

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**El drenaje ácido de roca como fuente de Fe y su rol en el secuestro de Fe, S y C en el
sedimento de Ensenada Ezcurra, Isla Rey Jorge, Antártida**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR:

GABRIEL ROBERTO TASAYCO DAVILA

ASESORES:

Dra. BLANCA SILVIA ROSAS LIZARRAGA

Dr. BERNHARD STEFAN DOLD

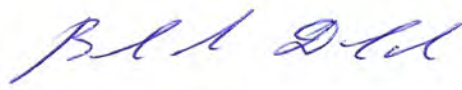
Lima, julio, 2024

Informe de Similitud

Yo, **Bernhard Stefan Dold**, docente de la Facultad de la **Facultad de Ciencias e Ingeniería** de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **El drenaje ácido de roca como fuente de Fe y su rol en el secuestro de Fe, S y C en el sedimento de Ensenada Ezcurra, Isla Rey Jorge, Antártida**, del autor **Gabriel Roberto Tasayco Davila**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 12/07/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

San Miguel, Lima, miércoles 17 de julio,

Apellidos y nombres del asesor: <u>Bernhard Stefan Dold</u>	
Pasaporte: C9FOCYFGW	Firma 
ORCID: /0000-0002-9576-4198	

Resumen

El hierro ha demostrado ser un elemento de gran importancia en el océano austral, una región con alto contenido de nutrientes, pero baja producción de clorofila (HNLC, por su sigla en inglés). En general, a pesar de los diversos modos por los que el hierro llega al océano, este se encuentra en bajas concentraciones, al punto de ser considerado un nutriente limitante para la vida. Además, este elemento está relacionado con la captura del CO₂ atmosférico hacia el sedimento marino por parte de organismos.

La presente tesis se basa en el estudio de la evolución del drenaje ácido de roca (DAR) generado en la caleta Cardozo, isla Rey Jorge, Antártida, con el fin de determinar qué procesos predominan sobre el hierro y sobre aquellos elementos que conforman complejos aniónicos. En el presente estudio se analizaron muestras de sedimento (mediante microscopía óptica, el determinador de carbono/azufre LECO CS230 y XRF), columna de agua y agua intersticial (mediante, IC, ICP-OES y HR-ICP-MS), en tres estaciones ubicadas a lo largo de la ensenada Ezcurra, entre caleta Cardozo y bahía Almirantazgo. Los resultados fueron comparados con los de muestras adquiridas en la bahía Esperanza, para el control analítico correspondiente. Las muestras de agua fueron adquiridas mediante una roseta CTDO equipada con botellas Niskin y las de sedimento, a través de un *Piston Corer*; en ambos casos durante la expedición peruana ANTAR XXVII (enero-marzo 2020).

En las dos estaciones más cercanas a caleta Cardozo (AC1 y AC2), se observó que la estratificación del agua se puede identificar mediante los quiebres en las curvas de la concentración de Cl⁻ y SO₄²⁻. La estación más cercana a bahía Almirantazgo (AC3) no mostró ninguna estratificación en el CTDO debido al *upwelling* de aguas provenientes del estrecho de Bransfield, lo cual se tradujo en concentraciones casi constantes de estos aniones. Por otro lado,

el Br es afectado por procesos de deshielo y escorrentías al encontrarse en menores concentraciones.

También se observó un enriquecimiento significativo de Fe y Co en la columna de agua en comparación con la bahía Esperanza (muestreo de control). En el caso del Fe, su concentración en el agua está determinada por la disolución de sólidos en suspensión, en la columna de agua, y por la disolución reductiva de hidróxidos, en el agua de poros. Asimismo, se determinó que la concentración de elementos que conforman oxi-aniones (Cr, Mo, W) y algunos complejos aniónicos (As, Cu, U y V) está determinada por la desorción de la superficie de sólidos en suspensión y del sedimento. Por otro lado, el Al precipita rápidamente en la costa bajo la forma de hidróxidos de color blanquecino, al entrar en contacto con el agua marina.

Se determinó asimismo que la cobertura glaciar aisló la pirita primaria del oxígeno atmosférico hasta hace 270 o 690 años. Esta época se caracteriza por un aporte de sedimento de mayor granulometría y minerales primarios de hierro (pirita, magnetita, hematita y epidota) que no sufrieron intemperismo químico. Dichos minerales primarios son poco reactivos con el azufre reducido, por lo cual no se apreció pirita framboidal en el sedimento transportado en esta época. Posteriormente, el inicio del retroceso glaciar permitió la oxidación de pirita, lo cual generó DAR. Este drenaje ácido formó jarosita e hidróxidos de hierro de bajo grado de cristalinidad (como schwertmannita y ferrihidrita) en la costa de la ensenada Ezcurra, además de constituir un aporte importante de hierro disuelto hacia el mar. Estos minerales secundarios, a diferencia de los primarios, pudieron ser aprovechados por los organismos, permitiendo la floración de fitoplancton. Dichos restos orgánicos fueron soterrados, secuestrando CO₂ atmosférico en el sedimento. Asimismo, la materia orgánica generó microambientes reductores, los cuales permitieron el secuestro de Fe y S mediante la precipitación de pirita framboidal. Se evidenciaría así la importancia del DAR generado en caleta Cardozo en el secuestro de C, Fe y S en el sedimento de la ensenada Ezcurra.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia: Mi madre por su apoyo incondicional, comprensión y ánimos para siempre seguir adelante. A mi padre, por su apoyo y estrictez y por la pasión que pone a su labor como geólogo, la cual me motivó a estudiar esta carrera.

Por su guía en este trabajo, a mis asesores: A la doctora Silvia Rosas por creer en mí e invitarme a participar de esta extraordinaria e inolvidable aventura antártica. Al doctor Bernhard Dold, por su voto de confianza y sus publicaciones que me motivaron a especializarme en hidroquímica.

A mi mejor amiga Andrea Millán, por sus ánimos, apoyo, empatía y paciencia infinita. He perdido la cuenta de todas las veces que logré correlacionar nuevas ideas gracias a que a te gustaba escuchar mis avances. A Eduardo Tirado, por su amistad y ayuda para desarrollar pensamiento crítico desde Estudios Generales Ciencias hasta después del egreso.

Este logro también es suyo

Índice

1.	<i>Introducción</i>	1
1.1.	El hierro en el mar	1
1.2.	El hierro en el océano Austral	2
1.3.	Estudios previos	3
1.4.	Problemática	8
1.5.	Objetivos	9
1.5.1.	Principal	10
1.5.2.	Secundarios	10
1.6.	Campaña de muestreo	10
1.7.	Hipótesis	11
1.8.	Justificación	12
2.	<i>Área de estudio</i>	13
2.1.	Situación geográfica	13
2.2.	Marco tectónico	14
2.3.	Estratigrafía	19
2.3.1.	Barton Horst	22
2.3.2.	Bloque Warszawa	24
3.	<i>Metodología</i>	27
3.1.	Muestreo en campo	27
3.1.1.	Muestreo de agua	27
3.1.2.	Muestreo en el sedimento	29
3.2.	Preparación de muestras	38

3.3. Análisis	41
3.3.1. Análisis mineralógico	41
3.3.2. Análisis en el sedimento	41
3.3.3. Análisis de agua	42
4. Resultados.....	44
4.1. Eh y pH	44
4.2. Geoquímica del agua	46
4.2.1. Tratamiento de datos	46
4.2.2. Especiación	47
4.2.3. Asociaciones geoquímicas	48
4.3. Geoquímica del sedimento	53
4.4. Mineralogía y petrografía	55
4.4.1. Descripción macroscópica	55
4.4.2. Descripción microscópica	64
4.5. Modelamiento geoquímico.....	74
5. Discusión	82
5.1. Elementos mayores	82
5.2. Azufre	84
5.3. Materia orgánica	86
5.4. Hierro.....	88
5.5. Pirita framboidal	95
5.6. Elementos traza.....	102
6. Conclusiones.....	109

7. Referencias.....	113
8. Anexos.....	123
8.1. Anexo I: Figuras	123
8.2. Anexo II: Esquemas	130
8.3. Anexo III: Tablas	148
8.4. Anexo IV: Fichas	172



Índice de Figuras

<i>Figura 1-1: Fuentes de hierro disuelto al océano Austral</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1-2: Intemperismo en la costa de caleta Cardozo estudiado por Dold et al. (2013).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1-3: Esquema de aportes de hierro hacia el mar en la ensenada Escurra</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1-4: Diagrama de estabilidad del hierro según el pH y Eh del medio</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1-5: Mecanismos de reducción y oxidación de compuestos en el ciclo del azufre</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1-6: Equipo de trabajo frente al BAP Carrasco fondeado en Punta Arenas.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2-1: Ubicación de la isla Rey Jorge.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2-2: Ubicación de ensenadas y caletas en la isla Rey Jorge.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2-3: Reconstrucción de la evolución tectónica del margen del Pacífico Sureste.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-4: Variación de la dirección de esfuerzos en la subducción Fénix-Antártida</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2-5: Unidades tectónicas de la isla Rey Jorge</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2-6: Posición estratigráfica de los grupos presentes en el Bloque Warszawa y Barton Horst.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2-7: Afloramientos en la bahía Almirantazgo según los grupos identificados</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3-1: Muestreo en la columna de agua.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3-2: Muestreo con el piston corer.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3-3: Forrado del testigo AC2.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3-4: Aseguramiento y muestreo del testigo AC3.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3-5: Instalación de los rhizon.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3-6: Esquema de niveles de muestreo de agua de poros.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3-7: Medición de pH y Eh del agua de poros</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3-8: Corte de los testigos</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3-9: Muestreo de sedimento.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3-10: Esquema de niveles de muestreo en el sedimento</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3-11: Elaboración de las muestras.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3-12: Esquema del proceso de preparación de muestras.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4-1: Perfiles de pH y Eh en la columna de agua de las estaciones AC1, AC2 y AC3</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4-2: Perfiles de pH y Eh en el agua de poros de las estaciones AC1, AC2 y AC3</i>	<i>45</i>

<i>Figura 4-3: Suma de cationes y aniones en miliequivalentes por litro.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-4: Correlación de mayor concentración de Fe a un mayor pH y menor Eh.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4-5: Esquematzación de la granulometría, color y materia orgánica del testigo AC1.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4-6: Esquematzación de la granulometría, color y materia orgánica del testigo AC2.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4-7: Esquematzación de la granulometría, color y materia orgánica del testigo AC3.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4-8: Resumen de la mineralogía de las muestras</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4-9: Asociación de pirita framboidal dentro y alrededor de restos orgánicos.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4-10: Restos orgánicos observados en las muestras</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4-11: Boxplot de la temperatura por tipos de muestra</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4-12: Ploteo del pH junto a las correcciones de Eh</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4-13: SI del hidróxido férrico, goethita, hematita, magnetita y cromita en la columna de agua.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4-14: SI del hidróxido férrico, goethita, hematita, magnetita, jarosita y cromita en el agua de poros.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4-15: Número de muestras con un SI negativo por especie al cambiar el Eh</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5-1: Corte esquemático de ensenada Ezcurra (SO-NE) y bahía Esperanza (NO-SE).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5-2: Distribución vertical de la pirita primaria (hipógena) y framboidal en el sedimento.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5-3: Distribución vertical de los restos orgánicos en el sedimento</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5-4: Intemperismo observado a lo largo de la costa noreste de la ensenada Ezcurra</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5-5: Comparación del Eh de las estaciones con los resultados obtenidos por Santos et al. (2007)</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-6: Distribución de los hidróxidos de hierro en el sedimento</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5-7: Contraste en la abundancia de impregnaciones de hidróxidos de hierro en AC1</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-8: Correlación de la abundancia de pirita framboidal con los restos orgánicos.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5-9: Abundancia relativa de los estados de oxidación del Fe</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5-10: Abundancia relativa de los estados de oxidación del S</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5-11: Efecto de la sorción de aniones</i>	<i>104</i>
<i>Figura 8-1: Capas de agua observadas en el CTDO y su correspondencia con los aniones mayoritarios.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 8-2: Balance iónico de las muestras de la columna de agua y agua de poros.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 8-3: Asociaciones geoquímicas en la columna de agua con base en los perfiles.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 8-4: Asociaciones geoquímicas en el agua de poros con base en los perfiles.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 8-5: Asociaciones geoquímicas en el sedimento con base en los perfiles.....</i>	<i>127</i>

Figura 8-6: Correlación de mayor concentración de As, Cr y V con el pH y Eh..... 128

Figura 8-7: Variaciones en las concentraciones relativas de los géneros de las especies de bacterias..... 129



Índice de Esquemas

<i>Esquema 8-1: Perfiles de concentraciones del Al en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento</i>	<i>131</i>
<i>Esquema 8-2: Perfiles de concentraciones del As en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento.....</i>	<i>132</i>
<i>Esquema 8-3: Perfiles de concentraciones del Br en la columna de agua y sedimento.....</i>	<i>133</i>
<i>Esquema 8-4: Perfiles de concentraciones del Cl en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento s.</i>	<i>134</i>
<i>Esquema 8-5: Perfiles de concentraciones del Co en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento s.....</i>	<i>135</i>
<i>Esquema 8-6: Perfiles de concentraciones del Cr en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento.</i>	<i>136</i>
<i>Esquema 8-7: Perfiles de concentraciones del Cu en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento.</i>	<i>137</i>
<i>Esquema 8-8: Perfiles de concentraciones del Fe en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento.....</i>	<i>138</i>
<i>Esquema 8-9: Perfiles de concentraciones del Ga en la columna de agua y sedimento.....</i>	<i>139</i>
<i>Esquema 8-10: Perfiles de concentraciones del Hf en la columna de agua y sedimento.....</i>	<i>140</i>
<i>Esquema 8-11: Perfiles de concentraciones del Mo en la columna de agua y sedimento.....</i>	<i>141</i>
<i>Esquema 8-12: Perfiles de concentraciones del Nb en la columna de agua y sedimento.....</i>	<i>142</i>
<i>Esquema 8-13: Perfiles de concentraciones del P en la columna de agua y sedimento</i>	<i>143</i>
<i>Esquema 8-14: Perfiles de concentraciones del S en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento.....</i>	<i>144</i>
<i>Esquema 8-15: Perfiles de concentraciones del Te en la columna de agua y sedimento</i>	<i>145</i>
<i>Esquema 8-16: Perfiles de concentraciones del U en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento s.</i>	<i>146</i>
<i>Esquema 8-17: Perfiles de concentraciones del V en la columna de agua y sedimento.....</i>	<i>147</i>
<i>Esquema 8-18: Perfiles de concentraciones del W en la fuente del DAR, columna de agua y sedimento.....</i>	<i>148</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 4-1: Asociaciones geoquímicas en la columna de agua</i>	50
<i>Tabla 4-2: Asociaciones geoquímicas en el agua de poros</i>	52
<i>Tabla 4-3: Asociaciones geoquímicas en el sedimento</i>	55
<i>Tabla 4-4: Semi-cuantificación de materia orgánica, pirita e hidróxidos de hierro en las muestras</i>	64
<i>Tabla 4-5: Número de muestras con un SI negativo por compuesto y tipo de muestra</i>	77
<i>Tabla 8-1: Ubicación espacial de las estaciones de muestreo.</i>	149
<i>Tabla 8-2: Lista de muestras obtenidas de la columna de agua por testigo</i>	149
<i>Tabla 8-3: Lista de muestras de agua de poros obtenidas por testigo</i>	151
<i>Tabla 8-4: Muestras de sedimento obtenidas de cada estación, según su profundidad</i>	152
<i>Tabla 8-5: Análisis geoquímico en la columna de agua por estación</i>	155
<i>Tabla 8-6: Análisis geoquímico en el agua de poros por estación</i>	157
<i>Tabla 8-7: Análisis geoquímico del sedimento por estación</i>	159
<i>Tabla 8-8: Especiación de los elementos en la columna de agua por estación</i>	163
<i>Tabla 8-9: Especiación de los elementos en el agua de poros</i>	165
<i>Tabla 8-10: Estadísticas de la geoquímica en columna de agua por estación</i>	167
<i>Tabla 8-11: Estadísticas de la geoquímica del agua de poros por estación</i>	167
<i>Tabla 8-12: Estadísticas de la geoquímica del sedimento de cada estación</i>	168
<i>Tabla 8-13: Variación del número de muestras con SI negativo al cambiar el Eh y la temperatura.</i>	170
<i>Tabla 8-14: Tabla de abreviaturas empleadas en las fichas</i>	173

1. Introducción

1.1. El hierro en el mar

El hierro, al igual que el nitrógeno y el fósforo, desempeña un papel fundamental en la vida marina ya que es necesario para su desarrollo; sin embargo este se encuentra en bajas concentraciones biológicamente disponibles (Blain et al., 2007). Este elemento se convirtió en un nutriente limitante cuando los niveles de oxígeno en la atmósfera e hidrósfera aumentaron a inicios del Proterozoico (Precámbrico) hace 2100 a 2400 Ma (Coale & Wong, 2018; Lyons et al., 2014), causando su oxidación y precipitación (bajo la forma del insoluble Fe III), originando así las formaciones de hierro bandeado (BIF, por sus siglas en inglés; Lyons et al., 2014). La insolubilidad del Fe III dificulta su aprovechamiento biológico, por lo que, para competir con los procesos de floculación y consecuente precipitación de este (Blain et al., 2007; Boyd & Ellwood, 2010; Coale & Wong, 2018), los organismos tuvieron que desarrollar ligandos orgánicos capaces de degradar el hierro en nanopartículas biológicamente disponibles (Blain et al., 2007; Hawkings et al., 2014; Raiswell et al., 2008).

Hoy en día, cerca del 30% de los océanos en el mundo tienen un alto contenido de nitrato (principal macronutriente), pero una baja producción de clorofila (HNLC, por su sigla en inglés), la cual está relacionada con la producción del fitoplancton (Coale & Wong, 2018). La baja producción biótica, que contrasta con la abundancia de nutrientes, ha sido atribuida a las bajas concentraciones de hierro, considerado un nutriente restrictivo (Boyd & Ellwood, 2010; Tagliabue et al., 2009). Esta idea ha sido reforzada luego de que se observaron floraciones de fitoplancton en áreas de fertilización natural (Blain et al., 2007) y artificial (Coale & Wong, 2018) de hierro. Adicionalmente, diversos experimentos de fertilización de este elemento determinaron que el incremento en la producción de vida contribuye a la fijación del CO₂ atmosférico por parte de los organismos (Blain et al., 2007; Coale & Wong, 2018; Raiswell &

Canfield, 2012), tal como lo planteó Martin (1990), en la “hipótesis de hierro”. Como resultado, se ha desarrollado diversas propuestas de ingeniería de fertilización a gran escala para combatir el cambio climático; no obstante, todas han sido descartadas por su complejidad, costo y baja efectividad (Chisholm et al., 2009; Coale & Wong, 2018).

1.2. El hierro en el océano Austral

El océano Austral, también llamado océano Antártico, corresponde a las aguas marinas situadas a más de 60°S y conforma la mayor región con HNLC (Tagliabue et al., 2009). Entre las fuentes de hierro en este océano (Figura 1-1) se encuentra la deposición eólica (Tagliabue et al., 2009), el derretimiento glaciar, el transporte en icebergs (Raiswell et al., 2008), escorrentías (Dold et al., 2013; Hawkings et al., 2014), el aporte de sedimentos (Tagliabue et al., 2009, 2010), las corrientes marinas (Blain et al., 2007) y la contribución hidrotermal (Tagliabue et al., 2010). Si bien a gran escala las principales fuentes de hierro en el océano Austral son el eólico y el sedimentario (Tagliabue et al., 2009), el tipo de aporte más relevante varía localmente, de acuerdo a las condiciones particulares de cada zona (Boyd & Ellwood, 2010). En el caso particular de la ensenada Ezcurra (isla Rey Jorge), existe un aporte importante de hierro ferroso y férrico debido al drenaje ácido de roca (DAR) generado en la caleta Cardozo, el cual podría, a su vez, generar un aporte más distal debido al transporte y derretimiento de icebergs (Dold et al., 2013).

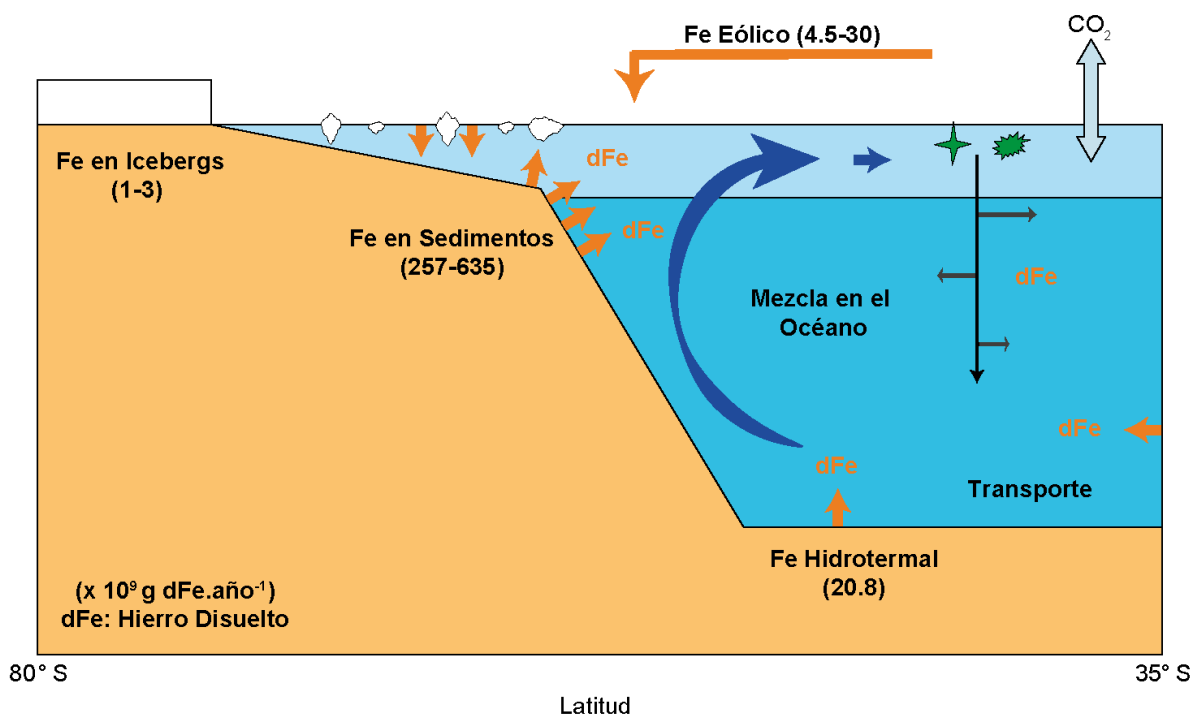


Figura 1-1: Fuentes de hierro disuelto al océano Austral. Modificado de Tagliabue et al. (2010).

1.3. Estudios previos

Entre 2009 y 2011, Dold et al. (2013) realizaron estudios sobre el intemperismo en los afloramientos rocosos de la parte continental de la caleta Cardozo (Figura 1-2), los cuales presentan mineralización de pirita (Barton, 1965; Birkenmajer, 1980, 1989; Kraus et al., 2010). Este estudio determinó que las aguas ácidas generadas en dicha zona constituyen un aporte importante de hierro disuelto a las aguas marinas de la ensenada Ezcurra mediante escorrentías superficiales (bajo la forma de Fe III) e infiltraciones subterráneas reducidas microbiológicamente (como Fe II, Figura 1-3A). También se identificó que cuando los afloramientos antes mencionados y la caleta se encuentran cubiertos por hielo, la pluma que contiene Fe II disuelto asciende y se aísla del agua marina por lentes de agua dulce, reuniendo las condiciones óptimas para que este elemento se oxide, hidrolize y precipite como schwertmannita $[\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4)]$, la cual, a su vez, puede ser transportada a lo largo de la ensenada por icebergs en movimiento (Figura 1-3B). Asimismo, como resultado del retroceso glaciar, el Fe III se habría diluido e hidrolizado, precipitando ferrihidrita $[5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ en la

costa por acción del oleaje. Por otro lado, el hierro ferroso presente en la pluma se mantuvo disuelto o solo logró formar compuestos férricos nanométricos debido a que su velocidad de oxidación disminuyó notablemente a causa de la baja temperatura (Dold et al., 2013; Raiswell et al., 2009).



Figura 1-2: Intemperismo en la costa de caleta Cardozo estudiado por Dold et al. (2013). Foto actualizada al 05/02/2020.

