

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**ANÁLISIS DEL GRADO DE METEORIZACIÓN
DE LAS ROCAS PARA LA FORMACIÓN DE
SUELOS DE HERMOSILLO, SONORA.**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.**



PRESENTA:

LILIA KARINA MORALES TORRES.

Hermosillo, Sonora, Mayo del 2015

Universidad de Sonora

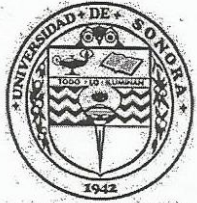
Repositorio Institucional UNISON



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



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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, a 18 de Mayo de 2015

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

"ANÁLISIS DEL GRADO DE METEORIZACIÓN DE LAS ROCAS PARA LA FORMACIÓN DE SUELOS DE HERMOSILLO, SONORA."

Esto es con el fin de que la alumna: **LILIA KARINA MORALES TORRES**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE,



M. Cs. Margarita de la O Villanueva.

Directora de Tesis

C.c.p. Interesada
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 19 de mayo de 2015

M.C. Margarita De la O Villanueva
Directora de Tesis

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

"ANÁLISIS DEL GRADO DE METEORIZACIÓN DE LAS ROCAS PARA LA FORMACIÓN DE SUELOS DE HERMOSILLO, SONORA"

Esto es con el fin de que la alumna: **MORALES TORRES LILIA KARINA** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Dr. I. Guadalupe Espinoza Maldonado	Presidente
Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega	Secretario
M.C. Alma Patricia Sámano Tirado	Vocal
M.C. Margarita de la O Villanueva	Vocal

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesada
C.c.p. Archivo

Dedicatoria

A mi esposo Julio C. Torres M. por su apoyo incondicional y su amor en todo momento, a mi madre que desde el cielo se que estuvo conmigo siempre y en cada una de mis desveladas acompañándome, a mi hermana Sandra, gracias por ir conmigo a mi lado en cada momento y cuidar de mi hija con el mismo amor de una segunda madre, y especialmente dedico este trabajo a mi hija Frida Camila, gracias mi princesa por haberme aguantado en este proceso por tu paciencia por tus risas tus abrazos y amor incondicional, esto es por ti y para ti mi muñequita hermosa..Te Amo.

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de realizar este proyecto, por sus bendiciones, gracias por haberme guiado en el camino, y conocer tanta gente tan valiosa, gracias Dios.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) becaria: 290733/482703 (08/2011-08/2014) por aceptarme dentro del Programa de Maestría en Ciencias- Geología.

A la Universidad de Sonora, al Departamento de Geología, al coordinador de la Maestría en Ciencias- Geología Dr. Rogelio Monreal S. por haberme aceptado en el programa de Maestría y apoyo en todo momento y confianza para este proyecto.

A mi Directora de Tesis Mtra. Margarita de la O Villanueva, por haber creído en mi para llevar a cabo este trabajo, por su paciencia y apoyo y sobre todo por transmitirme todo su conocimiento en todo momento, mil gracias.

A mis sinodales Mtra. Patricia Samano Figueroa, Dr. Guadalupe Hinojosa, Dr. Grijalva, gracias por su tiempo en la revisión de tesis.

Al Instituto de Geología de la UNAM, Estación Regional del Noroeste (ERNO), por hacer uso de sus instalaciones para la manipulación de las muestras, al Dr. Juan Carlos G. por su apoyo en el uso de microscopio para la realización de la petrografía de rocas; un especial agradecimiento al Técnico Superior de Difracción y Fluorescencia de Rayos X, Luis Miguel Rodríguez Jaren de la Universidad de Cádiz, por el apoyo brindado en el análisis geoquímico de las muestras.

A todas las valiosas personas que tuve el gusto de conocer a lo largo de este tiempo, a Héctor Mendivil, mil gracias por tu gran paciencia al enseñarme el uso de Arc Gis, Uzi; a mis grandes amigos Rafael del Río y Vero Moreno gracias por transmitirme su gran conocimiento en todo este tiempo pero sobre todo gracias por ser tan bellas personas y por su gran y valiosa amistad, de igual manera infinitas gracias a mi amigueta y compañera de vida mi Mtra. favorita Belem González, gracias por tu infinita amistad, complicidad y locuras, sabes que te adoro amiga.

A mi esposo Julio C. Torres por todo tu amor, apoyo y comprensión, Te amo, a nuestra princesa Frida Camila, pieza clave en este proyecto y en nuestras vidas, gracias por sorprendernos con tus risas y ocurrencias y enseñarnos a ser mejores padres cada día, te amamos hija.

A mi Madre María Ramona T. (†), se que estarías feliz por este logro porque todo el tiempo confiaste y creíste en mi, hasta el cielo esto es para ti madre, mi gran estrella del firmamento que siempre estás conmigo, me dejaste cuando más te necesitaba pero sé que desde donde estés me sigues guiando por la vida...TE AMO MI MONA.

A mi padre, Raymundo Morales gracias por tus fuerzas y amor para sacarnos adelante, y a mis hermanos por ser parte de mi vida y por estar conmigo siempre.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo el analizar y evaluar el grado de intemperismo de rocas para la producción de suelos a partir de índices de meteorización en la ciudad de Hermosillo. Se realizaron muestreos de roca, regolito y suelos, se hizo petrografía de rocas y suelo para descripción mineralógica y se estudiaron las características de los diferentes tipos de suelos; en la parte estructural se realizaron estudios de la calidad de los macizos rocosos; Difracción de Rayos X a muestras de roca, regolito y suelo, y se compararon geoquímicamente diferentes índices de meteorización. Además se generaron mapas de erosión de la ciudad mediante el análisis de clima en un periodo de 30 años.

El análisis estadístico de los datos geoquímicos revela que los suelos presentan un grado moderado de meteorización encontrándose enriquecidos por elementos como Al_2O_3 , K_2O y CaO , teniendo como principal aporte a rocas ígneas intrusivas. Dichas rocas muestran meteorización física bastante avanzada, propiciada por numerosas fallas, fracturas y diaclasas que favorecen de manera directa una meteorización química sobre los minerales de la roca. Estos procesos son responsables de que el grado de erosión de los suelos se haya incrementado con los años, siendo los más afectados aquellos del tipo Xerosol y Regosol que son suelos no muy desarrollados. Otros factores que están relacionados a esta situación son las escasas precipitaciones que cada vez son más torrenciales así como temperaturas más extremas.

OBJETIVOS

Analizar y evaluar del grado de intemperismo de rocas para la producción de suelos a partir de índices de meteorización

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar los índices climatológicos del área.
- Evaluar la pérdida potencial de suelo.
- Caracterizar la Geoquímica de roca, regolito y suelo.
- Analizar el grado geotécnico de la roca.
- Evaluar las características físicas del suelo.
- Analizar el contenido mineralógico de la roca, regolito y suelo.
- Correlacionar las variables físicas con las geoquímicas obtenidas en el estudio.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Meteorización Física	2
1.1.1. Descomprensión	2
1.1.2. Termoclastia.....	2
1.1.3. Haloclastia	3
1.1.4. Acción del Hielo (Gelifracción).....	3
1.1.5. Ciclos de Secado y Humedecimiento	3
1.2. Meteorización Química.....	3
1.2.1. Hidrolisis	4
1.2.2. Oxidación	4
1.2.3. Disolución	4
1.3. Meteorización Biológica.....	5
1.3.1. Acuñaamiento.....	5
1.3.2. Quelación.....	5
2. ANTECEDENTES	8
3. METODOLOGÍA	10
3.1. Gabinete.....	10
3.1.1. Recopilación bibliográfica	10
3.1.2. Elaboración de mapas	10
3.1.3. Estrategias y Plan de muestreo	10
3.2. Campo	10
3.2.1. Roca.....	10
3.2.2. Regolito	10
3.2.3. Suelo.....	11
3.3. Laboratorio.....	12
3.3.1. Preparación física de Roca, Regolito y Suelo.....	12
3.3.2. Análisis Geoquímicos, Físico-Químicos y Petrográficos (Roca, Regolito y Suelo).....	12
3.3.3. Análisis físico de la Roca.....	13
3.3.4. Calculo de Erosión Hídrica	14
3.3.5. Estimación de Índices Climatológicos a partir de la evaluación de varios autores.....	14
3.3.6. Índices Geoquímicos	15
4. MARCO GENERAL	16
4.1. Localización	16
4.2. Clima	16
4.3. Vientos	18

4.4. Fisiografía y Geomorfología	19
4.5. Hidrografía.....	22
4.6. Geología	25
4.7. Suelos	28
5. RESULTADOS	30
5.1 Índices climáticos.....	30
5.2. Petrografía roca	34
5.3. Petrografía Briquetas	41
5.4. índices de Meteorización	48
5.4.1. Índices Geoquímicos	48
5.4.1.1. Diagramas Harker	49
5.4.1.2. Índice de Alteración Química (CIA).....	53
5.4.1.3. Índice de Meteorización Potencial	55
5.4.1.4. Índice de Meteorización	58
5.4.1.5. Índice de Chesworth	61
5.5. Índice Físico	62
5.5.1. Índice de Meteorización Física	62
5.5.1.1. Unidad litológica Morelos Final.....	63
5.5.1.2. Unidad litológica Cerro Colorado	63
5.5.1.3. Unidad litológica La Sauceda.....	64
5.5.1.4. Unidad litológica Minitas Final	65
5.6. Erosión	65
6. CONCLUSIONES	70
ANEXOS.....	72
7. BIBLIOGRAFÍA.....	78

Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de muestras de roca y suelo en el área de estudio.....	11
Figura 2. Localización del área de estudio Mapa elaborado en este trabajo	16
Figura 3. Grafica precipitación y temperatura, figura generada en este trabajo	18
Figura 4. Rosa de vientos Cd. Hermosillo, Sonora. IMPLAN, 2006	18
Figura 5. Mapa Fisiográfico de Sonora. Fuente: INEGI	20
Figura 6. Mapa de topoformas área de estudio. Fuente: editado INEGI.....	22
Figura 7. Hidrología área de estudio. Fuente: editado INEGI.....	23
Figura 8. Mapa Geología del área de estudio. Fuente: editado INEGI	27
Figura 9. Estratigrafía área de estudio. Elaborado en este trabajo	28
Figura 10. Mapa suelos y ubicación de muestreos de suelo. Fuente: editado INEGI	29
Figura 11. Intensidad de Meteorización química según (Cooke y Doornkamp ,1990)	30
Figura 12. Índice climatológicos del área de estudio. Elaborada en este trabajo.....	31
Figura 13. Clasificación areniscas y lutitas terrígenas (Herror, 1988)	47
Figura 14. Gráfica de Correlación de %de SiO ₂ Vs. Al ₂ O ₃	50
Figura 15. Gráfica de Correlación de SiO ₂ contra Fe ₂ O ₃ y MgO	50
Figura 16. Gráfica de Correlación de SiO ₂ contra TiO ₂	51
Figura 17. Gráfica de Correlación de SiO ₂ Vs. K ₂ O y SiO ₂ Vs. CaO	51
Figura 18. Gráfica de Correlación SiO ₂ Vs. Na ₂ O	52
Figura 19. Diagrama triangular, valores CIA Nesbitt y Young (1989)	55
Figura 20. Gráfica índices de Meteorización Potencial de Roca, Regolito y Suelo.....	57
Figura 21. Distribución normalizada de los IMP para: a).- Roca, b).- Regolito c).-Suelo	57
Figura 22. Gráfica de Correlación Polinomial del IMP para: a).- Roca Vs. Regolito, b).- Roca Vs. Suelo	58
Figura 23. Gráfica Índice de Meteorización Roca, Regolito y Suelo	59
Figura 24. Distribución normalizada de los IM para: A) Roca, B) Regolito y C) Suelo	60
Figura 25. Gráfica de <i>Ajuste de polinomio de cuarto grado de a) Roca Vs. Regolito y b) Roca Vs. suelo</i>	61
Figura 26. Diagrama de Chesworth (1979)	62
Figura 27. Mapa Erosión decada 80's	67
Figura 28. Mapa erosión 90's	68
Figura 29. Mapa de erosión década 2000	69

Tablas

Tabla 1. Subcuencas de la zona hidrográfica de los alrededores de la Cd. De Hermosillo..	23
Tabla 2. Valores de Precipitación y Temperatura.....	32
Tabla 3. Índices Climatológicos.....	34
Tabla 4. Análisis geoquímicos muestras roca, suelo y regolito	53
Tabla 5. Valores CIA para Roca, Regolito y Suelo,.....	54
Tabla 6. Resultados Índice meteorización potencial	56
Tabla 7. Resultados para el índice de meteorización	59
Tabla 8. Valores encontrados de Q para la Unidad Litológica Morelos Final	63
Tabla 9. Relación de los valores de Q para unidad geotécnica encontrada en el área de estudio.....	64
Tabla 10. Valores de Q de la unidad litológica La Sauceda	64
Tabla 11. Valores de Q de la unidad litológica Minitas final	65

Fotos

Foto 1. Mármol conteniendo wollastonita de forma bacilar	25
Foto 2. Muestra Cerro la Flojera.....	26
Foto 3. Afloramiento Sierra el Bachoco	26
Foto 4. Microfotografía de granito	36
Foto 5. Microfotografía de granodiorita	37
Foto 6. Microfotografía de micrita con cuarzo detrítico.....	37
Foto 7. Microfotografía de traquiandesita porfídica.....	38
Foto 8. Microfotografía de riolita	38
Foto 9. Microfotografía de granito	39
Foto 10. Microfotografía de mármol	39
Foto 11. Microfotografía de Hornfels	40
Foto 12. Microfotografía de skarn de wollastonita	40
Foto 13. Microfotografía de arena de composición arcósica.....	43
Foto 14. Microfotografía de arena de composición lítica.....	43
Foto 15. Microfotografía de arena de composición lítica.....	44
Foto 16. Microfotografía de arena de composición arcósica.....	44
Foto 17. Microfotografía de arena de composición arcósica.....	45
Foto 18. Microfotografía de arena de composición arcósica.....	45
Foto 19. Microfotografía de arena de composición arcósica.....	46
Foto 20. Microfotografía de arena de composición arcósica.....	46
Foto 21. Microfotografía de arena de composición lítica.....	47

1. INTRODUCCION

Hablar de procesos geodinámicos externos en la corteza implica hablar sobre una gran cantidad de fenómenos, uno de ellos es el de meteorización, el cual es parte integral del desarrollo en la formación del relieve en condiciones actuales, y es una herramienta útil para identificar cambios climáticos y paleoambientes en el registro geológico.

La meteorización es la alteración y desgaste de las rocas de la superficie de la tierra por la acción de procesos fisicoquímicos que ocurren en la superficie de la tierra, donde interactúan atmósfera, litosfera e hidrosfera, debido a que los minerales de la roca, regolito y suelo no son estables en condiciones ambientales. (González S.L., 2003)

Estos procesos actúan a microescala o a escala de reacciones, sin embargo en el tiempo geológico tiene efectos significativos en el ámbito de las geoformas y además en la geoquímica de la corteza terrestre. Estos procesos conducen a la formación de un perfil, el cual refleja la actividad, tipo, intensidad e interacción de los mismos, erosión y removilización de materiales en la superficie terrestre en un periodo de tiempo. El intemperismo se da a través de una serie de etapas complejas descritos más adelante (González S.L., 2003)

La formación de los suelos implica la transformación de la roca original vía meteorización a iones y suelos arcillosos, los cuales tienen un papel fundamental en las propiedades físico-químicas del suelo como su textura, estructura, porosidad, capacidades de intercambio catiónico y aniónico, pH, fertilidad del suelo entre otros (González S.L., 2003)

Los factores de meteorización dependen de tres conjuntos de variables según Cooke y Doornkamp (1990), siendo éstos las siguientes:

- El ambiente de meteorización, en el cual las condiciones del clima son de gran importancia y donde incluye elementos locales como la topografía y drenaje.
- La naturaleza de los materiales, donde se considera la litología y estructura.
- Las condiciones biológicas, conformada por la naturaleza de la vegetación y de la vida animal.

La alteración y/o meteorización es uno de los factores más importantes que controlan la evolución del paisaje (Elizalde & Jaimes, 1989, en Gonzalez et al., 2004). Recientemente, se ha propuesto que además de la meteorización de minerales y roca madre, también son afectados por alteración suelos y sedimentos (Port et al., 1994) y

el regolito producto de la alteración de las rocas (Summerfield, 1997). En éste último, la alteración actúa en su diferenciación y evolución (Gonzalez et al., 2004).

Actualmente, la meteorización se clasifica en: física, química y biológica, aunque esta última es debatida por algunos autores; como es el caso de Doornkamp (1990), quien prefiere usar el término actividad biológica en vez de alteración biológica. Además incluye los términos procesos orgánicos dentro de los procesos físicos y los cambios químicos biológicos dentro de los procesos químicos. (Cooke et al., 1990)

Summerfield (1979) sugiere que estos tres tipos de meteorización son claras en teoría, pero en la naturaleza muy raramente estos procesos operan de manera separada, es decir, el efecto de uno ayuda a controlar el funcionamiento de otro. (González et al., 2004)

1.1. Meteorización Física

La meteorización física produce una ruptura en la roca manteniendo su composición química y mineralógica, fragmentándose debido a las condiciones del medio ambiente a las que está sometida, entre los procesos más importantes están:

1.1.1. Descompresión.

Las rocas formadas a grandes profundidades en el interior de la corteza, al ser exhumadas y expuestas en la superficie de la tierra, confrontan condiciones diferentes a las que fueron formadas y tiene que adaptarse a estas nuevas, y el proceso de adaptación es la conversión de estas rocas vía meteorización a suelos y rocas arcillosas

1.1.2. Termoclastia.

Es la ruptura de la roca por expansión y contracción, producto de los diferentes cambios de temperatura que se presenta tanto en el día como en la noche; durante el día la roca al calentarse por las temperaturas altas se dilata, y por lo contrario, por las noches, al bajar las temperaturas, la roca se contrae. Debido a que la roca está compuesta por diferentes minerales con diferentes calores específicos, como coeficiente de expansión/contracción (Ollier, 1969), se producen microfisuras, desintegrándose al cabo de un tiempo. Este tipo de meteorización es importante en los lugares con climas extremos con gran oscilación de temperaturas.

1.1.3. Haloclastia

La cristalización de las sales es un proceso importante en la desintegración de las rocas, especialmente en las más porosas. La sal se incrusta en los poros y fisuras, y cuando los cristales aumentan su volumen, se ejerce una presión dentro de las paredes de la roca, al momento de evaporarse el agua de los cristales de sal, ocurre la contracción de la roca. Este proceso se da en lugares muy específicos donde solo se encuentra la salinidad del medio ambiente, típico en áreas áridas y en las franjas litorales.

1.1.4. Acción del Hielo (Gelifracción)

Cuando el agua se congela aumenta su volumen produciendo cristales de hielo, si se encuentra en el interior de la roca ejerce una gran presión debido al ciclo de hielo-deshielo produciendo fracturas, esta agua debe de entrar por micro grietas o poros. Estos fragmentos de roca pueden acumularse al pie de los cerros, o en la base de de escarpes formando taludes o derrubios. Este tipo de meteorización es muy importante en ambientes glaciales y húmedos. (Alcalde R. J. (2013). Geología y Geomorfología: recuperado de <http://josabeth-geo-terra.blogspot.mx/p/semana-6.html>).

1.1.5. Ciclos de Secado y Humectación

Afecta principalmente a rocas sedimentarias de grano fino que tienen arcillas expandibles, aunque también en algunos casos puede afectar a rocas duras de naturaleza no arcillosa que pueden experimentar cambios de volumen en virtud de estos ciclos. Estos cambios pueden producir esfuerzos suficientes para fracturar las rocas, especialmente cuando actúan a lo largo de fisuras, planos de fracturamiento y estratificación (González et al., 2004).

Ollier (1969) sugiere como mecanismo de explicación, el carácter di-polar de las moléculas de agua, la cual se atrae a la carga negativa de las arcillas conformando una molécula ordenada, lo que se incrementa con los ciclos de sequedad-humectación y alcanza un comportamiento casi cristalino que ejerce presiones suficientes para fracturar la roca (González et al., 2004).

1.2. Meteorización Química

Son los procesos que alteran la composición química de la roca y de sus minerales, produciendo otros distintos (secundarios) a través de los agentes como el agua, el oxígeno, los ácidos orgánicos; los minerales son más susceptibles a esta meteorización cuando más débiles son sus enlace y más lejanas sus condiciones de formación a las

del ambiente en la superficie de la tierra. Los procesos más destacados en la meteorización química son:

1.2.1. Hidrólisis:

Consiste en la reacción química que se produce entre los iones de los minerales (químicamente una sal constituida por una base débil o un ácido débil) y los iones del agua (H^+ y OH^-), lo que conduce a la formación de nuevos componentes. Este proceso es el más efectivo en la alteración de minerales aluminosilicatados debido a la presencia de cargas eléctricas en la superficie de los cristales. (Spalletti, 2007)

1.2.2. Oxidación.

Reacción que ocurre entre un mineral al entrar en contacto con el oxígeno, en ella implica la remoción de uno o más electrones del componente mineral, incrementando su valencia, esto forma una estructura menos rígida e inestable; los óxidos más comunes de esta reacción son los óxidos de hierro y aluminio que precipitan de forma más fácil en condiciones de elevadas temperaturas y precipitaciones.

Las superficies rocosas de tonalidades rojizas, ocres o parduzcas, son el producto de la oxidación del hierro contenido en las rocas.

1.2.3. Disolución

Toda disolución está formada por una fase dispersa llamada soluto y un medio dispersante denominado disolvente, siendo el agua el solvente. La eficacia de la disolución depende de la naturaleza de la roca, afectando principalmente a las rocas con carbonatos.

La solubilidad del carbonato de calcio en agua pura aumenta conforme la temperatura, llegando a 15 mg/l a los 25°C, alcanzando una mayor solubilidad en presencia de ácidos; la concentración del ácido carbónico depende de la presión parcial de CO_2 en el agua, y la disociación del ácido carbónico es fuente de H^+ .

La meteorización química depende de dos variables fundamentales (Chessworth 1992, en González 2004): potencial de reducción (*también conocido como potencial redox, pE o Eh*) tendencia de las especies a adquirir electrones y el pH que indica la alcalinidad y/o acidez del ambiente. Éste mismo autor menciona que existen tres rutas principales para que el proceso de meteorización se lleve a cabo, siendo éstas: ruta ácida, ruta alcalina y ruta reductora.

1.3 Meteorización Biológica

En este proceso la roca presenta transformaciones y alteraciones en sus minerales debido a la presencia de organismos vivos como bacterias plantas y animales, esto gracias a la acción que tienen estos seres vivos al momento de metabolizar o descomponer ya sea el oxígeno o cualquier otro producto que necesiten para sobrevivir, van transformando químicamente los minerales contenidos en la roca.

1.3.1. Acuñaamiento

Es la ruptura o remoción de las rocas por la actividad de organismos vivos, por ejemplo las raíces de las plantas, llevando a la fractura de las rocas y a la bioturbación de sedimentos o suelo.

1.3.2. Quelación

Los procesos biológicos de los organismos vivos o la descomposición de la hojarasca, producen sustancias orgánicas denominadas quelatos, que involucra en su estructura un ion predominantemente metálico que entra en contacto con los minerales de la roca a través de la complejación de los cationes.

El proceso de meteorización conlleva a productos los cuales incluyen nuevos minerales arcillosos mayormente, minerales resistentes al proceso y fragmentos líticos aun no meteorizados, iones que pueden ser concentrado en costras precipitadas en un perfil de suelo o de meteorización.

Según el grado de meteorización, se pueden distinguir perfiles de meteorización y de suelo. Dentro de los primeros está incluido el regolito, también conocido como saprolito, que es todo el material que se encuentra por encima de la roca fresca, o que ha sido removilizado por cortas distancias, es decir, la roca meteorizada que no ha sufrido el efecto de los procesos erosivos y que puede llegar a ser tan antiguo que pueden generar paleorelieves. Los perfiles de meteorización también incluyen el sedimento que fue transportado en masas, depósitos de carbonatos de calcio, así como la re movilización de masas vía agua, viento y hielo.

Todos estos procesos físicos, químicos y biológicos que producen la meteorización o intemperismo de la roca madre, son uno de los agentes precursores de suelos. Estos procesos, más las características climatológicas de la región, así como el carácter orográfico del lugar; generan en los suelos horizontes con características

mineralógicas, físicas y biológicas diferentes unas de otras, tanto verticalmente como horizontalmente.

En la literatura mundial hay varios sistemas de clasificación para los perfiles de meteorización (horizontes de suelo), tomando en cuenta el tipo de roca y la zona de alteración, entre otras cosas.

Un perfil del suelo se considera como un cuerpo natural, constituido por horizontes formados como resultado de los procesos pedogenéticos, entre la interface atmósfera, biosfera, litosfera e hidrosfera. Los suelos son formados "*in situ*" si bien a través de ellos circulan arcillas y soluciones iónicas, constituyéndose un sistema termodinámicamente abierto. Un término que fue empleado por los científicos del suelo antes de los años 60's, y que en muchos textos aun aparece como suelo residual; en el sentido pedológico se forma a partir de un material parental, consistente de un saprolito producto de la meteorización, este término es diferente al concepto utilizado en el ámbito de la meteorización, el cual en este sentido forma parte del perfil de meteorización. (González, 2003)

Los horizontes se puede diferenciar en O-A-B-E-C y R y debido a las actividades biológicas se generan no solo horizontes específicos, sino además procesos específicos de meteorización. (González, 2003). Las características que presentan dichos horizontes son:

O: Material orgánico con o sin algún grado de descomposición.

A: Alteración de la estructura rocosa, acumulación de material húmico, formación estructura pedogenética.

E: Pérdida de arcillas, hierro y aluminio, concentración de arenas y limos.

B: Desaparición prácticamente total de la estructura de la roca, concentración de arcilla, carbonatos, yeso, sílice etc., remoción o adición de carbonatos, formación de estructuras, matriz de color más rojo o amarillo que el horizonte C.

C: Poco afectado por procesos pedogenéticos, no presenta rasgos de A, E ó B.

R: Capa de roca o material fuertemente cementado.

Además de los perfiles de meteorización y suelo, como resultado de los productos de la meteorización también se hace visible esto en cierto tipo de estructuras menores tanto en las rocas como en suelos; habiendo varios tipos de micro relieves tales como

los pits (hoyos), los cuales son un tipo de meteorización que desarrolla oquedades con dimensiones de centímetros a metros, siendo éstas comunes en regiones áridas y semiáridas; aunque pueden generarse en todo tipo de climas y rocas, y puede presentarse en rocas solubles como las calizas, también en granitos, areniscas y basaltos. La meteorización alveolar (variación de los pits) forma relieves tipo panal de abejas. Otros relieves o geoformas serían los tafonis y/o surcos, también producidos por la meteorización química. Los iones liberados por la meteorización química, pueden tomar varias rutas, como lo menciona González (2003); siendo éstas:

- incorporación a un sistema biológico
- adsorción superficial en las arcillas
- formación de nuevos minerales
- lixiviación
- transporte y precipitación en suelos y sedimentos formando del material saprolítico, solubilidad y movilidad del Fe, Al y Si.

