



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**ESTABILIDAD DEL PIROXENO EN DUNAS COSTERAS DE VERACRUZ  
BAJO CONDICIONES DE ALTA HUMEDAD CLIMÁTICA Y DE ALTA  
ENERGÍA EN LOS PROCESOS COSTEROS**

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**  
GEOLOGÍA MARINA

PRESENTA:  
**ING. MAURICIO MENDIETA LORA**

**TUTORES PRINCIPALES:**  
DR. JUAN JOSÉ KASPER ZUBILLAGA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
DR. RAYMUNDO G. MARTÍNEZ SERRANO  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**COMITÉ TUTOR:**  
DRA. ANA MARÍA LIZETH CABALLERO GARCÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DR. ARTURO GÓMEZ TUENA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS CAMPUS JURQUILLA  
DR. PRIYADARSI DEBAJYOTI ROY  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**MÉXICO, CD. MX., SEPTIEMBRE, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**ESTABILIDAD DEL PIROXENO EN DUNAS COSTERAS DE VERACRUZ  
BAJO CONDICIONES DE ALTA HUMEDAD CLIMÁTICA Y DE ALTA  
ENERGÍA EN LOS PROCESOS COSTEROS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**  
GEOLOGÍA MARINA

PRESENTA:  
**ING. MAURICIO MENDIETA LORA**

**TUTORES PRINCIPALES:**  
DR. JUAN JOSÉ KASPER ZUBILLAGA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
DR. RAYMUNDO G. MARTÍNEZ SERRANO  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**COMITÉ TUTOR:**  
DRA. ANA MARÍA LIZETH CABALLERO GARCÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DR. ARTURO GÓMEZ TUENA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS CAMPUS JURQUILLA  
DR. PRIYADARSI DEBAJYOTI ROY  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**MÉXICO, CD. MX., SEPTIEMBRE, 2023**

---

## **Agradecimientos**

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por otorgarme una formación académica de la más alta calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología -CONACYT- por el apoyo otorgado (CVU: 1046290).

A los miembros de mi comité tutor: Dr. Juan José Kasper Zubillaga, Dr. Raymundo Martínez Serrano, Dra. Ana María Lizeth Caballero García, Dr. Arturo Gómez Tuena y Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy, por su tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y sus valiosos comentarios.

A la M. en C. Laura Elena Gómez Lizárraga por el apoyo técnico especializado para el análisis de los minerales mediante el Microscopio Electrónico de Barrido, Laboratorio - ICML.

---

---

# Índice General

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
2. Antecedentes.....	3
3. Justificación.....	8
4. Hipótesis.....	8
5. Objetivo General.....	8
5.1. Objetivos Particulares.....	8
6. Materiales y Métodos.....	9
6.1. Área de Estudio.....	9
6.1.1. Sistema de Dunas Costeras.....	9
6.1.2. Procedencia de la Arena.....	11
6.1.3. Entorno Geológico.....	12
6.1.4. Clima y Escenario Geomorfológico.....	14
6.1.5. Régimen de Vientos.....	16
6.1.6. Corrientes Litorales y Mareas.....	18
6.2. Muestreo y Tratamiento de Muestras.....	20
6.2.1. Selección Monomineral.....	20
6.2.2. Análisis Geoquímico.....	21
6.2.3. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido.....	21
6.2.3.1. Análisis de Imágenes.....	22
7. Resultados.....	32
7.1. Geoquímica.....	32
7.2. Tamaño de Grano.....	33
7.3. Compacidad.....	34
7.4. Compacidad vs Tamaño de Grano.....	34
7.5. Compacidad vs Tamaño de Grano por Localidad.....	36
7.6. Prueba de Hipótesis de Correlación.....	41
7.7. Microtexturas.....	43
7.7.1. Microtexturas Mecánicas.....	44
7.7.2. Microtexturas Mecánico-Químicas.....	49
7.7.3. Microtexturas Químicas.....	50
8. Discusión.....	59
8.1. Compacidad vs Tamaño de Grano.....	59
8.2. Microtexturas.....	60
9. Surface textures of detrital pyroxenes in coastal dune sands (western Gulf of Mexico, Mexico): Implications for their preservation and geoenvironmental processes.....	65
10. Conclusiones.....	86
Referencias.....	88
Anexos.....	94

---

---

## Índice de Figuras

Fig. 1 Macrolocalización del área de estudio.....	9
Fig. 2 Mosaico de imágenes satelitales de las dunas costeras de cada localidad.....	10
Fig. 3 Diagramas ternarios para la clasificación de las arenas.....	11
Fig. 4 Mapa geológico y perfiles topográficos del área de estudio.....	15
Fig. 5 Mapa climático del área de estudio.....	16
Fig. 6 Rosas de vientos incidentes sobre el área de estudio.....	17
Fig. 7 Mapa de circulación de corrientes litorales y niveles de mareas en el área de estudio.....	18
Fig. 8 Esquema del método de muestreo.....	20
Fig. 9 Microscopio utilizado para la separación de los minerales.....	21
Fig. 10 Calibración espacial de la imagen MEB.....	23
Fig. 11 Mejora de la imagen MEB.....	24
Fig. 12 Extracción de objetos de la imagen MEB.....	25
Fig. 13 Obtención del valor proporcional de las microtexturas.....	30
Fig. 14 Diagrama ternario para la clasificación del piroxeno.....	32
Fig. 15 Diagrama de caja para el tamaño de grano.....	33
Fig. 16 Diagrama de caja para la compacidad.....	34
Fig. 17 Gráficos de Compacidad vs Tamaño de Grano para a) Conjunto de localidades, b) Barloventos, c) Crestas, d) Sotaventos.....	35
Fig. 18 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Istirincha.....	36
Fig. 19 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Lechuguilla.....	37
Fig. 20 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad El Morro.....	37
Fig. 21 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Palma Sola.....	38
Fig. 22 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Boca Andrea.....	38
Fig. 23 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Villa Rica.....	39
Fig. 24 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Farallón.....	40
Fig. 25 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad La Mancha.....	40
Fig. 26 Gráfico Compacidad vs Tamaño de Grano para la localidad Chachalacas.....	41
Fig. 27 Gráficos de la proporción promedio de cada microtextura.....	43
Fig. 28 Microtextura Collision Points.....	44
Fig. 29 Microtextura Abrasion Fatigue.....	45
Fig. 30 Microtextura Conchoidal Fractures, Arcuate Steps y Straigh Steps.....	46
Fig. 31 Microtextura Flat Cleavage Surface.....	47
Fig. 32 Microtextura Upturned Plates.....	48
Fig. 33 Microtexturas Bulbous Edges y Elongated Depressions.....	49
Fig. 34 Microtexturas Arcuate / Circular / Polygonal Cracks.....	50
Fig. 35 Microtextura Boxwork.....	51
Fig. 36 Microtexturas Oxidazed y Cornflake.....	52
Fig. 37 Microtextura Corrosion.....	53
Fig. 38 Microtextura Mamillated.....	54
Fig. 39 Microtextura Denticulated.....	55
Fig. 40 Microtextura Imbricated Wedge Marks.....	56
Fig. 41 Microtextura Lenticular Etch Pits.....	57
Fig. 42 Microtextura Solution Pits.....	58

---

---

## Resumen

Las fases del proceso que controla la evolución de los campos de dunas costeras, imprimen sobre la superficie de los clinopiroxenos sus microtexturas características, por lo que su estudio, significa una herramienta fundamental para reconocer su modelo de concentración y consecuente conservación. Este trabajo, recurrió a la microscopía electrónica de barrido (MEB) para realizar el análisis microtextural de los clinopiroxenos depositados en el sistema de dunas costeras localizadas en la costa central del Estado de Veracruz, México.

El análisis comprendió 333 clinopiroxenos, todos seleccionados de la fracción de tamaño más grande de cada muestra, esto para otorgar cierta homogeneidad en el estudio. La calidad de las imágenes MEB permitió identificar 19 microtexturas sobre las superficies de los granos, de las cuales, 8 fueron de origen mecánico, 2 de origen mecánico-químico y 9 de origen químico. Esta categorización microtextural se configuró con base en las sugeridas por investigaciones previas, además, incluyó una microtextura de origen mecánico (*Collision Points*) y otra de origen químico (*Corrosion*), ambas propuestas en este trabajo. En todas las localidades se observó el dominio, en mayor o menor porcentaje, de 3 microtexturas: dos de origen mecánico (*Flat Cleavage Surface* y *Bulbous Edges*) y una de origen mecánico-químico (*Elongated Depressions*), de ahí que estas microtexturas implicaran mayor enfoque en el análisis.

El tratamiento estadístico de los datos morfométricos y de los rasgos microtexturales, ambos obtenidos mediante el software JMicrovision, representó el fundamento para distinguir los diferentes medios y mecanismos de transporte de los clinopiroxenos. Esto resultó a partir de una valoración detallada, en la cual, el análisis estadístico se complementó al considerar, dentro de la discusión, la génesis de cada microtextura, el régimen de vientos, las corrientes litorales, las mareas, la morfología de las dunas y, el entorno geomorfológico y topográfico de cada localidad. La ponderación de estos factores permitió asumir que alguno y/o algunos de estos, representó en mayor o menor medida, el factor decisivo para la estabilidad de los clinopiroxenos en un ambiente de alta humedad climática y de alta energía en los procesos costeros.

Esta evaluación mostró una aparente interrelación entre las microtexturas dominantes con el tamaño de las dunas costeras donde se depositan los clinopiroxenos, además, algunas microtexturas sugieren ser una fase de desarrollo previo o posterior de otra microtextura, revelando, posiblemente, que dos o más microtexturas corresponden a una misma línea de desarrollo del intemperismo en los clinopiroxenos.

## Abstract

The phases of the process that controls the evolution of the coastal dune fields print their characteristic microtextures on the surface of the clinopyroxenes and their study is a fundamental tool to recognize their concentration model and consequent conservation. This work used scanning electron microscopy (SEM) to make the microtextural analysis of clinopyroxenes deposited in the coastal dune system located on the central coast of the State of Veracruz, Mexico.

The analysis included 333 clinopyroxenes selected from the largest size fraction of each sample to grant some homogeneity in the study. The quality of the SEM images allowed the identification of 19 microtextures on the grain surfaces: 8 were of mechanical origin, 2 of mechanical-chemical origin and 9 of chemical origin. This microtextural categorization was configured based on those suggested by previous research and it included a microtexture of mechanical origin (*Collision Points*) and another of chemical origin (*Corrosion*) proposed in this work. In all locations the dominance of 3 microtextures was observed: two of mechanical origin (*Flat Cleavage Surface* and *Bulbous Edges*) and one of mechanical-chemical origin (*Elongated Depressions*). These microtextures implied greater focus on analysis.

The statistical treatment of the morphometric data and the microtextural features obtained using the JMicrovision software represented the basis for distinguishing the different media and transport mechanisms of clinopyroxenes. This resulted from a detailed assessment in which the statistical analysis was complemented within the discussion the genesis of each microtexture, the wind regime, the coastal currents, the tides, the morphology of the dunes, the geomorphological and topographic environment of each locality. The weighting of these factors allowed us to assume that one and/or some of these represented the decisive factor for the stability of clinopyroxenes in an environment of high climatic humidity and high energy in coastal processes.

This evaluation showed an apparent interrelation between the dominant microtextures with the size of the coastal dunes where the clinopyroxenes are deposited also some microtextures suggest being a phase of development before or after another microtexture possibly revealing that two or more microtextures correspond along the same line of weathering development of clinopyroxenes.

---

# 1. Introducción

Los estudios sedimentológicos, desde hace varios años, han centrado su objetivo en vincular las microtexturas impresas en la superficie de los granos minerales con las diferentes etapas de su proceso sedimentario. Trabajos previos han conseguido desarrollar una metodología, en la cual, la microscopia electrónica de barrido (MEB) se ha convertido en la principal técnica de análisis (Vos et al., 2014; Mahaney, 2002; Krinsley & Takahashi, 1962). El diagnóstico del catálogo de imágenes MEB reportadas en las recientes investigaciones, ha permitido visualizar, interpretar y asignar criterios de génesis para las microtexturas superficiales observadas en los granos minerales, sobre todo, de aquellos considerados estables en ambientes deposicionales de alta energía y de alta humedad climática (Mejía-Ledezma et al., 2020; Armstrong-Altrin, 2020; Vos et al., 2014; Kasper-Zubillaga & Faustinos-Morales, 2007; Moral-Cardona et al., 2005). Este trabajo de investigación se enfocó en un ambiente de dunas costeras, y contrario a los estudios previos, se concentró sobre el clinopiroxeno, mineral considerado poco estable durante el proceso sedimentario debido a su poca resistencia al intemperismo. Las dunas costeras destacan por ser un ambiente sedimentario en permanente desarrollo, ubicadas en la transición entre el medio marino y el medio terrestre, situación que permite la continua interacción de las dunas con las playas adjuntas (Warren, 2013; Komar, 1976). En consecuencia, las condiciones hidrodinámicas en este ambiente de transición dependen de la conjunción de los factores propios de cada medio: del medio marino, las corrientes litorales y el incremento o descenso de la marea; del medio terrestre, el viento, la morfología de las playas donde deposita el sistema dunar, y el entorno topográfico. Esta combinación de factores determina la evolución y características microtexturales de los sedimentos ahí depositados (Walker, 2020; Delgado-Fernandez, 2010; Anthony, 2009).

El piroxeno es un mineral formado en magmas con temperaturas de entre 1000 °C y 1300 °C, siendo uno de los primeros minerales petrogenéticos en cristalizar. Su rápida meteorización durante el proceso sedimentario responde al desfase entre sus condiciones de formación con las condiciones existentes en su entorno de depósito, principalmente, las condiciones de intemperismo químico (Velbel & Backer, 2008; Velbel & Ranck, 2008; Velbel, 2007; Velbel et al., 2007; Kishina et al., 1995). Sin embargo, a pesar de esta inestabilidad, las dunas costeras de la costa central de Veracruz ofrecen un escenario adecuado para la conservación y consecuente concentración del piroxeno (Mendieta-Lora et al., 2018). En consecuencia, el estudio puntual de las características geoquímicas y microtexturales que guardan los granos concentrados en las dunas costeras, permitirá, a partir de la especificidad de estas, interpretar las condiciones deposicionales de alta energía que inhiben la intensidad del intemperismo químico en un ambiente de alta humedad climática.

El aporte de este estudio es el análisis de datos microtexturales vinculado con parámetros morfológicos de los granos minerales, en este caso, el tamaño de grano y la compacidad. Cabe mencionar que datos y parámetros fueron obtenidos mediante Jmicrovision, software libre diseñado para describir, medir, cuantificar y clasificar los componentes en imágenes de láminas delgadas (Roduit, 2019). El propósito de utilizar un software para medir la proporción ocupada por las microtexturas en la superficie de un grano, el tamaño de grano y su compacidad, fue el de abatir, en la medida de lo posible, la subjetividad inherente en el análisis visual, ya que trabajos previos estimaron visualmente la redondez de los granos y las proporciones superficiales de las microtexturas.

---

## 2. Antecedentes

[Mahaney \(2002\)](#) presentó un panorama general sobre el estudio microtextural de granos minerales por medio de la microscopía electrónica de barrido (MEB). Sus planteamientos se fundamentaron en investigaciones realizadas desde la década de 1970, y resaltó la relevancia que desde esos años ha tenido la MEB en los trabajos sedimentológicos, sobre todo, por el objetivo compartido al que orientaron su tarea. En general, los trabajos previos consistieron en el análisis y acopio de imágenes del MEB que mostraran con claridad las características microtexturales de los granos, para después, tratar de vincularlas con entornos geológicos específicos. Por esta razón, el autor coincidió en la necesidad de poseer una muestra representativa para identificar con fiabilidad las condiciones bajo las cuales los granos fueron remodelados. Además, lo imprescindible que resulta una evaluación estadística sobre la frecuencia microtextural para estimar sus entornos individuales de génesis.

En el capítulo referente al estudio microtextural de minerales pesados, [Mahaney \(2002\)](#) señaló las técnicas utilizadas para su selección desde una muestra a granel, y sugirió aprovechar las propiedades magnéticas y densidades para tal fin. Consideró que las fracciones de limo grueso y de arena fina, proporcionan el tamaño óptimo para un adecuado análisis con el MEB. En la conclusión de su diagnóstico, precisó que el estado de meteorización de los minerales pesados resulta importante para adquirir evidencia sobre su origen, mecanismo de transporte, y estado de alteración química durante el proceso de diagénesis. Adicionalmente, detalló que la meteorización de estos minerales puede causar un recubrimiento de arcilla y óxidos de varios tipos sobre su superficie, e incluso, generar un mineral pseudomórfico a partir de su especie mineral original.

En otro capítulo de su trabajo, [Mahaney \(2002\)](#) expuso la dinámica dominante en los ambientes eólicos y su consecuente efecto en la génesis microtextural del cuarzo detrítico. Él describió que, en el curso del transporte, los sedimentos están sujetos a sucesivas colisiones de alta energía, y precisó, que durante estas colisiones, se genera una microtextura denominada “Abrasion Fatigue”. Esta microtextura resulta de la trituración o desgaste del mineral, lo que produce una estructura reticular rota con pequeñas partículas ( $\varnothing < 3$  nm). Indicó que este remanente particulado incrementa la reactividad química sobre la superficie de los granos y estimula la pérdida acelerada de sílice. Sin embargo, especificó que durante el transporte eólico la estructura particular puede ser removida y encontrarse escasa. Asimismo, añadió que, durante esta etapa de transporte eólico, los granos además de colisionar giran. En consecuencia, esta variación en el mecanismo de transporte favorece la génesis de los bordes bulbosos y depresiones elongadas. Estas microtexturas son indicativas de fases de procesos eólicos dominantes.

El grado de redondeo en los granos también fue considerado como un rasgo característico e importante para la evaluación dinámica del depósito. Presumiblemente, cuanto más maduro es el depósito, más redondos son los granos. Sin embargo, [Mahaney \(2002\)](#) precisó que, en los granos de las fracciones más pequeñas, la redondez tiende a disminuir. Adjudicó esta inconsistencia a la posible translocación vertical de los granos más finos, posibilitando su enterramiento unos cuantos milímetros durante la dinámica de los sedimentos más superficiales y de mayor tamaño, situación que inhibiría su desgaste y por lo tanto su redondeo.

[Moral-Cardona et al. \(2005\)](#) emplearon la técnica de MEB para analizar las microtexturas de minerales pesados depositados en playas y dunas costeras del suroeste de España. La intencionalidad de esta

---

investigación fue complementar los estudios de procedencia con la información proporcionada por las microtexturas superficiales de los minerales pesados, al orientarse en mejorar la identificación y diferenciación de las áreas fuentes. Los minerales seleccionados, alrededor de 25 – 30 granos por muestra, incluyeron: andalucita, epidota, estaurolita, granate, turmalina, rutilo y circón, cuyos tamaños variaron entre 125 y 250  $\mu\text{m}$ . Las microtexturas fueron catalogadas con base en las propuestas por Mahaney (2002), e identificaron un total de 13 microtexturas, 9 de origen mecánico y 4 de origen químico. Los resultados revelaron el dominio de microtexturas mecánicas en los granos de granate, turmalina, rutilo y circón, mientras que los granos de andalucita, epidota y estaurolita exhibieron en su mayoría microtexturas químicas. Moral-Cardona et al. (2005) asociaron esta discrepancia a dos etapas diferentes. La primera etapa, generadora de las microtexturas mecánicas, fue atribuida a la acción subacuática de corrientes turbulentas y a la dinámica eólica de la costa. En consecuencia, las microtexturas reflejarían el transporte de los granos desde su fuente hasta su depósito en las dunas costeras. La segunda etapa, representada por las microtexturas químicas, la asociaron con la permanencia de los granos en la zona intermareal. Paralelamente, los investigadores reportaron que los siete minerales analizados exhibieron microtexturas superficiales descritas en granos de cuarzo. Además, diagnosticaron una relación entre la morfología de los granos y algunas microtexturas. En específico, los granos euhédricos presentaron pocas fracturas concoideas, mientras que, los granos subeuhédricos mostraron tendencia al redondeo de sus aristas, fracturas concoideas con signos de reelaboración y la presencia de algunas microtexturas de origen químico. En el caso de los granos angulosos, identificaron fracturas concoideas recientes y algunos pozos de solución. Finalmente, para los granos subredondeados reportaron la prominencia de bordes bulbosos, fracturas concoideas antiguas y mayor frecuencia de pozos de solución. Algunos de estos granos destacaron por lucir superficies con pulido generalizado. En cambio, los granos redondeados presentaron numerosas placas volteadas, pozos de solución y algunos huecos con fracturas concoideas. Las descripciones realizadas permitieron a los investigadores concluir que el estudio microtextural de minerales pesados detríticos posibilita distinguir etapas del proceso sedimentario. En este sentido, consideraron conveniente asociar la génesis y frecuencia de ocurrencia de las microtexturas, con la forma del grano, permitiendo así, dilucidar el régimen y los mecanismos de transporte.

Kasper-Zubillaga & Faustinos-Morales (2007) analizaron mediante el MEB las microtexturas de 9 granos de cuarzo depositados en las dunas costeras de Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco, Sonora. El tamaño de los granos utilizados tuvo un rango de entre 270 y 360  $\mu\text{m}$ . El estudio se limitó a los rasgos más conspicuos sobre la superficie de los granos y reportó 4 microtexturas de origen mecánico y 2 de origen químico, basándose en la categorización microtextural del trabajo de Moral-Cardona et al. (2005). Los resultados mostraron el dominio de las microtexturas de origen químico como disolución y precipitación de sílice. Los autores indicaron que las microtexturas son el reflejo de la exposición prolongada de los granos de cuarzo a condiciones de alteración química, probablemente, asociadas con la cercanía del agua de mar. Este resultado también fue asociado con la sobresaturación de sílice en la zona intermareal, debido al aumento de su concentración durante la caída de polvo procedente del desierto. En función de la dinámica costera, ellos afirmaron que los vientos incidentes desde el suroeste transportaron los granos de cuarzo desde las playas hacia el sistema dunar. Los investigadores argumentaron que, a pesar de representar una etapa posterior a los procesos de zona intermareal, el transporte eólico puede transferir elementos composicionales y microtexturales desde las playas a las dunas costeras. Esta herencia microtextural fue más evidente en Puerto Peñasco. Sin embargo, el

---

escenario energético en ambas localidades careció de potencial para imprimir mayor frecuencia de microtexturas mecánicas en los granos.

[Armstrong-Altrin & Nathaly-Pineda \(2013\)](#) estudiaron las microtexturas de cuarzo detrítico depositado en las playas de Tecolutla, Nautla y Veracruz, las tres localizadas en el estado de Veracruz. Su objetivo fue interpretar el ambiente deposicional y paleoclimático. Utilizaron el MEB para analizar 20 granos de cada playa, cuyos tamaños oscilaron entre 200 y 400  $\mu\text{m}$ . En sus resultados mostraron un total de 24 microtexturas identificadas: 13 mecánicas, 5 mecánico-químicas y 6 químicas. Además, notaron una distribución microtextural variada entre las tres playas, motivo por el cual, confirieron a los granos de cuarzo un proceso multicíclico con diferentes historias de transporte y procedencia.

Una característica frecuente que observaron fue el impacto grano a grano en los cuarzos y adjudicaron esa acción, tanto al transporte fluvial como al transporte eólico. El dominio de microtexturas mecánicas se presentó en los granos de Nautla, mientras que los granos de Tecolutla y Veracruz estuvieron dominados por microtexturas de origen mecánico y químico. Indicaron que la asociación de microtexturas de origen mecánico-químico corresponde al ambiente litoral, siendo la disolución, los glóbulos de sílice y las partículas adheridas, las principales microtexturas químicas identificadas. En particular, sugirieron el incremento de la disolución por el agua de mar contaminada, resultado del predominio de la actividad petroquímica local. Paralelamente, los glóbulos de sílice fueron relacionados con la precipitación química inherente al clima húmedo y a una zona intermareal saturada en sílice. También describieron partículas adheridas de NaCl. Precisarón que esta composición resultó de la disponibilidad de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua combinada con una alta tasa de evaporación, y con la prestación de espacio en la superficie de los granos para cristalizar.

Las diferencias microtexturales entre los cuarzos de las tres playas, permitió a los investigadores concluir que los estudios con el MEB resultaron útiles para distinguir las etapas de su procedencia, especialmente, cuando su distribución es evaluada con base en la génesis microtextural fomentada en cada subambiente.

[Vos et al. \(2014\)](#) discernieron las microtexturas de 1300 granos de cuarzo detrítico con el objetivo de construir un esquema de interpretación que permitiera diferenciar ambientes fluviales, marinos, eólicos, glaciales y diagenéticos de alteración. En este sentido, presentaron un caso de estudio en el cual, empleando su esquema de interpretación, constataron el entorno litoral conocido de dos muestras (duna costera de Pyla, Francia), pudiendo incluso, reconocer la interacción sucesiva de los granos entre el ambiente intermareal y eólico.

El caso de estudio consistió en examinar por medio del MEB entre 10 y 25 granos de cuarzo, dependiendo de la homogeneidad de la muestra tomada de las dunas. Los autores recomendaron seleccionar granos con diámetros similares, ya que, de acuerdo con su hipótesis, las microtexturas podrían haber estado relacionadas con el tamaño de grano. Además, consideraron que los granos de cuarzo con tamaños de 100  $\mu\text{m}$  a 2 mm representaron los mejores candidatos para la evaluación microtextural propuesta por [Mahaney \(2002\)](#). Sus resultados mostraron la identificación de 33 microtexturas en ambas muestras: 17 de origen mecánico, 7 de origen químico y 7 de origen mecánico-químico. La proporción de las microtexturas sobre la superficie de los granos fue dividida en 4 clases: rara (<5%), escasa (5-50%), común (50-75%) y abundante (>75%). El artículo no detalló la obtención de estos porcentajes, no obstante, al parecer fueron estimados de manera visual. Al menos 9 microtexturas de origen mecánico y 2 de origen mecánico-químico destacaron por ser comunes y

---

abundantes. En cambio, 7 microtexturas de origen químico fueron raras y escasas. En general, los granos de ambas muestras exhibieron abundancia de cuarzos redondeados con bordes bulbosos, depresiones alargadas y placas vueltas hacia arriba. También presentaron crestas serpenteantes, escalones arqueados, marcas de percusión en forma de medialuna y grietas de percusión en forma de V. Los granos de cuarzo de la cresta de la duna se caracterizaron por exponer fracturas concoideas asociadas con escalones arqueados, fracturas antiguas sobreimpresas por grietas de percusión en forma de V y un bajo relieve escasamente alisado. Los autores mencionaron que, pese al tratamiento de la muestra con ácido clorhídrico y pirofosfato tetrasódico, se encontraron partículas adheridas en los planos de fractura más recientes. Por su parte, los granos de cuarzo representativos del barlovento presentaron grietas de percusión en forma de V sobreimprimiendo a otras microtexturas, fracturas concoideas asociadas con escalones rectos y arqueados, un relieve de medio a bajo, y planos de fractura antiguos sobreimpresos por hoyos triangulares con glóbulos y flores de sílice.

Con base en las particularidades de cada muestra, los investigadores concluyeron que el patrón microtextural observado fue congruente con su entorno litoral. Afirmaron que la muestra de la cresta presentó las características típicas de los procesos de saltación, mientras que las microtexturas mecánicas y químicas de la muestra del barlovento confirmaron el entorno ligado a la playa. Esta afirmación fue respaldada al argumentar que los cuarzos del barlovento exhibieron microtexturas eólicas típicas, las cuales estuvieron sobreimpresas por gran cantidad de grietas de percusión en forma de V. En contraste, los cuarzos de la cresta presentaron grietas de percusión en forma de V solo en las depresiones y en los planos de fractura más antiguos, lugares donde estuvieron protegidas de la abrasión eólica. Estos rasgos distintivos, de acuerdo con los autores, demostraron que las microtexturas en granos de cuarzo son una herramienta útil para la interpretación de un ambiente sedimentario.

[Mejía-Ledezma et al. \(2020\)](#) examinaron las microtexturas de granos de cuarzo e ilmenita depositados en las dunas costeras de la costa central de Veracruz. En su trabajo utilizaron el MEB para obtener imágenes donde distinguieron los rasgos superficiales de ambos minerales. Observaron entre 25 y 72 granos de cuarzo, y entre 24 y 42 granos de ilmenita. Además, mencionaron que los mejores granos seleccionados para el estudio tenían tamaños de entre 150 y 400  $\mu\text{m}$ , que de acuerdo con los autores, representaron los tamaños ideales para la caracterización microtextural.

La categorización microtextural se basó en la propuesta por [Vos et al. \(2014\)](#). Sin embargo, en menor medida, también refirieron microtexturas superficiales reportadas en trabajos sedimentarios de otras partes del mundo. Las microtexturas reportadas fueron desglosadas en mecánicas, químicas y mecánico-químicas. Es importante destacar que su frecuencia de ocurrencia fue estimada visualmente.

Los resultados mostraron que ambos minerales heredaron microtexturas distintivas del transporte/ambiente fluvial, eólico y marino. Esto llevó a los investigadores a concluir que el cuarzo pudo haber sufrido transporte fluvial, concentración en depósitos aluviales y un posterior transporte a lo largo de la costa. Sugirieron que después de un tiempo de residencia relativamente corto en la costa y en condiciones marinas subacuáticas, este mineral pudo experimentar un transporte constante inducido por el viento, mecanismo que le permitió ser trasladado rápidamente hacia los sistemas dunares. Esta interpretación fue respaldada por las microtexturas mecánicas comunes presentes en todas las localidades, como fluviales, eólicas y marinas. En relación con las microtexturas de origen químico, argumentaron que fueron generadas durante la residencia subacuática y la meteorización intermedia y/o la diagénesis de los granos de cuarzo.

---

En el caso de los granos de ilmenita, ellos refirieron una procedencia de la Faja Volcánica Transmexicana, además, que su depósito en la costa respondió a la rotura de fragmentos líticos volcánicos durante su transporte fluvial. Los autores reportaron un control fluvial importante sobre la ilmenita, desde el interior del continente hasta la costa. Incluso afirmaron que pudo haber sufrido poco reciclaje marino antes de experimentar la fase eólica de transporte. Esto lo respaldó la evidencia microtextural de origen mecánico que presentó mayor frecuencia de características fluviales, eólicas y marinas diseminadas. Por su parte, las microtexturas químicas en la ilmenita, estuvieron representadas por pozos de solución y sobrecrecimientos cristalinos, reflejo de la exposición subacuática y una meteorización intermedia.

En conclusión, la similitud de frecuencia microtextural de ambos minerales indicó una dinámica similar en su depósito, sin embargo, las leves diferencias pudieron deberse a las respectivas propiedades físicas de cada mineral.

[Armstrong-Altrin \(2020\)](#) recurrió al MEB para analizar microtexturas superficiales de circones detríticos e inferir su historia deposicional. Las playas estudiadas fueron Riachuelos y Palma Sola, ambas ubicadas en la costa central de Veracruz. En su diagnóstico microtextural utilizó 150 granos de circón y su clasificación microtextural se basó en las propuestas por [Vos et al. \(2014\)](#) y [Mahaney \(2002\)](#). Sin embargo, contrario a estos autores, excluyó la categoría mecánica-química. Los resultados indicaron la presencia de 18 microtexturas, 11 de origen mecánico y 7 de origen químico. El autor atribuyó la génesis de las microtexturas mecánicas a los impactos grano a grano durante el transporte litoral en condiciones de alta energía. En el caso de las microtexturas químicas, él consideró una génesis por percolación de agua de mar y precipitación de sílice durante un tiempo considerable. En general, las características mecánicas y químicas identificadas en los circones de ambas playas sugirieron una combinación de los procesos de transporte, tanto de corrientes litorales como de flujos eólicos, ambos acentuándose en el ambiente costero subacuático. En este trabajo, el investigador hizo hincapié en que, la semejanza tanto microtextural como de los grupos de edad del circón en las dos playas, demostraron parecido entre sus rocas fuente y su distancia de transporte desde el área de origen hasta su depósito en la costa.

---

### **3. Justificación**

En primer lugar, no existen estudios suficientes que traten sobre el estado de conservación o preservación de minerales ferromagnesianos, como el piroxeno, en ambientes costeros, por lo que resulta muy importante el encontrar las variables que controlan tal conservación. En segundo lugar, la preservación del piroxeno en dunas costeras confinadas en ambientes de alta energía y de alta humedad permite diferenciar los procesos físicos y/o químicos puntuales que controlan su concentración. Esto posibilita establecer la dinámica de las dunas costeras de la costa central de Veracruz a lo largo de su historia deposicional reciente.

### **4. Hipótesis**

El escenario que favorece la preservación del piroxeno en las dunas de la costa central de Veracruz está determinado preferentemente por procesos físicos de alta energía, a pesar de que el área presenta alta humedad y con ello, intemperismo químico. Por lo tanto, el ambiente de alta energía favorece la movilidad de los granos y son menos vulnerables al efecto del intemperismo químico (weathering-limited erosion regime).

### **5. Objetivo General**

- Determinar los mecanismos físicos que controlan la preservación del piroxeno dentro de un entorno físico-químico de alta energía y de alta humedad climática.

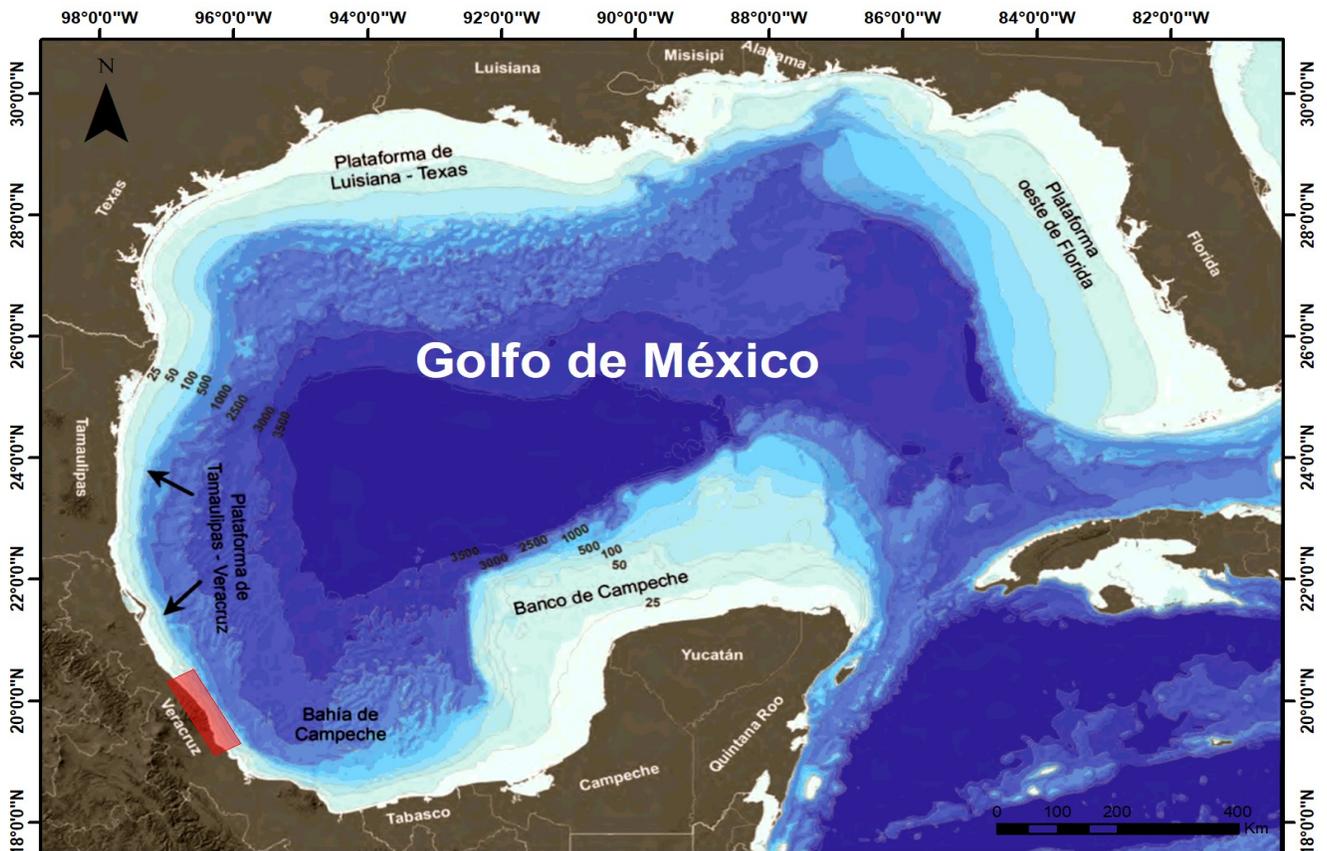
#### **5.1. Objetivos Particulares**

- Definir las características microtexturales de los granos de piroxeno para determinar los procesos físicos de transporte.
- Determinar la especiación geoquímica del piroxeno para discutir su relación con el intemperismo químico, y con base en sus microtexturas.

## 6. Materiales y Métodos

### 6.1. Área de Estudio

El área de estudio se ubica en el litoral occidental del Golfo de México y se localiza entre las coordenadas geográficas: 20° 12' N; 19° 24' N y 96° 45' W; 96°19' W. Este trabajo incluye al sistema de dunas depositado en la costa central del Estado de Veracruz (Fig. 1).



**Fig. 1** Macrolocalización del área de estudio donde el rectángulo rojo indica la ubicación del sistema de dunas costeras estudiadas. Modificado de [Romero-Centeno & Zavala-Hidalgo \(2020\)](#).

#### 6.1.1. Sistema de Dunas Costeras

El trabajo contempló las dunas costeras de 9 localidades: Istirincha (**IST**), Lechuguilla (**LCH**), El Morro (**EMR**), Palma Sola (**PSL**), Boca Andrea (**BCA**), Villa Rica (**VRC**), Farallón (**FRN**), La Mancha (**LMN**) y Chachalacas (**CHC**) (Fig. 2). Este sistema de dunas responde al proceso sedimentario propio del sistema litoral, dominado composicionalmente por el escenario geológico adjunto, la red hidrográfica bien desarrollada, las corrientes litorales, las mareas, y el régimen de los vientos incidentes en la zona.



**Fig. 2** Mosaico de imágenes satelitales donde se muestran las características morfológicas de las dunas costeras de cada localidad.

Las dunas de **IST**, **LCH**, **EMR**, **PSL**, **BCA** y **LMN** se clasifican como dunas frontales. Estos son montículos de arena relativamente pequeños, generalmente cercanos al mar y de orientación paralela a la costa. Pueden medir escasos metros de longitud o alcanzar varios kilómetros a lo largo del litoral costero. Las dunas de **IST**, **LCH** y **EMR** se desarrollan en una extensa planicie costera, caso contrario de las dunas de **PSL**, **BCA** y **LMN**, que se encuentran restringidas entre pequeñas estructuras de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que llegan hasta la playa. En la localidad de **VRC** se presentan dunas parabólicas depositadas en un tómbolo. Estas dunas se caracterizan por tener dos brazos y una

cima. La cima es la parte más alta donde se unen los brazos y está orientada hacia la dirección donde viajan los vientos dominantes.

Las dunas en las localidades **FRN** y **CHC** exhiben características transgresivas. Estas son dunas que avanzan tierra adentro a lo largo de la costa y sobre todo tipo de terrenos, desde aquellos totalmente cubiertos por vegetación, hasta aquellos con pendientes muy pronunciadas. El límite tierra adentro de los campos de dunas transgresivas se conoce como borde de precipitación, ya que es ahí donde la arena se deposita y cubre el terreno de avance. Los campos de dunas transgresivas se originan en respuesta a un conjunto de factores como son regiones con abundante aporte de sedimento y con un régimen de vientos fuertes, y en costas con fuertes procesos erosivos tanto naturales como antropogénicos. En cualquiera de estas circunstancias se destaca una importante cantidad de sedimentos, además de vientos frecuentes e intensos para su formación (Kasper- Zubillaga, et al., 2008; Kasper-Zubillaga, 2009; Jiménez-Orocio, 2014).

### 6.1.2. Procedencia de la Arena

Las características petrográficas de la arena de las dunas indican una composición controlada por fuentes basálticas. Mediante un conteo modal, la arena ha sido clasificada como cuarzo-lítica ( $C_{63\%}$  -  $L_{36\%}$  -  $F_{1\%}$ ) con abundancia de piroxeno y minerales opacos alta ( $py_{54\%}$  -  $op_{44\%}$  -  $ol_{2\%}$ ) (Mendieta-Lora et al., 2018) (Fig. 3). La composición responde al suministro de las rocas emplazadas cerca de la zona costera del Golfo de México (Palma Sola) constituidas por basaltos, andesitas, andesita-dacitas y tobas de basalto-riolita del Mioceno y Plioceno (19 a <3 Ma) (Ferrari et al., 2012; SGM, 2019). Las unidades basálticas presentan características composicionales que permiten considerarlas como las fuentes del piroxeno depositado en las dunas costeras (Negendank et al., 1985; Gómez-Tuena, 2002; Siebert & Carrasco-Núñez, 2002; Gómez-Tuena et al., 2005; Ferrari et al., 2005, 2012; Mendieta-Lora et al., 2018).

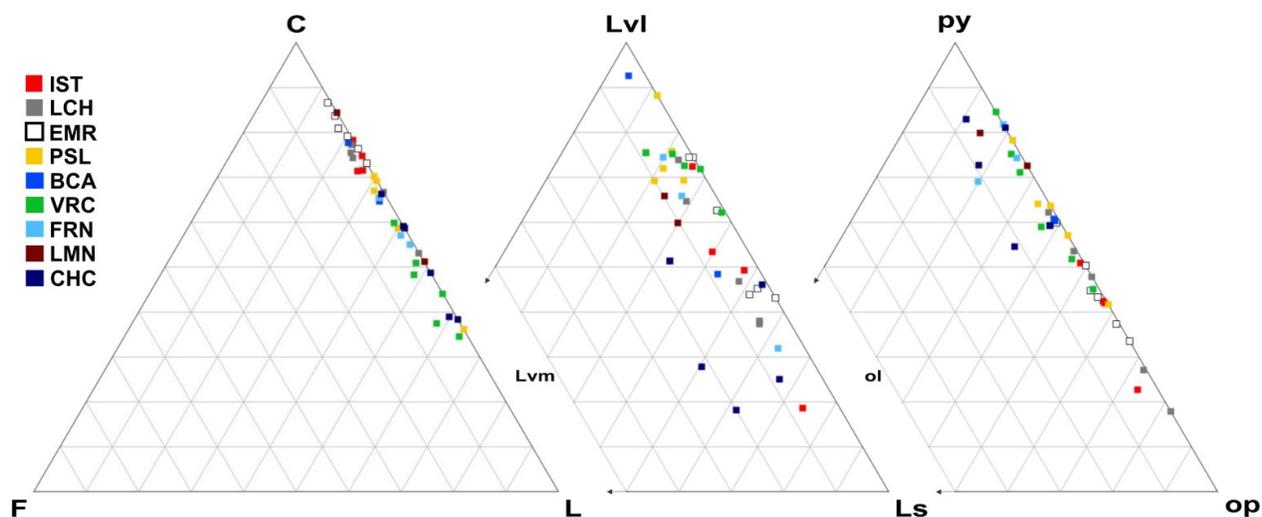
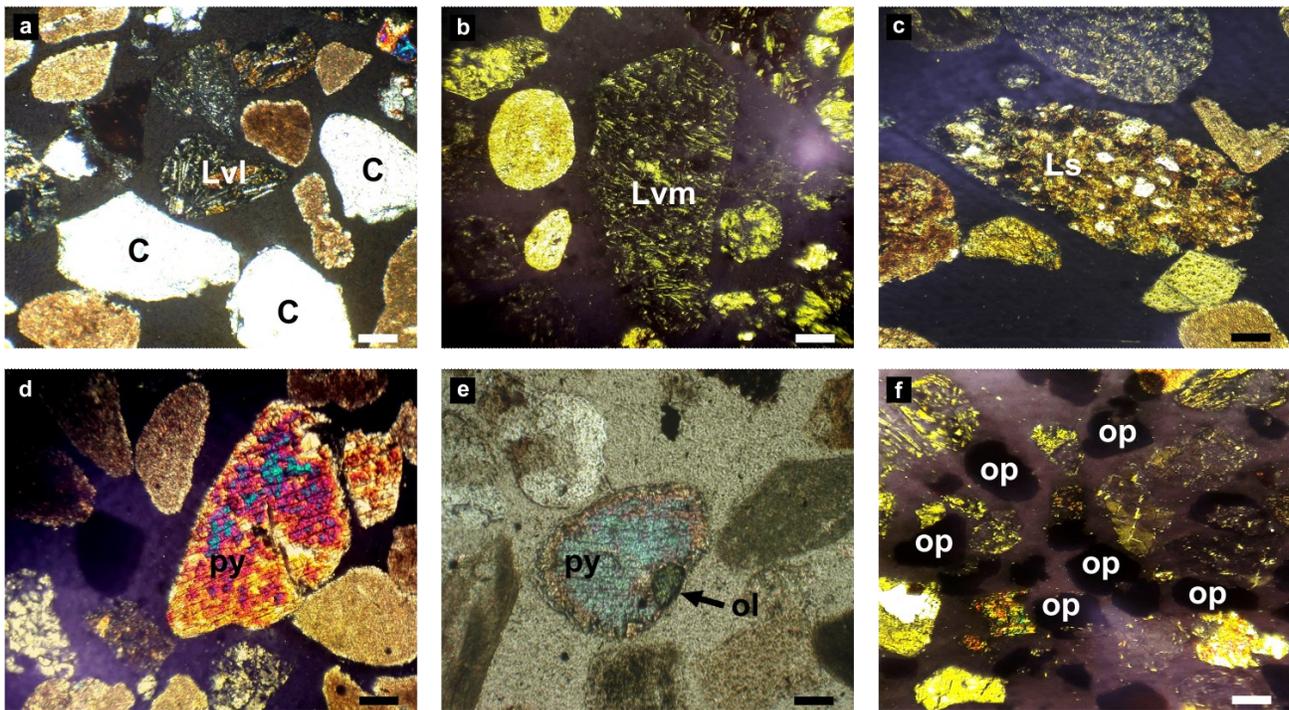


Fig. 3

continúa...



**Fig. 3** Diagramas ternarios correspondientes a las categorías de clasificación de las arenas: C-F-L) Cuarzo – Feldespato – Líticos; Lvl-Lvm-Ls) Líticos volcánicos con textura lathwork – Líticos volcánicos con textura microlítica – Líticos sedimentarios; py-ol-op) piroxeno – olivino – opacos. Las fotomicrografías tomadas durante el análisis petrográfico muestran fragmentos líticos y minerales representativos de cada categoría: a) cuarzo y lítico volcánico con textura lathwork; b) Líticos volcánico con textura microlítica; c) Lítico sedimentario; d) piroxeno; e) piroxeno y olivino; d) minerales opacos. Modificado de [Mendieta-Lora \(2019\)](#).

### 6.1.3. Entorno Geológico

El contexto geológico del área de estudio se encuentra ligado al extremo más oriental (Palma Sola) de la FVTM, definida como un arco magmático continental compuesto por estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos ([Demant, 1978](#); [López-Infanzón, 1991](#); [Gómez-Tuena et al., 2005](#)). La subducción de la Placa de Cocos respecto a la Placa Norteamericana, durante el Mioceno (23 Ma), produjo intensa actividad volcánica desde las costas del Océano Pacífico hasta los márgenes occidentales del Golfo de México. Esta actividad tectónica ocasionó el emplazamiento de la FVTM, y al mismo tiempo, modificó el relieve occidental de la Cuenca del Golfo de México y la distribución de sedimentos. Los datos geocronológicos parecen aclarar que la individualización de la FVTM, como entidad geológica distintiva, ocurrió durante el Mioceno Medio y Tardío, además, indican que las rocas ígneas más antiguas en la región de Palma Sola tienen ~16 - 11 Ma ([Ferrari et al., 1999](#); [Gómez-Tuena, 2002](#)). A partir del Holoceno (0.01 Ma), después de la última era glacial, el mar transgredió la cuenca del Golfo de México hasta su nivel actual, permitiendo el depósito de sedimentos clásticos a lo largo de los márgenes continentales. Este proceso favoreció el desarrollo de las actuales playas y dunas costeras ([Padilla y Sánchez, 1986](#); [Salvador, 1991](#); [Padilla y Sánchez, 2007](#); [Snedden & Galloway, 2019](#)).

---

## Mioceno Medio – Tardío

El magmatismo más antiguo en la región de Palma Sola se remonta al Mioceno Medio. Este episodio es evidenciado por cuerpos plutónicos y subvolcánicos de composición gabrítica a diorítica, con edades que varían entre ~16 y 11 Ma (Gómez-Tuena et al., 2003; Gómez-Tuena et al., 2005). En la misma área, derrames basálticos en ocasiones coronan pequeñas sierras andesíticas. Estos basaltos son rocas oscuras, grises o rojizas que intemperizan en tonos claros o negros. Presentan estructuras masivas escasamente pseudoestratificadas y se caracterizan por tener cierta abundancia de olivino como el fenocristal más visible. Nixon et al. (1987) le atribuyen una edad < 10 Ma, mientras que Ferrari et al. (2005) le otorgan una edad de 7 - 4.3 Ma (TmB, Fig. 4).

En el Mioceno Tardío, un vulcanismo máfico se emplazó al norte del arco precedente. Los trabajos consultados no reportan litología correspondiente en el área de Palma Sola, sus afloramientos más cercanos se ubican en la Sierra Álamo – Tantima, 225 km al noroeste del área de estudio (Vergara-Martínez et al., 2000; Gómez-Tuena et al., 2005; Ferrari et al., 2012).

## Final de Mioceno Tardío – Plioceno Temprano

Al final del Mioceno Tardío y durante el Plioceno Temprano, el vulcanismo se vuelve más diferenciado. En la porción oriental de la FVTM han sido reportadas secuencias piroclásticas intercaladas y cubiertas por lavas basálticas que constituyen un arreglo petrológico bimodal (Cantagrel & Robin, 1979). En el área de Palma Sola, vestigios de esta actividad son las unidades piroclásticas distribuidas en las pendientes más altas y porciones más bajas de la Sierra de Chiconquiaco (TmBvB, Fig. 4). Estas han sido descritas como brechas félsicas y basálticas densamente soldadas, que empaquetan y consolidan gran diversidad de fragmentos andesíticos y basálticos. Los fragmentos se presentan subangulosos y subredondeados de color gris oscuro a negro e intemperizan con mayor facilidad que la roca matriz (Vergara-Martínez et al., 2000).

Durante el final del Plioceno y principios del Pleistoceno retorna el vulcanismo máfico, se emplazó una extensa planicie de al menos 500 metros de espesor, conformada por derrames lávicos individuales de entre 1 y 10 m de espesor (TpQptB – Basalto Xalapa, Fig. 4). La secuencia se compone de derrames basálticos ricos en olivino, ocasionalmente intercalados con tobas y brechas basálticas. Presentan un color gris oscuro, estructura compacta y textura afanítica vesicular. Al menos uno de los derrames basálticos presenta xenocristales de clinopiroxeno y abundantes xenolitos ultramáficos, estos últimos de coloración verde olivo a negro con diámetros variables entre 2 y 20 cm. La roca encajonante muestra una textura porfídica con fenocristales de olivino y piroxeno, englobados por una matriz microcristalina de plagioclasa y piroxeno. Su edad varía entre ~1.7 y < 3 Ma (Vergara-Martínez et al., 2000; Gómez-Tuena, 2002; Gómez-Tuena et al., 2005). De la misma edad se reportan numerosos horizontes de ceniza volcánica color negro, con pequeños fragmentos de basalto pseudoestratificados horizontalmente (QptTB – Toba Basáltica Chiconquiaco, Fig. 4) (Robin, 1976; Vergara-Martínez et al., 2000).

## Cuaternario

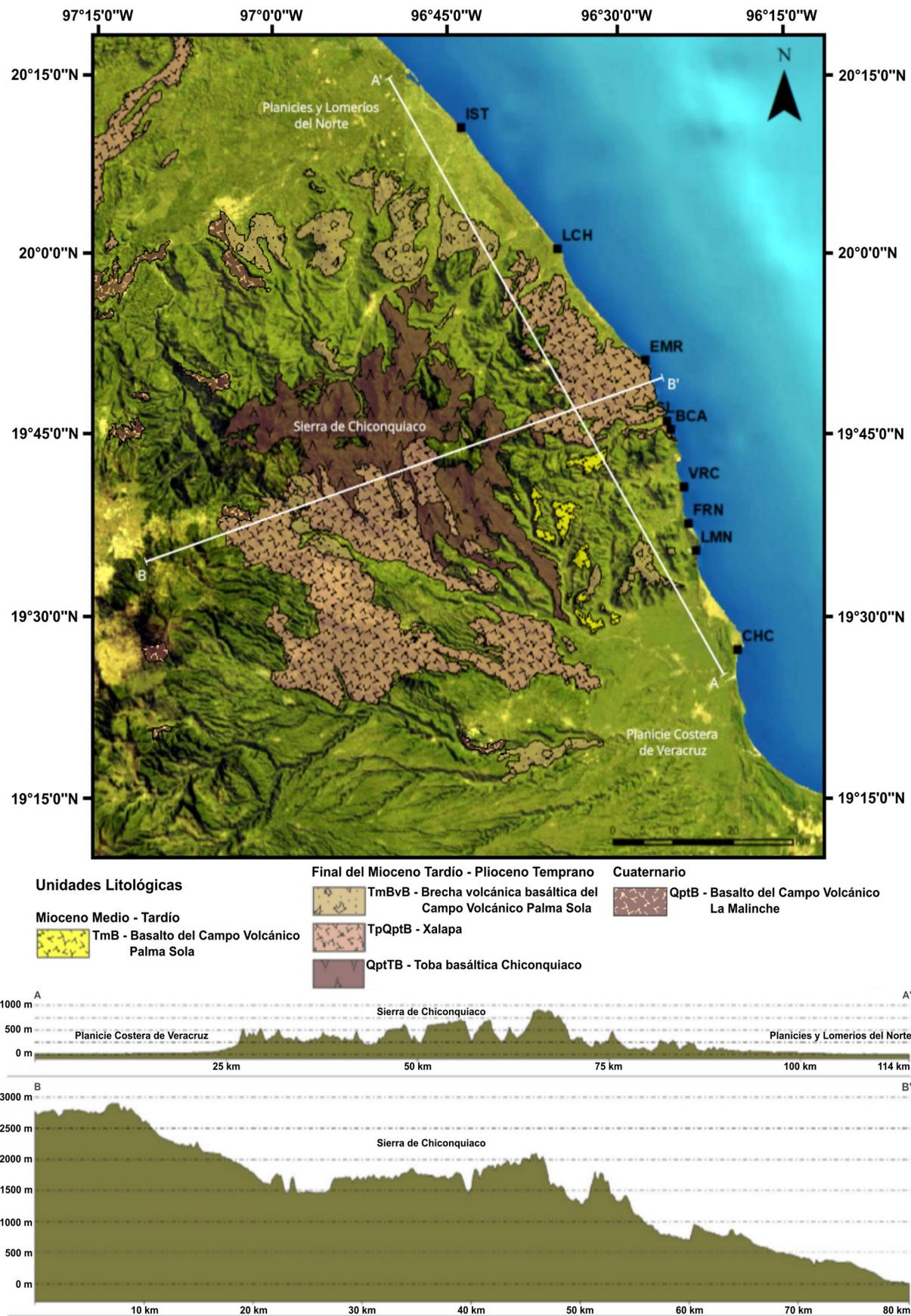
En el Cuaternario se presentó la última etapa de vulcanismo máfico en el área de Palma Sola. Este episodio emplazó conos monogenéticos de composición basáltica, edificios basálticos tipo escudo con conos cineríticos asociados, y rocas vulcanoclásticas vinculadas a la actividad de los grandes

---

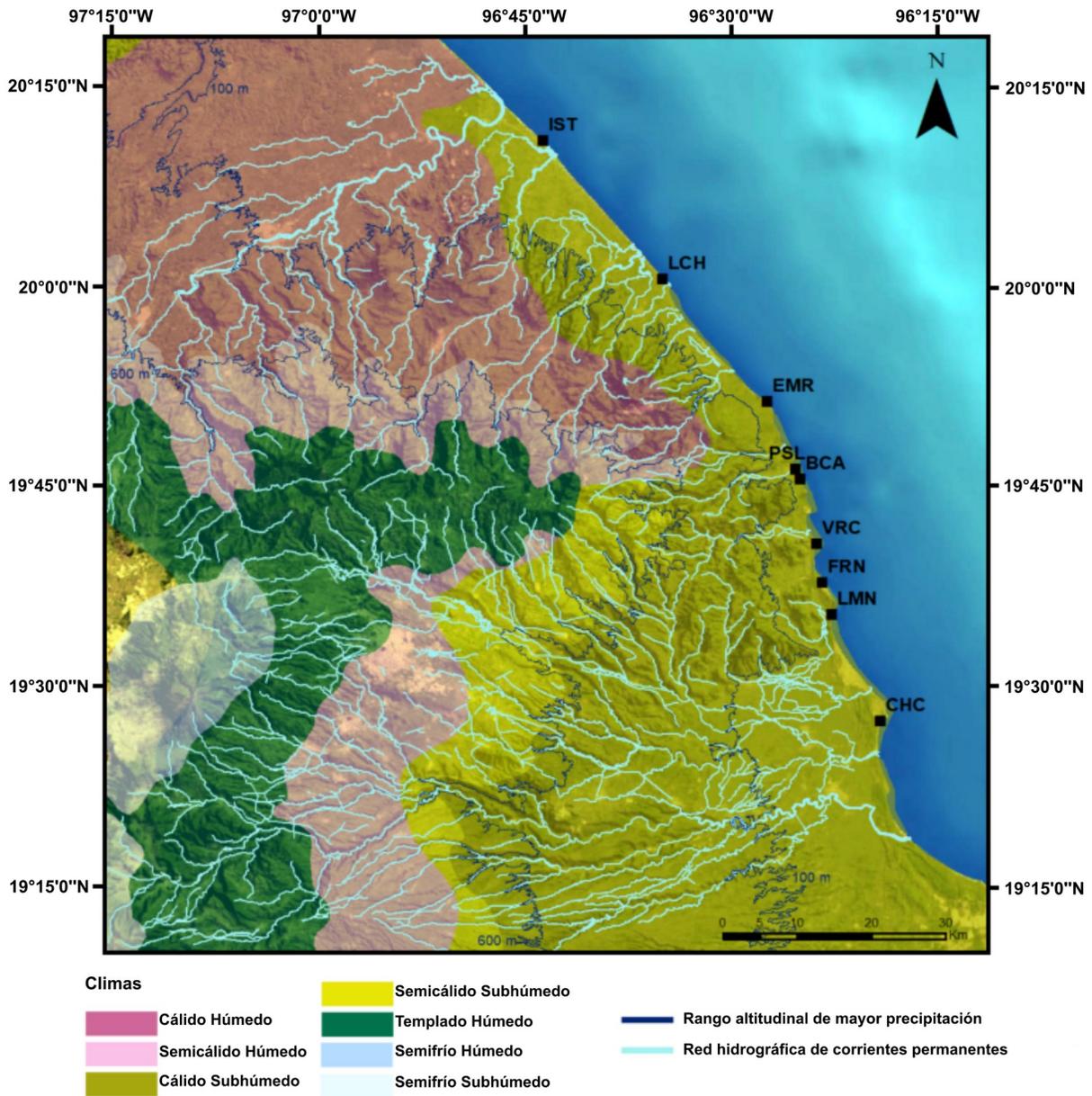
estratovolcanes ubicados al occidente del área de estudio (Sierra Cofre de Perote - Pico de Orizaba) (QptB, Fig. 4). Los basaltos asociados con los conos cineríticos son vesiculares y generalmente presentan texturas vitrofíricas o porfídicas, con fenocristales de olivino, plagioclasa y escaso piroxeno (Gómez-Tuena, 2002). Edades reportadas para esta unidad abarcan entre los 0.8 y 0.02 Ma ubicándola en el Pleistoceno (Negendank et al., 1985; Vergara-Martínez et al., 2000).