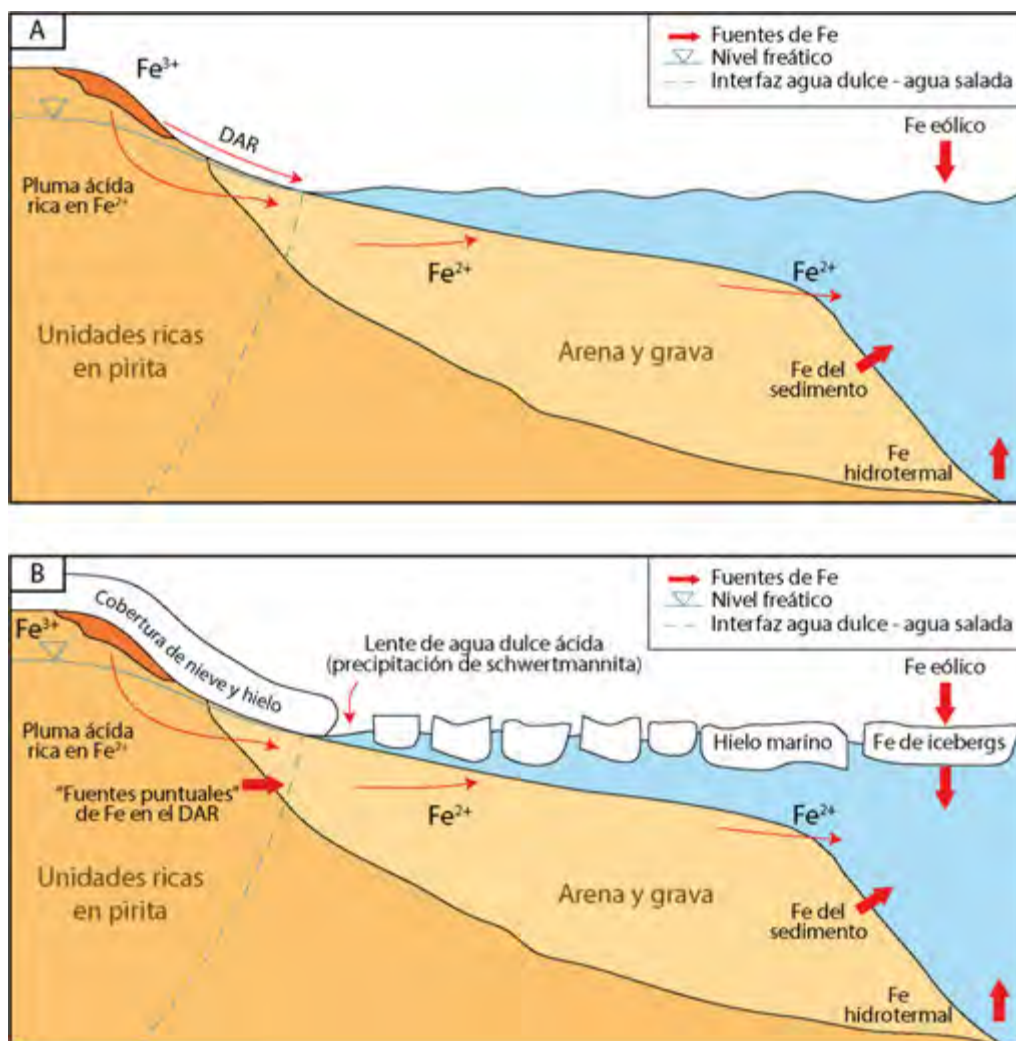


Figura 1-3: Esquema de aportes de hierro hacia el mar en la ensenada Escurra. (A) El DAR genera un aporte superficial de Fe^{3+} , parte del cual percola y se reduce microbiológicamente a Fe^{2+} . (B) Cuando el afloramiento se encuentra cubierto por nieve y/o hielo, la pluma de hierro reducido asciende y se mezcla lentamente debido a los lentes de agua dulce formados por los bloques de hielo, precipitando finalmente schwertmannita. Modificado de Dold et al. (2013).

Además de schwertmannita y ferrihidrita, se identificó la precipitación de goethita y jarosita $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ en el hielo costero (Dold et al., 2013). Cada uno de estos minerales se forma en distintas condiciones (Figura 1-4), lo que permite identificar los cambios que sufre el hierro hasta su precipitación y qué otros elementos lo acompañan en el proceso (como potasio o azufre, Dold, 2010). La diferencia más marcada en estos minerales de alteración se encuentra entre la schwertmannita, que se forma en aguas ácidas superficiales y puede coexistir con jarosita si hay potasio presente; y la ferrihidrita, que se forma en ambientes más alcalinos ($\text{pH} > 4$) (Dold, 2003; Raiswell et al., 2009). Dold (2003) identificó que en medios ácidos la

disolución de la schwertmannita está controlada por el colapso de su geometría esférica, mientras que Raiswell et al. (2008) comprobaron que la ferrihidrita transportada por los icebergs, por tener una estructura menos ordenada que la de los hidróxidos en los que se transforma, es más soluble y representa una fuente importante de hierro biológicamente disponible.

Por otro lado, aunque la jarosita se asocia con una alta acidez, también puede formarse en un ambiente neutro a gran escala debido a que las bacterias del género *Acidithiobacillus* pueden crear microambientes ácidos alrededor de los sulfuros. Los minerales mencionados anteriormente son metaestables en la superficie y, a menos que estén cubiertos por hielo, forman compuestos intermedios (generalmente goethita) que evolucionan a hematita como producto final (Boland et al., 2014; Das et al., 2011; Dold, 2010; Lyons et al., 2014; Raiswell et al., 2009).

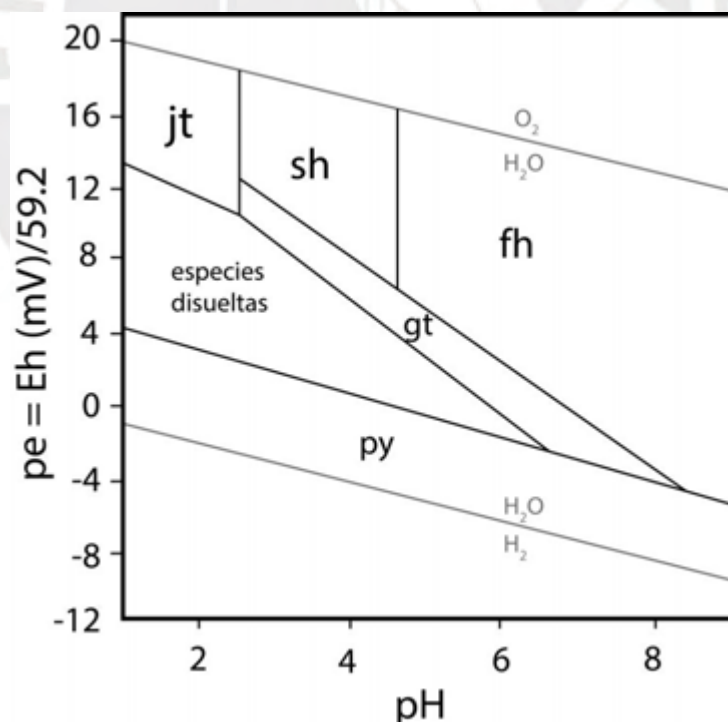


Figura 1-4: Diagrama de estabilidad del hierro según el pH y Eh del medio. Fases minerales: Jarosita (jt), schwertmannita (sh), ferrihidrita (fh), goethita (gt), pirita (py). Tomado de Dold (2010).

Estos minerales, así como el comportamiento del hierro, han sido objeto de estudio por ser productos (sulfatos, óxidos e hidróxidos) y, a su vez, generadores (sulfuros, especialmente en presencia de bio-catalizadores) de drenaje ácido tanto de roca (DAR) como de mina (DAM), a partir de la oxidación de diferentes sulfuros. Dichos estudios se enfocan principalmente en la disposición de residuos mineros (desmonte y relaves) debido al potencial riesgo ambiental y de salud, donde se ha identificado que la oxidación de sulfuros genera acidez, pudiendo liberar altas concentraciones de sulfato y metales (Fe, Al, Cu, Pb, Zn, Cd) al agua (Dold, 2010; Dold & Fontbote, 2001; INAP, 2014; Smuda et al., 2014). En un intento por evitar la oxidación de sulfuros presentes en dichos residuos, se han registrado casos de disposición submarina de relaves, argumentando que el agua alcalina del mar aislaría a los minerales del oxígeno atmosférico. No obstante, Dold (2014) recopiló numerosos casos alrededor del mundo en los que se demostró que un almacenamiento cerca de la superficie no es suficiente para evitar la oxidación, mientras que en casos de disposición a una mayor profundidad se comprobó que hubo liberación de oxi-aniones (como As y Mo) al agua. Esto último se debe a que los óxidos e hidróxidos de hierro pueden adsorber elementos tóxicos (como As, Sb y Cr) durante su precipitación, los cuales son puestos nuevamente en solución al ser sometidos a condiciones alcalinas reductoras (Amstaetter et al., 2010; Smuda et al., 2014; Zhang et al., 2018).

Se ha evidenciado la importancia de la materia orgánica en los procesos de reducción que ocurren en los sedimentos del fondo marino durante el soterramiento (Figura 1-5). Por un lado, los sideróforos bacterianos favorecen la disolución de minerales de hierro, principalmente hidróxidos amorfos (Yoshida et al., 2002), mientras que otros microorganismos, como la bacteria *Shewanella loihica*, son capaces de reducir el Fe III presente en la estructura de determinados minerales (como ferrihidrita, magnetita, goethita y hematita) y liberar Fe II en solución, (Benaiges-Fernandez et al., 2019). Por otro lado, microorganismos sulfato-reductores (principalmente bacterias) utilizan la materia orgánica como un receptor de electrones durante

producción de vida en regiones con HNLC, como es el caso del océano Austral (Boyd & Ellwood, 2010; Coale & Wong, 2018; Tagliabue et al., 2009). Los estudios respecto al aporte de hierro al océano han sido realizados a escala regional (como Boyd & Ellwood, 2010 y Tagliabue et al., 2009, 2010) y, por lo tanto, no reflejan con precisión lo que ocurre a escala local.

En el estudio de Dold et al. (2013), se obtuvieron muestras de agua hasta a 100 metros de la línea de costa de la caleta Cardozo con el fin de evaluar el efecto del DAR en el agua marina. Este estudio proporciona un primer indicio a escala local, mas no permite determinar un efecto sobre la ensenada Ezcurra. Los estudios en la zona generalmente se dedican a analizar el sedimento (Berbel & Braga, 2014; Khim et al., 2001; Khim & Yoon, 2003; Raiswell et al., 2009; Santos et al., 2007), mientras que aquellos que consideran simultáneamente al agua (Potapowicz et al., 2020; Szopińska et al., 2018) se basan en muestras a una única profundidad, lo que no es representativo, considerando especialmente la heterogeneidad propia de un ambiente glaciar. Si bien algunos resultados se pueden extrapolar para comprender qué sucede en una localidad en particular, diversos autores han subrayado que los aportes locales de hierro pueden generar variaciones significativas respecto a lo observado a mayor escala (Dold et al., 2013; Raiswell et al., 2006; Tagliabue et al., 2009).

Si bien se conoce el ciclo del hierro y azufre en el mar, los procesos que tienen lugar dependen de la presencia de materia orgánica (Berner, 1985; Jørgensen et al., 2019), la cual es escasa en el área de estudio (Berbel & Braga, 2014; Khim et al., 2001; Khim & Yoon, 2003; Potapowicz et al., 2020). Es así como surge un vacío de información sobre la influencia que tiene el DAR generado en caleta Cardozo (Dold et al., 2013) sobre el sedimento y aguas de la ensenada Ezcurra.

1.5. Objetivos

1.5.1. Principal

Determinar qué procesos predominan sobre el hierro y complejos aniónicos presentes en el agua y sedimento de la ensenada Ezcurra, y su relación con el DAR observado en caleta Cardozo.

1.5.2. Secundarios

- Obtener muestras representativas a distintas profundidades de la columna de agua, sedimento y agua intersticial a lo largo de la ensenada Ezcurra.
- Elaborar perfiles de composición geoquímica de las muestras de agua y sedimento de la ensenada Ezcurra, y compararlos con los datos de la caleta Cardozo y la bahía Esperanza.
- Realizar una semi-cuantificación de pirita primaria y framboidal, óxidos e hidróxidos de hierro y restos orgánicos mediante microscopía óptica.
- Identificar los procesos redox mediante la especiación y asociaciones geoquímicas, así como mediante la abundancia, textura y tamaño de los minerales, especialmente de hierro.

1.6. Campaña de muestreo

Con la finalidad de cumplir dichos objetivos, se planificó una recolección de muestras en tres estaciones ubicadas a lo largo de la ensenada Ezcurra (Tabla 8-1, Figura 2-2). Esta se llevó a cabo durante la vigésima séptima campaña científica peruana a la Antártida (ANTAR XXVII), denominada ORCA II “Evolución de Vulcanismo Submarino en el estrecho de Bransfield: Relación de las Emanaciones Hidrotermales con la Biodiversidad y el Cambio Climático” entre el 29 de enero y el 4 de marzo del 2020 gracias a la colaboración entre la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la Luleå University of Technology de Suecia y la “Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe” (BGR) de Alemania. La delegación

(Figura 1-6) estuvo compuesta por los doctores Silvia Rosas Lizárraga (PUCP) y Bernhard Dold (Luleå - PUCP), así como por los estudiantes Eduardo Jesús Tirado Romero (PUCP) y el presente autor, Gabriel Roberto Tasayco Davila (PUCP). Durante la campaña se obtuvo un total de 88 muestras de sedimento destinadas a estudios microbiológicos y 92 destinadas a estudios mineralógicos y geoquímicos, así como 130 muestras de columna de agua y 58 de agua de poros de los testigos obtenidos. En este trabajo se analizará la evolución de la materia orgánica, el hierro y aquellos elementos que se encuentren mayoritariamente como complejos aniónicos.



Figura 1-6: Equipo de trabajo frente al BAP Carrasco fondeado en Punta Arenas. De izquierda a derecha: Doctores Bernhard Dold, Silvia Rosas Lizárraga y estudiantes Gabriel Tasayco Davila y Eduardo Tirado Romero.

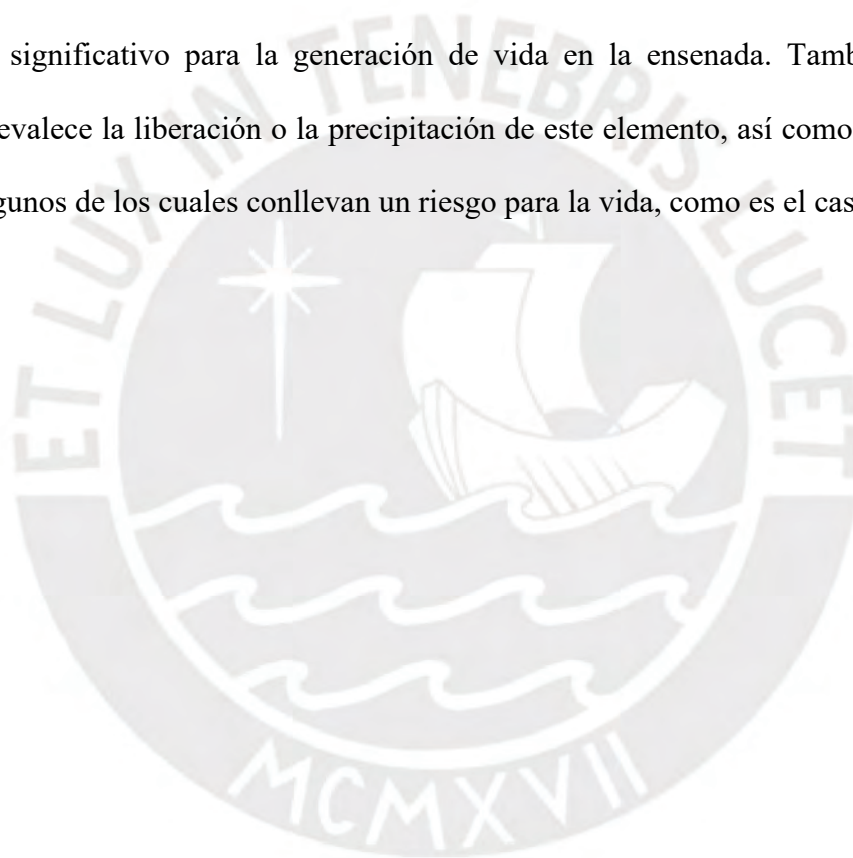
1.7. Hipótesis

El aporte de Fe disuelto, producido por el DAR, conllevaría a una mayor concentración de materia orgánica cerca de caleta Cardozo (fuente del DAR), la cual disminuirá con la profundidad en el sedimento debido a su oxidación. Asimismo, la concentración de Fe en la

columna de agua disminuirá conforme aumenta la distancia a caleta Cardozo. Por otro lado, al tratarse de mar abierto, la incorporación de este elemento al sedimento se verá limitada debido a la reducción del sulfato del agua de mar (en lugar de la del hierro, gracias al aporte del DAR) en presencia de bacterias sulfato-reductoras.

1.8. Justificación

Este estudio facilitará la comprensión de la evolución del DAR generado en caleta Cardozo a lo largo de la ensenada Ezcurra y determinará si el aporte natural de hierro (nutriente limitante) es significativo para la generación de vida en la ensenada. También permitirá conocer si prevalece la liberación o la precipitación de este elemento, así como de complejos aniónicos, algunos de los cuales conllevan un riesgo para la vida, como es el caso del arsénico y cromo.



2. Área de estudio

2.1. Situación geográfica

La isla Rey Jorge es la más grande del archipiélago Islas Shetland del Sur, situada en la provincia fisiográfica de la Península Antártica, en la Antártida Occidental (Jordan et al., 2020). Se encuentra limitada al noroeste por el paso Drake; al sureste, por el estrecho Bransfield (que la separa de la Península Antártica); y al suroeste, por la bahía Maxwell (la cual la separa de la isla Nelson), como se muestra en la Figura 2-1. Es en esta isla donde se encuentra la estación científica peruana Machu Picchu.

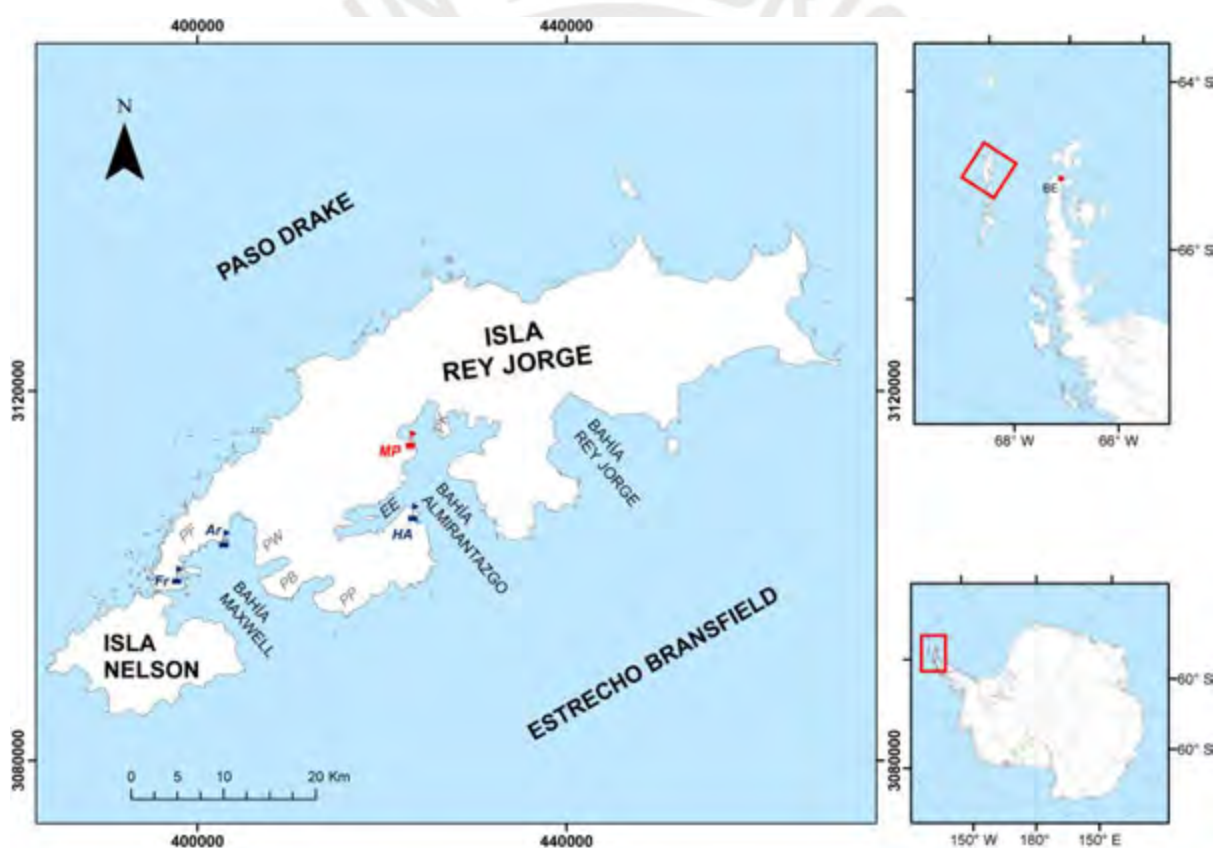


Figura 2-1: Ubicación de la isla Rey Jorge. Las banderas indican las bases según la WABA (2003): Machu Picchu de Perú (MP), Artigas de Uruguay (Ar), Frei de Chile (Fr) y Henry Arctowski de Polonia (HA). Penínsulas con afloramientos de roca: Fildes (PF), Wegger (PW), Barton (PB), Potter (PP), Keller (PK). EE: Ensenada Ezcurra. Sistema de coordenadas: UTM Zona 21S. Fuente: Matsuoka & Skoglund (2018).

La bahía Almirantazgo es un fiordo que se extiende de forma perpendicular al eje mayor de la isla, mientras que sus ramificaciones (ensenadas Ezcurra, MacKellar y Martel) corren de forma paralela (Figura 2-2). El área de interés corresponde a la ensenada Ezcurra, la cual se

extiende hacia el suroeste entre los campos de hielo Warszawa y Arctowski e incluye a las caletas Goulden y Cardozo (Figura 2-2, Birkenmajer, 1980; Kraus et al., 2010). El trayecto desde Punta Arenas (Chile) hasta la isla dura alrededor de 60 horas en buque o 3 horas en avión. Los perfiles batimétricos (data no publicada, obtenida durante la expedición en base a mapas batimétricos utilizados por la Marina de Guerra del Perú) muestran profundidades mayores a 210 metros, por lo cual tanto los puntos de muestreo (Tabla 8-1) como la fuente estudiada (caleta Cardozo) son accesibles mediante un gran rango de embarcaciones. El clima en la zona costera es variable, con una temperatura promedio de -10°C (extremos de -40°C en invierno y 10°C en verano) y vientos que alcanzan los 100 km/h, con ráfagas superiores a los 200 km/h (Australian Antarctic Division, 2002).

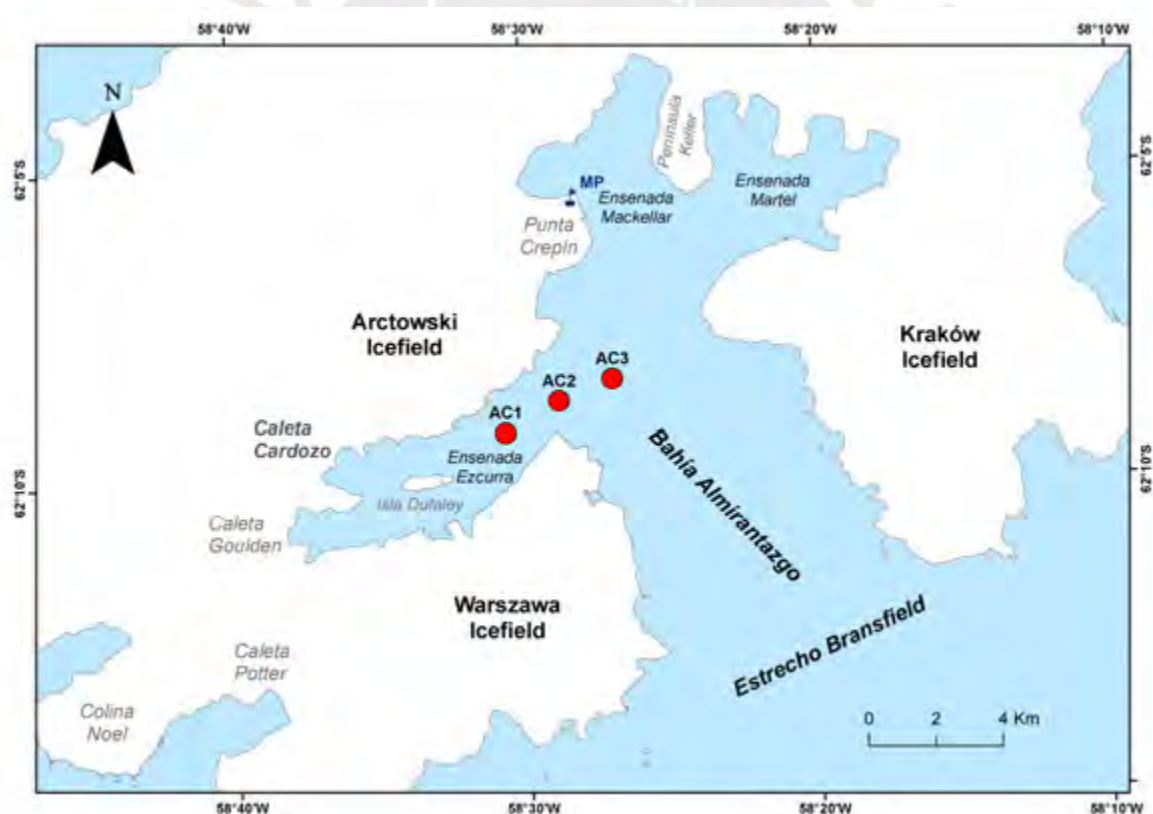


Figura 2-2: Ubicación de ensenadas y caletas en la isla Rey Jorge. En rojo puntos de muestreo de la campaña de 2020 MP: Estación científica Machu Picchu. Fuente: Matsuoka & Skoglund (2018).