2. ANTECEDENTES

Actualmente la meteorización es estudiada por varias disciplinas, teniendo diferentes enfoques. Existen muchos artículos de investigación sobre el efecto de este fenómeno en los materiales pétreos, utilizados en gran número de monumentos arquitectónicos de diferentes partes del mundo (González, 2003). Otro enfoque que se le ha dado es por la oxidación de estructuras metálicas, e investigaciones sobre la calidad del suelo para los usos agrícola y para conocer las aptitudes del suelo. También Dapena (1978) estudió la influencia de la meteorización sobre las características de los materiales pétreos utilizados en proyectos de obras públicas (González, 2003).

Mundialmente hay varios estudios que se han realizado sobre meteorización enfocados a la relación de esta con el desarrollo de crono secuencias de los suelos, y en qué Era se localiza la mayor meteorización, como el trabajo presentado por Zhang et al. (2007), donde realizaron estudios geoquímicos de suelos desarrollados de los basaltos en la isla de Hainan.

También existen trabajos sobre la alteración química de las rocas donde se evalúa precisamente los índices de meteorización. Entre los estudios más destacados se encuentran: García et al. (1983) establecieron las transformaciones geoquímicas durante el proceso de meteorización de las rocas gabrónicas del macizo de Monte Castelo (La Coruña). Otro estudio es el de Aristizábal et al. (2009), que evaluaron y cuantificaron la composición y mineralogía de los perfiles de meteorización, tanto de depósitos como de la roca fuente en un ambiente de humedad en el valle de Aburrá, Colombia; Gómez et al. (1999) caracterizaron los perfiles de meteorización desarrollados en granitos de la cordillera costera catalana, para evaluar las condiciones mineralógicas y petrográficas; Gallardo (1982) establece las relaciones entre los numerosos índices de meteorización y los aplica a los suelos de la vertiente norte de la sierra de Gredos; mientras que Taboada et al. (1987) hablan sobre el proceso de meteorización en una zona de contacto granito-lamprófido al noroccidente de la zona gallega. Por otro lado, López et al. (1985), hicieron estudios químicos y mineralógicos en el proceso de alteración de las granulitas de Cabo Ortegal, al norte de la provincia de la Coruña, España; Flórez et al. (2009) muestran algunos de los rasgos de la alteración y los minerales de las cenizas volcánicas del norte de la cordillera central de Colombia; Taboada et al. (1992) realizaron estudios mineralógicos del proceso de meteorización de dos perfiles de alteración sobre granodioritas al noroeste de España; García et al. (1997) caracterizaron un perfil de alteración sobre los granitoides de las proximidades de Santiago de Compostela, al noroeste de España; en tanto, Macías et

al. (2013) investigaron sobre las transformaciones químicas y mineralógicas durante la alteración en las rocas metabásicas de las Mariñas.

Existen en la literatura varios estudios que han abordado la cuantificación de la meteorización, entre otros destacan los siguientes: Hay et al. (1972) estudiaron el origen y la cantidad de meteorización de tres depósitos de tefra basálticas en la isla de Hawái; otro es el caso de Hisham et al. (2010) quienes investigaron la relación entre los índices de alteración y elementos traza de las rocas y sedimentos de norte de Iraq; mientras que Lyons et al. (2005) determinaron la mineralogía y química resultante de la meteorización de rocas graníticas dentro de las cuencas del río Harsit en Nueva Zelanda.

En el área de la geotecnia también hay varios estudios que se han realizado como parte importante en la construcción de obras civiles, como el que realizó Ceryan (2012), con la evaluación de los efectos en la clasificación en las rocas graníticas erosionadas del noroeste de Turkia para ser usadas en los proyectos de obras de geotecnia. Por otro lado Aristizábal et al. (2011) caracterizaron el suelo residual y saprolito de dos perfiles de alteración derivados de rocas ígneas en ambiente tropical húmedo en el Valle de Aburrá (Medellín, Colombia), con el objeto de desarrollar modelos geotécnicos; y Almaguer (2005) evaluó los perfiles de meteorización de rocas ultrabásicas, a fin de evaluar el riesgo asociado a movimiento de masas en Moa, Cuba.

En México los estudios que se han realizado sobre índices de meteorización relacionados con roca fuentes son pocos, encontrándose el de Domínguez (2011) que evaluó y cuantificó la geoquímica de los perfiles de meteorización en los depósitos de vertiente en el cerro de Denganthza, Valle del Mezquital municipio de Francisco I. Madero, Hidalgo; por otro lado se encuentra el de Drever (1971) que habla sobre el intemperismo químico en terrenos de rocas ígneas en el río Ameca, México; Otros de menor importancia son los de Dubroeuq et al. (1998) y el de Roy et al. (2008) que hablan sobre la meteorización química y procedencia de los materiales, más no de los índices de meteorización.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo en tres etapas. Siendo éstas las siguientes:

3.1. Gabinete

3.1.2. Recopilación bibliográfica

Se realizó una exhaustiva revisión de las diferentes referencias bibliográficas sobre el tema, al igual que la búsqueda de trabajos ya hechos en el ámbito local, nacional e internacional, encontrándose una gran cantidad, tanto de suelos como de meteorización.

3.1.2. Elaboración de mapas

Todos los mapas se realizaron en el Software ArcGis versión 10, tomando como referencia mapas del INEGI y del Servicio Geológico Mexicano, a partir de estos se digitalizaron mapas de suelo, geología, hidrografía y topografía entre otros; una vez elaborados, se hicieron las ediciones necesarias para lo requerido en el presente trabajo.

3.1.3. Estrategias y Plan de muestreo

Esto se realizó tomando como base los mapas de topografía, geología y planos edafológicos, para que los muestreos se hicieran de manera general en toda el área de estudio.

3.2. Campo

Este trabajo consistió en los siguientes muestreos: roca, regolito y suelo.

3.2.1. Roca

El muestreo de roca se efectuó en afloramientos alrededor del área de estudio (fig.1), primeramente se hizo un recorrido por la ciudad para observar los lugares estratégicos de la toma muestras de roca fresca y roca alterada.

3.2.2. Regolito

El muestreo de Regolito se llevó a cabo al mismo tiempo que la toma de muestras de suelo, colectándose al pie de los cerros (fig.1); en algunas ocasiones se encontró también en los perfiles de suelo, procediendo a la recolección de éstos.

3.2.3. Suelo

El muestreo se llevó a cabo en base a las especificaciones de la NMX-AA-132-SCFI-2006, que establece las técnicas para la obtención y manejo de muestras de suelo. Considerándose para el presente trabajo un muestreo de tipo exploratorio y sistemático. Tomándose en cuenta las siguientes consideraciones:

A partir de un recorrido previo por los diferentes puntos de la ciudad y de una revisión de planos de ésta se ubicaron estratégicamente los puntos de muestreo (anexo tabla 1). El tipo de toma de suelo fue superficial, en el cual se consideraron aquellos lugares, donde no hubiera actividad antropogénica (fig.1).

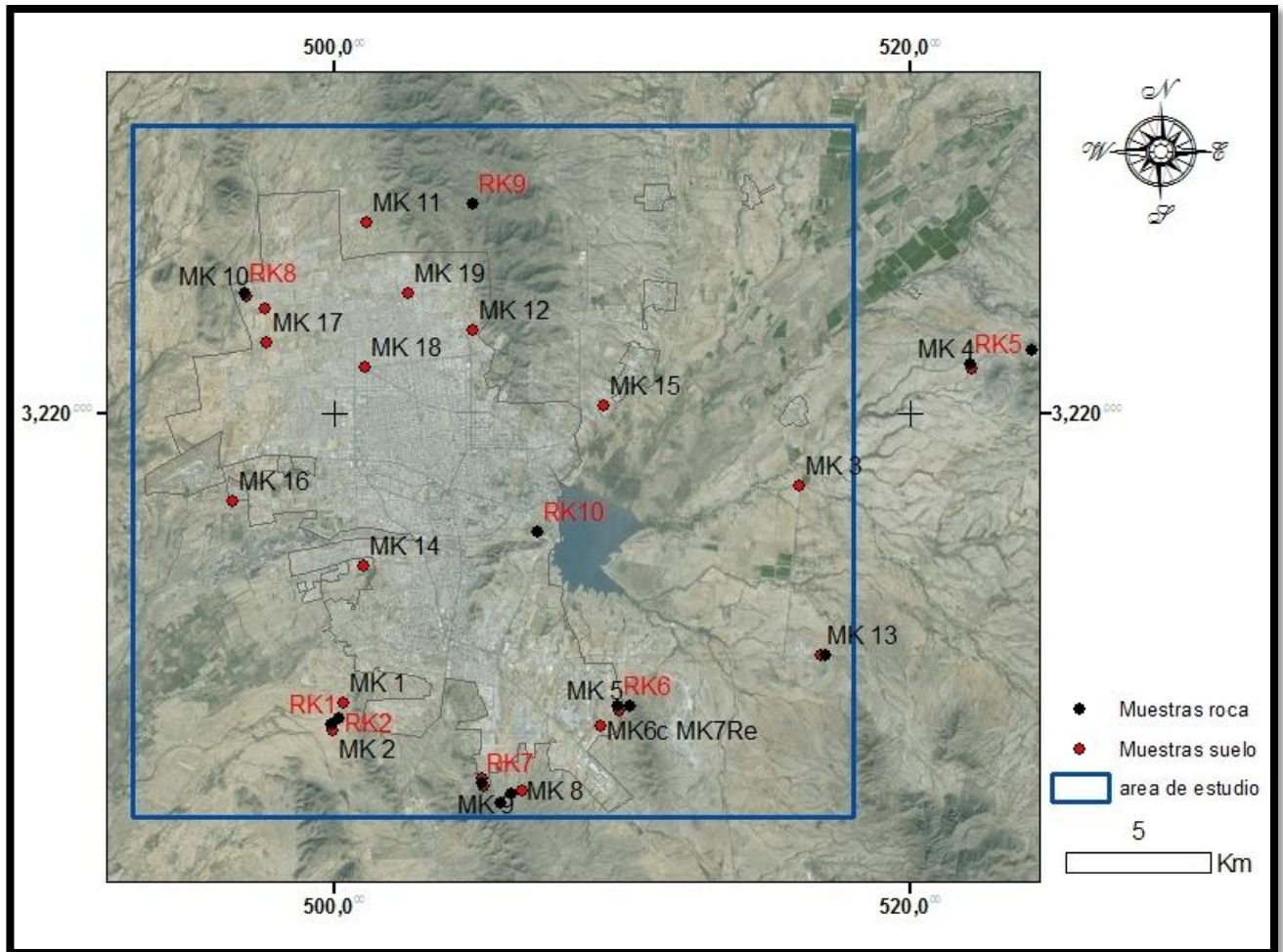


Fig. 1. Mapa de ubicación de muestras de roca y suelo en el área de estudios.

3.3. Laboratorio

3.3.1. Preparación física de Roca, Regolito y Suelos

Roca:

La roca se molió a través de una quebradora de quijadas de acero inoxidable Braun Chipmunk, una vez obtenida la muestra, ésta pasó por el tamiz 325, la cual fue seleccionada para el análisis geoquímico.

Suelo y Regolito:

Muestras de suelo y regolito se disgregaron, estas fueron secadas al horno durante 24 hrs y una vez enfriadas se pesaron, para ser sometidas a un análisis granulométrico según la metodología de Folk (1980).

Tratamiento de muestras para Geoquímica:

Suelos y Regolito

El sedimento obtenido a partir del tamiz 230, se pulverizó en mortero de ágata a tamaño menor del tamiz 325. Esto con la finalidad de ser enviado al análisis geoquímico.

3.3.2. Análisis Geoquímico, Físico-Químico y Petrográfico (Roca, Regolito y Suelo)

Geoquímico:

El análisis geoquímico de elementos y óxidos mayores se evaluó tanto para roca, regolito y suelo.

Una vez obtenidas las muestras para los análisis geoquímicos, éstas fueron tratadas en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cadiz, España. Donde las muestras se analizaron por espectrómetro u-XRF (M4 TORNADO), que consiste en un método de alta sensibilidad y no destructivo.

Fisicoquímico:

El análisis fisicoquímico solo se realizó para suelo, considerando los parámetros establecidos en la NOM-021- SEMARNAT-2000, que establece los criterios de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

Una vez obtenidas las muestras del proceso físico, éstas se analizaron para su tratamiento fisicoquímico en la escuela de Agricultura y Ganadería.

Análisis Petrográfico:

Se elaboraron láminas delgadas de rocas y briquetas de suelos.

Interpretación mineralógica de roca y suelo a partir de análisis petrográfico de los minerales identificados en cada lámina delgada.

3.3.3. Análisis Físico de la Roca

A partir de los fenómenos meteorológicos y usando la técnica del Índice Q (Deere, 1967) se determinó el Índice de fracturamiento para roca. (Ramírez *et.al.*,2004), en donde se calcula la calidad de las rocas con base en tablas, asignar la calidad del macizo según los parámetros de la formula Q.

$$Q = (RQD/Jn) * (Jr/Ja) * (Jw/SRF)$$

Donde:

Q: Es la Estimación del tamaño de los bloques) x (Estimación de la resistencia del corte, entre los bloques) x (Esfuerzo activo).

RQD: Es la calidad de la roca definida por (Deere et al. (1967), que puede variar de 0 (macizos rocosos de muy mala calidad) a 100 (macizo rocosos de excelentes calidad).

Jn: Es un coeficiente asociado al número de sets de estructuras presentes en el macizo rocoso que puede variar de 0.5 (macizo masivo o con pocas estructuras) a 20 (roca totalmente disgregada o triturada).

Jr: Coeficiente asociado a la rugosidad de las estructuras presentes en el macizo rocoso, que puede variar de 0.5 (estructuras planas o pulidas) a 5 (estructuras poco persistentes espaciadas a más de 3m).

Ja: Coeficiente asociado a la condición o grado de alteración de las estructuras presentes en el macizo rocoso, que puede variar de 0.75 (vetillas selladas en roca dura con rellenos resistentes y no degradables) a 20 (estructuras con rellenos potentes de arcilla).

Para este estudio, se realizaron mediciones y observaciones de los bloques de los diferentes tipos de rocas de los alrededores del área de estudio y en base a los cálculos mediante la fórmula de RQD se definió su calidad de las rocas.

3.3.4. Cálculo de Erosión Hídrica

Ésta se evalúo a partir de la ecuación corregida de la erosión universal, la cual se expresa de la siguiente manera.

$$A= RKLSCP$$

Donde:

A= Pérdida Total de Suelo por Unidad de Área (ton/ha/año)

R= Factor erosividad de las lluvias (MJ/ha*mm/hr)

K = Factor erodabilidad del suelo (Ton/ha.MJ*ha/mm*hr) (anexos tabla 2).

LS = Factor topográfico, que es en función de longitud, inclinación y forma de la pendiente (adm)

C = Factor ordenación de los cultivos (adm)

P = Factor de prácticas de conservación de la estructura del suelo (adm)

3.3.5. Estimación de Índices Climatológicos a partir de la evaluación de varios autores:

Índice de erosión potencial de Fournier:

$$\text{Fournier: } K= (\sum Pi^2)/ P$$

Donde:

K: índice de erosion potencial

Pi: Mes de mayor precipitación media (mm)

P: Precipitaciones anuales (mm)

Índice de Aridez de Lang:

$$\text{Lang: } Pf= P/tm$$

Donde:

Pf: índice de aridez

P: Preipitación media anual en mm

tm: temperatura media anual en °C

Índice de Aridez de Martonne

$$\text{Martonne: } Ia= P/[tm+10]$$

Donde:

Ia: índice de aridez

P: Precipitación media anual en mm

Tm: temperatura media anual en °C

3.3.6. Índices Geoquímicos

Los índices geoquímicos se utilizan para observar la alteración de roca, regolito y suelo. Éstos son muy numerosos, y suelen relacionar diferentes componentes químicos de las rocas (óxidos mayores) y horizontes de suelo. En el presente trabajo se consideraron las relaciones entre óxidos mayores (Diagramas de Harker, 1909 y Chesworth, 1973) e índices de meteorización; esto a partir de los análisis geoquímicos de los óxidos mayores como: SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MnO, Na₂O, K₂O y CaO, tanto en roca, regolito y suelo considerando los siguientes autores:

Diagrama de Harker(1909): correlaciona los elementos menos móviles (SiO₂), contra aquellos elementos más móviles (resto de los óxidos).

Diagrama de Chesworth (1973): compara roca fresca a partir de la suma de óxidos SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃, CaO +MgO y Na₂O + K₂O en un diagrama, donde el extremo superior del triángulo es la zona residual, que corresponde a la roca ya alterada (suelo o regolito).

Índice Meteorización Potencial (**IMP**) de García (1976), utilizando CaO, MgO, K₂O y Na₂O a partir de la siguiente ecuación:

$$IMP = 10.2 CaO + 13.1 MgO + 8.1 K_2O + 10.5 Na_2O$$

Índice de Alteración Química (**CIA**) de Nesbitt y Young (1989), utilizando Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O a partir de la siguiente ecuación:

$$CIA=(Al_2O_3/Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)*100$$

Índice de Meteorización (**IM**) de Ruxton (1968), solo utiliza SiO₂ y Al₂O₃, a partir la siguiente ecuación:

$$IM = SiO_2/Al_2O_3$$

4. MARCO GENERAL

4.1. Localización

La ciudad de Hermosillo se localiza en la parte centro - suroeste del estado de Sonora (fig. 2), siendo la capital de dicho estado. Sus principales vías de comunicación son, por la carretera federal México 15, México 14 y México 16, y por las carreteras interestatales, Sonora 100 Hermosillo-Bahía de Kino, Sonora 140 Hermosillo- Mazatán, Sonora 110 Hermosillo-Santa Eduwiges, Sonora 88 entronque a la carretera Mina Pilares. La zona de estudio comprende un área de 600 Km² aproximadamente, abarcando la mayor parte de la zona urbana enmarcándose en las siguientes coordenadas geográficas (UTM) 3206000N-3230000N y 493000E-518000E.

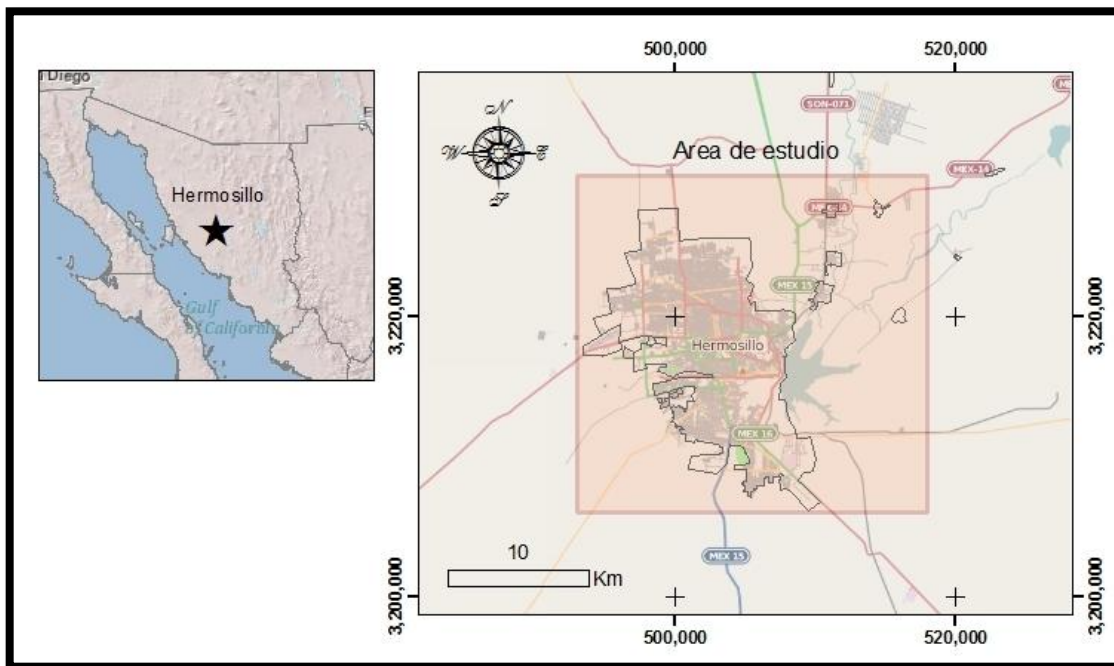


Fig.2.Localización del área de estudio

4.2. Clima

El clima de la ciudad de Hermosillo es desértico cálido (Bwh), de acuerdo a la clasificación climática de Köppen (1936), con una temperatura media anual de 25°C durante la mayor parte del año, y una precipitación promedio anual de 375.5 mm. (IMPLAN,2006).

Tomando datos históricos de la estación climatológica ubicada en el Aeropuerto de la Cd. de Hermosillo, y un registro de 30 años partiendo de los años 80's hasta el 2009, se realizó el análisis de las épocas de las 4 estaciones del año, encontrándose que las precipitaciones en el invierno, entre los meses de Diciembre a Febrero, oscilan entre los 13 mm con precipitaciones record en el mes de Enero de 1995 y Diciembre del 1993, donde se registraron 44mm y 43.4 mm respectivamente. Con respecto a la temperatura en esta temporada, se ha mantenido constante en un rango de 20° C, un record de temperatura máxima de 43.4°C para el mes de Diciembre del 1993 y mínimos en el mes de Diciembre y Enero del 2007 con -1°C.

En la temporada de primavera durante estas décadas, las precipitaciones fueron pocas o nulas, reportándose 7 mm como promedio, con la mayor precipitación de 35.5mm. en Marzo del 1995, y la temperatura promedio fue de 23°C, la máxima registrada fue de 45°C en Mayo de 1989 y la mínima de 1°C en Abril de 1980.

Durante la estación de verano las temperaturas se incrementan, en el análisis que se realizó de estos 30 años la temperatura promedio fue de 32°C, con una máxima de 49°C en Abril 1996 y una mínima de 10°C en Agosto de 1981. Respecto a las precipitaciones aun cuando el promedio en esta temporada fue de 18.91 mm., se registra un aumento en las lluvias debido al monzón de verano; en el año de 2003 en los meses de Julio y Agosto, se presentó un record de precipitación de 114.6 mm y 128.7 mm respectivamente, a pesar de que en ese año solo hubo 13 días lluviosos (fig. 3).

En la época de otoño las precipitaciones se presentaron con menos frecuencia teniendo un promedio de 11.5 mm y máxima 43.9mm del mes de Octubre de 1994; las temperaturas máximas registradas en esta temporada fue de 45°C en Septiembre del 2000 y una mínima de 4.0°C en Octubre de 1994, y según los datos históricos de la estación, la temperatura promedio fue de 25°C, la máxima de 46°C en Septiembre de 1983 y la mínima record en noviembre de 1985 con 1°C registrado.

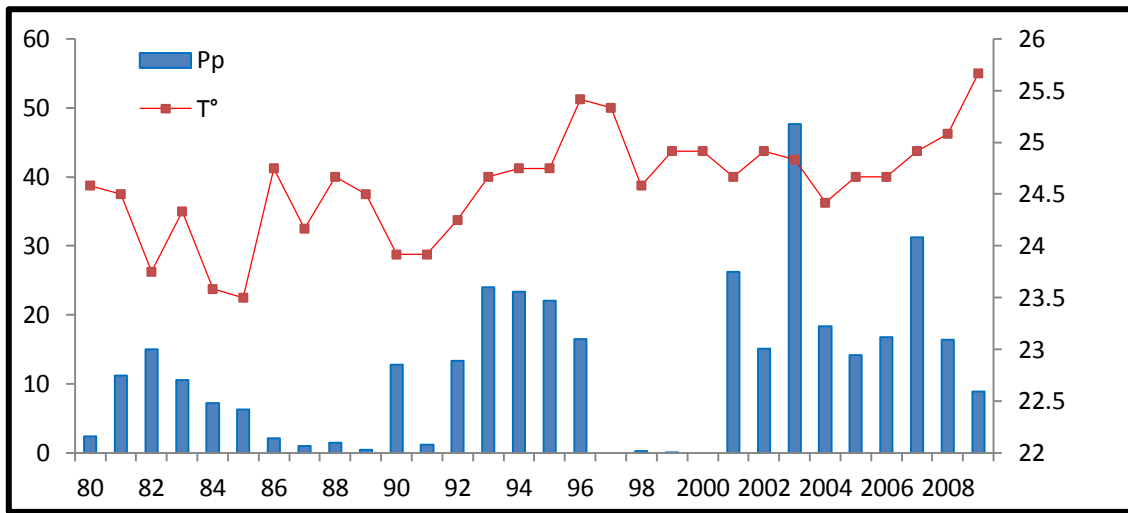


Fig. 3. Gráfica histórica (30 años) de precipitación y temperatura.

4.3 Vientos

Según los datos recabados de la estación meteorológica del aeropuerto internacional Gral. Ignacio Pesqueira, los vientos dominantes en la mayor parte del año provienen del SW (fig. 4). Los vientos más fuertes se presentan en los meses de julio, agosto y septiembre, con variaciones de 60 a 80 Km/h que eventualmente pueden presentarse huracanados con ráfagas de hasta 120 km/h durante los huracanes o tormentas en las costas de Golfo de California. (IMPLAN 2006).

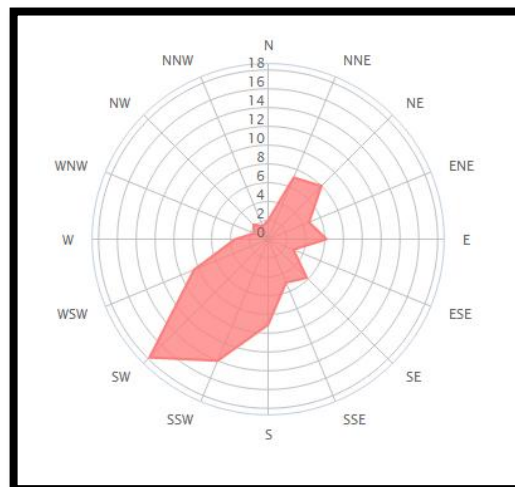


Fig. 4. Rosa de vientos Cd. Hermosillo, Sonora. IMPLAN, 2006

4.4. Fisiografía Y Geomorfología

Regionalmente el área de estudio se encuentra enmarcada dentro de la Provincia Fisiográfica de la Llanura Sonorense (Fig. 4), según la clasificación de INEGI (2000). Ésta se extiende de sur a norte, abarcando gran parte de las regiones costeras del Estado de Sonora, adoptando forma de cuña con orientación hacia el sur. Sus colindancias son: en el extremo noroeste con la Península de Baja California, hacia el oriente con la Sierra Madre Occidental y en su extremo sur con la Llanura Costera del Pacífico. Las características de este sistema fisiográfico es que presenta sierras paralelas con orientación noroeste a sureste, separadas entre sí por grandes bajadas de aluviones y llanuras, siendo estas últimas más amplias y hacia la costa.

