° y buzamiento de 74.8° al SW, la Familia 2 tiene una dirección de 248° con buzamiento de 68.3° al NW, y la tercer Familia, que corresponde al plano de estratificación, tiene una dirección de 40.2° y un buzamiento de 22.6° al SE. La Intersección entre dos planos en la

cual se tiene el valor más alto de inclinación entre dos familias de diaclasas es de 56°, y está dada por la intersección de la familia 1 y 2 (Tabla 7).

Tabla 7. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio Margarito Gracia.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	283°	56°
Familia 1 y 3	133°	23°
Familia 2 y 3	65°	9°

El macizo rocoso en el sitio Refugio II está representando por 3 familias de discontinuidades, la Familia 1 tiene una dirección de 102.5° y un buzamiento de 73.7° al SW, la Familia 2 tiene una dirección de 233.8° con buzamiento de 30.9° al NW, y la Familia 3 tiene una dirección de 6.3° con buzamiento de 57.5° al SE. Las familias 1 y 3 forman la intersección con el valor de inclinación más alto con 53° (Tabla 8).

Tabla 8. Intersecciones entre familias de discontinuidades en el sitio El Refugio II.

Intersección entre familias	Dirección de la inclinación	Inclinación
Familia 1 y 2	276°	22°
Familia 1 y 3	126°	53°
Familia 2 y 3	19°	19°

El Análisis de los parámetros geotécnicos determinados en los diferentes macizos rocosos dentro de la zona de estudio, permitió establecer mediante el sistema JGS una clave de nomenclatura que aporta de una manera general, información que eventualmente puede ser útil para futuros trabajos ingenieriles (Tabla 9).

Tabla 9. Nomenclatura JGS para los sitios muestreados.

Sitio	Clave Arenisca	Clave Lutita
El Tonelada	HM-BII/w3n3a3rpmf1	HF-CII/w3n3a3rpmf1
Refugio II	HM-BV/w3n3a1rpmf1	HF-CV/w3n3a1rpmf1
San Agustín	HM-BIII/w3n3a4rpsf1	HF-CIII/w3n3a4rpsf1
El Refugio	HM-BII/w3n3a4rpmf1	HF-CII/w3n3a4rpmf1
Margarito Gracia	HM-BIII/w3n3a4rwmf1	HF-CIII/w3n3a4rwmf1
Pizarra	HM-BIII/w3n3a4rwmf1	HF-CIII/w3n3a4rwmf1
Sentimiento I	HM-BIII/w3n3a4rwmf1	HF-CIII/w3n3a4rwmf1

La justificación del uso de la clasificación de los macizos rocosos esta en base de sus características fundamentales con las cuales se determina específicamente el ambiente del macizo rocoso. La aplicación de los resultados de la clasificación JGS puede ser usada para entender el estado actual del macizo rocoso, compartir información acerca del macizo rocoso a diferentes campos de la ingeniería, estimar las propiedades geotécnicas en investigaciones preliminares para determinar el diseño de parámetros y para determinar análisis de modelos. En la figura 44 se muestran los sitios con las nomenclaturas JGS obtenidas.



El Refugio



El Refugio II



El Tonelada



San Agustín



Margarito Gracia



Sentimiento I



La Pizarrina

Figura 44. Nomenclatura JGS para los sitios muestreados.

Si bien es cierto que la mayoría de las discontinuidades están dominadas por diaclasas y los planos de estratificación en las unidades litológicas de la Formación Santa Clara, también se encuentran fallas normales con desplazamientos menores a los 80 cm afectando los macizos rocosos. Dichas estructuras se contemplaron como parte de las discontinuidades totales en cada uno de los sitios estudiados.

En el sitio La Pizarrina se identificaron dos fallas, una con rumbo de 120° a 160° (NW-SE) y buzamientos de 40° a 80° grados hacia el SW; la otra estructura tiene una dirección de 85° (ENE) con un echado de 65° hacia el SSE.

Para el sitio Margarito Gracia la falla medida tiene una dirección 124° (NW-SE) con una inclinación de 67° hacia el SW. Mientras que en El Refugio, las fallas que afectan al macizo rocoso tienen las siguientes orientaciones y echados: a) 100° a 138° (NW-SE) con inclinación de 62° a 78° hacia el SW, b) 260° (NE-SW) con el echado de 80° hacia el NW, c) 85° (NEE-SWW) e inclinación 86° hacia el SSE, d) 276° (NWW-SEE) con inclinación 58° hacia el NNE.

En el sitio San Agustín se encontró una falla con dirección 135° (NW-SE) con una inclinación de 70° hacia el SW; y para el sitio El tonelada, se tiene una estructura con dirección 234° (NE-SW) y echado de 74° hacia el NW.

VII. CONCLUSIONES

Solo el sitio El Tonelada presenta un cambio de actitud en el buzamiento en la Familia 1, la cual presenta un echado al NW, mientras que los demás sitios presentan un buzamiento al SW. Los sitios presentan un rango de buzamiento que va desde 59.6° hasta 76.8° .

La mayoría de los sitios presentan un buzamiento al NW en la Familia 2, mientras que los sitios El Tonelada y San Agustín son los únicos que presentan un buzamiento al NE. Presentan un rango de inclinación que va de 30.9° a 68.3° .

La Familia 3 de todos los sitios tienen un buzamiento al SE, esta familia es la que representa el plano de estratificación, tiene un rango de buzamiento que va de 22.6° a 57.5° .

El sitio Refugio II es el sitio que presenta el plano con el grado de inclinación más alto (57.5°) mientras que el sitio Margarito Gracia presenta el plano con el grado de inclinación más bajo (22.6°) para la Familia 3.

Para la Familia 1 se tiene que los sitios Sentimiento I y La Pizarrina presentan planos con grado de inclinación alto (76.8° y 76.7°), mientras el sitio San Agustín es el que presenta el plano con menor grado de inclinación (59.6°).

Para la Familia 2 se tiene que el sitio El Refugio II tiene el plano con el menor grado de inclinación (30.9°) mientras que los sitios Sentimiento I y Margarito Gracia tienen los planos con el mayor grado de inclinación (67.7° y 68.3°), respectivamente.