2.2. Marco tectónico

El antiguo supercontinente de Gondwana inició su división en el Jurásico (Smellie et al., 2021), separando gradualmente a África (hace 160 Ma), India (hace 130 Ma) y Australia (hace 90 Ma), y aislando finalmente a la Antártida con el inicio de la abertura del Paso Drake (hace 30 Ma, McCarron & Larter, 1998; Storey & Granot, 2021). Actualmente, la cordillera Transantártica divide a la Antártida en dos provincias fisiográficas: Antártida Oriental y Antártida Occidental, siendo esta última la más joven, menos estable tectónicamente hablando y con una topografía menos elevada (Jordan et al., 2020; Storey & Granot, 2021). Las Islas Shetland del Sur se ubican al noroeste de la Península Antártica, perteneciendo a su vez a la Antártida Occidental. La información más reciente señala que el basamento de estas islas está conformado por la acreción de terrenos que experimentaron metamorfismo durante la actividad tectónica regional desarrollada durante el Mesozoico, dando lugar a facies anfíbolita y esquisto azul (Leat & Riley, 2021; Storey & Granot, 2021; Vaughan & Storey, 2000). Sobre este basamento se han depositado secuencias vulcano-sedimentarias y emplazado intrusivos producto de la subducción (magmatismo de arco y antearco) y post-subducción (magmatismo relacionado a *slab-window*, Smellie et al., 2021) de la placa de Fénix (denominada también como placa Drake o Aluk por Grunow et al., 1992, y Cande et al., 1982, respectivamente) debajo de la placa antártica.

De acuerdo con Bradshaw (1989), hace 105 Ma (Figura 2-3A), una sección de la dorsal que conformaba el margen divergente entre las placas del Pacífico y Fénix colisionó con la fosa en el margen antártico convergente, lo que derivó en la separación de Nueva Zelanda a lo largo de la nueva dorsal formada hace 85 Ma (Figura 2-3B). Se ha determinado que para finales del Cretácico (hace 87-67 Ma) la convergencia entre la placa antártica y la placa Fénix poseía un alto ratio (110-121 mm/a, McCarron & Larter, 1998) y era oblicua (Figura 2-4, flechas rojas) en las zonas de las Islas Shetland del Sur e isla Alexander. Posteriormente, el margen divergente Pacífico-Antártida se extendió hacia el interior de la placa antártica, generando la

denominada placa Bellingshausen (Figura 2-3C), cuyos límites con la placa antártica no se encuentran delimitados con precisión (Cande et al., 1982; McCarron & Larter, 1998). En el Paleógeno ocurrió una rotación de placas en sentido horario (hace 61-53 Ma), lo que causó una convergencia más ortogonal en las islas anteriormente mencionadas (Figura 2-4, flechas azules) y con ello un ratio de convergencia aún mayor (145 mm/a, McCarron & Larter, 1998).

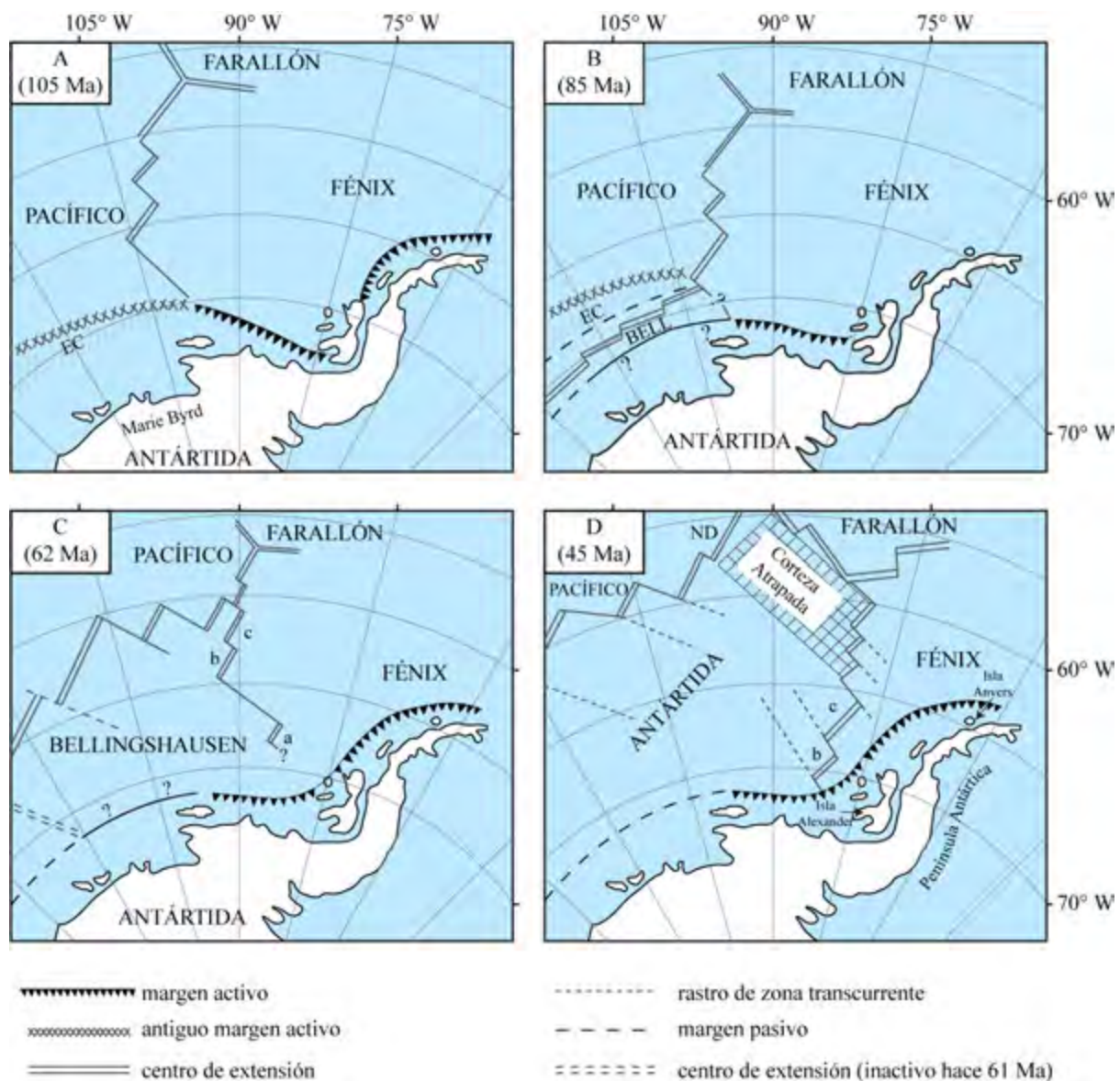


Figura 2-3: Reconstrucción de la evolución tectónica del margen del Pacífico Sureste. Se considera que no ha habido un movimiento relativo entre los bloques de la Antártida Occidental desde hace 105 Ma con base en los datos de paleomagnetismo publicados por DiVenere et al. (1994). BELL: Bellingshausen, EC: Elevación de Chatham (Nueva Zelanda), ND: Nueva dorsal. A, b y c son segmentos de la dorsal Fénix-Antártida. Modificado de McCarron & Larter (1998).

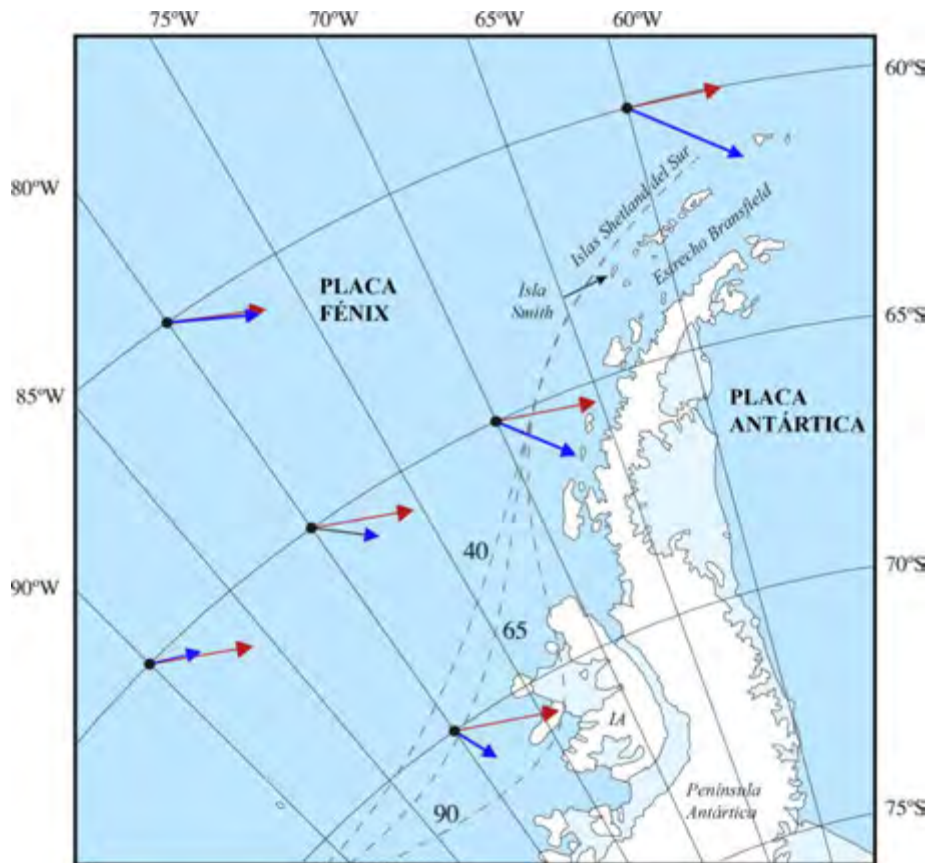


Figura 2-4: Variación de la dirección de esfuerzos en la subducción Fénix-Antártida. Se observa una rotación en sentido horario entre el Cretácico (flechas rojas) y el Paleógeno (flechas azules). El tamaño de las flechas es proporcional a la magnitud del esfuerzo. Las líneas discontinuas indican la posición de la fosa en millones de años. IA: Isla Alexander. Modificado de McCarron & Larter (1998).

Esta dirección de esfuerzos, a diferencia de la magnitud de los mismos, se mantuvo durante el resto del Cenozoico, lo que ocasionó que parte del piso oceánico producido en el antiguo margen extensivo Pacífico-Fénix, junto a la denominada placa Bellingshausen, quedara asimilado en la placa antártica (Figura 2-3D) hace 47 Ma (Cande et al., 1982; Kraus et al., 2010; McCarron & Larter, 1998). Durante el Paleógeno, hace 52 Ma, se registró un descenso abrupto del ratio de divergencia en el margen, reflejado en un menor ratio de convergencia (ambos de 42 mm/a). Esta relajación de esfuerzos provocó un *rollback* en la placa que subducía y una fase extensiva en el arco y antearco (Kraus et al., 2010; McCarron & Larter, 1998). Como evidencia de estos procesos durante dicha época, se encuentran la exhumación de rocas de facies esquisto azul en la isla Smith (Figura 2-4, Grunow et al., 1992), la generación de fallas transcurrentes paralelas al eje de la isla Rey Jorge (Fallas Ezcurra y Collins, Figura 2-5) y el

mayor registro de eventos intrusivos registrados en la isla (Kraus et al., 2010). Finalmente, el magmatismo se detuvo de suroeste a noreste, cuando hace 44 - 40 Ma inició la colisión entre la nueva dorsal Fénix-Antártida (antigua dorsal Bellingshausen-Fénix) con la fosa Fénix-Antártida (Figura 2-3D), lo que produjo el fin de la subducción, así como el de la extensión entre ambas placas (Barker, 1982; Bradshaw, 1989; Jordan et al., 2020; McCarron & Larter, 1998). Sin embargo, en los últimos 4 Ma se ha detectado vulcanismo a lo largo del archipiélago, el cual, al igual que la apertura del estrecho Bransfield hace 1.3 Ma, se debería al desprendimiento y hundimiento gravitacional de una parte de la corteza oceánica que subducía (Barker, 1982; Fisk, 1990; Pankhurst & Smellie, 1983).

La isla Rey Jorge ha sido dividida en cinco bloques tectónicos (Figura 2-5): Barton Horst y los bloques Fildes, Warszawa, Kraków y Melville. Estas unidades tectónicas son el resultado de tres fases principales de deformación, identificadas y descritas por Kraus (2010), las cuales son responsables de la geomorfología actual de la isla.

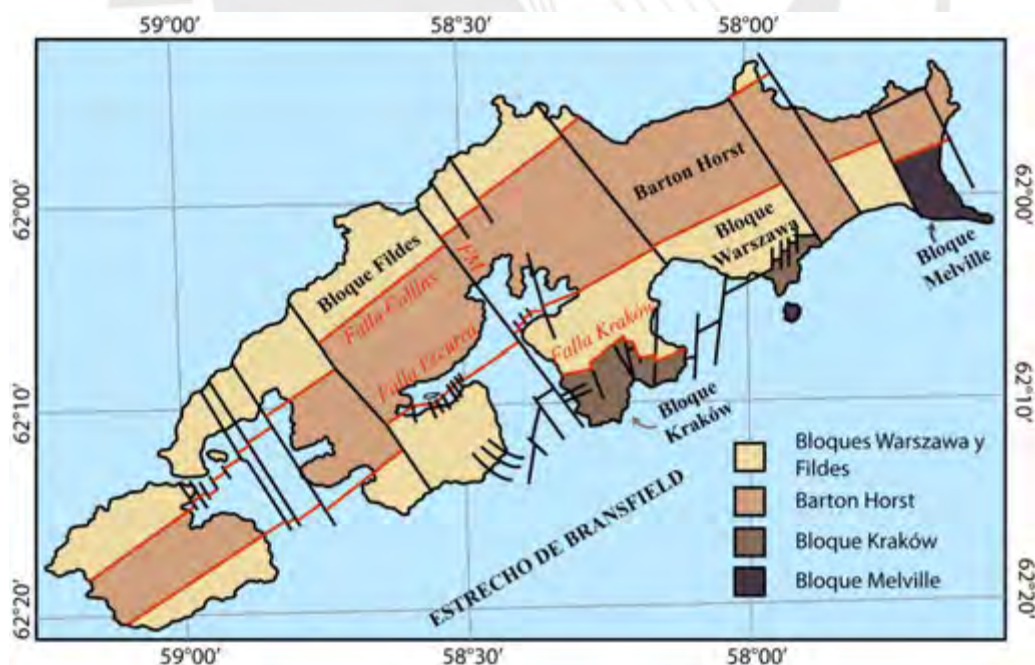


Figura 2-5: Unidades tectónicas de la isla Rey Jorge. FM: Falla Mackellar. Modificado de Kraus (2010).

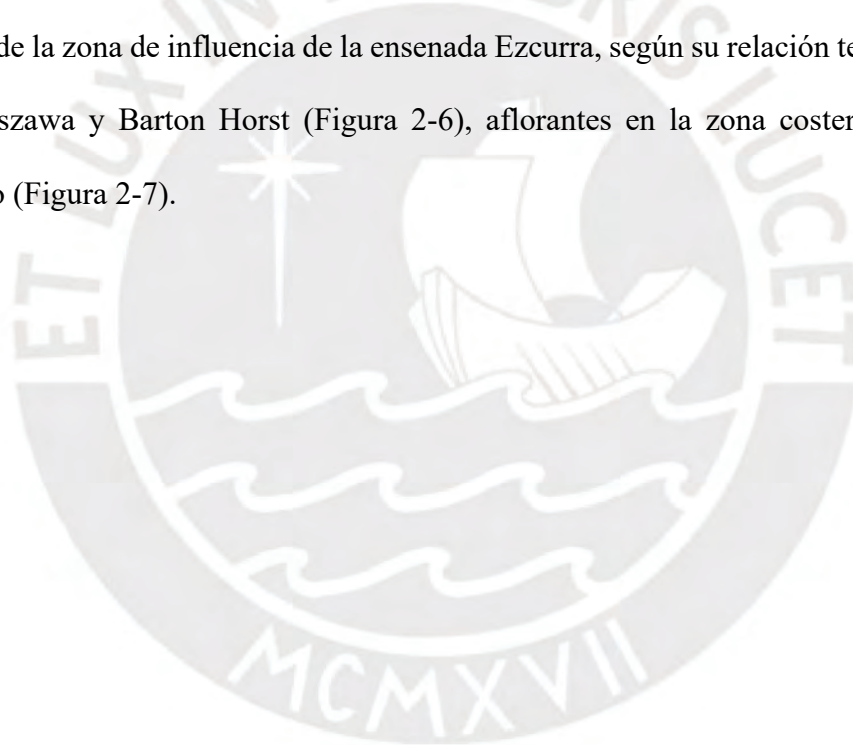
La primera fase corresponde a un régimen transpresional, el cual permitió el desarrollo de las Fallas Ezcurra y Collins, que separaron las rocas más antiguas de Barton Horst (los

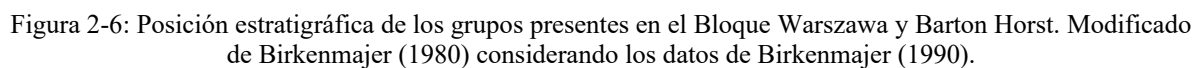
Grupos Ensenada Martel, Caleta Cardozo y Pico Wegger) de las rocas más jóvenes de los Bloques Warszawa (Súper Grupo Isla Rey Jorge) y Fildes (Grupo Península Fildes) (Birkenmajer et al., 1991) durante el Eoceno y Mioceno (entre hace 54 y 21 Ma, Birkenmajer et al., 1986 en Birkenmajer, 1991). Estas fallas se encuentran alineadas con el eje mayor de la isla y son las responsables de la orientación de la ensenada Ezcurra y de la caleta Potter (Kraus et al., 2010). El segundo periodo de deformación está relacionado con la creación de fallas de rumbo que cortaron transversalmente y desplazaron a las formadas durante la fase previa. Esta segunda fase se caracteriza por una mayor cantidad de fallas, las cuales corresponden a un régimen transtensional en el Plioceno Temprano (Birkenmajer, 1982 en Kraus, 2010), entre ellas la Falla Mackellar. La última fase de deformación se caracteriza por un colapso gravitacional en la zona costera adyacente al estrecho Bransfield, la cual afecta a las rocas más jóvenes de la isla: Grupos Dorsal Chopin y Bahía Legru del Bloque Kraków (Birkenmajer et al., 1991). A diferencia de las originadas en las dos fases anteriores, estas fallas no tienen una orientación preferencial definida y se encuentran radialmente distribuidas alrededor del Bloque Kraków (Figura 2-5). Por esta razón se considera que pueden estar relacionadas a la subsidencia durante la apertura del estrecho Bransfield (Kraus et al., 2010), por lo cual se las denomina “sistema de fallas Bransfield”.

2.3. Estratigrafía

La isla Rey Jorge está constituida por secuencias vulcano-sedimentarias, principalmente de afinidad calco-alcalinas y de edad desde Cretácica a Cuaternaria. Estas secuencias están atravesadas por intrusiones hipabisales (plutones y diques de composición basáltica a andesítica), producto del magmatismo de arco de isla que se desarrolló desde el Jurásico hasta el Plioceno (Birkenmajer, 1980, 1989; Kraus et al., 2010). A pesar de que más del 90% de la superficie está cubierta por diversas estructuras glaciares, autores como Hawkes (1961), Barton (1965) y Smellie (1984) han podido estudiar los escasos afloramientos y clasificarlos en grupos

y formaciones. La información obtenida por dichos autores ha sido recopilada, complementada, organizada y actualizada por Birkenmajer (véase Birkenmajer, 1980, 2002, 2003; Birkenmajer et al., 1986; Birkenmajer et al., 1991), quien propuso una secuencia estratigráfica preliminar basada en observaciones de campo y en dataciones K-Ar. Si bien trabajos posteriores, como las dataciones Rb-Sr de Kawashita y Soliani (1988) o U-Pb de Pańczyk et al. (2009), han permitido corregir la edad y posición estratigráfica de algunas formaciones, aún existe discrepancia sobre una secuencia estratigráfica completa de la isla (Kraus et al., 2010), debido a posibles interferencias en las edades K-Ar por eventos magmáticos (Smellie et al., 1984) o tectónicos termales (Soliani & Bonhomme, 1994). Por esta razón, se presentarán las formaciones de la zona de influencia de la ensenada Ezcurra, según su relación temporal en los bloques Warszawa y Barton Horst (Figura 2-6), aflorantes en la zona costera de la bahía Almirantazgo (Figura 2-7).





2.3.1. Barton Horst

La unidad más antigua corresponde al Grupo Ensenada Martel, el cual consiste en depósitos estratovolcánicos de lavas de composición basáltica a andesítica (raramente riolítica o dacítica) alternadas con aglomerados y tobas que en conjunto poseen más de 1100 m de potencia y contienen fragmentos silicificados de madera (Birkenmajer, 1980, 1989; Birkenmajer et al., 1991). Este grupo pertenece al Cretácico Superior – Paleoceno temprano (Birkenmajer et al., 1986 en Birkenmajer 1986); sin embargo, las edades obtenidas mediante dataciones K-Ar muestran un amplio rango de edad, lo que al igual que las alteraciones de carbonatización, epidotización y piritización, ha sido atribuido al magmatismo generador de intrusiones posteriores (Birkenmajer, 1980; Birkenmajer et al., 1991; Hawkes, 1961; Smellie et al., 1984). La mineralización de piritita (diseminada y en vetillas/venillas) alcanza su mayor intensidad en la península Keller y, así como las otras alteraciones, se debe a las Intrusiones Andinas del Grupo Wegger (Barton, 1965; Hawkes, 1961). Este grupo aflora principalmente al noreste de la Falla Mackellar, encontrándose exclusivamente en la unidad tectónica Barton Horst (Figura 2-7, Birkenmajer, 1989, 2002).

El Grupo Caleta Cardozo está conformado por más de 500 m de lavas de composición basáltica a andesítica basáltica con intercalaciones finas de toba y aglomerados que datan del Paleoceno. Este grupo incluye fragmentos de madera silicificada, pero en menor proporción que el Grupo Ensenada Martel (Birkenmajer, 1980, 1989). Las andesitas presentan una coloración verdosa en los niveles medios e inferiores del grupo, debido a que han sufrido alteraciones (cloritización, carbonatización, piritización, epidotización y serpentización), la cual se torna más intensa cerca de las intrusiones del Grupo Pico Wegger (Birkenmajer, 1980, 1989; Hawkes, 1961; Soliani & Bonhomme, 1994), que las atraviesa. Se observa plegamiento de este grupo, cuya intensidad aumenta en las inmediaciones de la Falla Ezcurra (Figura 2-5), lo que causa una disconformidad angular con el suprayacente Grupo Isla Dufaley al norte de

la ensenada Ezcurra (Birkenmajer, 1989; Kraus et al., 2010). Este grupo aflora exclusivamente en la unidad tectónica Barton Horst, específicamente en la colina Noel (península Barton al oeste de la caleta Potter, Figuras 2-1 y 2-2) y en el bloque occidental de la Falla Mackellar (Figura 2-7, Birkenmajer et al., 1991).

El Grupo Isla Dufaley data del Eoceno temprano (Soliani & Bonhomme, 1994) y es parte de la Súper Unidad Isla Rey Jorge, encontrándose en discordancia angular sobre el Grupo Caleta Cardozo. Su base está conformada por lavas andesíticas, las cuales se tornan más basálticas hacia el techo y están intercaladas con aglomerados, conglomerados y areniscas. (Birkenmajer, 1980, 1989). Estas secuencias presentan alteración a clorita, cuarzo secundario - sericita (que reemplazan de forma irregular a los minerales preexistentes) y pirita - leucoxeno diseminados en las rocas. Se ha identificado su afloramiento en la ensenada Ezcurra y en la isla Dufaley (Figura 2-7), donde se ha reportado restos de plantas en las tobas (Barton, 1965).

Los grupos anteriormente descritos fueron intruidos por plutones, stocks y diques hipabisales calcoalcalinos de cuarzo-gabros, cuarzo-dioritas, dioritas y granodioritas (Kraus et al., 2010), descritos como una Suite de Intrusiones Andinas por Hawkes (1961) y Barton (1965), y denominadas como Grupo Pico Wegger (Figura 2-6) por Birkenmajer (1980). Estas intrusiones hipabisales se emplazaron entre el Paleoceno Tardío y el Eoceno (Smellie et al., 1984; Soliani & Bonhomme, 1994), están dispuestas (sub) verticalmente (ya sea aisladas o como enjambres de disposición paralela) y se encuentran desplazadas por fallas transversales (Birkenmajer, 1980). La característica más resaltante de este grupo es su intensa epidotización y piritización (diseminada en las andesitas) a causa de su contacto con las lavas de las formaciones que intruye. Este grupo aflora en las penínsulas Barton, Fildes y Keller, así como en punta Crepín y colina Noel (Figura 2-7, Barton, 1965; Birkenmajer, 1980, 1989; Kraus et al., 2010).