#### 6.1.4. Clima y Escenario Geomorfológico

En el área de estudio dominan los climas húmedos - subhúmedos, resultado de la proximidad del Golfo de México. Además, en las llanuras costeras el clima es cálido ( $> 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), en los declives de las sierras semicálido ( $18 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y en sus partes más elevadas cambia a templado ( $12 - 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y semifrío ( $5 - 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Las precipitaciones inherentes a la variedad de climas tienen un rango de 1000 a 2000 mm/año. El máximo de precipitación en la zona no se presenta en el litoral, ni en la parte más alta del sistema montañoso, sino en un rango altitudinal de entre 100 y 600 metros. Sin embargo, cabe señalar que en la llanura costera precipitan lluvias durante todo el año y muestran concentración marcada en los meses veraniegos. Estas precipitaciones exceden la evaporación, circunstancia suficiente para mantener el terreno húmedo. (García, 1998 a, b; Vidal-Zepeda, 2005 ) (Fig. 5). Las precipitaciones son el principal aporte de agua para los escurrimientos, corrientes y redes hidrográficas que erosionan constantemente el terreno. En el área de Palma Sola este proceso ha generado un sistema montañoso de fuertes pendientes y muy accidentado hacia la costa, imprimiendo una alta energía en el relieve (Hernández-Santana et al., 2017). La estructura volcánica componente de Palma Sola es estrecha  $\approx 80\text{ km}$ , ligeramente alineada al WSW – ENE y se encuentra flanqueada perpendicularmente por dos llanuras costeras angostas, que se expanden cuanto más se alejan de la estructura (Fig. 4). La costa es arenosa y presenta tres sectores con atributos geomorfológicos particulares. 1) La costa de la Planicie y Lomerios del Norte es baja con línea costera en equilibrio. 2) La costa adjunta a las estructuras de la FVTM (Sierra de Chiconquiaco) transgrede la línea costera hacia el mar debido a un alto desarrollo erosivo. 3) La costa de la Planicie Costera de Veracruz es baja de línea costera transgresiva por sedimentación de corrientes litorales (Ortiz-Pérez & Figueroa-Mah Eng, 2007).



**Fig. 4** El mapa superior muestra la distribución de las unidades litológicas que por sus características pueden representar, en menor o mayor medida, las fuentes de suministro del piroxeno (TmB, TmBvB, TpQptB, QptTB, QptB). Los perfiles inferiores muestran la topografía y los rasgos geomorfológicos distintivos del área de estudio. Mapa configurado con datos de SGM (2019).

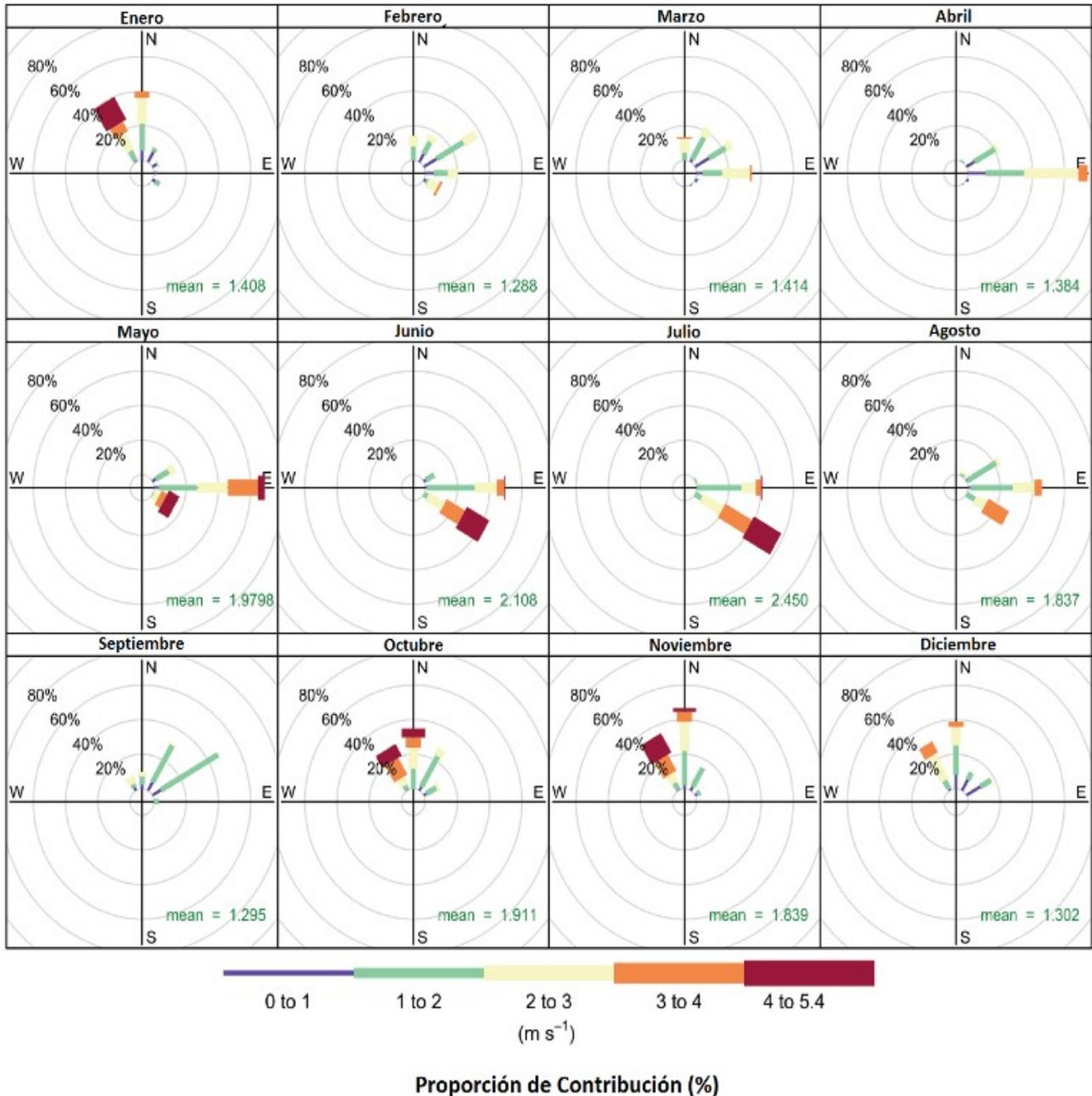


**Fig. 5** Mapa que muestra la distribución y variedad de climas imperantes en el área de estudio. Se puede observar como el límite superior de mayor precipitación delimita al clima cálido húmedo con el clima semicálido húmedo y también, al clima cálido subhúmedo con el clima semicálido subhúmedo. Asimismo, se muestra la red hidrográfica bien desarrollada sobre el área de estudio. Mapa configurado con datos de [García \(1998 a, b\)](#).

### 6.1.5. Régimen de Vientos

El área de estudio es dominada por vientos procedentes del Golfo de México que presentan una estacionalidad marcada y muestran una característica rotacional en su dinámica. Durante octubre-febrero los vientos se asocian con los frentes fríos. Las masas de aire frío y seco procedentes de las Montañas Rocosas (EE. UU.) interactúan con las masas de aire tropical del Golfo de México, donde la propia dirección del sistema origina su dirección característica NW-SE y N-S. Las velocidades de los

vientos durante los frentes fríos pueden presentar rachas de uno a dos días superiores a los 5 m/s, mientras que en la ausencia de estos eventos las velocidades promedio en esta época del año son de 2 a 3 m/s. Entre marzo-septiembre la rotación dinámica de los vientos origina diferentes direcciones NE-SW (marzo y septiembre), E-W (abril y mayo), SE-NW (junio-agosto). Este patrón rotacional que dura 6 meses es muy agudo y probablemente es reforzado por las temperaturas más altas en el Golfo de México durante esta época del año. El aumento de las velocidades en mayo, junio y julio se debe a que las masas de aire más cálido avanzan a mayor velocidad que las masas de aire más frío (Martínez-López & Pares-Sierra, 1998; Zavala-Hidalgo & Fernández-Eguiarte, 2004; Zavala-Hidalgo et al., 2014; Mejía-Ledezma et al., 2020) (Fig. 6).



**Fig. 6** Mosaico de las rosas de vientos incidentes sobre el área de estudio durante 2014 - 2018. Tomado de Mejía-Ledezma et al. (2020).

## 6.1.6. Corrientes Litorales y Mareas

La acción del viento genera corrientes forzadas en aguas someras debido a la transferencia de momento sobre las capas superiores, lo cual produce corrientes litorales, oleaje y consigo, el transporte de sedimentos a lo largo de la costa. Además, explica porque la mayoría de las corrientes intensas ocurren en las capas cercanas a la superficie. Las corrientes sobre la plataforma continental del Golfo de México, en específico, sobre la Plataforma de Tamaulipas y Veracruz, fluyen paralelas a la costa y tienen estacionalidad dominada por la circulación de los vientos. Cuando los vientos en la temporada otoño-invierno circulan sobre el Golfo de México generan corrientes con dirección hacia el sur. Contrario ocurre en la temporada de primavera-verano, cuando las corrientes dominantes son hacia el norte (Fig. 7). Las corrientes litorales superficiales en el Golfo de México presentan una velocidad promedio de 1.5 m/s y su transporte promedio es de 2500 m<sup>3</sup>/s (Zavala-Hidalgo & Fernández-Eguiarte, 2004; Allende-Arandía, 2015; Calderón-Bustamente, 2017). Desde el punto de vista sedimentológico, la dinámica en la plataforma continental de Tamaulipas y Veracruz está relacionada con sus ambientes costeros a través de la infraplaya, zona donde el oleaje rompe, variando entre los niveles medios de oleaje en buen tiempo y de tormentas (Tapia-Fernández, 2018). La Plataforma continental de Tamaulipas y Veracruz presenta mareas de tipo diurno (una marea alta y una baja durante el día) y tienen un rango pequeño de marea, es decir, la distancia vertical entre el nivel de la marea alta y el de la marea baja es menor que en otras partes del mundo. Desde el punto de vista sedimentológico, la dinámica de la costa está ínfimamente relacionada con el nivel de las mareas a través de la zona rompiente del oleaje, debido a que disminuye o aumenta la distancia de depósito de los sedimentos respecto al sistema de dunas costeras. La distancia disminuye cuando la marea es alta, y aumenta cuando la marea es baja, determinando el grado de trabajo necesario para que los sedimentos lleguen a depositarse en las dunas.

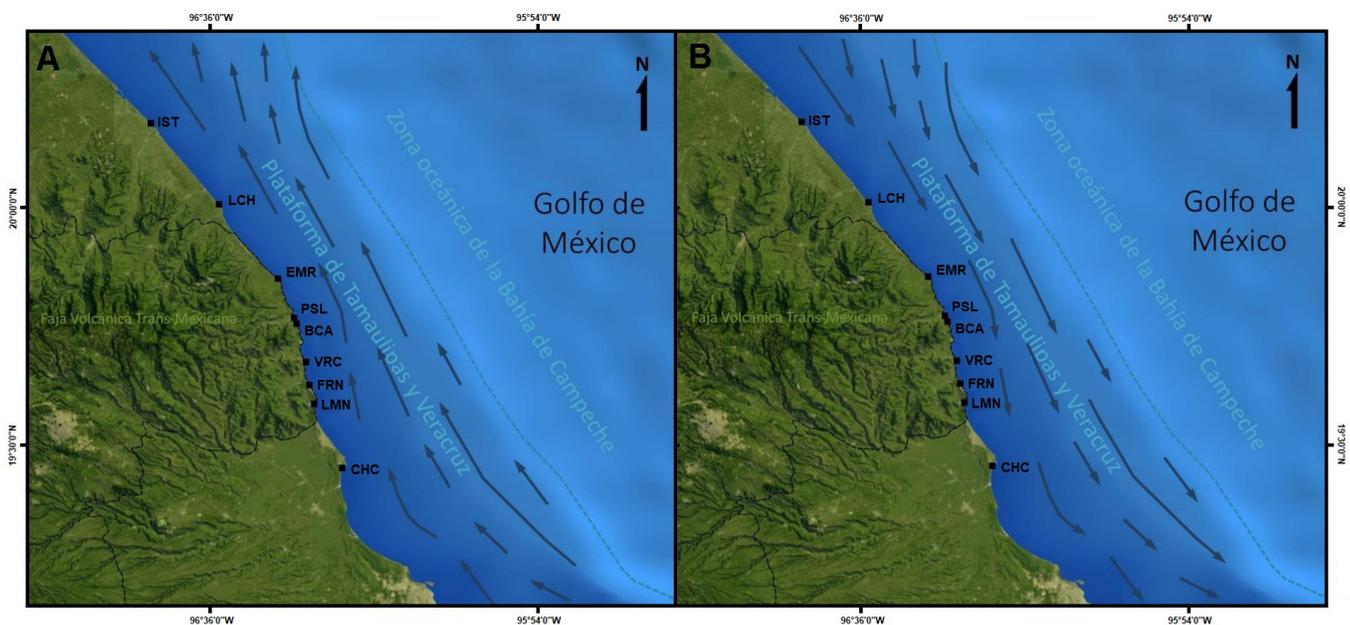
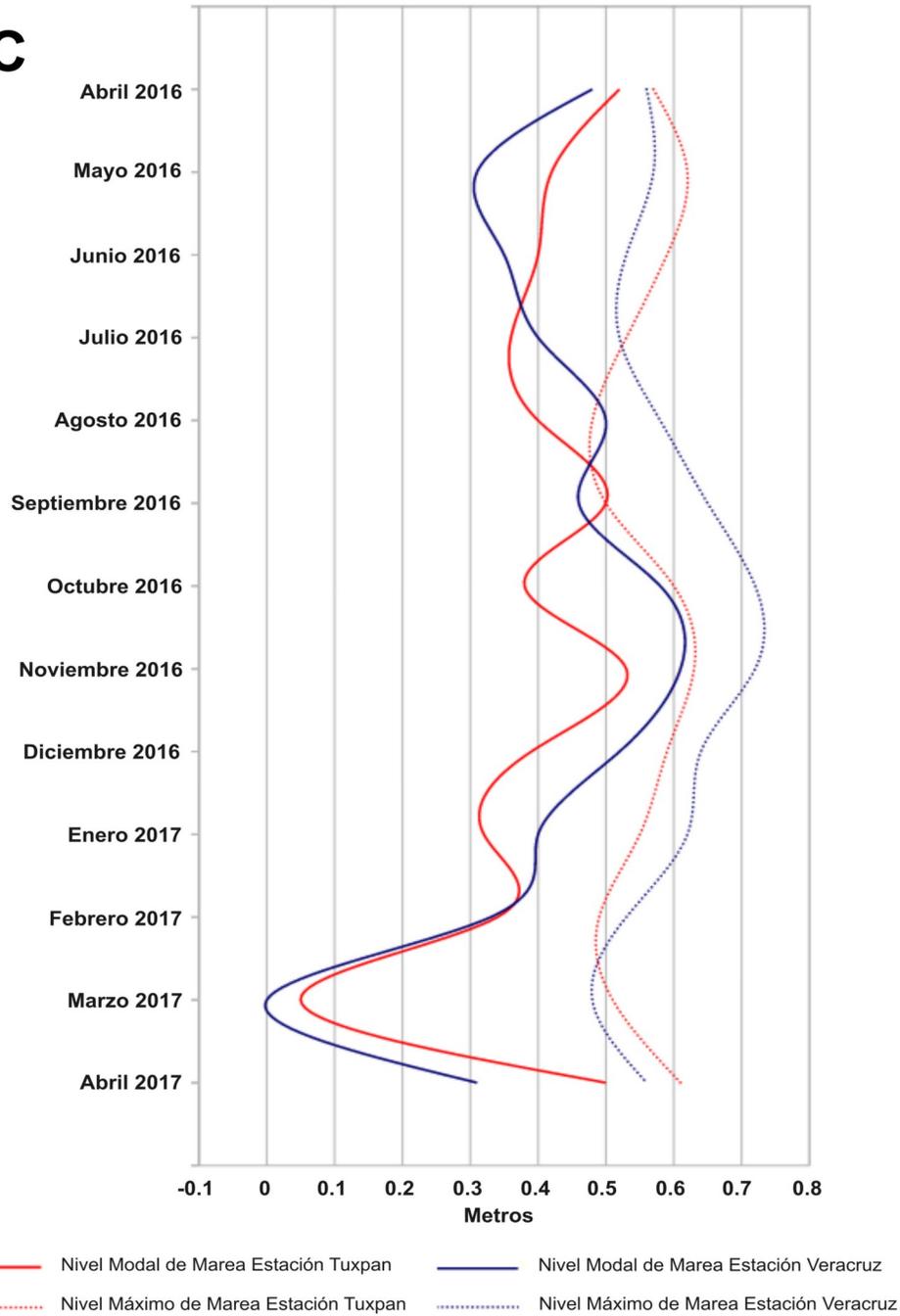


Fig. 7

continúa...

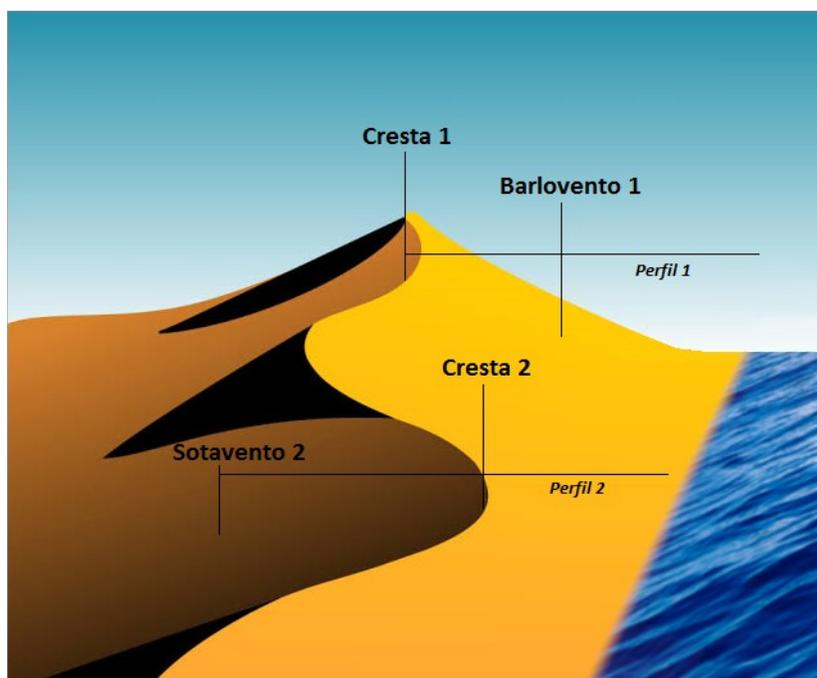
**C**

**Fig. 7** Mapas de circulación de las corrientes litorales en el área de estudio: A) temporada Primavera – Verano y B) temporada Otoño - Invierno. El diagrama C) muestra los niveles modales y niveles máximos de las mareas, ambos registrados en los meses previos a la fecha de muestreo. Gráfico de mareas configurados con datos de SEMAR (2017) y corresponden a la estación Tuxpan y Veracruz, localizadas al NW y SE de IST y CHC, respectivamente.

---

## 6.2. Muestreo y Tratamiento de Muestras

El muestreo de campo (abril del 2017) se llevó a cabo en las dunas costeras de 9 localidades: Istirinchá (IST), Lechuguillas (LCH), El Morro (EMR), Palma Sola (PSL), Boca Andrea (BCA), Villa Rica (VRC), Farallón (FRN), La Mancha (LMN) y Chachalacas (CHC). La distancia abarcó ~ 90 km. La recolección de muestra se realizó sistemáticamente en perfiles perpendiculares a la línea de costa (Fig. 8), tomando ~150g de muestra representativa en cada subambiente de las dunas: barlovento (n=13), cresta (n=16) y sotavento (n=3). En la recolección de las muestras se tomó en cuenta el centímetro superior en la duna para evitar el efecto de heterogeneidad en las arenas (Pettijohn, 1975).



**Fig. 8** Esquema del método de muestreo.

En el laboratorio de geoquímica del ICMYL se aplicó el tratamiento preliminar a todo el conjunto de muestras, el cual incluyó, a) limpieza para la remoción de fragmentos biógenos y pequeños restos de raíces; b) enjuague con agua destilada para la remoción de sales, y c) secado a 50 °C en estufa. Cabe mencionar, la no aplicación de soluciones químicas en los granos para preservar las partículas adheridas y la posible pérdida de información de perturbaciones físicas y químicas en las microtexturas superficiales de los granos (Vos et al., 2014).

### 6.2.1. Selección Monomineral

Se colocó una pequeña cantidad de muestra total de arena a granel (~ 5 g) en una placa tipo Petri. Después, bajo un microscopio binocular 4X-Velab – VES1 y con la ayuda de un pincel fino se procedió a la separación manual de granos del piroxeno. El parámetro considerado para la separación fue el color verde que presentaron los minerales cuando a través de ellos incidía la iluminación inferior del

---

microscopio (Fig. 9). Los granos fueron separados de la fracción más grande de cada muestra y tenían un tamaño  $> 125 \mu\text{m}$  el cual es adecuado para evaluar las texturas superficiales predominantes (Vos et al., 2014).



**Fig. 9** Microscopio utilizado para la separación de los minerales. La imagen derecha ejemplifica la apariencia de los piroxenos cuando incidía a través de ellos la iluminación inferior del microscopio.

## 6.2.2. Análisis Geoquímico

Para validar la composición geoquímica de los granos de piroxeno, los cristales separados fueron montados en un portaobjetos de resina orgánica, se pulieron y se cubrieron con una superficie de grafito. Se realizaron cuarenta y un análisis de cristales de piroxeno mediante microsonda electrónica. Se empleó una microsonda electrónica JEOL JXA8900-R automatizada con cinco Espectrómetros de Dispersión de Longitud de Onda (WDS) y un Espectrómetro de Dispersión de Energía (EDS) (Laboratorio Universitario de Petrología, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM). Se utilizó un voltaje de aceleración de 20 keV y una corriente de 20 nA con un diámetro de haz de 1,0  $\mu\text{m}$ . El tiempo máximo de conteo fue de 10 s para Na y K, 30 s para Sr y Ba y 30 s para otros elementos. La calibración se realizó utilizando estándares internacionales (USGS) e internos. Los efectos de matriz se corrigieron mediante el protocolo JEOL-ZAF y el error analítico máximo en los óxidos mayoritarios es inferior al 3 %. La calidad de los datos se evaluó mediante estándares de kaersutita, olivino, diópsido, cuprita y pentlandita. Para determinar la composición química de los granos de piroxeno ( $n= 41$ ), se elaboró un diagrama ternario basado en los ejes  $\text{CaSiO}_3$  (wollastonita, un piroxenoide),  $\text{MgSiO}_3$  (enstatita) y  $\text{FeSiO}_3$  (ferrosilita).

## 6.2.3. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido

Siguiendo los protocolos establecidos por Gómez-Lizárraga (2020), los granos se montaron en un portamuestras para ser observados en una plataforma de rotación basculante X-Y-Z. Los portamuestras se recubrieron con oro para tener la mejor resolución (es decir, en comparación con otros metales o carbono) (Krinsley y Doorkamp, 1973). Las observaciones con el microscopio electrónico de barrido se realizaron en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México. Para obtener una base de datos más precisa sobre las microtexturas superficiales del piroxeno se realizó una revisión de la

literatura para comparar las microtexturas reportadas en trabajos llevados a cabo en una amplia gama de entornos de todo el mundo (Kishina et al., 1995; Mahaney, 2002; Velbel, 2007; Velbel & Ranck, 2007; Velbel et al., 2007; Velbel & Barker 2008; Vos et al., 2014). La siguiente tabla muestra la categorización microtextural para este trabajo.

**Categorización Microtextural**

Origen	Microtextura	Autor
Mecánico	1.- Collision Points	Propuesta en este trabajo
	2.- Abrasion Fatigue	Mahaney (2002)
	3.- Conchoidal Fractures	Vos et al. (2014)
	4.- Arcuate Steps	Vos et al. (2014)
	5.- Straight Steps	Vos et al. (2014)
	6.- Flat Cleavage Surfaces	Vos et al. (2014)
	7.- Upturned Plates	Vos et al. (2014)
	8.- Bulbous Edges	Vos et al. (2014)
Mecánico-Químico	9.- Elongated Depressions	Vos et al. (2014)
	10.- Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	Vos et al. (2014)
Químico	11.- Boxwork	Velbel & Barker (2008)
	12.- Oxidized	Khisina (1995)
	13.- Cornflake	Velbel & Barker (2008)
	14.- Corrosion	Propuesta en este trabajo
	15.- Mamillated	Velbel & Ranck (2007)
	16.- Denticulated	Velbel (2007)
	17.- Imbricated Wedge Marks	Velbel et al. (2007)
	18.- Lenticular Etch Pits	Velbel (2007)
	19.- Solution Pits	Vos et al. (2014)

### 6.2.3.1. Análisis de Imágenes

Las medidas cuantitativas de tamaño, compacidad y proporción microtextural en los granos de piroxeno (n= 333) se obtuvieron mediante el software J Microvision v. 1.3.4 (Roduit, 2019).

El tamaño de grano es la dimensión lineal más extensa, es decir, su longitud (Wentworth, 1922, 1935; Krumbein, 1941; Folk, 1974; Leeder, 2011). La compacidad es la aproximación del contorno general de una partícula a la circularidad y se aplica para el análisis de objetos digitales proyectados en 2 dimensiones (Blott & Pye, 2008; Claes et al., 2016; Berrezueta et al., 2019). El software trabaja las imágenes bidimensionales a partir de una expresión matemática basada en  $C=4\pi A/P^2$ , donde C = compacidad; A = área de la forma y  $P^2$  = perímetro al cuadrado (Osserman, 1978). La compacidad es adimensional, es decir, no representa alguna dimensión física dentro del SI y solo se asigna como cantidad de dimensión igual a 1, por lo que valores cercanos a 1 representan una mayor compacidad y valores más distantes a 1 representan una menor compacidad del grano (Claes et al., 2016). Jain (1989) y Montero & Bribiesca (2009) han utilizado la compacidad para describir la redondez de un objeto en

el procesamiento digital de imágenes. Por lo tanto, en este trabajo se toma como referencia de la redondez, considerando que la abrasión paulatinamente le confieren una forma redonda a los granos. Se siguieron varios pasos para obtener el tamaño de grano y la compacidad: a) Calibración espacial de la imagen SEM a partir de su escala desplegada en micras ( $\mu\text{m}$ ) (Fig. 10); b) Mejora de la imagen SEM en un sistema de colores primarios (RGB) con la función de fábrica de imágenes. El ajuste da como resultado un contraste de color en el que los píxeles correspondientes al grano de piroxeno se vuelven negros y los píxeles del fondo de la imagen se vuelven blancos (Fig. 11). Este proceso permite que el software trabaje con el contraste de valores RGB de negro ( $R = 0, G = 0, B = 0$ ) y blanco ( $R = 255, G = 255, B = 255$ ) (Gonzales & Woods, 2002); c). La función de extracción de objetos rellena los píxeles negros ( $R = 0, G = 0, B = 0$ ) resaltando la forma del grano de piroxeno. El software extrae las medidas de tamaño de grano y compacidad de la figura resaltada (Fig. 12).

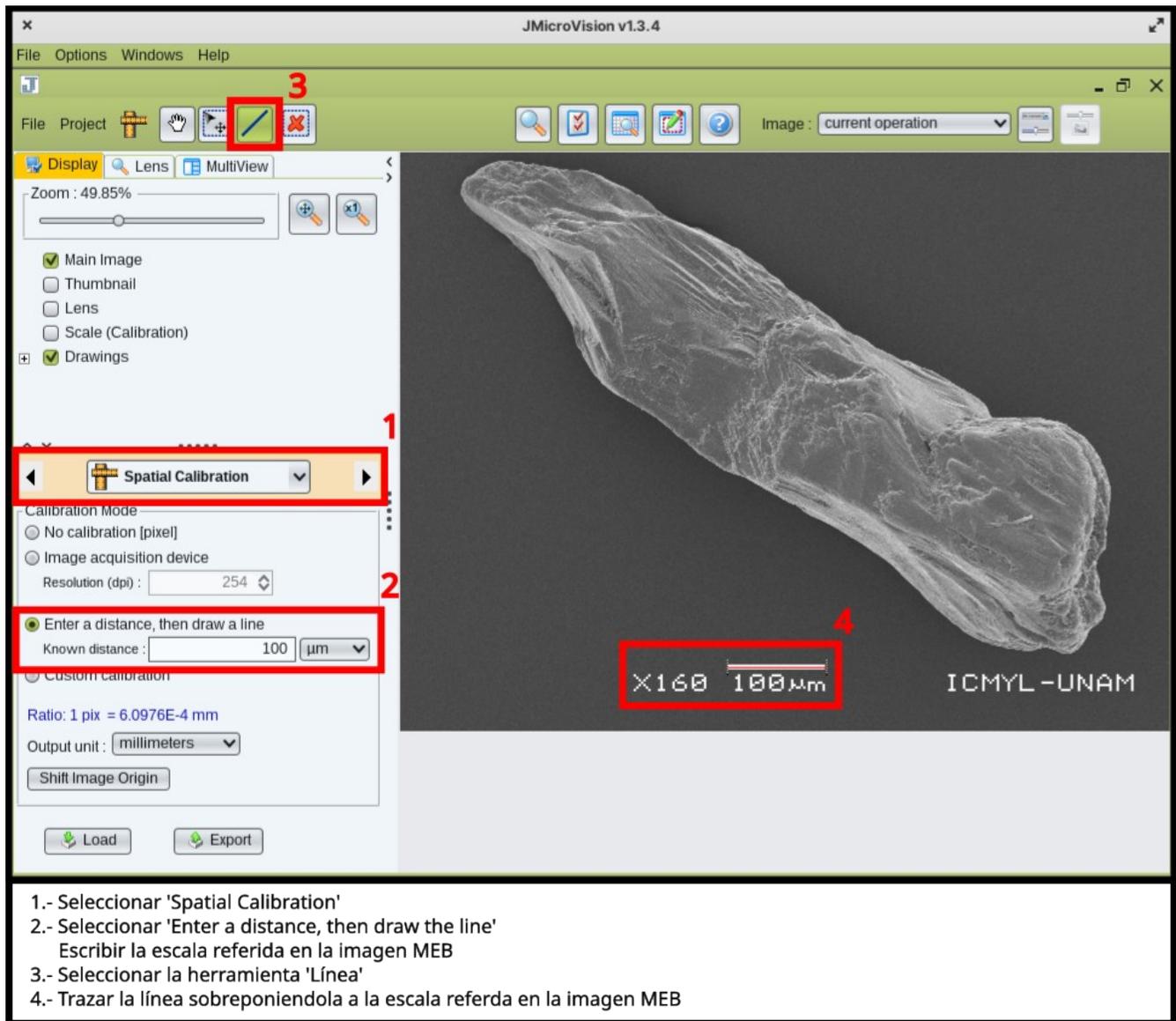
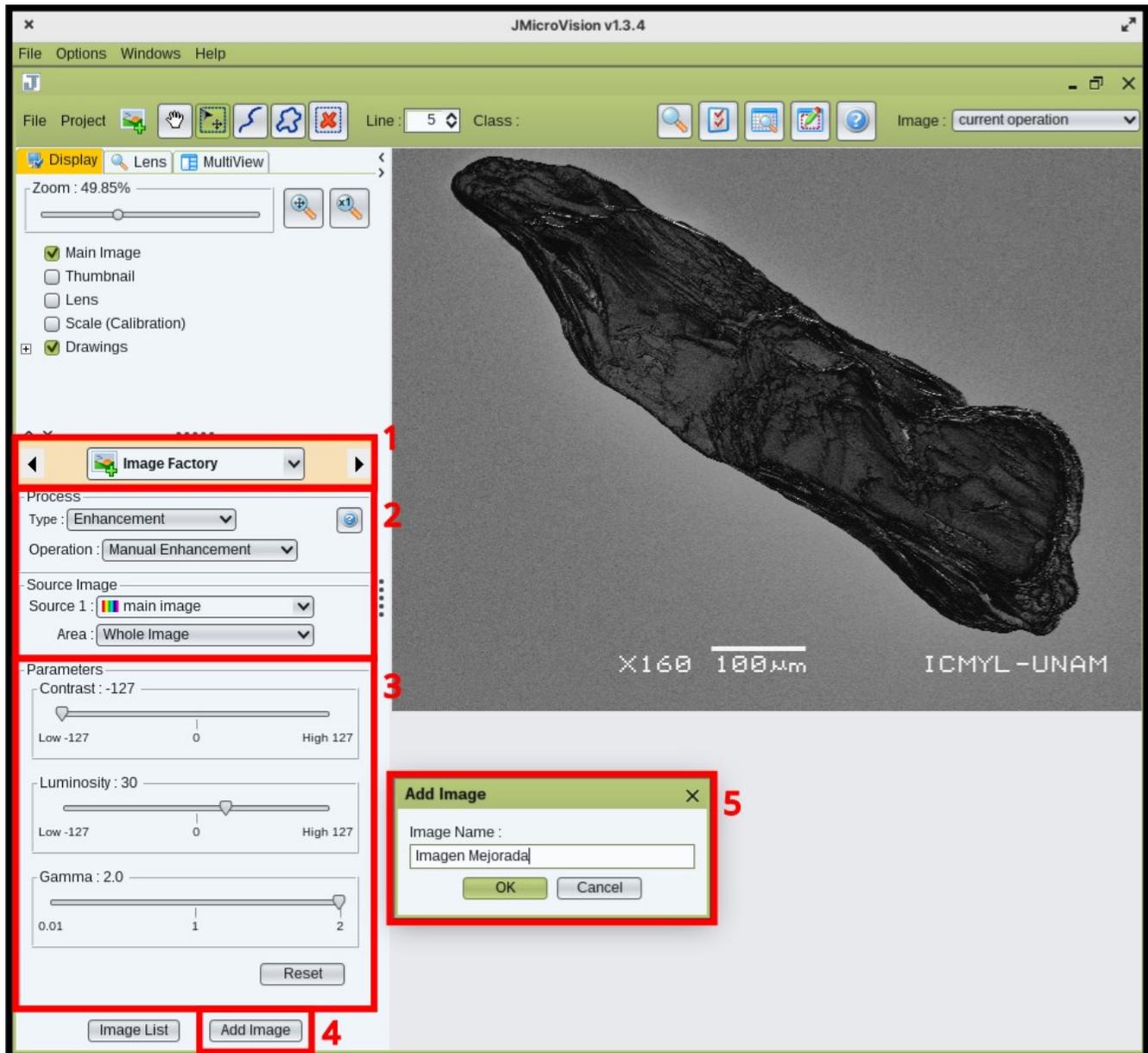
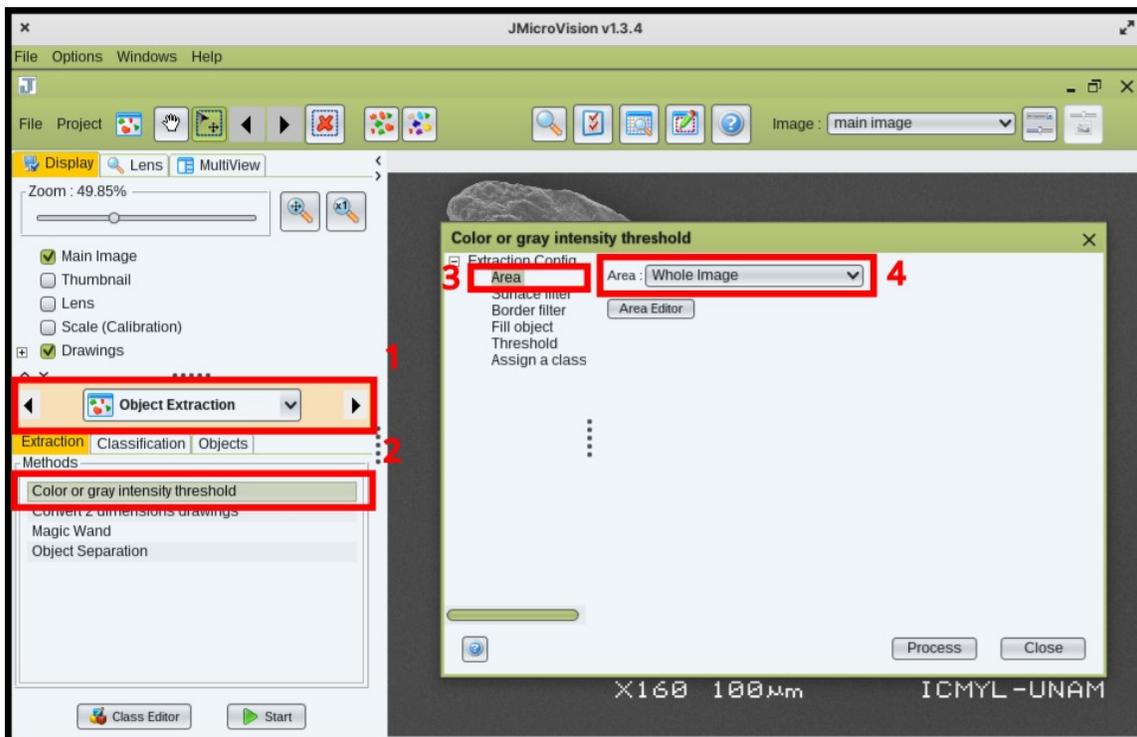


Fig. 10 Calibración espacial de la imagen MEB.

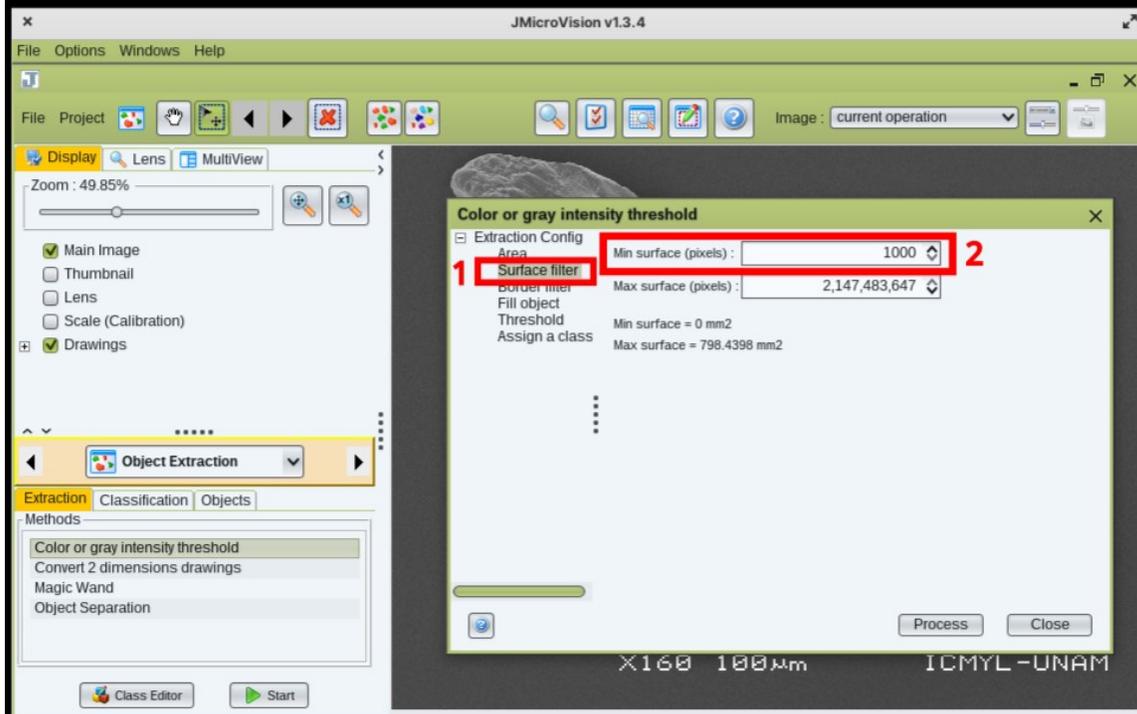


- 1.- Seleccionar 'Image Factory'
- 2.- Seleccionar 'Type: Enhancement' y 'Operation: Manual Enhancement'
- 3.- Definir parámetros de Contraste, Luminosidad y Gamma.  
El propósito de ajustar estos valores es oscurecer el grano mineral y aclarar el fondo para generar un contraste.  
Los valores requeridos por lo general son:  
Contraste: -127; Luminosidad: 30 - 50; Gamma: 2.  
\*Estos valores pueden variar según la imagen, pero deben ser ajustados siempre buscando el mayor contraste.
- 4.- Seleccionar 'Add Image' para guardar ajustes.
- 5.- Nombrar la modificación y dar click en 'OK'.

Fig. 11 Mejora de la imagen MEB.



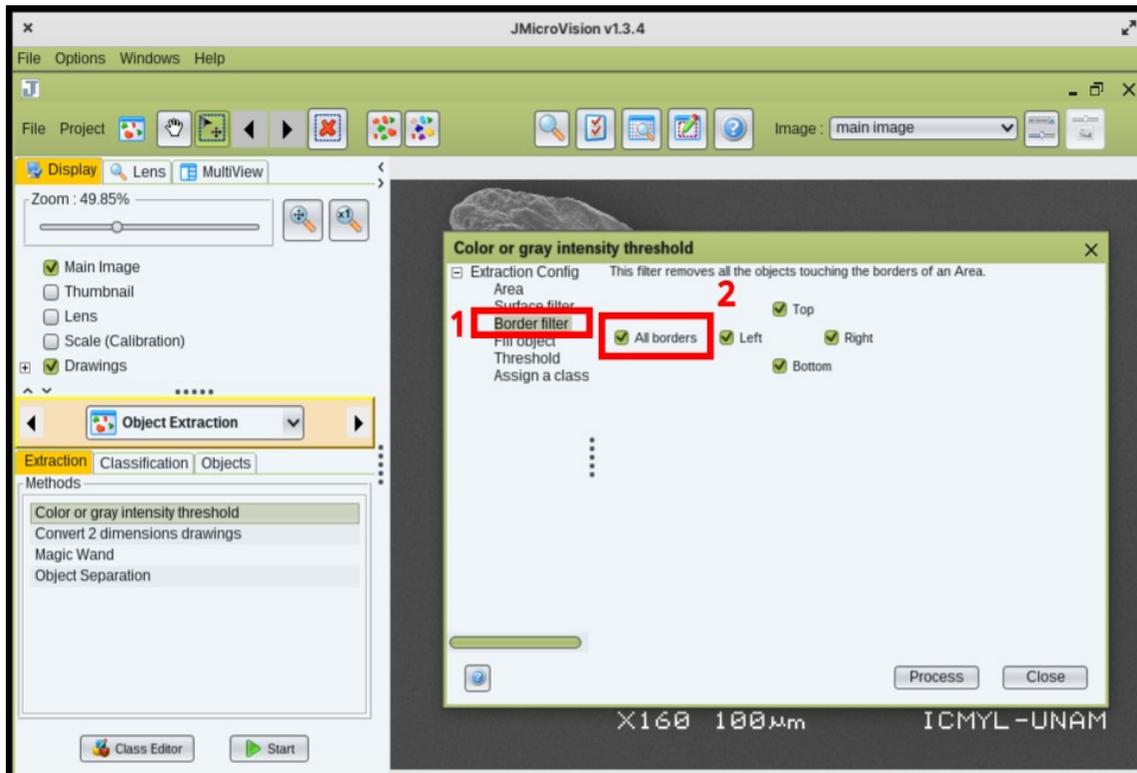
- 1.- Seleccionar 'Object Extraction'
- 2.- Seleccionar 'Color or gray intensity threshold'
- 3.- Seleccionar 'Area'
- 4.- Seleccionar 'Whole Image'



- 1.- Seleccionar 'Surface Filter'
- 2.- Ajustar los valores en 'Min surface (pixels)'  
 Este ajuste representa el área mínima de píxeles que será tomada en cuenta para el proceso. El área menor a la ajustada será descartada por el software. Este ajuste es necesario cuando existen, en la superficie del grano, pequeñas áreas de color claro semejantes al fondo de la imagen, y que debido a su calidad, no pudieron ser oscurecidas (contrastadas) con el 'Manual Enhancement'

Fig. 12

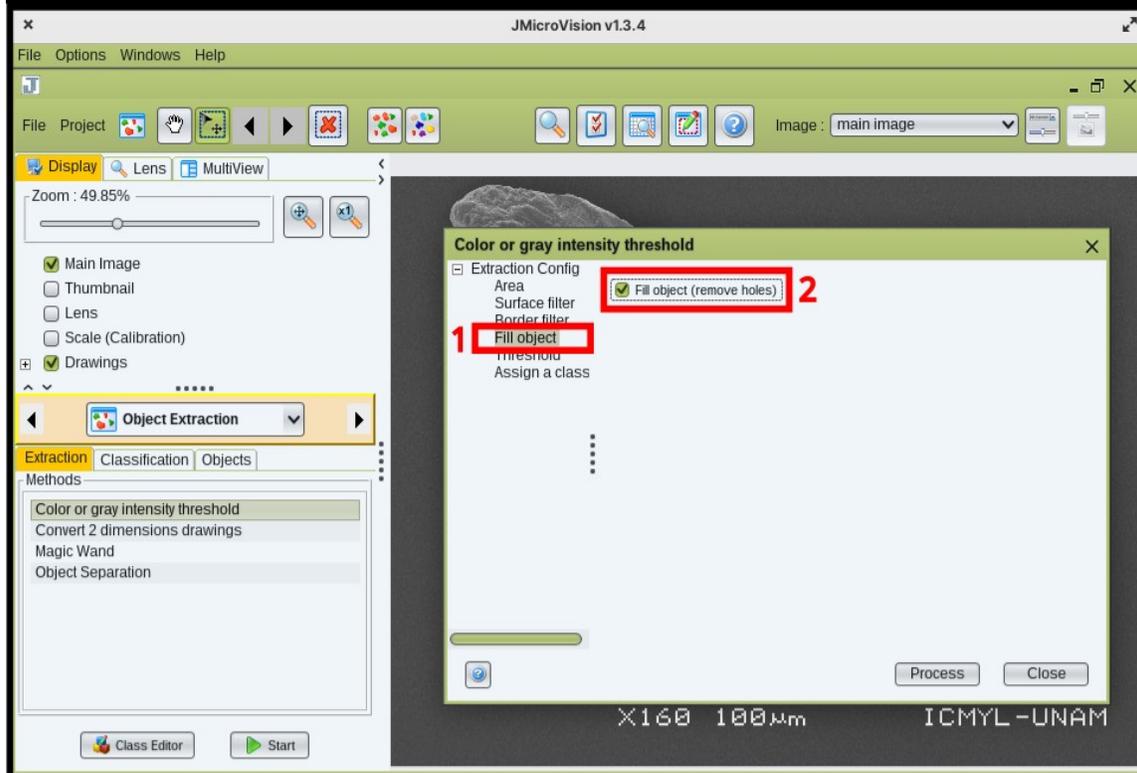
continúa...



1.- Seleccionar 'Border filter'

2.- Seleccionar 'All borders'

Esta selección delinear  el perímetro del grano ajustado al borde de la imagen, en dado caso de que el grano no estuviera centrado y sobrepasara alguno.

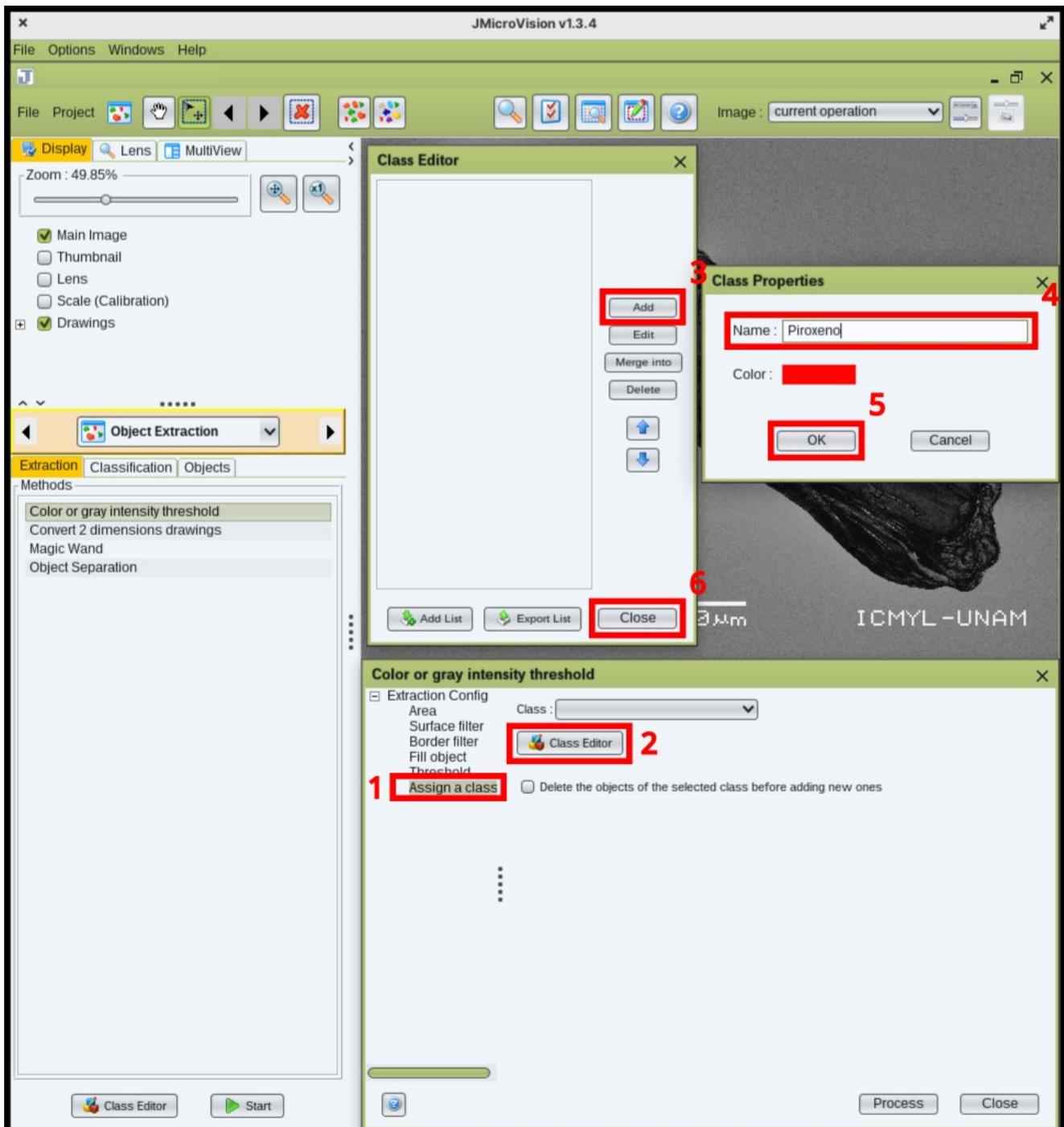


1.- Seleccionar 'Fill object'

2.- Seleccionar 'Fill object (remove holes)'

Fig. 12

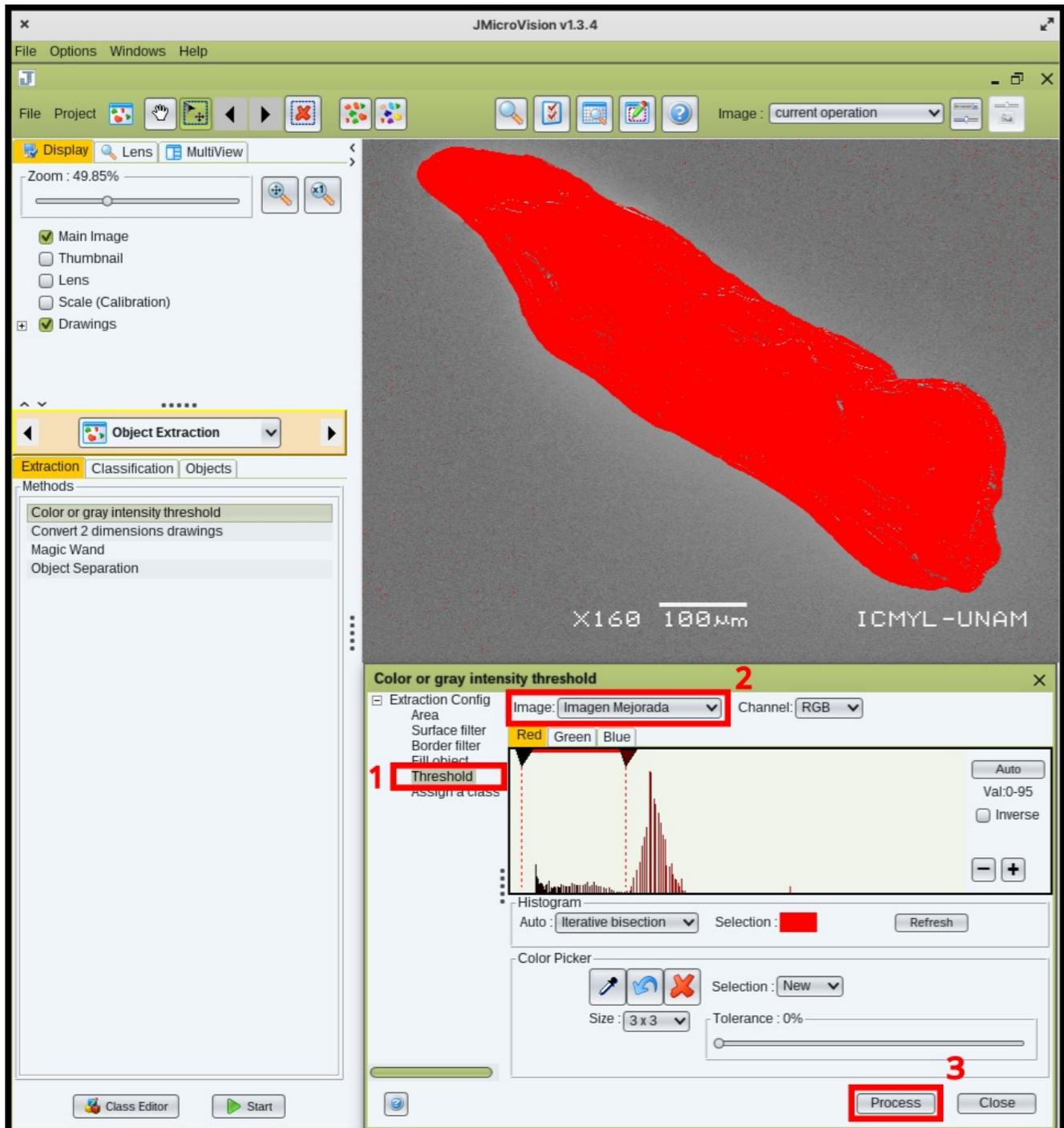
continúa...