La provincia Desierto o Llanura Sonorense a su vez se divide en dos subprovincias, siendo éstas el Desierto de Altar y Sierras y Llanuras Sonorenses, incluyendo además una discontinuidad denominada Sierra del Pinacate (Fig.5).

El área de estudio se localiza dentro de la parte centro-sur de la subprovincia de Sierras. Presentando las siguientes características fisiográficas:

Comprende un área de 81,661.40 km². Está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Tales sierras son más elevadas (700 a 1 400 msnm) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente, casi en todos los casos las sierras son más angostas que las llanuras y su espaciamiento es tal, que nunca quedan fuera de la vista.

Las pendientes de las sierras son bastante abruptas. Los arroyos que drenan esta región efectúan una fuerte erosión produciendo espolones laterales que se proyectan en las llanuras. Las llanuras representan alrededor de 80% de la subprovincia.

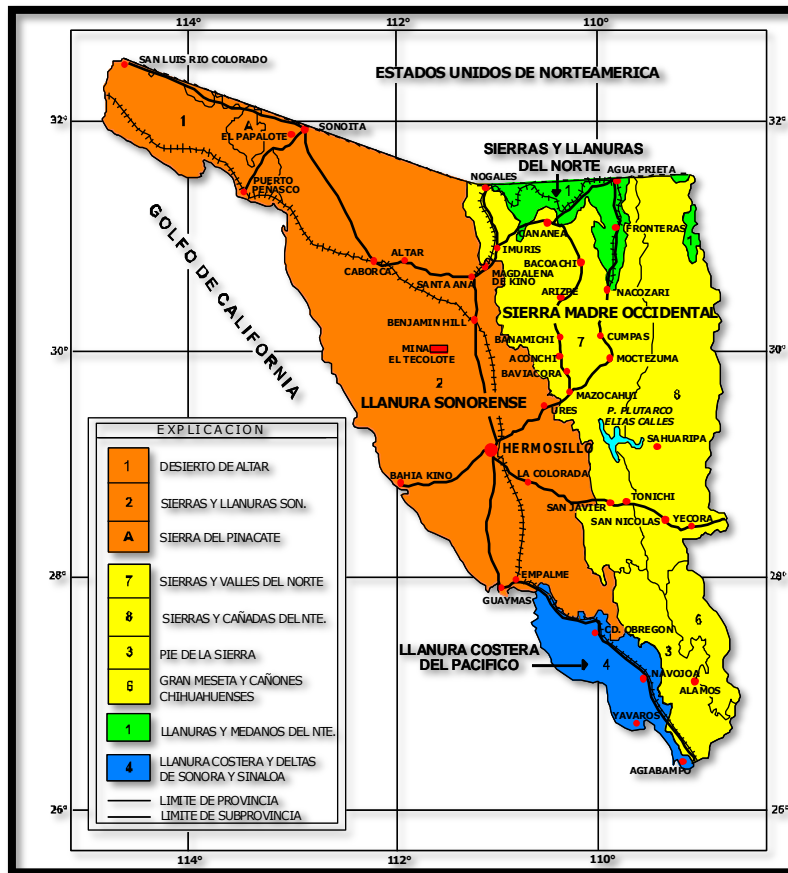


Fig.5 Mapa Fisiográfico de Sonora Fuente: INEGI

En el área de Hermosillo se encuentran una serie de cerros tanto dentro como en las partes aledañas, presentando éstos las siguientes características:

Hacia la parte norte se localiza la unidad fisiográfica más grande cuyo sistema corresponde a la Sierra Bachoco, la cual se extiende en una dirección al NW-SE, siendo la de mayor altura en la ciudad con una altitud máxima de 500 msnm, entrando en la descripción de Sierras en el sistema de topofomas como se muestra en la fig. 6, con cimas redondeadas y pendientes muy paralelas.

En la parte Este se encuentran un conjunto de unidades donde su mayor altitud no rebasa los 250 msnm con dirección NE-SW y entran el sistema de topofomas como Llanuras, donde su cima es de forma redondeada y sus curvas son de tipo cóncavo, éstas son el cerro del Mariachi, cerro las Amapolas, al igual que el cerro Piedra Bola ubicado al SW de la Ciudad; en la misma ubicación se encuentra el cerro La Cementera con una altitud de 350 msnm aproximadamente y se extiende en dirección

NE-SW, con sus pendientes de forma cóncava y sus cimas son de tipo puntiaguda; en esta área se encuentra el cauce del Río Sonora, presentando una curva de nivel de 210 msnm, formando lo que se le conoce como el Vado del Río, que recorre la ciudad de este a oeste, siendo la parte más baja con una clasificación de llanura según INEGI (2003).

Hacia la parte Este del área de estudio se localiza la Sierra Los Leyva con una altitud de 500 msnm, una orientación NW-SE, y se clasifica en el sistema de topofomas como Sierra, con cimas puntiagudas y pendientes muy paralelas. Del lado SE se ubica la unidad fisiográfica cuyo sistema corresponde a la Sierra La Flojera, con una altitud de 350 msnm, orientada de NW-SE, con sus cimas afiladas y sus pendientes paralelas. Hacia el área Sur la ciudad se encuentra limitada por la unidad fisiográfica conocida como el Cerro Agualurca, con una altitud de más de 600 msnm y el cual se extiende 8 km en una dirección NW-SE correspondiendo en el sistema de topofomas a Sierra, igual que el cerro El Espía el cual se encuentra más hacia el lado oeste, con una altitud de 330 msnm, orientación NW-SE con sus cimas muy suaves y sus curvas de nivel muy paralelas. La parte SW se encuentra limitada por los cerros Colorado, el Yeso y la Galera, con altitudes entre 400 y 240 msnm, correspondiendo al sistema de topofomas como bajada con lomerío y con sus pendientes redondeadas y curvas paralelas.

En el área NW de la ciudad se tiene un conjunto de unidades fisiográficas descritas en el sistema como bajadas, los cuales se conoce como Cerro Bola y Las Cuevas, con altitudes de 400 y 350 msnm respectivamente, pendientes muy paralelas y cima circular.

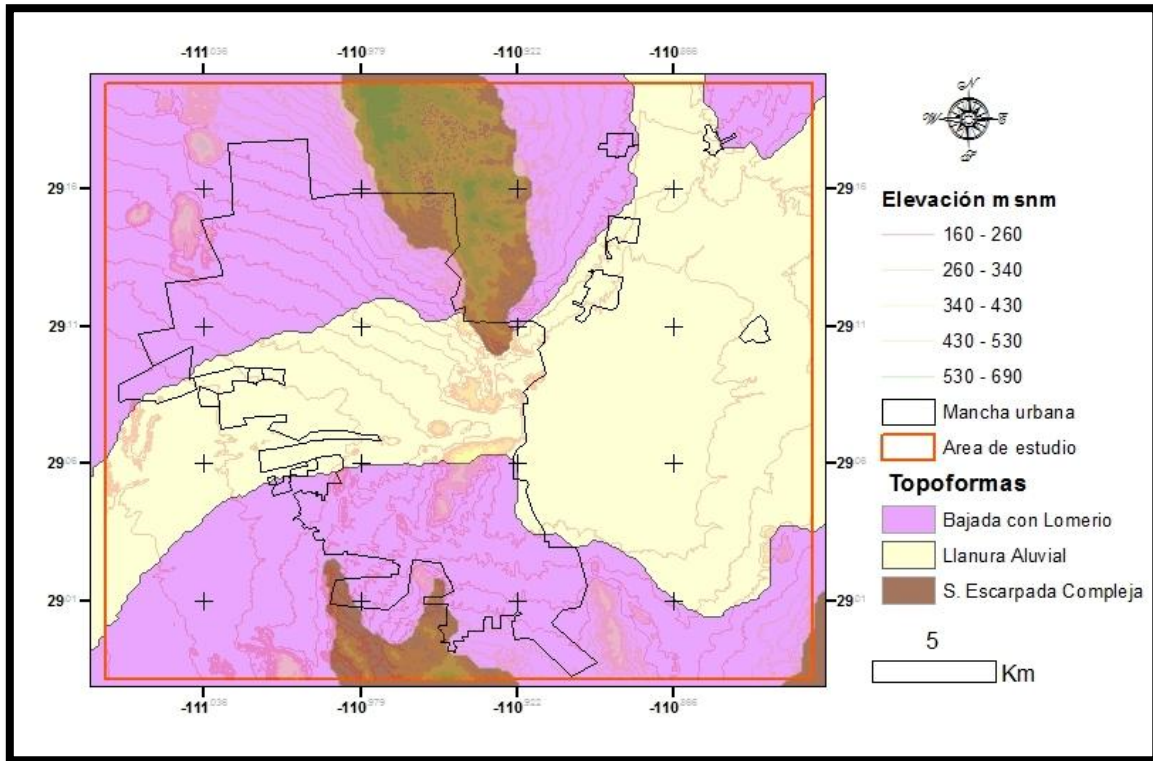


Fig. 6. Mapa de topografía área de estudio (considerando las topografías de INEGI, 2003).

4.5. Hidrografía

La zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del río Sonora RH9. Ésta a su vez se subdivide en las subcuencas Río Sonora 1, Río Sonora 2, Río Sonora 3 y Río San Miguel. El área de estudio se encuentra dentro de la subcuenca Río Sonora 2 (IMPLAN, 2006).

Se caracterizaron cada una de estas subcuencas en los alrededores y en la misma Cd. de Hermosillo, en base a: patrón hidrográfico, área y dirección del flujo, esto con la finalidad de observar hacia dónde va la dirección de transporte del sedimento que es arrastrado por las corrientes hidrográficas, y además el de determinar cuáles son las zonas de depositación de sedimentos, y tomando en cuenta para esta caracterización cómo estos flujos han cambiado de dirección en muchas partes de la ciudad debido a la plusvalía que ha tomado la misma ciudad. La hidrología en general del área de estudio está integrada por varias subcuencas dentro de la ciudad (fig.7). En la tabla 1 se describen éstas en función del área principal que las divide, así como de su extensión.

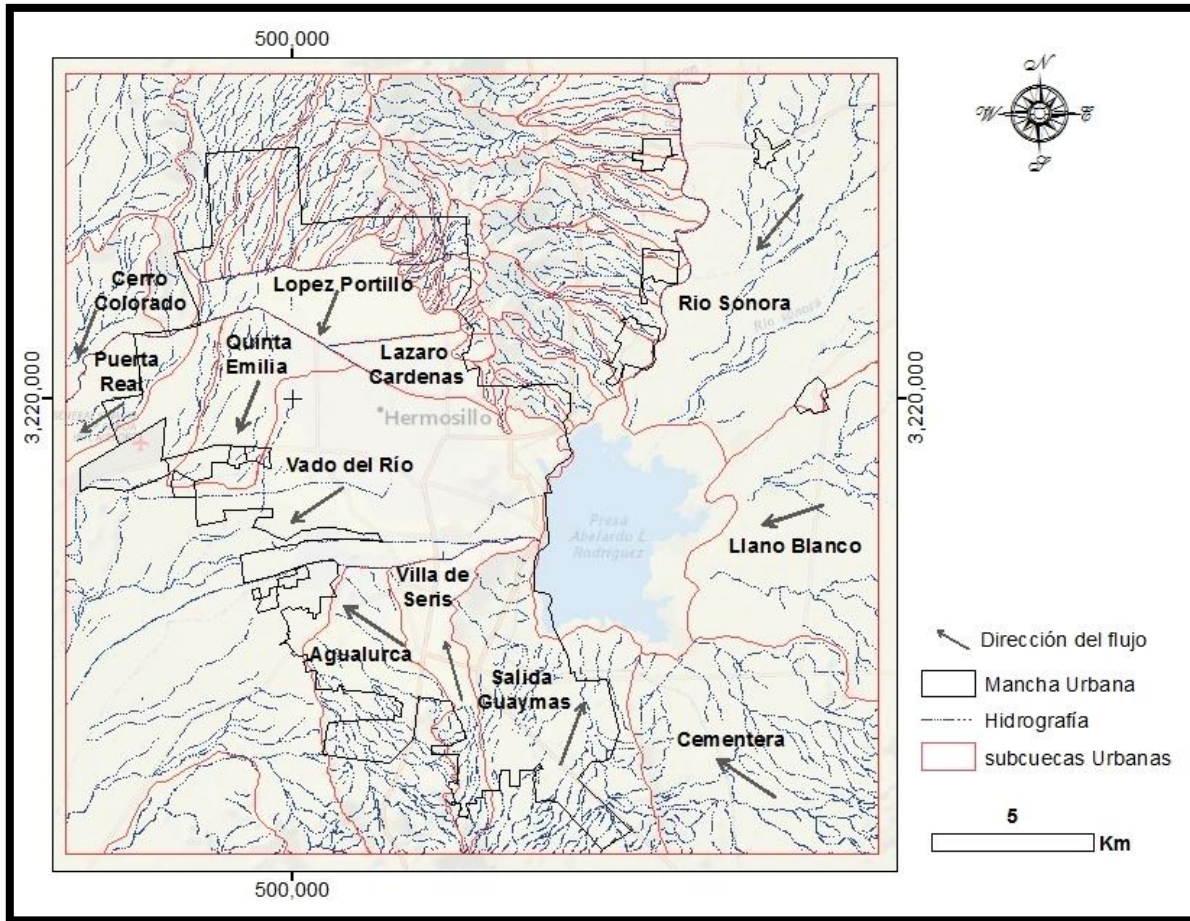


Fig. 7. Hidrología área de estudio.

Fuente: editado INEGI

Tabla 1. Subcuencas de la zona hidrográfica de los alrededores de la Cd. de Hermosillo.

Nombre cuenca	Sub	Área Km ²
López Portillo		14.372
Lázaro Cárdenas		6.294
Quinta Emilia		13.629
Agualurca		27.700
Villa de Seris		13.056
Salida a Guaymas		39.646
Vado del Río		131.26
Puerta Real		8.203
Cerro Colorado		3.901

Subcuenca López Portillo con un área de 14.372 Km² se localiza al noreste de la ciudad incluyendo las colonias de López Portillo, Eusebio Kino Villa Sonora, Jacinto López entre otras, sus escorrentías vienen desde el cerro el Bachoco en dirección NE-SW, y llegan al canal del Boulevard López Portillo, el cual llega y se une al canal del Boulevard Lázaro Cárdenas en la calle Margarita Maza de Juárez.

Subcuenca Lázaro Cárdenas nace de las escorrentías de las laderas de la parte SW del cerro el Bachoco, con una dirección SW dando inicio al canal Lázaro Cárdenas, tomando una dirección hacia el NE. Tiene un área de 6.294 Km² abarcando las colonias de Loma Linda, Bugambilias, Jesús García, Ley 57, Benito Juárez entre otras.

Subcuenca Quinta Emilia tiene un área de 13.629 Km² aproximadamente, y está localizada al norponiente de la ciudad; cruza las colonias Quinta Emilia y Perimetral norte principalmente, llegando hasta el Boulevard García Morales en una dirección SW.

Subcuenca Agualurca, nace de las escorrentías de los cerros Agualurca, Las Víboras y El Espía, con dirección SE-SW abarcando un área de 27.700 Km². Este drenaje pluvial pasa por el área recreativa Santa Clara y la colonia Las Minutas, que incluye el arroyo Las Víbora; dentro de ésta se encuentran las escorrentías del cerro Tecoripa las cuales tienen una dirección SE-NE y llegando hasta el canal del Seri.

Subcuenca Villa de Seris cubre un área de 13.056 Km², inicia de la parte NE del cerro Agualurca hacia la ciudad cruzando por el Centro Ecológico del Estado de Sonora, entrando a la ciudad por la parte sur. Al este de la subcuenca se encuentra el cerro Piedra Bola orientado NE-SW, y el cerro de la cementera, la dirección aguas abajo son hacia el Boulevard Vildósola, llegando hasta el Periférico Poniente y desembocando en el canal Villa de Seris, fluyendo en dirección poniente de la ciudad. Las colonias que entran dentro de esta subcuenca son el Jito, Villa de Seris, Emiliano Zapata, Peri sur, Altares, etc.

Subcuenca Salida Guaymas tiene un área de 39.646 Km² y se encuentra localizado entre la Sierra la Flojera por la parte poniente y de la parte oriente del cerro Piedra Bola y de la Cementera antigua, el principal arroyo es el Arroyo Agualurca, pasando sus principales agua superficiales por la colonia Nuevo Hermosillo por la zona industrial de la ciudad, llegando a la presa Abelardo L. Rodríguez al igual de las escorrentía de los cerros Piedra Bola y de la Cementera los cuales cruzan a las colonias Amapolas hasta llegar a desembocar a la presa.

Subcuenca Vado del Río. Es la más amplia del área de estudio, abarcando la mayor parte de la ciudad, con un área de 131.26 Km² la cual inicia desde la parte Noreste de la ciudad y sus escorrentías van hacia la parte suroeste abarcando la mayor parte de la zona centro oeste y suroeste, su principal afluente es el cauce del río Sonora, el cual

recorre toda la ciudad de este a oeste inundando a todos los sectores residenciales del lado oeste.

Subcuenca Puerta Real con área de 8.203 Km² se encuentra al noroeste de la ciudad, su drenaje pluvial proviene de las aguas de los niveles más bajos del Cerro Colorado, con dirección hacia el suroeste para llegar a formar parte del arroyo Las Pasadas; esta subcuenca abarca el área de las colonias Puerta Real, San Bosco, La Manga, Los Arroyos, siendo el área por donde pasan las aguas superficiales de la subcuenca.

Subcuenca Cerro Colorado y cubre un área de 3.901 Km² está ubicada al noroeste de la ciudad, sus aguas bajan del Cerro Colorado con una dirección hacia el suroeste para llegar a desembocar al Canal del Boulevard Lázaro Cárdenas final.

4.6. Geología

En el área de estudio afloran rocas ígneas de carácter intrusivo y extrusivo, sedimentarias y metamórficas (fig. 8).

Las rocas más antiguas son de origen sedimentario de edad Ordovícico-Pérmico (Rodríguez, 1981) y afloran al sureste de Hermosillo en la Sierra los Leyva (fig. 8). Estas son calizas y areniscas depositadas en una plataforma somera Paleozoica, presentan rumbos de 10° NE-SW y echados 35° NW, estas rocas en algunas áreas probablemente se encuentran metamorfizadas, pasando a ser mármoles conteniendo wollastonita de forma bacilar a radial (foto 10). En Loma el Rayo aflora esta secuencia, presentando rumbo 130°SE-NW y echados 35°NE.



Foto 1. Mármol conteniendo wollastonita de forma bacilar.

En la Sierra la Flojera aflora una secuencia sedimentaria que corresponde a calizas (fig.8) y areniscas de grano muy fino, con rumbos 140°SE NW y echados 44°SW, y con un intemperismo Kárstico. Asociándole una edad del Triásico superior; los fósiles encontrados en estas rocas (calizas) son crinoides y gasterópodos (foto 2). Además se presenta mucha cantidad de fierro inestrastratificado en las calizas.



Foto 2. Muestra Cerro La Flojera.

Rodríguez (1981) describió esta litología de calizas laminadas, algo arcillosas de aspecto brechoide, dentro de las características la secuencia presenta lentes y horizontes de microconglomerados. El estudio petrográfico reveló que estos lentes y horizontes construido por fragmentos de pedernal, cuarcita, fusilínidos y crinoides en matriz de micrita, dándole una edad Mesozoico.

Los afloramientos más importantes de rocas ígneas de composición granito-granodiorita (foto 4, 5 y 18) como lo menciona Rodríguez (1981), se localizan en la Sierra el Bachoco, cerro el Mariachi, el Coloso, el Ranchito, cerro las Víboras, al suroeste del cerro de la Cementera vieja, al norte de la Piedra Bola y este-noroeste de la Sierra Agua Lurca (fig.8); en ésta última se observa la roca de color rosa variando a un amarillo ocre a blanco, esto debido al grado de intemperismo (foto 3).

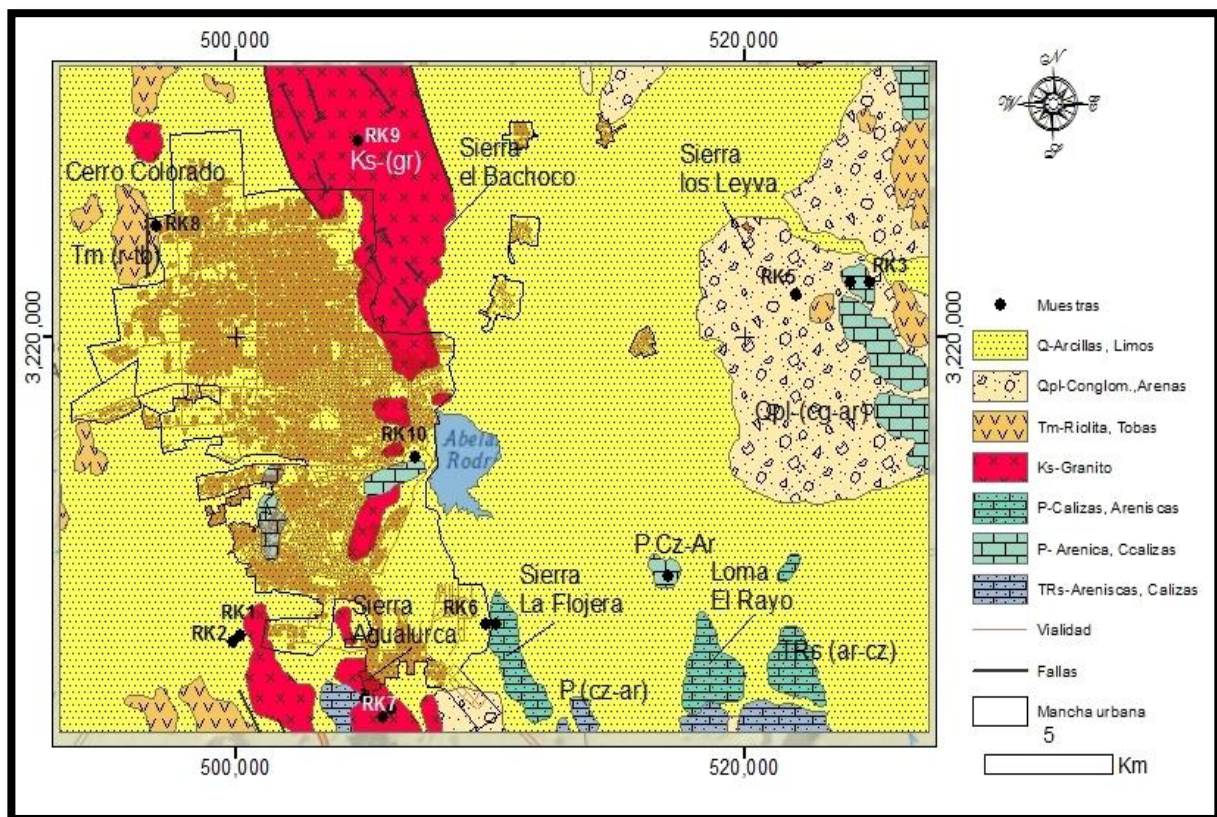
Además se observan numerosas fracturas, que probablemente sean diaclasas cuya orientación principal es NW-SE; las unidades principales que afectan a esta unidad son diques de distintos espesores, composición y longitudes. A estas rocas se les asigna una edad del Cretácico superior.



Foto 3. Afloramiento Sierra el Bachoco.

Al noroeste de la ciudad en el Cerro Colorado afloran rocas que corresponden a Riolita, extendiéndose este afloramiento en una superficie de aproximada de 2 km². Este afloramiento de color rojizo a rosado claro es afectado por fallamiento de rumbo N30°E y echado de 74°SE; esta secuencia en otros lugares se comportan como tobas, asignándole una edad del Terciario medio-superior (González, 2005).

El material más reciente que rellena la mayoría del valle, corresponde a una secuencia de gravas, arenas y limos del Plio-Cuaternario (fig. 9).



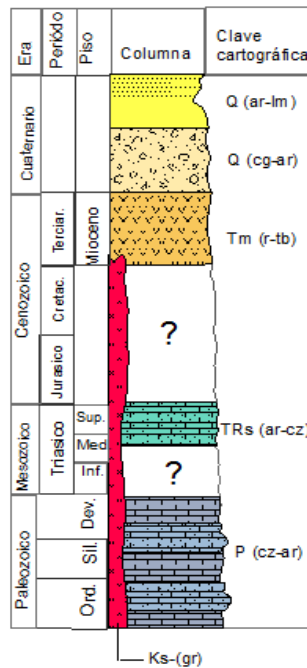


Fig.9.-Estratigrafía área de estudio.

4.7. Suelos

En base al mapa Edafológico de INEGI (1983) los suelos reportados para el área de estudio y los más representativos son: Feozem, Xerosol, Regosol y Litosoles con este último en los cerros del área de estudio.

Feozem: son suelos que se pueden representar en cualquier tipo de relieve y clima excepto en clima tropicales. Representa el 27% de los suelos del área de estudio, y se caracteriza por tener una capa superficial oscura que contiene 1.13% en materia orgánica y 1.6% en CaCO_3 , es rico en contenido de arcillas con 39.4% y menor cantidad de arenas con 26.6% y 34% de limos. Son suelos de profundidad muy variable y se erosionan con facilidad, el uso óptimo de éstos depende de la disponibilidad de agua, su símbolo es (H) (fig. 10).

Xerosol: Se localiza en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Ocupa el 21.5% en el área de estudio, su capa superficial por lo general es de color claro por el bajo contenido de materia orgánica de 0.43%, es rico en arena con un contenido del 81%, 10% de limos y un contenido de arcillas del 8% (fig.10). Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza, estos suelos en la ciudad tienen un contenido de 2.4% de carbonatos; son de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en

laderas o si están directamente sobre caliche. Su símbolo es X. Su vegetación natural es de matorral y pastizal.

Regosol: Capa de material suelto que cubre a la roca, tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son de color claro con un contenido de 0.48% en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen, y es el segundo suelo más representativo en la ciudad con 26% de cobertura. Su contenido de arena es 83.3%, 12% en limos y 4.7% en arcillas y con un contenido de CaCO₃ del 0.94%, muchas veces están asociados a Litosoles y con afloramientos de roca. Su símbolo es (R), son suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve (fig. 10).

Yermosol: Literalmente, suelo desolado en ocasiones presentan capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna parte del subsuelo, con un contenido de materia orgánica en 0.97% y 4.45% de carbonatos. La capa superficial de los Yermosoles es aún más pobre en humus y generalmente más clara que los Xerosoles, con un alto contenido de arena del 69.8%, 21% de limos y 9.2% de arcillas. Su símbolo es (Y). Son suelos localizados en las zonas más áridas del norte del país como la Sierra de la Giganta en Baja California Sur, Llanuras Sonorenses, entre otros. Ocupan el 11% del área de estudio, su vegetación típica es el matorral o pastizal.