El análisis de los diagramas estereográficos (Figura 45) permitió establecer similitudes en el comportamiento de las direcciones en las familias de diaclasas de los diferentes macizos rocoso de la zona de estudio, de las cuales se dedujeron las siguientes conclusiones (Tabla 10)

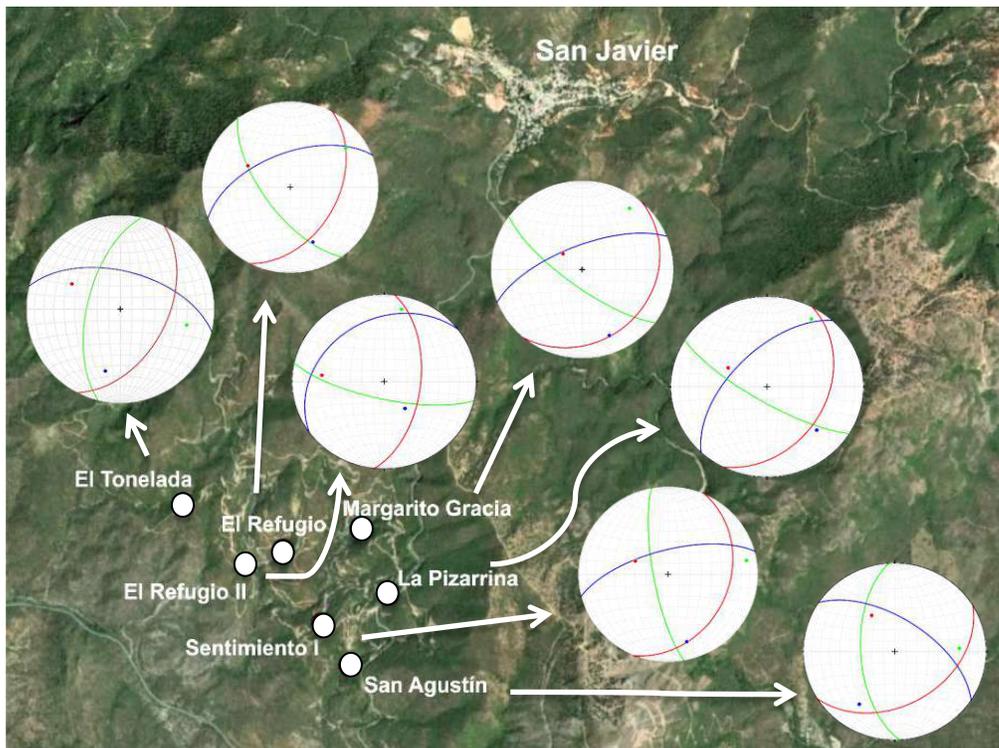


Figura 45. Diagramas estereográficos de los macizos rocosos estudiados en la zona carbonífera de San Javier.

Tabla 10. Comportamiento de las direcciones de las familias de diaclasas en los sitios.

Familia	SW	NW	NE	SE
Familia 1	El Refugio, La Pizarrina, El Refugio II, San Agustín, Sentimiento I, Margarito Gracia	El Tonelada.		
Familia 2		El Refugio, Sentimiento I, Margarito Gracia, La Pizarrina, Refugio II.	El Tonelada y San Agustín	
Familia 3				Todos los sitios se encuentran buzando al SE

Los sitios La Pizarrina, Margarito Gracia, San Agustín y El Refugio, presentan fallas que están inclinadas hacia el SW, con rangos de dirección que van de 100 ° a 160°. Las fallas en estos sitios y la Familia 1 tienen direcciones similares en el buzamiento hacia el SW.

Los sitios El Tonelada y El Refugio presentan fallas que buzando hacia el NW, con direcciones de 234° y 260° inclinación promedio de 77°. La falla en el sitio tonelada puede estar relacionada con la Familia 2 de diaclasas.

Los macizo rocosos de la Pizarrina y El Refugio presentan fallas con una dirección promedio de 80°, se encuentran inclinadas hacia el SE con rangos de 74° y 86°.

VIII. REFERENCIAS CITADAS

- Abril, E.G., 2010. Macizos rocosos. Cátedra de Geotecnia I: Cuadernos Didácticos de Geotecnia. Laboratorio Área Geotecnia (GeoLab), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina – Serie I - No3.
- Alencaster, G., 1961, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte norte central del estado de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 11, p. 1–18.
- Barrera, E. y Domínguez, J.E., 1987, Geología de la carta Tónichi (H12D65) con énfasis en el Paleozoico porción central del Estado de Sonora: Hermosillo, Sonora. México, Universidad de Sonora, tesis, 93 pp.
- Bartolini, C., 1988, Regional structure and stratigraphy of the Sierra El Aliso. Central Sonora, Mexico: Tucson, University of Arizona. MS thesis, 189 p.
- Bartolini, C., Stewart, J.H, Carter, C., Murchey, B.L. y Repetski, J.E, 1989, Stratigraphy of Paleozoic eugeoclinal strata in Sierra El Aliso, central Sonora, Mexico: Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, Segund Época, V.6, Nos. 1 y 2, p. 11-21
- Bartolini, C., Moraes, M., Damon, P. y Shafiqullah, 1991, Geology and geochronology of the sierra Lista Blanca, central Sonora, Mexico: a progress report: Universidad de Sonora, boletín del Departamento de Geología, V.8, No. 1, p. 1-5.
- Bell, F.G., 2007, Engineering Geology (2da. Ed.): Elsevier, 581 pp.
- Burckhardt, C., 1930. Etude synthétique sur le mésozoïque Mexicain première partie; Soc. Paleont. Suisse Mem, Vol. 49, p. 39-42.
- Barton, N. R., Lien, R. y Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support: Rock Mech. V.6, No.4, p.189-239.
- Bieniawski, Z. T., 1976. Rock mass classification in rock engineering: Proc. of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, No.1, p.97-106.
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M.E., Piedad-Sanchez N., Ferrusquía-Villafranca I., 2006, Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón en México. Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario Tomo LVII, Núm. 4, p. 141-160.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983, El batolito Laramide (90 40 Ma) de Sonora, en XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Guadalajara, Jalisco Jal.: México, p. 63-95.
- Deere, D.U., 1968, Geologic Considerations (Chapter 1), en Stagg, K. y Zienkiewics, O. (eds), Rock Mechanics in Engineering Practice: Wiley, New York, 442 pp.