- 1.- Seleccionar 'Assign a class'
- 2.- Seleccionar 'Class Editor'
- 3.- Seleccionar 'Add'
- 4.- Nombrar la clase que representará los elementos a analizar, en este caso, "Piroxenos"
- 5.- Dar click en 'OK' para guardar la clase.
- 6.- Dar click en 'Close', en este paso, el software habrá guardado la clase.

Fig. 12

continúa...



- 1.- Seleccionar 'Threshold'
- 2.- Seleccionar en 'Image' la imagen previamente guardada en el proceso "Mejora de la Imagen"  
 \*Ajustar la imagen desplazando las pestañas marcadas en el rectángulo rojo punteado. Siempre procurar una coloración uniforme del grano, tal como se muestra en la imagen.
- 3.- Dar click en 'Process'

Fig. 12

continúa...

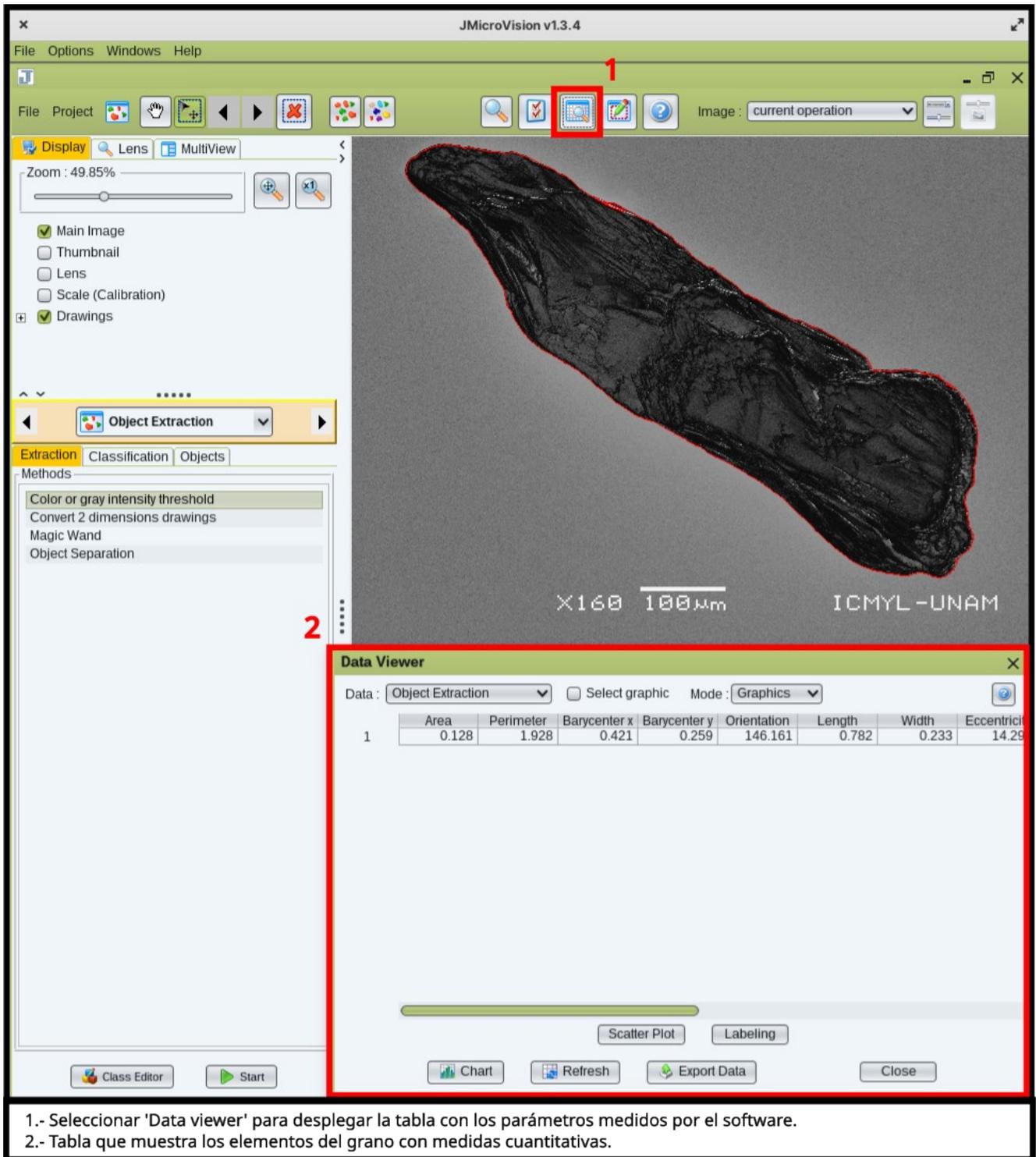


Fig. 12 Extracción de objetos de la imagen MEB.

Las microtexturas superficiales de los granos brindan una idea sobre la historia sedimentaria de los sedimentos clásticos (Vos et al., 2014). Para obtener una presencia cuantitativa de las microtexturas en la superficie de los granos de clinopiroxeno se siguieron los siguientes pasos: a) Calibración espacial de la imagen SEM a partir de su escala mostrada en micras ( $\mu\text{m}$ ) (Fig. 10) ; b) Dibujar el área total del grano y delimitar las superficies cubiertas por las microtexturas con la herramienta de medición 2D; c) Calcular el valor proporcional del área de las microtexturas con respecto al área total del grano de piroxeno (Fig. 13).

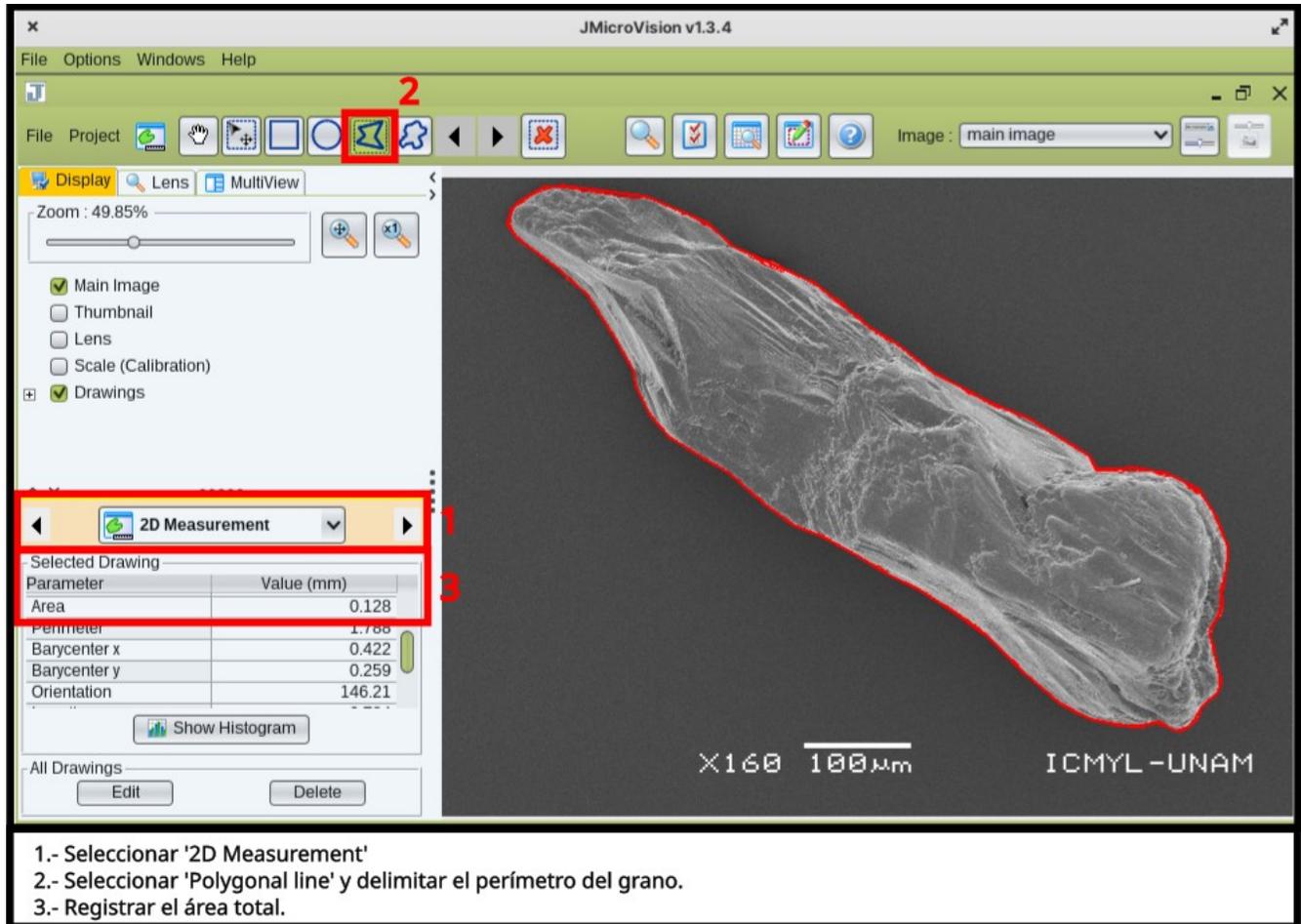
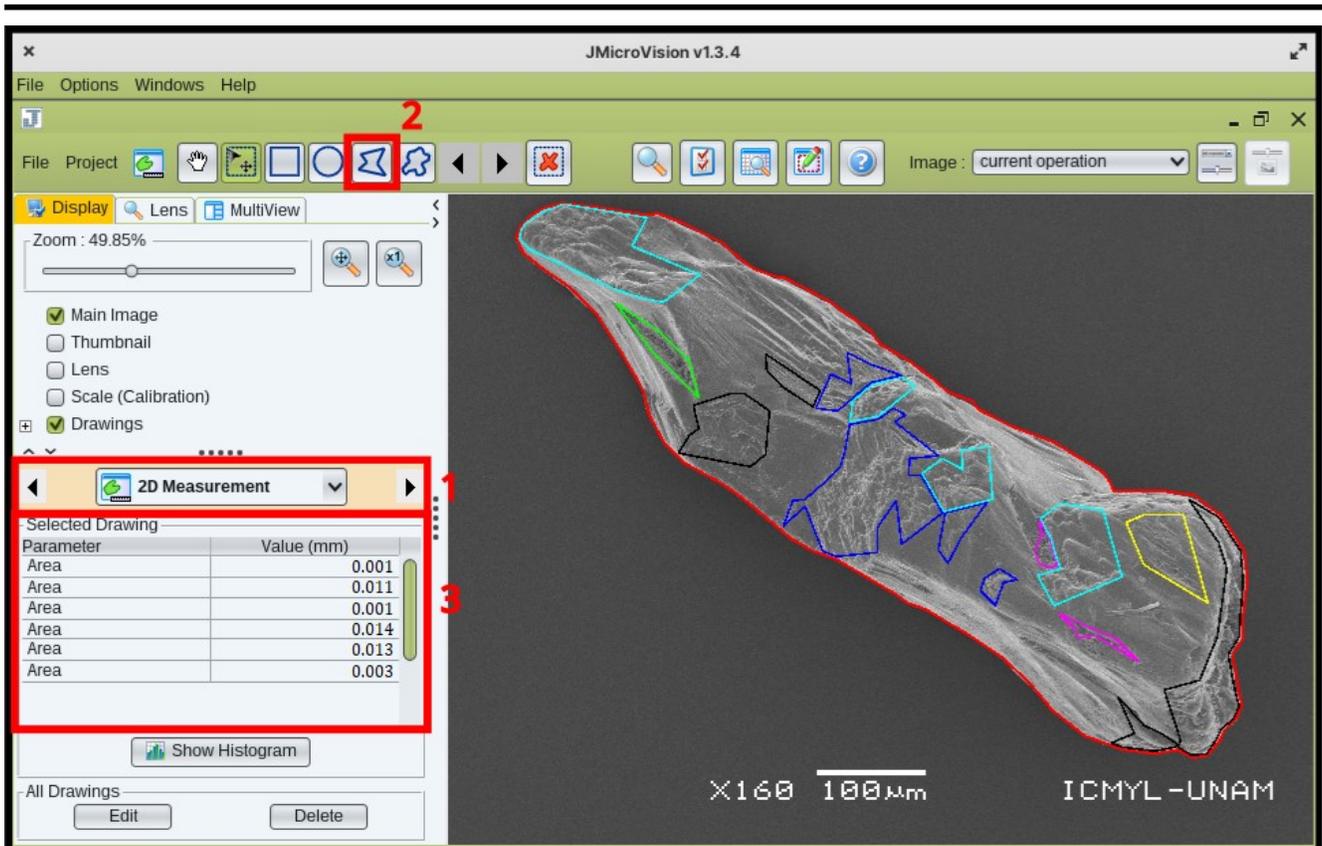


Fig. 13

continúa...



- 1.- Seleccionar '2D Measurement'
- 2.- Seleccionar 'Polygonal line' y delimitar la superficie de cada microtextura.
- 3.- Registrar el área de cada microtextura.

	Microtextura	Área	Superficie proporcional en el grano
	Perímetro del grano	0.128 mm <sup>2</sup>	100 %
	Abrasion Fatigue	0.001 mm <sup>2</sup>	0.8 %
	Flat Cleavage Surface	0.011 mm <sup>2</sup>	8.6 %
	Boxwork	0.001 mm <sup>2</sup>	0.8 %
	Mamillated	0.014 mm <sup>2</sup>	10.5 %
	Denticulated	0.013 mm <sup>2</sup>	9.8 %
	Lenticular Etch Pit	0.003 mm <sup>2</sup>	2.3 %
	<b>Total</b>	<b>0.043 mm<sup>2</sup></b>	<b>32.8 %</b>

- 1.- Área de la microtextura \* 100 / Área total del grano  
\* Valor proporcional de la microtextura en la superficie del grano.

Fig. 13 Obtención del valor proporcional del área abarcada por las microtexturas sobre la superficie del grano.

## 7. Resultados

### 7.1. Geoquímica

En el diagrama ternario de la Fig. 14 se muestra que los granos de piroxeno analizados se clasifican como augita ((Ca,Mg,Fe)<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) y diópsido ((Ca,Mg) Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>). En la augita los contenidos de Fe y Mg son más altos que en el diópsido. Estos minerales son inosilicatos de cadena simple y cristalizan en el sistema monoclinico. Sus densidades de 3.31 g/cm<sup>3</sup> (augita) y de 3.28 g/cm<sup>3</sup> (diópsido) les confieren la característica de ser minerales pesados (densidad > 2.9 g/cm<sup>3</sup>). Otras propiedades físicas que presentan son la dureza (en la escala de Mohs: 5 1/2 – 6 (augita) y 5 1/2 – 6 1/2 (diópsido)) y buen clivaje de ambos. El clivaje favorece que las dos direcciones de exfoliación se corten en ángulos próximos a 90° (Klein, 2001). En el triángulo de clasificación se observa que los clinopiroxenos de los sitios **IST**, **ELM** y **PSL** se distribuyen en los recuadros clasificatorios para augita y diópsido, mientras que los clinopiroxenos del sitio **VRC** solo se agrupan dentro del recuadro clasificatorio para diópsido.

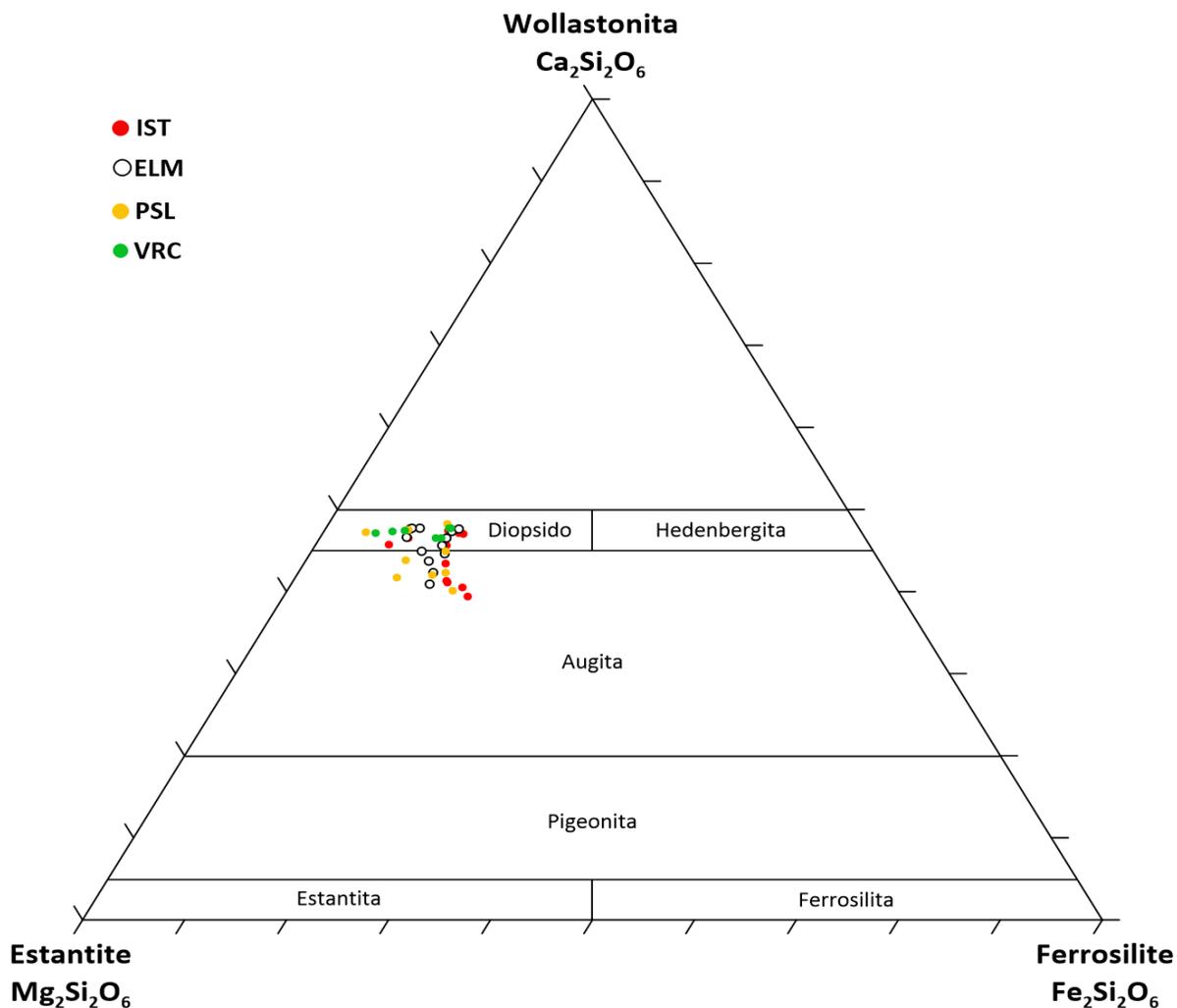
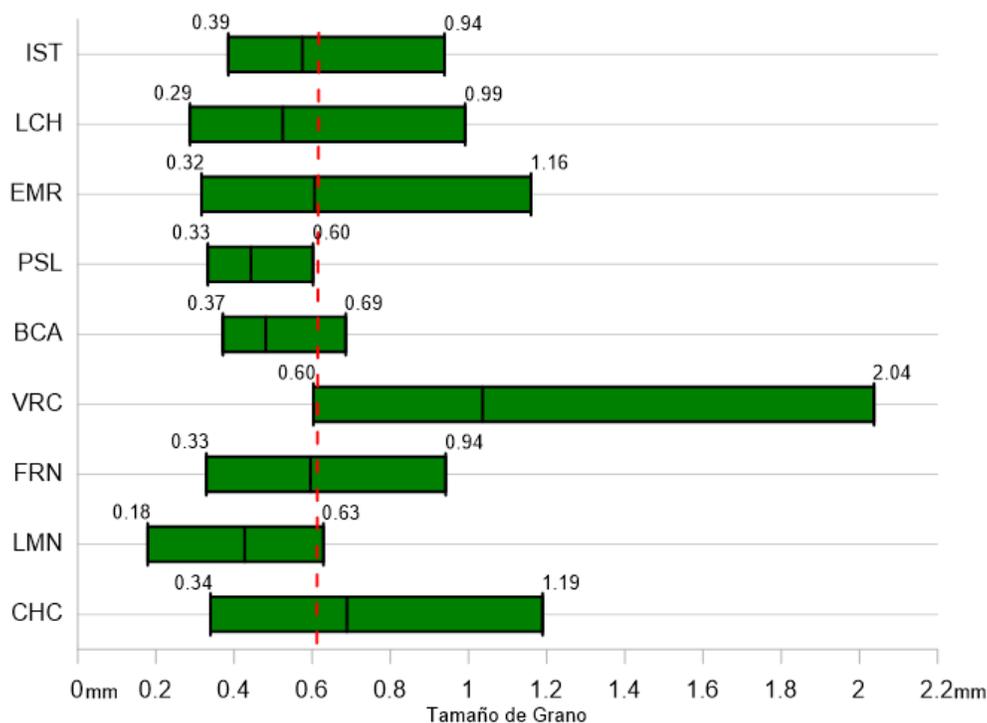


Fig. 14 Diagrama ternario para la clasificación del piroxeno. Propuesto por Morimoto et al. (1988). n = 66. Anexo I.

## 7.2. Tamaño de Grano

El tamaño de grano en cada localidad exhibe sutiles variaciones y muestra diferentes intervalos entre sus valores mínimos y máximos. El tamaño de grano promedio para todas las localidades es de  $0.61 \pm 0.01$  mm. No obstante, los tamaños promedios para los diferentes sitios son: **IST** =  $0.57 \pm 0.01$  mm, **LCH** =  $0.52 \pm 0.02$  mm, **EMR** =  $0.61 \pm 0.03$  mm, **PSL** =  $0.44 \pm 0.02$  mm, **BCA** =  $0.48 \pm 0.02$  mm, **VRC** =  $1.04 \pm 0.04$  mm, **FRN** =  $0.60 \pm 0.02$  mm, **LMN** =  $0.43 \pm 0.02$  mm y **CHC** =  $0.69 \pm 0.03$  mm. En el caso de valores mínimos y máximos de tamaño de grano se observa, en orden ascendente, diversos rangos: **PSL** = 0.27 mm, **BCA** = 0.31 mm, **LMN** = 0.45 mm, **IST** = 0.55 mm, **FRN** = 0.61 mm, **LCH** = 0.70 mm, **EMR** = 0.84 mm, **CHC** = 0.85 mm y **VRC** = 1.43 mm (Fig. 15).

De acuerdo con la clasificación de tamaño de grano propuesta por Udden-Wentworth, los clinopiroxenos presentan dimensiones en un intervalo de arenas finas a muy gruesas (Udden, 1914; Wentworth 1922, 1935; Folk et al., 1970). Puede notarse que los sitios **EMR**, **VRC**, **FRN** y **CHC**, no solo ostentan un tamaño de grano promedio igual y/o superior al promedio general de todas las muestras, sino también, ostentan los rangos más amplios en la variabilidad de tamaño de grano. Además, se observa que en los sitios **PSL**, **BCA** y **LMN** presentan los intervalos de variabilidad más ajustados.



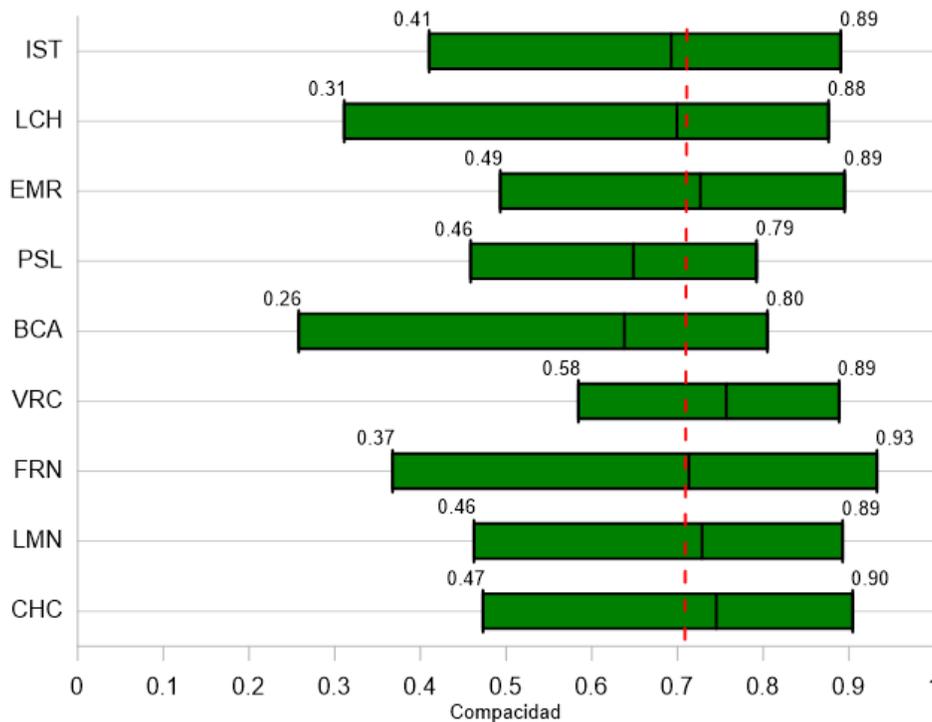
**Fig. 15** Diagrama de caja del rango de valores para el tamaño de grano (mm). El borde izquierdo representa el valor mínimo y el borde derecho el valor máximo. La línea roja indica el promedio para todo el conjunto de muestras. N = 333. Anexo II y III.

### 7.3. Compacidad

La compacidad en cada localidad, al igual que el tamaño de grano, exhibe variaciones importantes entre sus valores mínimos y máximos. La compacidad promedio para todas las localidades es de  $0.71 \pm 0.01$  mm, pero los valores promedios para cada sitio son: **IST** =  $0.69 \pm 0.01$ , **LCH** =  $0.70 \pm 0.02$ , **EMR** =  $0.73 \pm 0.01$ , **PSL** =  $0.65 \pm 0.02$ , **BCA** =  $0.64 \pm 0.03$ , **VRC** =  $0.76 \pm 0.01$ , **FRN** =  $0.71 \pm 0.02$ , **LMN** =  $0.73 \pm 0.02$  y **CHC** =  $0.75 \pm 0.02$ .

Los valores mínimos y máximos presentan, en orden ascendente, diversos rangos para los sitios: **VRC** = 0.30, **PSL** = 0.33, **EMR** = 0.40, **LMN** = 0.43, **CHC** = 0.43, **IST** = 0.48, **CA** = 0.55, **LCH** = 0.57 y **FRN** = 0.57 (Fig. 16).

La compacidad, a diferencia de la redondez, no se cataloga con tablas de comparación visual basadas en rangos de valores como las propuestas por [Krumbein \(1941\)](#) y [Powers \(1982\)](#). En cambio, con la compacidad solo podemos afirmar que los granos con valores más cercanos a 1 presentan mayor compacidad, mientras que granos con valores más distantes a 1 presentan menor compacidad.

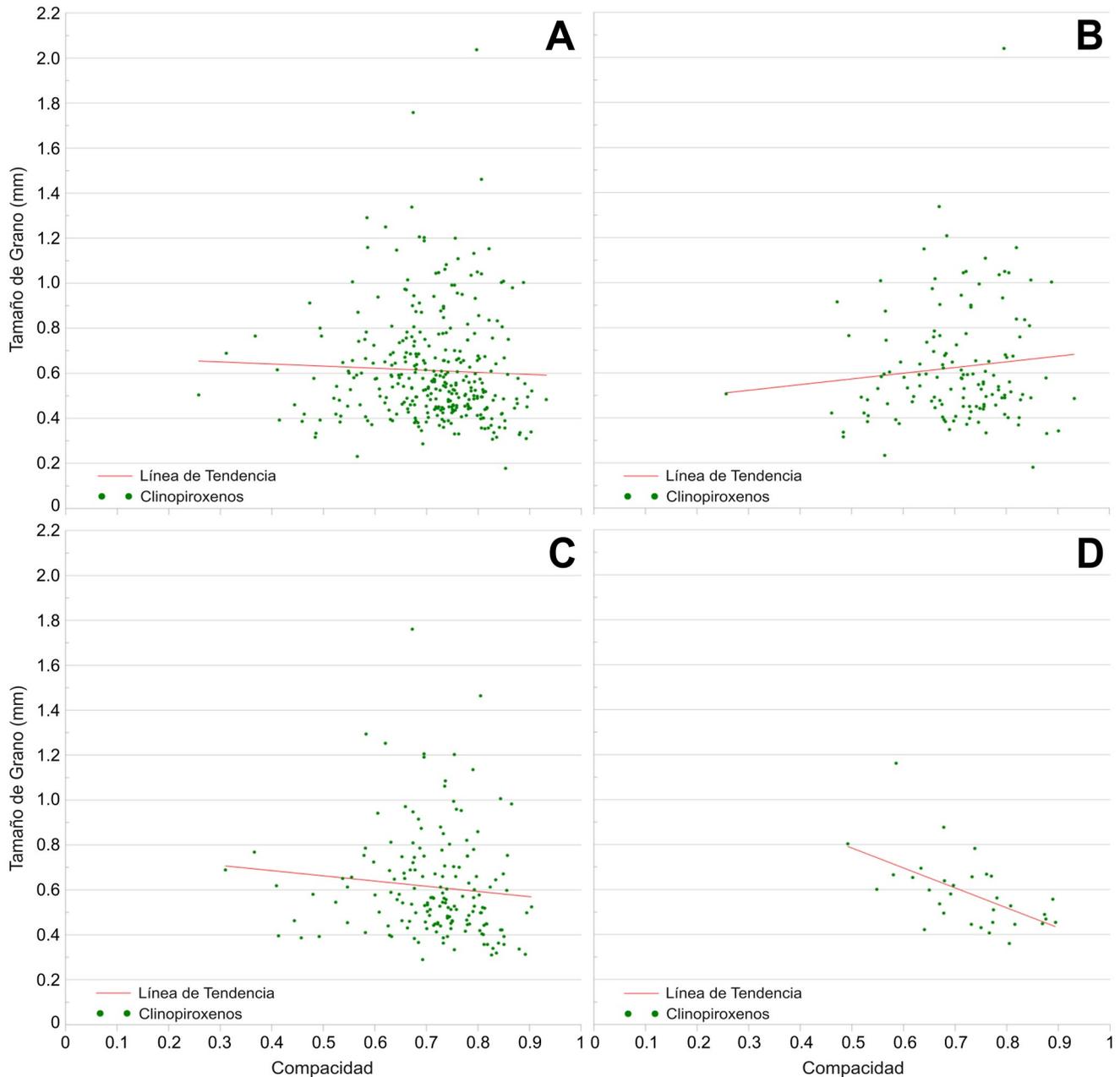


**Fig. 16** Diagrama de caja del rango de valores para la compacidad. El borde izquierdo representa el valor mínimo y el borde derecho el valor máximo. La línea roja indica el promedio para todo el conjunto de muestras. N = 333. Anexo II y III.

### 7.4. Compacidad vs Tamaño de Grano

Con los valores de compacidad y tamaño de grano (mm) resulta necesario elaborar diagramas de dispersión para detectar correlaciones significativas entre ambas variables (Fig. 17). Si se parte de la

hipótesis, en la cual, la compacidad aumenta conforme disminuye el tamaño de grano (resultado del desgaste generado por el transporte que paulatinamente le confieren una forma redonda a los granos), y esto con respecto a la dirección del transporte del sedimento (barlovento → cresta → sotavento), se podría revelar la intensidad energética, distancia, y mecanismo de transporte (Folk, 1974). En este sentido, se considera al desgaste de los bordes (compacidad) y al tamaño de grano como una relación inherente, y que, por lo tanto, los diagramas de dispersión son una referencia estándar para dilucidar la dinámica del clinopiroxeno en diferentes niveles de análisis, por localidad y/o por subambiente.



**Fig. 17** Gráficos que muestran la Compacidad vs Tamaño de Grano. a) Conjunto de localidades, n = 333; b) Barloventos, n = 133; c) Crestas, n = 168; d) Sotaventos, n = 32. Anexo III.

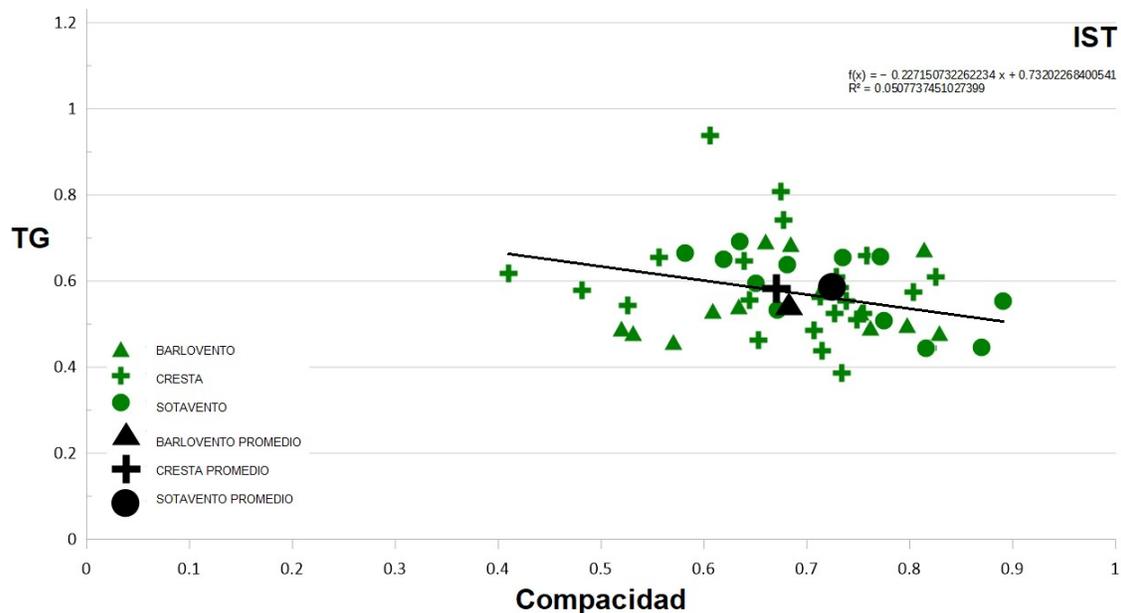
Las respectivas pruebas de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov ( $n > 50$ ) y Kruskal-Wallis ( $n \leq 50$ ), indicaron que algunas variables no siguen una distribución normal. Por lo tanto, las correlaciones se calcularon utilizando el método de Spearman (Schuenemeyer & Drew, 2011). Las muestras presentan

las siguientes correlaciones: significativa muy débil en la Fig. 17A ( $r_s = -0.13$  ( $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.02$ )), correlación nula en la Fig. 17B ( $r_s = 0.05$  ( $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.59$ )), correlación significativa débil en la Fig. 17C ( $r_s = -0.20$  ( $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.01$ )) y correlación significativa en la Fig. 17D ( $r_s = -0.55$  ( $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.001$ )). Esto considerando las siguientes definiciones:  $r_s = 0 - \pm 0.09$  correlación nula,  $r_s = \pm 0.10 - \pm 0.19$  correlación significativa muy débil,  $r_s = \pm 0.20 - \pm 0.49$  correlación significativa débil,  $r_s = \pm 0.50 - \pm 0.69$  correlación significativa moderada,  $r_s = \pm 0.70 - \pm 0.84$  correlación significativa,  $r_s = \pm 0.85 - \pm 0.95$  correlación significativa fuerte y  $r_s \pm 0.96 - \pm 1$  correlación significativa perfecta. Escala adaptada de Pérez-Tejada (2008).

## 7.5. Compacidad vs Tamaño de Grano por Localidad

El diseño de análisis para cada localidad permite obtener una mejor resolución de las variables. Las pruebas de bondad de ajuste muestran que no todos los conjuntos de datos siguen una distribución normal. Por esta razón, para estimar la correlación de los datos se recurre al método de Spearman ( $r_s$ ). En el caso de los conjuntos de datos que siguen una distribución normal se utiliza el método de Pearson ( $r$ ). En general, los datos por localidad y subambiente muestran lo siguiente.

En la localidad **IST** se determina correlación significativa débil ( $r_s = -0.25$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.08$ ) (Fig. 18). En el barlovento existe correlación significativa débil ( $r_s = 0.24$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.44$ ), en crestas correlación significativa débil ( $r_s = -0.32$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.13$ ) y en sotavento correlación significativa moderada ( $r = -0.69$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.01$ ).



**Fig. 18** Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad **IST**.  $n = 49$ .

En la localidad **LCH** se determina correlación significativa moderada ( $r_s = -0.50$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.00$ ) (Fig. 19). En el barlovento existe correlación significativa débil ( $r = 0.23$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.53$ ), en crestas

correlación significativa débil ( $r_s = -0.47$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.04$ ) y en sotavento correlación significativa moderada ( $r = -0.61$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.06$ ).

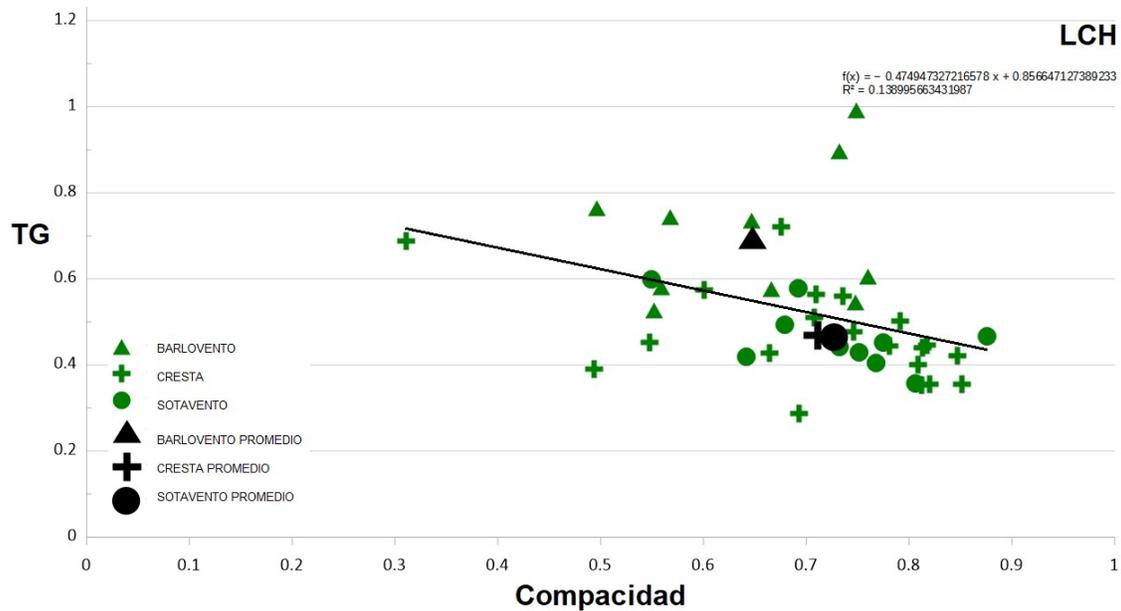


Fig. 19 Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad LCH. n = 40.

En la localidad **EMR** existe correlación significativa moderada ( $r_s = -0.65$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.00$ ) (Fig. 20). En el barlovento hay correlación significativa ( $r_s = -0.78$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.01$ ), en crestas correlación significativa moderada ( $r = -0.50$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.02$ ) y en sotavento correlación significativa débil ( $r_s = 0.30$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.41$ ).

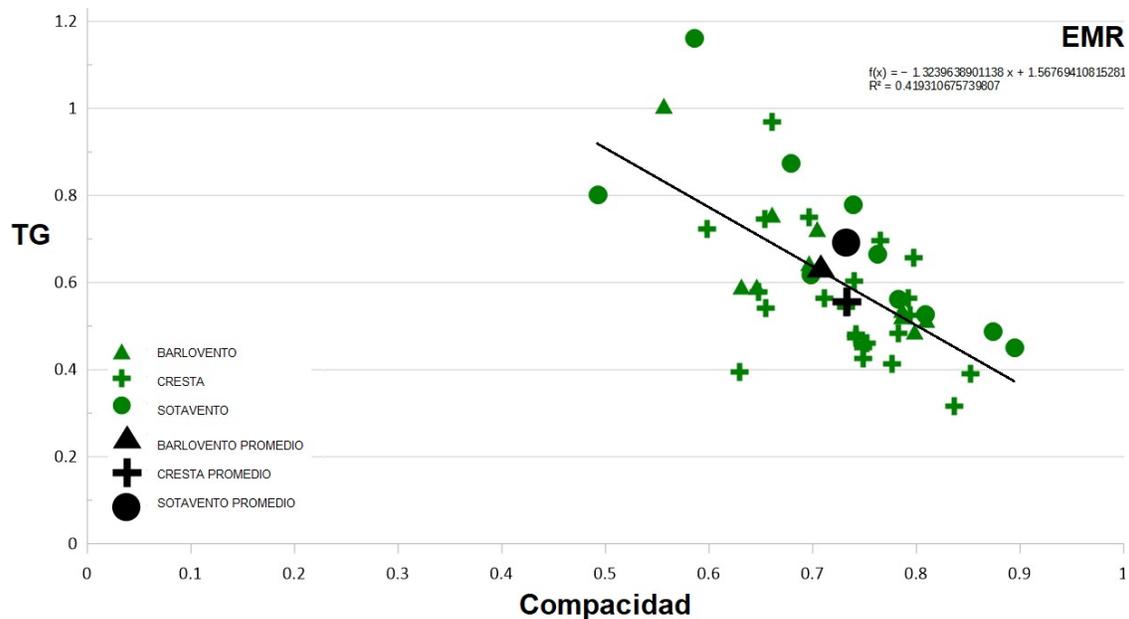


Fig. 20 Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad EMR. n = 43.

En la localidad **PSL** existe correlación significativa débil ( $r_s = 0.21$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.39$ ) (Fig.21). En el barlovento se tiene correlación significativa muy débil ( $r = 0.12$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.74$ ) y en crestas correlación significativa débil ( $r_s = 0.30$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.41$ ).

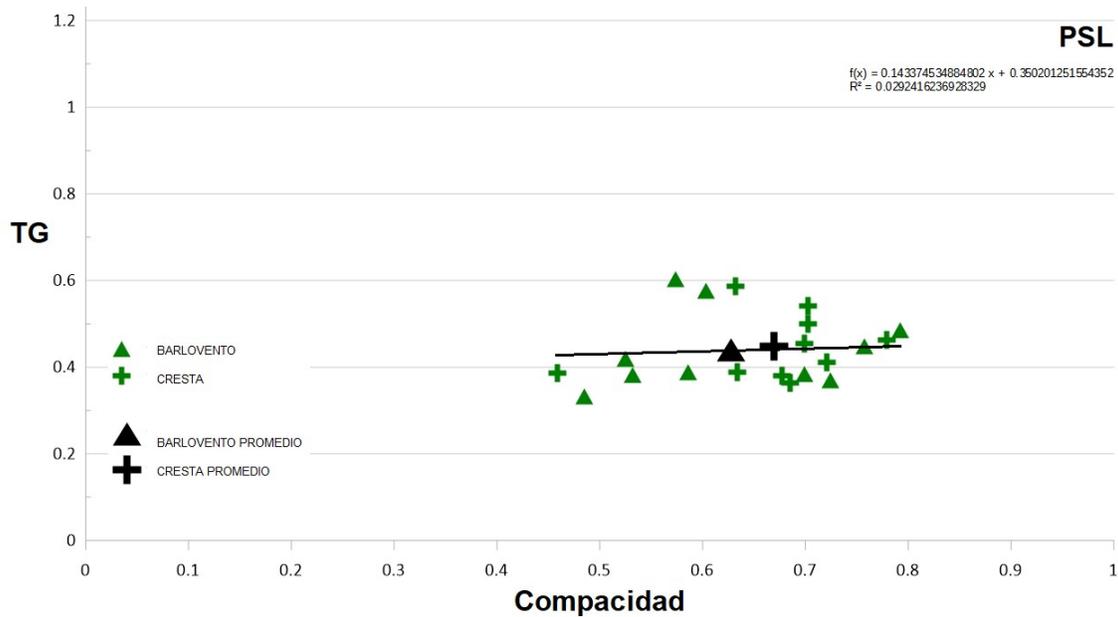


Fig. 21 Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad **PSL**.  $n = 20$ .

En el sitio **BCA** se obtuvo correlación nula ( $r_s = 0.02$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.95$ ) (Fig. 22), lo cual se refleja en los barloventos con correlación significativa débil ( $r_s = -0.29$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.43$ ) y en crestas correlación nula ( $r_s = 0.00$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 1.00$ ).

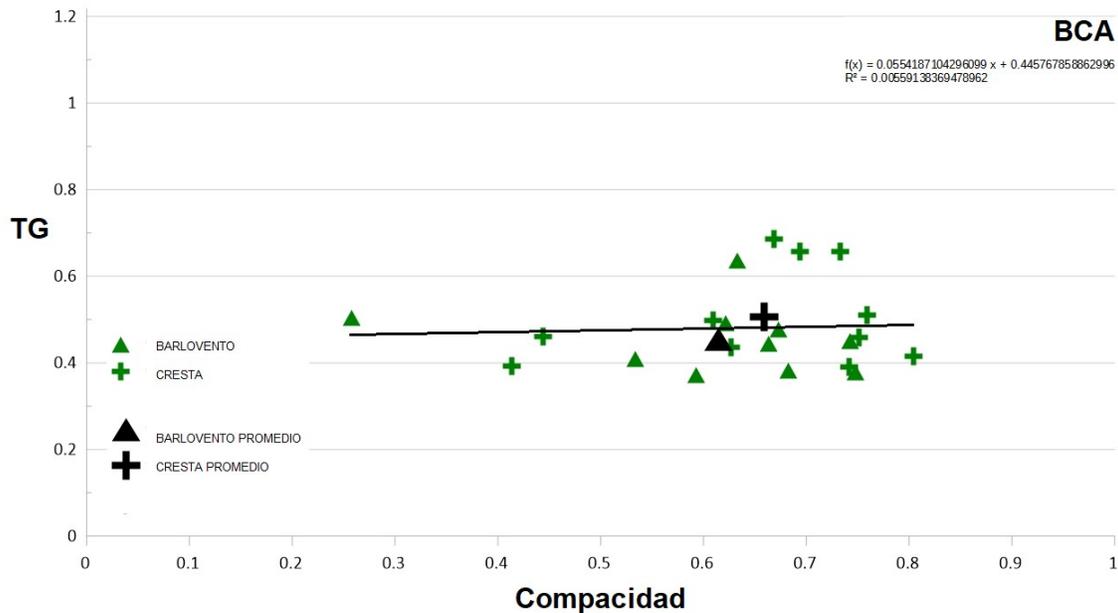


Fig. 22 Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad **BCA**.  $n = 21$ .



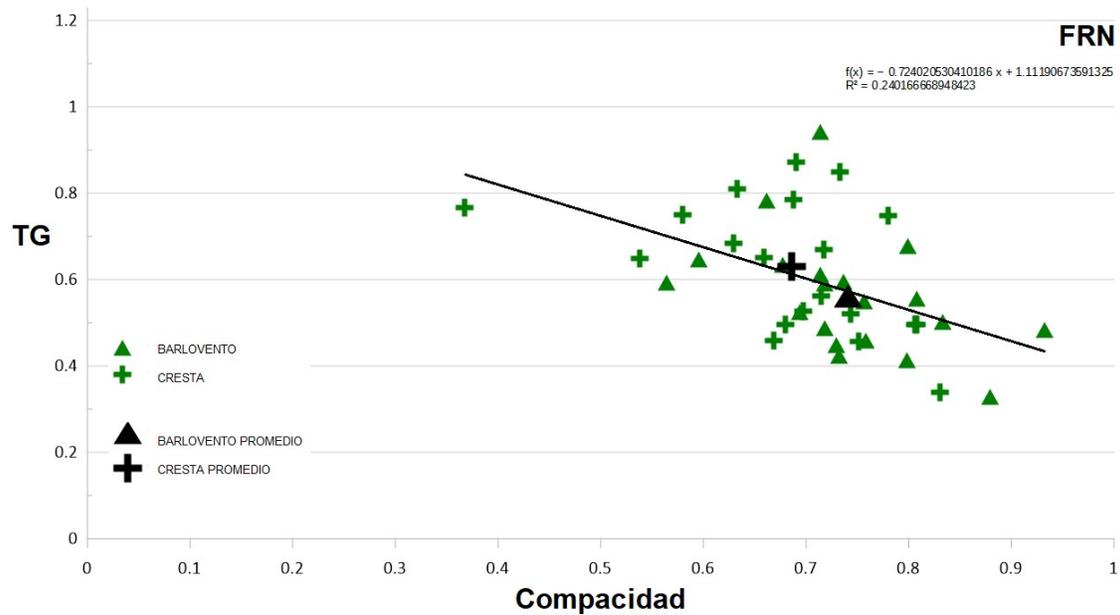


Fig. 24 Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad FRN. n = 40.

En la localidad LMN se tiene correlación significativa débil ( $r_s = -0.27$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.09$ ) (Fig.25), pero en barloventos correlación nula ( $r = 0.00$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.79$ ) y en crestas hay correlación moderada ( $r = -0.52$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.02$ ).

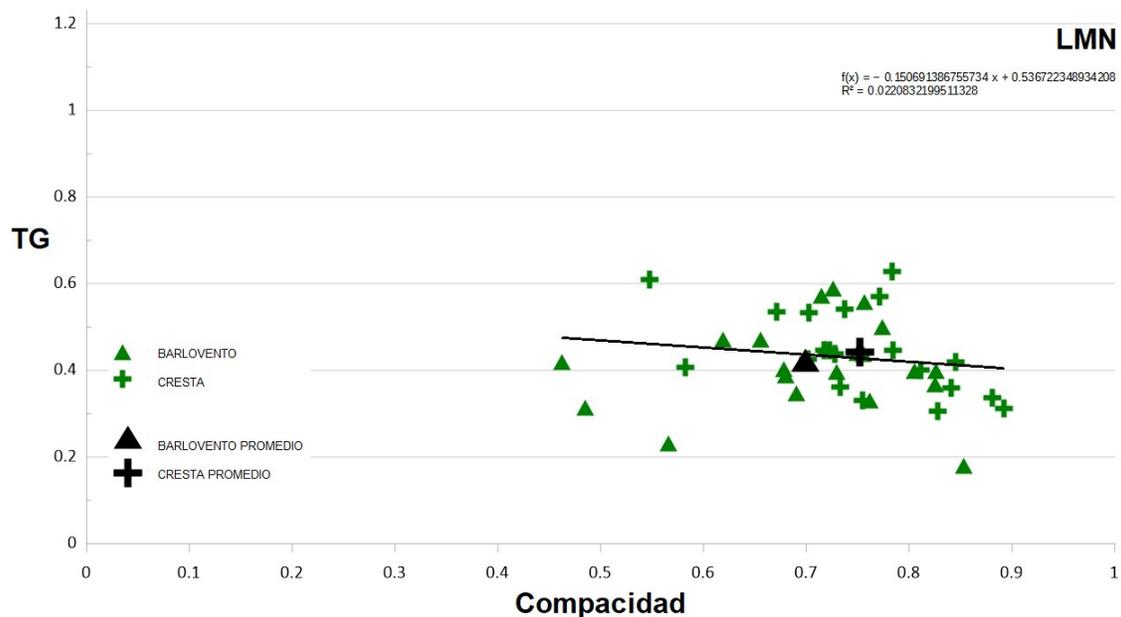
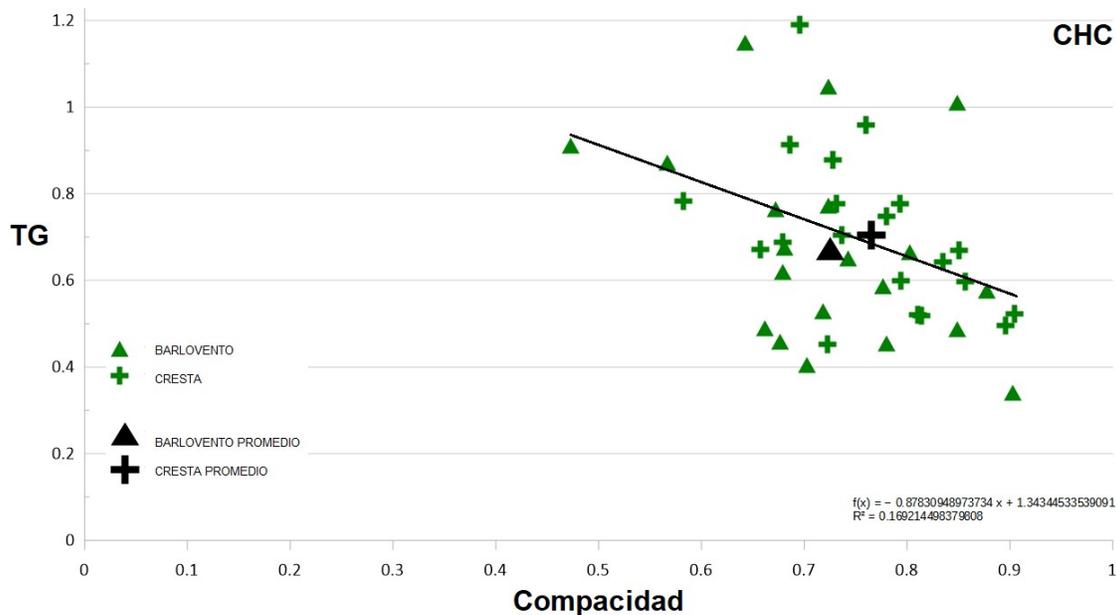


Fig. 25 Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad LMN. n = 40.