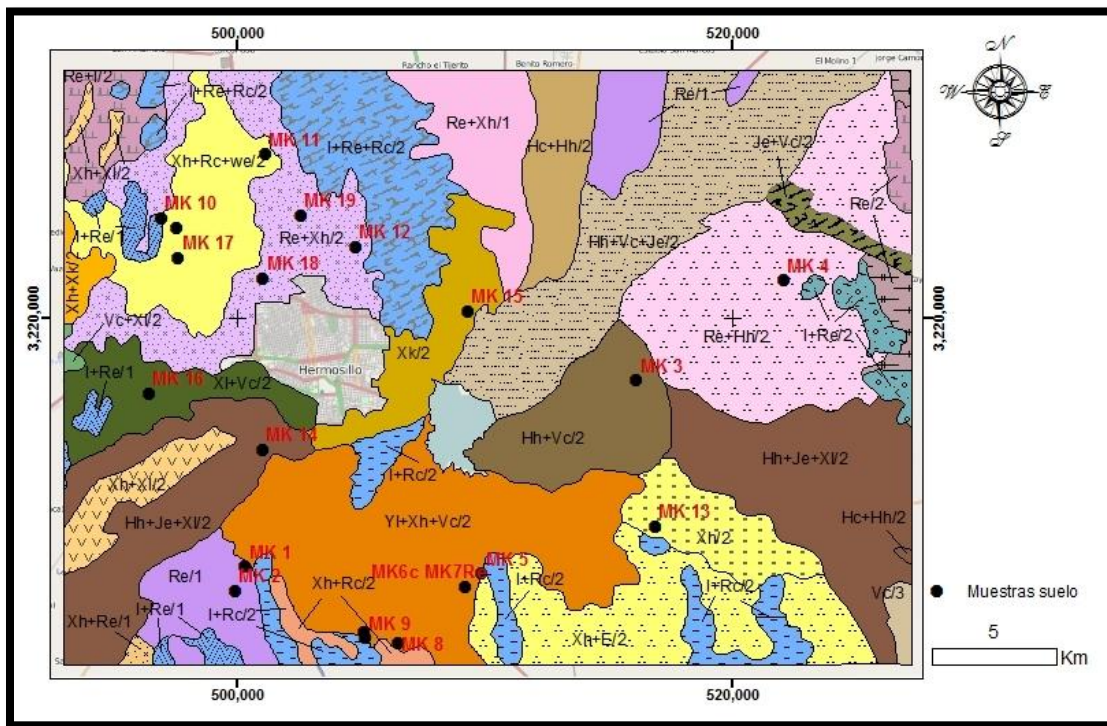


Fig. 10. Mapa suelos y ubicación de muestreos de suelo Fuente: editado : INEGI

5. RESULTADOS

5.1. Índices climáticos

Como lo menciona Bach (1977), el clima es factor *activo* en la edafogénesis, ya que participa de un modo directo en la alteración de las rocas mediante los procesos de meteorización. Considerándose como el elemento primario que imprime a la evolución o dinámica de un perfil de suelo. Pero también condiciona a un gran número de procesos biológicos, humidificación y degradación de la materia orgánica, entre otros.

Porta et al. (1994) señalan que las características climáticas y en particular la precipitación y temperatura, determinan la naturaleza y la intensidad con que actúan los procesos y por lo tanto, el producto formado. El planteamiento asume que la meteorización química se incrementa en la medida en que mayor sea la disponibilidad de agua y con el aumento de la temperatura González et al. (2004). En la Fig. 11 se observa como en base a los datos de precipitación y temperatura en el periodo de 30 años de análisis la ciudad de Hermosillo la meteorización química es de intensidad débil.

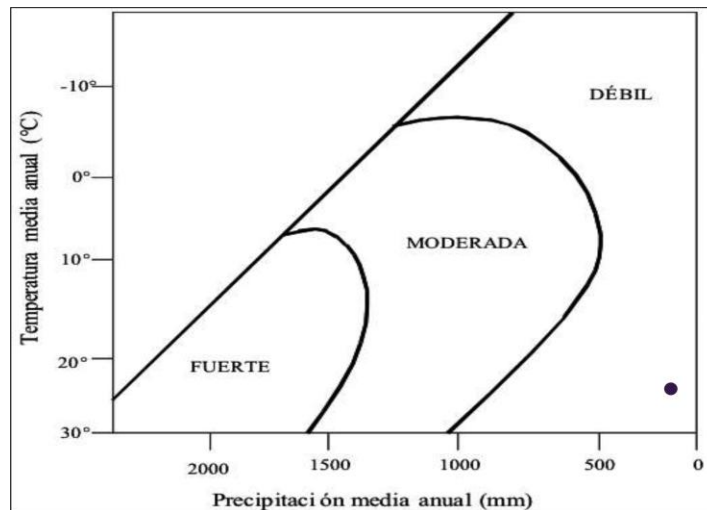


Fig. 11. Intensidad de Meteorización química según (Cooke y Doornkamp ,1990).

Un índice climatológico es un indicador de medida, generalmente cuantitativa, que se utiliza para ilustrar y comunicar de manera sencilla un proceso complejo que incluye tendencias y progresión a lo largo del tiempo. Para que un indicador sea válido debe cumplir dos condiciones: tener una buena base conceptual (debe hacerse una descripción de la metodología y de las fórmulas utilizadas) y ser comprensible y simple. De manera particular en el presente trabajo se consideraron los índices de Lang,

Martone y Fournier, donde los resultados de la aplicación de estos índices climáticos nos indican cuales son las condiciones de humedad y temperatura de la atmósfera como del suelo, así como la erosión potencial del suelo; todo esto a través del tiempo.

Para los índices evaluados se tomó la información de la red de estaciones meteorológicas de CONAGUA; considerándose datos por un periodo de 30 años (tabla 2) de precipitaciones anuales, medias y temperaturas medias. Los resultados obtenidos para los índices de Lang muestran que la ciudad de Hermosillo se encuentra dentro de un clima estepario a lo largo de los 30 años (tabla 3), en el presente índice no se observan variación en el clima a lo largo del tiempo debido a que el rango de clasificación es muy alto; mientras que para el índice de Martonne en general se define como un clima árido con gran variación de temperaturas entre verano e invierno. Pero si se analiza gráficamente (fig.12), y se observan los promedios de los 80's, 90's y 2000 (tabla 3); los climas pasan de árido extremo (desierto) a árido (estepario) y a árido extremo.

El índice Fournier establece el efecto del proceso erosivo en función de las precipitaciones. En el área de estudio cae en el rango baja agresividad erosiva según Fournier (tabla 3). También se consideraron los datos graficados de la erosión hídrica tomados de la información generada por la ecuación universal corregida de la pérdida de suelo. Aunque cae en un grado de erosión baja, gráficamente (fig.12) se puede notar que la erosión tanto de Fournier como de Hídrica va de menor a mayor de los 80's hasta los 2000 respectivamente.

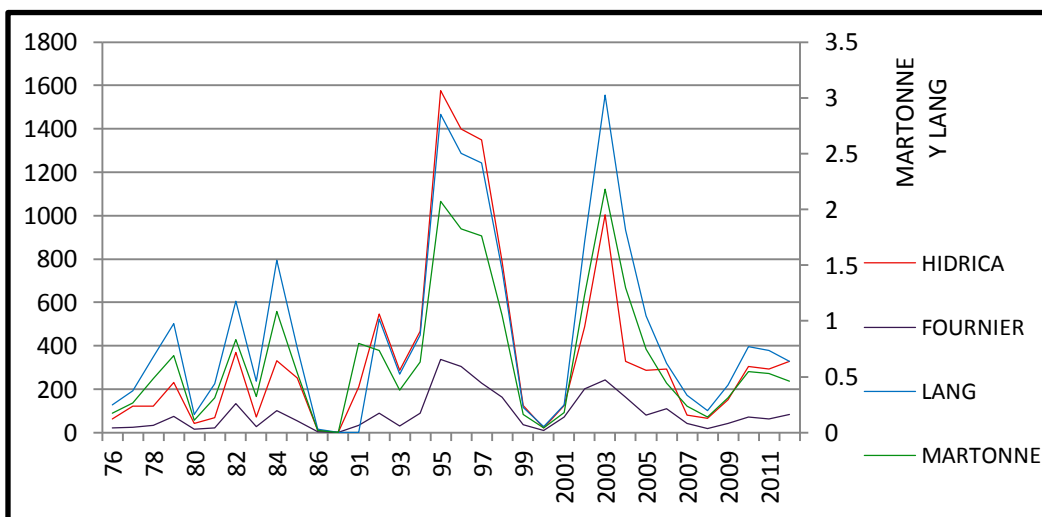


Fig. 12. Índice climatológicos del área de estudio.

Como se mencionó, el clima es un factor activo para los procesos de meteorización, lo cual se demuestra con los índices climatológicos que no son constantes a través del tiempo, y que tanto las condiciones de humedad, temperatura y precipitación han variado y donde estos procesos nos producen diferentes tipos de suelo con características físicas, químicas y biológicas diferentes.

Tabla 2. Valores de precipitación temperatura.

Año	Pp anual	Pp media anual	T° media anual
80	26.7	2.427	24.583
81	134.8	11.233	24.5
82	165.3	15.027	23.75
83	126.4	10.533	24.333
84	87.3	7.275	23.583
85	56.6	6.288	23.5
86	21.2	2.12	24.75
87	9.2	1.022	24.166
88	10.5	1.5	24.666
89	3	0.5	24.5
90	25.62	12.81	23.916
91	3.6	1.2	23.916
92	120.3	13.366	24.25
93	288.6	24.05	24.666
94	233.8	23.38	24.75
95	264.9	22.075	24.75
96	98.8	16.466	25.416
97	N/D	N/D	25.333

98	0.9	0.3	24.583
99	0.1	0.1	24.916
2000	N/D	N/D	24.916
2001	131.4	26.28	24.666
2002	90.6	15.1	24.916
2003	381.1	47.637	24.833
2004	165	18.333	24.416
2005	71.1	14.22	24.666
2006	100.5	16.75	24.666
2007	93.6	31.2	24.916
2008	98.2	16.366	25.083
2009	44.4	8.88	25.666

Tabla 3. Índices climatológicos.

Año	Índice de Martonne	Índice Lang	Índice de Fournier	Erosión hídrica
80	0.070	0.098	21.954	162.430
81	0.325	0.458	56.981	263.562
82	0.445	0.632	31.625	745.725
83	0.306	0.432	39.508	484.166
84	0.216	0.308	57.204	400.431
85	0.187	0.267	49.255	238.479
86	0.061	0.085	18.132	151.142
87	0.029	0.042	6.613	38.716
88	0.043	0.060	26.46	69.861
89	0.014	0.020	2.42	17.353
90	0.377	0.535	41.727	321.303
91	0.035	0.050	4.8	43.974
92	0.390	0.551	143.524	624.918
93	0.693	0.975	78.318	1163.730
94	0.672	0.944	82.429	1465.536
95	0.635	0.891	90.919	1058.470
96	0.464	0.647	67.746	671.220
97	N/D	N/D	N/D	N/D
98	0.008	0.012	1.633	8.964
99	0.002	0.004	0.1	1.522
2000	N/D	N/D	N/D	N/D
2001	0.758	1.065	169.288	1757.031
2002	0.432	0.606	54.549	646.200
2003	1.367	1.918	347.702	3334.615
2004	0.532	0.750	93.488	725.757
2005	0.410	0.576	73.367	687.478
2006	0.483	0.679	107.328	925.284
2007	0.893	1.252	107.449	947.745
2008	0.466	0.652	159.544	1098.817
2009	0.248	0.345	136.378	431.096

5.2. Petrografía roca.

El análisis petrográfico consistió en el estudio de 9 láminas delgadas para describir las características de los minerales contenidos en cada tipo de roca del área de estudio, con el fin de clasificarla y conocer el contenido de minerales de la roca parental para el desarrollo de los suelos.(fig. 1).

La muestra RK1 (foto 4) se tomó del cerro las Minitas; correspondiendo a una roca granítica. En la cual se observó cuarzo, feldespatos con intercrecimiento mirmequítico y oligoclasa, y como mineral accesorio piritita.

En Sierra El Bachoco (muestra RK9) de un afloramiento de composición félsica, presenta plagioclasas de composición oligoclasa-andesina donde se observan maclas polisintéticas, además cristales de cuarzo, biotita y minerales accesorios de esfena, por su composición mineralógica se clasificó como granodiorita (foto 5).

La muestra RK6 del Cerro la Flojera (foto 6) presenta características de una roca sedimentaria, en el análisis petrográfico se observó cuarzo detrítico, con una matriz micrítica, con feldespatos y fragmentos de cuarzo subangulosos.

La muestra RK5 (foto 7) tomada en La Sierra Leyva, presenta una textura porfídica con matriz afanítica, con plagioclasas de composición andesina-oligoclasa, correspondiendo la clasificación a de esta roca a una traquiandesita porfídica.

La muestra RK8 corresponde a un riolita en el Cerro Colorado ubicado hacia el Norte de la ciudad, donde afloran rocas de tipo extrusivo, con cristales de feldespato potásico, cuarzo, y como minerales accesorios piritita y hematita (foto 8).

La muestra RK7 tomada en Sierra Agualurca (foto 9) donde afloran rocas plutónicas, las cuales están constituidas principalmente por cristales de cuarzo, plagioclasas feldespato, minerales secundarios de biotita y como alteración clorita, y feldespatos con intercrecimiento mirmequítico, esta roca se clasificó como granito.

En la cementera antigua se encuentran la muestra RK10, que corresponde a una roca metamórfica mayormente constituida de cristales de calcita, granate, hornblenda, (foto 10) clasificada como mármol.

La Muestra RK2 tomada en Minitas final, mineralógicamente contiene cristales de granate poca presencia de calcita, cristales de plagioclasas alterada, wollastonita caracterizada por su forma radial, y minerales de diopsida e idocrasa, clasificada como Hornfels (foto 11).

La muestra RK3 (foto 12) tomada del afloramiento de Sierra los Leyva se clasificó como skarn de wollastonita, los minerales observados son wollastonita, calcita, diopsida, idocrasia y tremolita

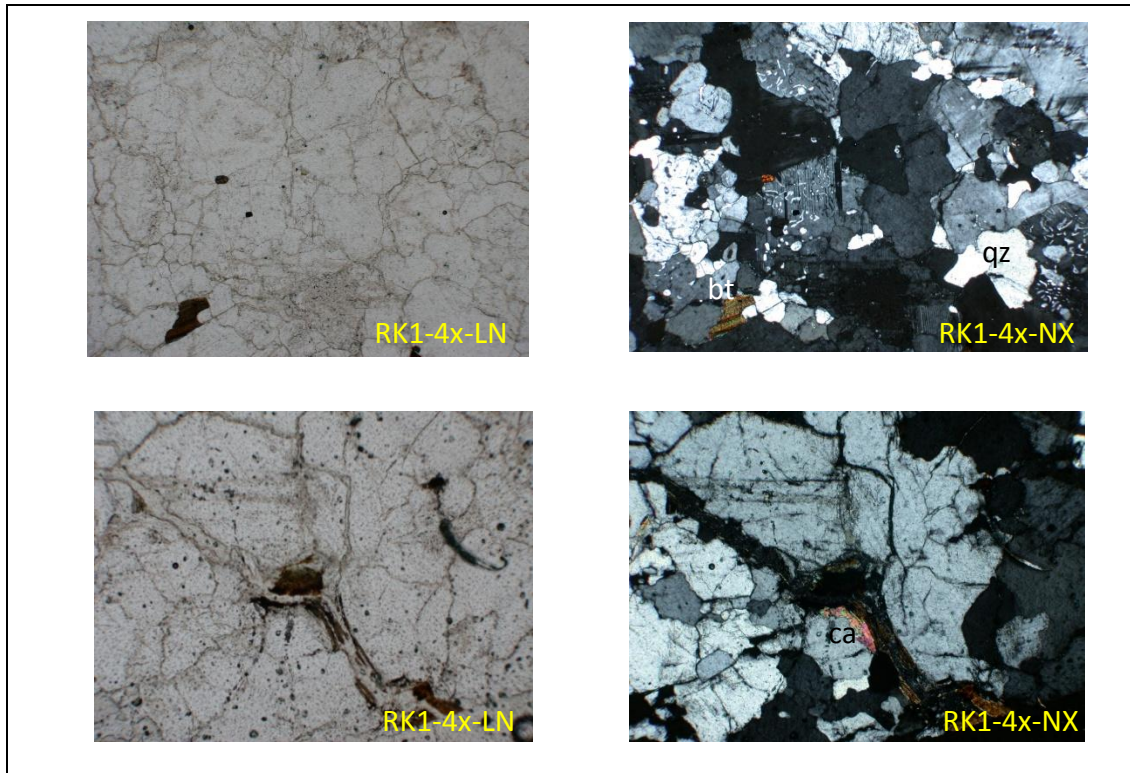


Foto 4. Granito, se observa cuarzo(qz), feldespatos con intercrecimiento mirmequítico (fotografía superior NX)(oligoclasas), biotita(bt) piritita, fotografías inferiores fractura rellena de calcita (ca)(mineral de color de interferencia alto) y biotita parcialmente cloritizada.

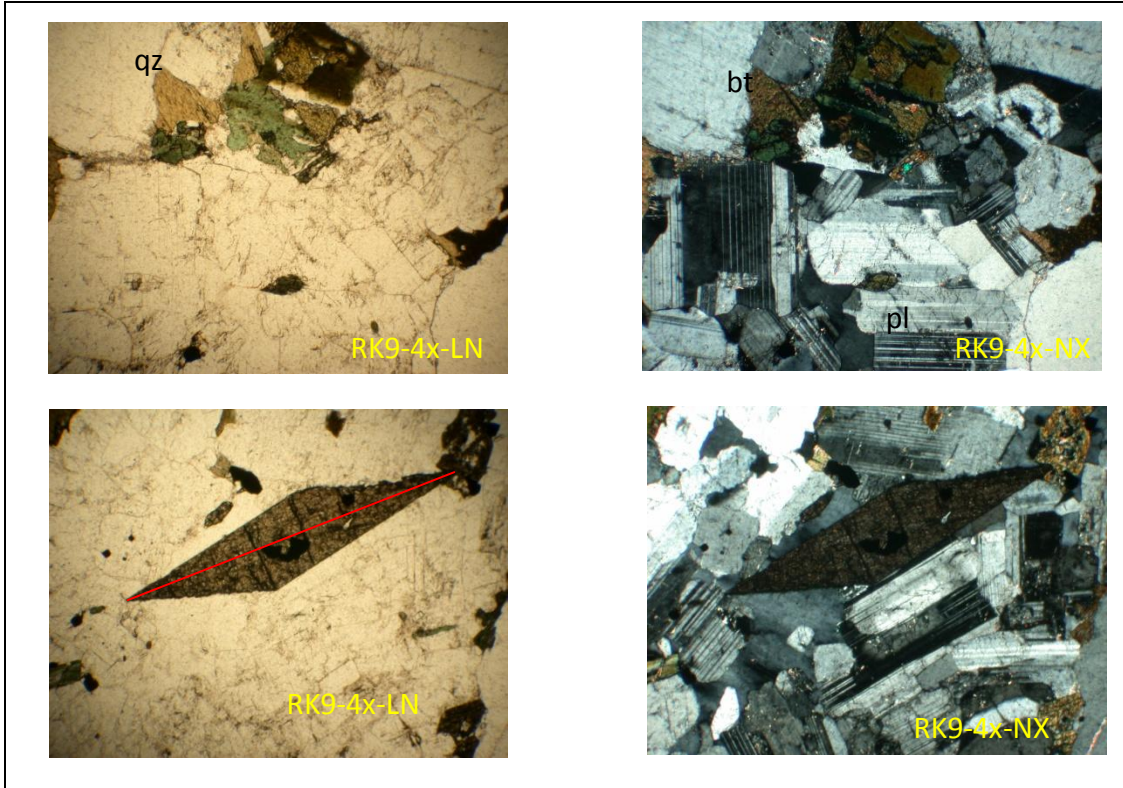


Foto 5. Granodioritas tomadas con microscopio petrográfico, donde se observan cristales tabulares de plagioclasas (pla), cuarzo (qz), biotita, inclusiones de circón en biotita (fotografía superiores), en las imágenes de la parte inferior se observa cristal de forma rómbica (esfena).

2.2

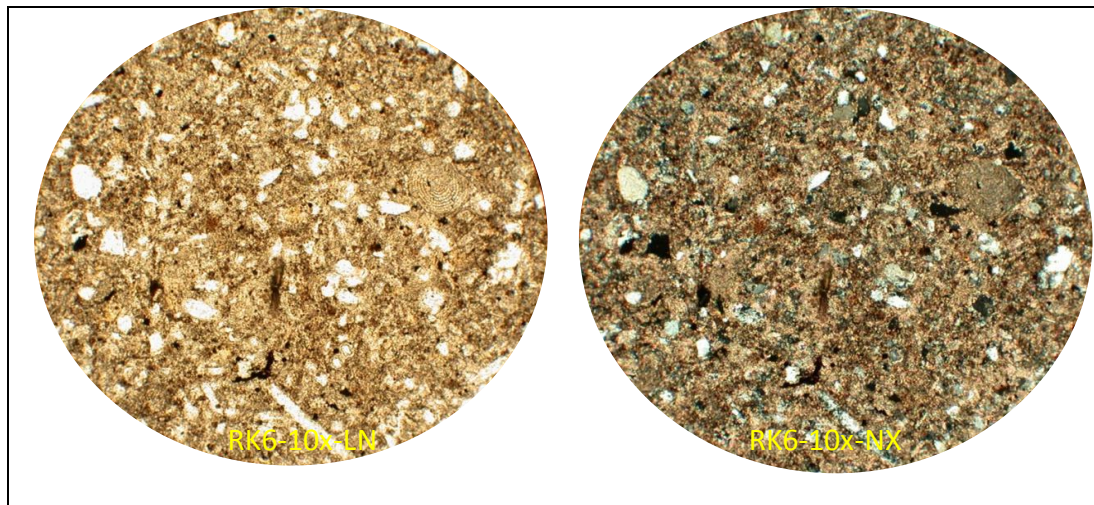


Foto 6. Microfotografía tomada con 10X de micrita con cuarzo detrítico, se observa la matriz carbonatada.

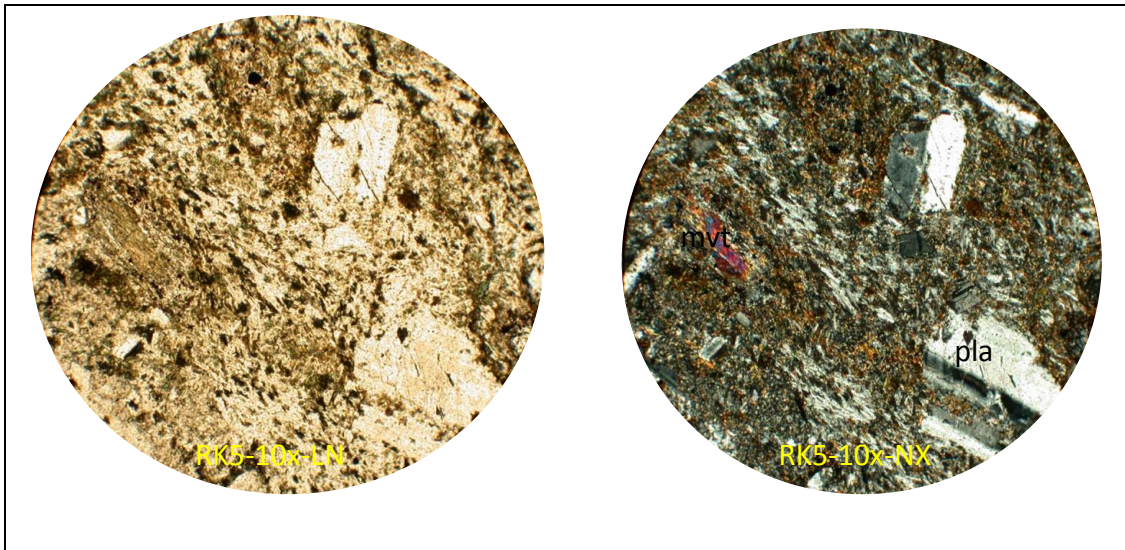


Foto 7. Sección delgada de traquiandesita porfídica, se aprecia fenocristales de plagioclasas (pla), muscovita (mvt) (foto derecha), calcita (mineral de interferencia colores pastel) piritita y alteración sericitica.

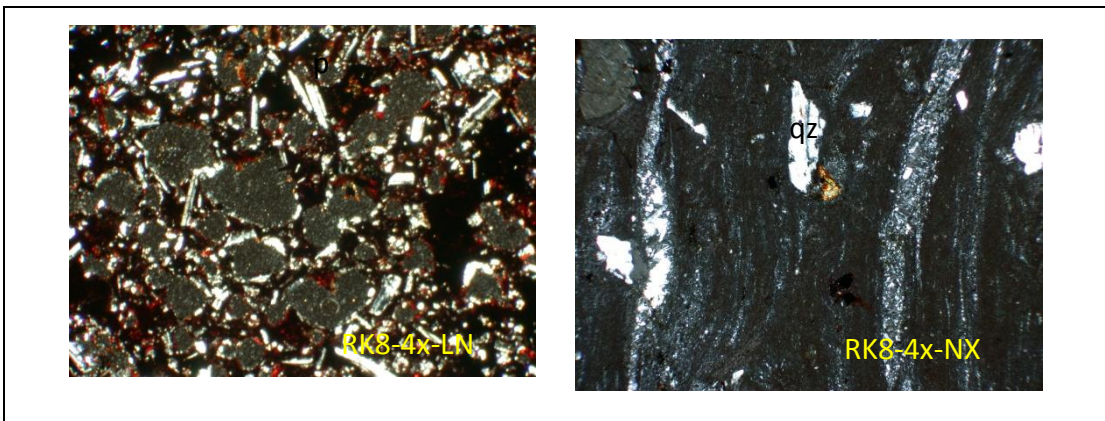


Foto 8. Microfotografía de riolita lado izquierda LN fragmento de escoria donde se observa claramente cristales tabulares de plagioclasas en roca riolitica, foto derecha se observa textura fluidal, fenocristales de feldespato y cuarzo.

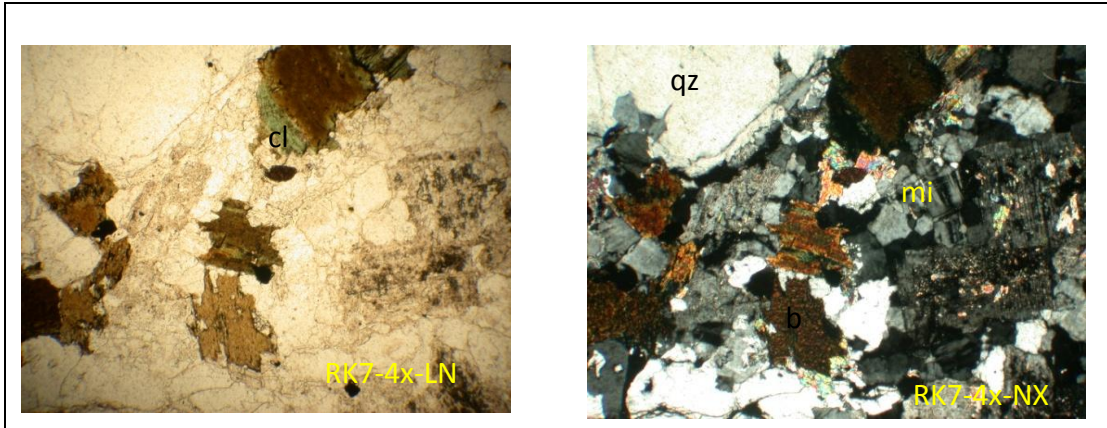


Foto 9. Granito NX de cuarzo (qz), clorita (cl) reemplazando a biotita, oligoclasas y microclina(mi), minerales secundarios de epidota(mineral de color de interferencia alto fotografía NX), así como vetillas rellenas de cuarzo; y alteración sericitica.