- Dumble, E.T., 1900, Notes on the geology of Sonora, Mexico: Transactions of the Society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), v. 29, p. 122–152.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, núm. 3, p. 343-378.
- González-León, C.M., Valencia, V., López, M., Bellon, H., Valencia Moreno, M.A., Calmus, T., 2010, The Arizpe sub-basin: sedimentary and magmatic evolution of the Basin and Range in north-central Sonora, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 27, p. 292-312.
- Henry, C.D., Aranda-Gómez, J.J., 2000, Plate interactions control middle late Miocene proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range: Tectonophysics, v. 318, p. 1–26,
- King, R.E., 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental: Geological Society of America Bulletin, V.50, p. 1625-1722.
- McDowell, F. W., Keizer, R. P., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, Mexico: Geological Society of America Bulletin, V.88, p. 1479-1487.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, V. 113, p. 521–531.
- Montijo-Contreras, O.; 2007. Estratigrafía y Depósitos de Grafito del Grupo Barranca, Área La Lourdes-La Cumbre; La Colorada, Sonora, México. U.N.A.M., Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste. Tesis de Maestría, 87 pp.
- Osada, M., Funato, A., Yohionaka, R. y 13 autores más, 2005, Geotechnical description and JGS engineering classification system for rock mass: International Journal of the JCRM, V.1, No.1, p. 7-17.
- Poole, F.G., Perry, W.J., Madrid, R.J., Amaya-Martínez, R., 2005, Tectonic synthesis of the Ouachita- Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia—stratigraphic and structural implications for timing of deformational events and plate tectonic model, in Anderson, T.H.; Nourse, J.A.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B., eds., The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393, p. 543–596.

- Radelli, L., Menicucci, S., Mesnier, H., Calmus, T., Amaya-Martinez, R., Barrera, E., Domínguez, E., Navarro, L., Soto, L., 1987, Allochthonous Paleozoic bodies of Central Sonora: Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, V.4, p.1-15.
- Roldán-Quintana, J. and McDowell, F.W. (1992) The Báucarit Formation in the Rio Yaqui area, Municipality of Onavas, Sonora: El Paso Geological Society, Guidebook for the 1992 Field Conference, p. 223-228.
- Servicio Geológico Mexicano, 2004a, Carta Geológico-Minera Tecoripa H12-D64, Sonora: Secretaría de Economía, mapa
- Servicio Geológico Mexicano, 2004b, Carta Geológico-Minera Tónichi H12-D65, Sonora: Secretaría de Economía, mapa
- Silva-Pineda, A., 1961, Paleontología del Triásico Superior de Sonora; Parte II, Flora Fósil de la Formación Santa Clara (Cárnico) del Estado de Sonora: Revista Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Paleontología Mexicana 11, p. 1-36
- Soto, L. y Navarro, L., 1987, Geología de la carta Tecoripa (H12D64) porción este central del Estado de Sonora; nuevas contribuciones al Paleozoico: Hermosillo, Sonora, Mexico, Universidad de Sonora, thesis, 93 pp.
- Stewart, J. H., Roldán-Quintana, J., 1991, Upper Triassic Barranca Group; Nonmarine and shallow-marine rift-basin deposits of northwestern Mexico, en Pérez-Segura, E., Jacques-Ayala, C. (eds.), Studies of Sonoran geology: Geological Society of America, Special Paper, No.254, p. 19-36.
- Terzaghi, K., 1946. Rock defects and loads on tunnel support, en Proctor, R. y White, T. (eds.): Rock Tunneling with Steel Supports, Section 1, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, OH, p.15-99.
- Vidal-Solano J. R., Paz-Moreno F. A., Demant A., López-Martínez M., 2007, Ignimbritas hipercalinas del Mioceno medio en Sonora Central: revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo terciario, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 24, núm. 1, p. 47-67.
- Weber, R., Zambrano-García, A., y Amozurrutia-Silva, F., 1980, Nuevas contribuciones al conocimiento de la taflorea de la Formación Santa Clara (Triásico Tardío) de Sonora: Revista Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, V.4, No.2, p. 125-137.
- Weber, R. (1985) - Las plantas fósiles de la Formación Santa Clara (Triásico Tardío, Sonora, México). Estado actual de las investigaciones. In: R. Weber (Ed.). IIIer Congreso Latinoamericano de Paleontología, México. Simposio sobre floras del Triásico Tardío, su fitogeografía y paleoecología Memoria, México, p. 107-124
- Wilson, E.I., Rocha, S.V., 1949, Coal deposits of the Santa Clara district near Tonichi, Sonora, Mexico. U.S. Geological Survey Bulletin 962A, 80 pp.

Anexos

Anexo 1

El Tonelada								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
-	D	34	79 NW	pm	-	1 m	-	30 cm
-	D	85	62 NW	pm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	D	5	68 SE	pr	.5 mm	1 m	-	1 m
-	D	74	74 NW	pm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	PE	24	45 SE	pm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	PE	148	65 SE	pm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	PE	142	62 SE	pm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	F	54	74 NW	wm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	D	96	56 NW	pm	.5 mm	1 m	-	1 m
-	D	166	68 SE	pm	.5 mm	15 cm	-	1 m
-	D	159	68 SE	pm	1 mm	15 cm	-	1 m
-	D	28	76 NW	wm	1 mm	30 cm	-	1 m
-	D	4	74 NW	wm	1 mm	30 cm	-	1 m
1	D	35	70 NW	pm	1 mm	-	-	3 m
1	D	55	45 NW	pm	1 mm	-	-	3 m
1	D	35	80 NW	pm	1 mm	-	-	1 m
-	D	115	50 NE	-	-	-	-	-
-	D	118	66 NE	-	-	-	-	-
-	D	195	55 NW	-	-	-	-	-
-	D	190	56 NW	-	-	-	-	-
-	D	195	60 NW	-	-	-	-	-
-	D	195	55 NW	-	-	-	-	-
-	D	190	56 NW	-	-	-	-	-
-	D	110	57 NE	-	-	-	-	-
-	D	105	50 NE	-	-	-	-	-
-	D	110	60 NE	-	-	-	-	-