Finalmente, en el sitio **CHC** hay correlación significativa débil ( $r = -0.41$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.01$ ) (Fig. 26). En barloventos existe correlación significativa débil ( $r = -0.40$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.08$ ) y en crestas correlación significativa moderada ( $r = -0.51$ ;  $\alpha = 0.05$ ,  $p = 0.02$ ).



**Fig. 26** Gráfico de dispersión Compacidad vs Tamaño de Grano (TG) para la localidad **CHC**.  $n = 40$ .

## 7.6. Prueba de Hipótesis de Correlación

A partir de las hipótesis de trabajo obtenidas mediante los análisis configurados en las Figs. 17A  $H_0$  = correlación significativa muy débil, 17B  $H_0$  = correlación nula, 17C  $H_0$  = correlación significativa débil y 17D  $H_0$  = correlación significativa moderada y aplicando el criterio de decisión como sigue:  $p > \alpha$  acepta  $H_0$  y  $p < \alpha$  rechaza  $H_0$ ; se puede afirmar que en las Figs. 17A rechaza  $H_0$  de correlación significativa muy débil, 17B acepta  $H_0$  de correlación nula, 17C rechaza  $H_0$  de correlación significativa débil y 17D rechaza  $H_0$  de correlación significativa moderada. Por lo tanto, no existe correlación significativa entre las variables de compacidad y tamaño de grano cuando el análisis se formula con la totalidad de los datos, ya sea para todas las localidades, para todos los barloventos, para todas las crestas y/o para todos los sotaventos. Esto podría indicar que la dinámica del piroxeno se impone localmente y no a lo largo de la costa, por lo que resulta adecuado analizar la correlación por localidad y subambiente.

Si se emplea el mismo criterio de decisión, donde  $p > \alpha$  acepta  $H_0$  y  $p < \alpha$  rechaza  $H_0$ , para cada localidad y subambiente, se afirma que:

En **IST** la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta para los datos en conjunto. En el barlovento la  $H_0$  correlación significativa débil se acepta, en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta y en el sotavento la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza.

---

En **LCH** la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza para los datos en conjunto. En el barlovento la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta, en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa débil se rechaza y en el sotavento la  $H_0$  de correlación significativa moderada se acepta.

En **EMR** la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza para los datos en conjunto. En el barlovento la  $H_0$  de correlación significativa se rechaza, en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza y en el sotavento la  $H_0$  de correlación significativa débil se rechaza.

En **PSL** la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta para los datos en conjunto. En los barloventos la  $H_0$  de correlación significativa muy débil se acepta y en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta.

En **BCA** la  $H_0$  de correlación nula se acepta para los datos en conjunto. En los barloventos la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta y en las crestas la  $H_0$  de correlación nula se acepta.

En **VRC** la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta para los datos en conjunto. En los barloventos la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta y en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta.

En **FRN** la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza para los datos en conjunto. En los barloventos la  $H_0$  de correlación significativa débil se rechaza y en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa débil se rechaza.

En **LMN** la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta para los datos en conjunto. En los barloventos la  $H_0$  de correlación nula se acepta y en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza.

En **CHC** la  $H_0$  de correlación significativa débil se rechaza para los datos en conjunto. En los barloventos la  $H_0$  de correlación significativa débil se acepta y en las crestas la  $H_0$  de correlación significativa moderada se rechaza.

Estos resultados revelan que, solo en algunos subambientes, la compacidad y el tamaño de grano presentan correlación en distinto grado y con un nivel de confianza del 95%. En algunas localidades, cuando la prueba se realiza para los datos en su conjunto, el resultado difiere de la prueba realizada para sus respectivos subambientes. Por lo tanto, es a nivel de subambientes y no a nivel de localidad donde mejor se esclarece la correlación entre variables. En consecuencia, se argumenta que solo en los pocos subambientes donde se cumple la prueba de hipótesis, la compacidad aumenta cuanto más pequeño es el tamaño de grano con respecto a la dirección del transporte del sedimento (barlovento → cresta → sotavento). Sin embargo, cabe tener en cuenta que los subambientes que presentan una tendencia positiva no cumplen dicho planteamiento (barloventos en **IST**, **LCH** y **PSL**). Esto debido a que la configuración de los diagramas determina que, para cumplirlo, el sentido de correlación debe ser necesariamente negativo.

## 7.7. Microtexturas

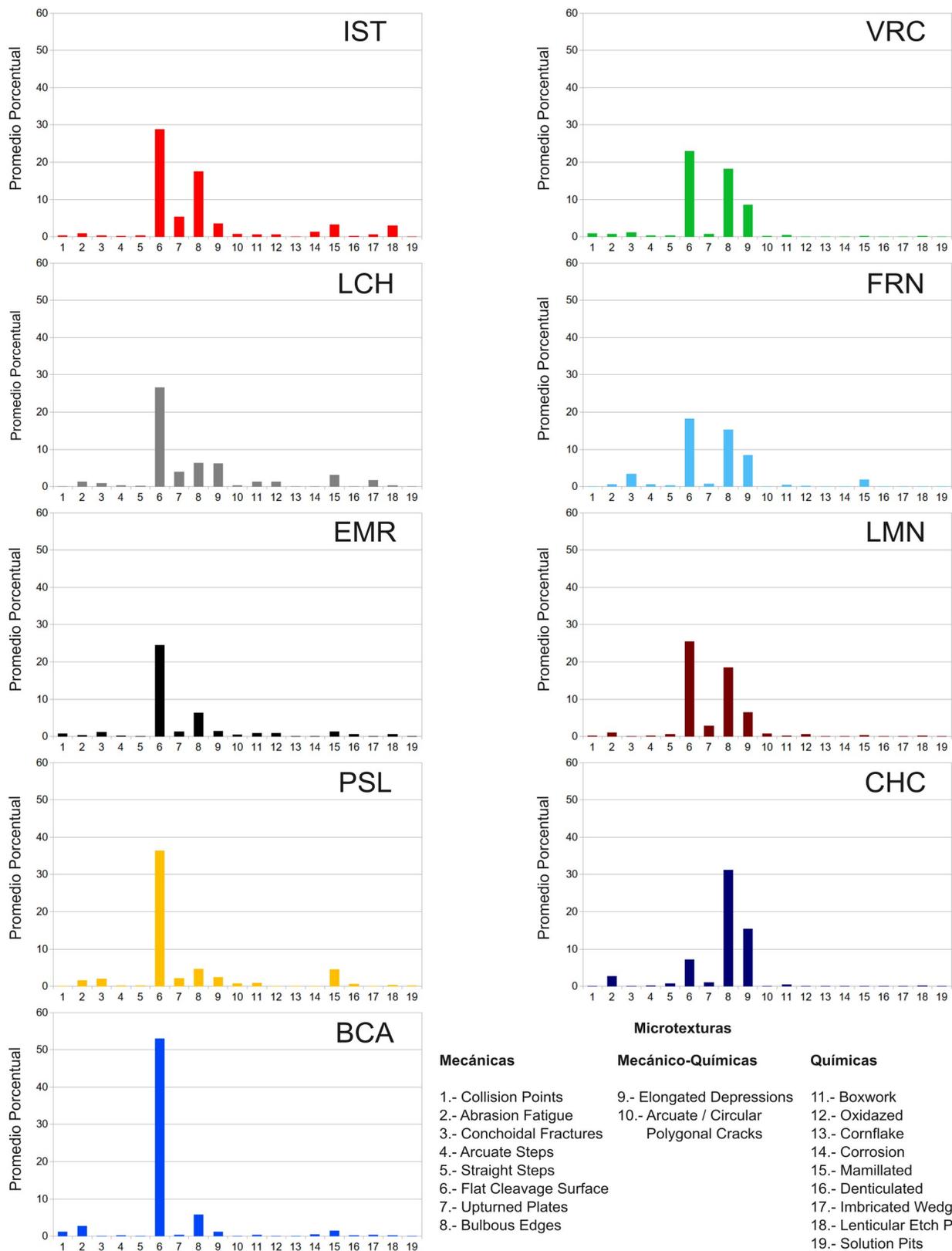
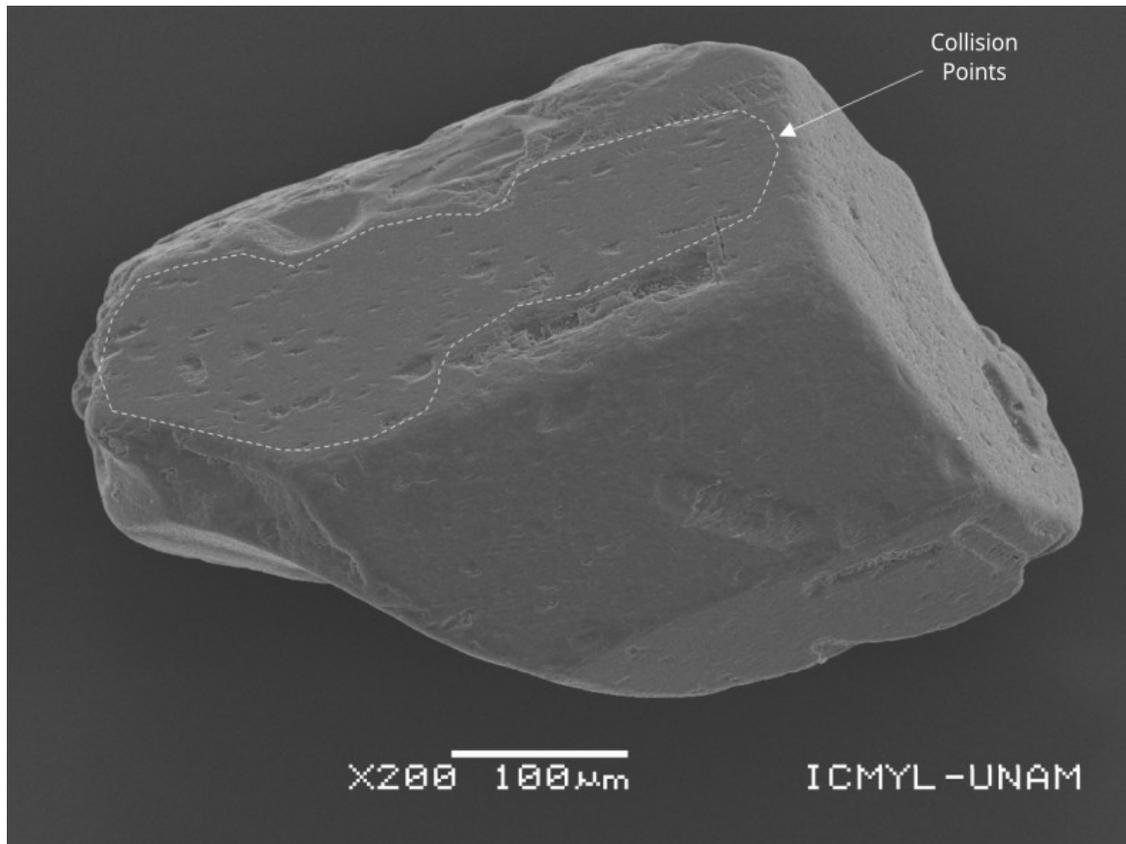


Fig. 27 Gráficos que muestran la proporción promedio de cada microtextura en la superficie de los clinopiroxenos. Anexo IV.

---

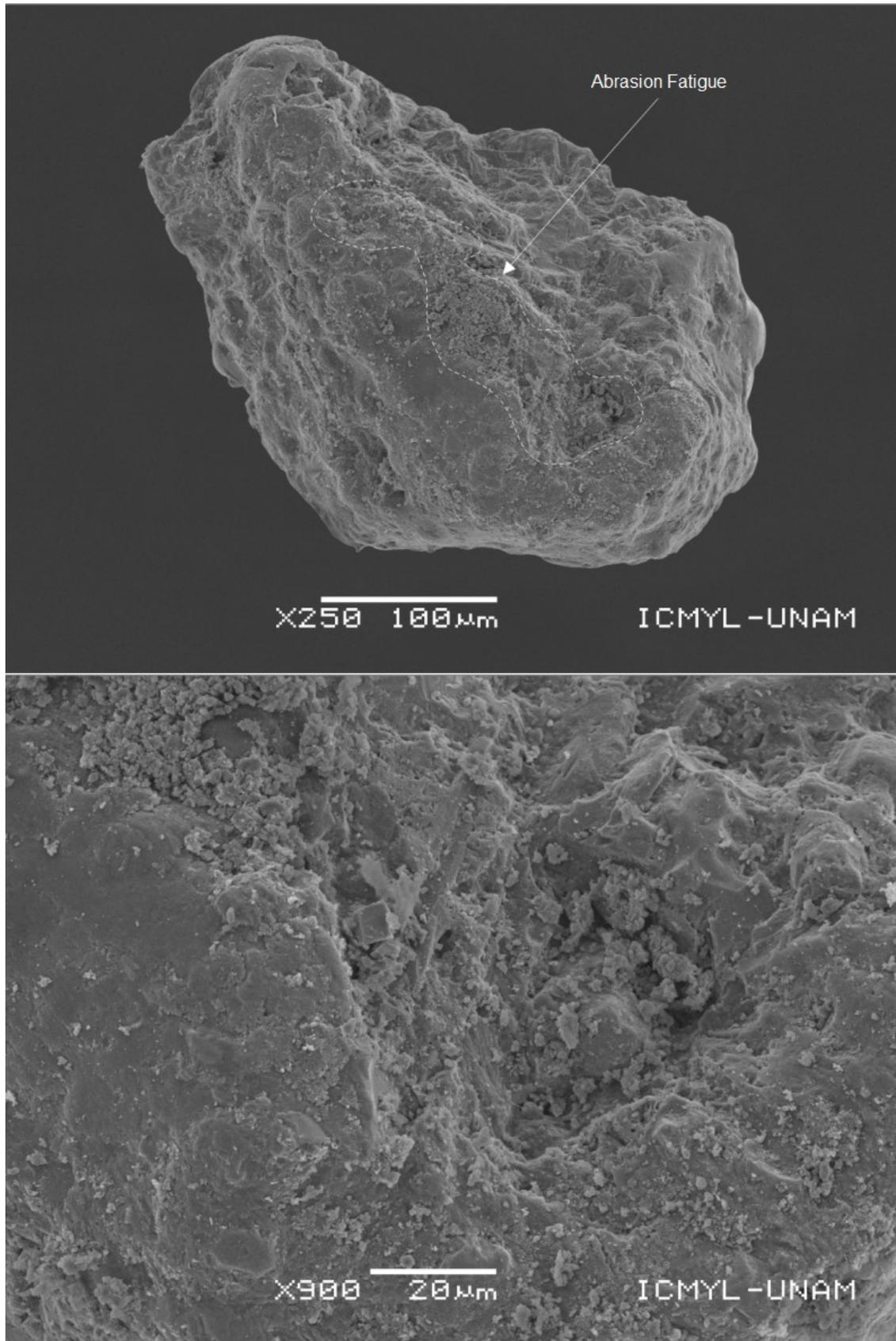
## 7.7.1. Microtexturas Mecánicas

1.- *Collision Points* (Fig. 28): Propuesta para este trabajo. Se observa al clinopiroxeno que conserva la forma geométrica del cristal y sobre una de sus caras donde se distinguen estas pequeñas irregularidades. Por su forma redonda, se asume son generadas por impactos de colisión durante el transporte. Debido a que están en la capa más superficial del cristal, y que este conserva su forma geométrica, se propone como la primera microtextura impresa sobre la superficie del clinopiroxeno.



**Fig. 28** Microtextura Collision Points.

2.- *Abrasion Fatigue* (Fig. 29): Son partículas adheridas sobre la superficie del grano. Posiblemente sea la evolución de los Collisions Points, ya que, durante el resto de transporte, los granos siguen padeciendo varias colisiones con el resto de las partículas. Esto paulatinamente destruiría la capa más superficial, logrando así, dejar sus remanentes en la superficie del grano (Mahaney, 2002). Porter (1962) reportó que los periodos largos de vibración incrementan el daño sobre la superficie de los granos. En este sentido, es probable que esta microtextura sea producto de la sonicación (Vargas et al., 2007).

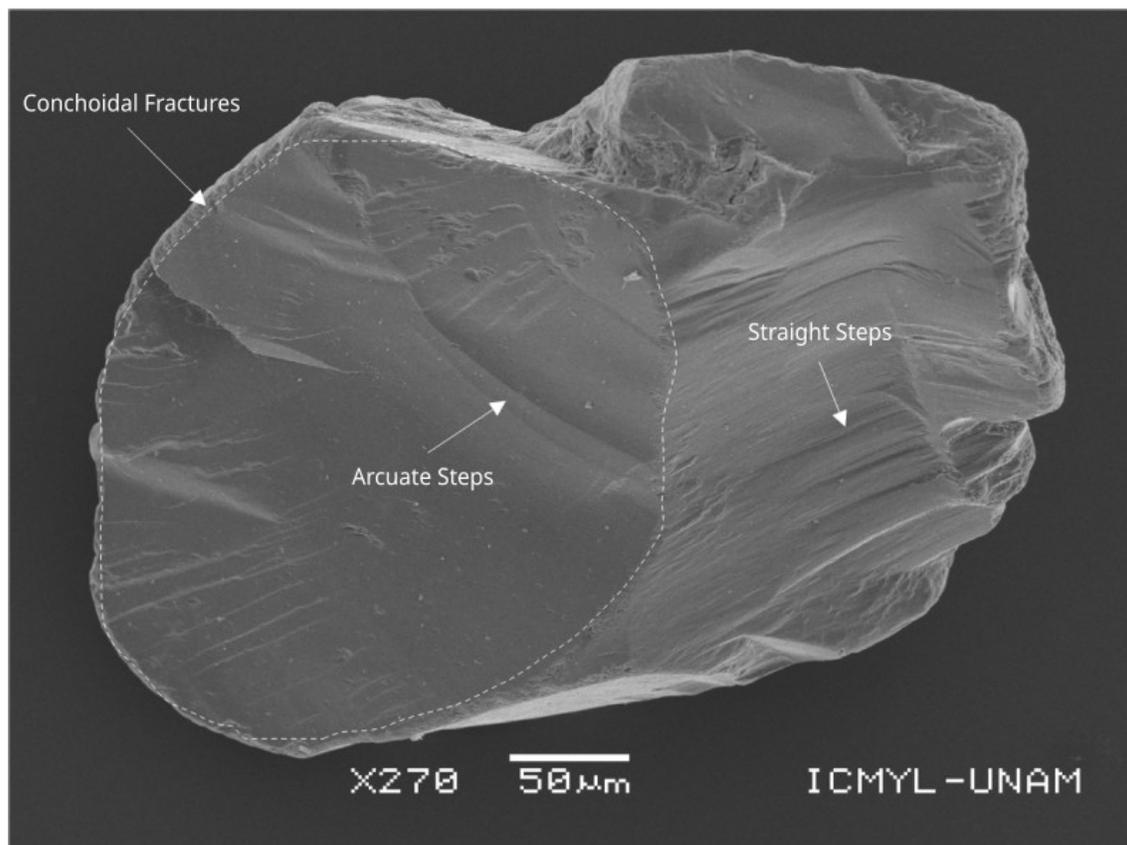


*Fig. 29* Microtextura Abrasion Fatigue.

3.- *Conchoidal Fractures* (Fig. 30): Estos son los típicos patrones curvos de ruptura en forma de concha. Se producen por un fuerte impacto o presión sobre la superficie del grano. A medida que la onda de presión se propaga a través de la red cristalina, se genera la apariencia acanalada de la fractura. La fractura en los granos litorales son rectos, mientras que en los granos eólicos están ligeramente curvados tendiendo adoptar la forma de un plato ([Krinsley et al., 1976](#); [Mahaney, 2002](#); [Vos et al., 2014](#); [Mejía-Ledezma et al., 2020](#)).

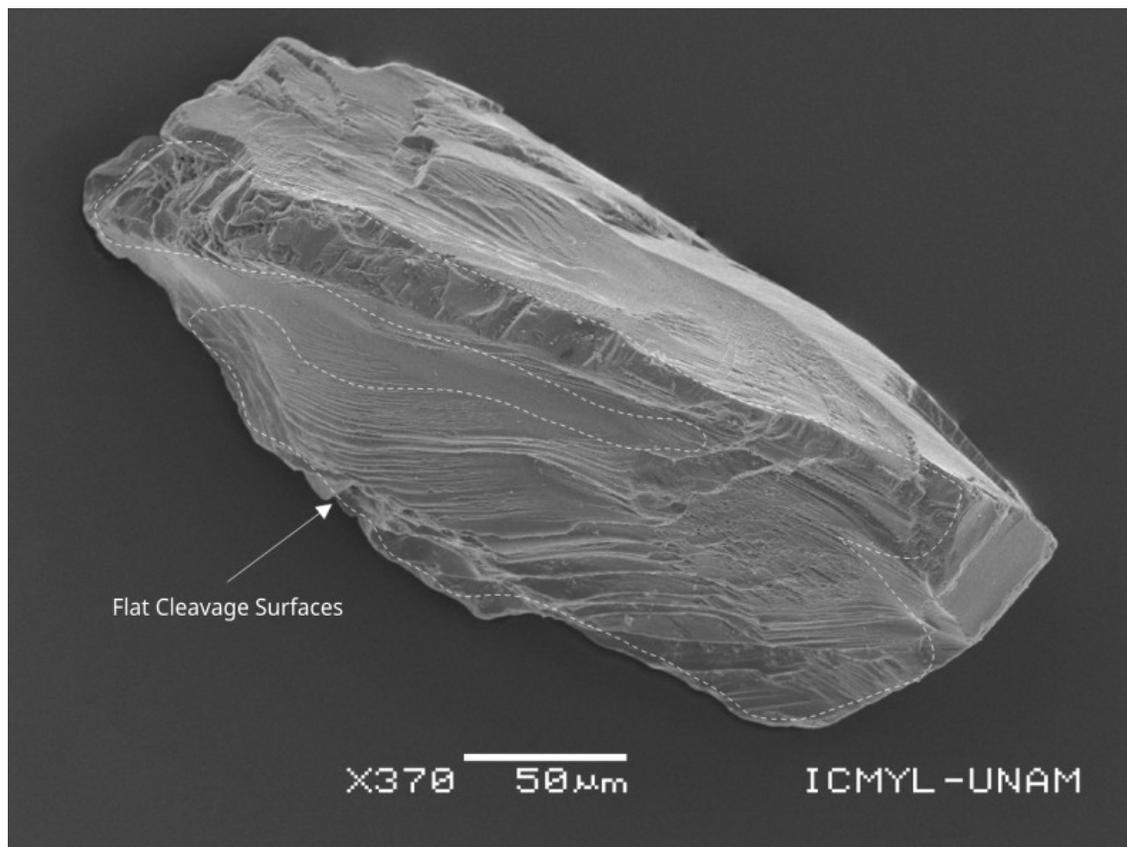
4.- *Arcuate Steps* (Fig. 30): Se forman durante impactos o presiones cuando el plano de fractura concoidea se cruza con los planos de ruptura del cristal. Por tanto, están genéticamente relacionadas con las fracturas concoideas ([Krinsley et al., 1976](#); [Mahaney, 2002](#); [Vos et al., 2014](#); [Mejía-Ledezma et al., 2020](#)).

5.- *Straigh Steps* (Fig. 30): Al igual que *Arcuate Steps*, están genéticamente relacionadas con las fracturas concoideas, formándose también, durante impactos o presiones cuando el plano de fractura concoidea se cruza con los planos de ruptura del cristal ([Krinsley et al., 1976](#); [Mahaney, 2002](#); [Vos et al., 2014](#); [Mejía-Ledezma et al., 2020](#)).



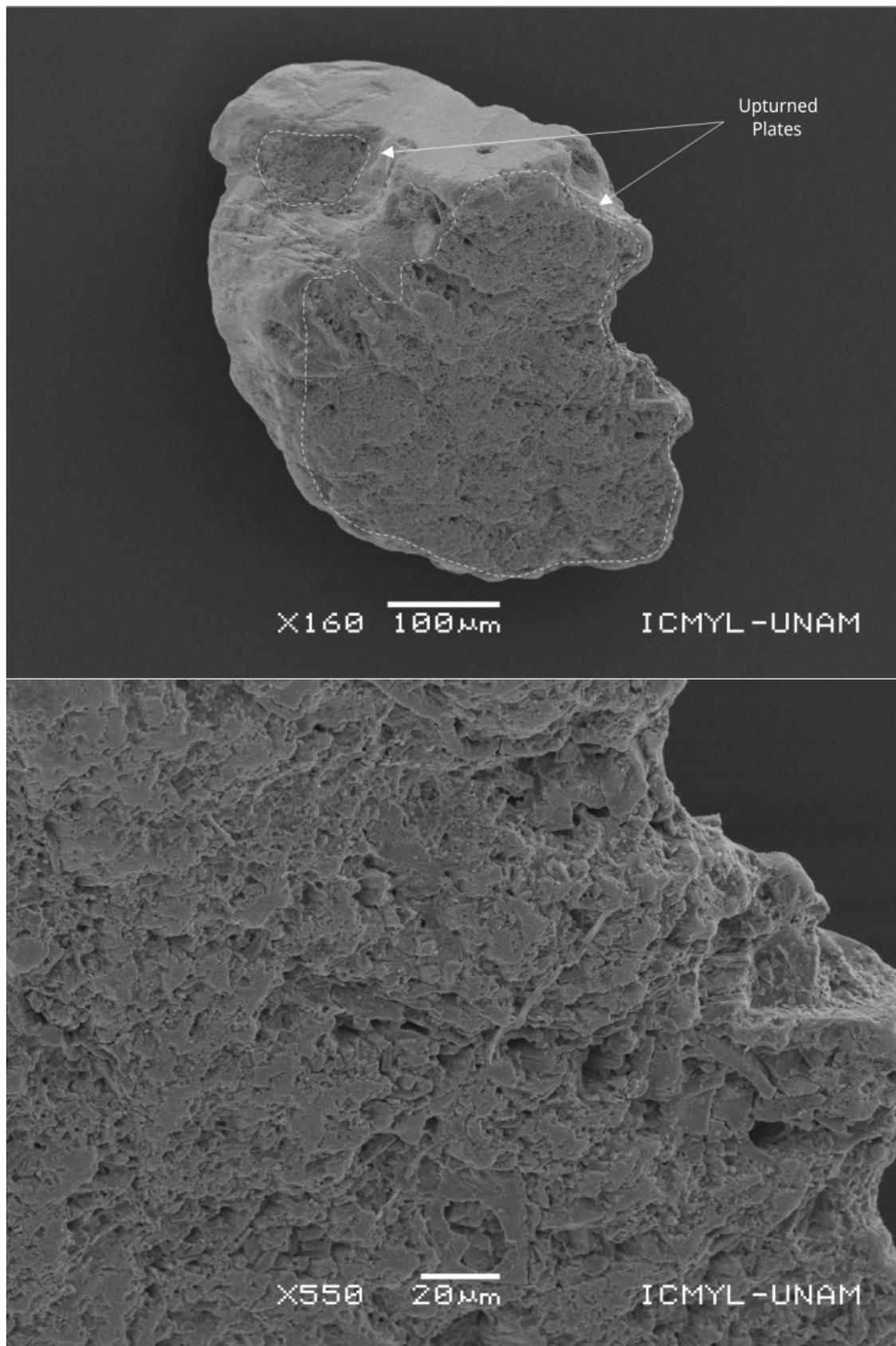
**Fig. 30** Microtextura Conchoidal Fractures, Arcuate Steps y Straigh Steps.

6.- *Flat Cleavage Surface* (Fig. 31): Las superficies de clivaje planas son patrones de rotura que se desarrollan paralelos a los planos de clivaje, como consecuencia del menor número de enlaces Si-O en estas orientaciones. Su formación se atribuye a ambientes fluviales, intermareales, glaciales, y escasamente, a ambientes eólicos (Kransley et al., 1976; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al., 2020).



**Fig. 31** Microtextura Flat Cleavage Surface.

7.- *Upturned Plates* (Fig. 32): Las placas volteadas se expresan como una serie de placas delgadas y paralelas, orientadas en algún ángulo con respecto a la superficie del grano. Por lo general, tienen un contorno dentado y, a menudo, tienen una altura irregular y están rotas en la parte superior. Se forman cuando los planos de clivaje se rompen durante colisiones de alta energía. Estas son una característica en los granos de ambientes fluviales, marinos intermareales, y, escasamente, en ambientes eólicos (Kransley et al., 1976; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al., 2020).

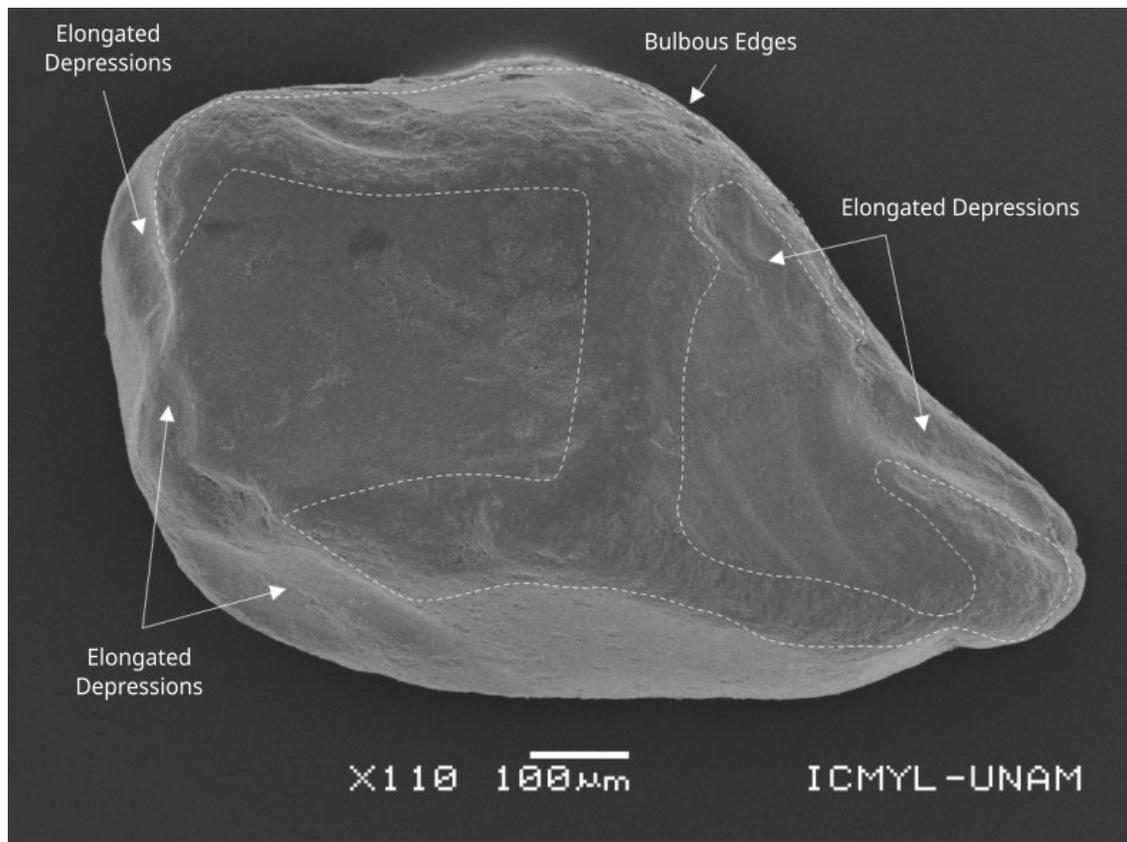


*Fig. 32* Microtextura Upturned Plates.

8.- *Bulbous Edges* (Fig. 33): Los bordes bulbosos son bordes de grano prominentes, salientes y redondeados en forma de curva parabólica. El redondeo de los bordes y las protuberancias se atribuye a la rotación de los granos. Por lo tanto, la aparición de bordes bulbosos es un diagnóstico para las fases de transporte eólico. Se observa que los bordes bulbosos a menudo ocurren simultáneamente con depresiones alargadas suavizadas o pulidas (Krinsley et al., 1976; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al., 2020).

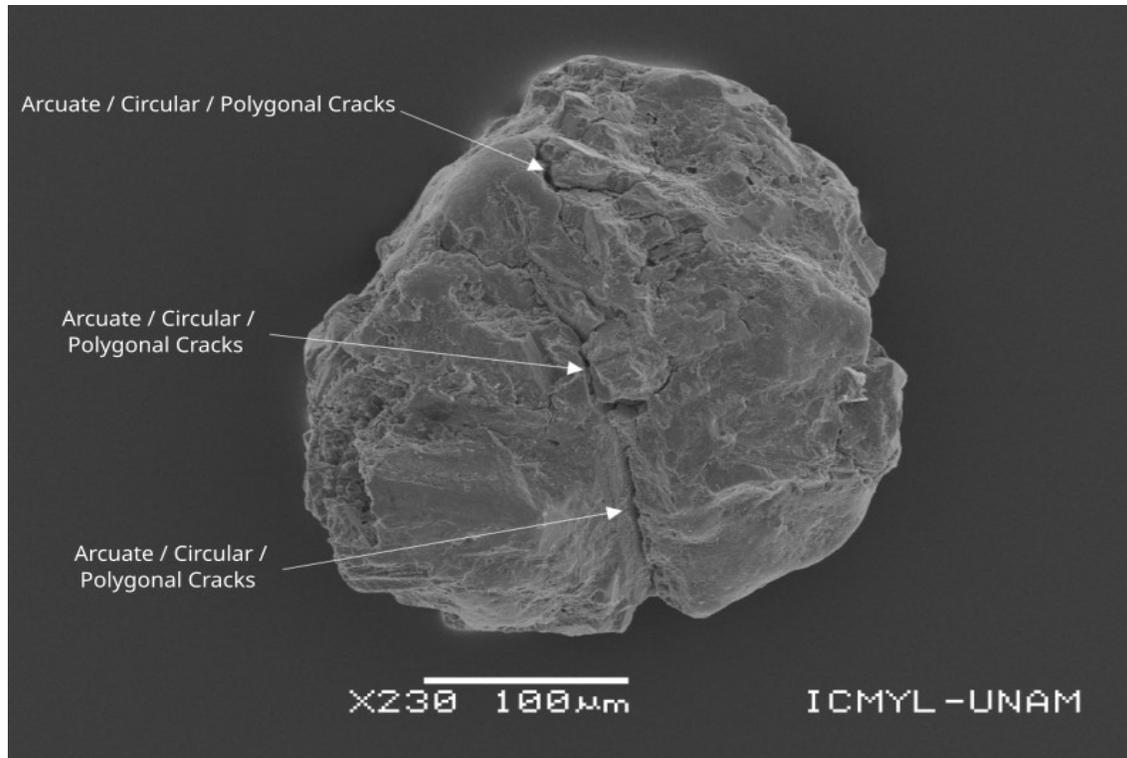
### 7.7.2. Microtexturas Mecánico-Químicas

9.- *Elongated Depressions* (Fig. 33): Las depresiones alargadas se presentan como grandes concavidades. Su formación se atribuye al transporte eólico de alta energía en el que se producen impactos directos entre granos saltantes. A menudo se presentan junto con bordes bulbosos y se encuentran lisas (Krinsley et al., 1976; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al., 2020).



**Fig. 33** Microtexturas Bulbous Edges y Elongated Depressions.

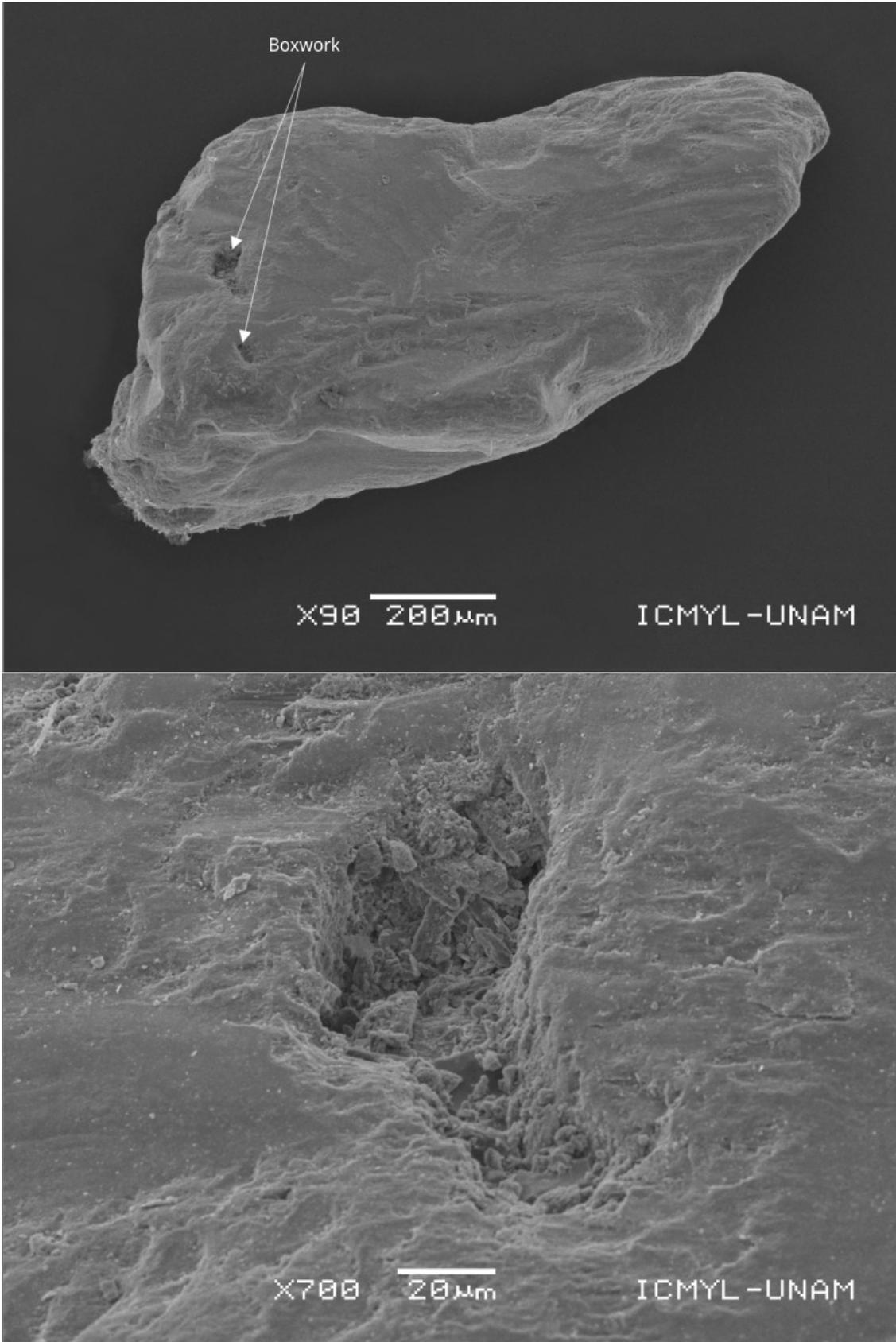
10.- *Arcuate / Circular / Polygonal Cracks* (Fig. 34): Las grietas arqueadas, circulares y poligonales tienen un contorno irregular. Se forman por procesos físicos y/o químicos, pudiendo producirse por la cristalización de sales. Raramente se han observado grietas en dunas costeras y arenas eólicas periglaciales, mientras que ocurren escasamente en granos de desiertos tropicales (Mejía-Ledezma et al., 2020; Vos et al., 2014; Mahaney, 2002; Krinsley et al., 1976).



**Fig. 34** Microtexturas Arcuate / Circular / Polygonal Cracks.

### 7.2.3. Microtexturas Químicas

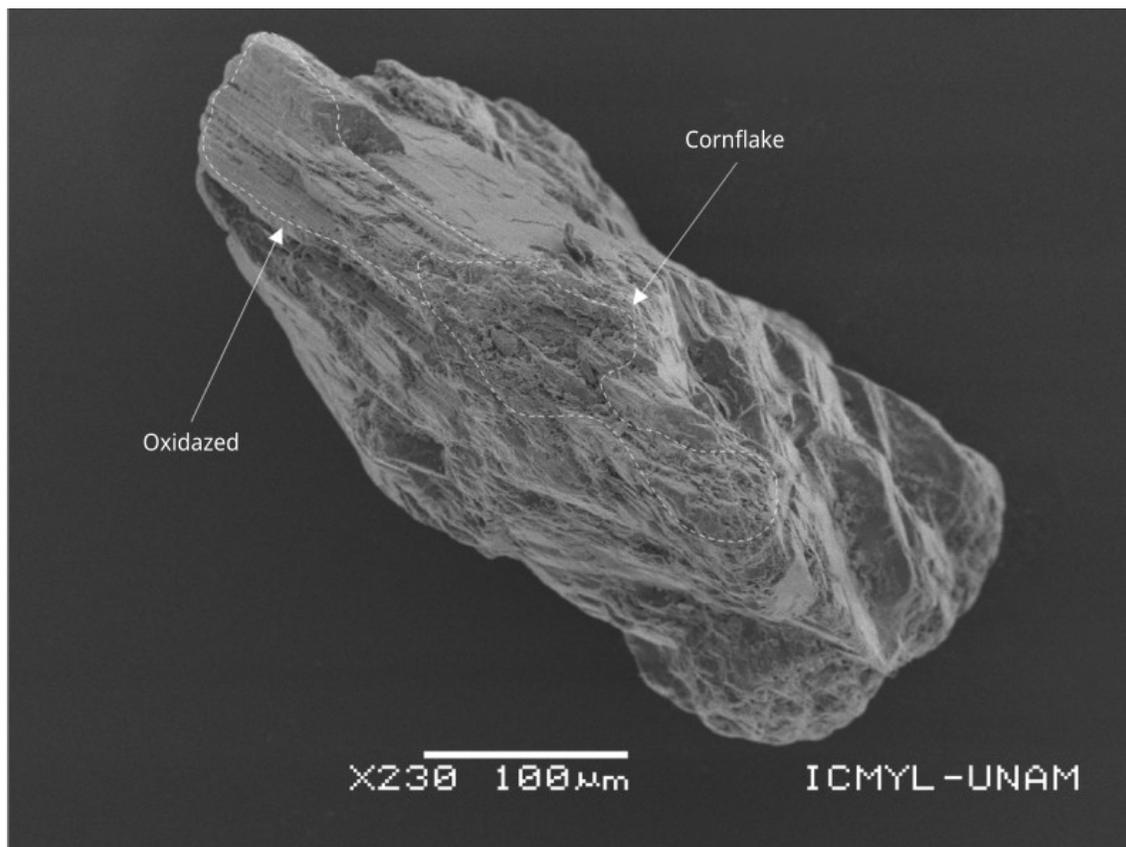
11.- *Boxwork* (Fig. 35): La microcaja se presenta como pequeñas fosas rellenas de material de alteración. Su formación inicia por la entrada de agua al grano (¿a través de grietas o el clivaje?), donde reacciones químicas reemplazan al piroxeno por material de alteración. En algún momento, las capas más externas del cristal se vuelven susceptibles a la ruptura mecánica, mejorando el acceso de fluidos, por lo que favorecen una disolución más completa del piroxeno (¿primera etapa de Solution Pits?) (Velbel & Barker, 2008).



*Fig. 35* Microtextura Boxwork.

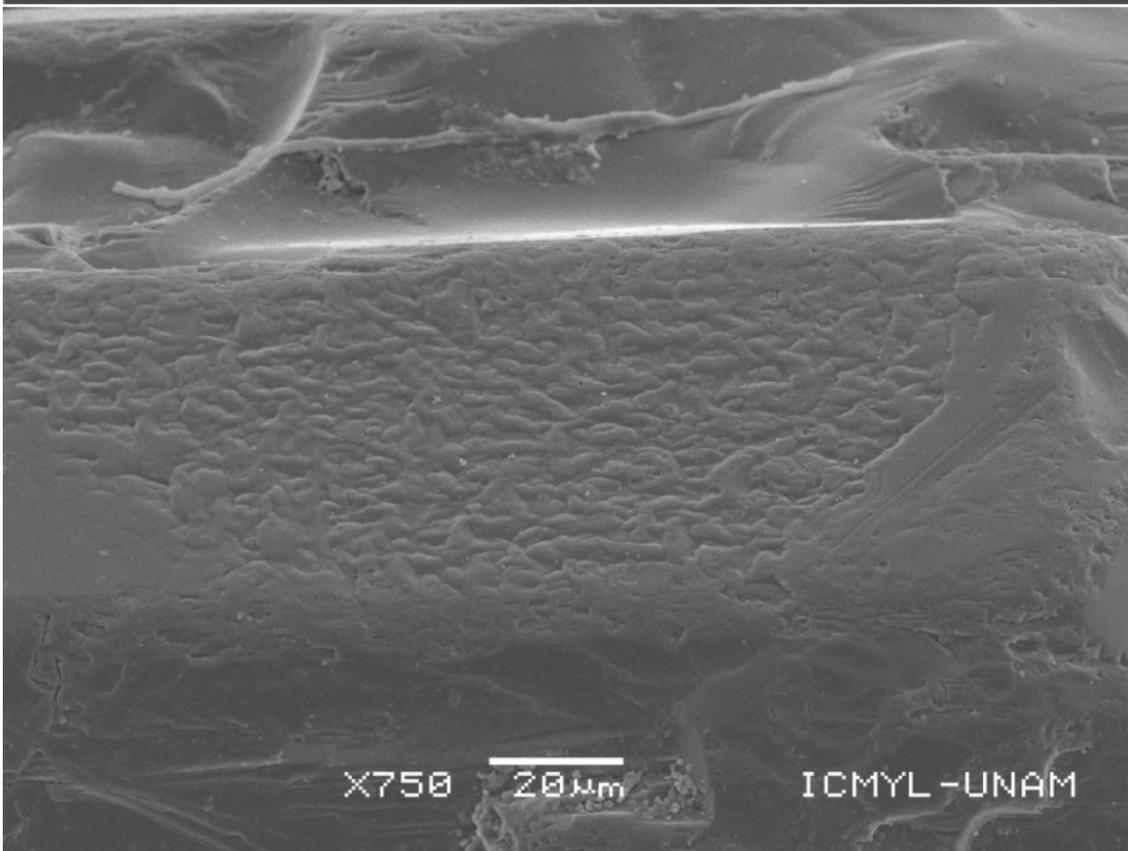
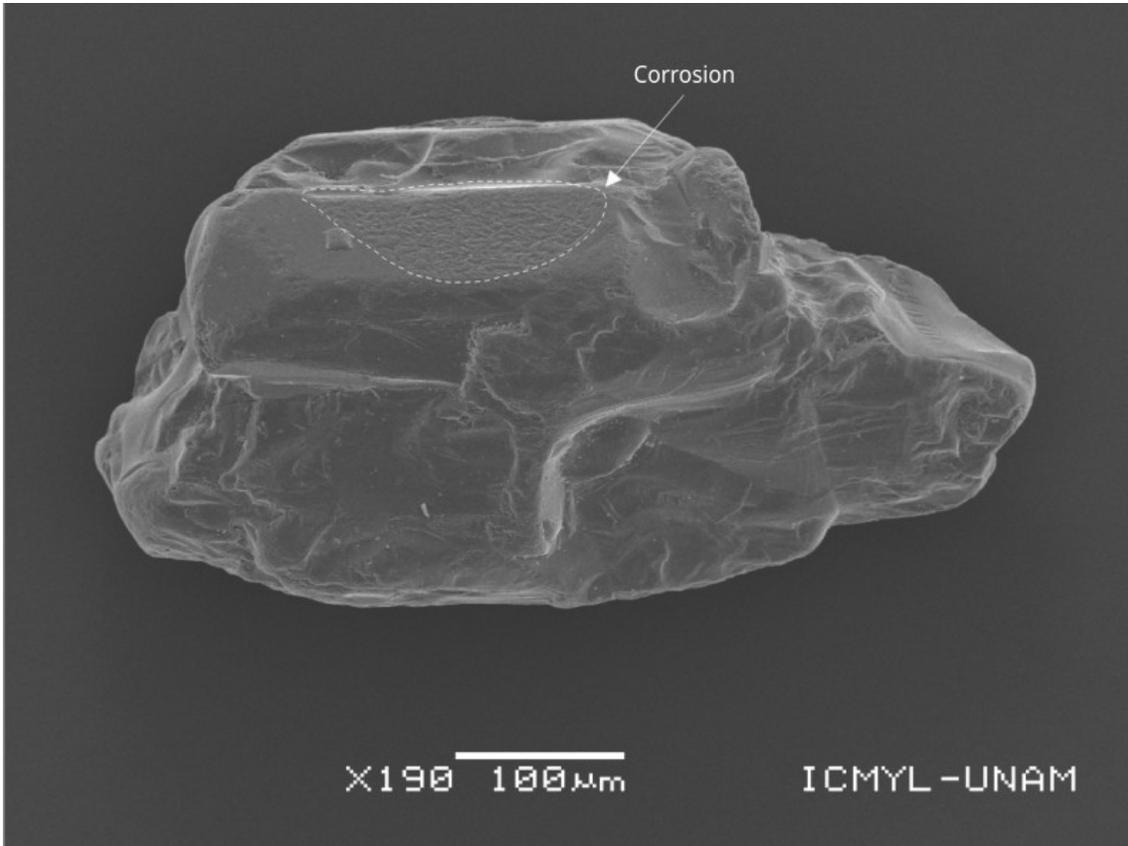
12.- *Oxidazed* (Fig. 36): Se presentan como líneas paralelas extensas. Estas coinciden con la dirección de exfoliación, lugar donde se inicia la alteración de la augita (Deer et al., 2013). La oxidación sobre los olivino, piroxenos y anfíboles puede originar la estructura de líneas paralelas extensas (Maresch, 1994; Khisina, 1995).

13.- *Cornflake* (Fig. 26): Se presenta como copos dispuestos paralelamente a la dirección de exfoliación. Aparece asociada a la microtextura oxidazed, por lo que la microtextura cornflake, podría representar etapas de alteración posteriores. Análisis de la microtextura cornflake han mostrado abundante Si, más Fe y Al, y menos Ca y Mg, en comparación con valores convencionales del piroxeno (Delvigne, 1983; Velbel & Barker, 2008).



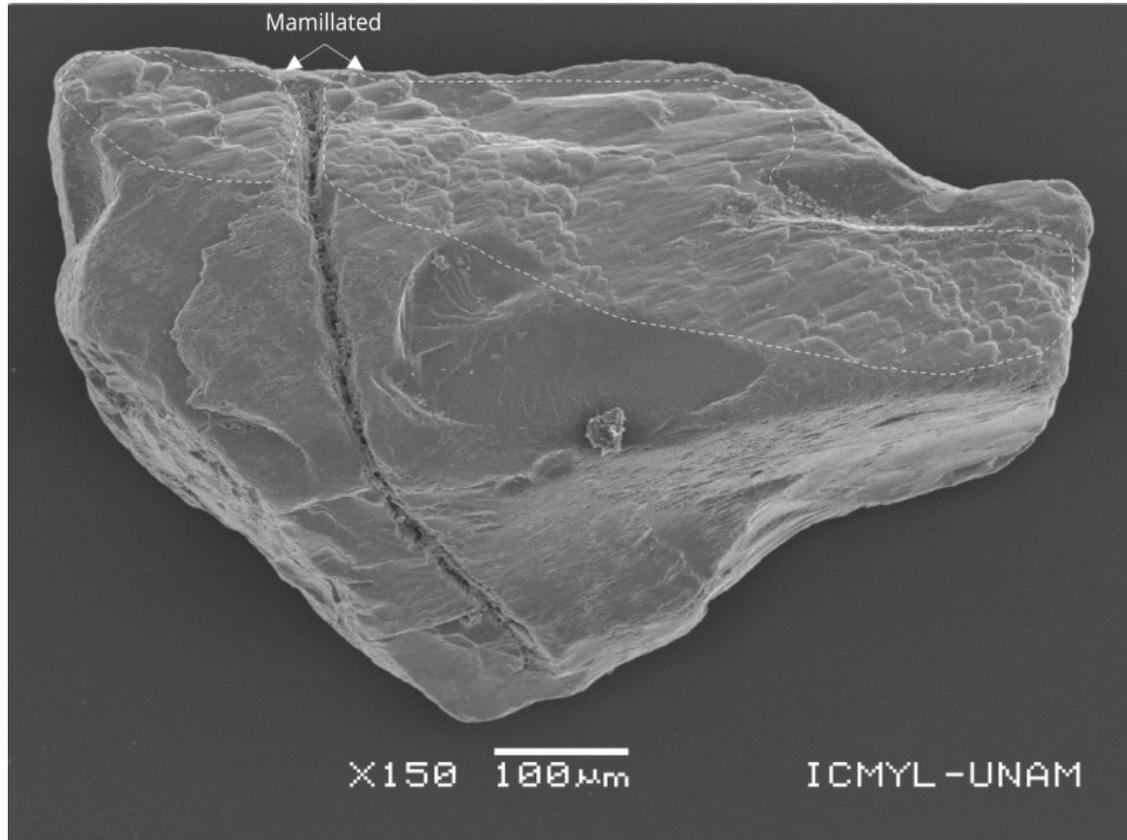
**Fig. 36** Microtexturas Oxidazed y Cornflake.

14.- *Corrosion*: Propuesta para este trabajo (Fig. 37). Se observa al clinopiroxeno conservando la forma geométrica del cristal, siendo en una de sus caras donde se distinguen estas pequeñas irregularidades. Por su aspecto, y porque se presentan en la capa más superficial del cristal, se propone como la primera etapa de alteración química generada sobre la superficie del clinopiroxeno.