2.3.2. Bloque Warszawa

En esta unidad tectónica afloran las rocas de los grupos de la Súper Unidad Isla Rey Jorge (Figura 2-7), con excepción del Grupo Isla Dufale (anteriormente descrito): Grupos Caleta Paraíso, Glaciar Baranowski, Ensenada Ezcurra y Punta Hennequin; los cuales datan del Cretácico Superior al Eoceno (Nawrocki et al., 2010). El Grupo Caleta Paraíso es la unidad más antigua encontrada en este bloque y está conformado por lavas basálticas, lutitas rojas, aglomerados y conglomerados con madera petrificada. Aflora exclusivamente en las costas sur y este de la península Warszawa Icefield (Birkenmajer, 1980; Birkenmajer et al., 1991). El Grupo Glaciar Baranowski está compuesto por intercalaciones de lavas de composición andesítica basáltica y tobas que contienen restos de plantas. Esta unidad aflora en la costa sur de la ensenada Ezcurra (Birkenmajer, 1989; Birkenmajer et al., 1991). El Grupo Ensenada Ezcurra está compuesto por lavas y depósitos piroclásticos de composición andesítica a andesítica-basáltica con una matriz que contiene magnetita y vidrio intersticial, así como vesículas y venillas de calcedonia, cuarzo, jaspe y zeolitas (Barton, 1965). Este grupo se subdivide en la Formación Caleta Arctowski (flujos de basaltos y andesitas intercalados con brechas y tobas rojizas, cubiertos por paleocanales rellenos de lutitas, tobas, areniscas y conglomerados que contienen restos vegetales y lignito) y la Formación Punta Thomas (intercalaciones de lavas y piroclastos de composición andesítica a basáltica), las cuales se encuentran separadas por una discontinuidad (Barton, 1965; Birkenmajer, 1980, 1989; Birkenmajer et al., 1991; Mozer, 2013). El Grupo Ensenada Ezcurra aflora en la caleta Potter y en la costa sur de la ensenada Ezcurra (Figura 2-7), al sureste de la falla con el mismo nombre (Barton, 1965; Nawrocki et al., 2010). Finalmente, el Grupo Punta Hennequin aflora al norte del Krakow Icefield (costa sur de la ensenada Martel, Figura 2-2) como se muestra en la Figura 2-7 (Barton, 1965; Birkenmajer, 2002) y está conformado por (traqui)andesitas, cuyas vesículas han sido rellenadas por cuarzo, calcedonia, jaspe y zeolitas (Barton, 1965;

Birkenmajer, 1989). Birkenmajer (1980) propone que el hiato observado en bahía Almirantazgo entre los Grupos Ensenada Ezcurra y Punta Hennequin podría corresponder a la ausencia del Grupo Glaciar Polonia (rocas volcánicas y volcanoclásticas), el cual aflora en la bahía Rey Jorge (Figura 2-1).

Las intrusiones del Grupo Bahía Almirantazgo intruyen a la Súper Unidad Isla Rey Jorge y a los Grupos Caleta Cardozo y Ensenada Martel (Figura 2-6, Birkenmajer, 1980; Hawkes, 1961); sin embargo, no se ha reportado epidotización, albitización ni piritización asociada. Este grupo data del Oligoceno (Nawrocki et al., 2010) y aflora en la península Warszawa Icefield y en la costa este de Krakow Icefield, como se muestra en la Figura 2-7 (Kraus et al., 2010). Ha sido dividido en cinco unidades (Birkenmajer, 2003 en Kraus, 2010): colina Esfinge (diques riolacíticos y riolíticos altamente alterados que contienen xenolitos de composición andesítica en su interior), dorsal Panorama (enjambre de diques de composición basáltica a andesítica alterados, que se entrecruzan), punta Jardín (intrusiones de composición andesítica a basáltica), colina Jersak (diques andesíticos a basálticos de grano fino con geodas en su interior) y caleta Hervé (intrusiones de composición basáltica a andesítica con geodas cerca de los bordes de contacto con la roca caja). Estas intrusiones se emplazaron desde hace 41 Ma (Soliani & Bonhomme, 1994) hasta hace 27 Ma (Pańczyk et al., 2009) durante la apertura del Pasaje Drake, causando las interferencias anteriormente mencionadas en las edades K-Ar de los grupos que intruye (Birkenmajer, 1989; Soliani & Bonhomme, 1994).

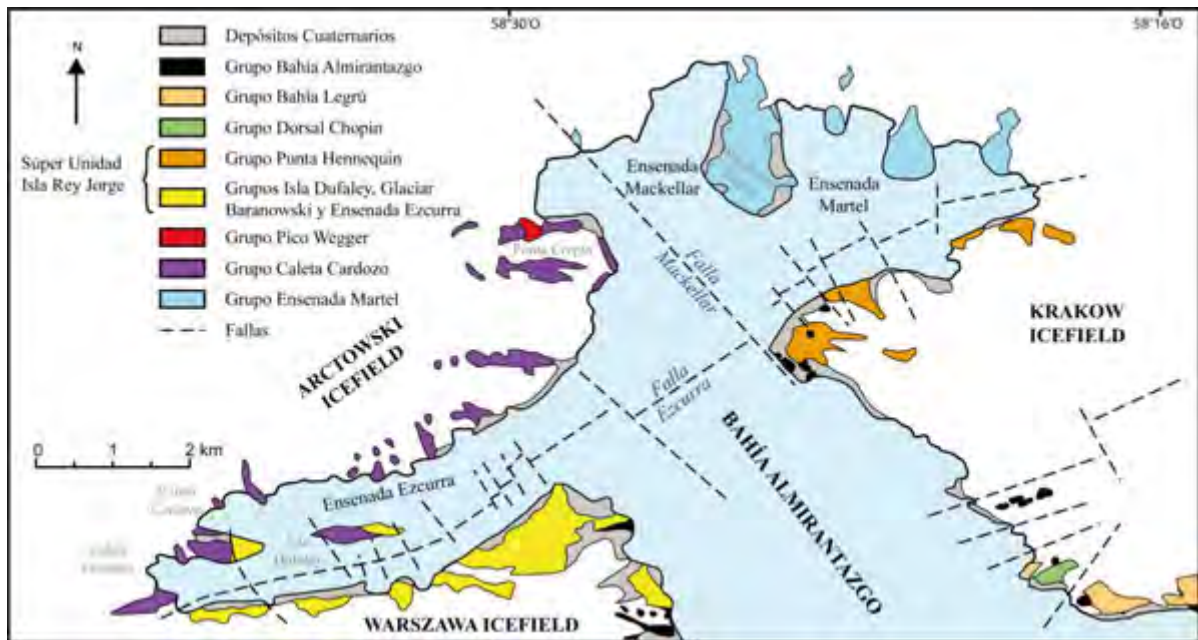


Figura 2-7: Afloramientos en la bahía Almirantazgo según los grupos identificados. Modificado de Soliani & Bonhomme (1994).

3. Metodología

3.1. Muestreo en campo

El muestreo en campo se llevó a cabo en el mes de febrero de 2020, durante la segunda parte de la campaña científica peruana ANTAR XXVII, teniendo como base de trabajo el buque de investigación científica BAP Carrasco de la Marina de Guerra del Perú. Para lograr identificar el efecto del DAR se establecieron tres estaciones de muestreo en la ensenada Ezcurra (AC) y un punto de control en bahía Esperanza (BE, extremo NE de la península antártica, Figura 2-1), cuyos datos se encuentran en la Tabla 8-1. El muestreo se realizó, específicamente, los días 2 (AC3), 3 (BE) y 5 (AC1 y AC2) de febrero bajo condiciones de mar calmo, lo que permitió poco o nulo desplazamiento horizontal de los instrumentos respecto al barco durante las maniobras (Figura 3-1A).

3.1.1. Muestreo de agua

El BAP Carrasco cuenta con una roseta de muestreo de agua, equipada con 24 botellas Niskin de 5 litros y una sonda CTDO (sensor de conductividad eléctrica, temperatura, presión y oxígeno) en el hangar CTD del buque (Figura 3-1B). En cada estación se determinaron los niveles a muestrear según los quiebres observados en los perfiles de los distintos parámetros generados por la sonda CTDO durante el descenso de la roseta. La obtención de las muestras se realizó durante el ascenso de esta, accionando desde el buque el sistema de cierre de las botellas a la profundidad deseada. Las excepciones fueron las muestras conseguidas a 0 (AC1 y AC3) y 6 (AC1) metros de profundidad, que se adquirieron mediante un balde y el grifo del laboratorio, respectivamente. Esto se debe a que las botellas Niskin eran limitadas y se compartían con otros proyectos, por lo que se buscó maximizar el número de muestras, con el fin de elaborar un perfil más completo.

Una vez la roseta regresó a superficie, se procedió a tomar alícuotas con jeringas de plástico de 60 ml desde la parte superior de las botellas (Figura 3-1C), previa purga con la misma agua a muestrear. Las primeras alícuotas de agua se vertieron en vasos plásticos de 15 ml para medir inmediatamente pH, potencial redox (Eh) y temperatura. Estas mediciones se realizaron en el laboratorio húmedo de la embarcación con un pH-metro portátil WTW 330i equipado con electrodos de Ag/AgCl. Posteriormente, se acopló un filtro de 0.2 μm a la boca de la jeringa para llenar dos frascos de PVC de 60 ml. Estas muestras se destinaron al análisis de cationes (previa acidificación usando cinco gotas de ácido nítrico) y aniones disueltos, por lo que se mantuvieron refrigeradas a 1 y -20°C, respectivamente.

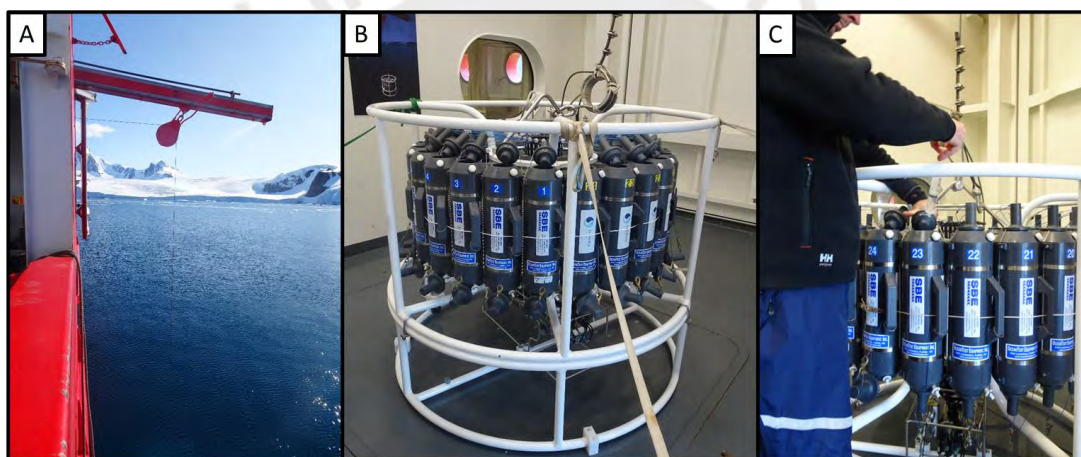


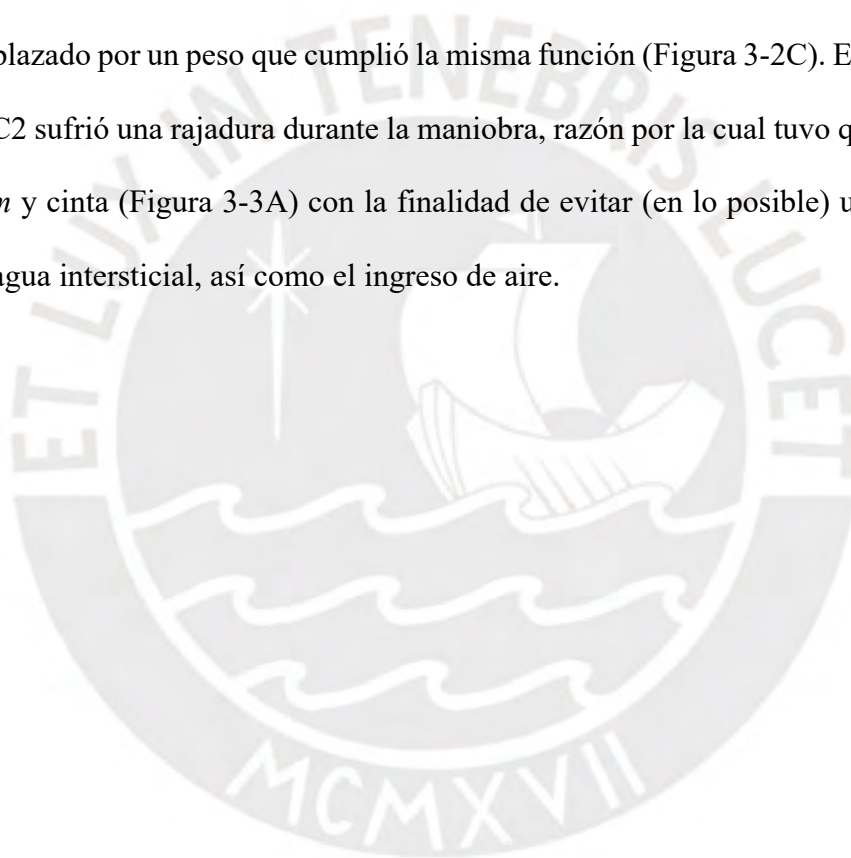
Figura 3-1: (A) Confirmación de la verticalidad de la roseta con botellas Niskin. (B) Roseta con 24 botellas Niskin y sonda CTDO utilizada para el muestreo. (C) Extracción de agua desde la parte superior de las botellas Niskin.

En el caso de las muestras obtenidas en bahía Esperanza, debido a que este proyecto no tenía prioridad frente a otros desarrollados en la zona, la poca cantidad de agua restante en las botellas no permitió el muestreo anteriormente detallado. Por ello, se tomaron muestras de aproximadamente 200 ml con matraces Erlenmeyer plásticos empleando la válvula inferior de las botellas Niskin. El agua de las muestras adquiridas a 0 y 6 metros de profundidad también se colocó en un matraz antes de proceder con las mediciones y muestreo, según lo detallado anteriormente. Cabe resaltar que las jeringas y los filtros fueron únicos por muestra con el fin de evitar contaminación cruzada, mientras que los vasos plásticos para medir pH, Eh y

temperatura se limpiaron con agua destilada entre cada muestra. La calibración del pH-metro se realizó antes de las mediciones en cada estación.

3.1.2. Muestreo en el sedimento

Para la obtención de los testigos de sedimento, de los cuales se recolectaron muestras tanto de sedimento como de agua intersticial, se empleó el *Piston Corer* disponible en el buque (Figura 3-2) y se procedió de acuerdo con su protocolo de armado y operación (véase Jesus, 2018). El liberador del sistema no fue recuperado durante la primera maniobra (AC3), por lo que fue reemplazado por un peso que cumplió la misma función (Figura 3-2C). El tubo de PVC del testigo AC2 sufrió una rajadura durante la maniobra, razón por la cual tuvo que ser forrado con papel *film* y cinta (Figura 3-3A) con la finalidad de evitar (en lo posible) una pérdida de sedimento y agua intersticial, así como el ingreso de aire.



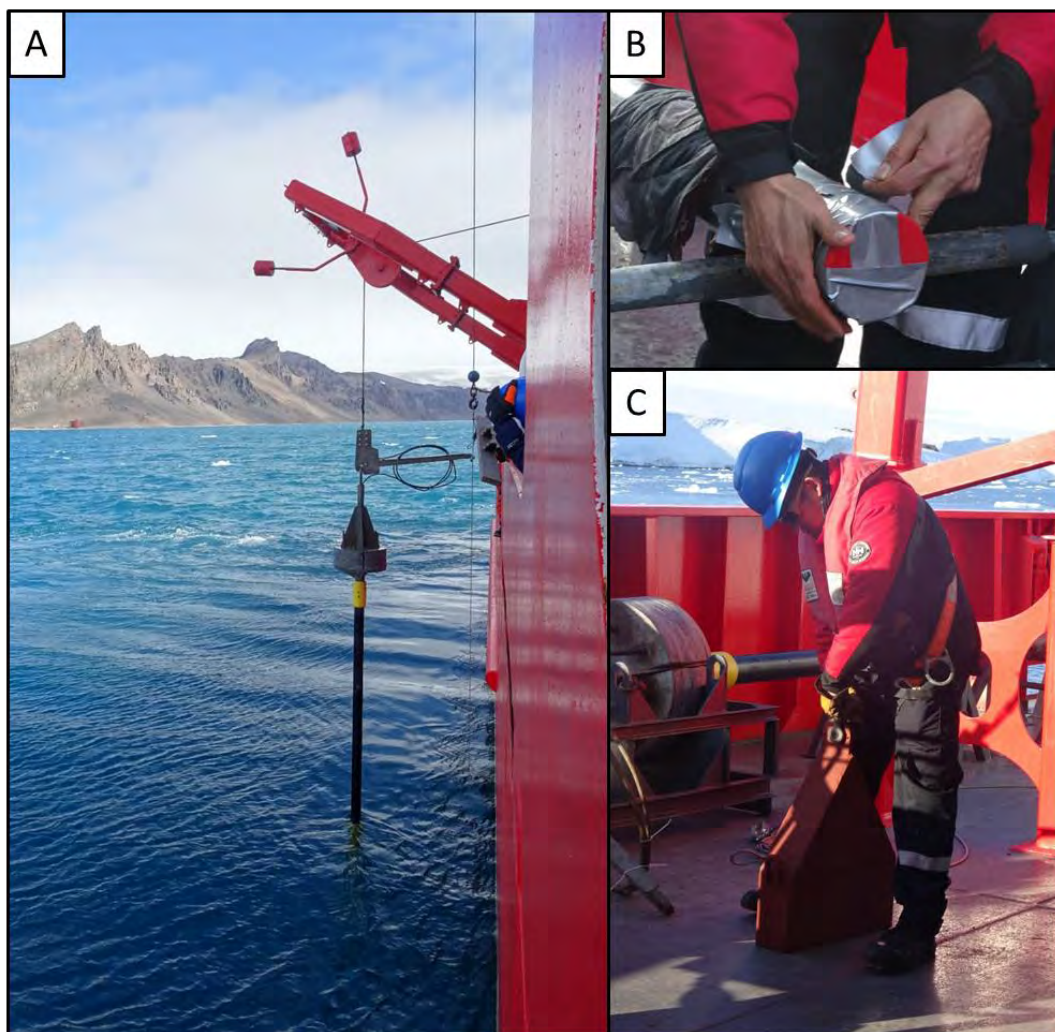


Figura 3-2: (A) Descenso del *Piston Corer* utilizado durante la expedición. (B) Recuperación, tapado y sellado del testigo. (C) Peso empleado como reemplazo del liberador.

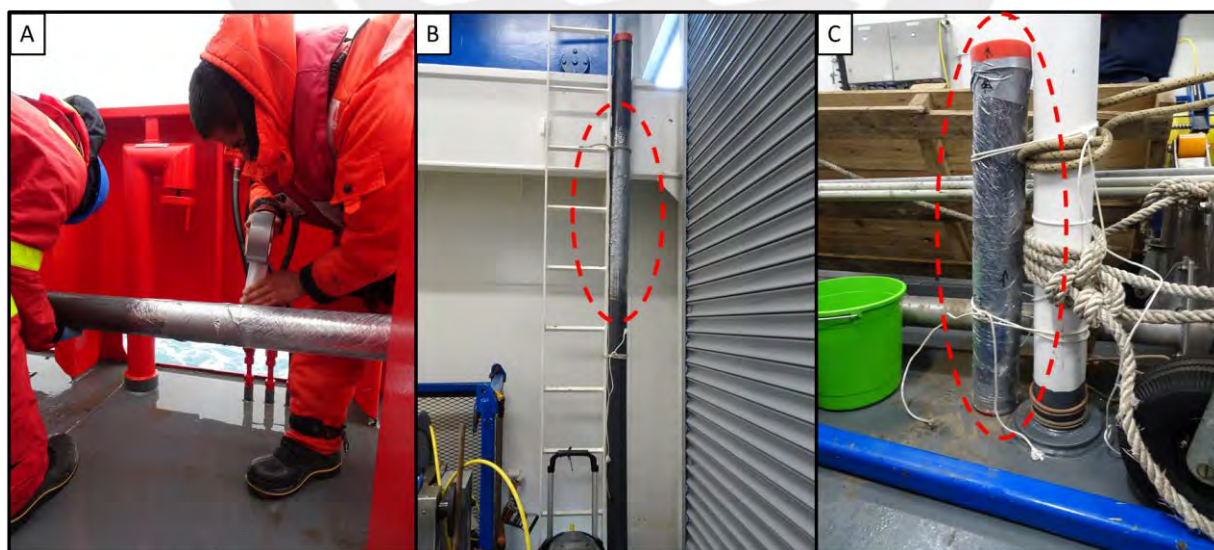


Figura 3-3: (A) Forrado con papel *film* y aseguramiento con cinta industrial en el corte. (B) y (C) Debido a que la longitud recuperada superó los 3 m, el contenido del testigo ocupó dos tubos, los cuales fueron almacenados en la cubierta de popa. En rojo se señala el tramo cubierto con papel *film*.

Previo al muestreo del contenido del testigo, se le dejó reposando en la cubierta de popa (Figura 3-4A), por un lapso de 24 horas, con el fin de lograr la sedimentación de las partículas en suspensión. Cabe resaltar que el testigo AC3 fue refrigerado a 1°C, procedimiento que no se replicó en los testigos AC1 y AC2, debido a que la cubierta se encontraba aproximadamente a dicha temperatura. Transcurrido el tiempo mencionado, se procedió a perforar el tubo PVC de 10 cm de diámetro con un taladro portátil, con la finalidad de obtener muestras de la columna de agua a 1 y 100 cm del sedimento, empleando una jeringa de 60 ml (Figura 3-4B). Esto se realizó con el fin de completar dos datos de la columna de agua ya que, por motivos de seguridad, la roseta debe mantener algunos metros de distancia del fondo marino. Posteriormente, se extrajo el agua suprayacente restante. El excedente del tubo PVC se cortó con una cierra manual (Figura 3-4C), tras lo cual se volvió a sellar.

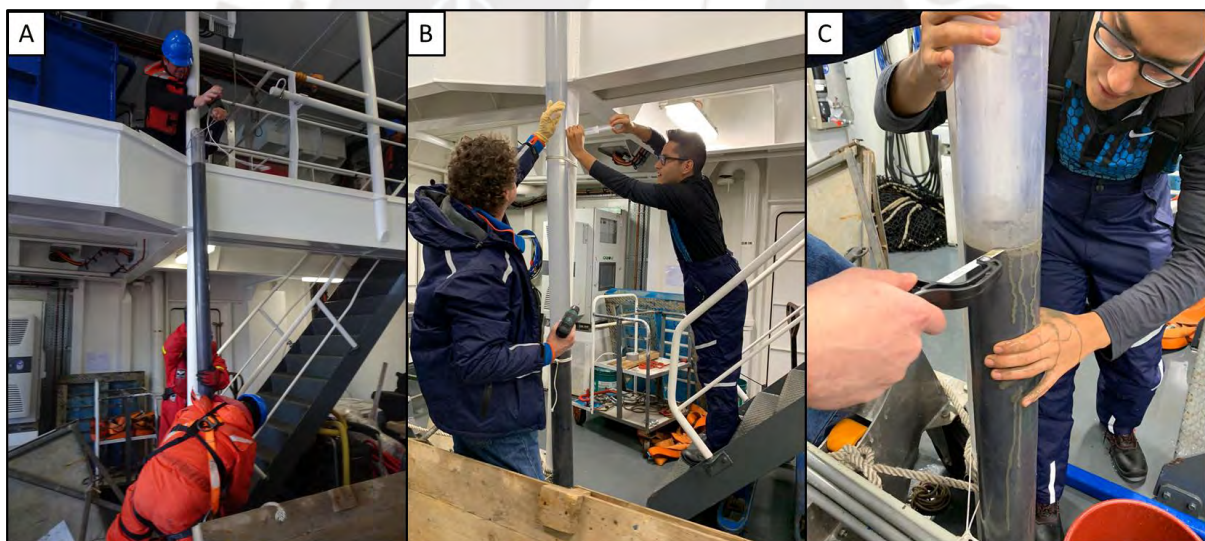


Figura 3-4: (A) Aseguramiento del testigo AC3 en un poste para su sedimentación. (B) Muestreo del agua a 100 cm de la interfaz sedimento-agua mediante el uso de una jeringa. (C) Desagado y corte del tubo de PVC.

Para la obtención del agua de poros se realizaron perforaciones perpendiculares a la superficie del tubo de PVC (Figura 3-5A) y se colocó un rhizon en cada una de ellas (Figura 3-5B), según el esquema presentado en la Figura 3-6. El rhizon consta de un cuerpo de 5 cm de largo, elaborado de un polímero microporoso (con poros de 0.12 a 0.18 μm de diámetro), el cual es usado para muestrear el agua intersticial en sedimento marino o de la zona no saturada

en agua subterránea (Kölling et al., 2004). Si bien este sistema permite un muestreo de alta resolución, su desventaja radica en el tiempo necesario para obtener las muestras. Así, con el propósito de acelerar el proceso y maximizar la cantidad de agua extraída, se utilizaron jeringas de 20 ml para crear y mantener un vacío con la ayuda de una varilla de madera (Figura 3-5C). En algunos niveles la succión generada se perdía, especialmente en aquellos donde el sedimento contenía mucho aire en sus poros por el contenido de gravilla; o cuando algún *dropstone* o litoclasto dificultaba la acción del rhizon, motivo por el cual se monitorearon las jeringas para reestablecer el vacío.