-	D	40	57 NW	-	-	-	-	-
-	D	35	55 NW	-	-	-	-	-
-	PE	55	42 SE	-	-	-	-	-
-	PE	35	46 SE	-	-	-	-	-

Refugio Cerrado 2								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
-	D	175	64 NE	pm	-	5 cm	-	2 m
-	D	175	64 NE	pm	-	10 cm	-	2 m
-	D	1	73 NE	pm	-	5 cm	-	3 m
-	D	175	68 NE	pm	-	5 cm	-	2 m
-	D	170	64 NE	pm	-	5 cm	-	2 m
-	D	12	84 NE	pm	-	5 cm	-	1 m
-	D	155	68 NE	pm	-	12 cm	-	1 m
-	D	1	78 NE	pm	-	-	-	20 cm
-	D	179	84 NE	pm	-	-	-	1 m
1	D	105	70 SW	pm	-	-	-	-
1	D	105	80 SW	pm	-	-	-	-
1	D	100	75 SW	pm	-	-	-	-
1	D	100	70 SW	pm	-	-	-	-
2	D	5	65 NW	pm	-	-	-	-
2	D	5	80 NW	pm	-	-	-	-
-	D	65	30 NW	-	-	-	-	-
-	D	53	32 NW	-	-	-	-	-
-	D	50	30 NW	-	-	-	-	-
-	D	50	33 NW	-	-	-	-	-
-	D	55	35 NW	-	-	-	-	-
-	D	56	35 NW	-	-	-	-	-
-	D	45	22 NW	-	-	-	-	-

San Agustín								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
1	D	10	70 NW	pm	1 mm	15 cm	-	3 m
1	D	15	70 NW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
1	D	20	65 NW	pm	1 mm	15 cm	-	3 m
1	D	25	45 NW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
1	D	15	35 NW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
1	D	15	45 NW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
1	D	20	50 NW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
2	D	105	35 NE	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
1	D	10	45 NW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
2	D	172	80 SW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
2	D	160	85 SW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
2	D	160	80 SW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
3	PE	60	50 SE	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
4	D	145	65 NE	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
2	D	25	71 SE	ps	-	-	-	2 m
2	D	0	44 W	ps	-	50 cm	-	4 m
2	D	3	44 SW	ps	-	-	-	4 m
2	PE	63	62 SE	pm	.5 mm	-	-	11 m
2	D	10	58 SW	ps	-	30 cm	-	2 m
2	D	162	74 SW	ps	.5 mm	31 cm	-	1.30 m
2	D	5	55 SW	ps	.5 mm	32 cm	-	1.80 m
2	D	159	79 SW	ps	-	33 cm	-	1.70 m
2	D	136	74 SW	ps	-	34 cm	-	-
2	D	155	78 SW	pm	.5 mm	35 cm	-	1.80 m
2	D	154	89 SW	pm	-	-	-	1 m
2	D	80	41 NW	ps	-	30 cm	-	1m

2	D	98	44 NE	ps	-	30 cm	-	2 m
2	D	106	36 NE	ps	-	-	-	1 m
1	D	20	26 NW	ps	-	-	-	4 m
1	D	8	44 NW	ps	-	-	-	4 m
2	D	22	69 SE	ps	-	1.30 m	-	1 m
2	D	175	23 SW	ps	-	-	-	-
1	D	10	42 NW	ps	-	-	-	-
1	D	145	57 NE	ps	-	-	-	-
-	D	145	77 NE	ps	-	-	-	-
-	D	10	48 NW	ps	-	-	-	-
1	D	155	68 NE	ps	-	20 cm	-	4 m
-	D	140	64 NE	ps	-	-	-	4 m
-	D	166	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	175	75 SW	-	-	-	-	-
-	D	170	78 SW	-	-	-	-	-
-	D	110	87 SW	-	-	-	-	-
-	D	110	87 SW	-	-	-	-	-
-	D	100	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	110	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	115	83 SW	-	-	-	-	-
-	D	110	70 NE	-	-	-	-	-
-	D	120	71 NE	-	-	-	-	-
-	D	120	75 NE	-	-	-	-	-
-	D	155	75 SW	-	-	-	-	-
-	D	160	78 SW	-	-	-	-	-
-	D	115	75 NE	-	-	-	-	-
-	D	122	70 NE	-	-	-	-	-
-	D	120	78 SE	-	-	-	-	-
-	D	115	70 NE	-	-	-	-	-

-	PE	75	30 SE	-	-	-	-	-
-	PE	72	35 SE	-	-	-	-	-
-	PE	78	35 SE	-	-	-	-	-
-	PE	72	30 SE	-	-	-	-	-
-	PE	70	30 SE	-	-	-	-	-
-	PE	71	30 SE	-	-	-	-	-
-	PE	70	32 SE	-	-	-	-	-
-	PE	65	28 SE	-	-	-	-	-
-	PE	35	35 SE	-	-	-	-	-
-	PE	38	40 SE	-	-	-	-	-
-	PE	43	30 SE	-	-	-	-	-
-	PE	36	38 SE	-	-	-	-	-
-	PE	32	35 SE	-	-	-	-	-
-	F	135	70 SW	-	-	-	-	-

El Refugio								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
1	D	166	56 SW	pm	-	30 cm	-	2 m
1	D	168	56 SW	pm	-	60 cm	-	2 m
2	D	63	58 SW	wm	-	-	-	2 m
1	D	140	63 SW	pm	2 mm	30 cm	-	60 cm
1	D	127	59 SW	pm	-	30 cm	-	40 cm
2	D	58	70 NW	pm	-	30 cm	-	30 cm
2	D	55	58 NW	pm	-	-	-	-
-	PE	2	50 SE	pm	-	2 m	-	8 m
-	PE	9	38 SE	pm	1 mm	30 cm	-	8 m
-	PE	19	39 SE	wm	2 mm	30 cm	-	8 m
-	PE	10	45 SE	pm	1 mm	1 m	-	8 m
-	PE	19	54 SE	wm	1 mm	-	-	8 m