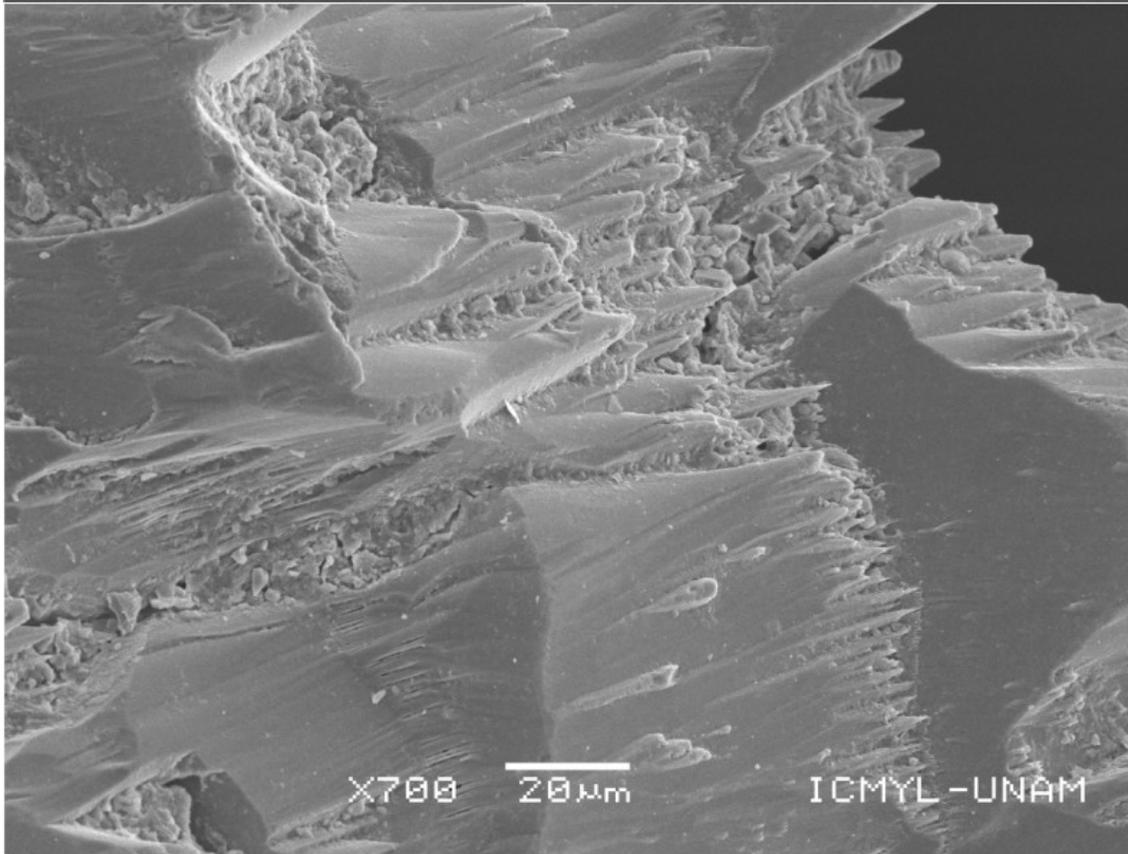
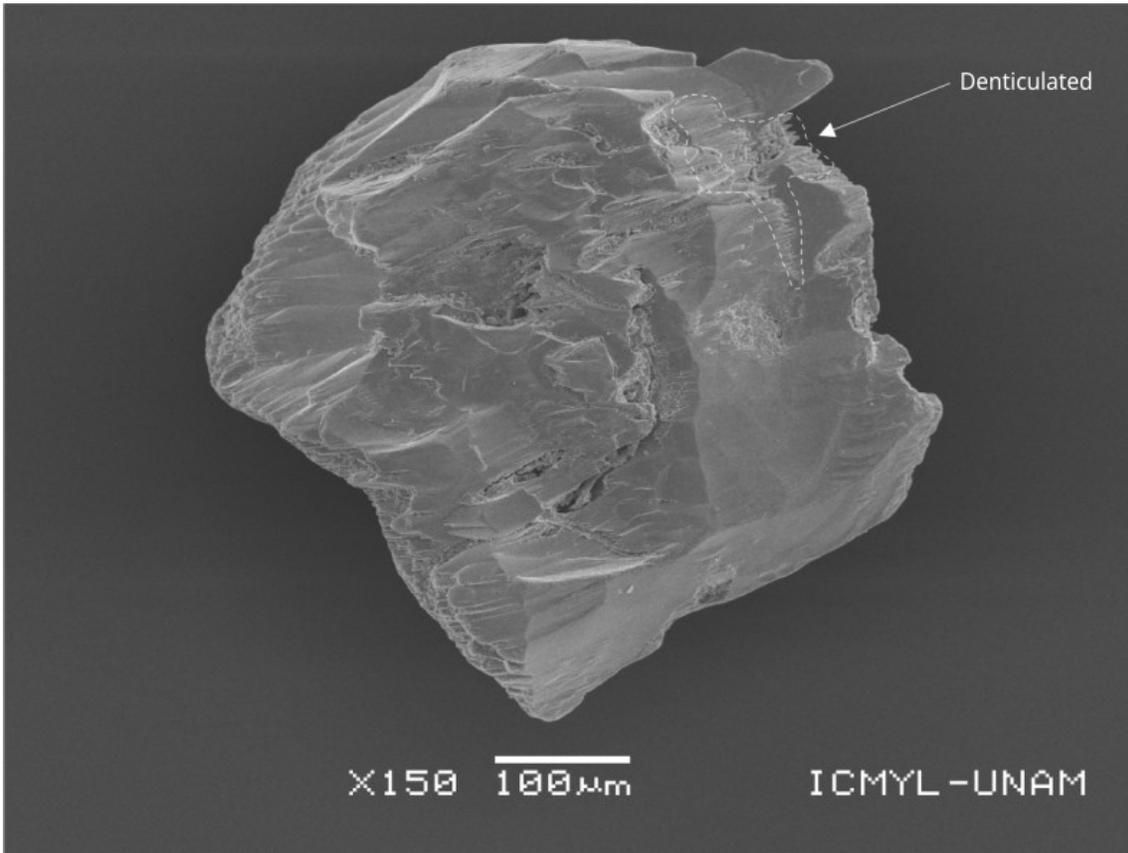
**Fig. 37** Microtextura Corrosion.

15.- *Mamillated* (Fig. 38): Se presenta como protuberancias globulares dispuestas en forma de teja. Se forma por corrosión acuosa (¿segunda etapa de la microtextura corrosión propuesta en este trabajo?). También ha sido reportada en granates y olivinos (Gravenor & Leavitt, 1981; Velbel & Ranck, 2007).



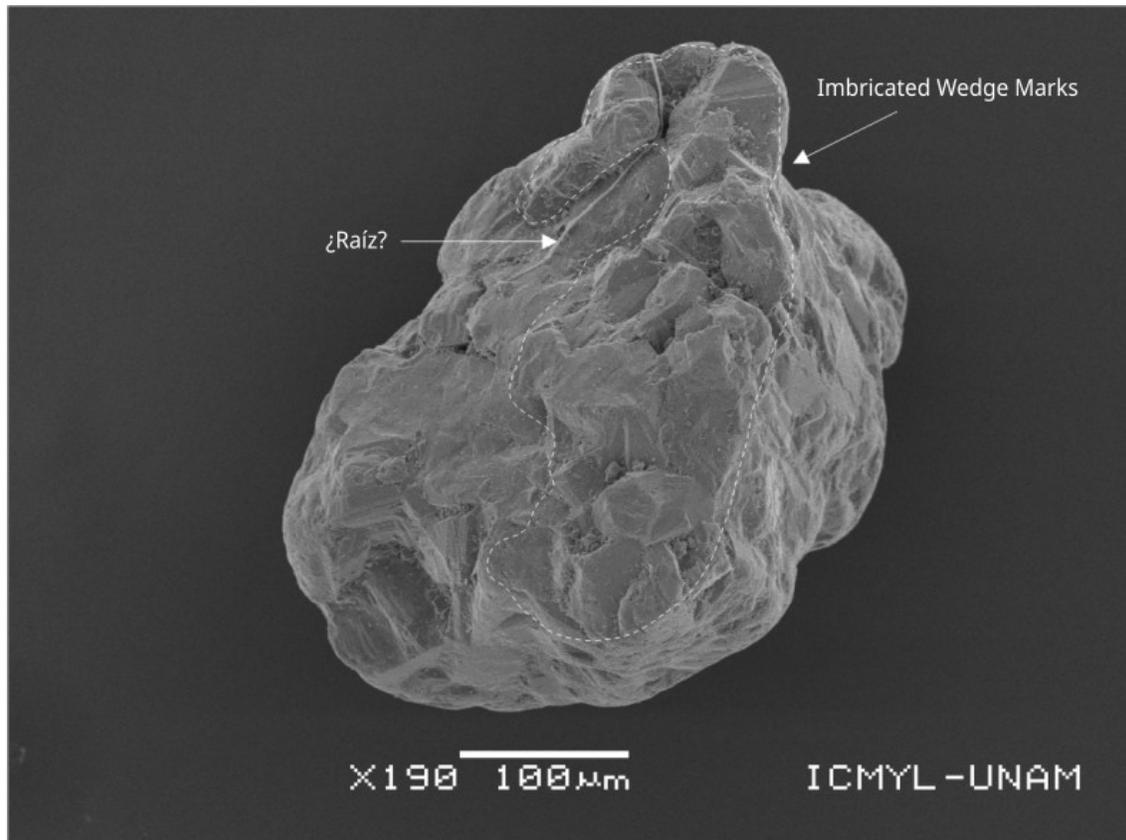
*Fig. 38* Microtextura Mamillated.

16.- *Denticulated* (Fig. 39): Se presenta en forma de dentículos apicales (Velbel, 2007). Estudios de laboratorio realizados a pH bajo (<4) y/o temperatura alta (50–90 °C) formaron dentículos apicales similares a las observadas en perfiles de suelos naturales erosionados (Brantley & Chen, 1995; Chen & Brantley, 1998). Por el contrario, experimentos de disolución de 30 días a pH circumneutral y 22 °C no dieron como resultado la formación de dentículos apicales (Werner et al., 1995). Sin embargo, dentículos apicales parecidos a los observados típicamente en sistemas naturales fueron reportados en experimentos de 60 días (Phillips-Lander et al., 2017). Esto sugiere que la duración de la alteración acuosa puede ser el principal control en la formación de esta microtextura.



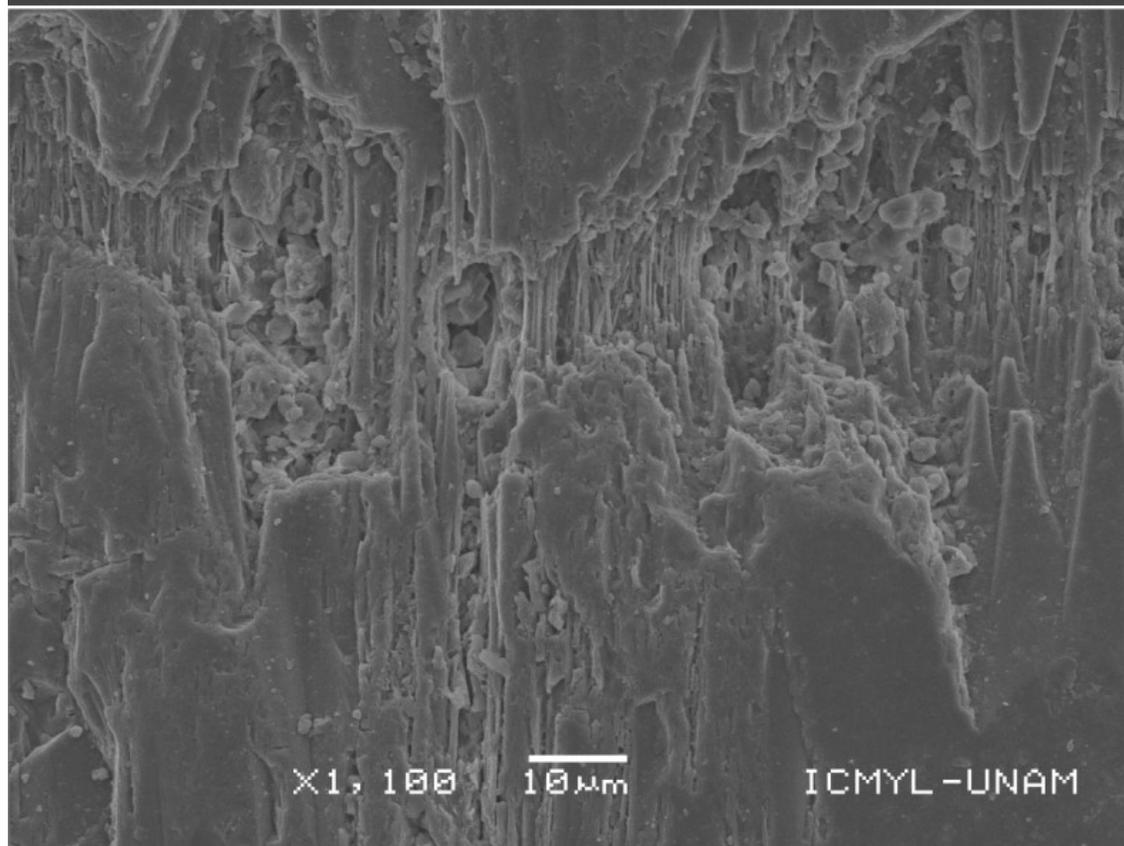
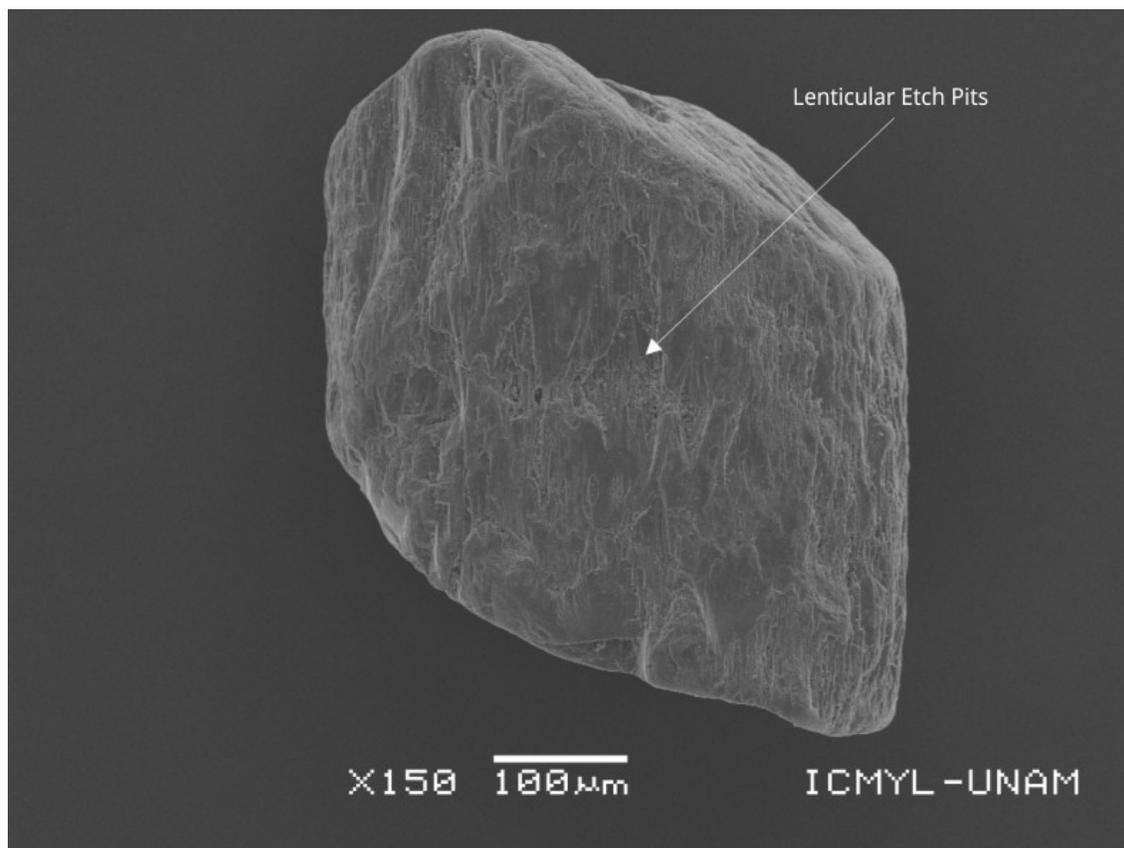
*Fig. 39* Microtextura Denticulated.

17.- *Imbricated Wedge Marks* (Fig. 40): Se presentan como poliedros facetados de aparente relieve positivo, similares a abundantes crecimientos excesivos. Se forman por disolución de superficies preexistentes. El tiempo requerido es mayor al tiempo de depósito y al tiempo de exposición del material, por lo que esta microtextura es considerada prepedogénica. [Velbel et al. \(2007\)](#), la reportaron en granates.



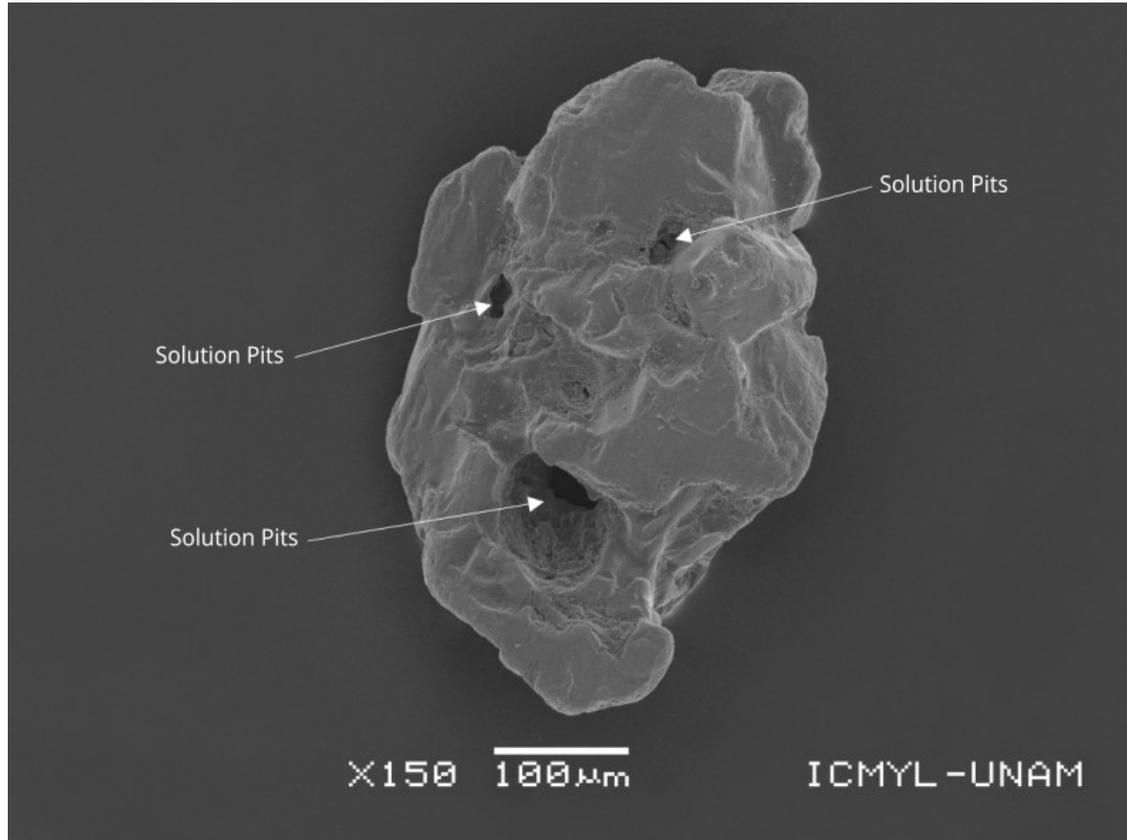
**Fig. 40** Microtextura Imbricated Wedge Marks.

18.- *Lenticular Etch Pits* (Fig. 41): Se presentan como “estalactitas y estalagmitas”. Se generan por el crecimiento y la coalescencia de estructuras de disolución previas, formando entre sí, “pilares” que consisten en el grano no disuelto. [Velbel \(2007\)](#) la reportó en hornblenda.



**Fig. 41** Microtextura Lenticular Etch Pits.

19.- *Solution Pits* (Fig. 42): Se presentan como pozos en la superficie del cristal. Se forman por disolución, atribuida al proceso diagenético y al proceso edafológico. Su tamaño va a depender de la actividad química y la permanencia del grano en el depósito (Vos et al., 2014).



**Fig. 42** Microtextura Solution Pits.

---

## 8. Discusión

### 8.1. Compacidad vs Tamaño de Grano

Las pruebas de correlación entre la compacidad y el tamaño de grano (Fig. 17 ... Fig. 26) rechazan estadísticamente el aumento de la compacidad acompañado de la disminución del tamaño de grano, y con respecto a la dirección lineal de transporte del sedimento (barlovento → cresta → sotavento) (Folk, 1970; Pettijohn et al., 1972). Esto sugiere dos escenarios determinantes en la falta de correlación:

1) El ambiente de alta energía que transporta a los clinopiroxenos, conlleva a que los granos afilen sus bordes y/o se fracturen debido a las colisiones generadas cuando son transportados en *bed-load* hacia las dunas (Pye & Tsoar, 2009; Resentini et al., 2018), lo que disminuye el tamaño y posiblemente la compacidad. Sin embargo, es más probable que los granos afilen sus bordes y no que se fracturen, así lo demuestra los bajos porcentajes superficiales de *Conchoidal Fractures* (Fig. 27; Fig. 30), microtextura que por su génesis representaría la evidencia más clara de alguna acción de ruptura en los granos. Además, los altos porcentajes superficiales de *Flat Cleavage Surface* indicarían que el grano cuando afila sus bordes deja expuestos sus planos de exfoliación, sugiriendo que las condiciones energéticas no superan el umbral de fractura de los clinopiroxenos (Fig. 27; Fig. 31).

2) La rotación direccional, junto con la variabilidad en la intensidad del viento incidente sobre el sistema de dunas (Fig. 6), representaría un ligero cambio en la dirección dominante del transporte y depósito del clinopiroxeno. Este proceso sería capaz de generar una mezcla de granos recientes con granos un poco más antiguos, y en consecuencia, una combinación de clinopiroxenos con diferentes tamaños y compacidades (Fig. 15; Fig. 16), inhibiendo la correlación entre la compacidad y el tamaño de grano en una dirección lineal de barlovento → cresta → sotavento. Esto se respalda por las estructuras sedimentarias cruzadas, propias de las dunas, y cuya formación responde al cambio en la direccionalidad del viento (Folk, 1970; Arche, 2010; Garzanti et al., 2015). Por lo tanto, se podría señalar al cambio en la direccionalidad de los vientos, como el agente responsable para que no exista correlación significativa entre el tamaño de grano y la compacidad en las dunas costeras. Simultáneamente, la variabilidad en la intensidad de los vientos determinaría el proceso de concentración del clinopiroxeno en las dunas. Stapor (1973) emitió una hipótesis, donde planteó “que los vientos relativamente suaves, capaces de mover solo minerales más ligeros de la arena de duna, y que soplan a través de playas con depósitos de arena negra, provocan la concentración de minerales pesados eólicos”, haciendo referencia al proceso de deflación. Esta hipótesis, pareció condensar sus observaciones que se acentúan en dos fases. La primera fase, considerada como un evento energético normal, es el transporte conjunto de los componentes líticos y minerales en el depósito. La segunda fase, consecuencia de eventos energéticos anormales, o bien, de “vientos más suaves de los normal”, es la remoción de minerales ligeros, permitiendo así, la concentración de los minerales pesados. Esto indicaría que la acumulación de minerales pesados en las dunas se debe en mayor medida a la variabilidad de las intensidades energéticas, y no, a la dirección del viento incidente sobre el depósito.

Es posible que tal combinación de escenarios, transporte en *bed-load* y cambios en la direccionalidad e intensidad del viento, se refleje en los diferentes intervalos de valores mínimos y máximos de tamaño de grano y compacidad (Fig. 15; Fig. 16), ya que los vientos intensos nutren a la duna de material

---

nuevo, mientras que los vientos suaves, proporcionan un modelado continuo al material ya depositado (Bagnold, 1954; McCullagh et al., 1972). En general, esto indica la persistente dinámica de los clinopiroxenos en el ambiente de dunas costeras, ya sea por las diferentes direcciones del viento, o bien, por las diferentes intensidades eólicas a las que se somete.

## 8.2. Microtexturas

Los gráficos del porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos, muestran un claro dominio de las microtexturas de origen mecánico sobre las microtexturas de origen químico, y quienes presentan una marcada tendencia en su disminución, desde las localidades del norte, hacia las localidades del sur (Fig. 27). En general, el dominio microtextural en orden decreciente es *Flat Cleavage Surface*, *Bulbous Edges*, *Elongated Depressions*, *Upturned Plates*, *Mamillated*, *Remaining Particles*, *Conchoidal Fractures*, *Boxwork*, *Lenticular Etch Pits*, *Oxidized*, *Arcuate / Circular / Polygonal Cracks*, *Collision Points*, *Straight Steps*, *Imbricated Wedge Marks*, *Arcuate Steps*, *Corrosion*, *Denticulated*, *Solution Pits*, y *Cornflake*. (Fig. 28 ... Fig. 42).

En función de un diagnóstico por localidad, se observa que en **LCH**, **EMR**, **PSL** y **BCA**, la proporción superficial de la microtextura *Flat Cleavage Surface* (**LCH** =  $26.64 \pm 2.70\%$ , **EMR** =  $24.52 \pm 2.10\%$ , **PSL** =  $36.40 \pm 6.09\%$ , **BCA** =  $53.11 \pm 5.96\%$ ) es ampliamente superior a la proporción superficial de la microtextura *Bulbous Edges* (**LCH** =  $6.42 \pm 1.61\%$ , **EMR** =  $6.41 \pm 1.62\%$ , **PSL** =  $4.7 \pm 2.14\%$ , **BCA** =  $5.85 \pm 2.61\%$ ) (Fig. 27; Fig. 31; Fig. 33). La génesis de *Flat Cleavage Surface* es atribuida a los ambientes fluviales, marinos intermareales y, escasamente, al ambiente de dunas costeras. En cambio, *Bulbous Edges* es indicativa para las fases de transporte eólico (Vos et al., 2014). Por otro lado, al tener en cuenta la especificidad de cada microtextura, se sugiere que el desarrollo preponderante de *Flat Cleavage Surface* es durante el transporte fluvial e intermareal, con lo cual, podría considerarse como una microtextura heredada a las dunas desde el ambiente fluvial y litoral (Fig. 5 y Fig. 7). Esto se respalda por la alta proporción de *Flat Cleavage Surface* con respecto a *Bulbous Edges*, lo que indica que el transporte eólico en estas localidades es corto en tiempo y distancia. La causa probable del corto transporte de los clinopiroxenos en estas localidades sería su adjunta ubicación a playas muy estrechas (Fig. 2) lo que favorecería un pronto depósito desde la zona intermareal a las dunas. Este escenario restrictivo para el desgaste de los bordes de los clinopiroxenos se respalda durante los aumentos de marea (Fig. 7), periodos de tiempo en que las playas se estrecharían aún más debido a que la zona intermareal reduciría su distancia con respecto a las dunas. Paralelamente, en **EMR**, **PSL** y **BCA**, el corto transporte eólico de los clinopiroxenos podría verse acentuado por su entorno confinado, circunscrito por las estribaciones más orientales de la FVTM (Fig. 4). Un argumento que apoya esta afirmación, en especial para **PSL** y **BCA**, son sus pequeños rangos de variabilidad en el tamaño de grano (**PSL** = 0.27 mm y **BCA** = 0.31 mm) (Fig.15), sugiriendo que, en estas localidades, los clinopiroxenos se retrabajan hasta casi homogeneizar su tamaño, o quizás, su propio entorno confinado, no permite la mezcla con material nuevo de tamaño variado.

En el caso de **IST**, **VRC**, **FRN** y **LMN**, la proporción superficial de la microtextura *Flat Cleavage Surface* (**IST** =  $28.84 \pm 3.32\%$ , **VRC** =  $23.00 \pm 3.41\%$ , **FRN** =  $18.32 \pm 1.19\%$ , **LMN** =  $25.47 \pm 3.52\%$ ) es similar a la proporción superficial de la microtextura *Bulbous Edges* (**IST** =  $17.58 \pm 3.48\%$ , **VRC** =  $18.24 \pm 3.63\%$ , **FRN** =  $15.36 \pm 2.18\%$ , **LMN** =  $18.51 \pm 2.76\%$ ) (Fig. 27; Fig. 31; Fig. 33). Esto revela un transporte eólico más prolongado de los clinopiroxenos en estas localidades, contrario al transporte

---

corto y restringido de los clinopiroxenos en **LCH**, **EMR**, **PSL** y **BCA**. La similitud en la proporción superficial de *Flat Cleavage Surface* y *Bulbous Edges* en **IST**, **VRC**, **FRN** y **LMN**, sugiere un equilibrio entre el transporte fluvial y litoral con el transporte eólico en las dunas. En consecuencia, la abrasión y el redondeo de los bordes producidos por el viento en los granos no logran desgastar por completo la microtextura *Flat Cleavage Surface* heredada del transporte fluvial y litoral. Particularmente en **IST**, la similitud proporcional de ambas microtexturas probablemente responda a su ubicación. Esta localidad es la ubicada más al norte del área de estudio, sobre las Planicies y Lomeríos del Norte (Fig. 4), circunstancia que permitiría a los clinopiroxenos desplazarse más distancia y por lo tanto, desarrollar de mejor manera *Bolbous Edges*, al grado de equilibrar proporcionalmente a *Flat Cleavage Surface*, inclusive, a pesar de la adjunción de sus dunas a una playa muy estrecha (Fig. 2). Este escenario plantea, posiblemente, un transporte del clinopiroxeno más prolongado a lo largo de la playa antes de su depósito en las dunas.

En las localidades de **VRC** y **FRN** la similitud en la proporción superficial de *Flat Cleavage Surface* y *Bulbous Edges* también sugiere un equilibrio entre el transporte fluvial y litoral, con el transporte eólico de los clinopiroxenos en las dunas (Fig. 27). El sistema dunar de **VRC** se ubica en un tómbolo y es el tercero más extenso del área de estudio (Fig. 2). Este distintivo permitiría que los clinopiroxenos tengan una dinámica ambivalente. Cuando los vientos fluyen NO-SE y N-S, durante el otoño y primera parte del invierno, el aporte sedimentario impera por el flanco norte del tómbolo, mientras que, cuando los vientos fluyen SE-NW durante el verano, el aporte sedimentario impera por el flanco sur (Fig. 6). Este desfase en la incidencia del viento provocaría en los granos de clinopiroxeno un movimiento de vaivén sobre el sistema de dunas (dinámica ambivalente), favoreciendo un desarrollo de *Bolbous Edges*, capaz de equilibrar proporcionalmente a *Flat Cleavage Surface*. Este supuesto escenario implicaría un pronto desgaste en los bordes de los clinopiroxenos y por lo tanto, la pronta pérdida de la microtextura *Flat Cleavage Surface* heredada del transporte fluvial y litoral, a pesar de la cercanas zonas intermareales en ambos flancos del tómbolo donde depositan los clinopiroxenos. Cabe mencionar, que, aunque el régimen de vientos es bidireccional durante el año, la imagen satelital y la morfología del sistema de dunas manifiestan que los vientos con dirección NO-SE dominan el suministro de sedimentos (Fig. 2). Por su parte, el sistema dunar de **FRN** es el segundo más extenso del área de estudio, solo superado por **CHC** (Fig. 2). Esta configuración morfológica de considerable extensión favorecería el transporte eólico más prolongado de los clinopiroxenos y, por lo tanto, el desarrollo de *Bolbous Edges* que permite alcanzar un equilibrio proporcional en la superficie de los granos con *Flat Cleavage Surface*. En cuanto al sistema dunar de **LMN**, en donde también la proporción superficial de *Flat Cleavage Surface* es similar a la proporción superficial de *Bulbous Edges*, ocurriría un escenario dinámico similar a **IST**. Las dunas de la **LMN** se encuentran depositadas junto a una playa muy estrecha. Sin embargo, la misma playa posee una prolongada extensión paralela a la zona intermareal donde se depositan los clinopiroxenos (Fig. 2). Estas condiciones morfológicas, posiblemente, faciliten un transporte eólico más prolongado del clinopiroxeno a lo largo de la playa antes de su depósito en las dunas. Este escenario dinámico proporcionaría las condiciones óptimas para el redondeo de los bordes de los clinopiroxenos y por lo tanto, para el desarrollo de *Bulbous Edges*, a tal grado de equilibrar proporcionalmente a *Flat Cleavage Surface* desarrollada y heredada por el transporte fluvial y litoral.

En el sistema dunar de **CHC** la microtextura *Bulbous Edges* (**CHC** =  $31.18 \pm 3.02\%$ ), asociada con a *Elongated Depressions* (**CHC** =  $15.46 \pm 2.48\%$ ) (Fig. 33), reemplazan el dominio proporcional sobre la superficie de los clinopiroxenos de *Flat Cleavage Surface* (**CHC** =  $7.27 \pm 0.84\%$ ) (Fig. 27). Este

---

sistema dunar es el más extenso del área de estudio (Fig. 2) y algunas de sus dunas alcanzan los ~50 m de altura. Esta configuración morfológica le otorga amplios barloventos favoreciendo un transporte eólico prolongado sobre ese subambiente. Esto permite un desarrollo importante de *Bolbous Edges* asociado con *Elongated Depressions* sobre la superficie de los clinopiroxenos, lo que hace desaparecer casi por completo a la microtextura *Flat Cleavage Surface* heredada por el transporte fluvial y litoral. Con base en lo anterior, se argumenta que el desarrollo microtextural de los clinopiroxenos es determinado por las condiciones morfodinámicas de cada localidad. Por consiguiente, se sugieren 3 factores decisivos para el desarrollo de las características microtexturales sobre las superficies de los clinopiroxenos depositados en las dunas costeras:

1) Régimen de viento: la direccionalidad y magnitud, es decir, el vector del viento ejerce un esfuerzo cortante sobre la capa más superficial del depósito para movilizar los granos. La zona intermareal donde se depositan los clinopiroxenos, además de estar expuesta a la acción del oleaje, también se encuentra expuesta a la acción eólica. El viento es competente para desplazar las partículas del tamaño de arena, desde la playa hacia el sistema de dunas, cuando supera los 6 m/s aproximadamente (Fryberger y Dean, 1979). En este contexto, las características de los clinopiroxenos depositados en las dunas costeras dependen tanto de su tránsito por la zona intermareal como de su tránsito por las playas adjuntas a los sistemas dunares (interacción playa-duna). Esto indica que la zona intermareal de la playa representa para los sedimentos, la interfase de transporte entre un medio líquido (corrientes fluviales y litorales) y el viento. En consecuencia, los granos depositados en las dunas costeras que conservan las microtexturas generadas en la fase de transporte fluvial y litoral indican, además de una breve transición hacia la fase de transporte eólico, un entorno restrictivo para su óptimo desarrollo.

2) Anchura de la playa: establece la disponibilidad de arena, así como el fetch efectivo sobre el que se desarrolla el transporte eólico. Las condiciones morfológicas de playas estrechas, en un sentido perpendicular respecto a la línea de costa, inhiben el desgaste de la microtextura generada por el transporte fluvial y litoral (*Flat Cleavage Surface*), por lo que es heredada en un corto período de tiempo hacia los sistemas de dunas.

3) Entorno topográfico: modula el vector del viento y por lo tanto, el transporte de la arena. En este sentido, la topografía tiene una relevancia importante en los procesos eólicos, a tal grado que establecen una retroalimentación morfodinámica entre ambos. Son dos los efectos significativos que ejerce la topografía en el desarrollo de los procesos eólicos costeros: a) variaciones en el flujo del viento y b) dirección topográfica (Delgado-Fernandez, 2011; Walker, 2020).

a) Las variaciones del flujo del viento le generan una compresión y descompresión que inciden en su esfuerzo cortante sobre la superficie del depósito. En la zona de transición topográfica entre la playa y la duna, la velocidad del viento disminuye sobre la superficie. La razón es que a medida que el flujo de viento se acerca a la duna, su presión aumenta ligeramente debido a la acumulación de presión positiva, resultando en la caída de su velocidad. Por tal motivo, la transición playa-duna representa la zona de acumulación de arena para el suministro y posterior crecimiento de las dunas. La acumulación de arena responde a la desaceleración del flujo de viento, que inhibe el esfuerzo cortante sobre la superficie del depósito y conduce a un transporte intermitente en esta zona. En los barloventos, contrario a la transición playa-duna, ocurre una aceleración del flujo del viento debido a la presión decreciente o negativa generada sobre las laderas de ese subambiente. Los vientos que inciden sobre las dunas costeras en ángulos <30° tienden a desviarse hacia los 90° aproximadamente provocando un aumento en la aceleración del flujo del viento sobre el barlovento (Hesp et al., 2005; Walker et al., 2006;

---

Anthony, 2008). Esta aceleración intensificaría el desarrollo de la microtexturas propias de la fase eólica de transporte, sobre todo en las dunas de **VRC**, **FRN** y **CHC**, las cuales son los sistemas dunares más extensos del área de estudio y en consecuencia, quienes ofrecen barloventos amplios para una aceleración prolongada del flujo del viento, y por lo tanto, un desarrollo más adecuado de *Bulbous Edges* y *Elongated Depressions* sobre la superficie de los clinopiroxenos (Fig. 2; Fig. 27). Este escenario dinámico sería diferente en las dunas de **LCH**, **EMR**, **PSL** y **BCA**, cuyas menores dimensiones en sus barloventos restringirían una aceleración prolongada de los vientos y por lo tanto, permitirían a los clinopiroxenos conservar de mejor manera la microtextura generada en su fase fluvial y litoral de transporte (*Flat Cleavage Surface*) (Fig. 2; Fig. 27).

b) La dirección topográfica determina la zona de alcance para el suministro de la arena. El elemento más importante es la variabilidad topográfica transversal a la costa, cuya segmentación puede restringir considerablemente el potencial de un transporte continuo paralelo en la costa, y a su vez, provoca un menor suministro desde la playa a la duna costera (Arens et al., 1995; Hesp et al., 2005; Anthony, 2008; Lynch et al., 2008). Este escenario dinámico es más representativo en las localidades **PSL** y **BCA** que se encuentran confinadas por las estribaciones más orientales de la FVTM (Fig. 4).

Es necesario destacar que la mayoría de microtexturas de origen mecánico y mecánico-químico, impresas sobre las superficies de los clinopiroxenos, coinciden con las mismas microtexturas de origen mecánico y mecánico-químico reportadas en granos de cuarzo y circón (Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al., 2020; Armstrong-Altrin, 2020) (Fig. 29 ... Fig. 34). Por lo tanto, posiblemente los silicatos tiendan a desarrollar un comportamiento mecánico similar.

Respecto a las microtexturas de origen químico, resulta interesante su disminución porcentual desde las localidades del norte hacia las localidades del sur (Fig. 27). La microtextura química dominante sobre las superficies de los clinopiroxenos es *Mamillated* (Fig. 38), no obstante, a pesar de imponerse sobre las otras microtexturas de origen químico, sus porcentajes son demasiado bajos para poner de manifiesto un entorno de intemperismo químico preponderante sobre la superficie de los clinopiroxenos. Esto sugiere que, al actuar de manera conjunta el escenario geomorfológico dominado por cuevas empinadas y la red hidrográfica bien desarrollada (Fig. 4; Fig. 5), se genera una alta energía de relieve sobre el terreno (Hernandez-Santana et al., 2017). Esta situación, además de ser favorable para una importante producción de sedimentos en la cuenca, permite la erosión y pronto depósito de los minerales antes de su completa alteración (Boggs, 2009). Esto plantea un constante suministro de clinopiroxenos hacia las dunas, y por lo tanto, esta sería la razón principal para que estos minerales desarrollen y presenten predominantemente las microtexturas propias de la fase de transporte fluvial y litoral (*Flat Cleavage Surface*), ya que su pronto depósito, primero hacia la playa y después hacia las dunas, estaría mitigando las condiciones de inmovilidad necesarias para un importante desarrollo de microtexturas de origen químico sobre su superficie.

Asimismo, la progresiva disminución de las microtexturas químicas desde las localidades del norte hacia las localidades del sur, posiblemente, estaría revelando la proximidad de la fuente de los clinopiroxenos en el sur del área de estudio. Esto sugeriría un escenario en el cual la distribución de los clinopiroxenos hacia el norte mediante el transporte litoral contribuiría a una mayor residencia del mineral en el medio acuoso, circunstancia favorable para la generación de microtexturas químicas en su superficie. Este supuesto, coincidiría con la dirección del transporte litoral hacia el norte durante primavera – verano (Fig. 7), temporada a la que pertenece el mes de abril, mes en que se realizó la recolección de muestras. Incluso, podría respaldarse al atender las características geomorfológicas de la

---

costa. [Ortiz-Pérez & Figueroa-Mah Eng \(2007\)](#), clasificaron la costa de la Planicie Costera de Veracruz como transgresiva por sedimentación de corrientes litorales, y por tanto, esta característica podría propiciar el abundante aporte de sedimentos en breve tiempo, lo que beneficiaría el depósito de los clinopiroxenos antes de ser completamente alterados por el entorno de alta humedad climática.

Otro posible escenario sería el diferente comportamiento de la augita y del diópsido en el mismo entorno catalizador para un alto intemperismo. Esto se plantea debido a que los clinopiroxenos de **IST**, **ELM** y **PSL**, clasifican como augita y diópsido, mientras que los clinopiroxenos de **VRC**, solo clasifican como diópsido (Fig. 14). Esta distinción podría estar exponiendo que la augita es más susceptible al intemperismo en comparación con el diópsido. Premisa sugerida debido a que las localidades ubicadas más al norte del área de estudio, además de contener augita, son las mismas que presentan una mayor proporción superficial de microtexturas de origen químico en la superficie de sus clinopiroxenos. Situación contraria ocurre en **VRC**, donde solo se identifica diópsido y donde se observa una disminución considerable de las microtexturas de origen químico sobre la superficie de los clinopiroxenos. Este mismo escenario, basado en la variación composicional de **IST**, **ELM** y **PSL** (augita y diópsido) con **VRC** (diópsido) (Fig. 14), supondría dos posibles fuentes del clinopiroxeno. La proximidad de **IST** y **ELM** con las unidades TmBvB y TpQptB indicaría que estas litologías representan la fuente puntual para la augita y el diópsido, respectivamente. Este supuesto se basa en la cercanía de **VRC** con la unidad TpQptB, lo que sugiere a esta litología, como la fuente puntual del diópsido (Fig. 4).

Es notable que de cumplirse cualquier escenario, sería con mayor prominencia hacia las localidades del norte, situación que validaría a la fase de transporte litoral como la encargada de la distribución de los sedimentos a lo largo de la costa, y por lo tanto, como el primer episodio incidente en la dinámica y consecuente desarrollo microtextural de los clinopiroxenos antes de depositarse en las dunas. Esto postergaría al transporte eólico, y por consiguiente, le correspondería la segunda fase dinámica y de desarrollo microtextural en los clinopiroxenos. Esta última consideración del transporte eólico como fase secundaria, además respaldaría lo discutido en la parte Compacidad vs Tamaño de Grano, donde se sugiere que el cambio de dirección del viento incidente sobre el sistema de dunas genera una mezcla de granos (Fig. 6). En el primer escenario, se produciría una mezcla de granos recientes con granos un poco más antiguos, en el cual, los granos un poco más antiguos, corresponderían a los porcentajes superficiales más altos de microtexturas químicas debido a su residencia más prolongada sobre las dunas costeras. En tanto, el segundo escenario, produciría una mezcla de augita y diópsido.

Finalmente, de la misma manera que ocurre con las microtexturas de origen mecánico y mecánico-químico impresas en las superficies de cuarzos y clinopiroxenos, es interesante observar que las microtexturas químicas de los clinopiroxenos coinciden con microtexturas químicas reportadas en olivino, granate y horblenda ([Velbel, 2007](#); [Velbel & Ranck, 2007](#)). Lo que sugiere la posibilidad de que los minerales formados en condiciones similares de temperatura actúen de manera parecida bajo las condiciones de un mismo ambiente de intemperismo químico, ya que, en ambos casos, los minerales están en equilibrio de condiciones, tanto de formación, como de alteración ([Colman, 1982](#)).

## 9. Surface textures of detrital pyroxenes in coastal dune sands (western Gulf of Mexico, Mexico): Implications for their preservation and geoenvironmental processes

Juan J. Kasper-Zubillaga<sup>1</sup>  | Raymundo Gerardo Martínez-Serrano<sup>2</sup> |  
David M. Buchs<sup>3</sup> | Mauricio Mendieta-Lora<sup>4</sup> | Elsa Arellano-Torres<sup>5</sup> |  
León Felipe Álvarez-Sánchez<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), Unidad Académica de Procesos Oceánicos y Costeros, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City, Mexico

<sup>2</sup>Instituto de Geofísica, Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City, Mexico

<sup>3</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Cardiff University, Cardiff, UK

<sup>4</sup>Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica de Procesos Oceánicos y Costeros, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City, Mexico

<sup>5</sup>Facultad de Ciencias, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City, Mexico

<sup>6</sup>Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), Unidad de Informática Marina (UNINMAR), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria s/n, Mexico City, Mexico

### Correspondence

Juan J. Kasper-Zubillaga, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), Unidad Académica de Procesos Oceánicos y Costeros, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria s/n, 04510 CDMX, Mexico.  
Email: [kasper@cmarl.unam.mx](mailto:kasper@cmarl.unam.mx)

### Funding information

Universidad Nacional Autónoma de México, Grant/Award Number: PASPA/DGAPA/UNAM

### Abstract

This work investigates how the surface textures and morphology of pyroxene grains evolve during their source-to-sink history. This study applies to detrital clinopyroxenes concentrated in coastal dune sands of the Gulf of Mexico which were sourced in the Trans Mexican Volcanic Belt then transported and deposited in environments subject to limited chemical weathering. The composition and morphology of the pyroxenes was characterised using single-grain geochemical analysis and surface texture imagery with a novel approach based on the compactness property to assess the shape of minerals. This reveals heterogeneous diopside-augite populations, displaying mineral morphologies dominantly controlled by impact breakage along cleavages, little physical abrasion along their edges and with limited evidence for chemical weathering. Mechanical surface textures dominate over mechanical/chemical and chemical surface textures. These mechanical surface textures are preserved primarily as flat cleavage surfaces and rounded edges inherited from fluvial-intertidal and aeolian transport, respectively. Mechanically/chemically induced surface textures are preserved as elongated depressions. Chemical surface textures are sparse and mostly represented by mammillated textures that suggest local dissolution under subaqueous

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2023 The Authors. *The Depositional Record* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of International Association of Sedimentologists.

conditions. The scarcity of chemical surface textures is attributed to frequent fragmentation of the clinopyroxenes along cleavages and limited chemical weathering during transport of the observed populations. Clinopyroxene grains in the coastal dune sands primarily retain surface characteristics from fluvial transport. Although the breakage of minerals along cleavages can obscure their original morphology under a weathering-limited erosion regime, this study shows how surface textures and morphology of pyroxene grains is used to determine episodes of transport and deposition close to volcanic environments. The use of the compactness property as a shape descriptor measurement of particles provides an alternative approach to observe how clinopyroxene remains unaltered despite the high energy conditions of the coastal area.

#### KEYWORDS

clinopyroxene, coastal dune sands, compactness, Mexico, surface textures, weathering

## 1 | INTRODUCTION

Surface textures on quartz and heavy minerals have been commonly used to assess the transport and depositional mechanisms grains experienced throughout their sedimentary cycles in ancient and recent fluvial, marine and aeolian environments (Armstrong-Altrin & Pineda-Olmedo, 2014; Costa et al., 2013; Dott, 2003; Gravenor & Leavitt, 1981; Itamiya et al., 2019; Kasper-Zubillaga et al., 2005; Krinsley et al., 1976; Krinsley & Donahue, 1968; Madhavaraju et al., 2022; Mejía-Ledezma et al., 2020; Phillips-Lander et al., 2017). In contrast to quartz (Costa et al., 2019; Immonen, 2013; Krinsley & Doornkamp, 1973; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014) and heavy minerals (Mejía-Ledezma et al., 2020; Moral-Cardona et al., 2005; Velbel et al., 2007; Velbel & Ranck, 2008), surface textures on pyroxene grains are reported to be useful as indicators of weathering and mechanical abrasion (Andò et al., 2012; Garzanti et al., 2015a, 2015b; Le Pera & Morrone, 2020; Morrone et al., 2020; Schott et al., 1981; Velbel, 2007) in ancient and recent sands. Similar to other ferromagnesian minerals, pyroxene grains can be rare in sands due to their vulnerability to chemical weathering and diagenesis (Deer et al., 1992; Delvigne, 1990; Marsaglia, 1993; Schott et al., 1981; Velbel & Barker, 2008), but they are nonetheless commonly found in volcanoclastic sediments (Hamill & Ballance, 1985; Le Pera et al., 2021). Even after long distance energetic subaquatic and subaerial conditions pyroxene can survive as part of the compositional framework of coastal sands (Garzanti et al., 2014, 2015a, 2018, 2021, 2022).

Hence, surface textures on clinopyroxenes offer the opportunity to identify some of the physical and chemical mechanisms that enable pyroxene grains to survive in a sandy coastal area emplaced within a volcanoclastic environment.

Along with the microtextural record, it is well known that the morphology of detrital minerals (e.g. sphericity/roundness/angulosity) are inherited grain properties determined by mechanical and chemical processes during the sedimentary cycle (Costa et al., 2013; Folk, 1980; Grandstaff, 1978; Immonen, 2013; Krinsley & Wellendorf, 1980; Resentini et al., 2018; Zhao & Wang, 2016). In addition, the morphology of pyroxenes can be primarily controlled by their weak cleavage surface boundaries and vulnerability to chemical weathering under natural and artificial conditions (Andò et al., 2012; Garzanti et al., 2015a, 2015b; Le Pera & Morrone, 2020; Velbel, 2007). However, there are only a few studies providing detailed constraints on these processes and their record in the morphology of pyroxenes. This paper addresses this issue by investigating the composition and morphology of detrital pyroxenes collected in fine-grained, well-sorted, litho-quartzose modern sand dunes deposited under moderate chemical weathering within the Gulf of Mexico coastal plain in Mexico, which record volcanoclastic supply from the nearby Trans Mexican Volcanic Belt (Mejía-Ledezma et al., 2020; Mendieta-Lora et al., 2018). Quantitative analyses to determine the composition of the pyroxene were carried out by energy dispersive spectrometers (EDS) and wavelength-dispersive spectrometers (WDS) with a peak counting time of 10s for Na and K. To determine the morphology of the pyroxenes the compactness shape descriptor property of objects was used to assess the shape of a sand-sized mineral closely related to a circle in the Euclidean domain or a polygon in the digital domain (Bogaert et al., 2000; Bribiesca, 2000; Li et al., 2013; Montero & Bribiesca, 2009; Osserman, 1978; Roduit, 2019). Hence, compactness offers an alternative

way to describe the shape of the grains utilising the properties of sphericity and convexity (see Bufham, 2000; Zhao & Wang, 2016). This approach can be regarded as an alternative to Fourier coefficient image analysis (Diepenbroek et al., 1992; Resentini et al., 2018; Thomas et al., 1995) and fractal analysis of grains (Hyslip & Vallejo, 1997; Maria & Carey, 2002, 2007; Zhou et al., 2018) to quantify the shape of sediment particles.

## 2 | STUDY AREA

The study area is located in the state of Veracruz along the western Gulf of Mexico, Mexico. It is part of the coastal area and the Maya Terrane (20°12', 19°24'N; 96°45', 96°19'W; Centeno-García, 2016; Tamayo, 2013; Figures 1 and 2). The climate is defined as Am (warm-humid with a summer rainfall maxima) and Aw (sub-humid with summer rainfall; Kotttek et al., 2006). Intense tropical storms are common from June to November (Tamayo, 2013), with low air temperatures between 17 and 25°C and highs of 22–30°C. The average precipitation ranges from 370 mm in summer to 60 mm in winter. The annual average humidity is about 80% (Tejeda et al., 1988).

### 2.1 | Coastal features and fluvial network

The Gulf of Mexico coastal plain is a wave-dominated, transgressive, low relief, narrow coastal plain, averaging 1.25 km in width (Ortiz-Pérez & Espinosa, 1991). Hinterland rivers are derived from the inactive volcanic complex of the Trans Mexican Volcanic Belt. Rivers developed as dendritic and subparallel arrangements of permanent and intermittent discharges (Figure 2).

Perennial rivers include the larger Cazonas and Actopan rivers with drainage basins of 2688 and 2100 km<sup>2</sup>, respectively (Mejía-Ledezma et al., 2020; Pereyra Díaz et al., 2010; Pérez-Quezadas et al., 2017). Conversely, the Boca de Ovejas, Palma Sola and El Viejón rivers flow intermittently with insignificant drainage basins located in the central area of the western Gulf of Mexico coastal plain (Kasper-Zubillaga et al., 1999).

### 2.2 | Physical oceanography and wind regime

The longshore drift is characterised by a northward component in spring–summer with velocities of 0.035–0.08 m/s (Fernández-Eguiarte et al., 1992). The average wave height is 0.90 m with 3–8 s periods. The tidal regime

in the western Gulf of Mexico is negligible. Tides of diurnal and mixed-diurnal types have an average tidal range of 0.30 m. Winds come from the north, east, north-east and south-east with maximum velocities of 4–5 m/s (Mejía-Ledezma et al., 2020; Pérez-Villegas, 1990).

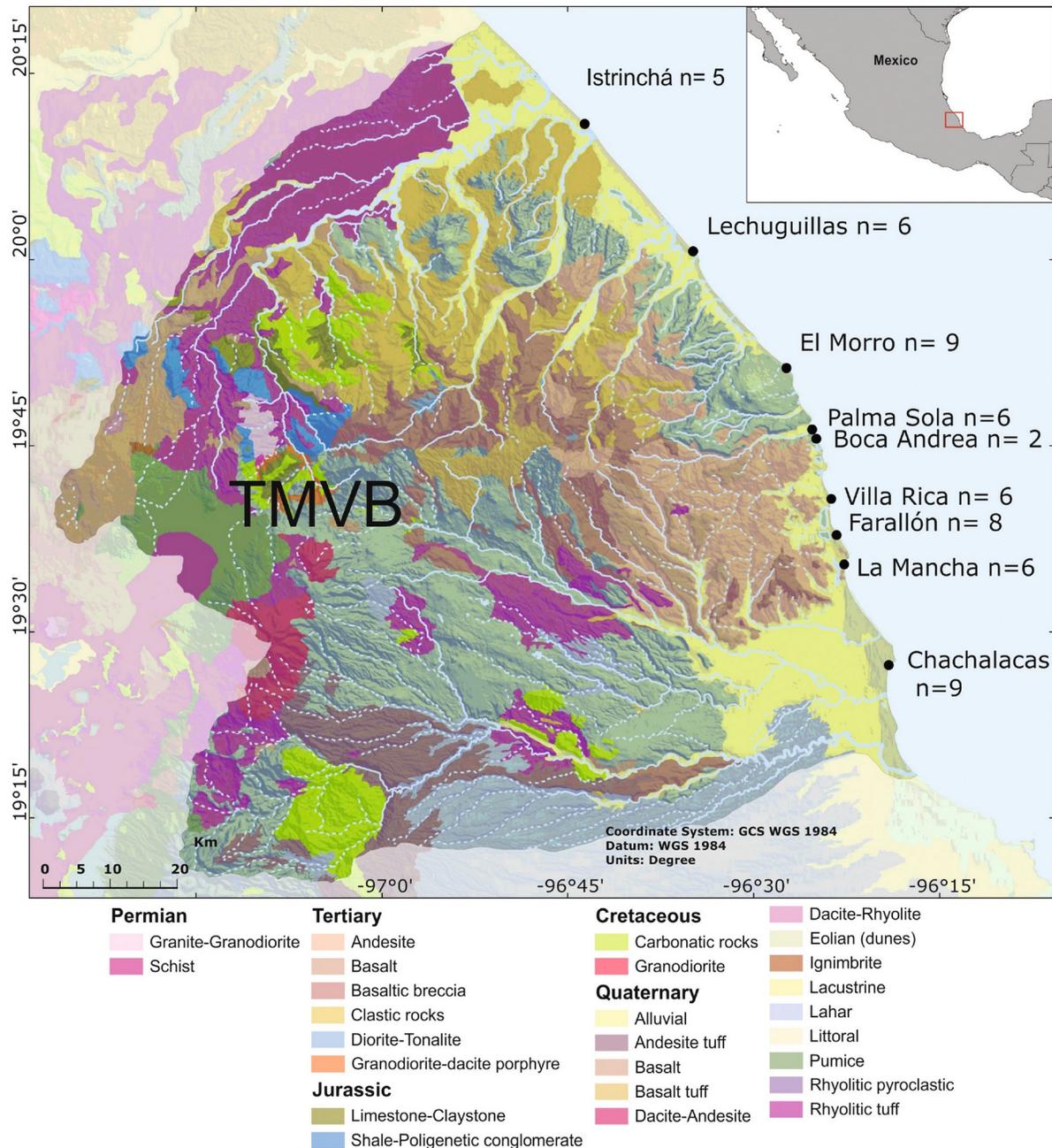
### 2.3 | Geological setting

The Trans Mexican Volcanic Belt Neogene continental arc is a volcanic province *ca* 1000 km long with a width of *ca* 80 to 230 km (Ferrari et al., 2011; Servicio Geológico Mexicano, 2017). It follows an E–W direction in its central and eastern parts. In its western sector, the belt develops a WNW–ESE trend with an angle of *ca* 16° with the Middle America Trench (Demant, 1979; Gómez-Tuena et al., 2007). The Trans Mexican Volcanic Belt divides the central part of Mexico into three sectors, from the Mexican Pacific to the Gulf of Mexico coasts (Alaniz-Alvarez et al., 2002; Demant, 1979; Pasquaré et al., 1991).