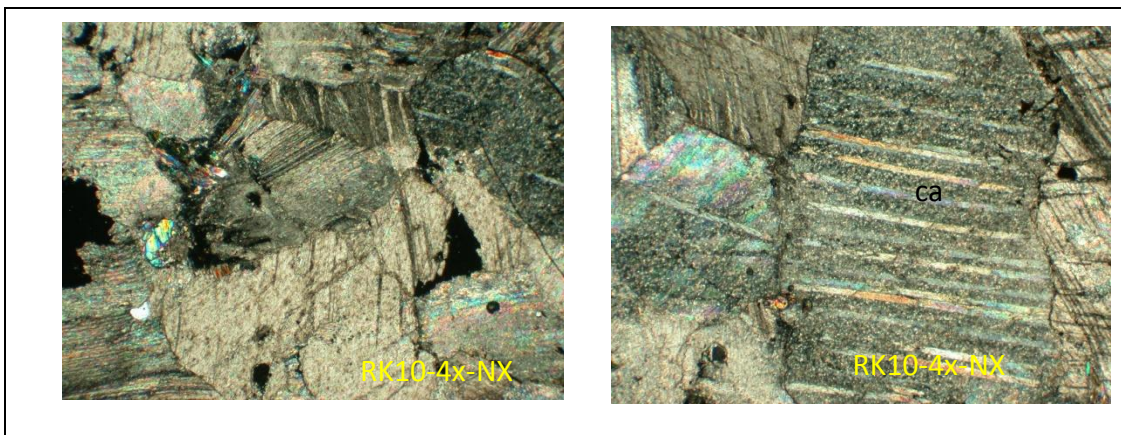


Foto 10. Mármol LN donde se observa calcita(ca) y se aprecia su crucero, NX, la macla lamelae típica de la calcita, se observa cristal de diopsida con crucero en dos direcciones (color verde azulado).

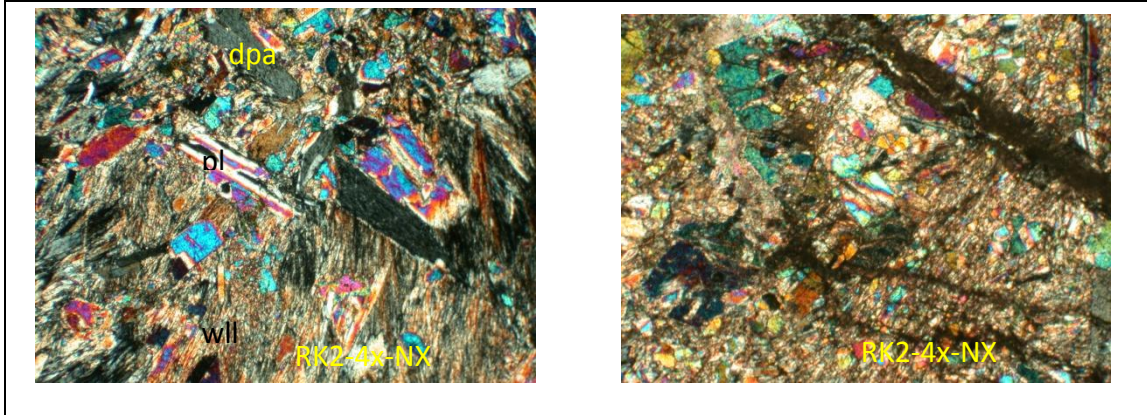


Foto 11. Hornfels, se observan cristales de plagioclasas alteradas (pla), wollastonita (wll), diopsida (dpa).

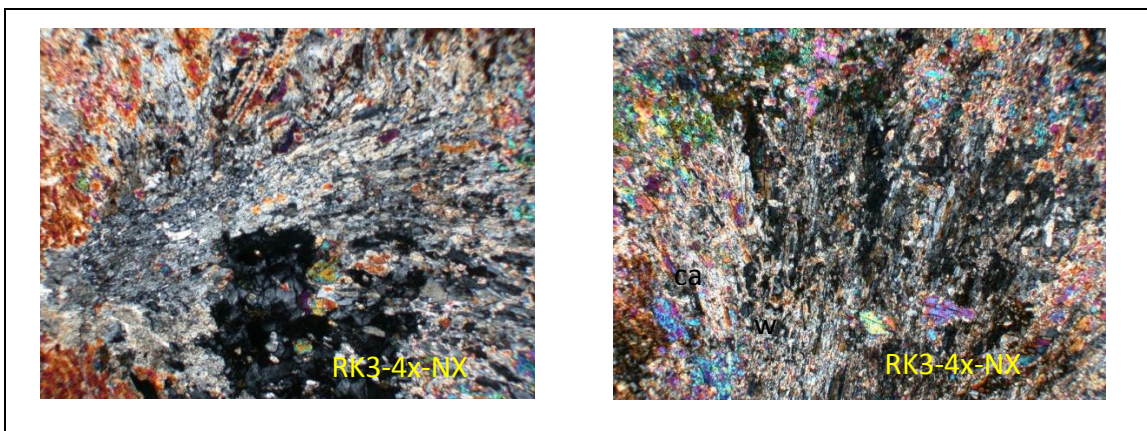


Foto 12. Skarn de Wollastonita, se observa ambas fotografías crecimiento radial en wollastonita, calcita (ca), e idocrasa (mineral color oscuro).

5.3. Petrografía Briquetas

Para la petrografía de los sedimentos, se realizaron briquetas de suelos superficiales, donde se interpretó la mineralogía y las características morfológicas de los granos; con la finalidad de definir la energía del transporte y el probable origen de los suelos. Así como también se determinó en base a su geoquímica la tendencia del material sedimentario al tipo de roca que se podría formar, siempre y cuando se lleve a cabo un proceso de compactación y litificación.

La muestra MK1 corresponde a arena moderadamente clasificada con madurez textural submaduro de composición arcósica, donde se observa que el componente principal es feldespato en un 57% (color gris con NX), muy fracturado, y redondez de anguloso a subanguloso, también se tienen granos de cuarzo muy fracturados de angulosos a subangulosos, así como biotita y pocos fragmentos de roca volcánica (foto 13).

Muestra MK5 es una arena de composición lítica, moderadamente clasificada, donde el componente principal son fragmentos de roca subredondeados a redondeados, y granos de cuarzo muy fracturados de forma subangulosa a subredondeada (foto 14).

Muestra MK6 es una arena lítica, donde el 75% son fragmentos de roca angulosos y subangulosos, moderadamente clasificados (foto 15), los granos están muy fracturados y son de subangulosos a subredondeados, mientras que los de feldespato son subredondeados a redondeados.

Muestra MK8 es una arena de composición arcósica, bien calcificada, (foto 16) con granos de feldespato como principal componente (52%) y son de angulosos a subangulosos, además tiene fragmentos de roca redondeados, y su madurez textural es madura. Los granos de cuarzos se presentan poco fracturados, con una forma de angulosos a subangulosos.

La muestra de suelo MK15 (foto 17) es arena de composición arcósica, moderadamente clasificada, de madurez textural submadura con un contenido de feldespato de 70%, los granos varían de subangulosos a subredondeados, y los de cuarzo están muy fracturados de angulosos a subangulosos. Con pocos fragmentos de roca volcánica siendo la mayoría de éstos subangulosos.

La muestra MK18 es una arena de composición arcósica, bien clasificada con alto contenido de feldespatos muy angulosos a angulosos, los granos de cuarzo son subangulosos a subredondeados y presenta fragmentos de mica (biotita) (foto 18).

En la foto 19 se observa la muestra MK19 la cual es una arena de composición arcósica, bien clasificada, con gran contenido de feldespatos subangulosos a subredondeados, cuarzo muy fracturado de anguloso a subangulosos y bien clasificados.

La muestra MK16 presenta una arena de composición arcósica, bien clasificada con un contenido de feldespato de 80% de subangulosos a subredondeados, con clastos de cuarzo muy fracturados de angulosos a sub angulosos (foto 20).

Muestra MK17 arena lítica, con granos moderadamente clasificados, donde el principal constituyente son los fragmentos de roca intrusiva, de angulosos a subangulosos y fragmentos de roca volcánica variando de subangulosos a subredondeados (foto 21).

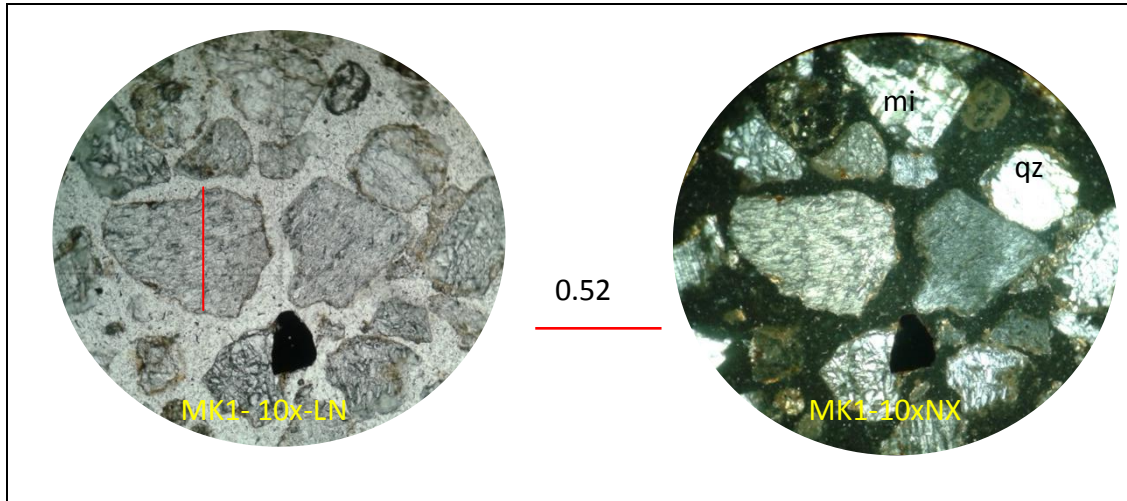


Foto 13. Arena de composición arcósica, donde se observa plagioclasas (pla), feldespato, y cuarzo (qz).

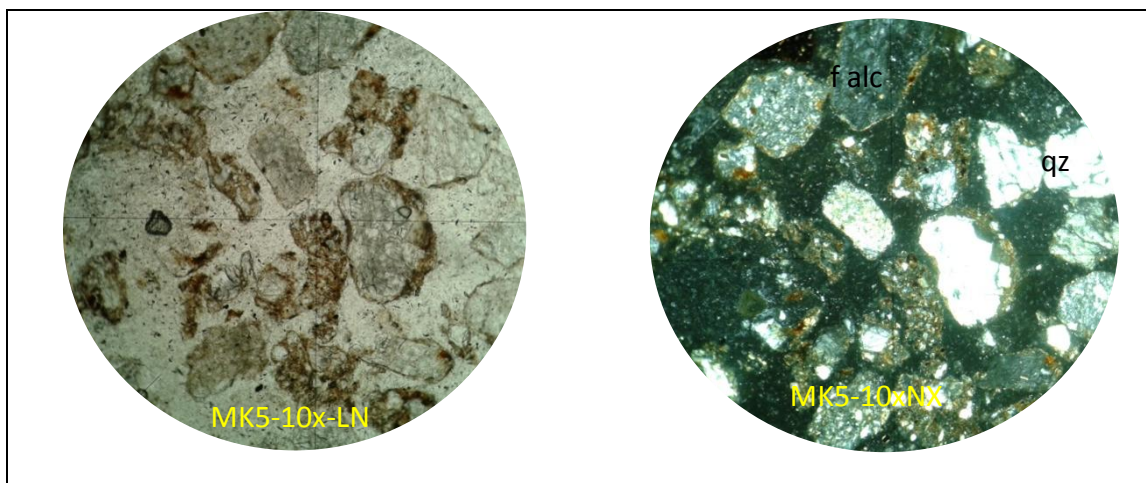


Foto 14. Arena de composición lítica, donde el componente principal son fragmentos de roca, se observa cuarzos (qz) presentando sutura y feldespato (f alc).

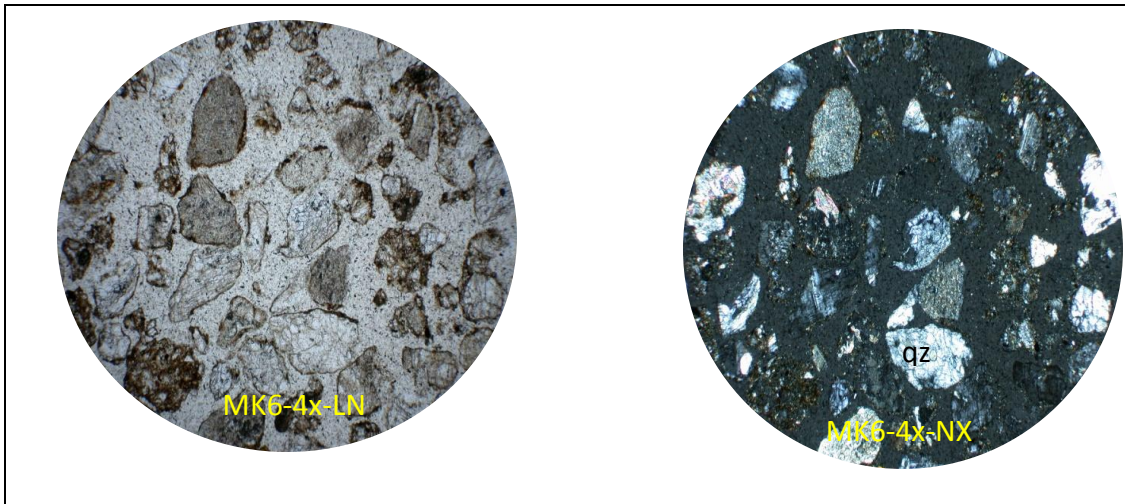


Foto 15. Arena de composición lítica.

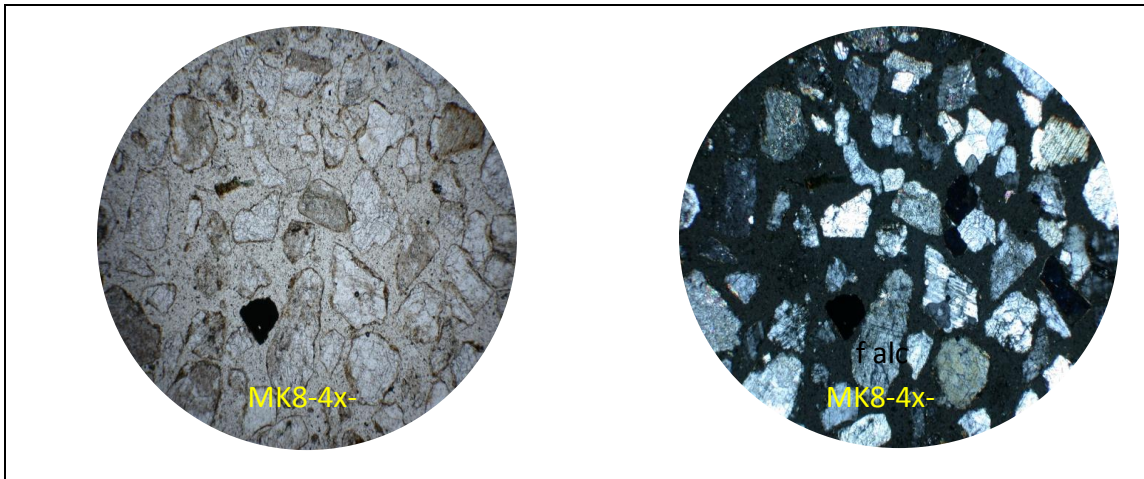


Foto 16. Arena de composición arcósica, donde el feldespato alcalino es el principal componente.

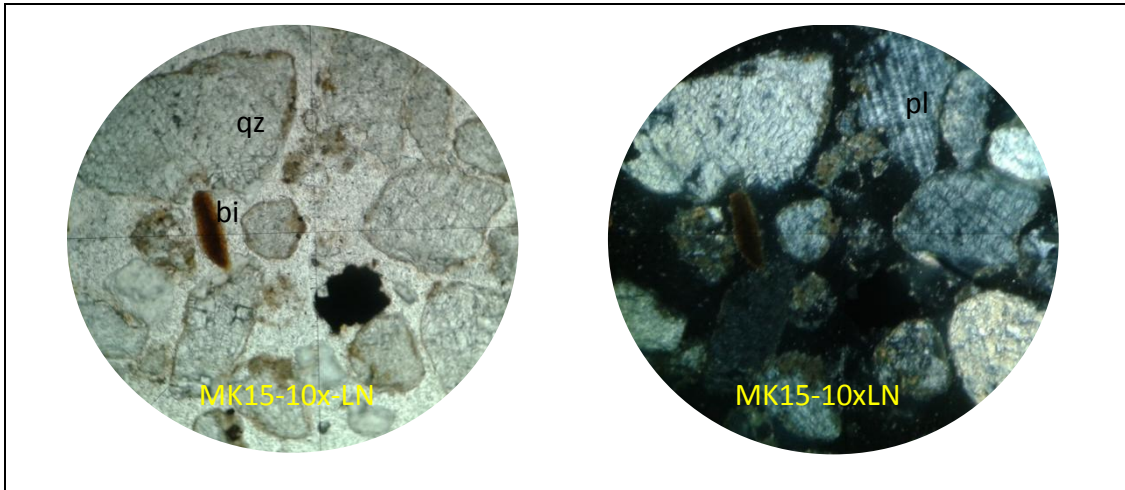


Foto 17. Arena arcósica, con contenido de feldespato alcalino, plagioclasas (pla), cuarzo (qz), y minerales accesorios de biotita (bi).

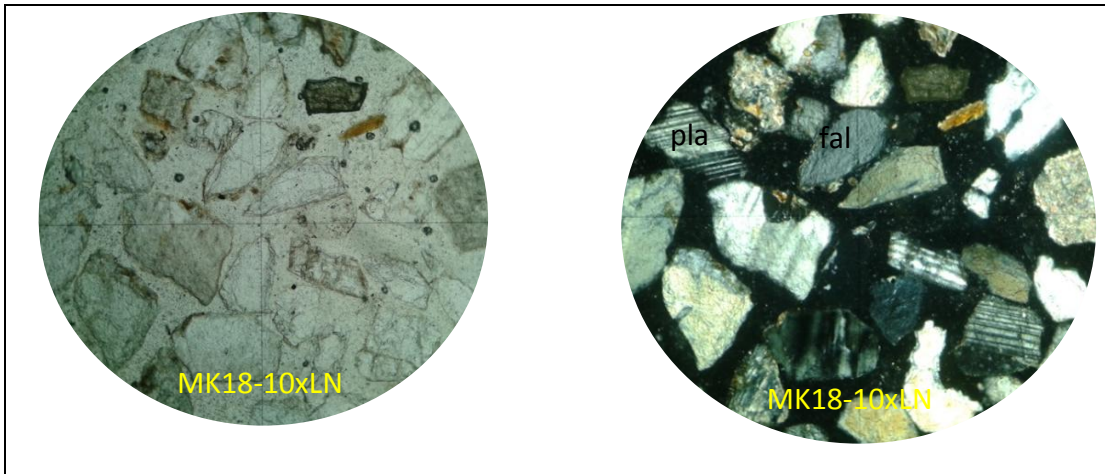


Foto 18. Arena de composición arcósica, con alto contenido de feldespatos alcalino (fal) y mineral accesorio de biotita.

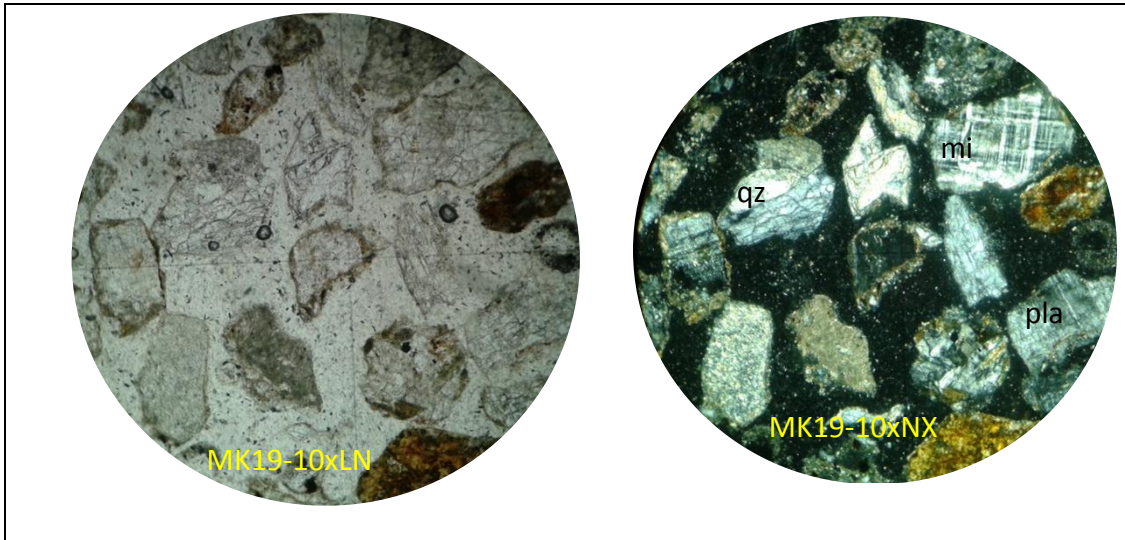


Foto 19. Arena de composición arcósica, la foto en Nícoles cruzados (NX) en la parte superior se observa microclina (mi), cuarzo (qz) y plagioclasa alterándose (pla).

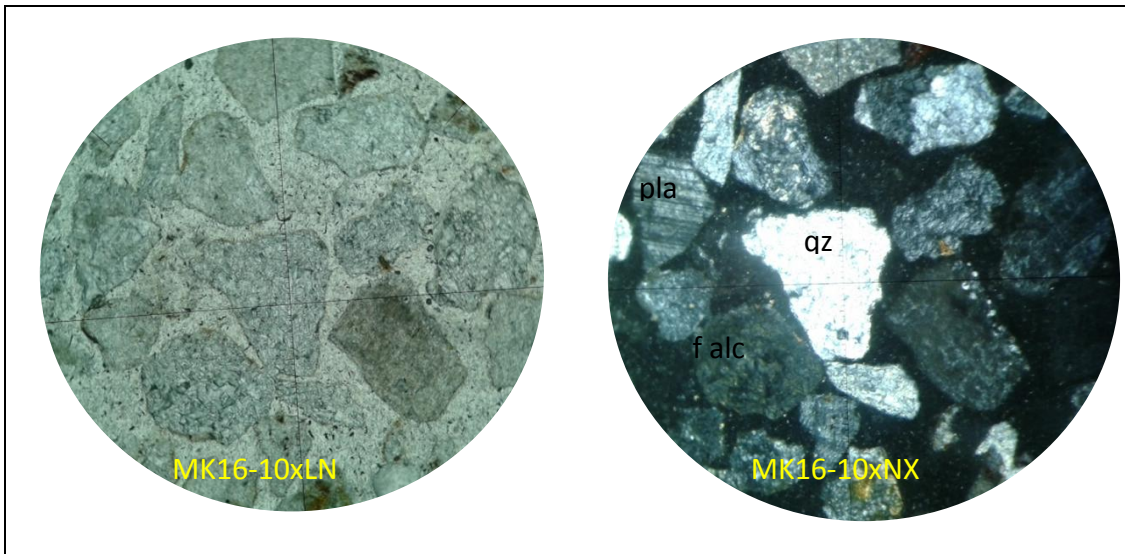


Foto 20. Arena de composición arcósica, conteniendo fragmentos de plagioclasas (pla), cuarzo (qz) y feldespato alcalino (f alc).

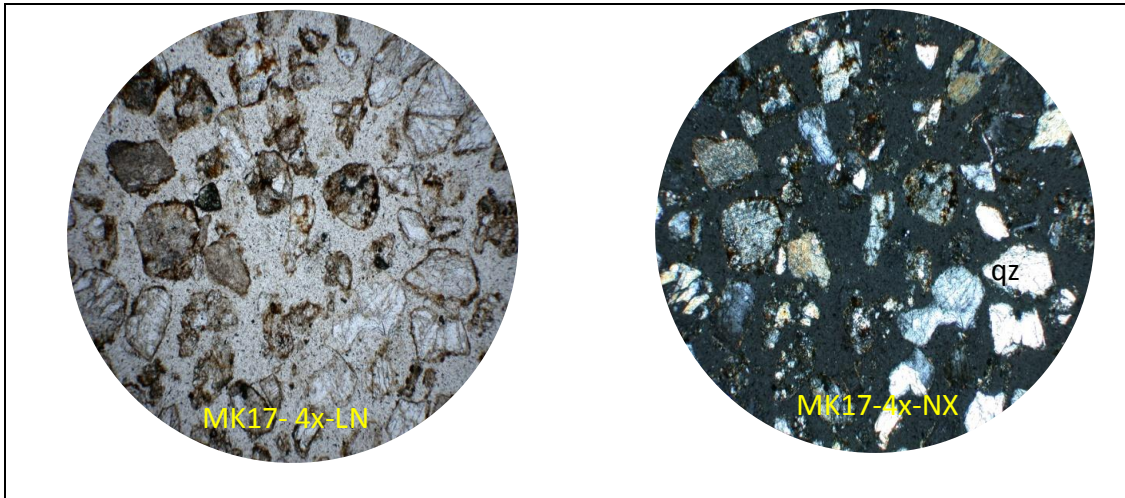


Foto 21. Arena lítica, en la parte superior de la imagen se observan clastos de roca volcánica, y en la parte inferior lo que pudiera ser un fragmento de palgioclasa (pla) alterada y cuarzo (qz).

En base al análisis geoquímico de muestras de suelo, éstos quedarían con un mayor porcentaje (63%) en la clasificación de Wakas y en un menor porcentaje en Arcosas (11%) y Lutitas (5%), según la clasificación de Herron (1988). Siempre y cuando estas muestras llegaran a la litificarse. (fig. 13).