1	D	120	75 SW	pm	2 mm	40 cm	-	8 m
1	D	124	76 SW	wm	1 cm	30 cm	-	2 m
1	D	146	64 SW	pm	2 mm	50 cm	-	2 m
1	D	132	78 SW	pm	2 m	1 m	-	2 m
1	D	155	66 SW	pm	2 mm	-	-	2 m
2	D	87	54 N	pr	1 mm	1 m	-	2 m
2	D	94	59 NE	pm	1 mm	30 cm	-	180 cm
2	D	92	62 N	pr	1 mm	50 cm	-	2 m
2	D	100	82 NE	pm	1 mm	40 cm	-	3 m
2	D	93	86 NE	pm	-	30 cm	-	2 m
2	D	83	60 NE	pr	1 mm	30 cm	-	2 m
2	D	70	70 NW	pr	1 mm	20 cm	-	2 m
2	D	56	66 NW	pr	1 mm	40 cm	-	180 cm
2	D	64	78 NW	pr	-	15 cm	-	180 cm
2	D	65	63 NW	pr	-	50 cm	-	180 cm
2	D	96	48 N	pm	.5 mm	-	-	180 cm
1	D	143	61 SW	pr	.5 mm	40 cm	-	2.20 m
1	D	134	71 SW	wm	1 mm	1 m	-	2 m
1	D	156	65 SW	pr	2 mm	30 cm	-	2.40 cm
1	D	175	62 SW	pm	2 mm	30 cm	-	2.30 cm
1	D	162	70 SW	pr	2 mm	10 cm	-	2 m
1	D	161	70 SW	pr	1 cm	1 m	-	2 m
1	D	173	65 SW	pm	1 mm	20 cm	-	2.60 m
1	D	155	55 SW	pr	2 mm	50 cm	-	2 m
1	D	165	59 SW	pr	3 mm	20 cm	-	2.20 m
1	D	151	63 SW	pm	-	20 cm	-	2.20 m
1	D	149	61 SW	pm	-	40 cm	-	2.30 cm
1	D	176	70 SW	pm	-	20 cm	-	3 m
1	D	140	64 SW	pr	-	40 cm	-	4 m

1	D	105	76 SW	pm	-	15 cm	-	3 m
1	D	121	72 SW	pm	.5 mm	15 cm	-	3 m
1	D	175	58 SW	pm	.5 mm	10 cm	-	1 m
1	D	134	74 SW	pm	-	-	-	4 m
1	D	118	72 SW	pm	-	2 m	-	4 m
1	D	125	60 SW	pr	-	-	-	4 m
2	D	106	74 NE	pm	2 mm	1 m	-	3 m
2	D	100	65 NE	pm	2 mm	-	-	3 m
4	D	52	69 NW	pm	-	-	-	3 m
4	D	36	72 NW	pm	-	-	-	3 m
4	D	39	41 NW	pm	-	-	-	3 m
4	D	18	64 NW	pm	-	-	-	3 m
4	D	35	56 NW	pm	-	-	-	3 m
4	D	39	36 NW	pm	-	-	-	3 m
2	D	84	74 NW	pm	-	50 cm	-	3 m
2	D	96	81 NW	pm	-	-	-	3 m
3	PE	10	48 SE	pm	-	-	-	3 m
1	F	96	58 NE	pm	-	-	-	3 m
2	PE	55	35 NE	pr	-	-	-	3 m
2	D	115	75 SW	pr	-	-	-	3 m
2	D	145	65 SW	pm	1 mm	-	-	3 m
2	D	160	60 SW	pm	1 mm	30 cm	-	3 m
2	D	140	65 SW	pm	1 mm	45 cm	-	3 m
2	D	150	55 SW	pm	1 mm	-	-	3 m
2	D	170	60 SW	pm	-	-	-	3 m
1	D	110	85 SW	pm	-	-	-	3 m
1	D	130	70 SW	pm	-	-	-	3 m
1	D	110	60 SW	pm	-	-	-	3 m
1	D	100	85 NW	pm	-	-	-	3 m

1	D	105	85 NW	pm	-	-	-	3 m
1	D	70	70 NW	pm	-	-	-	3 m
1	D	65	70 NW	pm	-	-	-	3 m
-	D	40	44 NW	-	-	-	-	-
-	D	45	45 NW	-	-	-	-	-
-	D	125	81 SW	-	-	-	-	-
-	D	130	60 SW	-	-	-	-	-
-	D	45	65 NW	-	-	-	-	-
-	D	40	46 NW	-	-	-	-	-
-	D	143	70 SW	-	-	-	-	-
-	D	65	60 NW	-	-	-	-	-
-	D	130	88 SW	-	-	-	-	-
-	D	50	55 NW	-	-	-	-	-
-	D	35	65 NW	-	-	-	-	-
-	D	10	46 NW	-	-	-	-	-
-	D	12	56 NW	-	-	-	-	-
-	D	75	45 NW	-	-	-	-	-
-	D	80	43 NW	-	-	-	-	-
-	D	76	40 NW	-	-	-	-	-
-	D	38	56 NW	-	-	-	-	-
-	D	150	80 NE	-	-	-	-	-
-	D	145	85 NE	-	-	-	-	-
-	PE	30	51 SE	-	-	-	-	-
-	PE	25	30 SE	-	-	-	-	-
-	PE	80	85 SE	-	-	-	-	-
-	PE	30	51 SE	-	-	-	-	-
-	PE	22	48 SE	-	-	-	-	-
-	PE	18	35 SE	-	-	-	-	-
-	PE	20	40 SE	-	-	-	-	-

-	PE	18	35 SE	-	-	-	-	-
-	PE	20	52 SE	-	-	-	-	-
-	PE	21	50 SE	-	-	-	-	-
-	PE	20	52 SE	-	-	-	-	-
-	F	85	86 SE	-	-	-	-	-
-	F	100	78 SW	-	-	-	-	-
-	F	115	65 NW	-	-	-	-	-
-	F	138	62 SW	-	-	-	-	-
-	F	80	80 NW	-	-	-	-	-
1	D	80	80 NW	-	pm	2 m	-	3 m
2	D	160	55 SW	-	pr	2 m	-	3 m
1	D	80	85 NW	-	pm	2 m	-	3 m
2	D	160	70 SW	-	pr	1 m	-	3 m
1	D	30	55 NW	-	pm	2 m	-	3 m
2	D	160	75 SW	-	pr	1 m	-	1 m
1	D	30	45 NW	-	pm	1 m	-	1 m
2	D	155	65 SW	-	pr	2 m	-	2 m
3	PE	30	55 SE	-	pr	-	-	-
1	D	50	85 NW	-	pr	1 m	-	1 m
2	D	115	85 NE	-	pm	1m	-	1 m

Margarito Gracia								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
1	F	124	67 SW	wm	-	20 cm	-	2 m
1	D	134	72 SW	wm	-	25 cm	-	1 m
1	D	124	62 SW	wm	1 mm	31 cm	-	1.20 m
1	D	121	66 SW	wm	-	35 cm	-	60 cm
1	D	133	78 SW	wm	-	23 cm	-	60 cm
1	D	119	85 SW	wm	1 mm	34 cm	-	40 cm