In the Gulf of Mexico coastal plain, the rocks of the Trans Mexican Volcanic Belt are compositionally dominated by mafic, intermediate and acid rocks exposed as basalts, andesites, andesite-dacites and basalt-rhyolite tuffs of Miocene and Pliocene ages (Ferrari et al., 2011; Servicio Geológico Mexicano, 2017). Miocene andesites are the oldest Trans Mexican Volcanic Belt rocks exposed along the coast. Basalts and basaltic breccias represent upper Miocene to lower Pliocene rocks of mugearitic composition (e.g. Na-alkaline structure exposed at the Palma Sola coastal area; Figure 1). These rocks contain phenocrysts of plagioclase, augite-diopside, oligoclase, opaque minerals and olivine suites (Ferrari et al., 2005; Gómez-Tuena et al., 2007). The upper Pliocene to Quaternary volcanic rocks are of calc-alkaline composition (Ferrari et al., 2005; Gómez-Tuena et al., 2007; Negendank et al., 1985; Figure 1). Recent units are exposed as Plio-Quaternary alluvial deposits and dune fields occur along the coastal area (Ferrari et al., 2005).

### 2.4 | Dune fields

Dune fields cover an extensive coastal area throughout the Gulf of Mexico coastal plain including transverse mobile and vegetated dunes with average heights of 2–8 m in the north-central coastal area, that is Istiríncha (I) to Boca Andrea (BA). In contrast, the coastal dunes in the south, that is Villa Rica (VR) to Chachalacas (CH), are transverse-vegetated, parabolic and barchan coastal dunes with average heights of *ca* 10 m (Mendieta-Lora et al., 2018; Figures 1 and 3A,B,C). The dunes are exposed where chemical weathering action is lower than sand transport rates (Johnsson et al., 1993; Kasper-Zubillaga et al., 2022).



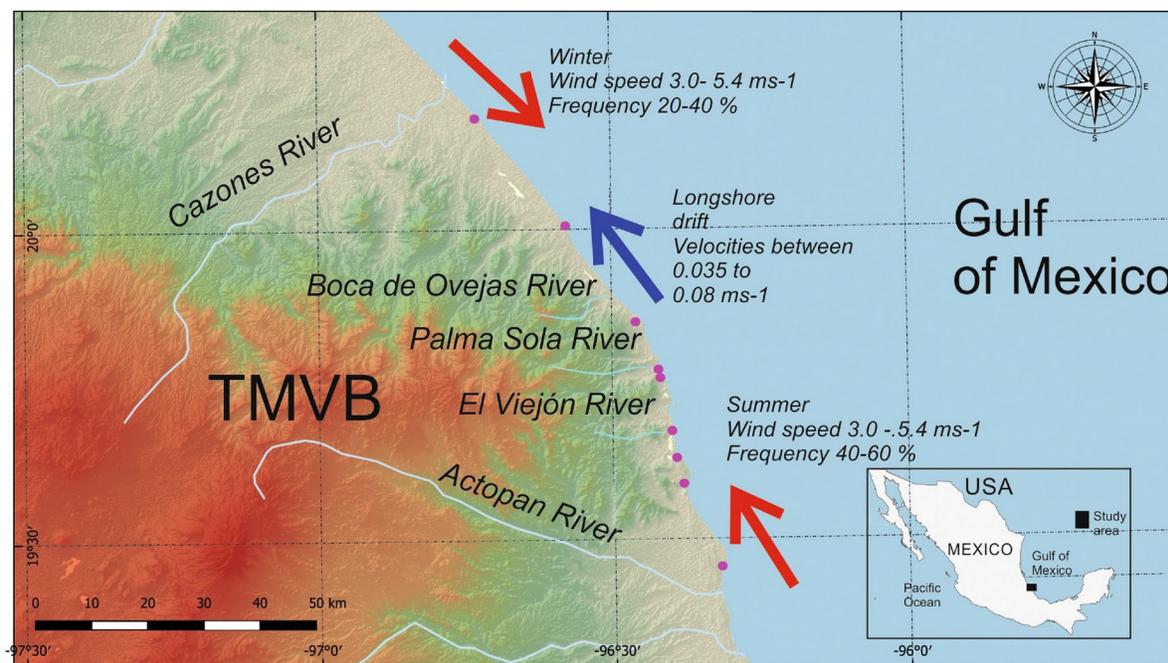
**FIGURE 1** Geology (modified from Ortega-Gutiérrez et al., 1992) and location of coastal dune sand samples ( $n = 56$ ). The western Gulf of Mexico coastal area includes the north-central sites: Istrinchá (I), Lechuguillas (Le), El Morro (EM), Palma Sola (PS), Boca Andrea (BA) and the south sites: Villa Rica (VR), Farallón (F), La Mancha (LM) and Chachalacas (CH). TMVB, Trans Mexican Volcanic Belt.

### 3 | EQUIPMENT AND METHODS

#### 3.1 | Field sampling

Samples were collected from backshore dunes from nine beach sites along the Gulf of Mexico coastal plain. Localities

are Istrinchá (I), Lechuguillas (Le), El Morro (EM), Palma Sola (PS), Boca Andrea (BA), Villa Rica (VR), Farallón (F), La Mancha (LM) and Chachalacas (CH) (Figure 1). Field sampling comprised approximately 200g of sand from the uppermost centimetre of the stoss, crest and lee face of the coastal dunes ( $n = 56$ ). To avoid bias during sampling,



**FIGURE 2** Dominant north-westerly, south-easterly winds, long shore drift and fluvial network along the Gulf of Mexico coastal plain. Cazones and Actopan are perennial rivers whereas Boca de Ovejas, Palma Sola and El Viejón are intermittent rivers (modified from Kasper-Zubillaga et al., 2022).

sediments were collected away from anomalous heavy-mineral lag-concentration deposits (Garzanti et al., 2015b).

### 3.2 | Scanning electron microscopy analysis

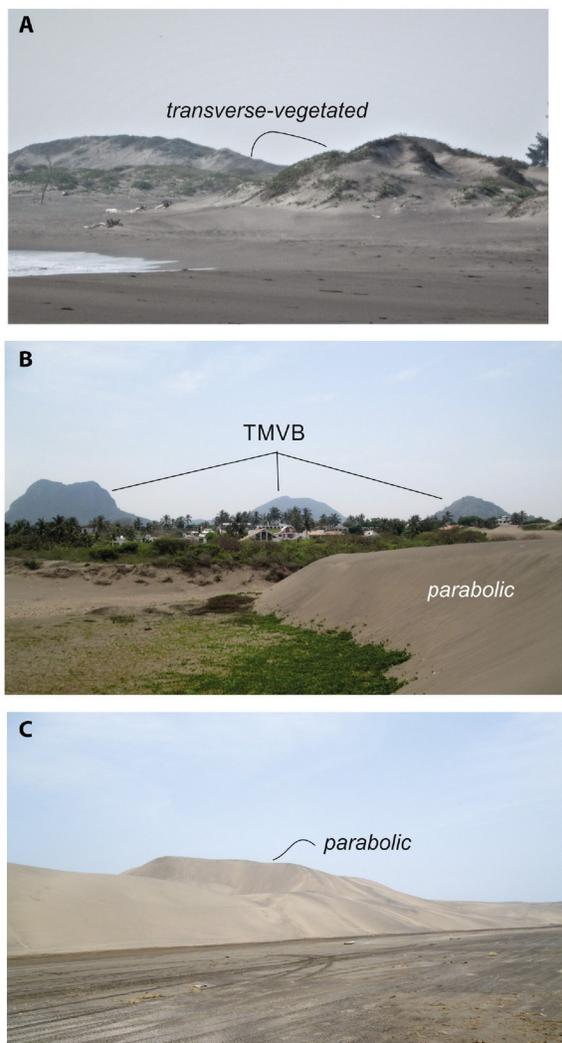
#### 3.2.1 | Sample preparation and geochemical analyses

Samples were cleaned and rinsed with distilled water, avoiding chemical solutions that might remove adhering particles since they provide valuable information on the surface texture attributes of the grains (Vos et al., 2014). After cleaning, the sands were dried in an oven at 50°C. A small amount of the whole bulk sand sample (ca 0.5 g) was placed in a Petri-like dish under a binocular microscope objective 4X-Velab-VES1 for separation of pyroxene grains by hand-picking based on their noticeable green and dark green colour and shape. Pyroxene grains ranging from 100 µm to 2 mm, suitable for assessing the prevailing surface textures (Vos et al., 2014), were separated from bulk samples of very fine to fine sand (from 2.5 to 3.0 ϕ). This grain size consideration was achieved after most of the grains observed were bigger than 100 µm (e.g. 2.5–3.0 ϕ; very fine to fine sands).

A selection of separated crystals were mounted on organic resin slides, polished, and coated with graphite.

The centre of each pyroxene crystal was then analysed twice by electron microprobe ( $n = 66$ ) (Figure 4A through E). The geochemical characterisation of pyroxene minerals in sand samples can be carried out by EDS or WDS. The EDS technique is relatively fast and enables almost simultaneous determination of the chemical elements that compose a mineral sample, although with lower precision. However, the WDS analysis is more suitable for ferromagnesian phases because more detailed information is obtained in terms of chemical composition that can be related to the source rock of the pyroxene grains. The WDS analysis is not as fast as EDS but has better precision since only one element can be monitored at a time in each spectrometer, although the parallel acquisition of  $n$  elements ( $n$  ... number of spectrometers) is achieved.

An automated JEOL JXA8900-R electron microprobe with five WDS and one EDS was employed (Laboratorio Universitario de Petrología, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM). An acceleration voltage of 20 keV and 20 nA current with a 1.0 µm beam diameter was used. Quantitative analyses were carried out by WDS with a peak counting time of 10 s for Na and K, and 30 s for the other elements. Calibration was performed using international standards (United States Geological Survey; USGS) and internal standards (Division of Structure Probe, Inc.; SPI). Matrix effects were corrected for using the JEOL-ZAF protocol, with the maximum analytical error in oxides



**FIGURE 3** Some coastal dune systems are: (A) El Morro transverse vegetated, (B) Villa Rica parabolic and (C) Chachalacas parabolic dune systems.

determined to be less than 3%. The quality of the data was assessed using kaersulite, olivine, diopside, cuprite and pentlandite standards. Only analyses with a total >96 wt% were considered valid (most of the analytical totals range between 98 and 101 wt%, as expected for pyroxenes). The structural formula of the pyroxenes was calculated according to the method described in Morimoto et al. (1988).

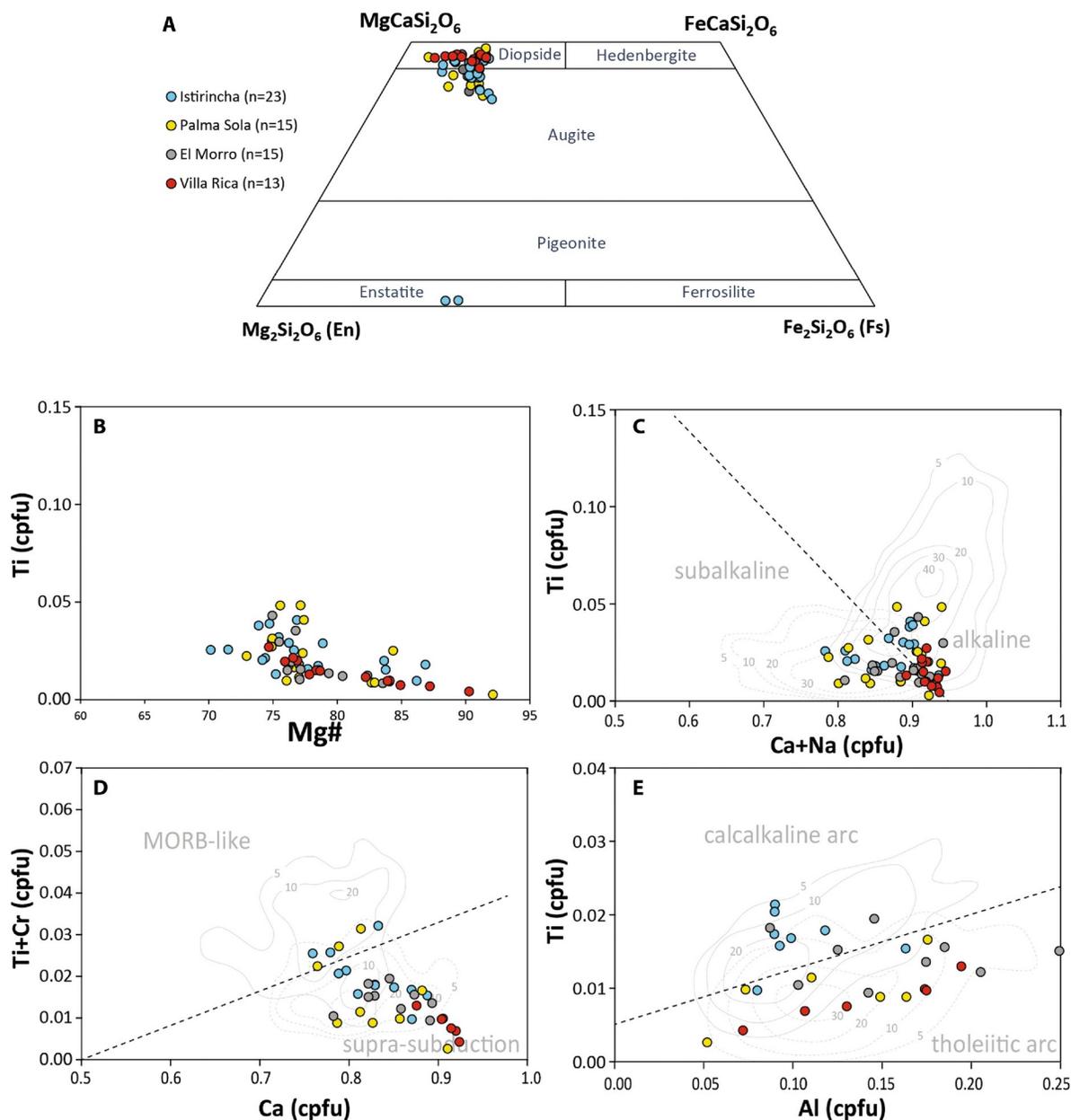
### 3.2.2 | Grain shape assessment: Compactness measurements

Quantitative measurement of compactness on pyroxene grains was obtained from petrographic images

using the J Microvision v. 1.3.4 software ( $n = 332$  grains; Roudit, 2019). The compactness property of objects and particles has been widely used to quantify the extent to which a geographical area changes throughout space and time (Bogaert et al., 2000; Bribiesca, 2000; Chaudhuri et al., 2012; Li et al., 2013). To date, compactness measurements have been used to assess the shapes of objects without any attempt to employ them as shape descriptors in minerals. This study aims to discuss how pyroxene grains are mechanically and chemically altered during transport and deposition using the compactness shape property. Compactness for isoperimetric inequality ratios is defined as the ratio of the area of the object to the size of a circle with the same perimeter.

$$C = 4\pi A / P^2$$

where  $C$  represents the compactness,  $A$  represents the area of the particle and  $P^2$  represents the squared perimeter of any object (Li et al., 2013; Osserman, 1978). Compactness in grains is an alternative method implemented to quantify particle shape. Quantification involves determining the area of the enclosing sphere ( $4\pi A$ ) that contains the particle's perimeter ( $P$ ). Compactness measurements encompass (i) sphericity, defined as the ratio of the surface area of a sphere with the same volume as the given particle to the surface area of the particle (Wadell, 1932) and the (ii) convexity, defined as the ratio of the volume of a particle and the volume of the convex hull that is the smallest polygon that contains a set of points inside it where interior angles of the convex polygon are  $\leq 180^\circ$  (see Angelidakis et al., 2022; Graham & Yao, 1983; Montero & Bribiesca, 2009; Zhao & Wang, 2016). Hence, compactness compares the particle with its volume equivalent sphere whereas convexity is a measure of the smallest set of convex shapes of the particle approaching a polygon (Zhao & Wang, 2016). Roundness is excluded as a parameter to define compactness measurements since roundness measurements determine the corners and sharpness of the grains whereas compactness accounts for the overall shape close to a circle. Furthermore, shape compactness, sphericity and circularity are the same concepts in a continuous plane and 3D shape in Euclidean spaces (Montero & Bribiesca, 2009). Nonetheless, compactness values in the digital domain can be interpreted in terms of the shape of the clinopyroxene once the crystal suffers breakage and its morphology tends to a polygon rather than a circle (see Rosenfeld, 1974). To assess the compactness of pyroxene grains, the JMicrovision software allows binary images to be analysed accurately by pixel connectivity, extraction and digitalisation of the grains following the pixel codes arrangement based on Freeman (1961) and the empirical formula for perimeter (Vossepoel & Smeulders, 1982). In binary images, white regions represent the foreground pixels



**FIGURE 4** (A) Geochemical composition of pyroxene grains by electron microprobe ( $n=66$ ) (Morimoto et al., 1988). Magmatic differentiation of source rocks based on the geochemical composition of calcic clinopyroxenes (see Leterrier et al., 1982), (B) Mg versus Ti (cpfu), (C) Ca + Na (cpfu) versus Ti (cpfu), (D) Ca (cpfu) versus Ti + Cr (cpfu), (E) Al (cpfu) versus Ti (cpfu).

in 8-pixel connectivity and black regions the background pixels in 4-pixel connectivity.

A database of compactness resulted from: (a) the spatial calibration of the grains in microns; (b) the extraction operation to configure the grain images (image segmentation); (c) adjustment of the surface filters to ensure a 1000 pixel value to compute the descriptors of the grain's shape; (d) removal of the border and fill filters to avoid adjacent

objects from the grain's border contour and surface holes and (e) the image threshold operation to convert the original greyscale image into a binary image (see Roduit, 2019). Compactness measurements range from 0.00 to 1.00, defined as low to high compactness (Li et al., 2013; Montero & Bribiesca, 2009; Roduit, 2019). Limitations with the compactness measurements of particles in the digital domain still remains a problem as they present fractal

patterns which might lead to dissimilar compactness values (Bribiesca, 2000; Rosenfeld, 1974). To ensure as much as possible the consistency of this compactness data, a visual inspection calibration of the grains was performed providing a full catalogue of dissimilar shapes of clinopyroxene (see Supplementary data available at <https://hdl.handle.net/20.500.12201/11352>).

Additional shape parameters like sphericity, convexity and roundness were obtained to observe any significant changes in the grain shape patterns of the clinopyroxenes and evaluate the value of the compactness parameter relative to more traditional approaches. Sphericity values were obtained following the sphericity index  $Is = A_I/A$ , where  $A_I$  is the area of the maximum inscribed circle obtained from the width of the particle (minimum radius) and  $A$  the particle area of the covering circle computed by the length of the particle (maximum radius; see Mo, 2020) (Table 1). Convexity values were obtained from the JMicrovision software descriptor shape output data based on the convexity hull (Zhao & Wang, 2016; Table 1). Roundness values were obtained by visual inspection of the SEM images based on the chart by Resentini et al. (2018, from figure 4; Table 1; Supplementary data available at <https://hdl.handle.net/20.500.12201/11352>).

### 3.2.3 | Scanning electron microscopy imaging of pyroxenes

A total of 337 pyroxene grains from 32 samples were observed using a SEM-Jeol-JSM 6360LV at the Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Mexico.

Grains were mounted on a specimen holder to be observed on an X-Y-Z tilt rotation stage and coated with gold for the best resolution (i.e. when compared to other metals or carbon; Krinsley & Doorkamp, 1973). A working distance of 15 mm was used for 200× magnification. A voltage of 10 kV was obtained using a tungsten filament in high vacuum mode.

### 3.2.4 | Quantitative assessment of surface textures

The percentage of total grain's pixel coverage area for each surface texture on the pyroxene crystal was assessed by the JMicrovision v. 1.3.4 software. This was done by using one single polygon interaction around the image's external boundary to reduce the number of edges and preserve the grain's contour as much as possible (see Chaudhuri et al., 2012; Ramer, 1972; Roduit, 2007). Each polygon represents the surface area on the grain's total area equivalent to 100% of the pyroxene crystal.

The measurements were first obtained from a scale calibration set up in millimetres on the image. The contouring of each individual grain was achieved manually by drawing an iterative selection of a subset of points as vertices of a polygon on the silhouette image for each pyroxene image using the 2D setup tool from the J Microvision v. 1.3.4 software (Roduit, 2019). The same contouring procedure was applied for each surface texture covering the grain's surface. Finally, for each surface texture, a percent proportion expressed as a percent value of the area covered is obtained for each pyroxene grain (Figure 5A through J).

## 4 | RESULTS

### 4.1 | Geochemical composition of pyroxenes

Among the 66 analysed pyroxenes, 64 are clinopyroxenes ranging in composition between diopside and augite, and two are enstatites (Figure 4A). The Mg# (Mg/Mg+Fe×100) of the clinopyroxenes ranges between 70 and 92 (Figure 4B), consistent with the provenance of the minerals from basaltic to andesitic volcanic sources. Titanium increases gradually from approximately 0.003–0.05 cpfu (cation per formula unit), or from 0.1 to 1.7 wt%, with decreasing Mg# (Figure 4B). This trend is consistent with crystallisation in mafic to intermediate melts without the abrupt appearance of Fe-Ti oxides during magmatic differentiation. Variability of Ti at a given Mg# suggests distinct sources for the clinopyroxenes. Accordingly, discrimination of magmatic series using the approach by Leterrier et al. (1982) indicates that the clinopyroxenes predominantly sourced in a volcanic arc, with a subset of grains originating from an alkaline source (Figure 4C,D,E). This is consistent with provenance of the studied volcaniclastic sand from the Trans Mexican Volcanic Belt. No obvious compositional difference was observed between the pyroxenes from distinct sampling localities.

### 4.2 | Compactness, sphericity, convexity and roundness measurements

The average compactness for all coastal sites for the clinopyroxene grains is  $0.71 \pm 0.10$ , the average sphericity value for most of the clinopyroxene grains is  $0.46 \pm 0.20$ , and the average convexity value for most of the grains is  $0.93 \pm 0.06$ . Significant correlations for La Mancha, Villa Rica, Chachalacas, El Moro Farallon and Lechuguillas between compactness and sphericity for clinopyroxene grains are observed (Figure 6A, see Table 1 for the number of samples). A lack of significant correlations

TABLE 1 Average and SD of compactness, sphericity, convexity and roundness in pyroxene grains ( $n = 332$ ).

<b>Istirircha, <math>n = 48</math> grains</b>	<b>I-s1</b>	<b>I-c1</b>	<b>I-c2</b>	<b>I-l</b>
Compactness	0.68 ± 0.11	0.66 ± 0.19	0.70 ± 0.08	0.72 ± 0.10
Sphericity	0.51 ± 0.17	0.47 ± 0.25	0.40 ± 0.20	0.54 ± 0.32
Convexity	0.90 ± 0.07	0.89 ± 0.09	0.93 ± 0.04	0.94 ± 0.03
Roundness	0.56 ± 0.13	0.60 ± 0.18	0.52 ± 0.10	0.50 ± 0.09
<b>Lechuguillas, <math>n = 40</math></b>	<b>Le-s1</b>	<b>Le-c</b>	<b>Le-c1</b>	<b>Le-l2</b>
Compactness	0.65 ± 0.10	0.65 ± 0.17	0.77 ± 0.06	0.73 ± 0.09
Sphericity	0.32 ± 0.16	0.46 ± 0.20	0.60 ± 0.19	0.52 ± 0.19
Convexity	0.92 ± 0.05	0.88 ± 0.10	0.94 ± 0.02	0.93 ± 0.05
Roundness	0.55 ± 0.06	0.054 ± 0.06	0.50 ± 0.11	0.51 ± 0.08
<b>El Morro, <math>n = 44</math></b>	<b>EM-s1</b>	<b>EM-c1</b>	<b>EM-c2</b>	<b>EM-l2</b>
Compactness	0.70 ± 0.08	0.69 ± 0.07	0.74 ± 0.07	0.73 ± 0.12
Sphericity	0.39 ± 0.18	0.40 ± 0.18	0.40 ± 0.15	0.37 ± 0.21
Convexity	0.94 ± 0.01	0.95 ± 0.04	0.95 ± 0.02	0.97 ± 0.01
Roundness	0.53 ± 0.10	0.54 ± 0.09	0.49 ± 0.09	0.57 ± 0.10
<b>Palma Sola, <math>n = 20</math></b>	<b>PS-s1</b>		<b>PS-c1</b>	
Compactness	0.64 ± 0.11		0.67 ± 0.09	
Sphericity	0.64 ± 0.18		0.58 ± 0.21	
Convexity	0.86 ± 0.07		0.89 ± 0.06	
Roundness	0.48 ± 0.07		0.45 ± 0.09	
<b>Boca Andrea, <math>n = 20</math></b>	<b>BA-s</b>		<b>BA-c</b>	
Compactness	0.61 ± 0.14		0.66 ± 0.13	
Sphericity	0.56 ± 0.16		0.58 ± 0.11	
Convexity	0.85 ± 0.10		0.88 ± 0.10	
Roundness	0.47 ± 0.08		0.49 ± 0.08	
<b>Villa Rica, <math>n = 40</math></b>	<b>VR-s1</b>	<b>VR-s2</b>	<b>VR-c</b>	<b>VR-c2</b>
Compactness	0.77 ± 0.08	0.76 ± 0.05	0.82 ± 0.07	0.73 ± 0.09
Sphericity	0.48 ± 0.19	0.49 ± 0.17	0.67 ± 0.15	0.47 ± 0.21
Convexity	0.96 ± 0.02	0.96 ± 0.01	0.94 ± 0.03	0.94 ± 0.03
Roundness	0.54 ± 0.08	0.58 ± 0.11	0.53 ± 0.10	0.51 ± 0.06
<b>El Farallon, <math>n = 40</math></b>	<b>F-s1</b>	<b>F-s</b>	<b>F-c1</b>	<b>F-c</b>
Compactness	0.75 ± 0.10	0.70 ± 0.09	0.73 ± 0.08	0.67 ± 0.12
Sphericity	0.50 ± 0.19	0.34 ± 0.19	0.35 ± 0.17	0.32 ± 0.14
Convexity	0.94 ± 0.03	0.96 ± 0.02	0.96 ± 0.03	0.92 ± 0.09
Roundness	0.50 ± 0.06	0.62 ± 0.12	0.62 ± 0.10	0.60 ± 0.08
<b>La Mancha, <math>n = 40</math></b>	<b>LM-s1</b>	<b>LM-s3</b>	<b>LM-c1</b>	<b>LM-c3</b>
Compactness	0.68 ± 0.10	0.75 ± 0.07	0.74 ± 0.11	0.78 ± 0.10
Sphericity	0.32 ± 0.11	0.37 ± 0.17	0.49 ± 0.11	0.51 ± 0.19
Convexity	0.93 ± 0.06	0.96 ± 0.02	0.95 ± 0.07	0.96 ± 0.02
Roundness	0.60 ± 0.07	0.53 ± 0.07	0.55 ± 0.12	0.55 ± 0.10
<b>Chachalacas, <math>n = 40</math></b>	<b>CH-s</b>	<b>CH-s5</b>	<b>CH-c</b>	<b>CH-c4</b>
Compactness	0.74 ± 0.08	0.76 ± 0.08	0.71 ± 0.12	0.77 ± 0.09

(Continues)

TABLE 1 (Continued)

Chachalacas, <i>n</i> = 40	CH-s	CH-s5	CH-c	CH-c4
Sphericity	0.44 ± 0.19	0.40 ± 0.18	0.36 ± 0.19	0.54 ± 0.21
Convexity	0.94 ± 0.03	0.97 ± 0.01	0.94 ± 0.06	0.94 ± 0.03
Roundness	0.56 ± 0.08	0.58 ± 0.08	0.59 ± 0.06	0.56 ± 0.08

is determined for Boca Andrea, Istirinchá and Palma Sola (Figure S1). Nonetheless, a significant correlation is achieved for most of the samples (Figure 6A). Strong correlations between compactness and convexity are observed for each separate site and for all the sites together (Figure 6B; Figure S2). Finally, a lack of significant correlations exists between compactness and roundness for the clinopyroxene grains at each site and most of the studied areas (Figure 6C; Figure S3). To compare the values of compactness, sphericity and convexity, three images with dissimilar shapes are presented in Figure 7A through C.

### 4.3 | Surface textures in pyroxene grains

For each site, values for the average surface area coverage (%) are represented by mechanical and mechanical-chemical features limited to flat cleavage surfaces with low features Chachalacas (17 ± 16), high features Boca Andrea (77 ± 23); bulbous edges, low features Palma Sola and Boca Andrea (7 ± 13); high features Chachalacas (50 ± 22) and elongated depressions, low features Palma Sola and Boca Andrea (2 ± 6); high features Chachalacas (22 ± 19).

The contribution resulting from grouping mechanical, mechanical-chemical and chemical surface textures for most of the locations, that is Istirinchá + Lechuguillas + El Morro + Palma Sola + Boca Andrea + Villa Rica + Farrallón + La Mancha + Chachalacas, is limited to coverage by the high percentage of flat cleavage surfaces (48 ± 30%), bulbous edges (24 ± 26%) and elongated depressions (10 ± 15%) compared to the rest of the surface textures area coverage.

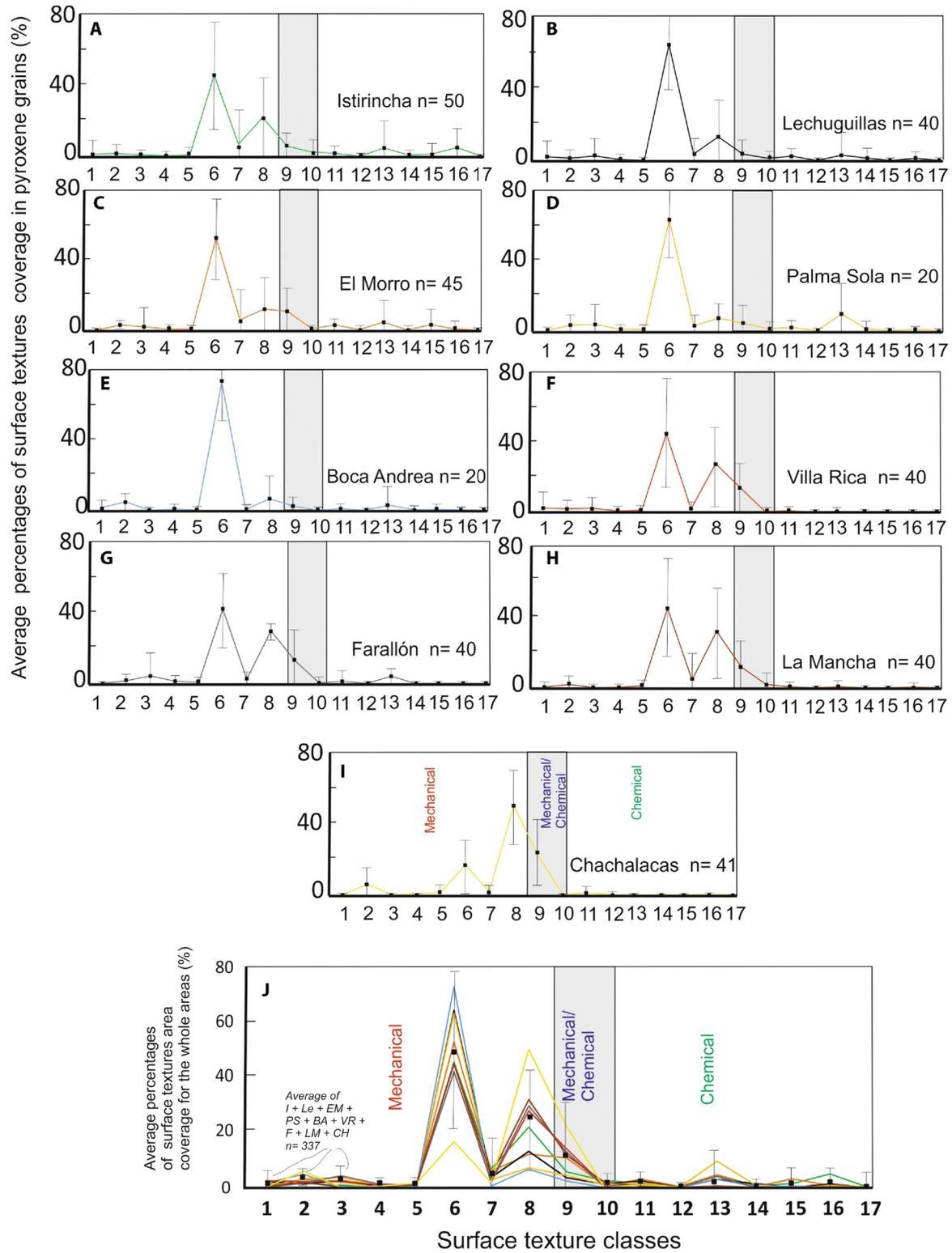
## 5 | DISCUSSION

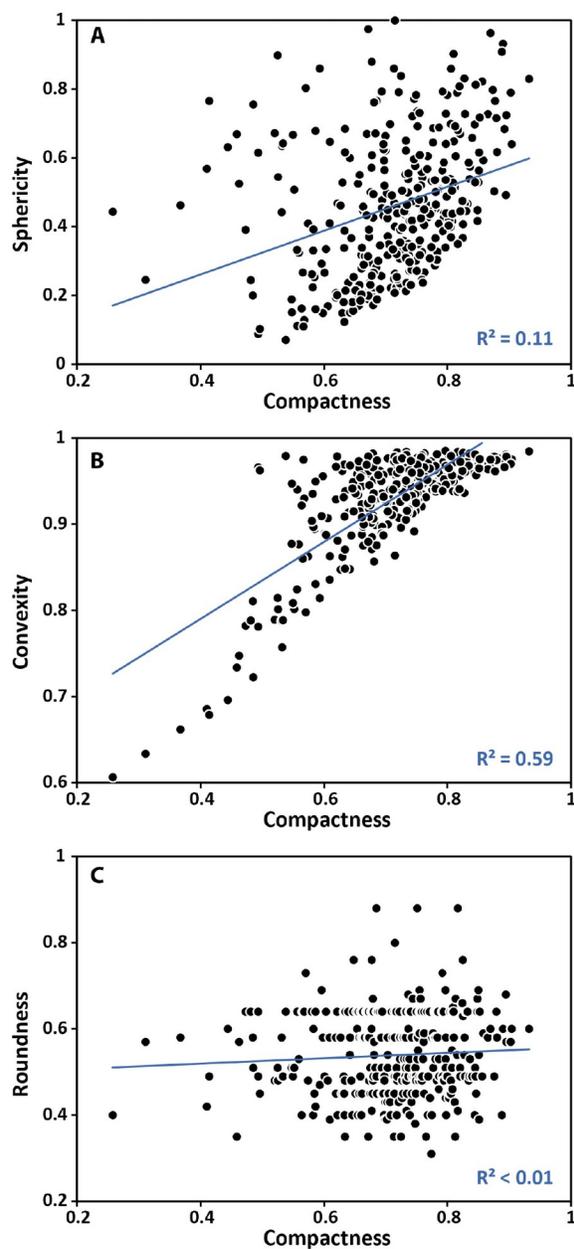
### 5.1 | Sand petrology

Petrology of the dune sands from the Gulf of Mexico coastal plain is markedly controlled by their closeness

to the Trans Mexican Volcanic Belt and the alluvial deposits in the south-eastern area of the coast. The presence of angular to subrounded monocrystalline quartz largely concentrated in the dune sands suggests that fluvial input, and probably aeolian input, increase quartz with angular and subrounded morphologies, respectively (Mendieta-Lora et al., 2018). However, subrounded quartz commonly occurs in coastal areas like Namibia after fluvial transport (Garzanti et al., 2012). Plagioclase, volcanic fragments with lathwork > micro-lithic > glassy textures and subordinate minerals like ilmenite, andesine, albite, augite and fayalite are derived from intermediate volcanic sources of the Trans Mexican Volcanic Belt (Gómez-Tuena et al., 2007; Mejía-Ledezma et al., 2020; Mendieta-Lora et al., 2018; Negendank et al., 1985). In the study area, plagioclase is commonly embedded within volcanic fragments with lathwork textures but does not occur as single crystals, probably because of the proximity of the source rock. This is similar to volcanic island environments, where plagioclase is more commonly observed in the groundmass of volcanic lithics (Le Pera et al., 2021). The scarcity of olivine grains in the dune sands is probably due to the lack of released monomineralic crystals after rapid fluvial and marine transport. This is suggested by observations from volcanic environments associated with small drainages, where durable retention of olivine occurs in the groundmass of volcanic lithics with glassy textures (Le Pera et al., 2021). This is distinct from the widely held idea that low concentrations of olivine in sands may be a direct consequence of depletion and even elimination of detrital olivine after long subaqueous transport (Garzanti et al., 2015a; Shukri, 1950). Alternatively, the scarcity of olivine grains could be due to their low abundance in the Trans Mexican Volcanic Belt, where differentiated (olivine-poor) igneous rocks are abundant (Gómez-Tuena et al., 2007). Biogenic carbonate grains are deposited as fine-grained fractions during vigorous transport by longshore currents

FIGURE 5 (A through I) Average percentages of surface texture coverage in pyroxene grains versus surface texture classes for each locality; (J) for the whole site. Surface texture classes are 1 = collision point (cp), 2 = remaining particles (abrasion) (rp), 3 = conchoidal (C), 4 = arcuate steps (as), 5 = straight steps (st), 6 = flat cleavage surfaces (fcs), 7 = upturned plates (up), 8 = bulbous edges (be), 9 = elongated depressions (ed), 10 = arcuate/circular/polygonal cracks (acpc), 11 = microbox (mb), 12 = cornflake (ck), 13 = mammillated (mam), 14 = denticulated (den), 15 = imbricated wedge marks (iwm), 16 = lenticular edge pits (lep), 17 = solution pits (sp); *n* = number of grains.

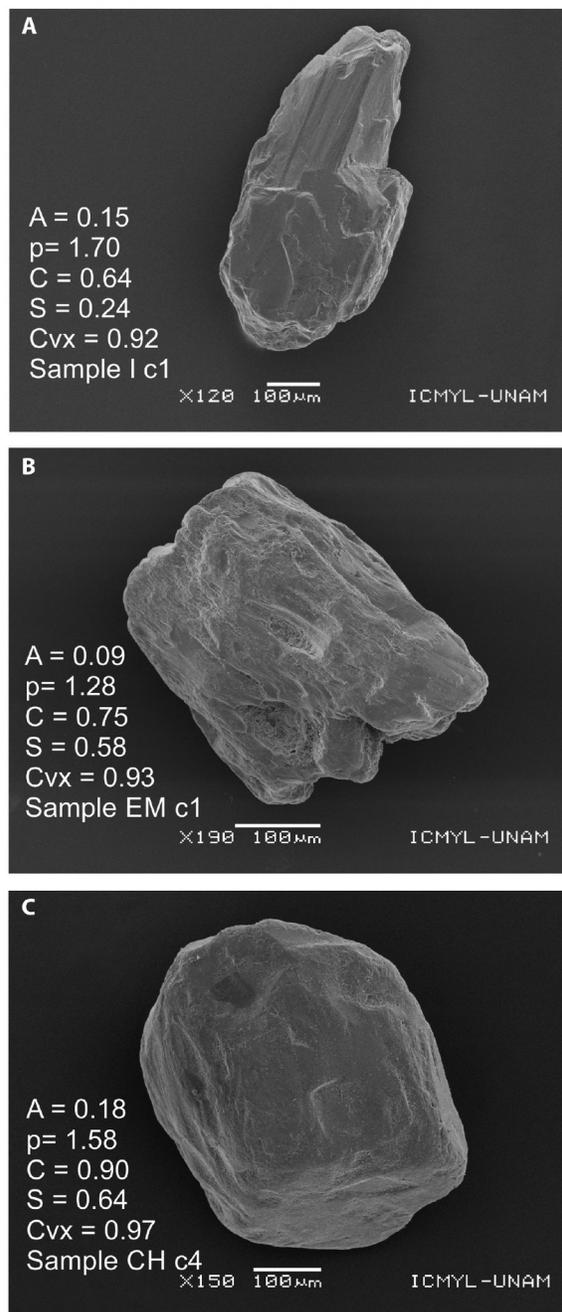




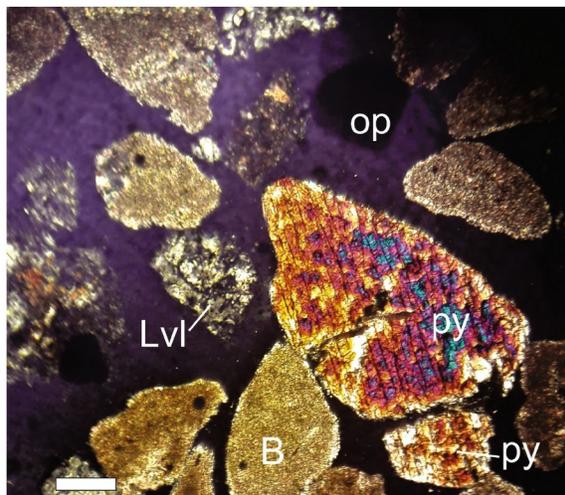
**FIGURE 6** Significant correlations for all sites studied (A) compactness and sphericity, (B) compactness and convexity, and (C) lack of significance between compactness and roundness. Significant correlations  $\rho < 0.05$ .

and winds (Mejía-Ledezma et al., 2020; Mendieta-Lora et al., 2018; Figure 8).

In the Gulf of Mexico coastal sands, the clinopyroxene grains are derived from the sub-alkali to alkali basalts and calcalkaline to tholeiitic basalts originating in the Trans Mexican Volcanic Belt (Ferrari et al., 2005; Gómez-Tuena



**FIGURE 7** Shape properties in clinopyroxene grains; (A) 'pristine' grain form with a relatively larger area (A) and perimeter ( $p$ ) compared to grains B and C. Note the low compactness (C) and sphericity (S) values in 'elongated' shapes and a constant convexity value (Cvx) (Zhao & Wang, 2016). (B) Relative increase in compactness and sphericity values as the grain is less elongated and more compact. (C) Grain with the highest compactness and sphericity values as the grain approaches a semi-developed hexagonal form.



**FIGURE 8** A microphotograph of the whole bulk composition of the dune sands; op = opaques; B = biogenic fractions; py = pyroxenes with angular to subangular outlines; Lvl = volcanic lithics with lathwork texture. Villa Rica site (stoss). Scale bar 500  $\mu\text{m}$ .

et al., 2007; Negendank et al., 1985; Figure 4C,E). The survivability of clinopyroxene in the dune sands is likely a consequence of the proximity of the source rock and rapid fluvial input seaward although detrital pyroxene can sometimes endure after prolonged subaqueous and sub-aerial transport (Garzanti et al., 2012).

## 5.2 | Surface textures on pyroxene grains

### 5.2.1 | Theory

Microtextures on detrital grains can be grouped as mechanical, mechanical/chemical and chemical surface textures. The mechanical surface textures are described as: (i) collision points observed as  $<100\mu\text{m}$  concave/circular holes developed on a cleavage surface probably analogous to elongated depressions but not observed on upturned plates (see Vos et al., 2014); (ii) remaining/granulated particles probably analogous to the abrasion fatigue surface textures formed during vigorous energetic aeolian collisions generating small adhering particles on the surface of the grain (Costa et al., 2013; Mahaney, 2002); (iii) small ( $<50\mu\text{m}$ ), medium ( $<100\mu\text{m}$ ) to large conchoidal ( $>100\mu\text{m}$ ) fractures observed as curved dish-like surface features (Itamiya et al., 2019; Krinsley & Donahue, 1968; Margolis & Krinsley, 1971; Mejía-Ledezma et al., 2020; Moral-Cardona et al., 2005; Vos et al., 2014); (iv) arcuate and (v) straight steps described as curved and linear step-like features present

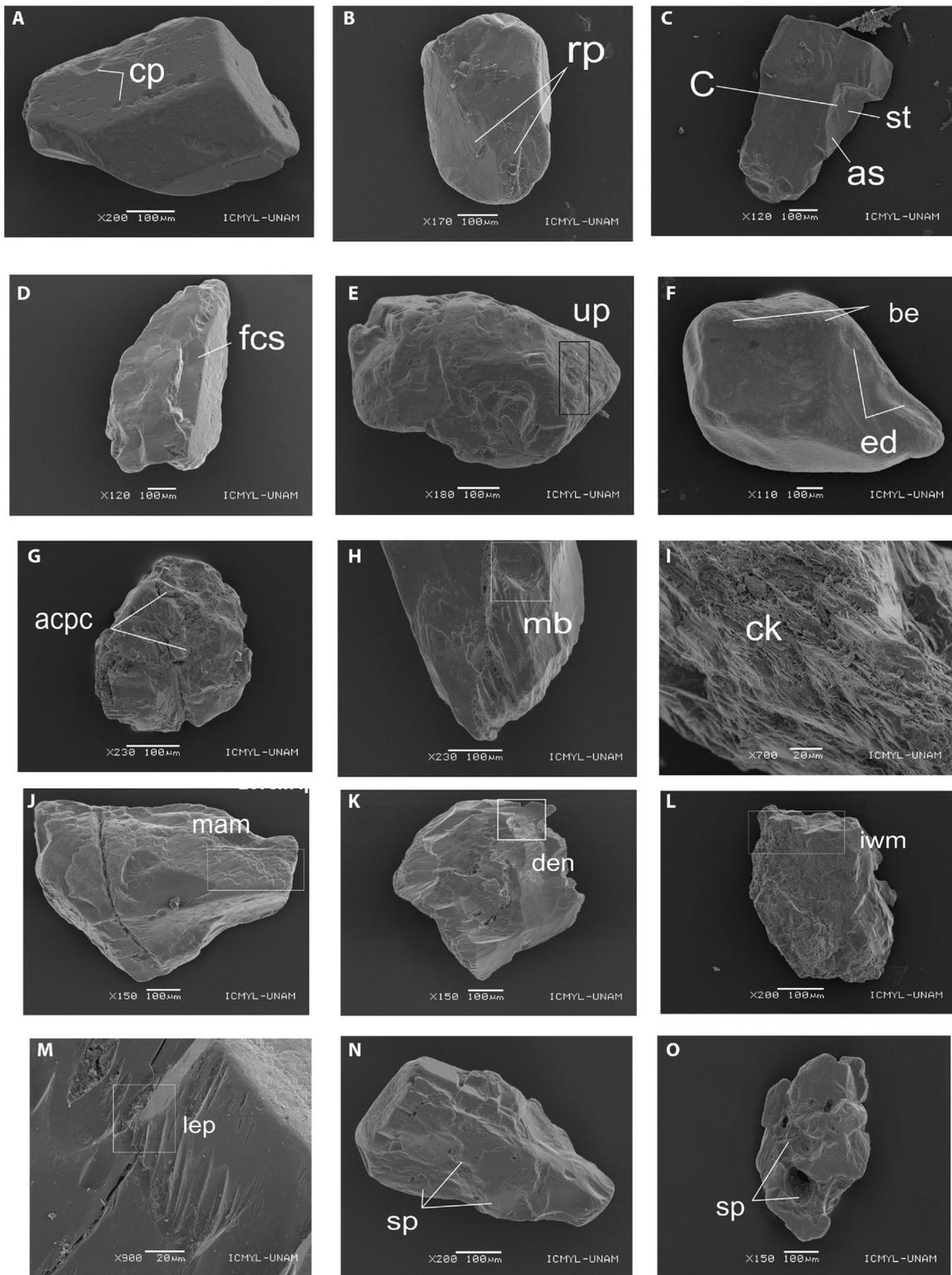
on conchoidal surfaces and common in coastal dunes and fluvial environments (Itamiya et al., 2019; Mejía-Ledezma et al., 2020; Moral-Cardona et al., 2005; Vos et al., 2014); (vi) flat cleavage surfaces present as breakage patterns (Itamiya et al., 2019; Mejía-Ledezma et al., 2020; Vos et al., 2014); (vii) upturned plates produced as superimposed thin plates (Costa et al., 2013; Itamiya et al., 2019; Krinsley & Cavallero, 1970; Mahaney, 2002; Mejía-Ledezma et al., 2020; Vos et al., 2014); (viii) bulbous edges are observed as well-rounded polished edges (Costa et al., 2013; Krinsley & Doornkamp, 1973; Mahaney, 2002; Mejía-Ledezma et al., 2020; Vos et al., 2014).

The mechanical-chemical surface textures are described as: (ix) elongated depressions present as large dish-shaped concavities (Krinsley et al., 1976; Mahaney, 2002; Mejía-Ledezma et al., 2020; Vos et al., 2014); (x) arcuate/singular/polygonal cracks *ca* 50–100  $\mu\text{m}$  in size and evidence of chemical and mechanical weathering processes (Krinsley & Doornkamp, 1973; Krinsley et al., 1976; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014).

The chemical surface textures are described as: (xi) possible microboxwork textures present as boxlike features (Velbel & Barker, 2008); (xii) cornflake particles described as platy-shaped grains (Velbel & Barker, 2008); (xiii) mammillated surface textures were observed as well-developed protuberances exposed on the grain surface of garnets and olivine (Gravenor & Leavitt, 1981; Velbel & Ranck, 2008); (xiv) denticulated surface textures observed as very sharp protuberances (Phillips-Lander et al., 2017; Velbel & Barker, 2008); (xv) imbricated wedge marks produced as the effect of loss of grain surface rather than crystalline overgrowth (Salvino & Velbel, 1989; Velbel et al., 2007); (xvi) lenticular etch pits characterised as a minor concave lens shaped feature  $\leq 20\mu\text{m}$  filled with remaining particles (Velbel & Barker, 2008); and (xvii) solution pits present as small and large holes that vary their size range (*ca* 10 to 100  $\mu\text{m}$ ) (Krinsley & Doornkamp, 1973; Moral-Cardona et al., 2005; Kasper-Zubillaga et al., 2005; Vos et al., 2014; Itamiya et al., 2019; Mejía-Ledezma et al., 2020).

### 5.2.2 | Observation

The visual inspection of clinopyroxene grains provides a catalogue of mechanical mechanical/chemical and chemical surface textures (Figure 9A through O). Hence, mechanical textures develop as collision points (cp) on flat cleavage surfaces (fcs) (Figure 9A,D), remaining/granulated particles (rp) probably associated with abrasion fatigue (Figure 9B), small to large conchoidal fractures (C) (Figure 9C), arcuate (as), straight steps (st) (Figure 9C) and the abundant presence of flat cleavage surfaces



**FIGURE 9** Surface textures catalogued in pyroxene grains: Grain samples are: (A) I-c-6, (B) EM-l2-5, (C) BA-c-6, (D) I-s1-11, (E) I-c-2-7, (F) CH-s5-3, (G) PS-s1-5, (H) I-c-2-5, (I) Le-c1-2, (J) EM-l2-3, (K) I-l-11, (L) Le-s1-5, (M) LM-s3-7, (N) I-s1-7, (O) PS-c1-9. Full imagery set available.

(Figure 9D). As observed in quartz and other mineral classes, upturned plates (up) (Figure 9E) and bulbous edges (be) endure on clinopyroxene grains (Figure 9F). Mechanical/chemical surface textures on clinopyroxene grains are dominated by elongated depressions (ed) (Figure 9F) and small arcuate/singular/polygonal cracks (acpc) (Figure 9G). Finally, chemical surface textures are sparse and inherited as microboxwork (mb) (Figure 9H), cornflake particles (ck) (Figure 9I), mammillated (mam) (Figure 9J), denticulated (den) (Figure 9K), imbricated wedge marks (iwm) (Figure 9L), lenticular etch pits (lep) (Figure 9M) and (xvii) solution pits (sp) (Figure 9N,O).

### 5.2.3 | Interpretation

Collision points and remaining particles probably developed following processes similar to those that led to the formation of elongated depressions and abrasion fatigue surface textures observed in quartz (Immonen, 2013; Krinsley & Donahue, 1968; Kuenen, 1960; Vos et al., 2014) and ilmenite (Makvandi et al., 2015; Mejía-Ledezma et al., 2020) from this and other study areas (Costa et al., 2013; Krinsley et al., 1976). Both surface textures are probably produced by high energy collisions during aeolian transport analogous to the abrasion fatigue surface textures resulting from grinding particles (Costa et al., 2013; Mahaney, 2002; Vos et al., 2014).

Larger size conchoidal fractures resulted from a highly active fluvial transport, following a morphological response similar to that commonly observed in other detrital minerals like quartz, ilmenite, garnet and zircon found in modern and ancient sandstones (Kasper-Zubillaga et al., 2005; Madhavaraju et al., 2022; Mejía-Ledezma et al., 2020; Moral-Cardona et al., 2005; Reddad et al., 2016; Varghese et al., 2016). The largest conchoidal fractures were probably generated on large, exposed areas and acquired by the clinopyroxenes during transport and depositional episodes in a similar manner to that observed in coarse-sized quartz grains (Vos et al., 2014). This is because clinopyroxene breaks easily along its flat cleavage surfaces and crystallographic structure. Both physical properties induce the development of large conchoidal fractures during grain-to-grain subaqueous collisions in coarse to medium-fine sands (e.g. poorly sorted sands) (Andò et al., 2012; Folk, 1980; Le Pera & Morrone, 2020; Velbel, 2007; Vos et al., 2014). Arcuate and straight steps commonly reported for quartz, ilmenite, garnet and zircon evolve as features associated with conchoidal fractures (Itamiya et al., 2019; Krinsley & Donahue, 1968; Madhavaraju et al., 2022; Mejía-Ledezma et al., 2020; Moral-Cardona et al., 2005).

Flat cleavage surfaces can form most of the surface texture on detrital clinopyroxene grains due to the high

abundance of weak cleavages in these minerals (Le Pera & Morrone, 2020). As also commonly observed in quartz and ilmenite (Cheng et al., 2017; Itamiya et al., 2019; Mejía-Ledezma et al., 2020; Vos et al., 2014), cleavage surfaces observed in the studied clinopyroxenes indicate they are features produced during high-energy fluvial transport and grain-to-grain collisions in the intertidal zone. However, unlike quartz, flat cleavage surfaces in clinopyroxenes are almost exclusively observed in larger grains (>100 µm).

Upturned plates are surface textures typical of aeolian environments (Costa et al., 2013; Krinsley & Cavallero, 1970; Mahaney, 2002), but they are poorly developed in the studied clinopyroxenes. This suggests that rapid aeolian transport occurs from the beach deposits onto the dunes in the study area, without any time to evolve upturned plates as part of a long-term aeolian process. Alternatively, upturned plates (and other small textures) might have developed on the clinopyroxenes before being removed/obscured during the development of flat cleavage surfaces during aeolian transport. This process could hide some textural features commonly developed during vigorous subaqueous and aeolian multicycles of sand transport. A relatively significant average percentage increase in bulbous edges on the clinopyroxene surfaces at the Chachalacas site is a response to the dominantly aeolian transport with the mineral's physical attributes and larger grain sizes >150 µm (Folk, 1980; Garzanti et al., 2015a; Resentini et al., 2018; Vos et al., 2014). Bulbous edges have also been reported in quartz, ilmenite and zircon from aeolian environments and sandstones (Costa et al., 2013; Mejía-Ledezma et al., 2020; Moral-Cardona et al., 2005).

In summary, surface textures on the studied clinopyroxene grains preserve signals acquired predominantly during subaqueous transport in the fluvial to intertidal beach zone environments, with subsequent minor overprints during subaqueous to aeolian transport to coastal sand dunes. Cleavage breakage is common in larger clinopyroxenes and can obscure the details of these signals.

A mix of physical and chemical processes acting on the grains are represented as elongated depressions derived from the grain-to-grain collisions during sand saltation or creeping (Mahaney, 2002). Commonly, they are preserved together with bulbous edges in grains >150 µm in size.