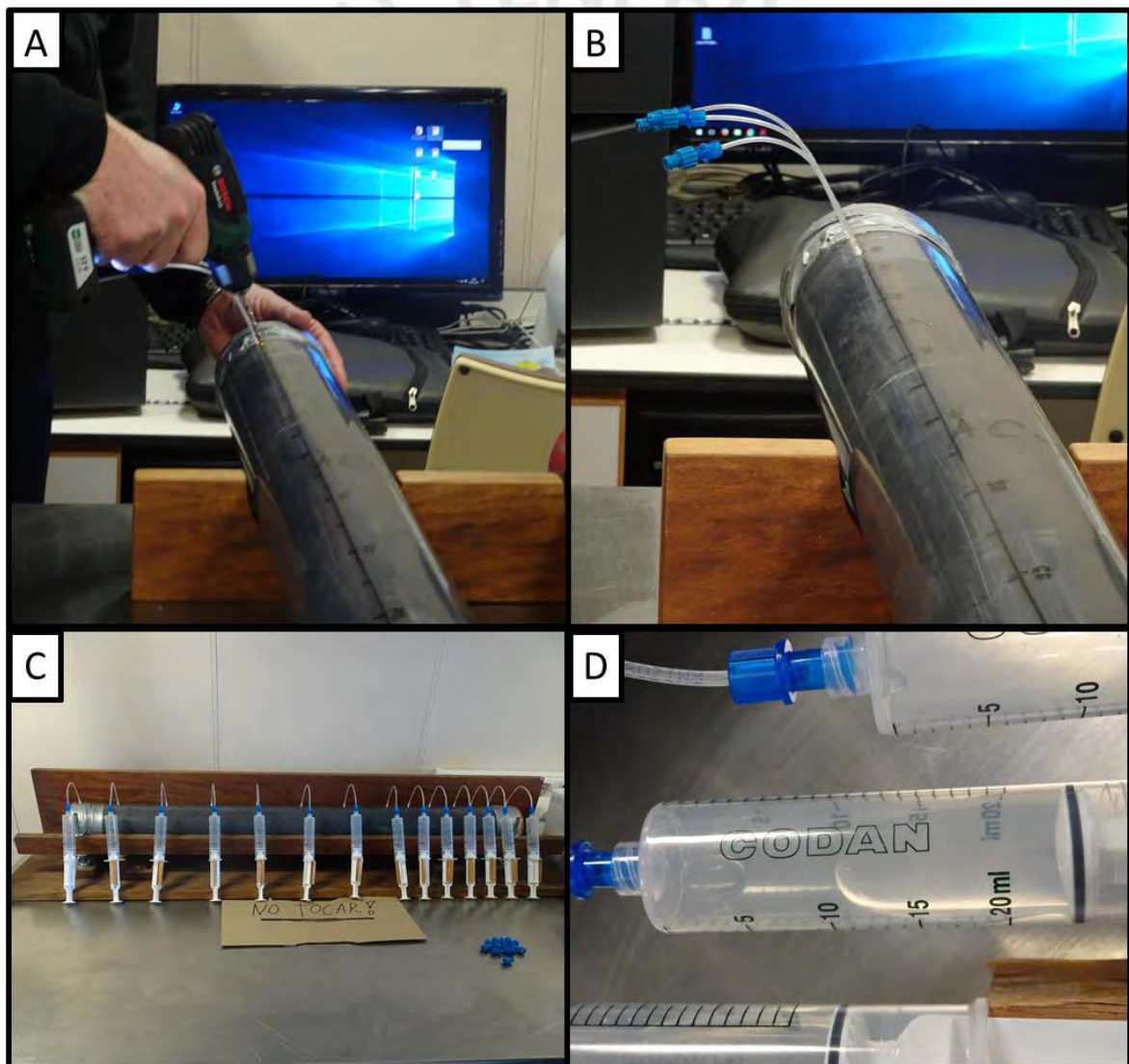


Figura 3-5: (A) Perforación del testigo según el modelo de la Figura 3-6. (B) Sistema rhizon para la obtención del agua de poros. (C) Testigo AC2 con las jeringas y los rhizons insertados extrayendo el agua intersticial. (D) Ejemplo del agua obtenida.

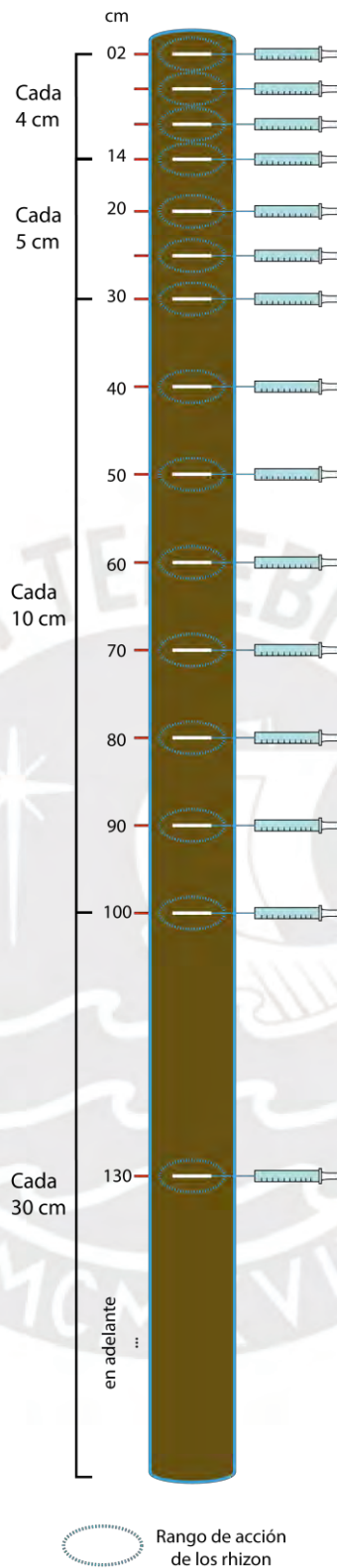


Figura 3-6: Esquema de niveles de muestreo de agua de poros. Debido a que los niveles más superficiales se encuentran influenciados por procesos biológicos y sedimentarios se buscó una mayor resolución en los primeros centímetros. Cada rhizon tiene un radio de acción de 2 cm, motivo por el cual el mínimo espaciamiento entre ellos es de 4 cm. El tramo de muestreo cada 5 cm se extendió hasta los 100 cm en AC1 y los 50 cm en AC2.

A pesar del esfuerzo realizado, se logró extraer un volumen variable de agua en cada punto, por lo cual se priorizaron los análisis de cationes (7 ml), luego los de aniones (15 ml, o 7 ml en su defecto) y, por último, la medición de pH y Eh (1 o 2 ml). Gracias al tamaño de los poros del rhizon, el agua obtenida no tuvo que ser filtrada a menos de 0.2 μm ; sin embargo, las últimas muestras de AC1 presentaron una coloración amarillenta (ver Tabla 8-3), motivo por el cual se decidió emplear el mismo filtro empleado en el muestreo de agua en la columna. Los recipientes destinados al análisis de aniones se llenaron en su totalidad, con la finalidad de evitar el ingreso de aire y se almacenaron a -20°C . Por otro lado, a los recipientes destinados al análisis de cationes se les agregaron 2 gotas de ácido nítrico, con el propósito de mantener los cationes en solución, y fueron refrigerados a 1°C . El almacenamiento se realizó en el laboratorio oceanográfico del buque.



Figura 3-7: Medición de pH y Eh del agua de poros. Se realizó en recipientes de 7 ml, volumen mínimo necesario para cubrir el sensor.

Posterior a la obtención del agua de poros, los orificios generados en el proceso fueron sellados con cinta, para luego proceder al corte a lo largo del testigo, empleando una sierra eléctrica (Figura 3-8). Se dispuso de paletas de plástico y cucharillas de acero inoxidable para la obtención de muestras de sedimento (Figura 3-9A), destinadas a análisis microbiológicos, mineralógicos y geoquímicos, de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 3-10. Cabe mencionar que se mantuvo una distancia de 1 cm con el borde del tubo de PVC y se desinfectaron los instrumentos para evitar contaminación cruzada, ya sea por arrastre de material desde otros niveles o a causa de impurezas del tubo mismo. En el AC3 (primero en ser muestreado) las muestras se obtuvieron haciendo uso de jeringas de 5 ml; sin embargo, estas fueron reemplazadas por cucharillas de metal en el muestreo de los otros testigos debido a que las jeringas no mantenían la succión necesaria para la extracción del sedimento. En el testigo adquirido en bahía Esperanza solo se obtuvo una muestra (Tabla 8-4), debido a que este proyecto no contaba con prioridad en dicha estación.

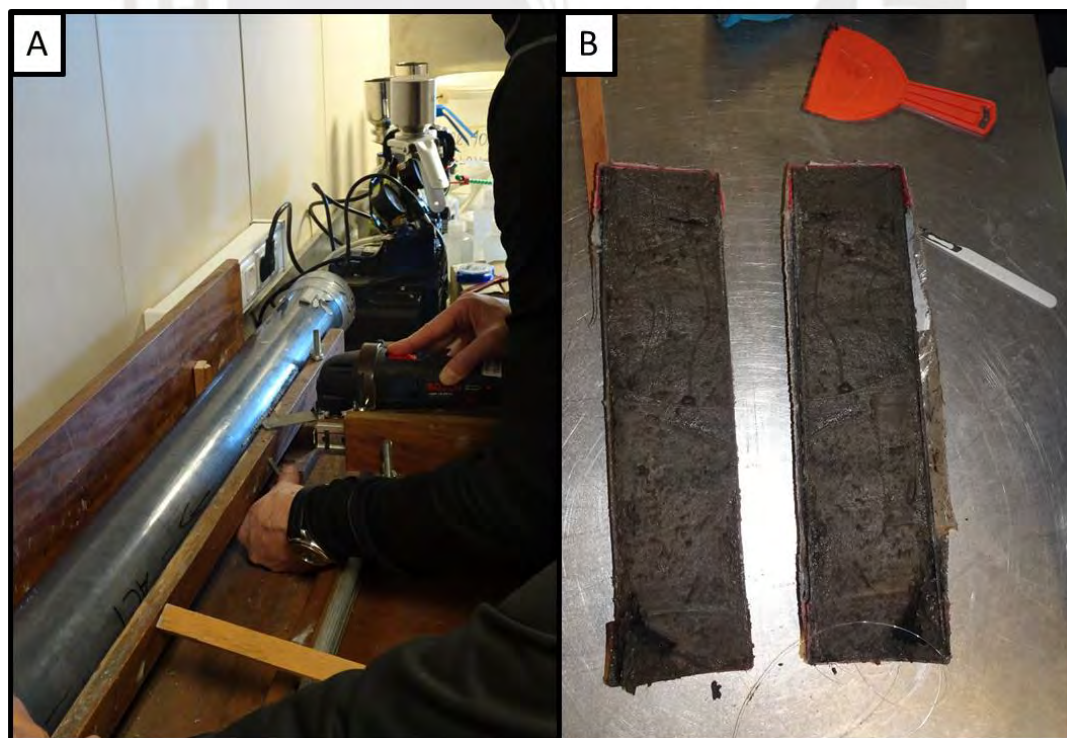


Figura 3-8: (A) Corte del testigo empleando una sierra eléctrica. En el corte final se empleó un bisturí con el objetivo de evitar contaminación a causa de la sierra. (B) Testigo AC3 cortado y separado con la ayuda de paletas de plástico e hilo de pescar.

Las muestras destinadas a análisis microbiológicos y geoquímicos tuvieron un volumen de 15 ml y se almacenaron congeladas a -70°C en tubos Falcon (Figura 3-9B) en el laboratorio de geología del buque, con el propósito de conservar el material genético de las bacterias. Por otro lado, aquellas con fines mineralógicos se colocaron en una placa petri para su secado en un horno a 40°C por 36 horas (Figura 3-9C), para evitar su alteración debido al oxígeno y al agua. Posteriormente, los grumos en el sedimento fueron disgregados (Figura 3-9D) mediante el uso de una paleta de plástico. Los clastos con diámetro mayor a 1 cm fueron separados y ambas fracciones fueron empaquetadas en bolsas con cierre hermético. Finalmente, se realizó una descripción visual de la granulometría, mineralogía, estructuras y contenido de materia orgánica de cada testigo.

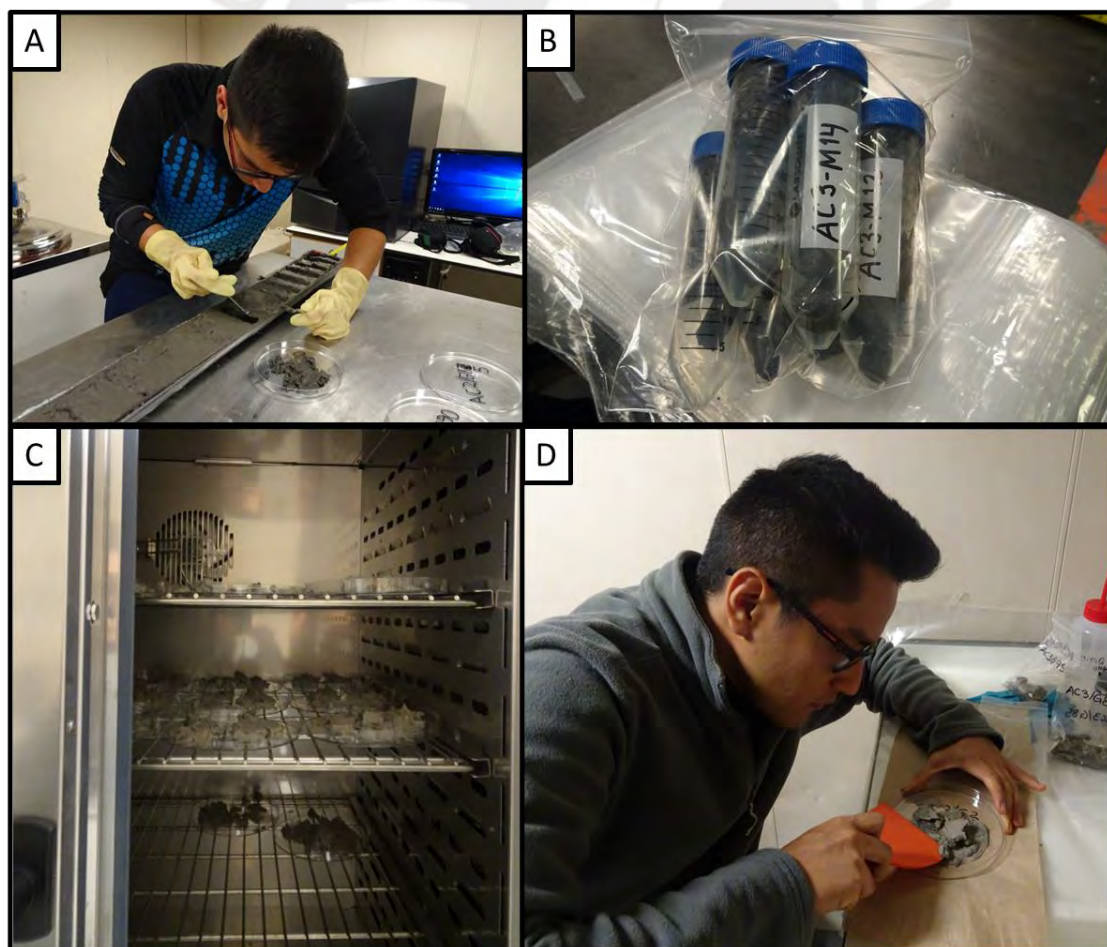


Figura 3-9: (A) Muestreo de sedimentos en el testigo AC2 según el esquema mostrado en la Figura 3-10. (B) Muestras almacenadas en tubos Falcon para su posterior congelamiento. (C) Secado de las muestras destinadas a análisis mineralógicos. (D) Separación de clastos antes del empaquetado.

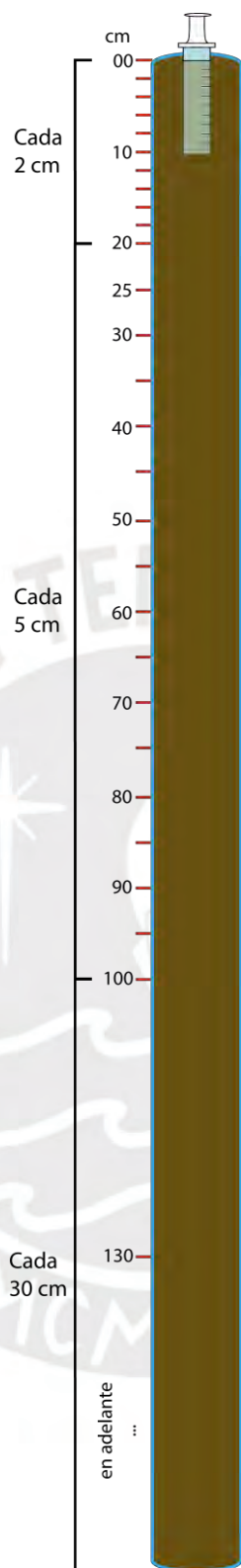


Figura 3-10: Esquema de niveles de muestreo del sedimento. Debido a que los niveles más superficiales aún se encuentran influenciados tanto por procesos biológicos como sedimentarios, se buscó una mayor resolución en los primeros 20 cm. Así, se muestrearon horizontes completos de 2 cm (aproximadamente 25 g) para los análisis mineralógicos y de 1 cm (15 ml) para los análisis microbiológicos y geoquímicos. Los primeros 10 cm también se muestrearon con una jeringa de 60 ml y se congelaron a -20°C para mantener las texturas y analizarlas posteriormente.

3.2. Preparación de muestras

La preparación de las muestras se llevó a cabo con los equipos e instrumentos disponibles en el laboratorio QEMSCAN de la PUCP ubicado en la Sección de Minas. Primero, se procedió a la eliminación de los grumos que se formaron durante el secado. Con este fin, y para evitar la contaminación, se esparció la muestra sobre un plástico, se cubrió con el mismo y, empleando un rodillo de acero, se generó presión con el cuidado necesario para evitar la fragmentación de los litoclastos presentes. Con base en la descripción visual de los testigos realizada durante el muestreo, se eligió tamizar la muestra por debajo de la malla #20 (850 μm) con el objetivo de separar los granos con tamaño superior al de arenas muy gruesas. Mientras que la fracción más gruesa se almacenó en viales, la fracción más fina se cuarteó utilizando los cuarteadores rotatorios y micro rotatorios, hasta obtener 5 gramos de muestra, combinando recipientes diametralmente opuestos. Tras ello, la fracción restante se almacenó en bolsas con cierre hermético (Figura 3-11B) para que pueda disponerse en posteriores estudios.

Las muestras del testigo AC1 obtenidas a una profundidad mayor a los 90 cm presentó un mayor contenido de arena. Esto causó segregación de los clastos más gruesos en la base de los *cups* durante la mezcla con la resina y el endurecedor (Figura 3-12C) en el proceso de elaboración de las láminas. Con el objetivo de no perder información con respecto a las otras muestras, se añadió la malla # 200 (75 μm) al proceso de tamizaje. Así, se creó una fracción intermedia compuesta por arenas muy finas a gruesas, mientras que la fracción fina se compuso de granos de tamaño limo y arcilla.

Posteriormente, en un vaso de plástico y con la ayuda de una paleta de madera, se preparó y homogenizó una mezcla de resina epoxi con endurecedor manteniendo una proporción de 7 a 1 (Figura 3-11A). Ésta fue introducida en una cámara de baja presión durante 15 minutos para la extracción de las burbujas de aire que pudieron haberse formado en el proceso; después,

se mezcló y homogenizó en un *cup* de plástico con los 5 gramos de muestra obtenidos en el paso previo, en una relación de 1 a 1 (Figura 3-12C). El producto se volvió a someter a baja presión, de forma controlada por otros 15 minutos y, a continuación, se introdujo en una cámara a 2 bar por aproximadamente 15 horas, con el objetivo de eliminar burbujas. Transcurrido este tiempo se limpiaron los bordes del *cup* con un punzón, se etiquetaron las muestras y se completó la altura de la briqueta empleando 3 gramos de mezcla (resina con endurecedor), según las consideraciones ya mencionadas.

Transcurridas otras 15 horas, se separaron las briquetas de los *cups* y, con el fin de asegurar la correcta impregnación con la lámina portaobjeto, se pulió la base en la cual el sedimento estaba expuesto empleando pulidoras de disco, equipadas con lijas Piano de grano 220 y 1200. Después de dejar secar la muestra por 15 horas más, se empleó una cortadora para obtener una lámina y una briqueta con 3 mm de altura de muestra, cada una (Figura 3-12D). El grosor de la lámina se redujo con otra cortadora y, a continuación, se empleó carburo de sílice de grano 600 y 1000 hasta obtener un espesor entre 25 y 30 μm (Figura 3-12E), con base en los colores de interferencia de los minerales presentes (principalmente plagioclasa y cuarzo). Por último, se utilizaron pulidoras equipadas con discos de 6, 3 y 1 μm para el pulido metalográfico, tanto de la briqueta (previo pulido con los discos de grano 220 y 1200) como de la lámina delgado-pulida.

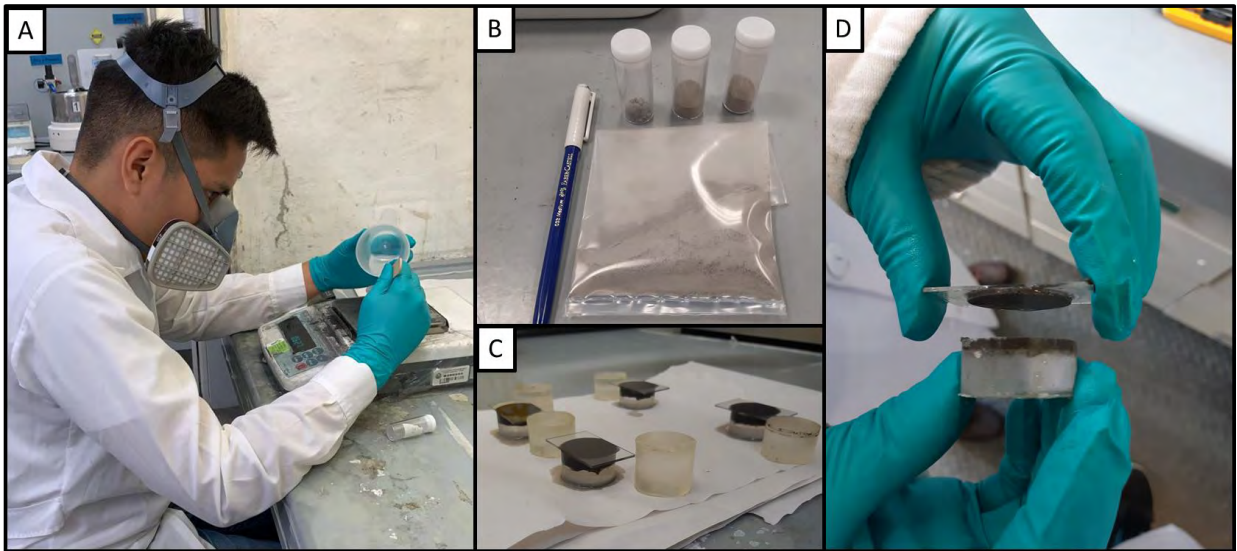


Figura 3-11: (A) Vertimiento de la mezcla de resina y endurecedor en los “cups” para homogenizarla con la muestra. (B) Viales con la fracción mayor a la malla 20, dos contramuestras y la bolsa con cierre hermético que contiene la fracción fina no utilizada. (C) Impregnación de la lámina portaobjeto. (D) Briqueta y lámina con 3 mm de altura de muestra.

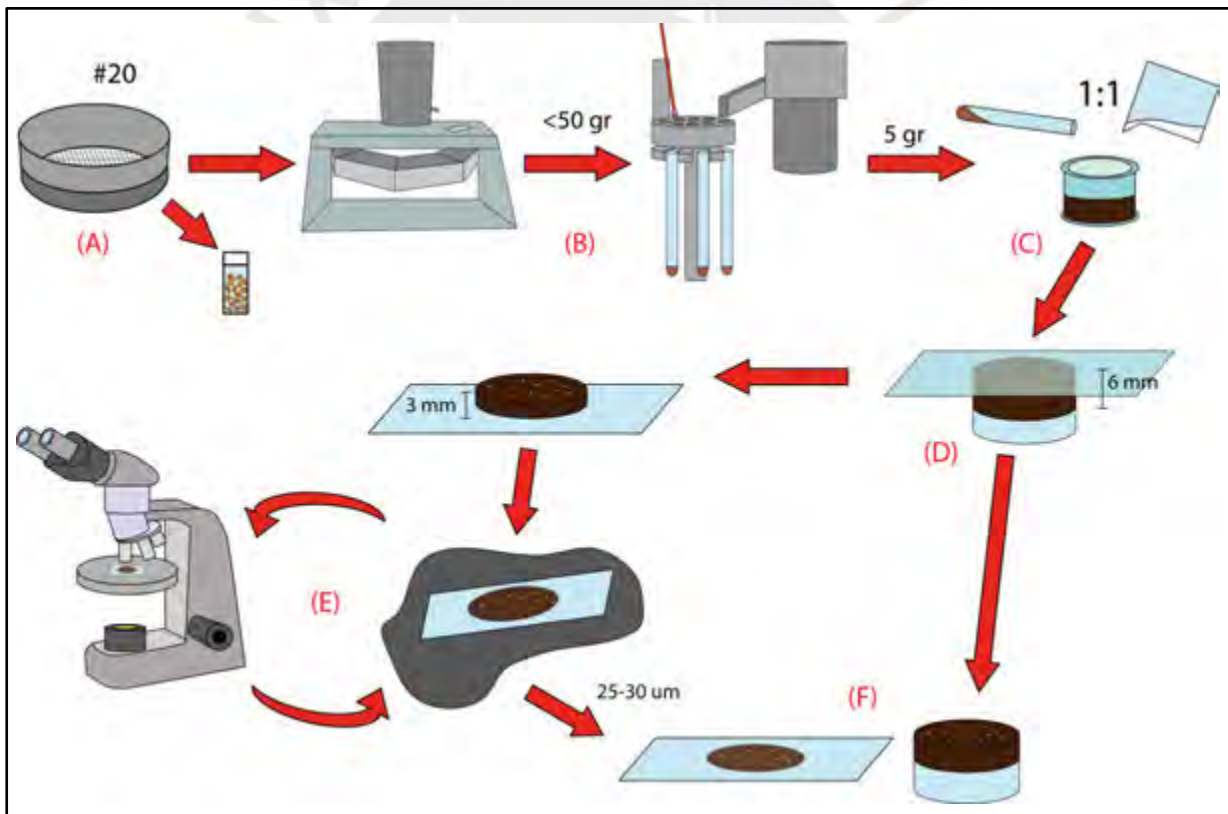


Figura 3-12: Esquema del proceso de preparación de muestras. (A) Tamizado a malla #20. (B) Cuarteo hasta 5 gramos. (C) Mezcla de resina, endurecedor y muestra en los “cups”. (D) Impregnación de la lámina y corte briqueta-lámina. (E) Reducción del grosor hasta 25-30 μm . (F) Briqueta y lámina.