1	D	130	86 SW	wm	1 cm	1.14 m	-	80 cm
1	D	105	85 SW	pr	1 cm	-	-	4 m

El Refugio								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
1	D	34	87 NE	wm	3 mm	33 cm	-	2 m
1	D	32	75 NE	wm	2 mm	62 cm	-	2 m
1	D	138	86 NE	ps	2 mm	40 cm	-	2 m
1	D	144	86 NE	wm	2 mm	70 cm	-	2 m
1	D	147	89 NE	wm	1 mm	36 cm	-	2 m
1	D	146	90 NE	pr	1 mm	10 cm	-	90 cm
1	D	136	87 NE	wm	1 mm	31 cm	-	2 m
1	D	149	86 NE	wm	1 mm	21 cm	-	1.20 m
1	D	146	73 NE	wr	1 mm	36 cm	-	1.50 m
1	D	139	89 NE	wm	1 mm	-	-	1.50 m
1	D	169	86 SW	wr	3 mm	17 cm	-	1.50 m
1	D	1	74 SW	wm	1 mm	57 cm	-	1.20 m
1	D	148	70 SW	sm	4 mm	54 cm	-	1.30 m
1	D	166	76 SW	wm	5 mm	-	-	-
2	D	100	75 NE	wm	-	36 cm	-	170 cm
2	D	105	80 NE	wm	2 mm	26 cm	-	170 cm
2	D	101	85 NE	wm	3 mm	47 cm	-	170 cm
2	D	104	80 NE	wm	2 mm	80 cm	-	2 m
2	D	95	74 NE	wm	-	68 cm	-	2 m
2	D	90	79 NE	wm	2 mm	-	-	150 cm
2	D	65	65 NW	wr	-	40 cm	-	2 m
2	D	75	85 NW	wm	-	27 cm	-	2 m
2	D	85	74 NW	wm	-	45 cm	-	-
2	D	66	65 NW	wm	-	-	-	-

3	PE	30	35 SE	wr	-	45 cm	-	260 cm
3	PE	30	32 SE	wr	4 mm	40 cm	-	2 m
3	PE	35	30 SE	wr	4 mm	45 cm	-	260 cm
3	PE	45	24 SE	wr	4 mm	60 cm	-	-

La Pizarrina								
Familia	Tipo	Rumbo	Echado	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Relleno	Extensión
2	D	61	NW 60	wm	-	30 cm	-	1 m
2	D	53	NW61	wm	-	-	-	2 m
2	D	55	NW51	wm	-	40 cm	-	2 m
1	D	123	SN84	wm	2 mm	150 cm	-	2 m
1	D	136	SW77	wm	1 mm	150 cm	-	3 m
1	D	111	SW81	wm	-	60 cm	-	-
1	D	102	SW71	wm	2 mm	-	-	2 m
1	D	100	SW88	wm	2 mm	60 cm	-	2 m
1	D	111	SW73	wm	1 mm	1 m	-	2 m
1	D	106	SW75	wm	1 mm	60 cm	-	2 m
1	D	90	SW61	wm	1 mm	60 cm	-	2 m
1	D	97	SW85	wm	1 mm	30 cm	-	3 m
1	D	101	SW77	wm	1 mm	60 cm	-	3 m
1	D	102	SW73	wm	0.5 mm	10 cm	-	3 m
1	D	110	SW74	wm	0.5 mm	20 cm	-	3 m
1	D	136	SW69	wm	0.5 mm	20 cm	-	3 m
1	D	123	SW70	wm	0.5 mm	20 cm	-	3 m
1	D	123	SW71	wm	-	10 cm	-	3 m
1	D	113	SW79	wm	1 mm	10 cm	-	3 m
1	D	11	-	wm	2 mm	-	-	-
1	D	115	SW69	wm	0.5 mm	50 cm	-	2.50 m
1	D	134	SW65	wm	2 mm	30 cm	-	2.4 m

1	D	116	SW73	wm	1 mm	20 cm	-	2.4 m
1	D	147	W65	wm	2 mm	30 cm	-	2.4 m
1	D	131	SW78	wm	1 cm	1 m	-	2.4 m
1	D	120	SW75	wm	1 mmm	30 cm	-	2.4 m
1	D	150	SW61	wm	1 mm	50 cm	-	2.4 m
1	D	126	SW70	wm	1 mm	40 cm	-	2.4 m
1	D	125	SW80	wm	1 cm	40 cm	-	2.45 m
1	D	124	SW64	wm	2 mm	30 cm	-	2.4 m
1	D	124	SW85	wm	1 mm	40 cm	-	2.5 m
1	D	136	SW77	wm	1 mm	40 cm	-	2.3 m
1	D	125	SW68	wn	1 mm	-	-	2 m
4	D	97	NE89	wm	-	-	-	30 cm
3	PE	5	SE37	wm	-	2 m	-	8 m
3	PE	24	SE37	wn	-	-	-	8 m
-	F	110	SW66	wm	-	-	-	-
2	D	32	NW59	wm	-	30 cm	-	1 m
2	D	35	NW50	wm	-	-	-	4 m
2	D	25	NW65	wm	-	20 cm	-	60 cm
2	D	57	NW75	wm	-	-	-	60 cm
2	D	50	NW50	wm	-	-	-	3 m
2	D	60	NW70	wm	-	40 cm	-	20 cm
2	D	75	NW73	wm	-	20 cm	-	30 cm
2	D	15	NW60	wm	-	-	-	-
2	D	56	NW67	wm	-	-	-	-
2	D	74	NW71	wm	-	-	-	-
2	D	49	NW78	wm	-	-	-	-
2	D	53	NW68	wm	-	-	-	-
2	D	15	SW51	wm	-	-	-	-
2	D	170	SW51	wm	-	-	-	-