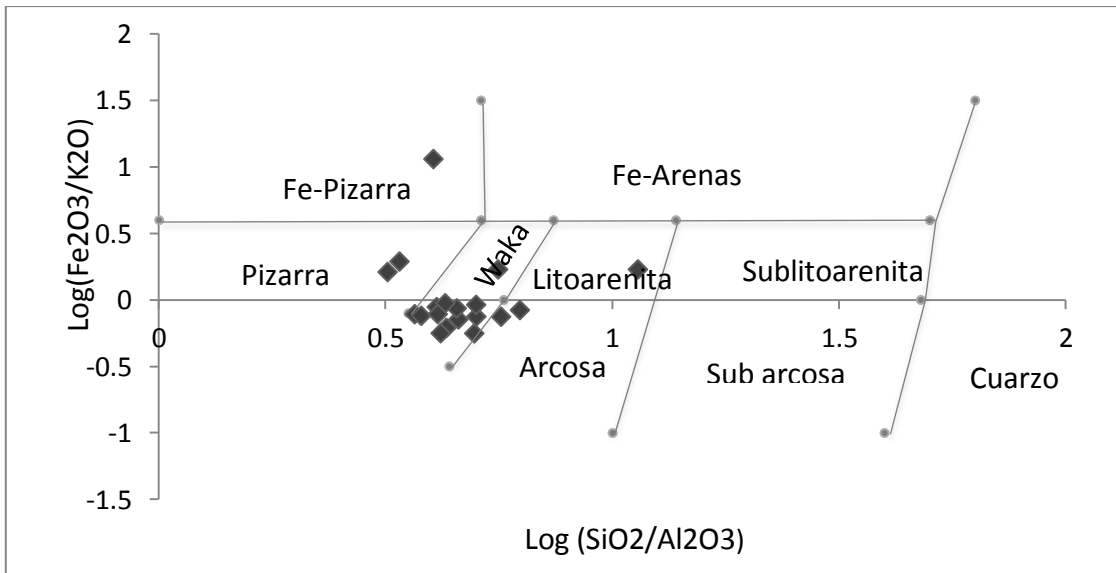


Fig.13. Clasificación areniscas y lutitas terrígenas (Herron, 1988).

5.4. Índices Meteorización

5.4.1. Índices Geoquímicos

La meteorización química se enfoca a aquellos procesos de alteración química de los minerales que integran las rocas. Esta alteración se lleva a cabo por una gran variedad de reacciones que pueden clasificarse dentro de los siguientes tipos más importantes: hidratación, intercambio de iones, quelación, hidrólisis, carbonatación y oxidación-reducción. Desde el punto de vista de la meteorización química, cuando las rocas se ven afectadas por la hidrólisis, se afecta los minerales con iones que son solubles en agua como los del grupo I II y VII de la tabla periódica, donde su estructura silicatada cambia sus iones metálicos por iones de hidrógeno. Esta reacción depende tanto del pH como del agua de lluvia; si el agua de lluvia es escasa, y la evaporación es superior a la precipitación anual, todos los productos de meteorización permanecen, originándose montmorillonita, illita y zeolitas.

El papel que juega el agua en la alteración química es uno de los principales agentes en las reacciones químicas, es el medio indispensable para que se produzca la mayoría de las reacciones, así como el agente de transporte de los productos de meteorización.

Una de las maneras de poder evaluar la alteración química de las rocas es a partir de los índices de meteorización o alteración, que son elaborados para diferentes tipos de rocas y suelos, se observa que no están elaborados para ser usados para todo tipo de rocas, ya que en algunos casos no dan valores significativos, debido a la mineralogía, y a la manera en que están manejando los minerales, refiriéndose a la fórmula (numerador, denominador); un gran número de autores toman diferentes tipos de minerales, como lo son el aluminio, fierro, calcio, magnesio, sílice, sodio potasio, entre otros; los cuales no se encuentran disponibles en todos los tipos de rocas, siendo estos índices más apropiados para rocas ígneas y sedimentarias en algunos casos; entonces se debe de tratar de manera separada, o una buena manera seria a partir de la mineralogía de los materiales parentales, reemplazando algunos minerales por los más adecuados a cada tipo de roca con las que se cuenta al momento de analizar dichos índices.

Para analizar los índices de alteración y meteorización tanto en roca, regolito y suelo, para este trabajo, se consideraron los siguientes:

5.4.1.1 Diagrama Harker (1909)

5.4.1.2. Índice de Alteración Química (CIA) (Nesbitt y Young, 1989).

5.4.1.3. Índice de Meteorización Potencial IMP (García Saavedra, 1976).

5.4.1.4. Índice de Meteorización IM (Ruxton, 1968).

5.4.1.5. Índice Chesworth (1973).

Además se utilizó una estadística de correlación lineal y no lineal, con la finalidad de analizar el estado geoquímico (índices de meteorización y relación de compuesto Vs. compuesto) que guarda la roca con respecto a regolito y suelo.

5.4.1.1. Diagramas de Harker

Los diagramas Harker se utilizan para graficar el comportamiento de los óxidos mayores con relación a un índice de diferenciación. En la mayoría de los casos el índice de diferenciación es el SiO_2 , al cual se le asigna el eje X, los restantes óxidos mayores se grafican en el eje Y. Estos diagramas son muy utilizados para analizar los datos geoquímicos principalmente de rocas ígneas, aunque no fueron diseñados para el análisis de suelos, en el caso particular de este trabajo, lo que se pretende establecer una correlación entre el óxido menos móvil contra los óxidos más móviles. A partir de un análisis estadístico denominado R^2 o factor de correlación de Pearson, se puede observar la relación que guardan los suelos con respecto a la roca parental, la cual nos puede decir si existe enriquecimiento o empobrecimiento de ciertos óxidos.

La correlación existente entre el SiO_2 y Al_2O_3 es mala con una correlación $R^2=0.44$. Indicando que las concentraciones de Al_2O_3 se encuentran en muy baja proporción (56%) con respecto al SiO_2 y una pendiente positiva, como se observa en la fig.14. Aunque gráficamente se puede observar que tanto suelo, regolito y roca presentan casi una misma agrupación; entonces de manera general tanto suelo y regolito presentan las mismas características de la roca parental, por lo que podría decirse que no son suelos alterados. Pero si se analiza de manera puntual las concentraciones promedio de Al_2O_3 en suelo-regolito es 14.5 %, y en roca de 9.97% (tabla 5), lo que sugiere que esta diferencia de casi 5% es un enriquecimiento en álcalis para regolitos-suelos en proporción de 50% con respecto a las rocas. Por lo que podría mencionarse que los suelos y el regolito se encuentran ligeramente alterados.

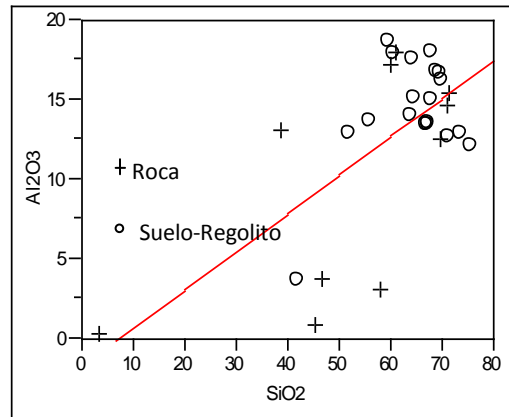


Fig. 14. Correlación % de SiO₂ contra Al₂O₃.

La correlaciones de SiO₂ con respecto a Fe₂O₃ y MgO son muy bajas, siendo éstas respectivamente de R²= 0.00337 y R²= 0.0061, tal y como se observa en la fig. 15, donde en la primera gráfica su pendiente es ligeramente negativa, mientras que en la segunda es ligeramente positiva. Además también nos indica que las concentraciones de hierro en roca son en promedio de 3.59%, para suelo y regolito es de 4.71 %; en el caso del óxido de magnesio las concentraciones son muy bajas, el promedio en roca es de 0.5%, mientras que en suelo y regolito es de 0.97%, el sílice varía su concentración de 52% en roca a 65% en suelo y regolito.

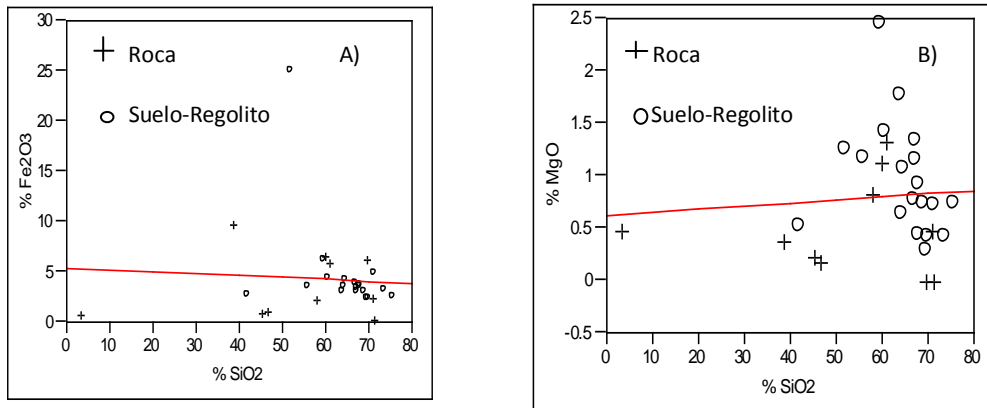


Fig. 15. Correlación de SiO₂ contra Fe₂O₃ y SiO₂ contra MgO.

Las concentraciones de Ti₂O son muy bajas con respecto a las concentraciones de SiO₂ oscilando éstas entre 0.37 % para roca y 0.47% en suelos-regolito, presentando una correlación baja de R²=0.067, con una pendiente positiva, como se muestra en la fig.16. Existe una concentración muy parecida de este óxido entre suelos y roca, lo cual nos indica que no existe mucha movilidad de dicho compuesto.

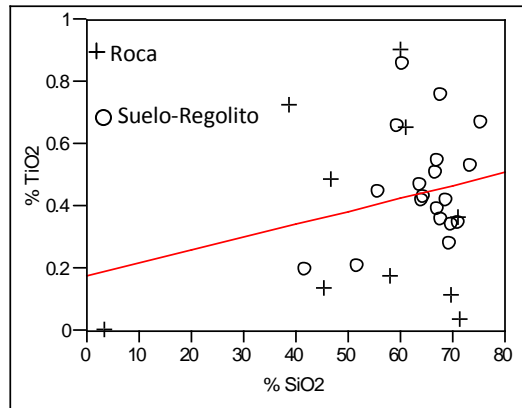


Fig. 16. Correlación de SiO₂ contra TiO₂.

Dentro de las mejores correlaciones que se encontraron fueron las de SiO₂ contra K₂O y SiO₂ contra CaO, siendo para ambas correlaciones de R²=0.55 y R²=0.85 respectivamente, cuya pendiente de la primera es positiva, mientras que la segunda negativa como se puede observar en la fig. 17. Presentándose valores promedio de K₂O en roca de 2% y de 3.9% en suelo-regolito, habiendo un enriquecimiento casi de un 50%; en el caso del CaO existe una concentración mucho mayor en roca, siendo en promedio de un 28%, mientras que para suelo-regolito es de 7.3%, habiendo un empobrecimiento en suelo-regolito, esto debido probablemente a alguna acidificación del suelo, ya sea por acción antropogénica o natural.

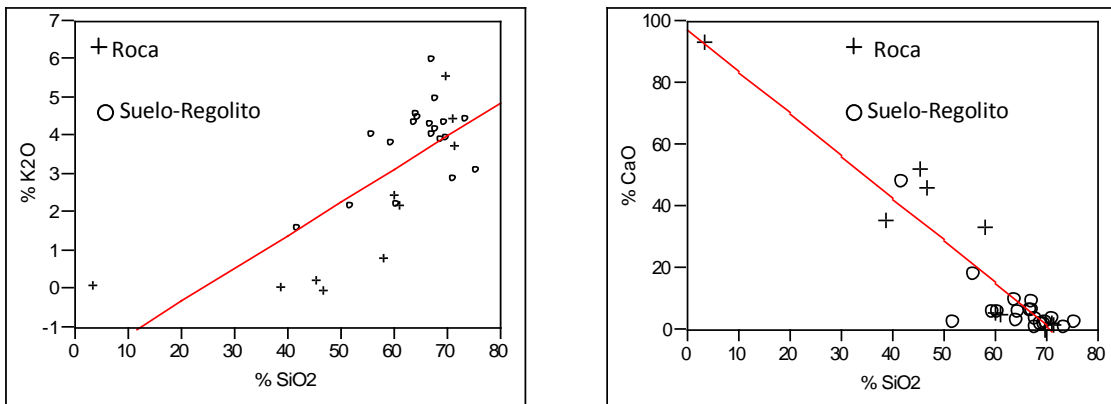


Fig. 17.- Correlación de SiO₂ contra K₂O y SiO₂ contra CaO.

La correlación existente entre SiO₂ y Na₂O es baja, con una correlación R²=0.24, teniendo una pendiente positiva como se muestra en la fig.18. Además las concentraciones promedio roca y en suelo-regolito son bajas, siendo éstas respectivamente de 3.02% y 2.92%, sugiriendo que no hubo movilidad de dicho óxido.

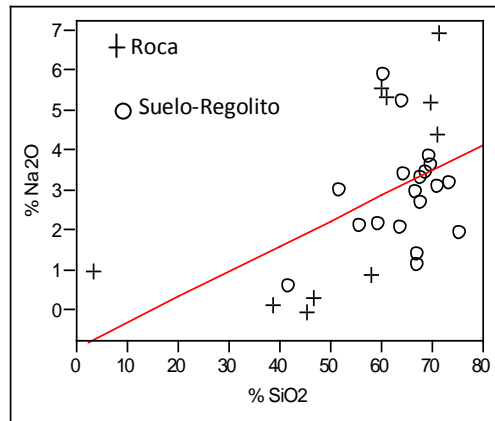


Fig. 18. Correlación SiO₂ contra Na₂O

En base a las cantidades que se determinaron en óxidos totales tanto en roca, regolito y suelo, la cantidad de SiO₂ es muy elevada en comparación con la de Al₂O₃ (tabla 4), quedando entonces el orden de abundancia de éstos de la siguiente manera: SiO₂> Al₂O₃>CaO> Fe₂O₃> K₂O>Na₂O>MgO.

Tabla 4. Análisis geoquímicos muestras roca, suelo y regolito.

Muestra roca	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Na ₂ O
RK-1	71.2	15.55	0.31	0	0.04	3.79	2.18	6.98
RK-2	45.18	0.93	0.89	0.22	0.14	0.25	52.33	0
RK-3	46.63	3.88	1.08	0.18	0.49	0	46.65	0.37
RK-4	38.62	13.19	9.77	0.37	0.73	0.1	35.94	0.16
RK-5	59.8	17.25	6.53	1.13	0.91	2.5	5.88	5.61
RK-6	57.69	3.21	2.18	0.82	0.18	0.84	33.43	0.95
RK-7	70.73	14.72	2.37	0.48	0.37	4.49	2.27	4.46
RK-8	69.59	12.59	6.18	0	0.12	5.62	0.51	5.24
RK-9	60.72	18.02	5.89	1.32	0.66	2.21	5.45	5.4
RK-10	3.29	0.34	0.73	0.48	0.01	0.14	93.56	1.01
Promedio	52.345	9.968	3.593	0.5	0.365	1.994	27.82	3.01
Muestra suelo								
MK-1	70.01	16.28	2.43	0.42	0.34	3.94	2.65	3.65
MK-4	67.47	13.62	3.37	1.16	0.55	6.01	6.15	1.42
MK-5	75.84	12.14	2.61	0.75	0.67	3.11	2.64	1.97
MK-6	68.31	15.07	3.63	0.93	0.76	4.2	3.49	3.35
MK-8	69.71	16.69	2.44	0.29	0.28	4.34	2.12	3.86
MK-14	59.76	18.73	6.23	2.46	0.66	3.84	5.75	2.18
MK-15	64.85	15.17	4.24	1.08	0.43	4.49	5.99	3.42
MK-16	73.8	13	3.33	0.43	0.53	4.45	1.04	3.18
MK-17	69.27	16.83	3.06	0.75	0.42	3.91	2.02	3.48
MK-18	71.43	12.77	4.87	0.72	0.35	2.87	3.56	3.12
MK-19	67.33	13.46	3.98	0.78	0.51	4.33	6.33	2.97
Muestra regolito								
MK-2	64.13	14.03	3.1	1.78	0.47	4.34	9.76	2.08
MK-3	67.35	13.45	3.03	1.34	0.39	4.04	9.02	1.14
MK-7	56.3	13.75	3.58	1.18	0.45	4.05	18.17	2.13
MK-9	64.48	17.61	3.58	0.65	0.42	4.58	3.16	5.25
MK-10	68.31	18.05	3.78	0.44	0.36	4.97	1.11	2.73
MK-11	52.3	12.99	25.12	1.26	0.21	2.19	2.55	3.03
MK-12	60.96	17.99	4.36	1.43	0.86	2.24	6.01	5.89
MK-13	42.21	3.71	2.75	0.53	0.2	1.62	48.09	0.61
Promedio	64.9372	14.492	4.71	0.967	0.466	3.869	7.347	2.91

5.4.1.2. Índice de Alteración Química (CIA)

Este índice evalúa cuantitativamente el record histórico de la meteorización en sedimentos y rocas sedimentarias a partir de la razón:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100$$

Este índice fue propuesto por Nesbitt y Young (1982), y ha sido utilizado por más de dos décadas, principalmente para evaluar el intemperismo químico en cuencas de drenaje (McLennan, 1993; Vital y Stattegger, 2000; Yang and et al., 2004). Domínguez et. al. (2011) utiliza este índice para estimar la tendencia del intemperismo químico y observa la posible fuente de la composición de las muestra.

Los valores encontrados de CIA para roca presentan una homogeneidad en las ígneas con un valor promedio de 55.40 (tabla 5), mientras que para las metamórficas es de 8.95.

Los valores de CIA para los regolitos son más homogéneos como se muestra en la tabla 9, teniéndose un promedio de 48.95, mientras que para los suelos el valor es mucho más constante, con un promedio de 58.83.

Tabla 5. Valores encontrados de CIA para Roca, Regolito y suelo.

Índice de Alteración Química (Nesbitt & Young)					
Roca		Suelo		Regolito	
RK-1(Granito)	54.56	MK-1(Re)	61.38	MK-2 (Ígnea)	46.44
RK-2(Metamórfica. Hornfels)	1.73	MK-4(Je)	50.07	MK-3(Metamórfica)	46.44
RK-3(Metamórfica)	7.62	MK-5(YI)	61.12	MK-7(Micrita)	36.08
RK-4(Costra alteración de metamórfica)	26.70	MK-6(YI)	57.71	MK-9 (Granito)	57.54
RK-5 (Traquiandesita)	55.21	MK-8(YI)	61.79	MK-10(Riolita)	67.20
RK-6(Micrita c/ cuarzo detrítico)	8.35	MK-14(Hh)	61.40	MK-11 (Traquiandesita)	48.64
RK-7 (Granito)	56.74	MK-15(Xk)	52.18	MK-12 (Granodiorita)	62.57
RK-8(Riolita)	52.54	MK-16(XI)	59.99	MK-13 (Caliza)	26.70
RK-9 (Granodiorita)	57.97	MK-17(Xh)	64.13		
RK-10(Mármol)	0.35	MK-18(Re)	57.21		
		MK-19(Re)	49.68		

Los resultados de roca, regolito y suelo encontrados para el CIA fueron graficados en el diagrama triangular **A** (Al_2O_3)-**CN** ($CaO+Na_2O$)-**K** (K_2O) de Nesbitt y Young (1989); dichas muestras se ubican en su mayoría en la parte central del triángulo (fig. 19), donde se localizan la línea del promedio de las rocas graníticas; los valores de CIA que

se encuentran en un rango de 40-60 indican una ligera meteorización, mientras que valores en el rango de 60 a 80 indican una meteorización química moderada, para valores mayores de 80 ésta extrema, produciéndose así suelos de tipo residual (Domínguez et al., 2011). Estos resultados del índice de alteración química de los suelos reflejan que éstos no se han alterado intensamente, ya que presentan un CIA casi igual al de las rocas y regolito. Además los valores de los índices de disolución de las plagioclasas propuestos por Price and Velbel (2003) presentan un rango de disolución de 20%, tanto para roca, regolito y suelo; lo cual reafirma que el grado de meteorización es muy incipiente.

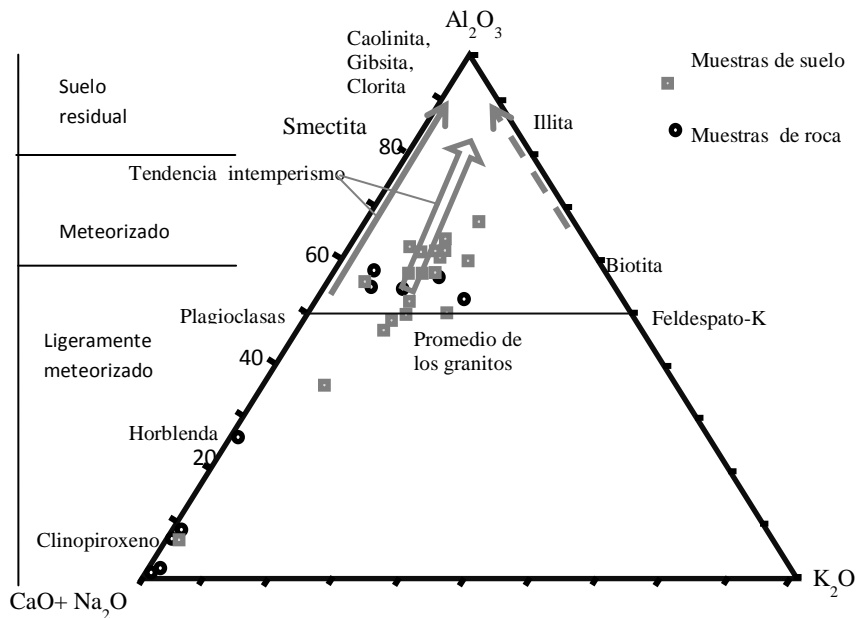


Fig. 19. Diagrama triangular, valores CIA Nesbitt y Young (1989).

5.4.1.3. Índice de Meteorización Potencial (IMP)

El índice meteorización potencial propuesto por García y Saavedra (1976), toma como base las concentraciones de los elementos mayores más móviles Na, K, Ca y Mg y sus respectivas energías de enlace con el oxígeno. Con base a los resultados de los análisis geoquímicos en el presente trabajo y aplicados a la fórmula de dicho índice ($IMP = 10.2 CaO + 13.1 MgO + 8.1K_2O + 10.5 Na_2O$), es mucho mayor en las rocas metamórficas, que corresponden a Hornfels y Mármoles (RK2 y RK10), siendo estos valores respectivamente de 538.673 y 972.339 como se muestra en la tabla 6 y fig. 20, mientras que los valores más bajos son para las rocas ígneas cuya mineralogía las caracteriza como Riolitas y Granitos (RK-8 y RK-1, RK-7), con valores de 105.744 y 112.64. Para el caso de los regolitos el mínimo valor encontrado fue de 86.008,

correspondiendo a regolito de riolita (MK-10) y un máximo valor de 516.98 que pertenece a regolito de caliza (MK-13); mientras que los valores intermedios pertenecen a regolitos que corresponden a granito y granodioritas; con respecto a los suelos los valores más altos de los índices de meteorización potencial es de 147.42 que pertenecen a un tipo de suelo denominado Xerosol (MK-15), mientras que el mínimo valor es de 82.62 perteneciente a un Yermosol (MK-5).

Tabla 6. Resultados para el índice de meteorización potencial (IMP).

Índice de Meteorización Potencial (García Saavedra)					
Roca		Suelo		Regolito	
Muestra		Muestra		Muestra	
RK-1(Granito)	126.22	MK-1(Re)	102.77	RK-2 (Ígnea)	179.86
RK-2(Metamórfica. Hornfels)	538.67	MK-4(Je)	141.51	RK-3(Metamórfica)	154.25
RK-3(Metamórfica)	482.07	MK-5(Yl)	82.62	RK-7(Micrita)	132.97
RK-4(Costra alteración de metamórfica)	373.92	MK-6(Yl)	116.97	RK-9 (Granito)	92.07
RK-5 (Traquiandesita)	153.93	MK-8(Yl)	101.10	RK-10(Riolita)	85.67
RK-6(Micrita con Cuarzo detrítico)	368.50	MK-14(Hh)	144.87	RK-11 (Ígnea)	92.07
RK-7 (Granito)	112.64	MK-15(Xk)	147.52	RK-12 (Granodiorita)	160.02
RK-8(Riolita)	105.74	MK-16(Xl)	85.67	RK-13 (Caliza)	516.98
RK-9 (Granodiorita)	147.48	MK-17(Xh)	98.64		
RK-10(Mármol)	972.33	MK-18(Re)	101.75		
		MK-19(Re)	141.04		

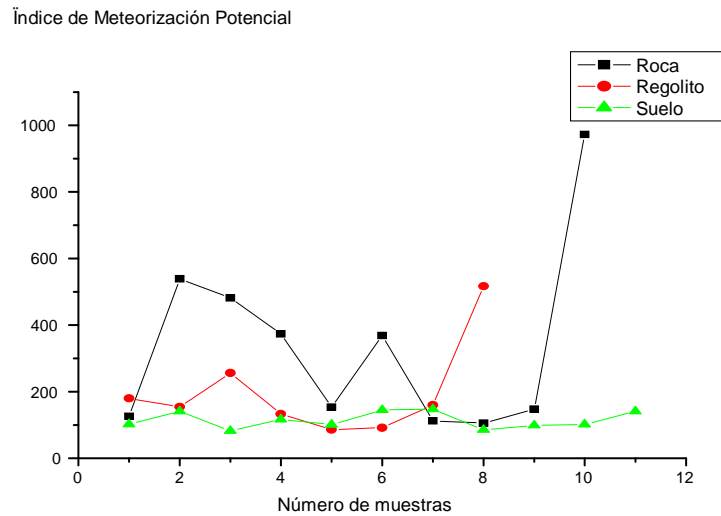


Fig. 20. Índices de Meteorización Potencial de Roca, Regolito y Suelo.

En general el comportamiento de los IMP es mayor en las rocas, teniendo una distribución sesgada hacia los valores altos (sesgo negativo), una desviación estándar muy alta, y una distribución mesocúrtica (fig. 21 a). El IMP para los regolitos presenta un sesgo inesgado, con un desviación estándar menor y su gráfica va siendo leptocúrtica, (fig. 21 b). Para los suelos el sesgo es completamente inesgado, con una desviación estándar muy pequeña, y su gráfica es muy Leptocúrtica (fig. 39c). Este índice nos demuestra como la estabilidad de alteración de los minerales va cambiando conforme su estado inicial, que es la roca tiene un valor más alto hasta que los minerales van teniendo una estabilidad mineralógica en función de las condiciones ambientales a las que es sometido el material parental, tomando valores menores en los índices de meteorización potencial.