Con el propósito de evitar la contaminación por hierro u otros elementos, todos los instrumentos metálicos utilizados fueron de acero inoxidable; asimismo, los utensilios

descartables (plástico cobertor, guantes, paleta de madera, viales y *cups*) fueron únicos para cada muestra, tras lo cual fueron desechados. Los platos para pesar, la paleta de goma y la pinza se limpiaron con aire comprimido luego de su uso en cada muestra, mientras que los tubos de ensayo del micro-cuarteador rotatorio y los discos de la pulidora se lavaron con jabón. Adicionalmente, la brocha comúnmente utilizada en los cuarteadores rotatorios fue cambiada por una paleta de goma.

3.3. Análisis

3.3.1. Análisis mineralógico

Las láminas delgado-pulidas fueron estudiadas en luz transmitida (minerales traslúcidos) y luz reflejada (minerales opacos) empleando dos microscopios petrográficos. Para la medición de tamaño de partículas y para la obtención de fotos se utilizó el microscopio Leica DM 2500 equipado con una cámara digital, mientras que para la descripción petrográfica se optó por el Olympus BX51. Ambas tareas se llevaron a cabo en el laboratorio de microscopía de la Especialidad Ingeniería Geológica de la PUCP. Los resultados obtenidos se mostrarán en la sección 4.4.

3.3.2. Análisis en el sedimento

El sedimento, originalmente conservado a -70°C , se transportó a Alemania congelado a -80°C gracias al uso de hielo seco, para su análisis en el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR, por su sigla en alemán). Para determinar el S total (S_{tot}), C total (C_{tot}) y C orgánico (C_{org}) se empleó un analizador de carbono-azufre LECO CS230. El método consistió en la combustión de las muestras a 2000°C y posterior medición, mediante detección infrarroja del dióxido de carbono (y monóxido de carbono, previa oxidación) y dióxido de azufre generados. En el caso de la cuantificación del C_{org} se adicionó HCl, para evitar medir gases liberados por los carbonatos presentes.

La composición química total del sedimento se obtuvo mediante el método de fluorescencia de rayos X (XRF, por su sigla en inglés). Para este análisis se molió y calentó la muestra hasta los 1030°C, para eliminar volátiles, tras lo cual se mezcló con metaborato y bromuro de litio para fundirlas a 1200°C durante 20 minutos. La pastilla vítrea resultante se analizó con un equipo XRF de onda dispersiva del BGR, para la cuantificación de elementos mayores (expresados en porcentajes de sus óxidos) y menores (expresados en mg/kg o ppm) de las muestras. La pérdida de masa por ignición (LOI, por su sigla en inglés) se calculó previo a la fusión.

3.3.3. Análisis de agua

Las muestras destinadas al análisis de aniones (conservadas a -20°C) y de cationes (conservadas a 1°C) fueron también transportadas a la BGR en Alemania congeladas con hielo seco (-80°C, para aniones) o refrigeradas con gel (2-8°C, para cationes). Para el análisis de iones mayoritarios (Cl^- , SO_4^{2-} , F^- y Br^-) se optó por la cromatografía iónica (IC, por su sigla en inglés) mediante un cromatógrafo iónico de Dionex, mientras que para los elementos mayores restantes se eligió la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por su sigla en inglés), empleando un espectrómetro Spectro. Los elementos menores o traza se analizaron mediante la espectrometría de masas de alta resolución de plasma acoplado inductivamente (HR-ICP-MS, por su sigla en inglés), mediante un espectrómetro Finnigan MAT tipo elemental.

En la presente tesis se estudió la evolución del hierro y de aquellos elementos que se comportan como aniones, por lo que se emplearon los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y Eh) junto con las concentraciones para identificar las especies mayoritarias presentes, así como los índices de saturación de los diferentes compuestos. Con este objetivo se empleó el software PHREEQC con la base de datos LLNL. Si bien la base de datos WATEQ4 presenta

una mayor cantidad de metales que la ya consistente base por defecto (PHREEQC), se optó por la base de datos LLNL, ya que no solo posee más elementos que ambas, sino que también adapta las constantes de equilibrio a un amplio rango de temperatura (0.01 a 300°C). Debido a que la especie de cada elemento depende tanto de los parámetros fisicoquímicos como de la composición química total, se optó por excluir a los elementos que, en más de la mitad de las muestras, se encontraban por debajo del límite de detección o muy cercano a este. En el caso de los elementos no incluidos en la base de datos escogida y aquellos discriminados por su poca concentración, la especiación se obtuvo usando el software Medusa-Hydra y se confirmó con los diagramas de Pourbaix presentes en Kesler (1988).



4. Resultados

4.1. Eh y pH

Se logró obtener un total de 65 muestras de columna de agua (Tabla 8-2) y 43 muestras de agua de poros (Tabla 8-3), en las que se midió el pH y Eh. Los valores obtenidos de Eh fueron ajustados según la temperatura de las muestras, de acuerdo con las lecturas obtenidas durante la calibración del equipo. Dichos valores, expresados en milivoltios (mV), se convirtieron a medidas de electrodo estándar de hidrógeno (SHE, por su sigla en inglés), tras lo cual se realizaron perfiles para cada punto de muestreo (Figuras 4-1 y 4-2).

En la columna de agua, las mediciones de pH y Eh se distribuyen de la siguiente manera: 24 muestras de AC1, 20 de AC2, 18 de AC3 y 3 de BE. En las tres estaciones de medición (AC1, AC2 y AC3) se observó una ligera tendencia hacia valores más neutros de pH en profundidad. Mientras en AC2 el Eh mostró una mayor dispersión, en AC1 y AC3 fue casi constante, aunque en AC3 se observan condiciones notoriamente más oxidantes que en los otros puntos muestreados. Cabe resaltar que la última muestra en AC1 y las dos últimas de AC3 se obtuvieron de la columna de agua sobre el testigo.

En cuanto al agua de poros, las muestras en donde se logró medir el pH y Eh fueron: 20 muestras de AC1, 11 de AC2 y 12 de AC3. El comportamiento del pH del agua intersticial es opuesto al observado en la columna de agua: En AC1 y AC2 se observa una tendencia hacia valores más alcalinos a mayor profundidad, mientras que en AC3 los valores son casi constantes, salvo a 50 y 70 cm. Si bien el Eh es más disperso que en la columna de agua, los valores indican condiciones más reducidas, aunque no se aprecia una tendencia con la profundidad. Asimismo, al igual que en la columna de agua, en AC3 se observan condiciones notablemente más oxidantes, aunque con una dispersión mayor.

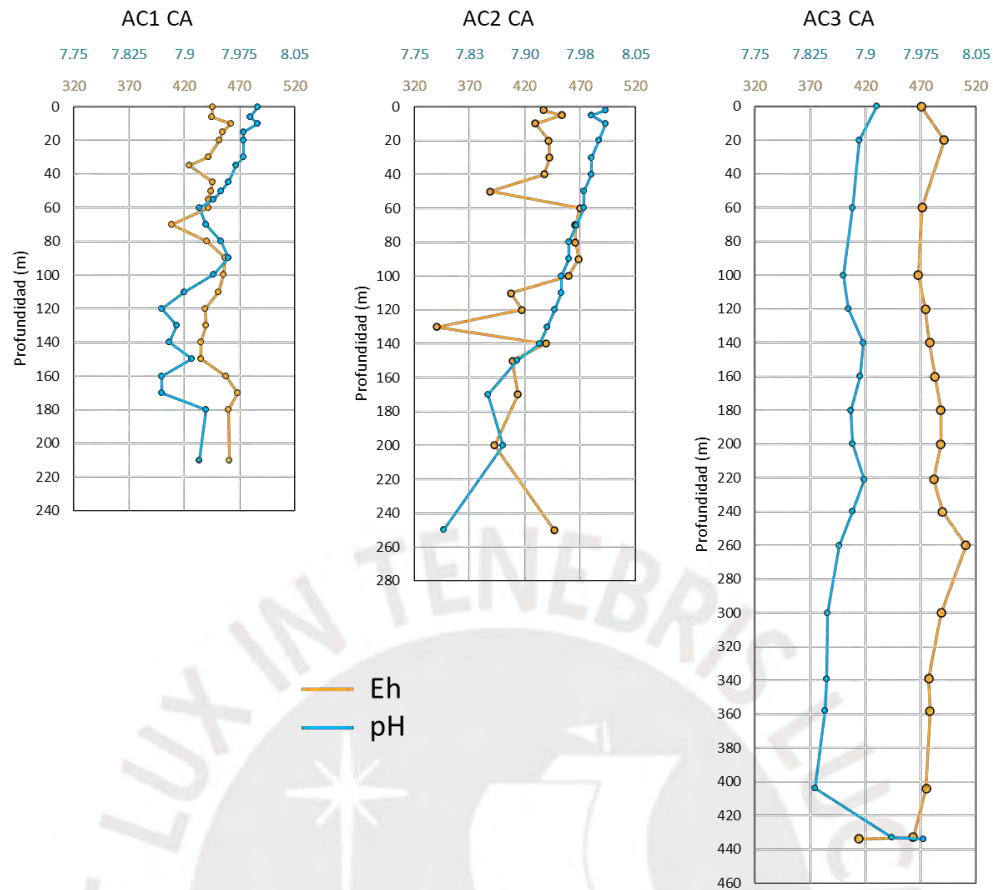


Figura 4-1: Perfiles de pH y Eh en la columna de agua de las estaciones AC1, AC2 y AC3

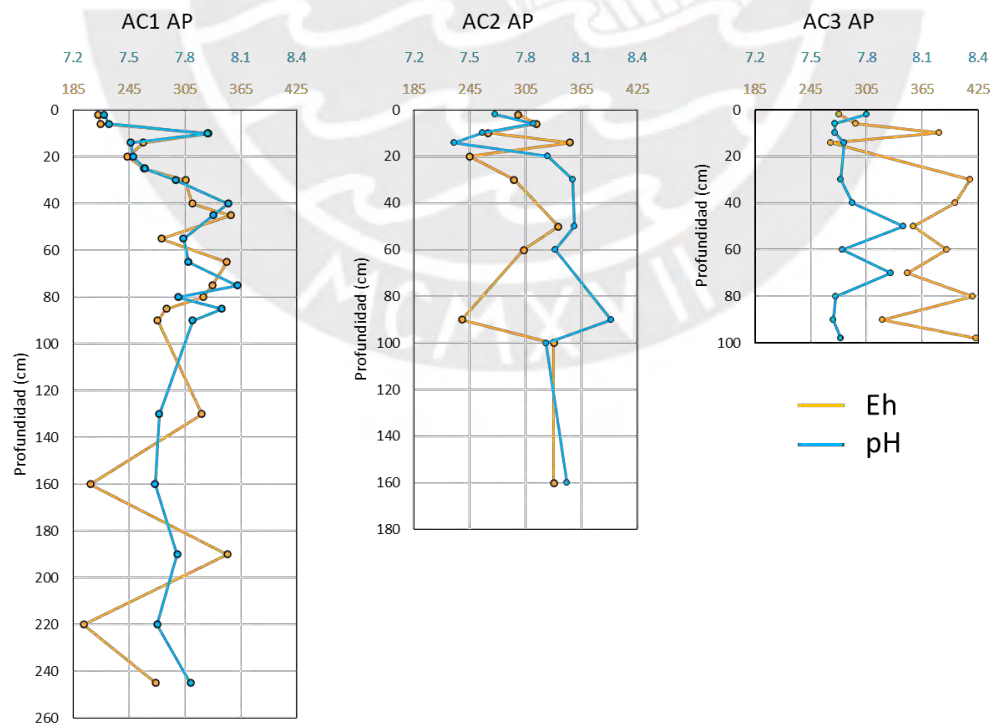


Figura 4-2: Perfiles de pH y Eh en el agua de poros de las estaciones AC1, AC2 y AC3

4.2. Geoquímica del agua

4.2.1. Tratamiento de datos

Se logró obtener 65 muestras para el análisis de cationes y aniones en la columna de agua (Tabla 8-2), mientras que en el agua de poros se consiguió extraer 42 muestras para el análisis de aniones y 57 para el de cationes (Tabla 8-3). Debido a que en campo se obtuvieron cantidades limitadas de muestras de agua, no se pudo contar con muestras duplicadas; sin embargo, se procedió a realizar la validación de las mediciones mediante el balance iónico. Este método parte del principio de que el agua no está cargada, por lo cual la suma de las cargas de los principales aniones (Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-) y cationes (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) debe ser cero (Appelo & Postma, 2005). No obstante, como el HCO_3^- no fue analizado, para el balance iónico se utilizó el valor de 134.5mg/dm^3 , por ser el promedio de los valores obtenidos por Krogulec et al. (2017) en la intersección bahía Almirantazgo – ensenada Ezcurra. Este valor se empleó para todas las muestras, tanto para el balance iónico como para la simulación geoquímica posterior, ya que no se espera un cambio significativo del HCO_3^- en el agua de mar.

Como se observa en las Figuras 4-3 y 8-2, cuatro muestras presentan valores anómalos. Según Appelo & Postma (2005), un error menor al 2% es inevitable en cualquier laboratorio, mientras que solo son admisibles aquellos menores a 5% para muestras cuya suma de cationes o aniones se encuentre entre 10 y 800 meq/L (APHA, 1999; Appelo & Postma, 2005). La muestra de agua de poros AC1/P10 muestra un error en el balance iónico de 11.15%, debido a una baja suma de aniones y a una alta suma de cationes, inclusive en comparación con las muestras aledañas. Por otro lado, las muestras de columna de agua AC3/160 y AC3/180, a pesar de poseer un error de balance iónico pequeño (-1.06% y -0.13%, respectivamente), poseen una suma de iones muy elevada. Si bien se observan valores altos en las muestras colindantes, esto no se refleja en un cambio en la conductividad eléctrica en el CTDO (Figura

8-1), cuyas mediciones son continuas en tiempo real. Finalmente, la muestra AC1/P35 también posee un balance iónico aceptable (-3.94%), pero la suma de cationes y aniones (17.22 y 18.64 meq/L, respectivamente) es notablemente inferior que la de las otras muestras (>500 meq/L), especialmente considerando que se trata de agua intersticial marina. Cabe resaltar que para el cálculo del balance iónico en esta muestra no se consideró la concentración de HCO_3^- mencionada anteriormente ya que dicho valor es muy superior a la concentración de los otros iones mayoritarios (Tablas 8-5 y 8-6), lo cual hubiese incrementado aún más el error. Por estas razones, estas cuatro muestras fueron excluidas del análisis, pero sí se incluyeron en los gráficos para ilustrar el contraste.

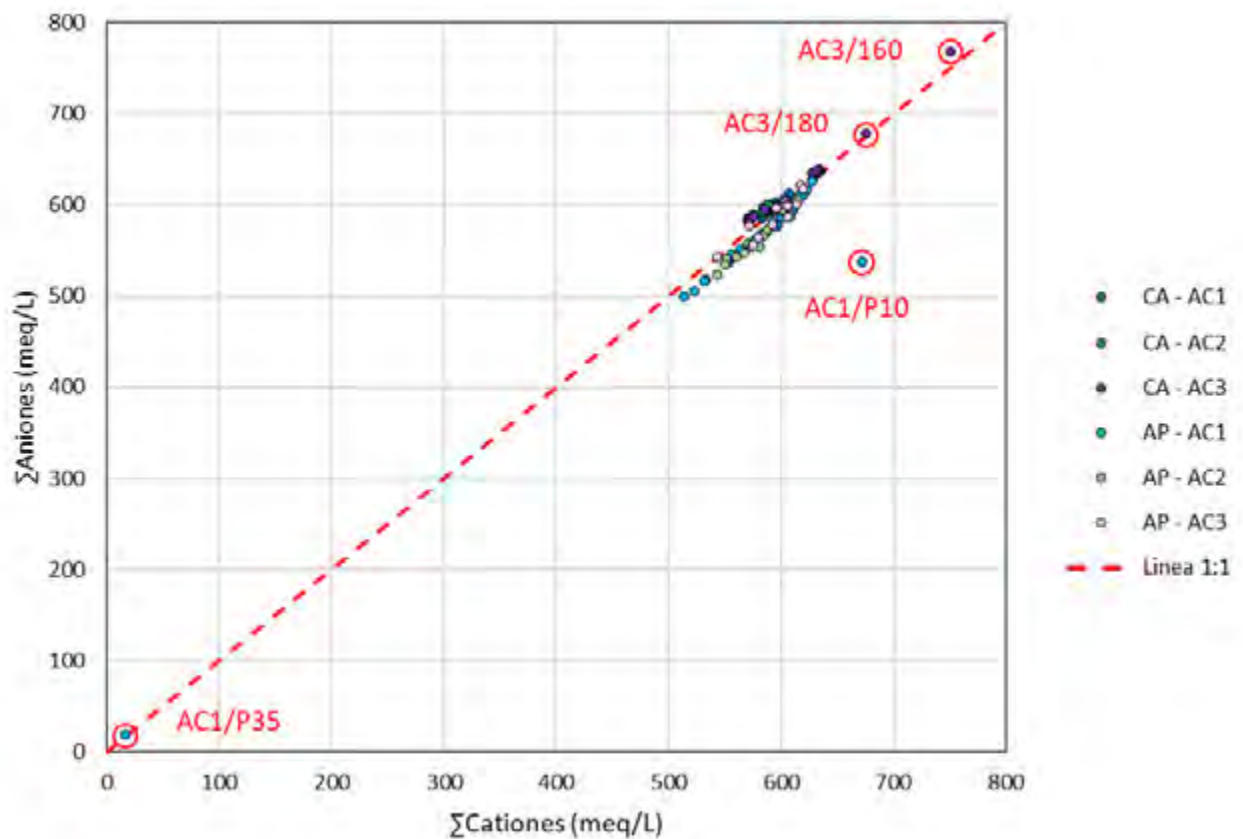


Figura 4-3: Suma de cationes y aniones en miliequivalentes por litro (meq/L)

4.2.2. Especiación

Como en la presente tesis solo se analizará el comportamiento de los aniones, se procedió a realizar una primera especiación con el software PHREEQC para identificar qué elementos

se presentan como aniones, oxi-aniones o complejos aniónicos (Tablas 8-8 y 8-9 en anexos). Así, se determinó que el Br y el Cl se presentan siempre como aniones, mientras que el S, Mo y Cr se presentan como oxi-aniones, aunque este último conforma también un compuesto catiónico en el agua de poros ($\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$, Tabla 8-9). Por otro lado, el As, C, Co, Cu, P, U y V forman compuestos aniónicos al asociarse con O^{2-} , H^+ , CO_3^{2-} y Cl^- .

El Cu formó un compuesto neutro (CuCO_3) en todas las muestras de la columna de agua, mientras que en el agua de poros se presenta como un compuesto aniónico (CuCl_3^{2-}), el cual predomina en AC1 y es minoritario en AC3. El U, el cual siempre conforma complejos carbonatados con carga negativa [$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$] en el agua de poros, en la columna de agua se presenta principalmente como un compuesto neutro [$\text{UO}_2(\text{OH})_2$], especialmente lejos de la fuente (en AC2 y AC3). El P no supera el límite de detección en la columna de agua y en el agua de poros se presenta mayoritariamente como especie neutra (MgHPO_4); sin embargo, en concentraciones similares (mismo orden de magnitud) se encontró una especie con carga negativa (NaHPO_4^-), por lo que se incluyó en el análisis. El Fe, aunque se presentó como un compuesto neutro [$\text{Fe}(\text{OH})_3$], también se incluyó en el análisis por las razones mencionadas en la introducción de la presente tesis. Finalmente, los elementos que se presentan por debajo del límite de detección o que no se encuentran en la base de datos LLNL y que, según el software Medusa Hydra, conforman principalmente complejos aniónicos fueron: Al como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, Ga como $\text{Ga}(\text{OH})_4^-$, Hf como $\text{Hf}(\text{OH})_5^-$, Nb como $\text{Nb}(\text{OH})_6^-$, Te como $\text{TeO}(\text{OH})_3^-$ y W como WO_4^{2-} .

4.2.3. Asociaciones geoquímicas

Posteriormente, se procedió a realizar perfiles de concentración para cada elemento con el objetivo de identificar grupos con similar comportamiento. En la columna de agua, las concentraciones de Al, Ga, Hf, Nb, PO_4 , W y Te no superan el límite de detección o se

encuentran muy próximas a este (Tablas 4-1 y 8-5), que no permite un mayor análisis. A pesar de que en el agua de poros las concentraciones fueron mayores, solo el PO_4 , Te y W presentaron valores lo suficientemente alejados del límite de detección para ser interpretados (Tablas 4-2 y 8-6).

En la columna de agua, en las tres estaciones de muestreo, los dos principales aniones mayoritarios (Cl y SO_4^{2-}) tienen un comportamiento similar, mostrando concentraciones casi constantes (Grupo 1 de la Tabla 4-1 y Figura 8-3), con un promedio de concentraciones totales de 19340 mg/L de Cl y 2610 mg/L de SO_4^{2-} . Las pequeñas variaciones en la concentración se relacionan con la estratificación de las capas de agua, identificada en el CTDO en las estaciones AC1 y AC2 (Figura 8-1). Especialmente en esta segunda estación, se observa un quiebre hacia concentraciones menores constantes, luego de los 120 m de profundidad; aunque esta variación es menor al 3%, por lo que se sigue considerando como concentraciones constantes. El Br, otro anión mayoritario en el agua marina, presenta una mayor variación a escala de sistema que sus pares en las tres estaciones. Solo se correlaciona con ellos en la estación AC3, donde se observa una concentración casi constante, salvo un *outlier* a 160 m. A esta profundidad se observa un punto con alta concentración en todos los elementos mayoritarios medidos con ICP-OES, pero no se observa ninguna anomalía con los datos obtenidos en tiempo real con la sonda CTDO. En esta última estación, los parámetros medidos (incluida la conductividad eléctrica, la cual es proporcional a los elementos disueltos) disminuyen con la profundidad, mientras que los iones disueltos mayoritarios muestran un quiebre hacia valores constantes más altos a partir de 200 m de profundidad.

En las estaciones AC2 y AC3, el As, Cr, Mo y V, los cuales se presentan principalmente conformando complejos aniónicos (Tabla 8-8), y el U (cuya especie predominante en AC2 y AC3 es neutra) muestran una buena correlación con los perfiles de pH (Tabla 4-1 - G2 y Figura 8-3). En el caso de la estación AC1, si bien no se observa esta correlación, dichos elementos

(salvo el Cr) presentan perfiles similares. En la estación AC3, este grupo de elementos puede subdividirse en dos: uno con una disminución gradual de concentraciones hasta los 220 m (Tabla 4-1 - G2) y otro con una concentración casi constante (Tabla 4-1 - G3). Cabe resaltar que en AC3 también se presenta una correlación negativa con el Eh, el cual exhibe un comportamiento opuesto al pH. Por otro lado, el Fe no presenta una correlación consistente con parámetros individuales (Tabla 4-1). Mientras que en AC3 el Fe correlaciona positivamente con el pH, en AC1 lo hace negativamente y en AC2 no correlaciona individualmente con parámetro alguno.

Tabla 4-1: Asociaciones geoquímicas en la columna de agua

GRUPO	AC1		AC2		AC3	
	Elemento	Patrón	Elemento	Patrón	Elemento	Patrón
G1	Cl, SO ₄ ²⁻	Constante	Cl, SO ₄ ²⁻	Constante	Br, Cl, SO ₄ ²⁻	Constante
G2	As, Co, Mo, U, V	Patrón no identificado	As, Cr, Mo, U*, V	pH	Cr, Mo, U*, V	pH, -Eh
G3	Cr, Br	Opuestos	Br	-log pH	As, Fe, Cu**	pH, -Eh
G4	Fe	-pH				
SG			Fe			
<LD	Al, Ga, Hf, Nb, PO ₄ , W, Te		Al, Co, Ga, Hf, Nb, PO ₄ , W, Te		Al, Co, Ga, Hf, Nb, PO ₄ , W, Te	

Nota: (*) En AC2 y AC3 U se presenta como UO₂(OH)₂, el cual es un compuesto neutro; sin embargo, se observa una correlación con los perfiles de otros elementos. (**) El Cu se presenta como especie neutra en las tres estaciones en la columna de agua y solo en AC3 se observa una correlación con otros elementos.