Arcuate/circular/polygonal cracks result from physical or chemical weathering, including the crystallisation of salts (Krinsley & Doornkamp, 1973; Krinsley et al., 1976; Vos et al., 2014). They can be attributed to minor chemical weathering and/or early diagenesis with a short residence time of the grains under intense chemical weathering conditions. In addition, arcuate/circular/polygonal cracks have not been reported in quartz from coastal sand dunes

(Vos et al., 2014), which may suggest efficient removal of these textures during the breakage and surface abrasion of grains affected by fast-paced multicycle transportation/reworking (Mejía-Ledezma et al., 2020).

There is little evidence of incipient microbox and cornflake textures in the clinopyroxenes (Velbel & Barker, 2008), as chemical weathering is negligible despite their vulnerability to chemical alteration (Buchs et al., 2015; Morton & Hallsworth, 2007). Mammillated surface textures likely reflect subaqueous alteration, where surface material was dissolved to form pinnacle features similar to those observed previously on olivine grains (Grandstaff, 1978; Velbel & Ranck, 2008).

Early stages of weathering are evidenced by the preservation of denticulated surface textures, defined as retreating or remnants of initial void spaces (Velbel & Barker, 2008). In addition, little development of imbricated wedge marks on the surface of the studied clinopyroxene grains suggests that the minerals were affected by the dissolution of their original crystal boundaries rather than grain enlargement produced by crystal overgrowths. Similar observations were previously made for detrital garnet (Salvino & Velbel, 1989; Velbel et al., 2007), suggesting this may be a recurring feature of ferro-magnesian minerals not encountered as commonly in quartz.

Although the abundance of lenticular etch pits increases slightly at the Istrincha sampling site, these textures and solution pits are generally negligible on clinopyroxene grains in the study area. Lenticular etch pits typically result from the formation of pore voids, with the development of vermiform corrosion features within resistant material (Velbel, 2007; Velbel & Barker, 2008). In contrast, solution pits occur during chemical weathering occasionally set on imbricated wedge marks (Velbel et al., 2007).

Overall, limited chemical surface textures on the studied clinopyroxene indicates moderate chemical weathering of grains. Instead, the morphology of retrieved grains was mainly controlled by cleavage breakage and other mechanical features developed during the highly energetic fluvial, marine and aeolian transport of their sedimentary cycle.

### 5.3 | Compactness measurements: Implications of pyroxene breakage

The significant correlation between compactness versus sphericity and convexity values suggests that the shape of the clinopyroxene is controlled by its original form, an irregular polygon, rather than being abraded to adopt a circular form. This is because sphericity accounts for a ratio of the area of the particle related to an enclosed and

inscribed circle and convexity is the ratio of the particle related to the convex hull (polygon). The low average value of sphericity and the high convexity value suggests an irregular shape for the clinopyroxene grains, closer to a polygon rather than a circle (see Zhao & Wang, 2016; Figure 7A–C). Compactness is not correlated to the equivalent diameter or particle size ( $R^2=0.11$ ). Furthermore, since compactness correlation is higher to convexity ( $R^2=0.59$ ) than to sphericity ( $R^2=0.11$ ), it is clear that compactness measurements in the studied pyroxenes are generally determined by the irregular shape of the grain rather than its approximation to a circle. Conversely, compactness is not correlated to roundness. This is due to the fact that compactness is a measure of the global shape of the grain whereas roundness is a mesoscale shape descriptor that only quantifies the sharpness of the grains.

In detail, compactness measurements combine some of the key morphological characteristics associated with the larger-scale shape of the mineral grains. In this study, this is exemplified by changes in the relative control of sphericity and convexity on the compactness values between two groups of localities. At the Boca Andrea, Istrincha and Palma Sola sites, sphericity is poorly correlated to compactness ( $R^2=0.01-0.08$ ), but these two parameters are correlated at the six other studied localities (Figure S1). In contrast, convexity at the Boca Andrea, Istrincha and Palma Sola sites is systematically better correlated to compactness than at other localities ( $R^2=0.70-0.95$  vs  $0.20-0.63$ ) (Figure S2). This supports stronger control of convexity relative to sphericity in the compactness values at Boca Andrea, Istrincha and Palma Sola. Compactness results show that most clinopyroxenes display low compactness (Table 1), suggesting limited abrasion of their edges and possible retention of their original forms despite their susceptibility to abrasion (Folk, 1980; Resentini et al., 2018). However, low compactness values can also be controlled by cleavages in the grains, which can facilitate breakage, rather than significant smooth abrasion, of clinopyroxenes under both subaqueous and subaerial conditions (Folk, 1980; Le Pera & Morrone, 2020). The preservation of surface textures like flat cleavage surfaces is plausible evidence of clinopyroxene breakage. Some grains might have achieved relatively higher compactness (e.g. at sites VR and CH) probably due to long aeolian transport and minor breakage, because clinopyroxene are abraded faster than most other heavy minerals (e.g. amphibole, garnet and zircon; Resentini et al., 2018). Conversely, unlike the results reported here, the behaviour of clinopyroxene along the coastal sands of South-West Africa draws attention since rounded clinopyroxene endures in beach and dune sands even after a long distance of littoral transport and fluvial control of the Orange River

input seaward (Garzanti et al., 2014, figure 2; Garzanti et al., 2018). Alternatively, several studies outline how clinopyroxene endures in different areas with different climates and topographic settings (Garzanti et al., 2021, 2022) with evidence of roundness and preservation of chemical surface textures (Garzanti, et al., 2015a).

However, in this study little evidence of abrasion of clinopyroxene grains remains after high energy subaqueous and subaerial transport. Breakage along clinopyroxene cleavage surfaces is probably the main reason for the low preservation of abraded grains. Nonetheless, these results show that angular to subrounded clinopyroxene grains indicate the dominance of river control over aeolian influence on the grains. Finally, compactness is not correlated to the equivalent diameter or particle size ( $R^2 = 0.11$ ).

## 6 | CONCLUSIONS

Heavy minerals in backshore dunes of the Gulf of Mexico coastal plain are mostly clinopyroxenes (augite and diopside) derived from basalts and andesites of the Trans-Mexican volcanic belt. The cleavage properties of clinopyroxenes determines the low compactness values in clinopyroxene grains with breakage under vigorous subaqueous conditions generating minor abrasion along their edges. Flat cleavage surfaces and bulbous edges represent the dominant average surface coverage percentages of mechanical surface textures on retrieved detrital clinopyroxenes. The former texture suggests highly active fluvial transport and grain-to-grain collisions in the intertidal zone. In contrast, bulbous edges were produced by aeolian transport. In addition, slight preservation of elongated depressions associated with bulbous edges in the clinopyroxenes is produced during high energy aeolian transport. Chemical surface textures are almost non-existent on the studied clinopyroxenes except for rare mammillated surface textures derived from dissolution under subaqueous conditions. The limited preservation of chemical surface textures is probably due to fast and energetic transport during their sedimentary cycle, which led to their morphology being dominated by mechanical processes. Notably, these results clearly show that the cleavage properties of these minerals had a significant control on their shape. In this study, large conchoidal fractures on clinopyroxene  $>100\mu\text{m}$  suggests fluvial transport dominates over intertidal control on the grains. However, cleavage may obscure some surface textures initially developed on the clinopyroxenes as the mineral breaks and its surface remains apparently unaltered. The use of the compactness shape descriptor is an alternative approach

to understanding clinopyroxene behaviour during its source-to-sink history in coastal dune sands since it considers the overall shape of the grain, that is sphericity and convexity, rather than the measurements of the particles based solely on the sphericity or roundness as individual parameters. Compactness measurements of grain particles in the digital domain should be visually inspected referencing a complete catalogue of images to ensure compactness measurements are consistent with the shape of the grain particles leading to a more objective interpretation of the shape of detrital clinopyroxene grains in coastal dune sands.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Final draft of the manuscript was completed during a Sabbatical Year at the School of Earth and Environmental Sciences Cardiff University, Wales, United Kingdom. The authors thank PASPA/DGAPA/UNAM for their financial support during the Sabbatical Year's Project 'Preservación del piroxeno en ambientes sedimentarios recientes: Implicaciones geoambientales de su concentración en playas y dunas costeras de México y Nueva Zelanda'. We are truly grateful to Laura Elena Gómez Lizárraga and Carlos Linares López, for Scanning Electron Microscopy and Microprobe Analyses at the Instituto de Ciencias del Mar y Limnología and Laboratorio Universitario de Petrología, Instituto de Geofísica, respectively at the Universidad Nacional Autónoma de México, México. This manuscript has largely benefited from the constructive review by Eduardo Garzanti.

## FUNDING INFORMATION

Universidad Nacional Autónoma de México. Project PASPA/DGAPA/UNAM, México.

## CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare that they do not have competing financial interest nor conflict of interest.

## DATA AVAILABILITY STATEMENT

Data are available at the following links: <https://hdl.handle.net/20.500.12201/11352>; <https://hdl.handle.net/20.500.12201/11368> (Figure S1); <https://hdl.handle.net/20.500.12201/11369> (Figure S2); <https://hdl.handle.net/20.500.12201/11370> (Figure S3).

## ORCID

Juan J. Kasper-Zubillaga  <https://orcid.org/0000-0002-1169-1359>

## REFERENCES

Alaniz-Alvarez, S., Nieto-Samaniego, A., Morán-Zenteno, D. & Alba-Aldave, L. (2002) Rhyolitic volcanism in extension zone

- associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, Southern México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118, 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00247-0)
- Andò, S., Garzanti, E., Padoan, M. & Limonta, M. (2012) Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: a catalogue for optical analysis. *Sedimentary Geology*, 280, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.023>
- Angelidakis, V., Nadimi, S. & Utili, S. (2022) Elongation, flatness and compactness indices to characterise particle form. *Powder Technology*, 396, 689–695. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.027>
- Armstrong-Altrin, J.S. & Pineda-Olmedo, N. (2014) Microtextures of detrital sand grains from the Tecolutla, Nautla, and Veracruz beaches, western Gulf of Mexico, Mexico: implications for depositional environment and paleoclimate. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 4321–4333. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1088-x>
- Bogaert, J., Rousseau, R., Van Hecke, P. & Impens, I. (2000) Alternative area-perimeter ratios for measurement of 2D shape compactness of habitats. *Applied Mathematics and Computation*, 11, 71–85. [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(99\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(99)00075-2)
- Bribiesca, A. (2000) A measure of compactness for 3D shapes. *Computers and Mathematics with Applications*, 40, 1275–1284. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(00\)00238-8](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(00)00238-8)
- Buchs, D.M., Cukur, D., Masago, H. & Garbe-Schönberg, D. (2015) Sediment flow routing during formation of forearc basins: constraints from integrated analysis of detrital pyroxenes and stratigraphy in the Kumano Basin, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 414, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.046>
- Buflam, B.A. (2000) The size and compactness of particles of arbitrary shape: application to catalyst effectiveness factors. *Chemical Engineering Science*, 55, 5803–5811. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00425-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00425-5)
- Centeno-García, E. (2016) Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: an overview. *Ore Geology Reviews*, 1–18, 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.010>
- Chaudhuri, D., Kushwaha, N.K., Sharif, I. & Gohri, V. (2012) Unique measure for geometrical shape object detection-based on area matching. *Defence Science Journal*, 62, 58–66. <https://doi.org/10.14429/dsj.62.942>
- Cheng, Y., Liu, C., Lu, P., Zhang, Y., Nie, Q. & Wen, Y. (2017) Surface textural analysis of quartz grains from modern point bar deposits in lower reaches of the Yellow River. IOP conference series: earth and environmental science <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/3/032023>
- Costa, P.J.M., Andrade, C., Mahaney, W.C., Marques da Silva, F., Freire, P., Freitas, M.C., Janardo, C., Oliviera, M.A., Silva, T. & Lopes, V. (2013) Aeolian microtextures in silica spheres induced in a wind tunnel experiment: comparison with aeolian quartz. *Geomorphology*, 180–181, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.011>
- Costa, P.J.M., Rasteiro da Silva, D., Figueirinhas, L. & Lario, J. (2019) The importance of coastal geomorphological setting as a controlling factor on microtextural signatures of the 2010 Maule (Chile) tsunami deposit. *Geologica Acta*, 17, 1–10. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2019.17.4>
- Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. (1992) *An introduction to the rock-forming minerals*. London: The Mineralogical Society, 498 p.
- Delvigne, J. (1990) Hypogene and supergene alterations of orthopyroxene in the Koua Bocca ultramafic intrusion, Ivory Coast. *Chemical Geology*, 84, 49–53. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90161-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90161-Y)
- Demant, A. (1979) Vulcanología y petrografía del sector Neovolcánico. *Revista Instituto de Geología*, 7, 39–57.
- Diepenbroek, M., Bartholoma, A. & Ibbeken, H. (1992) How round is round? A new approach to the topic “roundness” by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology*, 39, 411–422. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1992.tb02125.x>
- Dott, R.H. (2003) The importance of Eolian abrasion in supermature quartz sandstones and the paradox of weathering on vegetation-free landscapes. *The Journal of Geology*, 111, 387–405. <https://doi.org/10.1086/375286>
- Fernández-Eguarte, A., Gallegos-García, A. & Zavala-Hidalgo, J. (1992) Oceanografía Física (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos) IV.9.1, escala 1: 4000.000, Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 1 Chart, Mexico.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. & Manea, M. (2011) The dynamic history of the trans-Mexican volcanic belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M., Petrone, C., JacoboAlbarrán, J. & López-Martínez, M. (2005) Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: the Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 284–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.02.004>
- Folk, R.L. (1980) *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, TX: Hemphill Publishing, p. 182.
- Freeman, H. (1961) On the encoding of arbitrary geometric configurations. *Transactions on Electronic Computers*, 10, 260–268.
- Garzanti, E., Andò, S., Padoan, M., Vezzoli, G. & El Kammar, A. (2015a) The modern Nile sediment system: processes and products. *Quaternary Science Review*, 130, 9–56. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.011>
- Garzanti, E., Andò, S., Resentini, A., Vezzoli, G., Lustrino, M., Boni, M. & Vermeesch, P. (2012) Petrology of the Namib Sand Sea: long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta. *Earth-Science Reviews*, 112, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.008>
- Garzanti, E., Capaldi, T., Tripaldi, A., Zarate, M., Limonta, M. & Vezzoli, G. (2022) Andean retroarc-basin dune fields and Pampean Sand Sea (Argentina): provenance and drainage changes driven by tectonics and climate. *Earth Science Reviews*, 231, 104077.
- Garzanti, E., Dinis, P., Vermeesch, P., Andò, S., Hahn, A., Huv, J., Limonta, M., Padoan, P., Resentini, A., Rittner, M. & Vezzoli, G. (2018) Sedimentary processes controlling ultralong cells of littoral transport: placer formation and termination of the Orange sand highway in southern Angola. *Sedimentology*, 65, 431–460. <https://doi.org/10.1111/sed.12387>
- Garzanti, E., Dinis, P., Vezzoli, G. & Borromeo, L. (2021) Sand and mud generation from continental flood basalts in contrasting landscapes and climatic conditions (Paraná – Etendeka conjugate igneous provinces, Uruguay and Namibia). *Sedimentology*, 68, 3447–3475. <https://doi.org/10.1111/sed.12905>
- Garzanti, E., Resentini, A., Andò, S., Vezzoli, G., Preira, A. & Vermeesch, P. (2015b) Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral and aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology*, 62, 971–996. <https://doi.org/10.1111/sed.12169>

- Garzanti, E., Vermeesch, P., Andò, S., Lustrino, M., Padoan, M. & Vezzoli, G. (2014) Ultra-long distance littoral transport of Orange sand and provenance of the Skeleton Coast Erg (Namibia). *Marine Geology*, 357, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.07.005>
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T. & Ferrari, L. (2007) Igneous petrogenesis of the trans-Mexican volcanic belt. In: Alaniz-Álvarez, S.A. & Nieto-Samaniego, Á.F. (Eds.) *Geology of México: celebrating the Centenary of the Geological Society of México*. Geological Society of America Special Paper, Vol. 422. Boulder: The Geological Society of America, pp. 129–181. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(05\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(05))
- Graham, R.L. & Yao, F.F. (1983) Finding the convex hull of a simple polygon. *Journal of Algorithms*, 4, 324–331.
- Grandstaff, D.E. (1978) Changes in surface area and morphology and the mechanism of forsterite dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 1899–1901. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90245-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90245-4)
- Gravenor, C.P. & Leavitt, R.K. (1981) Experimental formation and significance of etch patterns on detrital garnets. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 765–775. <https://doi.org/10.1139/e81-070>
- Hamill, P.F. & Ballance, P.F. (1985) Heavy mineral rich beach sands of the Waitakere coast, Auckland, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 28, 503–511. <https://doi.org/10.1080/00288306.1985.10421203>
- Hyslip, J.P. & Vallejo, L.E. (1997) Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. *Engineering Geology*, 48, 231–244. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00046-X)
- Immonen, N. (2013) Surface microtextures of ice-rafted quartz grains revealing glacial ice in the Cenozoic Arctic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 374, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.02.003>
- Itamiya, H., Sugita, R. & Sugai, T. (2019) Analysis of the surface microtextures and morphologies of beach quartz grains in Japan and implications for provenance research. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0287-9>
- Johnsson, M.J., Ellen, S.D. & McKittrick, M.A. (1993) Intensity and duration of chemical weathering: an example from soil clays of the southern Koolau Mountains, Oahu, Hawaii. In: Johnsson, M.J. & Basu, A. (Eds.) *Processes controlling the composition of clastic sediments*. Geological Society of America, Special Paper, Vol. 284. Boulder: The Geological Society of America, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p147>
- Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E., Álvarez-Sánchez, L.F., Carlos Delgado, L., Martínez-Serrano, R.G. & Baltazar-Jiménez, P.A.E. (2022) Implications of polymodal distributions in the grain size parameters of coastal dune sands (Oaxaca, Mexico). *Sedimentary Geology*, 437, 106189. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2022.106189>
- Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza Edwards, A. & Rosales-Hoz, L. (1999) Petrography and geochemistry of Holocene sands in the western Gulf of Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 1003–1010. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.1003>
- Kasper-Zubillaga, J.J., Dickinson, W.W., Carranza Edwards, A. & Hornelas-Orozco, Y. (2005) Petrography of quartz grains in beach and dune sands of Northland, North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48, 649–660. <https://doi.org/10.1080/00288306.2005.9515139>
- Kottke, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated 15: 259–263.
- Krinsley, D.H. & Cavallero, L. (1970) Scanning electron microscopic examination of periglacial eolian sands from Long Island, New York. *Journal of Sedimentary Research*, 40, 1345–1350. <https://doi.org/10.1306/74D721A3-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Krinsley, D.H. & Donahue, J. (1968) Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *Geological Society of American Bulletin*, 79, 743–748. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1968\)79\[743:EIOSGS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1968)79[743:EIOSGS]2.0.CO;2)
- Krinsley, D.H. & Doornkamp, J.C. (1973) *Atlas of quartz sand surface textures*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 37.
- Krinsley, D.H., Friend, P.F. & Klimentidis, R. (1976) Eolian transport textures on the surfaces of sand grains of Early Triassic age. *Geological Society of American Bulletin*, 87, 130–132. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<130:ETTOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<130:ETTOTS>2.0.CO;2)
- Krinsley, D.H. & Wellendorf, W. (1980) Wind velocities determined from the surface textures of sand grains. *Nature*, 283, 372–373. <https://doi.org/10.1038/283372a0>
- Kuenen, P.H. (1960) Experimental abrasion: 4. Eolian action. *The Journal of Geology*, 68, 427–449. <https://doi.org/10.1086/626675>
- Le Pera, E. & Morrone, C. (2020) The use of mineral interfaces in sand-sized volcanic rock fragments to infer mechanical durability. *Journal of Palaeogeography*, 9, 21. [doi:10.1186/s42501-020-00068-8](https://doi.org/10.1186/s42501-020-00068-8)
- Le Pera, E., Morrone, C., Arribas, J., Arribas, M.E., Ancochea, E. & Huertas, M.J. (2021) Petrography and provenance of beach sands from volcanic ocean islands: Cabo Verde, Atlantic Ocean. *Journal of Sedimentary Research*, 91, 92–115. <https://doi.org/10.2110/jsr.2020.096>
- Leterrier, J., Maury, R., Thonon, P., Girard, D. & Marchal, M. (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 139–154. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4)
- Li, W., Goodchild, M.F. & Churc, C. (2013) An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems. *International Journal of Geographical Information Science*, 27, 1227–1250. <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.752093>
- Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J.S., Selvaraj, K. & James, R.A. (2022) Microtextures on quartz grains from the Gulf of Mexico and the Mexican Pacific coastal sediments: implications for sedimentary processes and depositional environment. *Journal of Palaeogeography*, 11, 256–274. <https://doi.org/10.1016/j.jop.2022.04.001>
- Mahaney, W.C. (2002) *Atlas of sand grain surface textures and applications*. New York: Oxford University Press, p. 237.
- Makvandi, S., Beaudoin, G., McClenaghan, B.M. & Layton-Matthews, D. (2015) The surface texture and morphology of magnetite from the Izok Lake volcanogenic massive sulfide deposit and local glacial sediments, Nunavut, Canada: application to mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 150, 84–103. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2014.12.013>
- Margolis, S.V. & Krinsley, D.H. (1971) Submicroscopic frosting on eolian and subaqueous quartz sand grains. *Geological Society of*

- American Bulletin*, 82, 3395–3406. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[3395:SFOEAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[3395:SFOEAS]2.0.CO;2)
- Maria, A. & Carey, S. (2002) Using fractal analysis to quantitatively characterize the shapes of volcanic particles. *Journal of Geophysical Research*, 107, 2283. <https://doi.org/10.1029/2001JB000822>
- Maria, A. & Carey, S. (2007) Quantitative discrimination of magma fragmentation and pyroclastic transport processes using the fractal spectrum technique. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.12.006>
- Marsaglia, K.M. (1993) Basaltic Island sand provenance. In: Johnsson, M.J. & Basu, A. (Eds.) *Processes controlling the composition of clastic sediments Geological Society of America, Special Paper*, Vol. 284. Boulder: The Geological Society of America, pp. 41–65. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p41>
- Mejía-Ledezma, R.O., Kasper-Zubillaga, J.J., Álvarez Sánchez, L.F., Mendieta-Lora, M., Arellano-Torres, E., Tetlalmatzi-Marínez, J.L., González-Bermúdez, A., Patiño-Andrade, D. & Armstrong-Altrin, J.S. (2020) Surface textures of quartz and ilmenite grains from dune and beach sands of the Gulf of Mexico coast, Mexico: implications for fluvial, aeolian and marine transport. *Aeolian Research*, 45, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100611>
- Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledezma, R.O., Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E. & Álvarez Sánchez, L.F. (2018) Mineralogical and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico. *Chemie Der Erde. Geochemistry*, 78, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.004>
- Mo, P.Q. (2020) Internal rolling method for particle shape evaluation and reconstruction. *PLoS One*, 15, e0242162. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242162>
- Montero, R.S. & Bribiesca, E. (2009) State of the art of compactness and circularity measures. *International Mathematical Forum*, 4, 1305–1335.
- Moral-Cardona, J.P., Gutierrez-Mas, J.M., Sánchez-Bellón, S., Domínguez-Bella, S. & Martínez-López, J. (2005) Surface textures of heavy-mineral grains: a new contribution to provenance studies. *Sedimentary Geology*, 174, 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.12.006>
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. & Gottardi, G. (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39, 55–76. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>
- Morrone, C., Le Pera, E., Marsaglia, K.M. & De Rosa, R. (2020) Compositional and textural study of modern beach sands in the active volcanic area of the Campania region (southern Italy). *Sedimentary Geology*, 396, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105567>
- Morton, A.C. & Hallsworth, C.R. (2007) Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. In: Mange, M.A. & Wright, D.T. (Eds.) *Heavy minerals in use*. Developments in Sedimentology, Vol. 58. Amsterdam: Elsevier, pp. 215–245. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58007-6](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58007-6)
- Negendank, J.F.W., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H. & Wehrle, D. (1985) Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *GeofisiInternacional*, 24, 477–575.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno, D.J., Alaniz-Alvarez, S.A. & Nieto-Samaniego, A.F. (1992) *Carta Geológica de la República Mexicana, Esc.1:2 000 000, 5a. Edic. y Texto Explicativo*. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología y Secretaría de Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, p. 74.
- Ortiz-Pérez, M.A. & Espinosa, R.L.M. (1991) Clasificación geomorfológica de las costas de México. *Geografía y Desarrollo*, 2, 2–9.
- Osserman, R. (1978) Isoperimetric inequality. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 84, 1182–1238.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V., Tibali, A. & Vezzoli, L. (1991) Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt States of Guanajuato and Michoacán. Geological Society of America Maps and Chart Series MCH072, scale 1: 3000 000 1 sheet 22.
- Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J.A. & Salas Ortega, M.D.R. (2010) Universidad Veracruzana Repositorio Institucional In Gobierno del Estado de Veracruz. *Hidrología Universidad Veracruzana*, 1, 85–122.
- Pérez-Quezadas, J., Cortés-Silva, A., Salas-Ortega, M.R., Araguás-Araguás, L., Pedro Morales-Puente, P. & Carrillo-Chávez, A. (2017) Evidencias hidrogeoquímicas e isotópicas sobre el origen del agua subterránea en la cuenca hidrográfica Río Actopan, Estado de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 3(4), 25–37.
- Pérez-Villegas, G. (1990) *Wind sheet IV.4.2, Vientos dominantes 1:4 000.000*. Mexico: Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Phillips-Lander, C.M., Legett, C., IV, Elwood Madden, A.S., Megan, E. & Elwood Madden, M.E. (2017) Can we use pyroxene weathering textures to interpret aqueous alteration conditions? Yes and No. *American Mineralogist*, 102, 1915–1921. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6155>
- Ramer, U. (1972) An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Computer Graphics and Image Processing*, 1, 244–256. [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(72\)80017-0](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(72)80017-0)
- Reddad, H., El Talibi, H., Perri, F., El Moussaqui, S., Zrdeb, M.A., Zaghoul, M.N. & Critelli, S. (2016) Textural and compositional controls on modern fluvial and beach sands of Mediterranean coastal Rif belt (Northern Rif, Morocco). *Italian Journal of Geosciences*, 135, 336–349. <https://doi.org/10.3301/IJG2015.33>
- Resentini, A., Andò, S. & Garzanti, E. (2018) Roundness of detrital minerals by image analysis: sediment transport, shape effects and provenance implications. *Journal of Sedimentary Research*, 88, 276–289. <https://doi.org/10.2110/jsr.2018.12>
- Roduit, N. (2007) JMicroVision: un logiciel d'analyse d'images pétrographiques polyvalent. Unpublished PhD Thesis, Université de Genève, Switzerland. 116.
- Roduit, N. (2019) JMicroVision: image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.3.1. <https://jmicrovision.github.io>
- Rosenfeld, A. (1974) Compact figures in digital pictures. *IEEE Trans Systems, Man and Cybernetics*, 4, 221–223.
- Salvino, J.F. & Velbel, M.A. (1989) Faceted garnets from sandstones of the Munising Formation (Cambrian), northern Michigan: petrographic evidence for their origin by intrastratal dissolution. *Sedimentology*, 36, 371–379. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1989.tb00613.x>

- Schott, J., Berner, R.A. & Sjöberg, E.L. (1981) Mechanism of pyroxene and amphibole weathering-I. Experimental studies of iron-free minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 2123–2135. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)90065-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90065-X)
- Servicio Geológico Mexicano. (2017) Cartografía Geológica De La República Mexicana. Geological Chart. Formato SHP Escala 1:250,000.
- Shukri, N.M. (1950) The mineralogy of some Nile sediments. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 105, 511–534.
- Tamayo, J.L. (2013) *Geografía Moderna de México*. México: Trillas, p. 390.
- Tejeda Martínez, A., Acevedo, F. & Jáuregui, E. (1988) *Atlas Climático del Estado de Veracruz*. Mexico: Universidad Veracruzana, p. 150.
- Thomas, M.C., Wiltshire, A.T. & Williams, A.T. (1995) The use of Fourier descriptors in the classification of particle shape. *Sedimentology*, 42, 635–645. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1995.tb00397.x>
- Varghese, T.I., Prakash, T.N. & Nagendra, R. (2016) Depositional history of coastal plain sediments, Southern Kerala, South West India. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 7, 6. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000355>
- Velbel, M.A. (2007) Surface textures and dissolution processes of heavy minerals in the sedimentary cycle: examples from pyroxenes and amphiboles. In: Mange, M.A. & Wright, D.T. (Eds.) *Developments in Sedimentology*, Vol. 58. Amsterdam, pp. 113–150.
- Velbel, M.A. & Barker, W.W. (2008) Pyroxene weathering to smectite: conventional and cryo-field emission scanning electron microscopy, Koua Bocca ultramafic complex, Ivory Coast. *Clays and Clay Minerals*, 56, 112–127. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2008.0560110>
- Velbel, M.A., McGuire, J.T. & Madden, A.S. (2007) Scanning electron microscopy of garnet from southern Michigan soils: etching rates and inheritance of preglacial and pre-pedogenic grain-surface textures. *Developments in Sedimentology*, 58, 413–432.
- Velbel, M.A. & Ranck, J.M. (2008) Etch pits on naturally altered olivine from dunites of the Appalachian Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. *Mineralogical Magazine*, 72, 145–148. <https://doi.org/10.1180/minmag.2008.072.1.145>
- Vos, K., Vandenberghe, N. & Elsen, J. (2014) Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): from sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*, 128, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>
- Vossepoel, A.M. & Smeulders, A.W.M. (1982) Vector code probability and metrication error in the representation of straight lines of finite length. *Computer Graphics Image Processing*, 20, 347–368.
- Wadell, H. (1932) Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 40, 443–451.
- Zhao, B. & Wang, J. (2016) 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with  $\mu$ CT. *Powder Technology*, 291, 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.029>
- Zhou, B., Wang, J. & Wang, H. (2018) Three-dimensional sphericity, roundness and fractal dimension of sand particles. *Geotechnique*, 68, 18–30. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.20>

## SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information can be found online in the Supporting Information section at the end of this article.

**How to cite this article:** Kasper-Zubillaga, J.J., Martínez-Serrano, R.G., Buchs, D.M., Mendieta-Lora, M., Arellano-Torres, E. & Álvarez-Sánchez, L.F. (2023) Surface textures of detrital pyroxenes in coastal dune sands (western Gulf of Mexico, Mexico): Implications for their preservation and geoenvironmental processes. *The Depositional Record*, 00, 1–21. <https://doi.org/10.1002/dep2.228>

---

## 10. Conclusiones

- 1) El estudio microtextural de clinopiroxenos detríticos por medio de MEB posibilita explicar la dinámica que experimentan durante su depósito en el ambiente de dunas costeras. Esto siempre y cuando, el análisis dinámico es diagnosticado en base a la integración de la génesis y frecuencia microtextural con los parámetros morfométricos de los granos.
- 2) El análisis de imágenes MEB mediante JMicroision permite cuantificar con precisión los parámetros morfométricos de los granos, además, confiere rigor al cálculo proporcional de las microtexturas sobre la superficie de los granos.
- 3) La falta de asociación entre la compacidad y el tamaño de grano de los clinopiroxenos, es respuesta, más que a la intensidad del viento, al régimen rotacional con el que incide sobre las dunas costeras, y que afecta principalmente, el transporte sucesivo: barlovento → cresta → sotavento. Es posible que esto revele, estadísticamente, la sedimentación cruzada propia de las dunas.
- 4) El dominio de las microtexturas de origen mecánico en todas las localidades, confirma las condiciones dinámicas de alta energía en las que los clinopiroxenos son depositados sobre las dunas costeras. La variación porcentual que presentan las diferentes microtexturas mecánicas en las localidades, indica condiciones dinámicas específicas, y por consiguiente, un desarrollo microtextural propio en cada localidad.
- 5) En los clinopiroxenos de **LCH**, **EMR**, **PSL** y **BCA**, domina ampliamente *Flat Cleavage Surface*, microtextura heredada del ambiente fluvial y marino intermareal. En los clinopiroxenos de **IST**, **VRC**, **FRN** y **LMN**, se equilibra el dominio porcentual entre *Flat Cleavage Surface* y *Bulbous Edges*, esta última, microtextura indicativa para la fase de transporte eólico. En **CHC**, *Bulbous Edges* y *Elongated Depressions* dominan sobre la superficie de los clinopiroxenos, distinguiéndose del dominio que *Flat Cleavage Surface* posee en las demás localidades. Esto último revela que un ambiente eólico intenso y constante, remueve por medio de la abrasión, las microtexturas generadas en una a fase o subambiente previo al que se estudia, y por lo tanto, esta acción debe considerarse como una limitante para determinar el desarrollo microtextural de los clinopiroxenos desde su fuente hasta su depósito.
- 6) La aparente interrelación que existe entre las microtexturas dominantes, con el tamaño de las dunas costeras donde se depositan los clinopiroxenos. La microtextura *Flat Cleavage Surface*, domina en las dunas de **LCH**, **EMR**, **PSL** y **BCA**, siendo estas, las mas pequeñas del área de estudio. En el caso de las dunas de **VRC** y **FRN**, representan el tamaño intermedio de todas las dunas estudiadas, y es en estas dunas, donde *Flat Cleavage Surface* equilibra su dominio con *Bulbous Edges*. Este equilibrio también se presenta en las dunas de **IST** y **LMN**, sin embargo, el equilibrio porcentual en estas localidades, responde a su adjunta ubicación con prolongadas playas, y no al tamaño de sus dunas, que es pequeño. En las dunas de **CHC**, las mas extensas del área de estudio, domina *Bulbous Edges* asociada con *Elongated Depressions*, resultado de una fase eólica más prolongada. Esta aparente interrelación demuestra que la morfología de las dunas costeras y de sus playas adjuntas, tienden a repercutir en el desarrollo microtextural de los clinopiroxenos.

---

7) El desarrollo de idénticas microtexturas mecánicas y mecánico-químicas tanto en los clinopiroxenos como en el cuarzo, sugiere un comportamiento mecánico similar entre los silicatos. Lo mismo ocurre entre las microtexturas de origen químico, que al coincidir en olivino, granate y horblenda, sugiere que, minerales formados en condiciones similares de temperatura, responden de manera idéntica bajo las condiciones de un mismo ambiente de intemperismo químico. Sin embargo, para confirmar o rechazar este planteamiento, se requiere un estudio *ex profeso*.

8) La falta asociación entre la compacidad y el tamaño de grano, aunada al dominio de microtexturas de origen mecánico en todas las localidades, validan la hipótesis del trabajo, en la cual se plantea, que el escenario de alta energía es limitante para el intemperismo químico (weathering-limited erosion regime). Esto también es respaldado de manera sólida por los porcentajes superficiales de las microtexturas químicas sobre la superficie de los clinopiroxenos, que a pesar de encontrarse depositados en un ambiente de alta humedad climática, adecuado para su desarrollo, estas no representan una presencia preponderante. Este escenario tiende, al mismo tiempo, a ser favorecido por la alta energía de relieve del área contigua, que provee un constante suministro de clinopiroxenos hacia las dunas, y por lo tanto, un pronto depósito de los minerales antes de su completa alteración.

---

## Referencias

- Allende-Arandía, M. E. (2015). Escenarios de la Dinámica y Termodinámica en el Sistema Arrecifal Veracruzano Norte ante el Cambio Climático. Tesis Doctoral. México, D. F., UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Anthony, E. J. (2009). *Shore Processes and Their Paleoinvaromental Applications*. Elsevier, NL (519 pp.).
- Arche, A. (2010). *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ES (1288 pp.).
- Arens, S. M., Van Kaam-Peters, H. M. E., & Van Boxel, J. H. (1995). Air flow over foredunes and implications for sand transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20 (4), 315 – 332.
- Armstrong-Altrin, J. S. & Nathaly-Pineda, O. (2013). Microtextures of detrital sand grains from the Tecolutla, Nautla, and Veracruz beaches, western Gulf of Mexico, Mexico: implications for depositional environment and paleoclimate. *Arabian Journal of Geosciences*, 7 (10), 4321 – 4333.
- Armstrong-Altrin, J. S. (2020). Detrital zircon U–Pb geochronology and geochemistry of the Riachuelos and Palma Sola beach sediments, Veracruz State, Gulf of Mexico: a new insight on palaeoenvironment. *Journal of Palaeogeography*, 9, 28.
- Bagnold, R. A. (1954). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Springer, UK (265 pp.).
- Barreuzeta, E., Cuervas-Mont, J., Rodríguez-Rey, Á. & Ordóñez-Casado, B.. (2019). Representativity of 2D Shape Parameters for Mineral Particles in Quantitative Petrography. *Minerals*, 9, 768.
- Blott, J. S. & Pye, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55, 31 – 63.
- Boggs, S. (2009). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge University Press, USA (600 pp.).
- Brantley, S. L., & Chen, Y. (1995). Chemical Weathering Rates of Pyroxenes and Amphiboles. *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, 4, 119 – 172.
- Calderón-Bustamante, O. (2017). Respuesta Dinámica del Golfo de México al paso de un frente frío intenso: Caso Frente Frío No. 4 de 2007. Tesis de Maestría. México, D. F., UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Cantagrel, J. M. & Robin, C. (1979). K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks - relations between the andesitic and the alkaline provinces. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 99 – 114.
- Chen, Y. & Brantley, S. L. (1998). Diopside and anthophyllite dissolution at 258 and 908C and acid pH. *Chemical Geology*, 147, 233 – 248.
- Claes, S., Soete, J., Cnudde, V. & Swennen, R. (2016). A three-dimensional classification for mathematical pore shape description in complex carbonate reservoir rocks. *Mathematical Geosciences*, 48, 619 – 639.
- Colman, S. M. (1982). *Chemical Weathering of Basalts and Andesites: Evidence from Weathering Rinds*. U. S. Geological Survey, USA (51 pp.).
- Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J. (2013). *An introduction to the Rock-Forming Minerals*. The Mineralogical Society, UK (498 pp.).

- 
- Delgado-Fernandez, I. (2010). A review of the application of the fetch effect to modelling sand supply to coastal foredunes. *Eolian Research*, 2, 61 – 70.
- Delgado-Fernandez, I. (2011). Meso-scale modelling of aeolian sediment input to coastal dunes. *Geomorphology*, 130 (3–4), 230 – 243.
- Delvigne, J. (1985) Micromorphology of the alteration and weathering of pyroxenes in the Koua Bocca ultramafic intrusion, Ivory Coast, West Africa. *Sciences Géologiques Mémoires*, 72, 57 – 68.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Instituto de Geología UNAM*, 2, 172 – 187.
- Ferrari, L., Lopez-Martinez, M., Aguirre-Díaz, G., & Carrasco-Núñez, G. (1999). Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, 27, 303 – 306.
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M. T., Petrone, C. M., Jacobo-Albarrán, J., & López-Martínez, M. (2005). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 284 – 306.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Menea, V. & Menea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522 – 523, 122 – 149.
- Folk, R. L., Andrews, P. B. & Lewis, D. W. (1970). Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13, 937 – 968.
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, USA (182 pp.).
- Fryberger, S. G. & Dean, G. (1979). Dune forms and wind regime. *U. S. Geological Survey*, 1052, 137 – 169.
- García, E. (1998a). *Climas [Shape]. 1 :1 000 000*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- García, E. (1998b). *Precipitación Total Anual. [Shape]. 1 :1 000 000*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Garzanti, E., Resentini, A., Andò, S., Vezzoli, G., Pereira, A. & Vermeesch, P. (2015). Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral and aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology*, 62 (4), 971 – 996.
- Gómez-Lizárraga, (2019). *Instructivo para usuarios: Preparación de muestras para Microscopia Electrónica de Barrido*. UNAM – Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. <http://www.icmyl.unam.mx/Pdf/Home/2019/Instructivo%20para%20Usuarios%20Preparacion%20de%20muestras%20MEB.pdf>
- Gómez-Tuena, A. (2002). *Control Temporal del Magmatismo de Subducción en la Porción Oriental de la Faja Volcánica Transmexicana: Caracterización del Manto, Componentes en Subducción y Contaminación Cortical*. Tesis Doctoral. México, D.F., UNAM, Instituto de Geología.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 227 – 283.
- Gonzales, R. C. & Woods, R. C. (2002). *Digital Image Processing*. Pearson International Edition, USA, (976 pp.).

- 
- Gravenor, C. P. & Leavitt, R. K. (1981). Experimental formation and significance of etch patterns on detrital garnets. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18 (4), 765 – 775.
- Hernández-Santana, J., Pérez-Damián, J., Rosete Vergés, F., Méndez-Linares, A., & Navarro-Salas, E. (2017). Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de curvas de nivel y la energía del relieve. *UNAM - Instituto de Geografía*, 94, 1 – 15.
- Hesp, P. A., Davidson-Arnott, R., Walker, I. J. & Ollerhead, J. (2005). Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island, Canada. *Geomorphology*, 65 (1-2), 71 – 84.
- Jain, J. K. (1989). *Fundamentals of Digital Images Processing*. Prentice Hall, USA (569 pp.).
- Jiménez-Orocio, O., Hesp, P., Martínez, M. L., Espejel, I., & Moreno-Casasola, P. (2014). Diagnóstico de las dunas costeras de México. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MX* (350 pp.).
- Kasper-Zubillaga, J. J. & Faustinos-Morales, R. (2007). Análisis por microscopía electrónica de barrido de granos de cuarzo de duna desérticas y costeras (Desierto de Altar, NW México). *Ciencias Marinas*, 33 (1), 11 – 22.
- Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., & Morton-Bermea, O. (2008). Heavy Minerals and Rare Earth Elements in Coastal and Inland Dune Sands of El Vizcaino Desert, Baja California Peninsula, Mexico. *Marine Georesources & Geotechnology*, 26, 172 – 188.
- Kasper-Zubillaga, J. J. (2009). Roundness in quartz grains from inland and coastal dune sands, Altar Desert, Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61 (1), 1 – 12.
- Khisina, N. R., Khramov, D. A., Kolosov, M. V., Kleschev, A. A. & Taylor, L. A. (1995). Formation of ferriolivine and magnesioferrite from Mg — Fe-olivine: Reactions and kinetics of oxidation. *Physics and Chemistry of Minerals*, 22, 241 – 250.
- Klein, C. (2001). *Manual of Mineral Science*. Wiley, USA (656 pp.).
- Komar, P. D. (1976). *Beaches Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, USA (429 pp.).
- Krinsley, D. H. & Takahasi, T. (1962). The surface textures of sand grains, an application of electron microscopy. *Science*, 135, 923 – 925.
- Krinsley, D. H. & Doornkamp, J. C. (1973). *Atlas of Quartz Sand Surface Textures*. Cambridge University Press, UK (102 pp.).
- Krinsley, D. H., Friend, P. F. & Klimentidis, R. (1976). Eolian transport textures on the surfaces of sand grains of Early Triassic age. *Geological Society of American Bulletin*, 87 (1), 130 – 132.
- Krumbein, W. C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Journal of Sedimentary*, 11 (2), 64 – 72.
- Leeder, M. R. (2011). *Sedimentology and Sedimentary Basins: From Turbulence to Tectonics*. Wiley-Blackwell, UK (784 pp.).
- López-Infanzón, M. (1991). Petrologic study of the volcanic rocks in the Chiconquiaco-Palma Sola area, central Veracruz, Mexico. Thesis of Master, USA, Louisiana, Tulane University.
- Lynch, K., Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. (2008). Aeolian fetch distance and secondary airflow effects: the influence of micro-scale variables on meso-scale foredune development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 (7), 991 – 1005.
- Mahaney, W. C. (2002). *Atlas of sand grain surface textures and applications*. Oxford University Press, USA (244 pp.).

- 
- Maresch, W. V., Czank, M. & Schreyer, W. (1994). Growth mechanisms, structural defects and composition of synthetic tremolite: what are the effects on macroscopic properties?. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118, 297 – 313.
- Martínez-López, B. & Pares-Sierra, A. (1998). Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 24, 65 – 93.
- McCullagh, M. J., Hardy, N. E. & Lockman, W. O. (1972). Formation And Migration Of Sand Dunes: A Simulation Of Their Effect In The Sedimentary Enviroment. *Mathematical Models of Sedimentary Processes*, 175 – 190.
- Mejía-Ledezma, R. O., Kasper-Zubillaga, J. J., Alvarez-Sánchez, L. F., Mendieta-Lora, M., Arellano-Torres, E., Tetlalmatzi-Martínez, J. L., Gonzalez-Bermúdez, A., Patiño-Andrade, D. & Armstrong-Altrin, J. S. (2020). Surface textures of quartz and ilmenite grains from dune and beach sands of the Gulf of Mexico Coast, Mexico: Implications for fluvial, aeolian and marine transport. *Aeolian Research*, 45, 100611.
- Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledezma, R. O., Kasper-Zubillaga, J. J., Arellano-Torres, E. & Álvarez-Sánchez, L. F. (2018). Mineralogical and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico. *Geochemistry*, 78 (3), 323 – 339.
- Mendieta-Lora, M. (2019). Procedencia en dunas y playas de la costa central del estado de Veracruz, México: Implicaciones climáticas y de procesos costeros. Tesis de Licenciatura, México, HGO, UAEH, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.
- Montero, R. S. & Bribiesca, E. (2009). State of the Art of Compactness and Circularity Measures. *International Mathematical Forum*, 4 (27), 1305 – 1335.
- Moral-Cardona, J. P, Gutiérrez-Mas, J. M., Sánchez-Bellón, A., Domínguez-Bella, S. & Martínez-López, J. (2005). Surface textures of heavy-mineral grains: a new contribution to provenance studies. *Sedimentary Geology*, 174, 223 – 235.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K. & Gottardi, G. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 52, 535 – 550.
- Negendank, J. F. W., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H. & Wehrle, D. (1985). Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *International Geophysics*, 24, 477 – 575.
- Nixon G. T., Demant A., Armstrong R. L. & Harakal J. E. (1987). K-Ar and Geologic data bearing on the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional (México)*, 26, 109 – 158.
- Padilla y Sanchez, R.J. (1986). Post-Paleozoic tectonics of Northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf Of Mexico. *International Geophysics*, 25, 157 – 206.
- Ortiz-Pérez, M. A., & Figueroa-Mah Eng, J. M. (2007). Diferenciación Geomorfológica de las Costas de México. *Atlas Nacional III-4. México, D. F.: UNAM - Instituto de Geografía.*
- Osserman, R. (1978). Isoperimetric inequality. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 84 , 1182 – 1238.
- Padilla y Sanchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Sociedad Geológica Mexicana*, 59, 19 – 42.
- Pérez-Tejada, H. E. (2008). *Estadística, Ciencias Sociales, Del Comportamiento Y de la Salud.* Cengage Learning Latin America, MX (878 pp.).
- Pettijohn, J. F. (1972). *Sedimentary Rocks.* Harper & Row, USA (628 pp.).

- 
- Phillips-Lander, C. M., Legett, C., Elwood Madden, A. S., & Elwood Madden, M. E. (2017). Can we use pyroxene weathering textures to interpret aqueous alteration conditions? Yes and No. *American Mineralogist*, 102(9), 1915 – 1921.
- Porter, J. J. (1962). Electron microscopy of sand surface texture. *Journal of Sedimentary Petrology*, 32 (1), 124 – 135.
- Powers, M. (1982). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal Sedimentary Petrology*, 23, 117 – 119.
- Pye, K. & Tsoar, H. (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springer, DE (476 pp.).
- Resentini, A., Andò, S. & Garzanti, E. (2018). Quantifying Roundness of Detrital Minerals By Image Analysis: Sediment Transport, Shape Effects, and Provenance Implications. *Journal of Sedimentary Research*. 88 (2), 276 – 289.
- Robin, C. (1976). Présence simultanée de magmatismes de significations tectoniques opposées dans l'Est du Mexique. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 18, 1637 – 1645.
- Roduit, N. (2019). JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.3.1. <https://jmicrovision.github.io>.
- Romero-Centeno, R. & Zavala-Hidalgo, J. (2020). *Atlas de Línea Base Ambiental del Golfo de México: Circulación Oceánica y Oleaje*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, MX (182 pp.).
- Salvador, A. (1991). *The Gulf of México Basin*. Geological Society of America, USA (568 pp.).
- Schuenemeyer, J. H. & Drew, L. J. (2011). *Statistics for Earth and Environmental Scientists*. Wiley, SG (420 pp.).
- SEMAR (2017). *Tablas Numéricas de Predicción de Mareas: Estaciones Tuxpan y Veracruz*. [Base de datos]. México: Secretaría de Marina Armada de México.
- SGM (2019). *Geología de la República Mexicana [Shape]*. 1:100 000. Pachuca: Servicio Geológico Mexicano.
- Siebert, L. & Carrasco-Núñez, G. (2002). Late-Pleistocene to precolumbian behind-the-arc mafic volcanism in the eastern Mexican Volcanic Belt; implications for future hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 179 – 205.
- Snedden, J. W. & Galloway, W. E. (2019). *The Gulf of Mexico Sedimentary Basin: Depositional Evolution and Petroleum Applications*. Cambridge University Press, UK (344 pp.).
- Stapor, F. W. Jr. (1973). Heavy Mineral Concentrating Processes and Density/Shape/Size Equilibria in the Marine and Coastal Dune Sands of the Apalachicola, Florida, Region. *Journal of Sedimentary Petrology*, 43, 396 – 407.
- Tapia-Fernández, H. J. (2018). *Sedimentología, Petrografía y Geoquímica de Sedimentos del Litoral Sur del Golfo de México: Implicaciones Sobre el Ambiente de Depósito y Procedencia*. Tesis Doctoral. México, D. F., UNAM, Instituto de Geología.
- Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments: *Geological Society of America Bulletin*, 25, 655 – 744.
- Vargas, A., Duque, Z. & De Romero, M. (2007). Parámetros de sonicación para el desprendimiento y estudio de las biopelículas generadas por biocorrosión. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30 (3), 216 – 224.

- 
- Velbel, M. A. (2007). Surface Textures and Dissolution Processes of Heavy Minerals in the Sedimentary Cycle: Examples from Pyroxenes and Amphiboles. *Developments in Sedimentology*, 58, 113 – 150.
- Velbel, M. A., Mcguire, J. T. & Madden, A. S. (2007). Scanning Electron Microscopy of Garnet from Southern Michigan Soils: Etching Rates and Inheritance of Pre-Glacial and Pre-Pedogenic Grain-Surface Textures. *Developments in Sedimentology*, 58, 413 – 432.
- Velbel, M. A. & Backer, W. W. (2008). Pyroxene weathering to smectite: Conventional and cryo-field emission scanning electron microscopy, Koua Bocca ultramafic complex, Ivory Coast. *Clays and Clay Minerals*, 56, 112 – 127.
- Velbel, M. A. & Ranck J. M. (2008). Etch pits on naturally altered olivine from dunites of the Appalachian Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. *Mineralogical Magazine*, 72 (1), 145 – 148.
- Vergara-Martínez, A., Zárate-López, J., De la Calleja-M., A. & Jiménez-Henández, A. (2000). Carta Geológico-Minera Veracruz E14-3. Consejo de Recursos Minerales, México (79 pp.).
- Vidal-Zepeda, R. (2005). Las Regiones Climáticas de México. UNAM, Instituto de Geografía, MX (212 pp.).
- Vos, K., Vandenberghe, N. & Elsen J. (2014). Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy. *Earth-Science Reviews*, 128, 93 – 104.
- Walker, I. J., Hesp, P. A., Davidson-Arnott, R. G. D. & Ollerhead, J. (2006). Topographic steering of alongshore airflow over a vegetated foredune: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Journal of Coastal Research*, 22, 1278–1291.
- Walker, I. J. (2020). Aeolian (windblown) sand transport over beaches. *Sandy Beach Morphodynamics*, 213 – 253.
- Warren, A. (2013). *Dunes: Dynamics, Morphology, History*. Wiley-Blackwell, UK (240 pp.).
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments: *Journal of Geology*, 30, 377 – 392.
- Wentworth, C. K. (1935). The terminology of coarse sediments: National Research Council, 98, 225 –246.
- Zavala-Hidalgo, J., & Fenández-Eguiarte, A. (2004). Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México. *Taller de Ordenamiento Ecológico Costero*, Nov. 15 -16, 2004.
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., & Mateos-Jasso, A. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years?. *Atmósfera*, 27, 317 - 334.