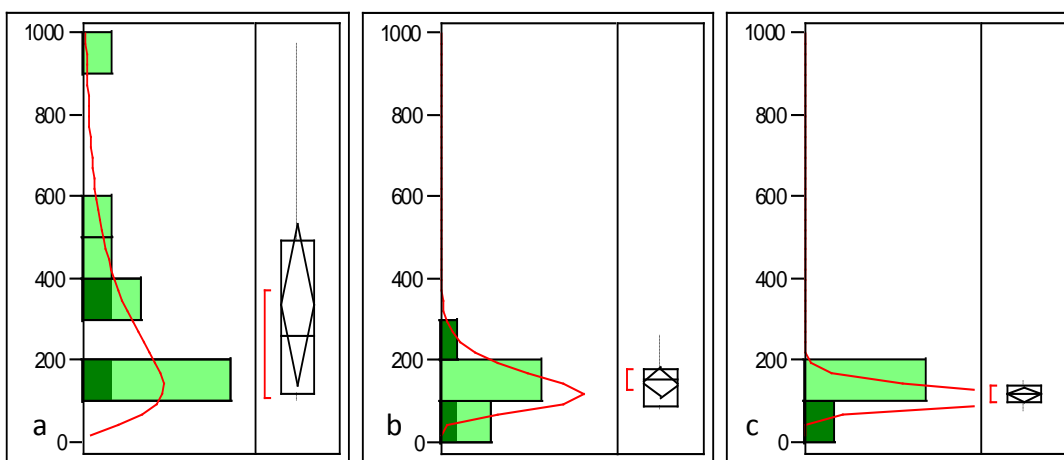


Fig. 21. Distribución normalizada de los IMP para: a).- Roca, b).- Regolito c).-Suelo.

En base a los resultados encontrados de estos índices se llevó a cabo una correlación de tipo polinomial entre Rocas contra Regolitos y Roca contra Suelos. El coeficiente de determinación R^2 entre Roca y Regolito es de 0.4516 (fig. 22 a), mientras que para la correlación de Roca contra Suelo $R^2=0.125$ (fig. 22 b). Estos resultados son de esperarse, ya que entre mayor grado alteración mineralógica se tiene, el coeficiente de determinación R^2 va siendo menor.

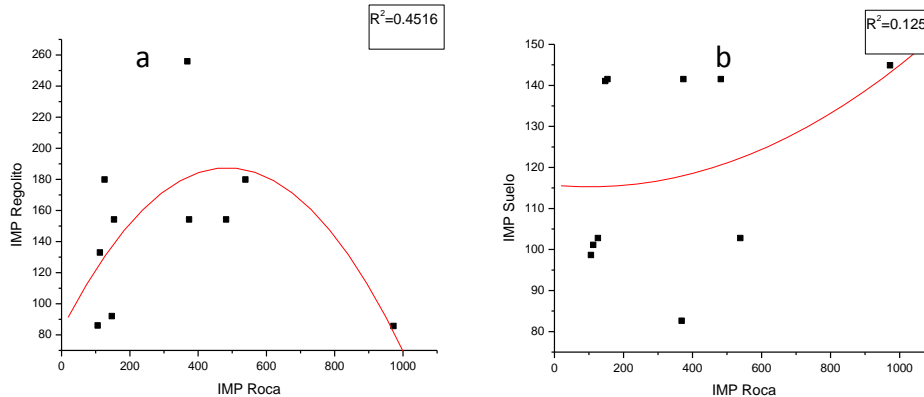


Fig. 22. Correlación Polinomial del IMP para: a).- Roca Vs. Regolito, b).- Roca Vs. Suelo.

5.4.1.4. Índice de Meteorización (IM)

El índice de meteorización (IM), fue utilizado por Ruxton en 1968, hace uso de cocientes simples moleculares como $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, donde se compara elementos considerados por diferentes autores menos móviles (Bahlburg 2009, Ohta y Arai 2007, Duzgoren-Aydin et al. 2002). Suponiendo que Al_2O_3 permanece inmóvil durante la meteorización, así los cambios de el IM reflejan la pérdida de sílice como un manera para evaluar (proxy) la pérdida total del elemento. El cociente Ruxton (IM) puede ser útil cuando se consideran perfiles de meteorización de rocas de composición intermedia y félsica, pero fue encontrado para ser mal correlacionada con el grado de erosión real de rocas silicatadas (Duzgoren-Aydin et al., 2002).

Los valores encontrados para este índice en rocas es muy variado como se observa en la tabla 7, siendo los más altos para rocas metamórficas (hornfels, mármol) cuyo valor oscila entre 48.58, 12.01 y 9.67; un 17.97 para roca sedimentaria (Micrita con cuarzo detrítico), los valores más bajos se encuentran de 2.92 a 5.52 perteneciendo a rocas ígneas de carácter granítico, granodiorítico y riolítico (fig. 23)

Tabla 7. Resultados para el índice de meteorización (IM).

Índice de Meteorización (IM)					
Roca		Suelo		Regolito	
Muestra		Muestra		Muestra	
RK-1(granito)	4.57	MK-1(Re)	4.30	MK-2 (ígnea)	4.57
RK-2(metamórfica. Hornfels)	48.58	MK-4(Je)	4.300	MK-3(metamórfica)	4.57
RK-3(metamórfica)	12.01	MK-5(Yl)	4.95	MK-7(Micrita)	4.95
RK-4(costra alteración de metamórfica)	2.92	MK-6(Yl)	4.95	MK-9 (Granito)	5.00
RK-5 (traquiandesita)	3.46	MK-8(Yl)	4.95	MK-10(riolita)	3.78
RK-6(Micrita con cuarzo detrítico)	17.97	MK-14(Hh)	6.24	MK-11 (ígneo)	4.09
RK-7 (granito)	4.80	MK-15(Xk)	4.17	MK-12 (Granodiorita)	4.02
RK-8(riolita)	5.52	MK-16(Xl)	4.11	MK-13 (Caliza)	5.67
RK-9 (granodiorita)	3.36	MK-17(Xh)	5.00		
RK-10(mármol)	9.67	MK-18(Re)	3.19		
		MK-19(Re)	5.00		

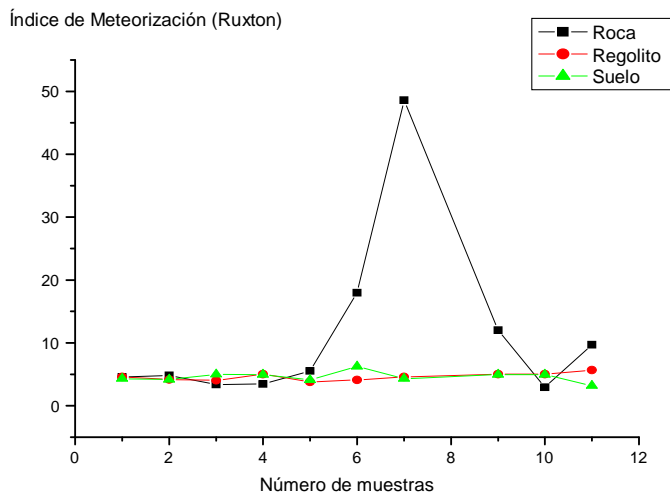


Fig. 23 Índice de Meteorización Roca, Regolito y Suelo.

El comportamiento de de los IM de Ruxton, que es el coeficiente de dos elementos considerados menos móviles se observa que en la roca (fig.24 a) los valores son más altos, presentándose una media de 11,29, presentado un sesgo negativo hacia los IM mayores, además se presenta una curva completamente platicúrtica, indicándonos que la distribución de sus datos es muy disperso donde se tiene una desviación estándar de 13, mientras que los valores de distribución de los datos tanto para regolito y suelo es muy parecida como se observa en la fig. 24 b y c, donde se presentan sesgos asimétricos, con una media de 4.6, una desviación estándar que oscila entre 0.6 a 0.8 y con curtosis que pertenecen a mesocúrtica. Esto nos indica que tanto los IM para regolitos y suelos son muy parecidos donde su probable explicación se deba a que ambos elementos que son menos móviles llegaron a un punto en que no se pueden alterar más en las condiciones ambientales en las que se encuentran.

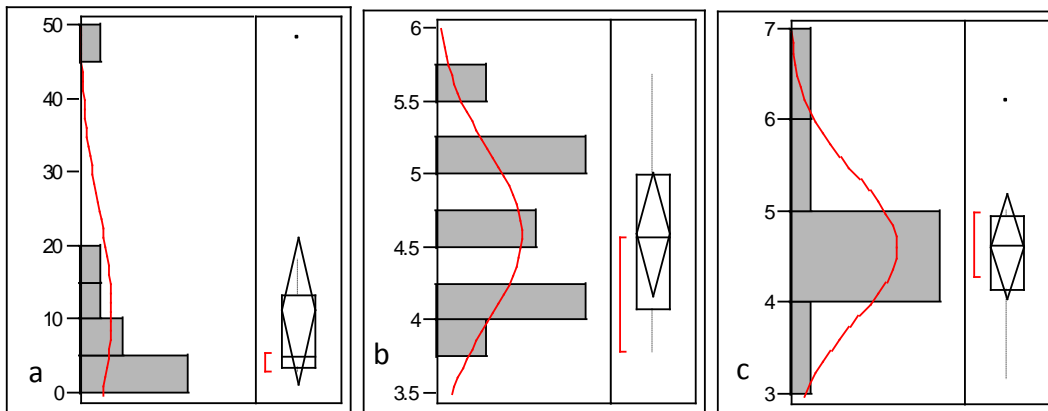


Fig. 24. Distribución normalizada de los IM para: A) Roca, B) Regolito y C) Suelo.

Estadísticamente se efectuó una correlación entre Roca Vs. Regolito y Regolito Vs. Suelo para corroborar la aseveración de que los elementos menos móviles llegan a un equilibrio al pasar de roca → regolito → suelo, esto se puede observar en la fig. 25 donde efectivamente existe una no muy buena correlación entre roca y regolito ya que el ajuste de polinomio de cuarto grado da un $R^2= 0.50$; mientras que para la correlación de regolito y suelo este coeficiente de correlación es de $R^2=0.70$ (fig. 25 b) mostrando una similitud de elementos no móviles entre suelo y regolito; demostrando que probablemente hasta ese punto existe una degradación mineralógica de aquellas rocas cuyos minerales se compongan en parte de Al_2O_3 y SiO_2 .

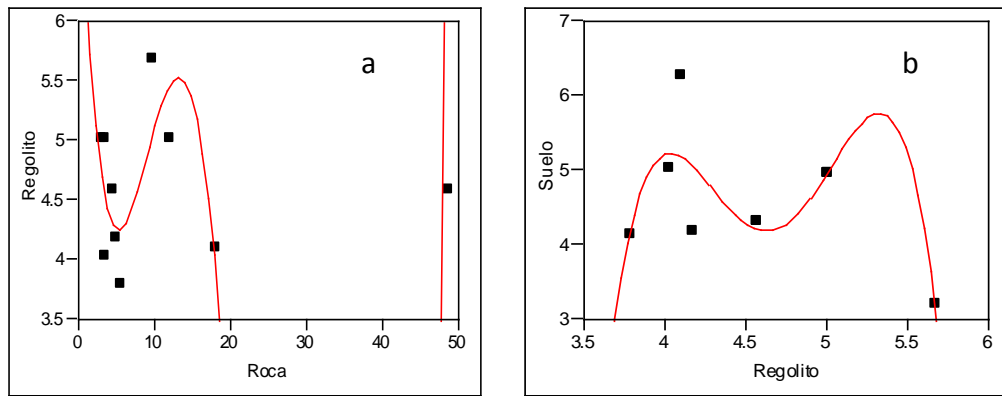


Fig. 25 a: Ajuste de polinomio de cuarto grado de Roca contra Regolito y Roca contra Suelo.

$$\text{Regolito} = 3.4412641 + 0.1697355 \text{ Roca} - 0.0324529 (\text{Roca}-11.2923)^2 - 0.004234 (\text{Roca}-11.2923)^3 + 0.0001332 (\text{Roca}-11.2923)^4$$

$$\text{Suelo} = 6.5235567 - 0.5047967 \text{ Regolito} + 6.0029852 (\text{Regolito}-4.5923)^2 + 2.2379164 (\text{Regolito}-4.5923)^3 - 7.5061977 (\text{Regolito}-4.5923)^4$$

$R^2=0.7$

El índice de lavado de Jenny, involucra minerales de K_2O y Na_2O , los cuales se vieron enriquecidos por la meteorización en las rocas ígneas y volcánicas, es lógico pensar esto, ya que, las rocas metamórficas pierden estos minerales al momento del metamorfismo; para el caso del índice de alteración de Ruxton, las rocas ígneas y volcánicas fueron los que dieron los valores más altos, siendo el SiO_2 el mineral más enriquecido con la alteración; contrario al índice de meteorización del mismo autor (Ruxton), en donde las rocas metamórficas son las más susceptibles, en el contenido de Al_2O_3 es mucho menor que en las rocas plutónicas, y el contenido de SiO_2 se mantiene en valores parecidos en todas las rocas del área de estudio.

5.4.1.5. Índice de Chesworth (1973)

Al igual que los autores anteriores Chesworth (1973) trata de observar las pérdidas y ganancias relativas de los diferentes elementos químicos durante los procesos de meteorización tanto en rocas, regolitos y suelo. Esto lo hace evaluando las relaciones entre aquellos componentes que presentan menor o mayor movilidad a través del diagrama $(CaO + MgO)-(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)-(Na_2O + K_2O)$.

Las muestras de roca del presente trabajo se sitúan en el diagrama de Chesworth (fig. 26) en el extremo del vértice $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$, considerándose el campo donde se ubican las muestras de composición de las rocas frescas, mientras que las muestras de suelo y regolitos se localizan dentro de los campos $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ y $CaO+MgO$, mostrando así el grado de alteración de las rocas, situando al material alterado (suelo y regolito) en las posiciones próximas al "sistema residual".

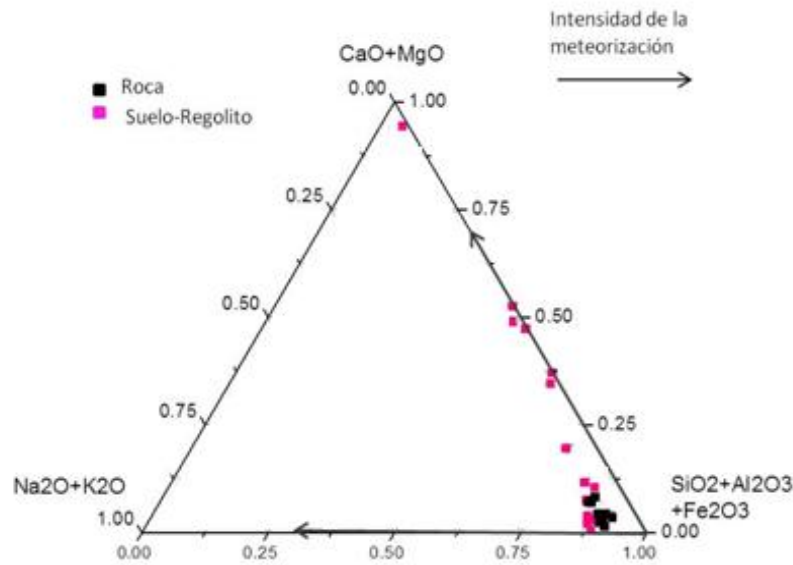


Fig. 26.- Diagrama de Chesworth (1979).

5.5.- Índice Físico

5.5.1. Índice de Meteorización Física

Como ya se mencionó anteriormente en la introducción la meteorización puede ser de carácter físico, químico o biológico. En virtud de los objetivos planteados inicialmente de evaluar únicamente la meteorización química, esto cambió durante el desarrollo del trabajo, debido principalmente a las observaciones de campo realizadas durante el muestreo, donde fue necesario atender la meteorización física, de manera particular el fracturamiento.

Existe una gran cantidad de métodos para evaluar fracturamiento de rocas, dentro de los más completos existe el método del índice Q, propuesto por Barton et al (1974), el cual describe la manera de calcular el índice Q de la calidad geotécnica de los macizos rocosos, el cual asigna valores numéricos para asignarle el carácter de calidad. Para estimar dicho índice, se utiliza la fórmula en donde intervienen factores, como: el tamaño de los bloques de las diferentes rocas, así como rugosidad de las estructuras de los macizos rocosos entre un coeficiente de grado de alteración de las estructuras del macizo. Los valores que adquieren cada una de las variables son asignadas en función de una tabla que equipara el valor la característica física encontradas en campo. Este índice se evaluó para cada tipo diferente de roca encontrada en los alrededores de Hermosillo.

5.5.1.1. Unidad Litológica Morelos Final

En este afloramiento se describieron tres tipos de unidades geotécnicas, denominadas: 1, 2 y 3, (foto 22). Dentro de las cuales se midieron diferentes estructuras, donde finalmente todos los valores de Q de las diferentes unidades (1,2 y 3) geotécnicas serán promediados, para dar el valor final de Q que corresponde a la roca, cuya composición es un granito. Los valores encontrados de Q para la Unidad Geotécnica 1 es de 7.49 como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Valores encontrados de Q para la Unidad Litológica Morelos Final.

Unidad Litológica	Valor de Q	Calidad del Macizo
1(L1)	7.492	
2(L2)	12.77	
3(L3)	0.77	
Total del Granito	7.07	Media a Regular



Foto 22. Unidades geotécnicas, de la unidad litológica Morelos Final.

5.5.1.2. Unidad Litológica Cerro Colorado

En esta unidad litológica afloran Riolitas y se representa por 2 unidades geotécnicas (foto 23), las cuales al igual que la anterior se midieron las estructuras y todos los valores de Q fueron promediados, la cual cae en la categoría de macizo de calidad buena. (Tabla 9).

Tabla 9. Relación de los valores de Q para unidad geotécnica encontrada en el área de estudio.

Unidad Litológica	Valor de Q	Calidad del Macizo
1(L1)	52.32	
2(L2)	3.62	
Total Riolita	27.97	Buena



Foto 23 a) Unidad geotecnia Cerro Colorado, b) estructura bien trabada y selladas con relleno duro.

5.5.1.3. Unidad Litológica La Sauceda

En esta unidad litológica representada por rocas metamórficas, se encontraron dos unidades geotécnicas, 1y 2(foto 24), la cual según los cálculos realizados conforme al método del Índice Q Barton et. al. (1979), la unidad cae en la categoría de Macizo de calidad muy buena (tabla 10).

Tabla 10. Valores de Q de la unidad litológica La Sauceda.

Unidad Litológica	Valor de Q	Calidad del Macizo
1(L1)	5.33	
2(L2)	94	
Total litología la Sauceda	49.66	Muy buena



Foto 24.-Unidades geotécnicas de la litología La Saucedá.

5.5.1.4.- Unidad Litológica Minitas Final

En esta unidad litológica se encontraron dos unidades geotécnicas, 1 representada por roca de origen metamórfico y la unidad 2 representada por roca de origen ígneo, la cual según los cálculos realizados conforme al método del Índice Q Barton et. al. (1979), la unidad cae en la categoría de Macizo de calidad buena. (tabla 11)

Tabla 11. Valores de Q de la unidad litológica Minitas final.

Unidad Litológica	Valor de Q	Calidad del Macizo
1(L1)	15.85	
2(L2)	5.20	
Total litología San José de las Minas	10.50	Buena

5.6. Erosión

El suelo es un recurso sumamente importante para el hombre, dada la relación de dependencia entre estos. En él se encuentra un gran número de actividades productivas de los sectores de alimentos, industria y vivienda, entre otros.

En el caso particular de la aplicación directa del suelo en la ciudad de Hermosillo, como es la vivienda e industria, han generado una ruptura de equilibrio sobre las fuentes de aporte de suelo (roca parental) y el fenómeno de erosión, marcándose un punto de quiebre frente al criterio de sostenibilidad, dadas las diferencias entre la tasa de formación y la tasa de pérdida de suelo.

Las urbanizaciones en su proceso de construcción aporta importantes cantidades de sedimentos, dado que actividades como la remoción de las coberturas vegetales, la excavación, y la explanación, entre otras, dejan grandes masas de suelo y roca expuestas la acción de la lluvia, provocando su desprendimiento y arrastre o transporte. Este fenómeno ha generado de manera directa que los procesos de erosión no solo en suelos, si no en las zonas de afloramientos rocosos aumente el proceso de intemperismo y erosión.

Para el cálculo de la erosión, se utilizó la ecuación universal de la pérdida del suelo.

Una vez obteniendo las tres décadas con datos recabados de la estación meteorológica, se procedió a hacer los cálculos de cada uno de los factores. Después de tener los datos de erosión, se realizó una relación en base a los tipos de suelo que se encuentran en el área de estudio y se hizo un mapa en el cual en base a los suelos se obtuvo la erosión de cada uno de los mismos para cada década. Esto para observar como cada suelo erosiona a diferente grado según su mineralogía y sus propiedades físicas.

En la década de los 80's la erosión que se presentó fue en un 59.74% leve, y en un 25.59% de manera moderada y 9.93% fue una erosión alta, el porcentaje restante pertenece al área de la ciudad y la presa (fig. 27). Los suelos más erosionados fueron los Feozem y Litosoles; los cuales estan presentes en las sierras y las partes más altas de la ciudad (anexos tabla 3).

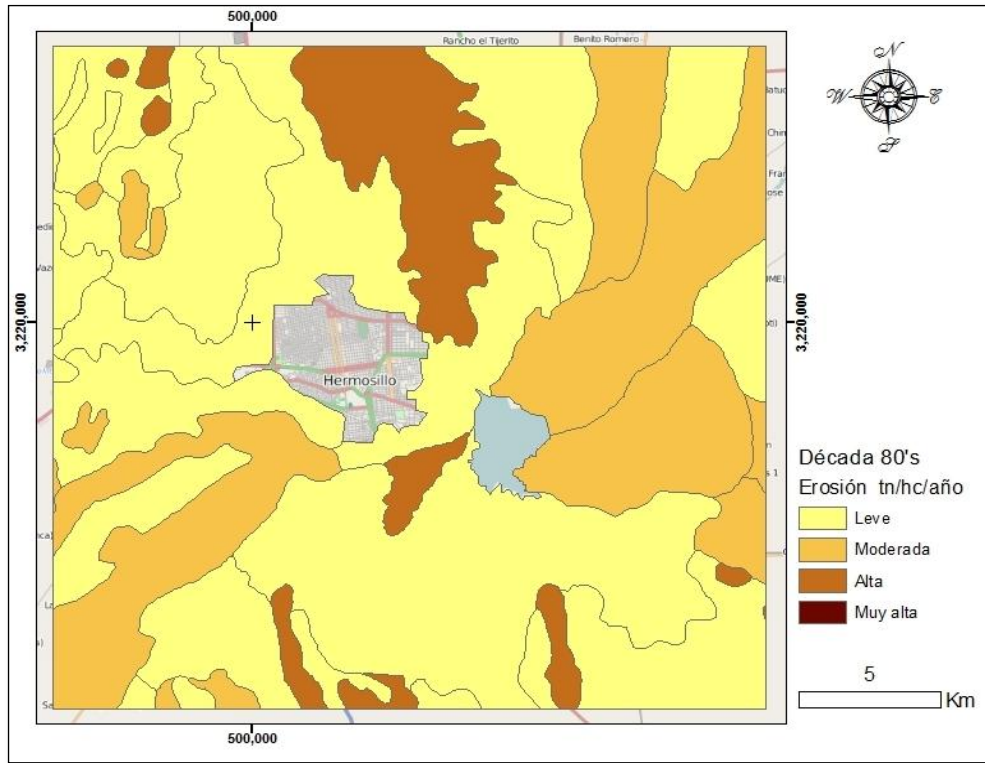


Fig. 27. Mapa Erosión década 80's

Para la década de los 90's (fig. 28), la erosión fue presente en la parte sureste del área de estudio, representada por los Xerosoles aumentando en un 32.59% la erosión moderada, y para la erosión leve y alta no presentaron gran cambio para esta década (anexos tabla 4).

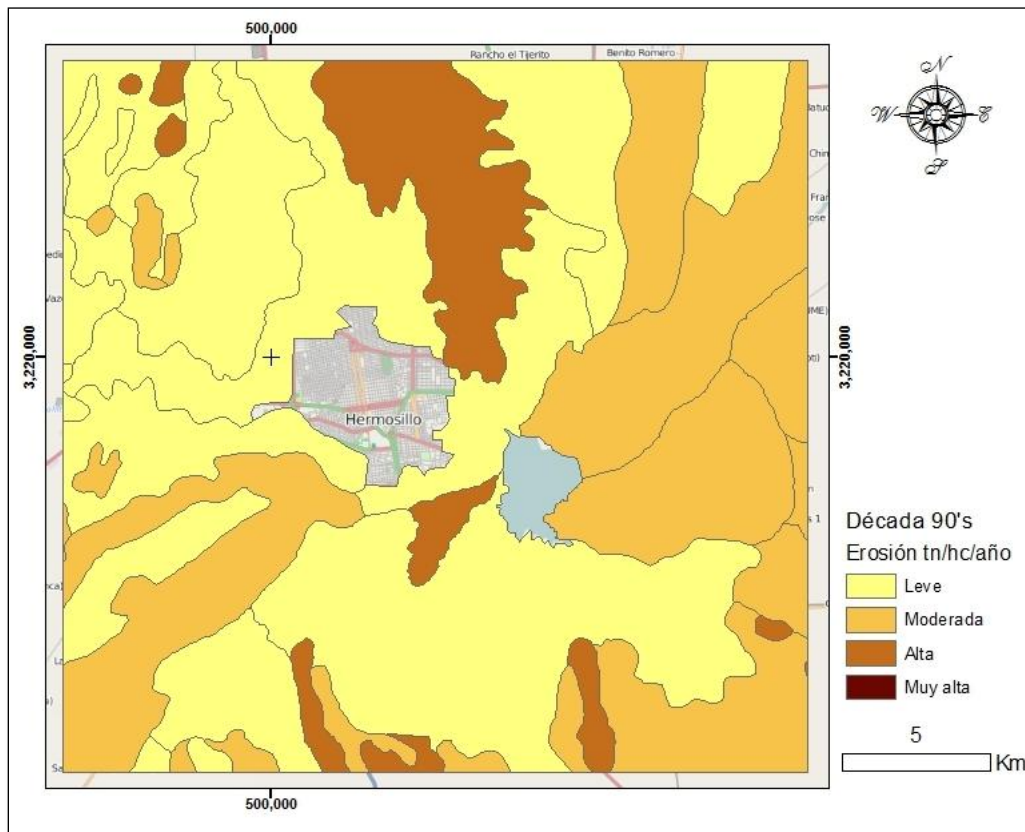


Fig. 28.-Mapa erosión 90's

En la década de 2000 el 95% de la ciudad se erosionó de manera moderada siendo en esta década donde todos los suelos se vieron afectados por este fenómeno (fig. 29), ya sea por causas del clima o antropogénicas, ya que fue cuando la ciudad tuvo un crecimiento acelerado con esto se vio afectada por la deforestación de muchas áreas, dejándolos desnudos y provocando con esto el lavado de los suelos. (anexos tabla 5).