2	D	61	NW68	wm	-	-	-	-
1	D	125SE	65SW	wm	2 mm	50 cm	-	-
1	D	125	70SW	wm	3 mm	32 cm	-	3 m
1	D	120	60SW	wm	3 mm	35 cm	-	3 m
1	D	120	70SW	wm	2 mm	30 cm	-	3 m
1	D	120	75	wm	2 mm	45 cm	-	3 m
1	D	120	80	wm	2 mm	20 cm	-	3 m
1	D	120	80	wm	2 mm	25 cm	-	3 m
3	PE	25SE	40SW	wm	-	-	-	-
3	PE	-	35	wm	-	-	-	-
3	PE	-	-	wm	-	-	-	-
1	D	120	85	wm	2 mm	35 cm	-	3 m
1	D	120	80	wm	3 mm	40 cm	-	3 m
1	D	121	75	wm	1 mm	40 cm	-	3 m
1	D	32	78 SE	wm	-	38 cm	-	40 cm
1	D	13	75 SE	wm	1 cm	80 cm	-	60 cm
1	D	63	76 SE	sr	5 mm	59 cm	-	3 cm
1	D	63	85 SE	wm	2 cm	60 cm	-	30 cm
1	D	65	80 SE	wm	1 cm	-	-	5 m
3	PE	103	25 SE	wr	1 mm	72 cm	-	1.50 m
3	PE	105	20 SE	sr	-	-	-	3 m
2	D	315	80 SW	-	-	80 cm	-	7 m
2	D	24	90 SW	-	-	38 cm	-	7 m
2	D	300	80 SW	-	-	38 cm	-	7 m
-	D	120	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	120	70 SW	-	-	-	-	-
-	D	123	82 SW	-	-	-	-	-
-	D	62	58 NW	-	-	-	-	-
-	D	41	61 NW	-	-	-	-	-

-	D	40	59 NW	-	-	-	-	-
-	D	128	83 SW	-	-	-	-	-
-	D	119	76 SW	-	-	-	-	-
-	D	125	68 SW	-	-	-	-	-
-	D	130	82 SW	-	-	-	-	-
-	D	123	78 SW	-	-	-	-	-
-	D	123	83 SW	-	-	-	-	-
-	D	35	56 NW	-	-	-	-	-
-	D	45	60 NW	-	-	-	-	-
-	D	125	83 SW	-	-	-	-	-
-	D	131	75 SW	-	-	-	-	-
-	D	121	81 SW	-	-	-	-	-
-	D	130	84 SW	-	-	-	-	-
-	D	126	83 SW	-	-	-	-	-
-	D	24	61 NW	-	-	-	-	-
-	D	35	68 NW	-	-	-	-	-
-	D	30	56 NW	-	-	-	-	-
-	D	35	62 NW	-	-	-	-	-
-	D	38	55 NW	-	-	-	-	-
-	D	40	60 NW	-	-	-	-	-
-	D	120	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	130	86 SW	-	-	-	-	-
-	D	120	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	128	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	123	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	122	86 SW	-	-	-	-	-
-	D	125	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	125	79 SW	-	-	-	-	-
-	D	130	80 SW	-	-	-	-	-

-	D	130	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	118	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	120	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	125	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	30	60 NW	-	-	-	-	-
-	D	110	80 SW	-	-	-	-	-
-	D	115	85 SW	-	-	-	-	-
-	D	110	85 SW	-	-	-	-	-
-	F	160	40 SW	-	-	-	-	-
-	F	155	15 SE	-	-	-	-	-
-	F	85	65 SE	-	-	-	-	-
-	F	120	80 SW	-	-	-	-	-
-	F		45 SW	-	-	-	-	-