En el agua de poros cambia la tendencia de los aniones mayoritarios (Tabla 4-2 - G1), puesto que solo el Cl y Br presentan concentraciones casi constantes con la profundidad (con un promedio de 19040 y 68.9 mg/L, respectivamente), especialmente si se obvia la muestra AC1/P35, por las razones señaladas en el apartado de “Tratamiento de datos”. A diferencia de sus pares, los perfiles del SO₄²⁻ (salvo en el último tramo del testigo AC3) muestran que la

concentración disminuye progresivamente con la profundidad (Tabla 8-4). Si bien en la estación AC1 el SO_4^{2-} muestra un perfil con quiebres similares al Br y Cl, la concentración del sulfato disminuye considerablemente (Figura 8-4); mientras que en las estaciones AC2 y AC3 se observan perfiles opuestos al pH y particularmente opuestos al PO_4 . Adicionalmente, la concentración promedio de Cl y SO_4^{2-} en el agua de poros (Tabla 8-11) disminuye respecto a la observada en la columna de agua (Tabla 8-10) entre 0.1 y 6 % en el caso del Cl; y entre 29 y 56% en el SO_4^{2-} . Esto es opuesto a lo que ocurre con el Fe y con los otros elementos analizados, donde se observa que la concentración media en el agua de poros es considerablemente mayor que en la columna de agua.

Por otro lado, los elementos restantes que conforman compuestos aniónicos (As, Mo, U, V, W, Cu), junto al Cr (mayoritariamente presente como un compuesto catiónico en AC1 y AC2, pero como compuesto aniónico en AC3; ver Tablas 8-9 y 8-9) y al PO_4 (mayoritariamente presente como especie neutra en las tres estaciones) presentan perfiles similares al pH (Tabla 4-2 – G2 y Figura 8-4). En AC1, este conjunto de elementos puede subdividirse en dos grupos, diferenciados por un pico de altas concentraciones a 40/45 cm (Tabla 4-2 - G2) o 130 cm (Tabla 4-2 - G3). En AC2, este grupo (Tabla 4-2 - G2) se diferencia del PO_4 (Tabla 4-2 - G3) por poseer concentraciones notoriamente más elevadas entre 35 y 45 cm de profundidad; sin embargo, en dichos niveles no se logró obtener muestras para medir el pH para afinar dicha correlación. En AC3 también se puede realizar una subdivisión ya que un grupo (Tabla 4-2 - G2) se caracteriza por presentar altas concentraciones a 20 cm (donde no se logró medir el pH), mientras que otro (Tabla 4-2 - G3) se caracteriza por presentar una concentración alta a 60 cm (lo cual es contrario a lo observado en el pH). El comportamiento opuesto entre los perfiles del SO_4^{2-} y PO_4 no se observa en la estación AC1, en donde los últimos metros de profundidad el PO_4 muestra un comportamiento opuesto al pH (contrario a la tendencia mostrada en las otras

estaciones). Los perfiles de Te y Co (salvo en AC1) no muestran una correlación con parámetro medido alguno, por lo cual no fueron asignados a ningún grupo (Tabla 4-2 - SG).

El Fe muestra una tendencia opuesta al Eh en AC1 y AC3, y al pH en AC1 y AC2. Al realizar un gráfico en 3D considerando ambos parámetros fisicoquímicos, se observa una tendencia a mayores concentraciones de Fe, bajo condiciones más reductoras y cuando el pH se acerca más a condiciones neutras (Figura 4-4). El V, As y Cr, a pesar de presentar una correlación consistente con el pH, esta mejora al considerar el Eh simultáneamente. Así, las mayores concentraciones de dichos elementos se observan en condiciones más básicas y reductoras (Figura 8-6).

Tabla 4-2: Asociaciones geoquímicas en el agua de poros

GRUPO	AC1		AC2		AC3	
	Elemento	Patrón	Elemento	Patrón	Elemento	Patrón
G1	Br, Cl, SO_4^{2-} *	Constante	Br, Cl	Constante	Br, Cl	Constante
G2	As, Mo, U, V	pH, Eh	As, Mo, U, V, W, Cu, Cr**	pH	As, Mo, U, V, W	pH
G3	Co, Cr**, Cu, W	pH, Eh	{ PO_4^{***} } y { SO_4^{2-} , Fe}	Opuestos {+pH}, {-pH}	SO_4^{2-} ; PO_4^{***}	Opuestos {-pH, +pH}
G4	PO_4^{***}	pH, Eh			Fe	-Eh
G5	Fe	-pH, -Eh				
SG	Te		Co, Te		Co, Cr, Te	
<LD	Al, Ga, Hf, Nb		Al, Ga, Hf, Nb		Al, Ga, Hf, Nb	

NOTA: (*) El SO_4^{2-} presenta un patrón con quiebres similares, pero con concentraciones que decrecen a profundidad. (**) El Cr mayoritariamente se encuentra como complejos catiónicos $[\text{Cr}(\text{OH})_2^+]$ en lugar de aniónicos. (***) El P, medido como fosfato, se presenta mayoritariamente como un compuesto neutro, pero la segunda especie más abundante $[\text{NaHPO}_4^-]$ posee concentraciones cercanas.

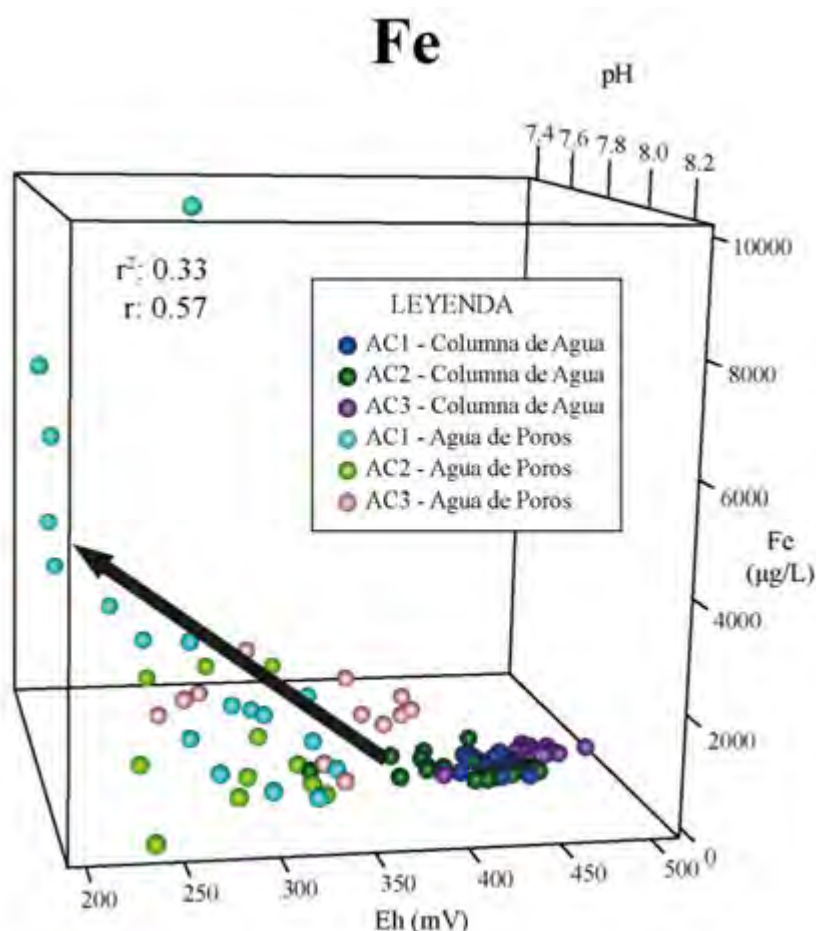


Figura 4-4: Correlación de mayor concentración de Fe a un mayor pH y menor Eh

4.3. Geoquímica del sedimento

Los resultados de la geoquímica en el sedimento se muestran en la Tabla 8-7. Debido a que se analizó la composición total de este, la validación de los datos se realizó mediante la suma de las concentraciones de todos los elementos y del LOI (el cual osciló entre 4.26 y 8.48%). La totalidad de muestras analizadas (86) se consideraron como correctas puesto que la suma de componentes superó siempre el 99.6%. Una vez validados los datos, se procedió a realizar perfiles para agrupar los elementos con comportamiento similar (Figura 8-5), obviando a los elementos cuya concentración no supera el límite de detección o se encuentra próxima a este (Co, Ga, Nb, Hf, Mo, U, W; Tabla 4-3).

En el sedimento, los grupos encontrados no guardan relación con los parámetros fisicoquímicos y las relaciones son menos consistentes que en el agua. El primer grupo se

compone por el S medido mediante XRF (expresado como SO_3) y LECO (expresado como S_{tot}). En AC1 se aprecia un segundo grupo (Tabla 4-3 – G2), el cual incluye al C_{org} y C_{tot} ; y cuyos perfiles son opuestos al S, puesto que muestran concentraciones altas relativamente constantes hasta los 85 cm, tras lo cual decrecen hasta el final del testigo. Este cambio en la concentración de elementos de ambos grupos se corresponde con un nivel de sedimento de color gris oscuro con abundante contenido de gravilla y pirita primaria.

En AC2 el SO_3 muestra concentraciones mayores relativamente constantes a partir de los 70 cm, así como picos de altas concentraciones a 50 y 130 cm, mientras que el S_{tot} no presenta dichos picos y el cambio hacia valores mayores se aprecia recién a partir de los 90 cm. No obstante, se les considera como parte del mismo grupo por poseer perfiles afines. El segundo grupo (Tabla 4-1 – G2) se caracteriza por poseer concentraciones altas y constantes durante los primeros 25 cm, tras lo cual decrecen y se mantienen relativamente constantes, salvo anomalías negativas a 35, 50, 80 y 85 cm. Lo opuesto ocurre con el tercer grupo (Tabla 4-3 – G3), caracterizado por concentraciones constantes que cambian a 25 cm y que poseen una única anomalía de altas concentraciones a 35 cm. Adicionalmente, se observa que el Fe (Tabla 4-1 – G4) presenta un perfil similar al grupo del Al y P hasta los 40 cm (y opuesto al grupo del C_{org} y C_{tot}), profundidad a partir de la cual se vuelve opuesto a este (y por ende similar al grupo del C_{org} y C_{tot}).

En AC3, el S (S_{tot} y SO_3) muestra un patrón de enriquecimiento con la profundidad hasta los 25 cm y concentraciones muy bajas a partir de los 45 cm de profundidad. En esta estación se identificaron dos grupos cuyos perfiles muestran un comportamiento opuesto al del S: el primero (Tabla 4-3 – G2) sufre un empobrecimiento progresivo con la profundidad y se enriquece hasta concentraciones constantes luego de los 45 cm, mientras que el segundo (Tabla 4-3 - G3) posee una zona de empobrecimiento extra entre los 75 y 85 cm. Asimismo, se observa que el Cr y el Fe presentan perfiles oscilantes opuestos.

Tanto en AC1 como en AC3, el As presentó perfiles similares con los del S, aunque su escasa concentración, junto a la baja resolución del método, no permitieron confirmar dicha asociación de modo rotundo. El V no muestra buena correlación con elemento alguno en AC2, mientras que el P solo presentó perfiles similares a otros elementos en dicha estación. Finalmente, no se observó una buena correlación de Cu con otros elementos en ninguna estación.

Tabla 4-3: Asociaciones geoquímicas en el sedimento

GRUPO	AC1		AC2		AC3	
	Elemento	Patrón	Elemento	Patrón	Elemento	Patrón
G1	SO ₃ , S _{tot} , As*	Opuesto a G2	SO ₃ , S _{tot} **	Similar a G2	SO ₃ , S _{tot} , As*	Opuesto a G2
G2	Cl, Al ₂ O ₃ , Cr, Fe ₂ O ₃ , V, C _{org} , C _{tot}	Opuesto a G1	Al ₂ O ₃ -P ₂ O ₅	Constante con valles	Al ₂ O ₃ , V	Opuesto a G1
G3			Cr, C _{org} , C _{tot}	Constante con picos	C _{tot} , C _{org}	Opuesto a G1
G4			Fe ₂ O ₃	Cambiante	Cr, Fe ₂ O ₃	Opuestos
SG	Cu, P ₂ O ₅		Cl, V, Cu		Cl, Cu, P ₂ O ₅	
<LD	Co, Ga, Nb, Hf, Mo, U, W		As, Co, Ga, Nb, Hf, Mo, U, W		Co, Ga, Nb, Hf, Mo, U, W	

NOTA: (*) La asociación con el As es aproximada. (**) La correlación entre SO₃ y S_{tot} en AC2 no es muy buena, pero se asume que deben estar asociadas puesto que representan lo mismo.

4.4. Mineralogía y petrografía

4.4.1. Descripción macroscópica

Testigo AC1

Es el testigo que posee una mayor heterogeneidad en cuanto al tamaño de grano del sedimento, ya que presenta niveles de arcilla, limo y arena. Se pudo identificar un total de ocho horizontes diferenciados principalmente por la coloración de los sedimentos (Figura 4-5), los cuales se detallan a continuación:

(0 a 2 cm): Segmento vacío.

(2 a 33 cm): Sedimento de color gris verdoso donde predominan las partículas de tamaño limo, incluyendo clastos de tamaño grava de hasta 2 cm (entre 23 y 25 cm de profundidad), arena fina (pirita primaria, plagioclasa, cuarzo y minerales máficos) y arena muy fina (magnetita). Este horizonte se caracteriza por poseer abundantes nódulos y lentes de materia orgánica, estos últimos relacionados espacialmente a grava (de hasta 1 cm) o arena de tamaño medio.

(33 a 34 cm): Sedimento de color gris claro, en donde predominan partículas tamaño limo, con alto contenido de gravilla.

(34 a 72 cm): Sedimento de color gris verdoso predominantemente de tamaño limo, incluyendo granos de tamaño arena media y grava a 47 cm (entre 3 y 5 cm de diámetro), así como grava fracturada a 67 cm (de 0.7 cm de diámetro). Estos niveles se componen de cuarzo, plagioclasa y pirita primaria. Adicionalmente, se encontró una estructura redondeada de arcilla de coloración rojiza entre los 55 y 64 cm, la cual ocupa la mitad del ancho del testigo; mientras que el sector donde predomina el limo contiene abundante grava (entre 0.5 y 1.2 cm). Si bien la cantidad de materia orgánica es menor que en el primer horizonte, se aprecia una cantidad considerable de nódulos difusos entre 40 y 51 cm, así como entre 68 y 70 cm de profundidad.

(72 a 76 cm): Sedimento de color gris claro compuesto principalmente por partículas tamaño limo, aunque se encontraron cantidades importantes de grava de 6 mm de diámetro. Se compone principalmente por plagioclasa, cuarzo, pirita primaria y magnetita.

(76 a 89 cm): Sedimento de color gris verdoso, en donde predominan partículas de tamaño limo, cuya composición mineralógica es principalmente plagioclasa, cuarzo y pirita primaria. Las estructuras de materia orgánica encontradas son menos visibles que en los niveles más someros, pudiendo reconocerse tanto lentes como nódulos de este material.

(89 a 135 cm): Sedimento de color gris oscuro, conformado principalmente por plagioclasa, cuarzo, pirita primaria y magnetita de tamaño limo. La cantidad de estructuras de materia orgánica decrece notablemente respecto a los horizontes superiores, reduciéndose a nódulos y laminaciones milimétricas (en lugar de lentes). Adicionalmente, se encontró un *dropstone* de 7.5 cm de diámetro a 92 cm de profundidad y litoclastos tamaño grava (4 cm) a 102 cm.

(135 a 150 cm): Sedimento de color gris claro predominantemente de tamaño limo, compuesto por plagioclasa, cuarzo y pirita primaria. Este horizonte es rico en gravilla de hasta 5 cm de diámetro.

(150 a 250 cm): Sedimento de color gris oscuro, en donde predomina el tamaño arena fina, incluyendo zonas con sedimento tamaño limo y lagunas partículas de gravilla. La mineralogía predominante es plagioclasa, cuarzo, pirita primaria y magnetita. A diferencia de los niveles en donde predomina el tamaño limo, la materia orgánica es ausentes. Asimismo, se encontraron litoclastos de tamaño grava gruesa a 187 (4 cm), 189 (3 cm), 212 (4 cm) y 219 (3 cm) cm de profundidad.

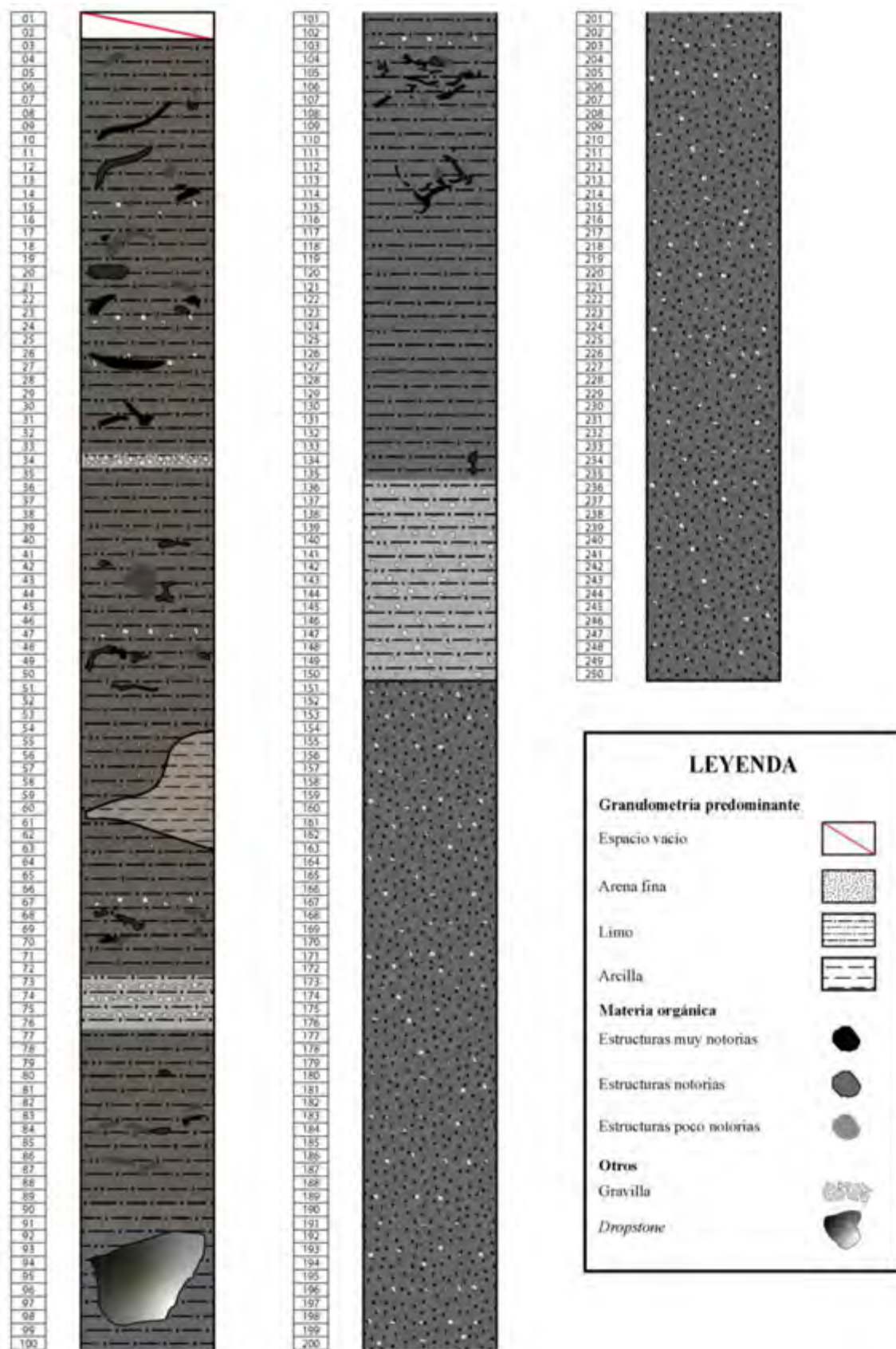


Figura 4-5: Esquematzación de la granulometría, color y materia orgánica del testigo obtenido en la estación AC1. Las estructuras de materia orgánica se representan a escala y corresponden a aquellas que se encuentran en la superficie de corte del testigo. El tamaño de los niveles de gravilla es referencial.

Testigo AC2

Es el segundo testigo en cuanto a la heterogeneidad en el tipo de sedimento. Se identificaron siete horizontes, diferenciados por el color del sedimento. La granulometría predominante en dichos horizontes es el tamaño limo (Figura 4-6). A continuación, se describe su litología:

(0 a 35 cm): Sedimento de color gris verdoso claro, en donde predomina el tamaño limo. La mala clasificación de estos sedimentos se evidencia por zonas de sedimento tamaño arcilla, incluyendo niveles de grava entre los 11 y 15 cm (hasta 0.5 cm de espesor), así como a 30 (1.5 cm de espesor) y 35 (2 cm de espesor) cm de profundidad. En este horizonte se encontró la mayor cantidad de estructuras de materia orgánica, principalmente nódulos irregulares junto a restos de poliquetos y/o ramas, así como laminaciones milimétricas entre los 30 y 35 cm.

(35 a 42 cm): Sedimento de color gris verdoso oscuro, en donde predomina el tamaño limo. Se reconoció un nódulo irregular de materia orgánica junto a laminaciones milimétricas, en la zona de contacto con el horizonte más somero. Este nivel está compuesto principalmente de magnetita, plagioclasa y cuarzo.

(42 a 91 cm): Sedimento de color gris verdoso claro, predominantemente de tamaño limo, pudiendo identificarse también zonas de tamaño desde arcilla hasta grava. La cantidad de estructuras de materia orgánica es menos abundante que la encontrada en los horizontes más someros, observándose únicamente nódulos de materia orgánica con formas irregulares. A 68 cm de profundidad se encontró un nivel de gravilla y a 71 cm se observó un *dropstone* de 8 cm de diámetro. La mineralogía predominante es magnetita, plagioclasa y cuarzo.

(91 a 119 cm): Sedimento de color gris rojizo, en donde predominan partículas tamaño limo. Se observaron escasos nódulos de materia orgánica, poco notorios y con formas

irregulares. Este horizonte también destaca por poseer pirita primaria, además de plagioclasa, cuarzo y magnetita.

(119 a 139 cm): Sedimento de color gris verdoso claro, cuya granulometría predominante es el tamaño limo. Este horizonte está compuesto principalmente de pirita primaria, plagioclasa, cuarzo y magnetita. A pesar de que el testigo no fue manipulado de modo invertido, luego del corte longitudinal del mismo, se encontró una separación en el sedimento entre los 130 y 133 cm de profundidad. Como no se pudo determinar el momento de esta separación, y para mantener la concordancia con las profundidades de obtención de las muestras de agua de poros, dicho espacio se describió como “vacío”. Respecto a las estructuras de materia orgánica, se observaron lentes notorios en los niveles adyacentes a dicha separación.

(139 a 158 cm): Sedimento de color gris rojizo claro, en donde predomina el tamaño limo. En este horizonte las estructuras de materia orgánica son muy escasas y poco notorias, encontrándose un solo nódulo irregular a 142 cm, acompañado de restos vegetales o de poliquetos. Respecto a la composición, predomina la plagioclasa, cuarzo y magnetita, con escaso contenido de pirita primaria, de tamaño entre limo y arena muy fina.

(158 a 188 cm): Sedimento de color gris verdoso claro, en donde predomina el tamaño limo. Entre los 174 y 176 cm de profundidad se encontraron notorios nódulos de materia orgánica con formas irregulares, así como estructuras difusas sin un patrón regular de distribución. La mineralogía se compone de plagioclasa, cuarzo y magnetita, acompañados de bajas concentraciones de pirita primaria, tamaño limo a arena muy fina.

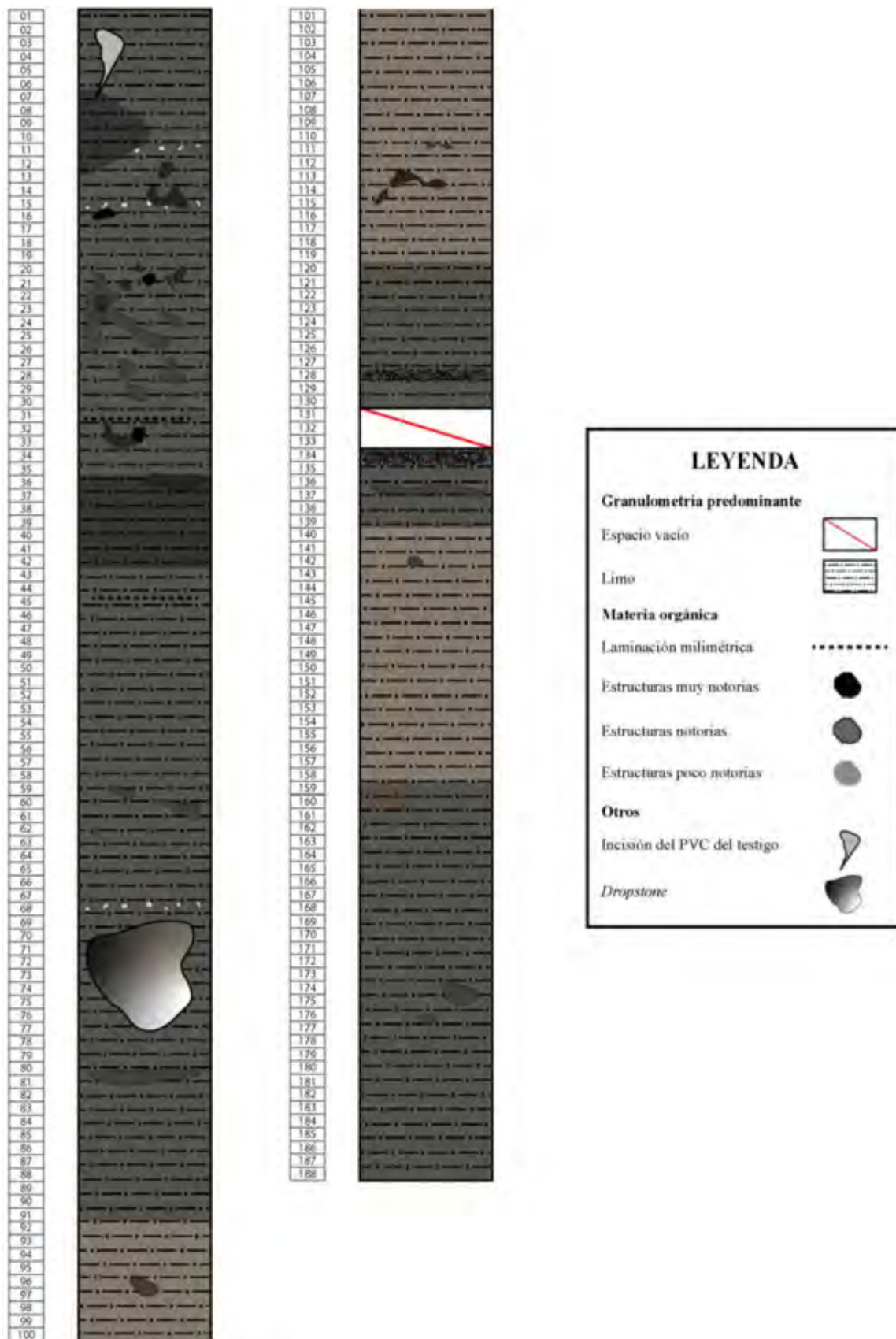


Figura 4-6: Esquematzación de la granulometría, color y materia orgánica del testigo obtenido en la estación AC2. La incisión en los primeros centímetros fue producto de la rotura del testigo durante la maniobra. Las estructuras de materia orgánica se representan a escala y corresponden a aquellas presentes en la superficie de corte del testigo. El tamaño de los niveles de gravilla es referencial.