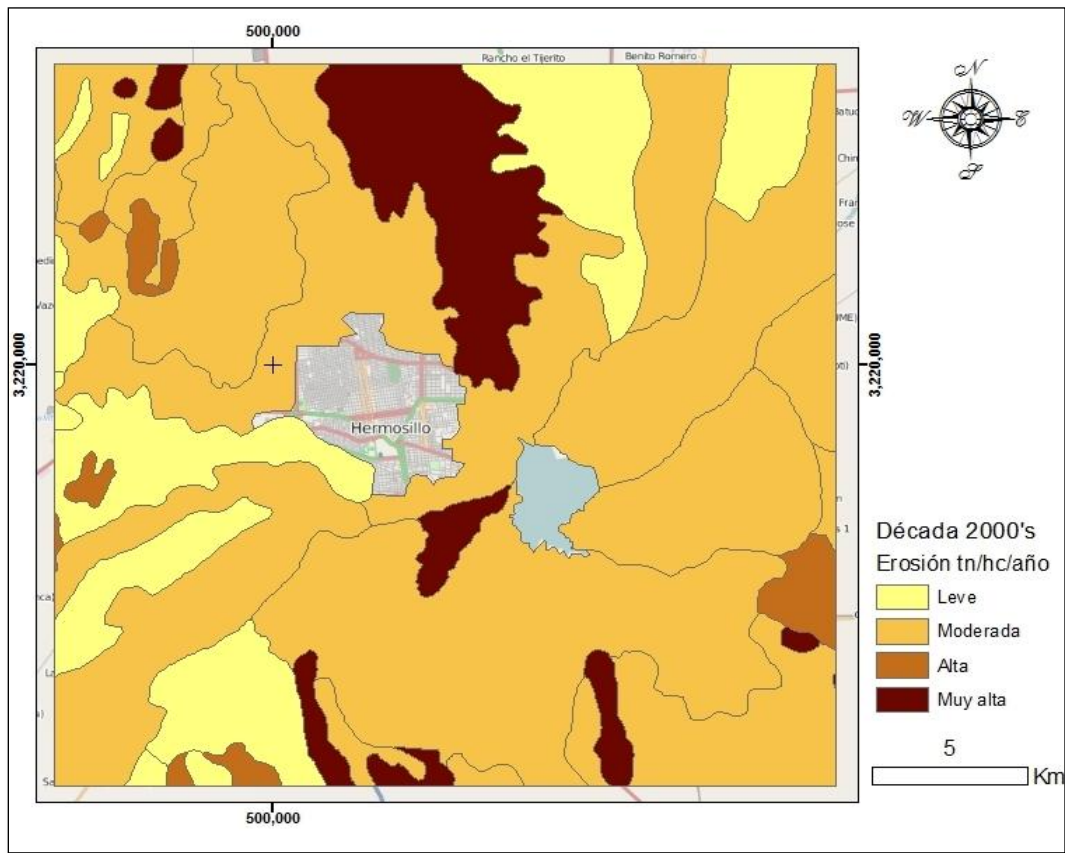


Fig. 29. Mapa de erosión década 2000.

6. -CONCLUSIONES

Como se mencionó a lo largo de la tesis, los procesos de meteorización pueden ser de carácter físico, químico o biológico, y los abordados en este trabajo fueron de carácter físico y químico para de los cuales se puede concluir lo siguiente:

Físico:

Las temperaturas que se presentan son extremas a lo largo de todo el año, y donde las precipitaciones son escasas y torrenciales mostrando que el análisis de sus índices climatológicos presenta un intemperismo débil en las rocas de la Cd. de Hermosillo.

Desde un punto de vista estructural se analizó la calidad de los macizos rocosos a partir del Método del índice Q de calidad geotécnica, donde los resultados obtenidos nos muestran que las rocas que presentan la calidad más mala son las granodioritas.

Químico:

Petrología

En función de la petrografía se pudo observar que las rocas del tipo ígneo representan el 33% de los afloramientos en la Cd. De Hermosillo, un 33% de origen metamórfico de contacto, y un 34% de sedimentarias.

La petrografía de las briquetas de suelo muestran que el material que presenta mejores características texturales son aquellos que provienen de rocas graníticas, ya que los granos están mejor clasificados, tienen mayor madurez textural y son menos angulosos; concluyendo con esto que este material se ha encontrado más tiempo expuesto a los procesos de intemperismo, erosión y transporte. Por lo tanto es la roca que presenta mayor grado de intemperismo.

Geoquímica

En base a los diagramas de Harker se concluye que los suelos aún mantienen una relación con la roca parental, y los elementos más móviles que se presentaron son Al_2O_3 , K_2O y CaO aumentando casi en un 50% en suelo-regolito, indicando la presencia de aluminosilicatos y altos contenidos de feldespatos en los suelos, por lo que el aporte a estos proviene principalmente de rocas ígneas.

En el índice químico de alteración (Nesbitt y Young, 1989) se encontraron valores muy variados para los diferentes tipos de roca, las muestras de suelo se encuentran ligeramente meteorizadas encontrándose en la parte media del diagrama triangular, indicando una meteorización química moderada, observando la tendencia de las muestras hacia la formación de arcillas de tipo caolinita, gibsita y cloritas.

En el Índice de meteorización potencial se demuestra que los suelos si presentan un grado de alteración, los minerales están llegando a una estabilidad en comparación al estado inicial, donde los datos están más dispersos. Concluyendo que efectivamente se está desarrollando una meteorización química en los suelos.

En el diagrama triangular de Chesworth (1973) se observa como las muestras de suelo-regolito tuvieron una pérdida de elementos más móviles, tendiendo a una alteración moderada, ya que las muestras de suelo-regolito aun mantienen características de la roca madre inclinándose más al sistema residual.

En el análisis de los 30 años del comportamiento de los climas, se observó que los suelos han ido en aumento en el proceso de erosión partiendo de una erosión leve en la década de los 80's donde los suelos mas erosionados fueron los Feozem, hasta llegar a una erosión moderada para la década de los 90's y 2000 donde la mayor parte de los suelos de la ciudad se erosionaron afectando más a los suelos menos desarrollados a los del tipo Regosol y Xerosol.

En el presente trabajo se puede concluir en general que el mayor aporte a la formación de suelos en la ciudad son las rocas de origen ígneo intrusivo, donde el precursor inicial para del proceso de meteorización en la roca es el físico(estructural), seguido del intemperismo químico que actuó sobre el fracturamiento directamente, al haber infiltración de agua, generando así el material parental del cual se compone los suelos de la Cd. De Hermosillo. Siendo ésta una meteorización moderada, ya que aún mantienen características mineralógicas de las rocas de la cual provienen.

ANEXOS

Tabla 1. Coordenadas muestras suelo, regolito y roca.

Muestra suelo	Coordenadas		Muestra regolito	Coordenadas		Muestra roca	Coordenadas	
MK-1	500285 E	3209991 N	MK-2	499887 E	3209030 N	RK-1	499887 E	3209030 N
MK-4	522054 E	3221550 N	MK-3	516107 E	3217513 N	RK-2	500166 E	3209247 N
MK-5	500989 E	3209700 N	MK-7	509202 E	3209183 N	RK-3	524970 E	3222010 N
MK-6	509202 E	3209183 N	MK-9	505136 E	3207114 N	RK-4	524970 E	3222010 N
MK-8	506448 E	3206910 N	MK-10	496918 E	3224061 N	RK-5	524214 E	3222010 N
MK-14	500983 E	3214723 N	MK-11	501085 E	3226633 N	RK-6	510261 E	3209710 N
MK-15	509282 E	3220290 N	MK-12	504757 E	3222907 N	RK-7	505126 E	3206989 N
MK-16	500983 E	3214723 N	MK-13	516845 E	3211629 N	RK-8	496883 E	3224018 N
MK-17	509282 E	3220290 N				RK-9	504816 E	3227117 N
MK-18	29.12294	-110.989				RK-10	507056 E	3215686 N
MK-19	29.14586	-110.973						

Tabla 2. Valores de K de la formula de pérdida de suelo FAO.

Orden	Texturas			Orden	Textura			Unidades de suelo de la clasificación de la FAO	
	G	M	F		G	M	F	Nombre	Símbolo
A	0.026	0.040	0.010	Lo	0.026	0.040	0.013	Acrisoles	A
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026	Cambisoles	B
Ag	0.026	0.040	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026	Chernozem	C
Ah	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.026	0.040	0.013	Podzoluvisoles	D
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,x)	0.013	0.020	0.007	Rendzinas	E
Ap	0.053	0.079	0.026	O(x)	0.013	0.020	0.007	Ferrosoles	F
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026	Gleysoles	G
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026	Feozem	H
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026	Litosoles	I
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013	Fluvisoles	J
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013	Kastañozem	K
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026	Luvisoles	L
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026	Gleysem	M
BK	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007	Nitsoles	N
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013	Histosoles	O
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013	Podzoles	P
C(g,h,k,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007	Arenosoles	Q
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013	Regosoles	R
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026	Solonetz	S
F(ah,oo,x)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026	Andosoles	T
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026	Rankers	U
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013	Vertisoles	V
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026	Planosoles	W
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013	Xerosoles	X
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007	Yermosoles	Y
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007	Solonchak	Z
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013		
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013		
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007		
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026		
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026		
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026		
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026		
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013		
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013		
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026		
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026		
K(h,K,l)	0.026	0.040	0.013	X(h,kl,y)	0.053	0.079	0.026		
L	0.026	0.040	0.013	Y(hklyt)	0.053	0.079	0.026		
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013		
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013		
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007		
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.026	0.040	0.013		

Tabla 3. Erosión anual década de los 80's para cada tipo de suelo.

SUELO	80	A 81	A 82	A 83	A 84	A 85	A 86	A87	A88	A89
Hc+Hh/2	6.765	10.977	31.058	20.164	16.677	9.932	6.294	1.612	2.909	0.722
Hh+Je+Xl/2	6.765	10.977	31.058	20.164	16.677	9.932	6.294	1.612	2.909	0.722
Hh+Vc/2	6.765	10.977	31.058	20.164	16.677	9.932	6.294	1.612	2.909	0.722
Hh+Vc+Je/2	6.765	10.977	31.058	20.164	16.677	9.932	6.294	1.612	2.909	0.722
I+Rc/2	40.590	65.862	186.350	120.989	100.064	59.594	37.769	9.674	17.457	4.336
I+Re/1	13.358	21.676	61.330	39.819	32.932	19.613	12.430	3.184	5.745	1.427
I+Re+Rc/2	40.590	65.862	186.350	120.989	100.064	59.594	37.769	9.674	17.457	4.336
Re/1	0.467	0.758	2.146	1.393	1.152	0.686	0.435	0.111	0.201	0.049
Re+Hh/2	3.425	5.557	15.725	10.210	8.444	5.029	3.187	0.816	1.473	0.365
Re+Xh/1	1.380	2.239	6.337	4.114	3.403	2.026	1.284	0.329	0.593	0.147
Re+Xh/2	2.740	4.446	12.580	8.168	6.755	4.023	2.549	0.653	1.178	0.292
Vc+Xl/2	1.164	1.889	5.346	3.471	2.871	1.709	1.083	0.277	0.500	0.124
Xh/2	8.563	13.894	39.314	25.525	21.110	12.572	7.968	2.041	3.683	0.914
Xh+E/2	4.247	6.891	19.500	12.660	10.470	6.235	3.952	1.012	1.826	0.453
Xh+Rc/2	4.247	6.891	19.500	12.660	10.470	6.235	3.952	1.012	1.826	0.453
Xh+Rc+We/2	2.466	4.001	11.322	7.351	6.079	3.620	2.294	0.587	1.060	0.263
Xh+Xk/2	1.164	1.889	5.346	3.471	2.871	1.709	1.083	0.277	0.500	0.124
Xh+Xl/2	1.164	1.889	5.346	3.471	2.871	1.709	1.083	0.277	0.500	0.124
Xk/2	2.740	4.446	12.580	8.168	6.755	4.023	2.549	0.653	1.178	0.292
Xl+Vc/2	1.164	1.889	5.346	3.471	2.871	1.709	1.083	0.277	0.500	0.124
Yl+Xh+Vc/2	2.123	3.445	9.750	6.330	5.235	3.117	1.976	0.506	0.913	0.226
Re+I/2	3.014	4.891	13.838	8.984	7.430	4.425	2.804	0.718	1.296	0.322
Xh+Re/1	0.756	1.228	3.475	2.256	1.866	1.111	0.704	0.180	0.325	0.080
total anual	162.43	263.562	745.725	484.166	400.431	238.479	151.142	38.7167	69.861	17.353

Tabla 4. Erosión anual década de los 90's para cada tipo de suelo.

SUELO	A 90	A 91	A 92	A 93	A94	A 95	A 96	A 97	A 98	A 99
Hc+Hh/2	13.381	1.831	26.027	48.467	61.037	44.083	27.955	N/D	0.373	0.063
Hh+Je+XI/2	13.381	1.831	26.027	48.467	61.037	44.083	27.955	N/D	0.373	0.063
Hh+Vc/2	13.381	1.831	26.027	48.467	61.037	44.083	27.955	N/D	0.373	0.063
Hh+Vc+Je/2	13.381	1.831	26.027	48.467	61.037	44.083	27.955	N/D	0.373	0.063
I+Rc/2	80.291	10.988	156.162	290.806	366.225	264.503	167.732	N/D	2.240	0.380
I+Re/1	26.424	3.616	51.395	95.708	120.529	87.051	55.203	N/D	0.737	0.125
I+Re+Rc/2	80.291	10.988	156.162	290.806	366.225	264.503	167.732	N/D	2.240	0.380
Re/1	0.924	0.126	1.798	3.349	4.218	3.046	1.932	N/D	0.025	0.004
Re+Hh/2	6.775	0.927	13.178	24.540	30.905	22.320	14.154	N/D	0.189	0.032
Re+Xh/1	2.730	0.373	5.310	9.889	12.454	8.995	5.704	N/D	0.076	0.012
Re+Xh/2	5.420	0.741	10.542	19.632	24.724	17.856	11.323	N/D	0.151	0.025
Vc+XI/2	2.303	0.315	4.480	8.343	10.507	7.589	4.812	N/D	0.064	0.010
Xh/2	16.939	2.318	32.945	61.351	77.262	55.802	35.386	N/D	0.472	0.080
Xh+E/2	8.401	1.149	16.341	30.430	38.322	27.677	17.551	N/D	0.234	0.039
Xh+Rc/2	8.401	1.149	16.341	30.430	38.322	27.677	17.551	N/D	0.234	0.039
Xh+Rc+We/2	4.878	0.667	9.488	17.669	22.251	16.071	10.191	N/D	0.136	0.023
Xh+Xk/2	2.303	0.315	4.480	8.343	10.507	7.589	4.812	N/D	0.064	0.010
Xh+XI/2	2.303	0.315	4.480	8.343	10.507	7.589	4.812	N/D	0.064	0.010
Xk/2	5.420	0.741	10.542	19.632	24.724	17.856	11.323	N/D	0.151	0.025
XI+Vc/2	2.303	0.315	4.480	8.343	10.507	7.589	4.812	N/D	0.064	0.010
YI+Xh+Vc/2	4.200	0.574	8.170	15.215	19.161	13.838	8.775	N/D	0.117	0.019
Re+I/2	5.962	0.816	11.596	21.595	27.196	19.642	12.456	N/D	0.166	0.028
Xh+Re/1	1.497	0.204	2.912	5.423	6.830	4.932	3.128	N/D	0.041	0.007
Total anual	321.303	43.974	624.918	1163.730	1465.536	1058.470	671.220	N/D	8.964	1.522

Tabla 5. Erosión anual década de los 2000 para cada tipo de suelo.

SUELO	A 00	A 01	A 02	A 03	A 04	A 05	A 06	A 07	A 08	A 09
Hc+Hh/2	N/D	73.177	26.913	138.882	30.226	28.632	38.536	39.472	45.764	17.954
Hh+Je+XI/2	N/D	73.177	26.913	138.882	30.226	28.632	38.536	39.472	45.764	17.954
Hh+Vc/2	N/D	73.177	26.913	138.882	30.226	28.632	38.536	39.472	45.764	17.954
Hh+Vc+Je/2	N/D	73.177	26.913	138.882	30.226	28.632	38.536	39.472	45.764	17.954
I+Rc/2	N/D	439.067	161.480	833.293	181.360	171.795	231.221	236.834	274.585	107.727
I+Re/1	N/D	144.503	53.145	274.248	59.688	56.540	76.098	77.945	90.369	35.454
I+Re+Rc/2	N/D	439.067	161.480	833.293	181.360	171.795	231.221	236.834	274.585	107.727
Re/1	N/D	5.057	1.860	9.598	2.089	1.978	2.663	2.728	3.162	1.240
Re+Hh/2	N/D	37.052	13.627	70.320	15.304	14.497	19.512	19.985	23.171	9.090
Re+Xh/1	N/D	14.932	5.491	28.339	6.167	5.842	7.863	8.054	9.338	3.663
Re+Xh/2	N/D	29.641	10.901	56.256	12.243	11.597	15.609	15.988	18.537	7.272
Vc+XI/2	N/D	12.597	4.633	23.908	5.203	4.929	6.634	6.795	7.878	3.090
Xh/2	N/D	92.630	34.067	175.800	38.261	36.243	48.780	49.964	57.929	22.727
Xh+E/2	N/D	45.944	16.897	87.196	18.977	17.976	24.195	24.782	28.733	11.2727
Xh+Rc/2	N/D	45.944	16.897	87.196	18.977	17.976	24.195	24.782	28.733	11.2727
Xh+Rc+We/2	N/D	26.677	9.811	50.630	11.019	10.438	14.048	14.389	16.683	6.545
Xh+Xk/2	N/D	12.597	4.633	23.908	5.203	4.929	6.634	6.795	7.878	3.090
Xh+XI/2	N/D	12.597	4.633	23.908	5.203	4.929	6.634	6.795	7.878	3.090
Xk/2	N/D	29.641	10.901	56.256	12.243	11.597	15.609	15.988	18.537	7.272
XI+Vc/2	N/D	12.597	4.633	23.908	5.203	4.929	6.634	6.795	7.878	3.090
YI+Xh+Vc/2	N/D	22.972	8.448	43.598	9.488	8.988	12.097	12.391	14.366	5.636
Re+I/2	N/D	32.605	11.991	61.881	13.468	12.757	17.170	17.587	20.391	8.000
Xh+Re/1	N/D	8.188	3.011	15.540	3.382	3.203	4.312	4.416	5.120	2.009
Total anual	N/D	1757.031	646.200	3334.615	725.757	687.478	925.284	947.745	1098.817	431.096

7. BIBLIOGRAFÍA

Almaguer C. Yuri, Guardado L. Rafael. 2005. Caracterización ingeniero geológica del perfil de meteorización de rocas ultrabásicas serpentizadas en el territorio de Moa, Cuba. *Minería y Geología*. Vol. 21. Núm. 3.

Aristizábal E., Roser B. & Yokota Shuichiro. 2009. Patrones e índices de meteorización química de los depósitos de vertiente y rocas fuente en el valle de Aburrá. *Boletín ciencias de la tierra*, núm. 25, diciembre-junio, 2008, p 27-42, Universidad Nacional de Colombia. <http://www.redalyc.org/pdf/1695/169516255002.pdf>.

Aristizábal E., Valencia Y., Guerra A., Vélez M., Echeverría O. (2011). Caracterización Geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, núm. 30, p. 47-60.

Cooke, R.U. and Doornkamp, J.C., 1990. *Geomorphology in environmental management. A new introduction, second edition*. Oxford. Clarendon Press. ISBN 0198741502 *Progress in Human Geography* December pp 483-484.

Dapena G. Juan E. 1978 Estudio de la influencia de la meteorización sobre las características de los materiales pétreos utilizados en el proyecto de obras públicas. Universidad Politécnica de Madrid.

Didier Dubroeuq, Daniel Geissert, Paul Quantin (1998). Weathering and soil forming processes under semi-arid conditions in two Mexican volcanic ash soils. *Geoderma*.

Domínguez-Soto Julia., Gutiérrez Alma, Prieto G. Francisco, Sandoval A. Otilio, López S. Sael. 2011. Índices de alteración y meteorización de suelos de la región de Dengathza, municipio Tepatepec de Francisco I. Madero, Hidalgo. *Ingeniería Agrícola y biosistemas* Vol. 3 núm. 2 Julio- Diciembre 2011, p. 57-65. Disponible: 10.5154/r.inagbi.2011.11.003.

Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A. and Malpas, J. 2002. Re-assessment of chemical weathering index :case study of pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology* 63, 99–119.

file:///C:/Users/FRIDA/Documents/proyecto%20suelos/articulos/definicion%20de%20suelos%20inegi.pdf

Flórez María T., Parra Luis N. 2009 Rasgos de alteración en los minerales de las cenizas volcánicas del norte de la cordillera central de Colombia. Boletín ciencias de la tierra. Universidad de Colombia vol. 27. Noviembre 2009. Medellín. ISSN0120-3630. p. 49-70.

Gallardo, J. F. 1981. Índices de alteración geoquímicos-edafofogenéticos: su aplicación a suelos de la vertiente norte de la sierra de gredos.

Gallardo. J. F. 1982. Índices de alteración Geoquímicos-Edafogenéticos: su aplicación a suelos de la vertiente norte de la sierra de Gredos. Cuadernos do laboratorio Xeoloxico de laxe, vol. 3 p. 0341-0361.

García Paz, C.; Macías Vázquez, F., 1983. Evolución geoquímica de las rocas gabrómicas de Galicia durante su meteorización.

Gómez-Gras D.y Ferre C. (1999). Caracterización petrológica de perfiles de meteorización antiguos desarrollados en granitos tardihercínicos de la cordillera costera catalana. Rev. Soc. Geol. España. 12 (2), p. 281-299.

González J., Guerra F., Gómez H., Elizalde G. 2004.GEOENSEÑANZA. Vol.9 . Universidad de Los Andes. Departamento de Ciencias Sociales, ULA-Táchira. Universidad Central de Venezuela, UCV. Facultad de Agronomía. p.213-237. ISSN 1316-60-77.

González S.L. Hernán, 2003 METEORIZACIÓN Y SUELOS Universidad de Colombia Facultad de Ciencias Escuela de Geociencias , Medellín.

González Sandoval J. R. 2005. Carta Geohidrológica de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. Tesis M. C. Universidad de Sonora, División de ciencias exactas y naturales Departamento de Geología. 85 p.

Guerrero. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Mayo de 2012.

Guía para la interpretación de Cartografía. Edafología. Instituto Nacional y Estadística, Geografía e Informática, 2004. Impreso en México. ISBN 970-13-4376-X. www.inegi.org.mx. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EDAFI.pdf>

Hay L. Richard., Jones Blair.1972. Weathering of Basaltic Tephra on the Island of Hawaii. Society Geological of America Bulletin vol. 83. P. 317-332.

Hisham Y. D, Sahra M. Othman, Salim Al-Dabbagh (2011). The Relationship between chemical index of alteration and some major and trace elements content in rocks of Injana Formation of Northern Iraq. Iraqi National Journal of Earth Science, vol. 11, No. 1. P. 1-22.

Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo 2006. Programa de Desarrollo Urbano, p. 21.

James I. Drever (1971). Chemical Weathering in a Subtropical Igneous Terrain, Rio Ameca, Mexico. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 41 (1971)No. 4. (December), Pages 951-961.

López. A., García C., Macías F., 1985. Meteorización de las Granulitas de Cabo Ortegale. Cuaderno do laboratorio Xeolóxico de Laxe. VI reunión de Xeoloxía e minería do Noroeste peninsular. P 423- 445.

Lyons, W. B., A. E. Carey, D. M. Hicks, and C. A. Nezat 2005, Chemical weathering in high-sediment-yielding watersheds, New Zealand, J. Geophys.

Macías V. F., García Paz, Giménez de Azcárate, Villar C. El factor material de partida en los suelos de las Mariñas, Alteración de las rocas Meta básicas.

Mapa Digital de México V6, Instituto Nacional de Estadística y Geografía 2013. Disponible en: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>

N. S. Duzgoren-Aydin, A. Aydin. Chemical and mineralogical heterogeneities of weathered igneous profiles: implications for landslide investigations. Natural Hazards and Earth System Science, 2006, 6 (2), pp.315-322. NOM-021-SEMARNAT-2000.

P.D. Roy, M. Caballero, R. Lozano, W. Smykatz-Kloss (2008). Geochemistry of late quaternary sediments from Tecocomulco lake, central Mexico: Implication to chemical weathering and provenance. Chemie der Erde - Geochemistry Volume 68, Issue 4, 25 September 2008, Pages 383–393.

Ramírez Oyanguren Pedro, Alejano Monge, Leandro R., 2004. Mecánica de Rocas: fundamentos e Ingeniería de Taludes. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras subterráneas. Universidad Politécnica de Madrid. Archivo digital UPM. Núm. 727. ID de la impresión 14183.

Reyes M. Amelia, Quintero S. María L., Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo de estado de Sonora, Revista digital Universitaria, publicación mensual, agosto,2009,vol.10,núm. 8 ISSN:1607-6079 publicación mensual.

Robert L. Folk, 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Department of Geological Sciences. The University of Texas at Austin. ISBN Number 0-914696-14-9.

Rodríguez Castañeda J. L. 1981 Notas sobre la Geología del área de Hermosillo, Sonora .Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas vol.5 núm. 1 p. 30-36 ISSN 1026-8774.

Sener Ceryan 2012. Weathering Indices for Assessment of Weathering Effect and Classification of Weathered Rocks: A Case Study from NE Turkey, Earth Sciences, Dr. Imran Ahmad Dar (Ed.), ISBN: 978-953-307-861-8, disponible en: <http://www.intechopen.com/books/earth-sciences/weathering-indices-for-assessment-of-weathering-effect-and-classification-of-weathered-rocks-a-case->

SPALLETI A. Luis, 2007, Meteorización (Intemperismo), Cátedra de Sedimentología, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Disponible en : <http://cig.museo.unlp.edu.ar/docencia/sed/meteorizacion.pdf>.

Taboada R. María, García Paz C., 1997Caracterización de un perfil de alteración sobre el Granitoide de los Montes de Oleron (Galicia, Nw España). Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del suelo. Núm. 2. p. 1-9.

Taboada, T.M., Romero R., García C. 1992. Transformaciones micro morfológicas y mineralógicas en el proceso de meteorización de las granodioritas de Viveiro y Traba. Cuaderno Laboratorio de Laxe. Coruña vol. 17. P. 73-84.

Taboada, T.M., Romero R., García C. Macías F., 1987. Meteorización en una zona de contacto: granito- lamprofido. Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, vol. 11.p. 147-159.

Vázquez, R. Javier, 2012. Calculo de producción de sedimentos en la subcuenca del Río Ahuehuepan, Taxco, Volume 86, Issues 1–2, October 1998, Pages 99–122.

Zhang, Gan-Lin, Pan, Ji-Hua,Huang, Cheng-Min, Gong, Zi-Tong., 2007. Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 24, núm. 2, 2007. P.261-269.

Impresión de tesis apoyada con recursos PIFI/PROFOCIE-2014.