Anexo 2

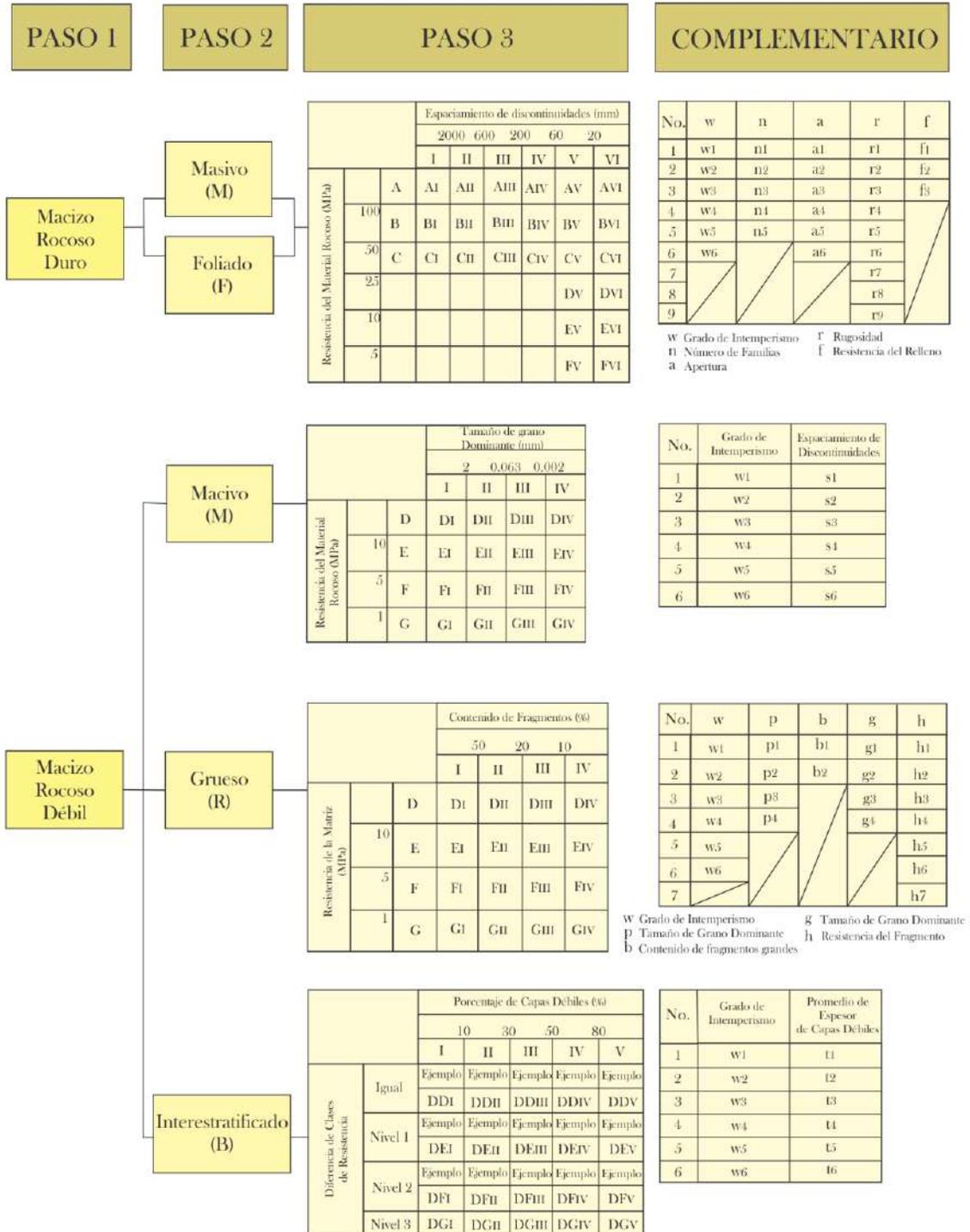


Tabla 1 Sistema de Clasificación Geotécnica de Macizos Rocosos JGS

Tabla 2 Parámetros y clases de clasificación de macizos rocosos duros

PARÁMETRO DE CLASIFICACIÓN	CLASE								
	A	B	C	D	E	F			
Resistencia del Material Rocoso (MPa)	Más de 100	100-50	50-25	25-10	10-5	Menos de 5			
Espaciamiento de las Discontinuidades (mm)	I	II	III	IV	V	VI			
	Más de 2000	2000-600	600-200	200-60	60-20	Menos de 20			
Grado de Intemperismo	W1	W2	W3	W4	W5	W6			
Número de familias de Discontinuidades	n1	n2	n3	n4	n5				
	1 Familia	2 Familias	3 Familias	4 Familias y más	Al azar				
Apertura de las Discontinuidades (mm)	a1	a2	a3	a4	a5	a6			
	menos de 0.1	0.1-0.25	0.25-0.5	0.5-2.5	2.5-10	Más de 10			
Rugosidad de las Discontinuidades	r _{sr}	r _{sm}	r _{ss}	r _{wr}	r _{wm}	r _{ws}	r _{pr}	r _{pm}	r _{ps}
Existencia de Material de Relleno	f1		f2			f3			
	Ninguna		Parcialmente rellena			Completamente rellena			

Tabla 3 Parámetros y clases de clasificación de macizos rocosos débiles

PARAMETRO DE CLASIFICACIÓN	CLASE						
	D	E	F	G			
Resistencia del Material Rocoso (MPa)	25-10	10-5	5-1	Menor que 1			
Resistencia de la Matriz (MPa)	D	E	F	G			
Diferencia de Clases de Resistencia	25-10	10-5	5-1	Menor que 1			
	DD/EE/FF/GG	DE/EF/FG	DF/EG	DG			
Tamaño de grano Dominante (mm)	Misma	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3			
	I	II	III	IV			
Contenido de Fragmentos (%)	Más de 2	2-0.063	0.063-0.002	Menos de 0.002			
	I	II	III	IV			
Porcentaje de Capas Débiles (%)	Más de 50	50-20	20-10	Menos de 10			
	I	II	III	IV	V		
Grado de Intemperismo	Menos de 10	10-30	30-50	50-80	Más de 80		
	w1	w2	w3	w4	w5	w6	
Espaciamiento de Discontinuidades (mm)	I	II	III	IV	V	VI	
	Más de 2000	2000-600	600-200	200-60	60-20	Menos de 20	
Tamaño Dominante en la Matriz (mm)	p1	p2	p3	p4			
	Más de 2	2-0.063	0.063-0.002	Menos de 0.002			
Contenido de Fragmentos (%)	b1			b2			
	Más o igual a 10			Menos de 10			
Tamaño Dominante de Fragmentos (mm)	g1	g2	g3	g4			
	Más de 630	630-200	200-63	Menos de 63			
Resistencia de los Fragmentos (MPa)	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
	Más de 100	100-50	50-25	25-10	10-5	5-1	Menos de 1
Promedio de Espesor de Capas Débiles (mm)	t1	t2	t3	t4	t5		
	Más de 600	600-200	200-60	60-20	Menor de 20		

Tabla 4 Clases de rugosidad para macizos rocosos

Pequeña Escala (10 cm) Gran Escala (1-2 m)	Rugosa: r 	Ligeramente Rugosa: m 	Suave: s 
Escalonada: s 	r_{sr}	r_{sm}	r_{ss}
Ondulada: w 	r_{wr}	r_{wm}	r_{ws}
Plana: p 	r_{pr}	r_{pm}	r_{ps}

Tabla 5 Clases de grado de intemperismo para macizos rocosos

TÉRMINO	ESTADO DEL INTEMPERISMO O ALTERACIÓN	CLASE
Fresca	Sin intemperismo o alteración visible en la roca. Se observa sin o con un ligero cambio en la coloración de las paredes de las discontinuidades	W1
Ligeramente Intemperizada	Cambio visible en el color del material rocoso y/o en las paredes de la discontinuidad	W2
Intemperizada	Se observa una decoloración de la roca en menos de un 50%. La estructura y características de composición del macizo rocoso, y las paredes de las discontinuidades son aún visibles	W3
Fuertemente Intemperizada	El cambio en la coloración de la roca es mayor al 50%. En la porción fresca de la roca aún se observa la estructura y la composición del macizo, así como las paredes de las discontinuidades	W4
Completamente Intemperizada	El grado de alteración y/o intemperismo es tan alto que sólo en pequeñas partes del macizo rocoso se puede observar su estructura y composición como pequeños remanentes	W5
Suelo Residual/ Material Alterado	El material está completamente intemperizado y/o alterado. Su estructura y composición original está totalmente destruida.	W6

Tabla 6 Estimaciones cualitativas de la Resistencia de las rocas (MPa)

	Mpa	Características de Campo	Ejemplos
Extremadamente Fuerte	>250	La muestra sólo se astilla con la pica	Basalto, pedernal, diabasa, gneiss, granito, cuarcita
Muy Fuerte	100-250	La muestra requiere de varios golpes con la pica para fracturarla	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza mármol, riolita, toba
Fuerte	50-100	La muestra requiere más de un golpe para fracturarla	Caliza, mármol, filita, arenisca, esquistos, lutita
Medianamente Fuerte	25-50	La muestra no se descascara con una navaja. Se fractura con un solo golpe de la pica	Lutita, carbón, concreto, esquistos, pizarra
Débil	2-25	La muestra puede ser difícilmente descascarada con la navaja. Se fractura fácilmente con un golpe de la pica	Evaporitas
Muy Débil	1-5	La muestra puede ser fácilmente descascarada con la navaja.	Rocas altamente intemperizadas o alteradas
Extremadamente Débil	0.25-1	La muestra es deleznable	Salbanda en zonas de falla (harina de falla)