# Anexos

## I. Geoquímica

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	NiO	CuO	CoO	Total	Porcentajes Diagrama de Clasificación		
															FeO	CaO	MgO
Std-Kaer-1	39.92	12.30	12.91	0.00	12.29	0.12	11.80	1.13	2.46	4.93	0.01	0.01	0.01	97.89			
Std-Kaer-2	39.75	12.09	12.65	0.00	12.38	0.13	11.82	1.19	2.42	5.03	0.02	0.01	0.03	97.51			
Std-Kaer-3	39.71	12.21	12.89	0.00	12.43	0.13	11.85	1.16	2.45	4.96	0.00	0.00	0.01	97.78			
IS-S-1-1	52.25	2.07	9.42	0.00	15.34	0.31	20.20	0.02	0.34	0.77	0.02	0.00	0.01	100.74	20.95	44.92	34.12
IS-S-1-2	52.57	2.06	9.46	0.01	15.24	0.31	19.95	0.01	0.32	0.74	0.00	0.02	0.00	100.69	21.19	44.68	34.13
IS-S-1-3	52.53	1.86	10.61	0.00	14.93	0.31	19.79	0.02	0.42	0.93	0.00	0.00	0.00	101.40	23.40	43.65	32.94
IS-S-1-4	47.78	4.47	8.23	0.00	14.00	0.23	22.62	0.02	0.30	0.46	0.01	0.01	0.00	98.11	18.34	50.43	31.22
IS-S-1-7	50.33	3.80	5.34	0.00	15.31	0.06	22.55	0.01	0.28	0.71	0.02	0.00	0.00	98.40	23.63	44.97	31.40
IS-S-1-9	51.91	1.82	4.83	0.00	16.87	0.08	21.79	0.02	0.17	0.35	0.01	0.01	0.00	97.85	12.36	52.19	35.45
IS-S-1-13	51.08	3.73	5.36	0.00	15.51	0.09	22.38	0.03	0.23	0.55	0.01	0.03	0.00	99.00	11.10	50.10	38.80
IS-S-1-14	50.53	3.36	7.77	0.00	14.29	0.32	21.71	0.02	0.55	0.91	0.01	0.00	0.01	99.47	12.39	51.75	35.86
IS-S-1-15	50.48	2.82	8.52	0.00	14.69	0.26	20.82	0.01	0.47	1.14	0.01	0.00	0.00	99.21	17.75	49.59	32.65
IS-S-2-1	51.54	5.81	4.22	0.00	15.66	0.09	21.17	0.02	0.45	0.66	0.01	0.00	0.00	99.64	19.36	47.28	33.36
IS-S-2-2	50.25	5.69	7.13	0.00	13.29	0.14	21.73	0.02	0.49	1.47	0.01	0.00	0.02	100.23	10.29	51.56	38.15
IS-S-2-3	53.96	2.13	7.64	0.00	14.93	0.33	20.57	0.03	0.47	0.57	0.00	0.00	0.00	100.63	16.92	51.56	31.52
IS-S-2-4	53.83	2.74	7.90	0.00	14.73	0.20	21.19	0.00	0.28	0.65	0.04	0.00	0.03	101.59	17.71	47.68	34.61
IS-S-2-5	51.17	2.03	11.11	0.00	14.65	0.24	18.85	0.03	0.30	0.90	0.00	0.04	0.03	99.34	18.04	48.36	33.61
IS-S-2-7	50.65	3.72	7.95	0.00	14.30	0.17	21.86	0.02	0.51	1.05	0.00	0.02	0.00	100.24	24.91	42.26	32.83
IS-S-2-8	50.55	5.32	8.33	0.00	13.21	0.20	22.11	0.02	0.37	1.38	0.00	0.00	0.00	101.49	18.02	49.56	32.42
IS-S-2-9	51.36	5.13	8.02	0.00	13.30	0.17	22.10	0.03	0.53	1.43	0.01	0.00	0.00	102.06	19.08	50.66	30.26
IS-S-2-10	51.17	2.03	7.46	0.00	15.27	0.34	21.23	0.02	0.46	0.62	0.00	0.00	0.00	98.59	18.47	50.90	30.63
IS-S-2-11	47.56	3.29	8.69	0.01	14.56	0.17	20.91	0.03	0.40	1.05	0.00	0.04	0.00	96.69	16.96	48.30	34.74
IS-S-2-12	48.99	2.19	8.05	0.00	14.63	0.38	21.20	0.03	0.42	0.58	0.00	0.02	0.00	96.49	19.68	47.35	32.97
IS-S-2-15	50.35	3.12	6.95	0.00	14.56	0.22	21.38	0.01	0.44	1.02	0.00	0.02	0.00	98.07	18.34	48.32	33.34
EMR-S-3-1	52.59	2.88	7.44	0.00	15.29	0.16	21.03	0.02	0.32	0.55	0.01	0.01	0.00	100.31	17.00	48.06	34.94
EMR-S-3-2	51.44	4.59	7.69	0.00	13.83	0.10	22.65	0.01	0.31	0.64	0.02	0.02	0.00	101.28	17.42	51.28	31.30
EMR-S-3-3	49.59	6.17	7.79	0.00	13.07	0.13	22.06	0.01	0.53	1.56	0.03	0.00	0.01	100.95	18.15	51.40	30.45
EMR-S-3-4	51.94	2.00	8.33	0.00	15.66	0.28	20.75	0.03	0.33	0.66	0.03	0.01	0.01	100.01	18.62	46.38	35.00
EMR-S-3-5	50.19	4.73	6.71	0.00	15.45	0.11	21.80	0.02	0.34	0.44	0.01	0.03	0.00	99.83	15.27	49.59	35.14
EMR-S-3-6	50.56	4.28	7.75	0.00	14.67	0.16	22.23	0.03	0.38	0.57	0.00	0.03	0.01	100.65	17.36	49.79	32.85
EMR-S-3-7	50.88	2.61	5.62	0.00	15.99	0.13	22.96	0.02	0.26	0.30	0.02	0.01	0.00	98.80	12.60	51.51	35.88
EMR-S-3-8	53.17	2.39	8.52	0.00	16.05	0.32	20.05	0.01	0.36	0.38	0.02	0.00	0.00	101.25	19.09	44.94	35.97
EMR-S-3-9	47.10	6.90	7.64	0.00	13.19	0.09	23.12	0.02	0.25	1.06	0.06	0.00	0.02	99.46	17.39	52.61	30.01
EMR-S-3-10	51.09	5.79	7.98	0.00	14.26	0.16	21.02	0.01	0.37	0.55	0.01	0.01	0.02	101.27	18.44	48.60	32.96
EMR-S-3-11	50.23	3.30	8.13	0.00	14.80	0.26	21.12	0.02	0.36	0.69	0.03	0.00	0.03	98.97	18.45	47.96	33.60
EMR-S-3-12	50.03	6.66	7.41	0.00	13.71	0.09	21.65	0.02	0.39	1.29	0.00	0.03	0.01	101.30	17.31	50.62	32.06
EMR-S-3-13	50.50	4.03	7.01	0.00	15.09	0.10	22.70	0.02	0.26	0.49	0.05	0.00	0.00	100.23	15.64	50.66	33.69
EMR-S-3-14	50.82	4.89	5.73	0.00	14.98	0.09	23.14	0.02	0.22	0.45	0.00	0.00	0.01	100.34	13.06	52.79	34.16
EMR-S-3-15	52.40	3.29	5.32	0.00	15.74	0.08	22.73	0.02	0.24	0.34	0.02	0.01	0.01	100.20	12.15	51.91	35.95
PS-B-1-1	47.98	4.94	7.47	0.00	13.81	0.13	22.80	0.02	0.23	0.68	0.00	0.00	0.01	98.07	16.94	51.73	31.33
PS-B-1-2	45.39	9.39	6.80	0.01	12.86	0.09	20.79	0.03	0.51	1.70	0.00	0.02	0.00	97.59	16.81	51.40	31.80
PS-B-1-3	49.61	3.96	7.71	0.00	14.20	0.10	21.93	0.02	0.32	0.59	0.01	0.00	0.03	98.47	17.60	50.01	32.39
PS-B-1-4	48.98	4.65	7.38	0.00	14.10	0.12	21.96	0.01	0.40	0.85	0.01	0.03	0.00	98.49	16.99	50.56	32.46
PS-B-1-5	50.24	2.51	8.78	0.00	14.73	0.19	20.06	0.01	0.36	1.10	0.00	0.00	0.00	97.98	20.15	46.04	33.81
PS-B-1-6	46.44	6.84	7.36	0.01	12.76	0.09	22.51	0.01	0.37	1.70	0.00	0.00	0.02	98.12	17.27	52.79	29.94
PS-B-1-7	53.18	1.68	8.14	0.00	14.49	0.29	21.58	0.01	0.37	0.35	0.01	0.01	0.00	100.10	18.40	48.82	32.78
PS-B-1-8	48.63	6.58	7.02	0.00	13.48	0.09	22.54	0.03	0.34	1.47	0.02	0.02	0.01	100.22	16.31	52.37	31.32
PS-B-1-9	52.71	3.80	6.03	0.00	16.12	0.11	21.16	0.01	0.22	0.32	0.04	0.03	0.04	100.57	13.92	48.86	37.22
PS-B-1-10	52.68	2.19	10.04	0.00	15.17	0.29	19.35	0.01	0.30	0.81	0.02	0.00	0.01	100.86	22.52	43.43	34.05
PS-B-1-11	55.53	1.22	2.67	0.00	17.47	0.05	23.57	0.02	0.15	0.10	0.00	0.00	0.00	100.76	6.10	53.93	39.97
PS-B-1-12	51.73	2.53	8.34	0.00	15.68	0.28	20.52	0.01	0.32	0.41	0.00	0.02	0.01	99.85	18.73	46.07	35.20
PS-B-1-13	53.49	2.58	8.80	0.00	14.73	0.27	20.06	0.03	0.34	0.99	0.02	0.01	0.02	101.33	20.20	46.02	33.79
PS-B-1-14	51.06	4.63	4.95	0.00	14.95	0.09	22.31	0.01	0.31	0.91	0.02	0.00	0.00	99.26	11.73	52.85	35.42
PS-B-1-15	53.50	3.48	6.22	0.00	16.91	0.14	20.29	0.03	0.18	0.32	0.01	0.00	0.00	101.09	14.32	46.73	38.95
VR-C1-1	52.62	4.08	5.25	0.00	15.55	0.10	23.40	0.01	0.17	0.36	0.02	0.00	0.03	101.58	11.88	52.94	35.18
VR-C1-2	52.95	4.11	5.28	0.00	15.45	0.11	23.42	0.02	0.17	0.36	0.00	0.00	0.01	101.87	11.96	53.04	34.99
VR-C1-4	52.96	2.48	4.30	0.00	16.43	0.06	23.58	0.04	0.17	0.25	0.01	0.00	0.00	100.27	9.70	53.22	37.08
VR-C1-5	52.93	3.04	5.05	0.00	15.96	0.08	23.55	0.02	0.14	0.28	0.02	0.03	0.00	101.09	11.34	52.84	35.82
VR-C1-6	47.22	4.41	7.18	0.01	14.58	0.14	22.85	0.02	0.22	0.53	0.03	0.03	0.01	97.21	16.10	51.23	32.68
VR-C1-7	53.47	1.67	3.32	0.00	17.25	0.10	23.68	0.02	0.16	0.16	0.06	0.00	0.00	99.88	7.50	53.52	38.99
VR-C1-8	52.17	4.54	7.36	0.00	14.48	0.15	22.55	0.02	0.21	0.48	0.01	0.03	0.00	102.00	16.58	50.80	32.62
VR-C1-9	50.53	5.25	7.52	0.00	14.03	0.17	23.15	0.01	0.21	0.73	0.00	0.00	0.01	101.61	16.83	51.78	31.39
VR-C1-10	48.49	3.24	8.20	0.00	14.50	0.22	21.94	0.00	0.29	0.69	0.04	0.02	0.02	97.65	18.37	49.15	32.48
VR-C1-11	49.89	3.89	5.81	0.00	15.06	0.10	22.86	0.01	0.27	0.41	0.02	0.00	0.03	98.36	13.28	52.28	34.44
VR-C1-13	50.42	5.48	7.44	0.00	13.63	0.12	22.65	0.01	0.28	0.78	0.02	0.00	0.03	100.87	17.01	51.81	31.18
VR-C1-14	50.23	4.38	7.11	0.01	14.71	0.13	22.60	0.02	0.31	0.54	0.01	0.00	0.00	100.04	16.01	50.88	33.11
VR-C1-15	48.87	5.35	8.22	0.00	13.59	0.13	22.63	0.04	0.27	0.97	0.03	0.02	0.03	100.14	18.49	50.92	30.59
Std-Kaer-11	39.98	12.80	12.23	0.00	12.45	0.12	11.62	1.20	2.47	4.92							

## II. Datos Morfométricos

### Istirincha

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
IS - B - 1	1	0.13	1.79	0.49	0.40	0.52
	2	0.16	1.75	0.69	0.39	0.66
	3	0.14	1.54	0.53	0.36	0.75
	4	0.29	2.12	0.67	0.52	0.81
	5	0.19	1.87	0.68	0.36	0.68
	6	0.14	1.46	0.48	0.41	0.83
	7	0.12	1.45	0.57	0.29	0.71
	8	0.12	1.39	0.50	0.36	0.80
	9	0.12	1.66	0.48	0.32	0.53
	10	0.15	1.72	0.54	0.42	0.63
	11	0.11	1.34	0.49	0.33	0.76
	12	0.14	1.72	0.53	0.34	0.61
	13	0.13	1.72	0.46	0.41	0.57
IS - C - 1	1	0.14	1.58	0.44	0.44	0.71
	2	0.15	1.71	0.65	0.31	0.64
	3	0.14	1.84	0.54	0.40	0.53
	4	0.14	1.53	0.53	0.33	0.73
	5	0.09	1.18	0.44	0.26	0.82
	6	0.12	1.42	0.55	0.29	0.74
	7	0.08	1.21	0.46	0.21	0.65
	8	0.21	2.53	0.62	0.47	0.41
	9	0.16	1.63	0.51	0.45	0.75
	10	0.12	1.76	0.58	0.29	0.48
	11	0.18	1.77	0.58	0.46	0.73
	12	0.07	1.10	0.39	0.26	0.73
IS - C - 2	1	0.22	2.03	0.81	0.38	0.67
	2	0.17	1.73	0.61	0.37	0.73
	3	0.19	1.79	0.66	0.38	0.76
	4	0.18	1.77	0.56	0.52	0.71
	5	0.28	2.42	0.94	0.39	0.61
	6	0.14	1.51	0.57	0.37	0.80
	7	0.18	2.04	0.66	0.38	0.56
	8	0.14	1.63	0.55	0.34	0.64
	9	0.17	1.62	0.61	0.42	0.82
	10	0.13	1.50	0.48	0.40	0.71
	11	0.22	2.01	0.74	0.38	0.68
	12	0.12	1.41	0.52	0.31	0.75
IS - S - 2	1	0.23	1.81	0.55	0.53	0.89
	2	0.13	1.39	0.44	0.39	0.82
	3	0.14	1.51	0.51	0.34	0.77
	4	0.22	1.89	0.66	0.43	0.77
	5	0.13	1.65	0.65	0.29	0.62
	6	0.16	1.80	0.69	0.32	0.63
	7	0.14	1.43	0.44	0.44	0.87
	8	0.12	1.53	0.60	0.28	0.65
	9	0.15	1.78	0.66	0.31	0.58
	10	0.17	1.68	0.66	0.36	0.73
	11	0.18	1.82	0.53	0.53	0.67
	12	0.24	2.13	0.64	0.56	0.68

Tab. 2 Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

### Lechuguilla

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
LC - B - 1	1	0.16	1.86	0.74	0.27	0.57
	2	0.12	1.64	0.58	0.33	0.56
	3	0.17	1.69	0.61	0.40	0.76
	4	0.40	2.60	0.99	0.58	0.75
	5	0.16	1.63	0.54	0.42	0.75
	6	0.16	1.88	0.53	0.37	0.55
	7	0.14	1.62	0.58	0.32	0.67
	8	0.13	1.79	0.76	0.25	0.50
	9	0.17	1.84	0.73	0.29	0.65
	10	0.32	2.36	0.90	0.50	0.73
LC - C - 1	1	0.07	1.03	0.35	0.25	0.81
	2	0.07	1.27	0.45	0.20	0.55
	3	0.09	1.17	0.40	0.32	0.81
	4	0.12	1.57	0.57	0.30	0.60
	5	0.17	2.59	0.69	0.34	0.31
	6	0.07	1.36	0.39	0.31	0.49
	7	0.15	1.61	0.56	0.40	0.74
	8	0.05	1.00	0.29	0.26	0.69
	9	0.07	1.02	0.36	0.27	0.85
	10	0.08	1.20	0.43	0.23	0.66
LC - C - 2	1	0.24	2.10	0.72	0.51	0.68
	2	0.13	1.45	0.50	0.38	0.79
	3	0.09	1.25	0.51	0.24	0.71
	4	0.12	1.33	0.42	0.38	0.85
	5	0.10	1.27	0.44	0.30	0.78
	6	0.13	1.41	0.45	0.37	0.82
	7	0.15	1.57	0.48	0.42	0.75
	8	0.11	1.29	0.44	0.37	0.81
	9	0.08	1.09	0.36	0.32	0.82
	10	0.17	1.73	0.56	0.40	0.71
LC - S - 2	1	0.10	1.27	0.45	0.33	0.77
	2	0.09	1.36	0.42	0.32	0.64
	3	0.12	1.46	0.49	0.32	0.68
	4	0.10	1.31	0.43	0.31	0.75
	5	0.12	1.29	0.47	0.33	0.88
	6	0.09	1.18	0.36	0.33	0.81
	7	0.13	1.56	0.58	0.29	0.69
	8	0.08	1.17	0.41	0.32	0.77
	9	0.07	1.12	0.44	0.20	0.73
	10	0.18	2.03	0.60	0.49	0.55

**Tab. 3** Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

### El Morro

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
EM – B – 1	1	0.22	2.04	0.76	0.40	0.66
	2	0.14	1.47	0.54	0.38	0.79
	3	0.28	2.50	1.01	0.34	0.56
	4	0.21	1.93	0.72	0.43	0.70
	5	0.14	1.48	0.51	0.37	0.81
	6	0.12	1.39	0.52	0.33	0.79
	7	0.20	1.90	0.64	0.50	0.70
	8	0.14	1.49	0.49	0.39	0.80
	9	0.12	1.51	0.59	0.25	0.65
	10	0.12	1.52	0.59	0.25	0.63
EM – C – 1	1	0.08	1.16	0.45	0.25	0.75
	2	0.18	1.87	0.74	0.34	0.65
	3	0.08	1.25	0.39	0.29	0.63
	4	0.10	1.30	0.42	0.32	0.75
	5	0.10	1.30	0.41	0.34	0.78
	6	0.14	1.63	0.58	0.29	0.65
	7	0.13	1.46	0.56	0.35	0.79
	8	0.05	0.90	0.32	0.23	0.84
	9	0.32	2.48	0.97	0.44	0.66
	10	0.09	1.21	0.46	0.27	0.75
EM – C – 2	1	0.13	1.61	0.54	0.39	0.65
	2	0.19	1.71	0.66	0.41	0.80
	3	0.24	1.99	0.70	0.48	0.77
	4	0.10	1.28	0.48	0.27	0.78
	5	0.15	1.78	0.72	0.28	0.60
	6	0.10	1.28	0.47	0.25	0.74
	7	0.14	1.49	0.52	0.40	0.79
	8	0.34	2.47	0.75	0.59	0.70
	9	0.13	1.49	0.54	0.32	0.73
	10	0.08	1.11	0.39	0.31	0.85
	11	0.14	1.55	0.56	0.33	0.71
	12	0.13	1.47	0.60	0.29	0.74
	13	0.10	1.30	0.48	0.28	0.74
EM – S – 2	1	0.15	1.48	0.49	0.43	0.87
	2	0.12	1.29	0.45	0.32	0.89
	3	0.27	2.14	0.78	0.50	0.74
	4	0.13	1.85	0.80	0.24	0.49
	5	0.15	1.59	0.67	0.34	0.76
	6	0.18	1.78	0.62	0.44	0.70
	7	0.26	2.19	0.87	0.36	0.68
	8	0.13	1.42	0.53	0.35	0.81
	9	0.14	1.49	0.56	0.31	0.78
	10	0.38	2.84	1.16	0.46	0.59

**Tab. 4** Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

**Palma Sola**

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
PS – B – 1	1	0.09	1.21	0.37	0.34	0.72
	2	0.14	1.78	0.60	0.38	0.57
	3	0.11	1.35	0.45	0.34	0.76
	4	0.10	1.52	0.38	0.30	0.53
	5	0.07	1.35	0.33	0.29	0.49
	6	0.08	1.20	0.38	0.31	0.70
	7	0.09	1.38	0.39	0.32	0.59
	8	0.14	1.68	0.58	0.33	0.60
	9	0.14	1.51	0.49	0.43	0.79
	10	0.11	1.63	0.42	0.40	0.52
PS – C – 1	1	0.09	1.19	0.46	0.25	0.78
	2	0.08	1.47	0.39	0.32	0.46
	3	0.13	1.52	0.54	0.33	0.70
	4	0.09	1.31	0.38	0.36	0.68
	5	0.15	1.72	0.59	0.34	0.63
	6	0.10	1.35	0.41	0.37	0.72
	7	0.11	1.39	0.45	0.36	0.70
	8	0.09	1.35	0.39	0.32	0.63
	9	0.11	1.43	0.50	0.33	0.70
	10	0.09	1.27	0.36	0.32	0.68

**Boca Andrea**

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
BA – B – 1	1	0.09	1.38	0.37	0.34	0.59
	2	0.09	1.26	0.38	0.31	0.68
	3	0.10	1.43	0.49	0.34	0.62
	4	0.09	2.12	0.50	0.34	0.26
	5	0.10	1.36	0.48	0.29	0.67
	6	0.12	1.42	0.45	0.38	0.74
	7	0.08	1.16	0.38	0.29	0.75
	8	0.10	1.39	0.44	0.30	0.66
	9	0.09	1.43	0.41	0.33	0.53
	10	0.16	1.79	0.64	0.40	0.63
BA – C – 1	1	0.25	2.18	0.69	0.56	0.67
	2	0.13	1.49	0.51	0.38	0.76
	3	0.10	1.22	0.42	0.31	0.80
	4	0.20	1.84	0.66	0.44	0.73
	5	0.12	1.85	0.46	0.37	0.44
	6	0.21	1.95	0.66	0.44	0.69
	7	0.07	1.11	0.39	0.27	0.74
	8	0.10	1.77	0.39	0.34	0.41
	9	0.09	1.36	0.44	0.30	0.63
	10	0.13	1.66	0.50	0.40	0.61
	11	0.10	1.31	0.46	0.38	0.75

**Tab. 5** Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

Villa Rica

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
VR - B - 1	1	0.47	2.92	1.21	0.63	0.69
	2	0.39	2.49	0.93	0.62	0.79
	3	0.80	3.50	1.15	0.94	0.82
	4	0.56	3.04	1.11	0.77	0.76
	5	0.30	2.12	0.76	0.52	0.83
	6	0.65	3.23	1.03	0.86	0.79
	7	1.64	5.09	2.04	1.19	0.80
	8	0.41	2.45	0.81	0.73	0.85
	9	0.43	2.73	1.04	0.59	0.72
	10	0.67	3.54	1.34	0.75	0.67
VR - C - 1	1	0.59	2.97	1.00	0.84	0.84
	2	0.57	3.13	1.06	0.78	0.74
	3	0.61	3.12	1.13	0.85	0.79
	4	0.31	2.14	0.75	0.58	0.86
	5	0.55	3.03	1.20	0.68	0.75
	6	0.66	3.46	1.20	0.79	0.70
	7	0.35	2.38	0.82	0.60	0.78
	8	0.32	2.44	0.94	0.45	0.67
	9	0.61	3.18	0.99	0.85	0.75
	10	0.49	2.90	1.08	0.59	0.74
VR - B - 2	1	0.41	2.80	0.97	0.72	0.66
	2	0.71	3.18	1.00	0.96	0.89
	3	0.36	2.34	0.83	0.63	0.84
	4	0.49	2.91	0.89	0.72	0.73
	5	0.60	3.06	1.04	0.87	0.81
	6	0.55	2.93	1.05	0.69	0.80
	7	0.37	2.65	0.90	0.56	0.67
	8	0.46	2.94	1.01	0.69	0.66
	9	0.37	2.37	0.84	0.56	0.82
	10	0.22	1.91	0.65	0.49	0.77
VR - C - 2	1	0.55	3.45	1.29	0.65	0.58
	2	0.44	2.68	0.95	0.62	0.77
	3	0.22	2.02	0.60	0.47	0.68
	4	0.61	2.99	0.98	0.84	0.87
	5	0.93	3.81	1.46	0.92	0.81
	6	0.41	2.52	0.86	0.76	0.80
	7	1.15	4.64	1.76	0.85	0.67
	8	0.37	2.50	0.80	0.62	0.75
	9	0.45	3.00	1.25	0.56	0.62
	10	0.27	2.12	0.70	0.48	0.75

Tab. 6 Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

### Farallón

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
FN – B – 1	1	0.17	1.73	0.61	0.42	0.71
	2	0.09	1.26	0.42	0.28	0.73
	3	0.20	1.79	0.68	0.47	0.80
	4	0.16	1.45	0.48	0.44	0.93
	5	0.09	1.22	0.41	0.35	0.80
	6	0.10	1.51	0.59	0.24	0.56
	7	0.08	1.21	0.45	0.30	0.73
	8	0.19	1.80	0.59	0.44	0.74
	9	0.15	1.52	0.56	0.40	0.81
	10	0.25	2.19	0.78	0.46	0.66
FN – C – 1	1	0.14	1.67	0.68	0.26	0.63
	2	0.12	1.47	0.56	0.29	0.71
	3	0.11	1.31	0.50	0.32	0.81
	4	0.13	1.49	0.46	0.39	0.75
	5	0.05	0.90	0.34	0.23	0.83
	6	0.11	1.37	0.52	0.33	0.74
	7	0.10	1.38	0.50	0.26	0.68
	8	0.09	1.47	0.65	0.17	0.54
	9	0.08	1.19	0.46	0.30	0.67
	10	0.14	1.63	0.65	0.28	0.66
FN – B – 2	1	0.13	1.53	0.63	0.29	0.68
	2	0.14	1.47	0.50	0.34	0.83
	3	0.13	1.53	0.52	0.36	0.69
	4	0.14	1.54	0.59	0.27	0.72
	5	0.16	1.85	0.65	0.35	0.60
	6	0.07	1.02	0.33	0.28	0.88
	7	0.29	2.24	0.94	0.43	0.71
	8	0.09	1.19	0.46	0.23	0.76
	9	0.08	1.19	0.49	0.25	0.72
	10	0.14	1.54	0.55	0.36	0.76
FN – C – 2	1	0.28	3.10	0.77	0.52	0.37
	2	0.28	2.12	0.75	0.50	0.78
	3	0.26	2.17	0.87	0.41	0.69
	4	0.19	1.92	0.81	0.28	0.63
	5	0.27	2.15	0.85	0.40	0.73
	6	0.16	1.70	0.67	0.32	0.72
	7	0.14	1.61	0.53	0.40	0.70
	8	0.21	2.11	0.75	0.38	0.58
	9	0.10	1.28	0.50	0.30	0.81
	10	0.24	2.10	0.78	0.43	0.69

**Tab. 7** Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

**La Mancha**

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
LM – B – 1	1	0.08	1.14	0.40	0.26	0.73
	2	0.06	0.99	0.37	0.22	0.83
	3	0.07	1.16	0.39	0.27	0.68
	4	0.07	1.18	0.47	0.19	0.66
	5	0.05	0.95	0.35	0.20	0.69
	6	0.05	0.89	0.33	0.21	0.76
	7	0.06	1.13	0.47	0.21	0.62
	8	0.03	0.94	0.31	0.14	0.48
	9	0.07	1.10	0.44	0.23	0.75
	10	0.02	0.70	0.23	0.12	0.57
LM – C – 1	1	0.07	1.07	0.44	0.25	0.73
	2	0.09	1.29	0.54	0.23	0.67
	3	0.15	1.57	0.63	0.36	0.78
	4	0.09	1.17	0.40	0.32	0.81
	5	0.09	1.23	0.45	0.30	0.72
	6	0.10	1.29	0.45	0.32	0.78
	7	0.11	1.39	0.54	0.30	0.74
	8	0.05	0.95	0.36	0.18	0.73
	9	0.05	0.94	0.33	0.26	0.75
	10	0.10	1.49	0.61	0.24	0.55
LM – B – 3	1	0.16	1.68	0.57	0.36	0.71
	2	0.08	1.09	0.40	0.26	0.81
	3	0.15	1.59	0.56	0.40	0.76
	4	0.10	1.31	0.50	0.29	0.77
	5	0.09	1.25	0.45	0.30	0.72
	6	0.07	1.04	0.40	0.25	0.83
	7	0.08	1.48	0.42	0.30	0.46
	8	0.10	1.27	0.44	0.34	0.76
	9	0.14	1.58	0.59	0.42	0.73
	10	0.02	0.54	0.18	0.15	0.85
LM – C – 3	1	0.08	1.07	0.36	0.29	0.84
	2	0.07	0.99	0.34	0.26	0.88
	3	0.08	1.22	0.42	0.30	0.70
	4	0.06	1.13	0.41	0.23	0.58
	5	0.12	1.44	0.53	0.30	0.70
	6	0.07	1.12	0.45	0.25	0.72
	7	0.07	1.01	0.31	0.28	0.83
	8	0.08	1.11	0.42	0.31	0.85
	9	0.15	1.57	0.57	0.32	0.77
	10	0.06	0.92	0.31	0.26	0.89

**Tab. 8** Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

### Chachalacas

Subambiente	Clinopiroxeno	Área	Perímetro	Largo	Ancho	Compacidad
CH - B - 1	1	0.12	1.33	0.49	0.31	0.85
	2	0.10	1.38	0.46	0.35	0.68
	3	0.18	1.69	0.59	0.47	0.78
	4	0.14	1.60	0.62	0.33	0.68
	5	0.10	1.40	0.49	0.28	0.66
	6	0.20	1.93	0.76	0.34	0.67
	7	0.11	1.32	0.45	0.32	0.78
	8	0.11	1.36	0.53	0.26	0.72
	9	0.08	1.03	0.34	0.30	0.90
	10	0.07	1.13	0.40	0.27	0.70
CH - C - 1	1	0.16	1.74	0.69	0.30	0.68
	2	0.15	1.71	0.67	0.32	0.66
	3	0.15	1.47	0.50	0.42	0.90
	4	0.30	2.19	0.78	0.50	0.79
	5	0.20	1.76	0.60	0.39	0.79
	6	0.22	1.82	0.67	0.49	0.85
	7	0.22	1.83	0.64	0.49	0.83
	8	0.20	1.84	0.70	0.42	0.74
	9	0.27	2.23	0.91	0.40	0.69
	10	0.09	1.24	0.45	0.27	0.72
CH - B - 5	1	0.53	2.79	1.01	0.68	0.85
	2	0.34	2.99	0.91	0.57	0.47
	3	0.46	2.84	1.05	0.65	0.72
	4	0.20	1.82	0.65	0.42	0.74
	5	0.39	2.78	1.15	0.45	0.64
	6	0.16	1.74	0.67	0.35	0.68
	7	0.24	2.06	0.77	0.37	0.72
	8	0.21	1.72	0.58	0.50	0.88
	9	0.18	2.02	0.87	0.29	0.57
	10	0.21	1.82	0.66	0.42	0.80
CH - C - 5	1	0.31	2.33	0.88	0.55	0.73
	2	0.17	1.56	0.52	0.42	0.90
	3	0.21	1.76	0.60	0.54	0.86
	4	0.25	2.34	0.78	0.49	0.58
	5	0.20	1.76	0.52	0.49	0.81
	6	0.31	2.30	0.78	0.58	0.73
	7	0.24	1.97	0.75	0.45	0.78
	8	0.70	3.56	1.19	0.95	0.70
	9	0.36	2.43	0.96	0.47	0.76
	10	0.15	1.52	0.52	0.36	0.81

**Tab. 9** Valores morfométricos expresados en mm, excepto Compacidad.

### III. Estadística

#### Tamaño de Grano (mm)

Localidad	n	Promedio	Error Estándar	Valor Mínimo	$\Delta$	Valor Máximo
IST	49	0.57	0.01	0.39	0.55	0.94
LCH	40	0.52	0.02	0.29	0.70	0.99
EMR	43	0.61	0.03	0.32	0.84	1.16
PSL	20	0.44	0.02	0.33	0.27	0.60
BCA	21	0.48	0.02	0.37	0.31	0.69
VRC	40	1.04	0.04	0.60	1.43	2.04
FRN	40	0.60	0.02	0.33	0.61	0.94
LMN	40	0.43	0.02	0.18	0.45	0.63
CHC	40	0.69	0.03	0.34	0.85	1.19

<b>Total</b>	333	0.61	0.01	0.18	1.86	2.04
--------------	-----	------	------	------	------	------

#### Compacidad

Localidad	n	Promedio	Error Estándar	Valor Mínimo	$\Delta$	Valor Máximo
IST	49	0.69	0.01	0.41	0.48	0.89
LCH	40	0.70	0.02	0.31	0.57	0.88
EMR	43	0.73	0.01	0.49	0.40	0.89
PSL	20	0.65	0.02	0.46	0.33	0.79
BCA	21	0.64	0.03	0.26	0.55	0.80
VRC	40	0.76	0.01	0.58	0.30	0.89
FRN	40	0.71	0.02	0.37	0.57	0.93
LMN	40	0.73	0.02	0.46	0.43	0.89
CHC	40	0.75	0.02	0.47	0.43	0.90

<b>Total</b>	333	0.71	0.01	0.26	0.67	0.93
--------------	-----	------	------	------	------	------

Tab. 10 Datos estadísticos de Tamaño de Grano y Compacidad.

#### Correlación Tamaño de Grano vs Compacidad

Resolución de Análisis	n	Línea de Tendencia	Coefficiente de Correlación (rho)	Grado de Correlación	p valor	$\alpha$ significancia	Decisión $H_0$
<b>Conjunto de Localidades</b>	333	Negativa	-0.13	Significativa Muy Débil	0.02	0.05	Rechaza
<b>Barloventos</b>	134	Positiva	0.05	Nula	0.59	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	167	Negativa	-0.20	Significativa Débil	0.01	0.05	Rechaza
<b>Sotaventos</b>	32	Negativa	-0.55	Significativa Moderada	0.00	0.05	Rechaza
<b>IST</b>	49	Negativa	-0.25	Significativa Débil	0.08	0.05	Acepta
<b>Barlovento</b>	13	Positiva	0.24	Significativa Débil	0.44	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	24	Negativa	-0.32	Significativa Débil	0.13	0.05	Acepta
<b>Sotavento</b>	12	Negativa	-0.69	Significativa Moderada	0.01	0.05	Rechaza
<b>LCH</b>	40	Negativa	-0.50	Significativa Moderada	0.00	0.05	Rechaza
<b>Barlovento</b>	10	Positiva	0.23	Significativa Débil	0.53	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	20	Negativa	-0.47	Significativa Débil	0.04	0.05	Rechaza
<b>Sotavento</b>	10	Negativa	-0.61	Significativa Moderada	0.06	0.05	Acepta
<b>EMR</b>	43	Negativa	-0.65	Significativa Moderada	0.00	0.05	Rechaza
<b>Barlovento</b>	10	Negativa	-0.78	Significativa	0.01	0.05	Rechaza
<b>Crestas</b>	23	Negativa	-0.50	Significativa Moderada	0.02	0.05	Rechaza
<b>Sotavento</b>	10	Positiva	0.30	Significativa Débil	0.41	0.05	Acepta
<b>PSL</b>	20	Positiva	0.21	Significativa Débil	0.39	0.05	Acepta
<b>Barloventos</b>	10	Positiva	0.12	Significativa Muy Débil	0.74	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	10	Positiva	0.30	Significativa Débil	0.41	0.05	Acepta
<b>BCA</b>	21	Positiva	0.02	Nula	0.95	0.05	Acepta
<b>Barloventos</b>	10	Negativa	-0.29	Significativa Débil	0.43	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	11	Neutra	0.00	Nula	1.00	0.05	Acepta
<b>VRC</b>	40	Negativa	-0.29	Significativa Débil	0.07	0.05	Acepta
<b>Barloventos</b>	20	Negativa	-0.32	Significativa Débil	0.17	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	20	Negativa	-0.32	Significativa Débil	0.16	0.05	Acepta
<b>FRN</b>	40	Negativa	-0.56	Significativa Moderada	0.00	0.05	Rechaza
<b>Barloventos</b>	20	Negativa	-0.45	Significativa Débil	0.05	0.05	Rechaza
<b>Crestas</b>	20	Negativa	-0.46	Significativa Débil	0.04	0.05	Rechaza
<b>LMN</b>	40	Negativa	-0.27	Significativa Débil	0.09	0.05	Acepta
<b>Barloventos</b>	20	Neutra	0.00	Nula	0.79	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	20	Negativa	-0.52	Significativa Moderada	0.02	0.05	Rechaza
<b>CHC</b>	40	Negativa	-0.41	Significativa Débil	0.01	0.05	Rechaza
<b>Barloventos</b>	20	Negativa	-0.40	Significativa Débil	0.08	0.05	Acepta
<b>Crestas</b>	20	Negativa	-0.51	Significativa Moderada	0.02	0.05	Rechaza

Tab. 11 Pruebas de Hipótesis de Correlación.

## IV. Análisis Microtextural

Istirinchá																									
Microtextura	IST - B - 1												IST - C - 1												
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits						
<b>Promedio</b>	0.35	0.85	0.34	0.16	0.31	28.84	5.44	17.58	3.64	0.83	0.58	0.62	0.00	1.35	3.24	0.27	0.60	3.04	0.03						
<b>Error Estándar</b>	0.35	0.18	0.22	0.07	0.12	3.32	2.65	3.48	1.00	0.29	0.15	0.32	0.00	1.23	2.03	0.19	0.44	1.06	0.03						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Abrasion Fatigue	1.5	1.2	0.0	0.7	1.6	0.7	0.8	0.0	1.7	0.7	2.7	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	4.2	0.0	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	1.5	1.2	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	2.5	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	15.4	52.2	0.0	8.9	44.0	21.7	22.7	20.5	28.8	23.0	20.0	100.0	44.8	34.3	37.6	28.9	17.5	14.0	23.5	14.5	17.3	17.5	16.9	9.3	31.4
Upturned Plates	23.8	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	1.9	76.3	0.0	30.6	0.0
Bulbous Edges	11.5	0.0	0.0	3.4	35.1	4.9	14.3	13.9	6.8	11.2	11.8	0.0	55.2	0.0	3.4	0.0	79.6	30.1	3.4	31.6	80.8	0.0	78.8	10.9	65.7
Elongated Depressions	13.1	8.7	0.0	0.0	14.1	2.1	5.9	0.8	2.5	1.3	2.7	0.0	0.0	0.0	2.0	2.8	0.0	40.9	7.6	15.8	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0
Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	3.4	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oxidized	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	13.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	10.2	0.0	0.0	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	0.0	17.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	2.1	0.0	2.2	0.0	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	0.4	2.3	0.0	0.0	0.0	0.7	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	2.2	1.6	2.1	0.0	0.0	0.0	1.4	0.8	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Flat Cleavage Surfaces	64.0	18.8	7.8	60.9	17.8	5.5	0.0	18.4	2.3	45.7	82.1	52.5	0.0	9.6	26.4	75.5	51.5	24.5	19.0	31.7	85.0	24.4	6.2	18.8	
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	
Bulbous Edges	15.1	26.1	88.1	0.0	0.0	0.0	29.9	0.0	2.3	13.4	10.6	35.8	0.0	0.0	33.6	0.0	0.0	8.0	17.6	0.0	8.8	19.6	0.0	0.0	
Elongated Depressions	2.2	5.7	4.1	0.0	2.4	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	7.3	0.0	2.2	15.2	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	1.4	0.0	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	1.2	0.6	0.0	
Boxwork	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.4	1.1	0.7	0.0	1.6	0.0	0.0	4.8	0.0	0.7	0.0	1.5	1.8	0.7	0.0	0.0	0.6	2.8	0.8	
Oxidized	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	95.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.9	0.0	5.0	0.0	0.0	15.7	0.0	
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	0.0	
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.9	6.8	0.0	0.0	0.7	3.4	1.1	7.4	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	4.5	0.0	0.0	42.3	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

**Tab. 12** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

## Lechuguilla

Microtextura	LCH - B - 1										LCH - C - 1										
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Poligonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits		
<b>Promedio</b>	0.00	1.38	0.88	0.31	0.25	26.64	3.99	6.42	6.16	0.35	1.28	1.33	0.14	0.00	3.15	0.05	1.78	0.33	0.00		
<b>Error Estándar</b>	0.00	0.48	0.83	0.12	0.13	2.70	2.11	1.61	1.67	0.12	0.26	0.57	0.14	0.00	1.56	0.05	1.27	0.33	0.00		
	LCH - B - 1										LCH - C - 1										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	4.5	2.5	1.1	0.0	0.0	1.9	0.7	0.8	0.0	0.0	Abrasion Fatigue	3.0	0.0	0.0	2.5	0.0	1.4	0.0	1.9	0.0	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	Arcuate Steps	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	Straight Steps	1.5	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	16.6	30.8	9.8	8.4	3.8	28.8	19.6	36.2	17.9	55.8	Flat Cleavage Surfaces	31.3	14.3	42.0	27.1	34.5	17.8	0.0	37.0	58.6	57.3
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	20.7	Upturned Plates	0.0	12.9	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	33.3	0.0	0.0
Bulbous Edges	8.9	0.0	24.1	4.6	41.1	0.0	2.9	14.2	4.6	6.9	Bulbous Edges	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	6.7
Elongated Depressions	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	5.1	4.7	1.7	6.3	Elongated Depressions	16.4	0.0	2.3	13.6	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	22.7
Arcuate / Circular / Poligonal Cracks	1.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Poligonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	3.2	0.0	6.9	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	1.2	0.0	Boxwork	1.5	0.0	0.0	0.0	1.2	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Oxidized	0.0	0.0	8.0	0.0	10.1	0.0	0.0	4.7	1.7	0.0	Oxidized	0.0	17.1	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	49.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LCH - C - 2										LCH - S - 2										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	3.8	0.0	0.0	0.0	2.0	4.6	0.0	0.0	7.7	0.0	Abrasion Fatigue	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate Steps	1.0	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Straight Steps	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	10.5	20.9	9.3	32.5	12.1	28.5	15.1	18.7	24.4	23.5	Flat Cleavage Surfaces	10.0	48.4	44.0	79.4	21.1	14.4	31.1	4.8	36.1	33.3
Upturned Plates	0.0	4.7	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	0.0	Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bulbous Edges	6.3	10.1	0.0	28.2	0.0	0.0	15.8	0.0	0.0	33.5	Bulbous Edges	0.0	12.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	6.9	0.0
Elongated Depressions	0.0	3.9	29.1	0.0	0.0	12.3	0.0	15.0	0.0	5.3	Elongated Depressions	0.0	18.3	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0	39.3	0.0	0.0
Arcuate / Circular / Poligonal Cracks	0.0	0.8	2.3	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Poligonal Cracks	1.0	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
Boxwork	3.4	3.1	0.0	2.6	2.0	1.5	2.1	1.9	0.0	0.0	Boxwork	0.0	0.0	2.6	2.0	0.0	4.4	0.0	2.4	0.0	2.8
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.5	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	21.4	0.0	0.0
Denticulated	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	48.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.1	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tab. 13** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

**El Morro**

Microtextura	EMR - B - 1										EMR - C - 1									
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits	
<b>Promedio</b>	0.82	0.41	1.13	0.19	0.04	24.52	1.36	6.41	1.49	0.46	0.89	0.88	0.00	0.00	1.36	0.58	0.00	0.60	0.00	
<b>Error Estándar</b>	0.55	0.10	0.64	0.07	0.02	2.10	0.55	1.62	0.75	0.12	0.25	0.36	0.00	0.00	0.77	0.40	0.00	0.23	0.00	

Microtextura	EMR - B - 1										EMR - C - 1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Collision Points	0.0	0.0	0.0	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	10.6	31.6	33.2	20.7	15.6	31.4	21.2	29.9	25.0	77.8	41.3	37.4	17.7	57.0	36.9	20.9	12.9	13.2	15.2	39.5
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8	0.0	1.3	0.0	0.0	7.5	11.4	0.0	0.0	0.0
Bulbous Edges	21.1	0.0	0.0	0.0	17.0	12.4	20.7	1.5	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.5	28.8	0.0	0.0	0.0
Elongated Depressions	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0	23.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0
Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	0.0	1.5	0.0	2.0	0.0	1.7	1.5	0.0	0.0	0.0	1.3	2.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
Boxwork	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	3.8	1.5	0.0
Oxidized	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.9	0.0	1.0	0.0	5.3	3.8	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Microtextura	EMR - C - 2													EMR - S - 2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	15.6	0	0	0	0	0
Abrasion Fatigue	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.1	1.4	2.7	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.6	0.8	0.4	0.8	0	2.3	1.9	1.5	0	0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	13.4	0	0	0	0	0	0	0	0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.7	0.0	0.0	1.2	0.7	0.0	0.0	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flat Cleavage Surfaces	22.6	30.8	40.0	34.3	18.7	15.8	34.0	21.5	11.5	19.3	28.1	24.6	19.2	19.5	10.9	13.3	8.6	5.2	18.1	11.2	30	4.3	18.5
Upturned Plates	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0	6.7	0	0	0	0	0	0	0	0
Bulbous Edges	0.0	0.0	0.0	18.6	0.0	3.2	6.4	0.0	0.0	2.4	4.4	11.1	0.0	3.9	5.9	0	0	10.4	0	0	9.2	41.3	0
Elongated Depressions	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0
Arcuate / Circular / Polygonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.9	3.1	0.0	0.7	0.0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3
Boxwork	6.0	3.2	0.4	0.0	0.0	0.0	3.5	0.6	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0	0	3.3	0.8	0	0	0.4	0	0.7	1.3
Oxidized	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	3.8	0.0	0.0	3.2	0.0	0	0	0	0	2.6	0	0	0	0	0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	0.0	1.8	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	31.1	10.5	0	0	0	0	0	0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	9.8	0	0	0	0	0	0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0	3.4	6.3	2.3	0	0	0	0	0	0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tab. 14** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

**Palma Sola**

Microtextura	PSL - B - 1										PSL - C - 1										
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits		
<b>Promedio</b>	0.00	1.63	1.98	0.28	0.25	36.40	2.16	4.70	2.50	0.73	0.88	0.04	0.00	0.00	4.54	0.62	0.00	0.37	0.18		
<b>Error Estándar</b>	0.00	0.66	1.42	0.14	0.12	6.09	0.88	2.14	1.55	0.44	0.38	0.04	0.00	0.00	2.24	0.62	0.00	0.29	0.18		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Abrasion Fatigue	1.2	0.7	0.9	2.1	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	Abrasion Fatigue	6.7	11.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	5.3	
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	27.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	6.8	
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	Arcuate Steps	1.1	0.0	2.3	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
Straight Steps	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	1.5	1.4	0.0	0.0	Straight Steps	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Flat Cleavage Surfaces	80.0	18.2	16.2	36.1	48.6	20.0	21.3	17.2	16.2	0.0	Flat Cleavage Surfaces	7.9	45.6	24.0	91.3	31.3	66.7	18.3	97.8	39.8	10.2
Upturned Plates	11.8	0.0	5.4	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	8.7	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
Bulbous Edges	0.0	0.0	3.6	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Bulbous Edges	30.3	0.0	3.1	0.0	0.0	32.4	11.0	0.0	4.4	3.4
Elongated Depressions	0.0	0.0	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	Elongated Depressions	29.2	0.0	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	1.8	2.1	8.6	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0
Boxwork	0.0	0.7	0.9	5.2	0.0	0.0	5.6	0.0	0.7	2.7	Boxwork	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	12.4	0.0	9.0	36.9	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.1
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0

**Tab. 15** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

**Boca Andrea**

Microtextura	BCA - B - 1										BCA - C - 1											
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Fiat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits			
<b>Promedio</b>	1.16	2.68	0.00	0.24	0.10	53.11	0.33	5.85	1.23	0.00	0.36	0.00	0.00	0.50	1.48	0.24	0.41	0.16	0.00			
<b>Error Estándar</b>	0.85	0.75	0.00	0.14	0.10	5.96	0.24	2.61	0.54	0.00	0.32	0.00	0.00	0.50	1.06	0.24	0.36	0.12	0.00			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	16.4	0.0
Abrasion Fatigue	5.6	0.0	3.0	2.2	8.1	1.7	13.8	2.0	0.0	1.2	Abrasion Fatigue	0.8	2.2	1.0	0.0	0.0	3.8	6.8	3.0	0.0	0.0	1.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	2.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fiat Cleavage Surfaces	83.1	81.4	31.7	15.4	18.2	98.3	13.8	57.8	87.2	47.2	Fiat Cleavage Surfaces	71.5	36.6	32.3	29.8	64.4	23.7	89.0	64.0	75.0	27.6	67.3
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0
Bulbous Edges	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.2	0.0	0.0	Bulbous Edges	0.0	27.6	0.0	0.0	32.2	0.0	0.0	0.0	0.0	14.9	9.9
Elongated Depressions	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	Elongated Depressions	0.0	0.0	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	5.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	0.0	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Boxwork	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	1.2	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tab. 16** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

Villa Rica

Microtextura	VRC - B - 1										VRC - C - 1										
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits		
<b>Promedio</b>	0.91	0.84	1.16	0.30	0.40	23.00	0.83	18.24	8.55	0.26	0.51	0.06	0.00	0.00	0.20	0.03	0.00	0.26	0.00		
<b>Error Estándar</b>	0.58	0.19	0.52	0.16	0.19	3.41	0.26	3.63	1.62	0.09	0.11	0.04	0.00	0.00	0.20	0.02	0.00	0.21	0.00		
	VRC - B - 2										VRC - C - 2										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Collision Points	0.0	0.0	12.2	0.0	0.0	0.0	0.0	20.2	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	2.3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	Abrasion Fatigue	0.0	0.0	3.6	4.2	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8	0.0	9.6	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.6	0.0	0.0
Straight Steps	0.4	0.0	3.6	0.0	0.7	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	Straight Steps	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	35.4	15.6	1.9	21.6	28.4	19.6	0.0	20.0	46.1	20.6	Flat Cleavage Surfaces	58.8	22.6	11.1	0.6	13.7	12.1	4.3	21.6	98.5	28.1
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bulbous Edges	3.8	1.3	2.4	17.0	9.8	15.3	91.9	5.7	40.7	24.2	Bulbous Edges	34.1	4.2	6.2	38.6	11.0	9.5	68.9	0.0	0.0	8.1
Elongated Depressions	6.3	11.5	0.0	7.9	15.5	0.0	8.1	0.0	7.4	28.5	Elongated Depressions	0.0	7.0	2.1	9.7	3.8	26.4	9.1	1.6	0.0	1.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	1.1	1.3	0.0	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	Boxwork	0.0	0.9	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	0.0	0.0	1.1	1.4	0.3	1.5	0.3	1.1	0.0	2.3	Abrasion Fatigue	0.2	1.1	1.8	0.8	0.0	1.2	0.0	4.6	1.3	1.1
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	0.0	0.0	12.7	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	Arcuate Steps	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	Straight Steps	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	35.0	11.3	1.4	30.1	2.0	3.1	40.8	20.4	4.1	42.3	Flat Cleavage Surfaces	43.1	21.6	18.8	83.8	4.3	29.2	6.0	0.0	30.6	11.5
Upturned Plates	0.0	5.0	0.3	0.0	0.0	1.5	1.4	1.3	0.0	0.9	Upturned Plates	2.0	0.0	8.3	0.0	0.0	2.7	2.4	3.0	2.0	1.1
Bulbous Edges	1.9	27.4	31.6	0.0	53.9	14.3	7.2	2.9	26.4	0.0	Bulbous Edges	0.0	5.2	0.0	0.0	71.6	0.0	55.8	27.4	11.2	0.0
Elongated Depressions	0.0	9.4	10.8	0.0	35.5	17.8	12.7	0.0	1.1	5.9	Elongated Depressions	0.0	35.3	0.0	0.0	22.1	0.0	24.6	17.6	3.1	0.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	1.4	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.9	0.0
Boxwork	0.5	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.4	Boxwork	0.9	1.8	0.0	0.8	2.0	1.0	0.0	3.0	0.7	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	8.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. 17 Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

## Farallón

Microtextura	FRN - B - 1										FRN - C - 1									
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits	
<b>Promedio</b>	0.00	0.58	3.37	0.61	0.42	18.32	0.76	15.36	8.41	0.13	0.49	0.20	0.00	0.00	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	
<b>Error Estándar</b>	0.00	0.17	1.82	0.26	0.17	1.19	0.29	2.18	1.97	0.09	0.20	0.13	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.9	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	2.9
Choncooidal Fractures	0.0	52.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.1	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	40.8	0.0
Arcuate Steps	0.0	3.2	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	6.4	1.0	1.3	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.9	0.0	0.0	0.9	0.0	1.1	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	10.5	21.3	24.9	10.9	23.2	41.2	16.7	21.1	3.4	5.8	32.6	26.0	20.7	9.8	18.5	11.7	32.4	14.9	15.8	6.4
Upturned Plates	1.2	0.0	2.0	3.8	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.0	1.1	0.0	0.0
Bulbous Edges	15.7	0.0	28.8	25.6	15.8	0.0	42.9	0.0	0.7	49.2	0.0	26.0	17.1	15.0	13.0	7.2	5.9	9.6	7.9	15.0
Elongated Depressions	0.0	2.1	25.4	36.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	0.0	8.9	5.4	0.0	0.0	3.6	15.7	0.0	2.6	0.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	0.0	2.1	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.8	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
Oxidized	1.2	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	1.7	0.0	3.9	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.2	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	1.6	0.0	0.0	4.2	0.0	0.8	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	4.6	0.0	0.0	0.0	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flat Cleavage Surfaces	13.4	20.8	19.2	16.9	13.0	17.8	15.4	19.8	19.8	23.8	16.0	21.8	23.2	20.4	11.7	14.5	24.5	10.8	24.6	17.4
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1.7
Bulbous Edges	16.5	35.4	33.1	8.1	0.0	39.7	2.1	23.3	37.0	2.8	11.3	0.0	6.2	5.9	22.3	19.4	2.8	34.5	18.5	0.0
Elongated Depressions	8.7	41.0	13.8	41.9	0.0	0.0	2.8	32.6	24.7	7.0	0.0	20.4	0.0	5.4	0.0	2.4	0.7	0.0	23.8	0.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	2.3	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tab. 18** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

**La Mancha**

Microtextura	LMN - B - 1										LMN - C - 1										
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits		
<b>Promedio</b>	0.21	1.06	0.11	0.16	0.61	25.47	2.87	18.51	6.48	0.83	0.28	0.57	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.16	0.00		
<b>Error Estándar</b>	0.21	0.34	0.11	0.08	0.18	3.52	1.87	2.76	1.57	0.35	0.10	0.29	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.16	0.00		
	LMN - B - 3										LMN - C - 3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
*Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Particulas Desprendidas o Remanentes Medium choncooidal fractures	3.9	4.7	0.0	0.0	2.0	6.1	1.6	0.0	0.0	0.0	Abrasion Fatigue	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	3.0	0.0	0.0	Straight Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.9	3.8	1.9	0.0
Flat Cleavage Surfaces	7.8	18.8	100.0	43.8	12.0	32.7	25.4	84.8	23.9	40.9	Flat Cleavage Surfaces	22.4	11.2	17.0	93.2	22.1	11.5	28.1	24.5	24.1	13.4
Upturned Plates	2.6	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	6.1	3.8	0.0	4.1
Bulbous Edges	6.5	9.4	0.0	4.1	64.0	16.3	19.0	0.0	18.3	0.0	Bulbous Edges	49.3	25.8	8.5	0.0	11.6	28.8	17.5	11.3	31.5	3.1
Elongated Depressions	6.5	37.5	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Elongated Depressions	0.0	14.6	0.0	0.0	0.0	6.7	3.5	0.0	9.3	0.0
Arcuate/Circular/Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0
Boxwork (relleno de remane)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	Boxwork	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
*Frontal Dissolution	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tab. 19** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.

## Chachalacas

Microtextura	CHC - B - 1										CHC - C - 1										
	Collision Points	Abrasion Fatigue	Choncooidal Fractures	Arcuate Steps	Straight Steps	Flat Cleavage Surfaces	Upturned Plates	Bulbous Edges	Elongated Depressions	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	Boxwork	Oxidized	Cornflake	Corrosion	Mamillated	Denticulated	Imbricated Wedge Marks	Lenticular Etch Pits	Solution Pits		
<b>Promedio</b>	0.00	2.76	0.00	0.21	0.81	7.27	1.01	31.18	15.46	0.00	0.44	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00		
<b>Error Estándar</b>	0.00	0.56	0.00	0.10	0.20	0.84	0.56	3.02	2.48	0.00	0.15	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00		
	CHC - B - 5										CHC - C - 5										
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	0.0	9.8	8.0	13.0	6.7	2.5	9.0	3.7	2.9	6.7	Abrasion Fatigue	0.0	2.0	0.0	1.0	0.0	1.8	0.0	2.0	0.4	0.0
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	1.9	0.0	Arcuate Steps	0.0	2.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	2.9	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	1.3	Straight Steps	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	3.4
Flat Cleavage Surfaces	1.7	5.9	10.2	14.5	3.8	16.7	7.5	15.0	16.3	9.3	Flat Cleavage Surfaces	0.0	0.7	3.2	6.7	5.1	8.0	7.6	19.2	1.1	5.7
Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.4	1.9	0.0	2.7	Upturned Plates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0
Bulbous Edges	32.5	16.7	6.3	5.8	32.7	14.1	43.3	13.1	45.2	18.7	Bulbous Edges	70.2	31.4	57.1	17.8	34.7	64.3	20.5	12.6	49.8	17.0
Elongated Depressions	5.0	0.0	5.7	9.4	0.0	0.0	10.4	0.9	15.4	38.7	Elongated Depressions	24.8	43.1	12.3	29.9	13.8	0.0	0.0	2.5	17.9	0.0
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Boxwork	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oxidized	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	CHC - B - 5										CHC - C - 5										
Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Collision Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abrasion Fatigue	0.0	0.6	0.0	2.0	0.3	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	Abrasion Fatigue	3.8	10.3	3.3	2.7	1.0	0.6	1.7	0.0	1.4	10.1
Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Choncooidal Fractures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arcuate Steps	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate Steps	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Straight Steps	0.0	0.0	0.2	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5	Straight Steps	1.9	1.7	0.0	3.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0
Flat Cleavage Surfaces	3.4	12.1	1.5	15.5	8.0	9.2	0.0	4.4	9.2	19.6	Flat Cleavage Surfaces	4.5	4.6	4.7	7.1	8.0	2.3	5.0	2.6	3.3	7.4
Upturned Plates	3.0	1.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	Upturned Plates	0.0	0.0	0.5	0.4	1.5	0.0	0.4	0.0	0.6	1.3
Bulbous Edges	34.3	15.0	35.0	8.0	25.9	16.0	42.2	86.9	39.5	6.9	Bulbous Edges	24.8	24.6	28.0	56.5	22.1	28.9	10.4	54.6	51.0	32.9
Elongated Depressions	6.1	11.2	11.7	19.5	31.6	39.3	3.7	0.0	25.4	2.0	Elongated Depressions	20.4	0.0	9.0	23.1	12.6	63.3	4.6	42.8	42.6	19.5
Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Arcuate / Circular / Polgonal Cracks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Boxwork	0.0	0.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.2	0.0	Boxwork	1.3	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	1.1	0.0
Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Oxidized	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Cornflake	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Mamillated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Denticulated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Imbricated Wedge Marks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Lenticular Etch Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Solution Pits	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Tab. 20** Porcentaje microtextural sobre la superficie de los clinopiroxenos.