Testigo AC3

Es el testigo con menor heterogeneidad en cuanto al tipo de sedimento, puesto que solo se identificaron dos niveles diferenciables tanto por su granulometría como por la coloración de sus clastos (Figura 4-7). Estos niveles se detallan a continuación:

(0 a 58 cm): Sedimento de color gris verdoso oscuro, en donde predomina el tamaño limo, incluyendo sedimento tamaño arcilla. Adicionalmente, se encontraron litoclastos de 3.5 cm (tamaño grava gruesa) a 27 y 45 cm de profundidad. En este nivel se encontraron notorias estructuras de materia orgánica, primando los nódulos por sobre los lentes. La mineralogía predominante es la plagioclasa, cuarzo (tamaño arena fina) y pirita primaria (tamaño arena hasta limo).

(58 a 100 cm): Sedimento de color gris verdoso claro, en donde predomina el tamaño arcilla, presentando una consistencia lodosa. Se observaron dos estructuras nodulares poco notorias de materia orgánica a 79 y 92 cm, así como un ofiuroideo a 91 cm. A causa del reducido tamaño de los granos la composición mineralógica se detalla en el apartado de “Descripción microscópica”.

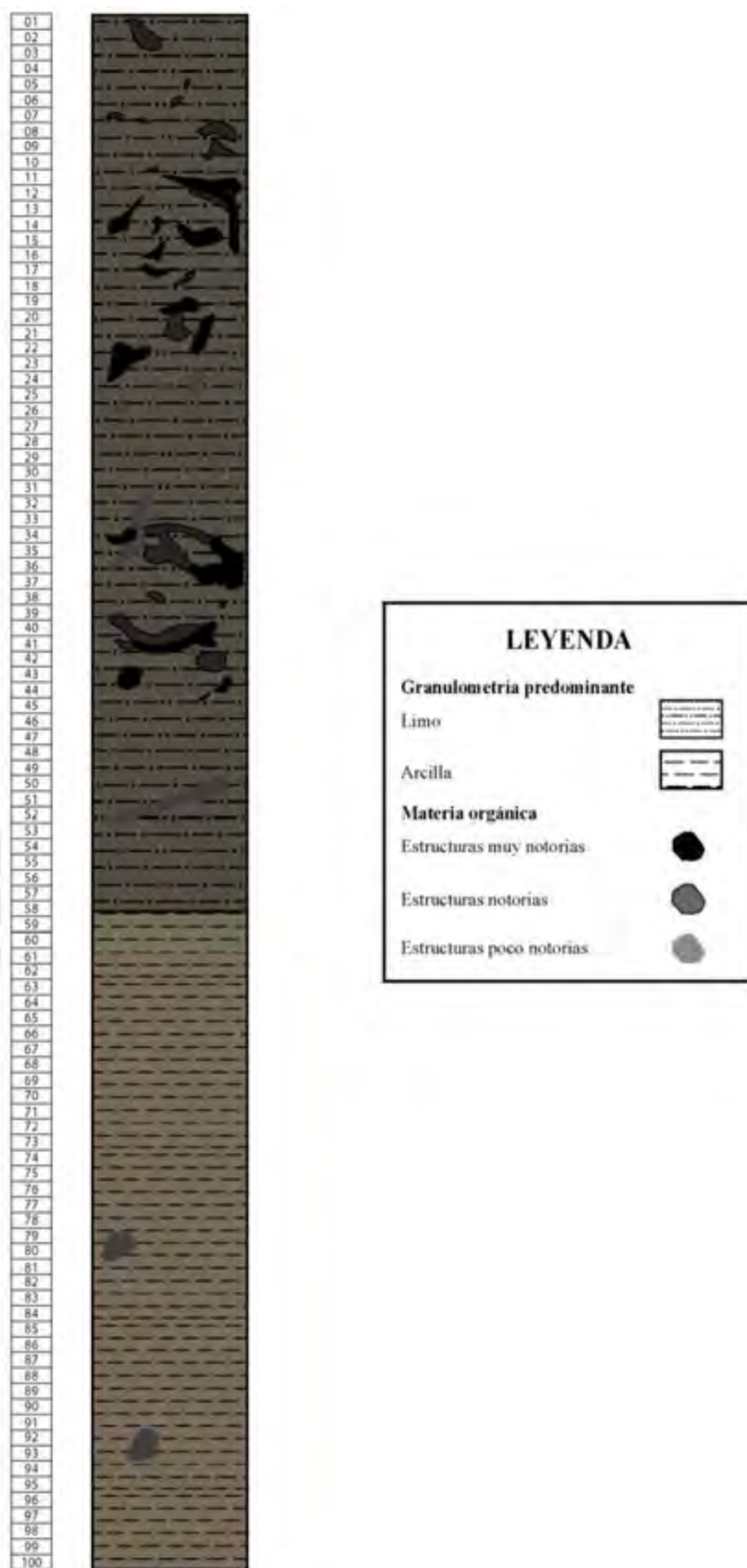


Figura 4-7: Esquematzación de la granulometría, color y materia orgánica del testigo obtenido en la estación AC3. Las estructuras de materia orgánica se representan a escala y corresponden a aquellas presentes en la superficie de corte del testigo.

4.4.2. Descripción microscópica

Con base en los quiebres de los perfiles geoquímicos del C_{org} , S_{tot} y Fe_2O_3 , se eligieron un total de 36 muestras (Tabla 4-4) para su análisis bajo el microscopio. Como los elementos que conforman especies de complejos aniónicos en el agua no conformaron fases minerales propias, este análisis, mediante microscopía óptica, se enfocó en una descripción de la mineralogía general, junto con una semi-cuantificación de materia orgánica, pirita (framboidal y primaria) e hidróxidos de hierro. Esta cuantificación se realizó en una escala discreta del 1 al 5, donde posteriormente se asignaron los porcentajes aproximados mostrados en la Tabla 4-4.

La pirita framboidal no superó los niveles de traza ($<0.5\%$), mientras que la primaria llegó a observarse en concentraciones cercanas al 3%. La máxima abundancia estimada de restos orgánicos fue de 1%. Por otro lado, se identificó dos grupos de hidróxidos: El primer grupo, denominado FeOH-G1, se presentó en niveles de traza (0.125-0.5%), componiéndose de agregados sub redondeados aislados, tanto pseudomórficos según minerales ferromagnesianos alterados (anfíboles y cloritas), como cemento entre litoclastos de plagioclasa. El segundo grupo, denominado FeOH-G2, fue el más abundante (0-10%, Figura 5-6), conformándose por impregnaciones finas sobre litoclastos. Para su cuantificación, se consideró el porcentaje de clastos estimados y la abundancia relativa de hidróxidos de hierro en las impregnaciones en comparación con las arcillas y jarosita.

Tabla 4-4: Semi-cuantificación de materia orgánica, pirita e hidróxidos de hierro en las láminas delgado-pulidas

Testigo	Profundidad (cm)	Muestra	C_{org} (%)	Pirita primaria (%)	Pirita framboidal (%)	FeOH - G1 (%)	FeOH - G2 (%)	FeOH - Total (%)
AC1	14	AC1/G14	1.0%	1.8%	0.4%	0.3%	1.3%	1.5%
AC1	35	AC1/G35	0.4%	1.8%	0.2%	0.5%	2.5%	3.0%
AC1	40	AC1/G40	0.6%	0.6%	0.1%	0.5%	2.9%	3.4%
AC1	60	AC1/G60	0.2%	1.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%
AC1	65	AC1/G65	0.8%	1.2%	0.4%	0.3%	5.0%	5.3%
AC1	75	AC1/G75	0.2%	3.0%	0.2%	0.3%	2.5%	2.8%

Testigo	Profundidad (cm)	Muestra	C _{org} (%)	Pirita primaria (%)	Pirita framboidal (%)	FeOH - G1 (%)	FeOH - G2 (%)	FeOH - Total (%)
AC1	80	AC1/G80	0.8%	1.2%	0.4%	0.3%	5.0%	5.3%
AC1	90	AC1/G90	0.2%	3.0%	0.1%	0.3%	5.7%	6.0%
AC1	95	AC1/G95	0.2%	3.0%	0.1%	0.3%	0.0%	0.3%
AC1	140	AC1/G140	0.2%	3.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%
AC1	160	AC1/G160	0.2%	3.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%
AC1	220	AC1/G220	0.2%	3.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%
AC1	250	AC1/G250	0.2%	3.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%
AC2	2	AC2/G2	0.2%	0.6%	0.0%	0.5%	0.0%	0.5%
AC2	4	AC2/G4	0.4%	1.2%	0.1%	0.5%	0.0%	0.5%
AC2	6	AC2/G6	0.6%	1.2%	0.1%	0.5%	2.0%	2.5%
AC2	8	AC2/G8	0.6%	0.6%	0.1%	0.5%	4.3%	4.8%
AC2	10	AC2/G10	0.6%	1.2%	0.2%	0.5%	0.0%	0.5%
AC2	16	AC2/G16	0.8%	1.2%	0.3%	0.5%	6.7%	7.2%
AC2	30	AC2/G30	0.6%	0.6%	0.2%	0.5%	8.6%	9.1%
AC2	35	AC2/G35	0.2%	0.6%	0.3%	0.5%	10.0%	10.5%
AC2	70	AC2/G70	1.0%	0.6%	0.4%	0.5%	1.0%	1.5%
AC2	85	AC2/G85	0.8%	1.2%	0.4%	0.3%	2.9%	3.1%
AC2	130	AC2/G130	1.0%	1.2%	0.4%	0.3%	2.9%	3.1%
AC2	135	AC2/G135	1.0%	1.2%	0.4%	0.3%	2.7%	2.9%
AC2	185	AC2/G185	1.0%	1.2%	0.4%	0.5%	2.9%	3.4%
AC3	18	AC3/G18	0.4%	3.0%	0.1%	0.5%	5.7%	6.2%
AC3	25	AC3/G25	0.6%	3.0%	0.1%	0.5%	8.3%	8.8%
AC3	30	AC3/G30	0.4%	1.8%	0.1%	0.3%	2.3%	2.5%
AC3	40	AC3/G40	0.8%	3.0%	0.2%	0.3%	2.0%	2.3%
AC3	45	AC3/G45	0.6%	0.6%	0.3%	0.3%	5.7%	6.0%
AC3	50	AC3/G50	1.0%	0.6%	0.3%	0.5%	2.9%	3.4%
AC3	60	AC3/G60	0.8%	1.2%	0.3%	0.3%	6.7%	6.9%
AC3	85	AC3/G85	0.8%	1.2%	0.4%	0.3%	10.0%	10.3%
AC3	90	AC3/G90	0.6%	1.2%	0.1%	0.3%	7.5%	7.8%
AC3	98	AC3/G98	0.6%	0.6%	0.2%	0.5%	5.1%	5.6%

A continuación se detalla lo observado bajo el microscopio:

- **Anfíboles:** Se encuentran en cantidades bajas a moderadas mostrando una coloración verdosa y frecuente reemplazamiento por cloritas (F05 de la Figura 4-8). Mayormente, presentan hábito prismático corto y se encuentran aislados,

con bordes angulosos a sub redondeados; en menor medida, pueden encontrarse dentro de litoclastos.

- **Apatito:** Se encuentra como cristales subhedrales y en cantidades muy escasas, mayoritariamente dentro de litoclastos de plagioclasa y cuarzo.
- **Biotita:** Se encuentra en cantidades muy escasas, presentando cristales con formas irregulares y bordes sub redondeados a redondeados. Debido a su alto grado de alteración, junto a impregnaciones de cloritas e hidróxidos de hierro, presenta colores anómalos de interferencia y un clivaje basal parcialmente perdido, aunque mantiene su extinción paralela característica.
- **Carbonatos:** Se encuentran en cantidades bajas a moderadas y aparecen como cristales aislados anhedrales a subhedrales con bordes angulosos a redondeados. En ocasiones, sus bordes son irregulares, posiblemente debido a la corrosión por acidez y/o al desgaste mecánico. También se presentan masivamente impregnando litoclastos conformados por cuarzo y feldespatos (+ epidota y pirita, F02 de la Figura 4-8) y, en menor proporción, como producto del reemplazo de plagioclasas.
- **Cloritas:** Se encuentran en cantidades entre escasas a poco abundantes. Poseen cristales con bordes redondeados difusos, hábito fibroso y en ocasiones con disposición radial. Se encuentran como relleno de vesículas volcánicas, presentando impregnaciones de óxidos de hierro (F03 de la Figura 4-8). Asimismo, se encuentran dentro de litoclastos de feldespatos y cuarzo, principalmente como producto del reemplazamiento de anfíboles (F05 de la Figura 4-8).
- **Cuarzo:** Se presenta en cantidades moderadas a abundantes. Mayoritariamente como parte de litoclastos, en cristales anhedrales, acompañado de feldespatos,

epidota, clorita y pirita. También conforma fragmentos líticos monominerales, con bordes subredondeados, compuestos por microcristales subgranulares. Cuando se presenta aislado, sus cristales poseen formas anhedrales y sus bordes son angulosos a subangulosos. Frecuentemente, los litoclastos de cuarzo se encuentran parcialmente cubiertos por carbonatos e impregnados de hidróxidos de hierro y jarosita.

- **Epidota:** Su abundancia es proporcional al contenido de pirita primaria. Se presenta mayormente como cristales con formas anhedrales a subhedrales, dentro de litoclastos de feldespatos, cuarzo, pirita y calcita (F02 de la Figura 4-8), o como cristales subredondeados aislados y alterados.
- **Feldespatos:** Es el grupo mineral más abundante en las muestras. Se presentan como cristales subhedrales aislados (con bordes angulosos a sub redondeados), dentro de litoclastos (junto a cuarzo, epidota y pirita) y también como cristales prismáticos, cementados por hidróxidos de hierro. Cabe resaltar que, debido a que se trata de sedimento (material no consolidado) con abundantes impregnaciones de hidróxidos de hierro, arcillas y jarosita, no siempre fue posible diferenciar entre feldespato potásico y plagioclasa; aunque se logró determinar que esta última predomina. Por último, en las muestras más superficiales, las plagioclasas incluyen cristales amarillentos de jarosita en los planos de fractura (F01 de Figura 4-8).
- **Glauconita:** Es un mineral muy escaso en las muestras. Se presenta como agregados aislados con bordes redondeados, conformados por cristales micro escamosos (F06 de la Figura 4-8).
- **Hematita:** Se presenta en cantidades moderadas. Por un lado, se observa como producto del reemplazamiento de magnetita (martitización, F09 de la Figura 4-8);

y por otro, como cristales anhedrales a subhedrales, diseminados dentro de litoclastos de plagioclasa y cuarzo.

- **Hidróxidos de Fe:** Se encuentran en cantidades poco abundantes a moderadas. Principalmente, se presentan como impregnaciones en litoclastos de cuarzo y plagioclasa y a su vez conforman pellets (F04 de Figura 4-8). En menor medida, rodean (total o parcialmente) óxidos de hierro, serpentina, y pirita. Se identificaron agregados subredondeados rojizos, con variable grado de translucidez, y goethita anhedral. Por último, pueden encontrarse tanto aislados como dentro de litoclastos, en ambos casos con bordes angulosos a redondeados. Ocasionalmente, cementan pequeños cristales alargados de plagioclasa.
- **Jarosita:** Se encuentra en cantidades moderadas, principalmente como impregnaciones masivas sobre litoclastos o recubriéndolos junto a arcillas e hidróxidos de hierro, formando pellets (F04 de Figura 4-8). También se encontraron cristales escamosos de un color amarillo intenso en los planos de fracturas de las plagioclasas, y, ocasionalmente, sobre agregados de cuarzo (F01 de la Figura 4-8).
- **Leucoxeno:** Se encuentra en cantidades escasas. Se presenta principalmente como alteración del rutilo.
- **Magnetita:** Se encuentra en cantidades poco abundantes a moderadas. Se presenta principalmente como cristales con formas subhedrales, diseminados en litoclastos de plagioclasa y cuarzo (F05 de la Figura 4-8) y, en menor proporción, como cristales aislados con bordes angulosos. Frecuentemente presenta martitización según los planos de clivaje del octaedro (F09 de la Figura 4-8) y ocasionalmente se encuentra rodeada de hidróxidos.

- **Olivino:** Se encuentra en muy escasas concentraciones. Los pocos ejemplares son cristales alterados, con formas subhedrales y bordes subredondeados.
- **Óxidos e hidróxidos de Mn:** Se encuentran en cantidades escasas. Se presentan como cristales con formas anhedrales y bordes subredondeados, ya sea aislados o diseminados en litoclastos de cuarzo y feldespatos. Ocasionalmente, están rodeados de hidróxidos de Fe.
- **Pirita framboidal:** Se encuentra en concentraciones muy bajas, a tal punto que solo cuando las concentraciones de pirita primaria son bajas, las mayores concentraciones de pirita framboidal pueden reflejarse como una anomalía positiva en los perfiles de la concentración de S_{tot} . Principalmente, se presenta como acumulaciones de framboides (agregados esféricos de microcristales de pirita) dentro de materia orgánica (F02, F03, F04 y F05 de la Figura 4-9), aunque también puede encontrarse alineada en los exteriores de estructuras orgánicas (F01 de la Figura 4-9) o aislada (especialmente cuando las estructuras orgánicas no son abundantes, F07 de la Figura 4-8), ya sea dentro o fuera de litoclastos. En el primer caso, el tamaño de los framboides está supeditado al espacio interno de las estructuras orgánicas, motivo por el cual en ocasiones presentan una forma ovalada y poseen un menor tamaño (9.8 μm en promedio) en comparación a aquellos aislados ubicados fuera de los litoclastos (16.9 μm en promedio).
- **Pirita primaria:** Su abundancia está en correlación con la concentración de S_{tot} en los perfiles geoquímicos. Los cristales que conforman litoclastos, junto a cuarzo y plagioclasa, tienen formas subhedrales y poseen un menor tamaño. Por otro lado, los cristales aislados presentan formas anhedrales a subhedrales con bordes subangulosos a subredondeados, y grado variable de fracturamiento (F08 de la Figura 4-8). Algunos cristales aislados, especialmente a menor profundidad,

presentan bordes irregulares, característicos de alteración a consecuencia de condiciones ácidas (F09 de la Figura 4-8).

- **Piroxenos:** Es un mineral escaso en las muestras, siendo la augita la especie predominante. Se presentan como cristales aislados prismáticos, con formas anhedrales a subhedrales y bordes angulosos.
- **Serpentina:** Se encuentra en cantidades escasas, principalmente como agregados aislados de cristales con hábito fibroso, disposición radial, bordes subredondeados, ligeramente deformados y, en menor proporción, dentro de litoclastos. Posiblemente se formó a partir de la alteración de olivino.
- **Otros minerales ferromagnesianos:** Se encontró un mineral verde con notable pleocroísmo y colores de interferencia verdes-amarillentos anómalos. Poseen un hábito fibroso perpendicular a la superficie sobre la cual se desarrollan (vacuolas volcánicas).
- **Restos orgánicos:** En general, presentan una buena correlación con la concentración de C_{org} en los perfiles geoquímicos. Principalmente, se encontraron organismos silíceos, predominando las diatomeas (mayoritariamente ovoides, en menor proporción discoidales y triangulares; F01, F04, F05, F06, F07, F08 y F09 de la Figura 4-10) junto a organismos con múltiples valvas silíceas redondeadas (F02 de la Figura 4-10), organismos alargados con una estructura tubular interna (F03 de la Figura 4-10) y otras formas de fitoplancton (F05 de la Figura 4-10). En menor proporción, se encontraron organismos carbonatados, como foraminíferos.

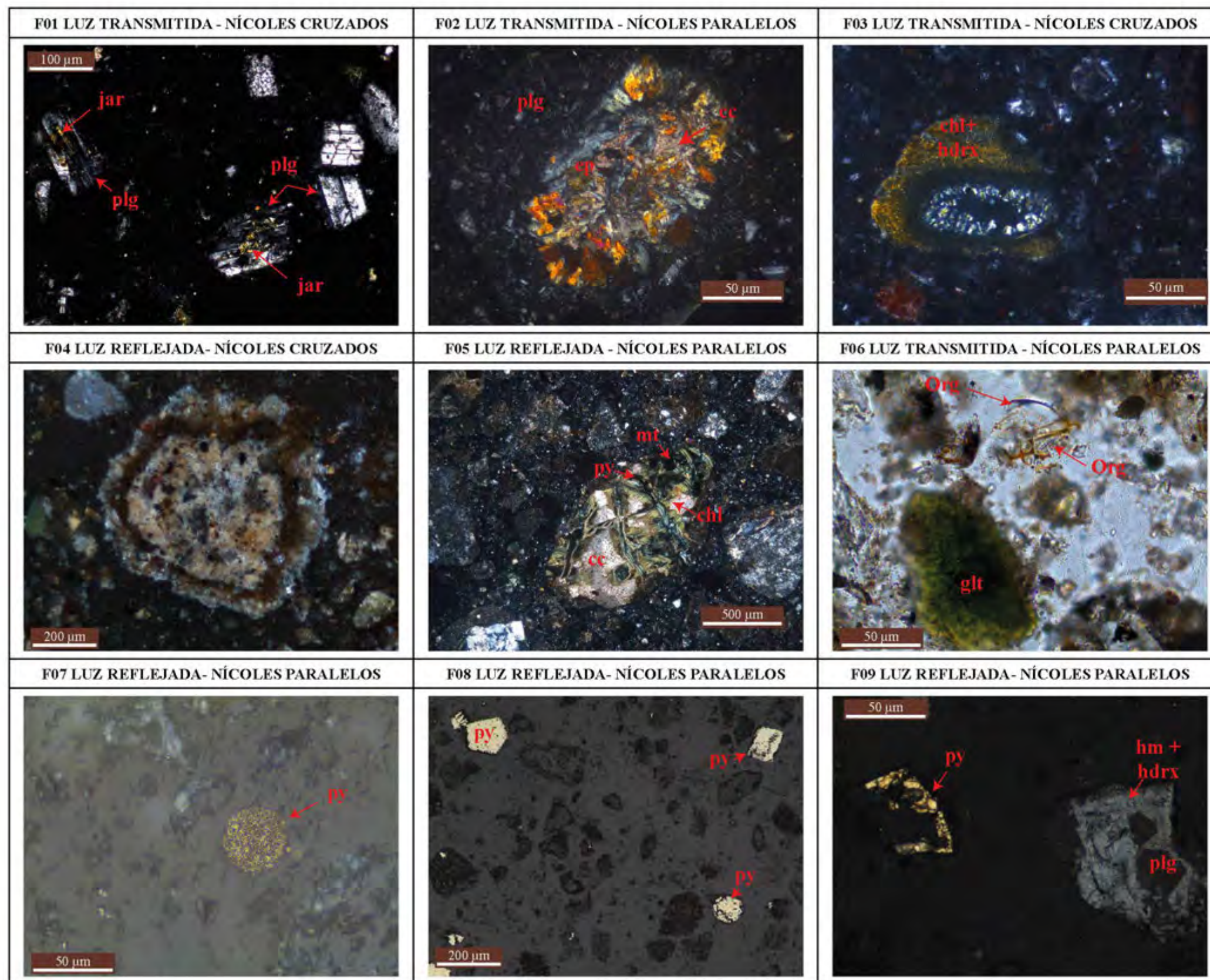


Figura 4-8: Resumen de la mineralogía de las muestras. F01: Plagioclasa con jarosita en los planos de fractura F02: Litoclastos de feldespatos con epidota e impregnaciones de carbonatos. F03: Vacuola volcánica rellena parcialmente por cloritas impregnadas por óxidos de hierro. F04: Pellet. F05: Molde de anfíbol reemplazado por cloritas, junto a carbonatos, magnetita y pirita primaria. F06: Glauconita. F07: Pirita framboidal aislada. F08: Pirita primaria con distinto grado de redondez. F09: Pirita primaria con bordes irregulares, probable producto del ataque ácido.

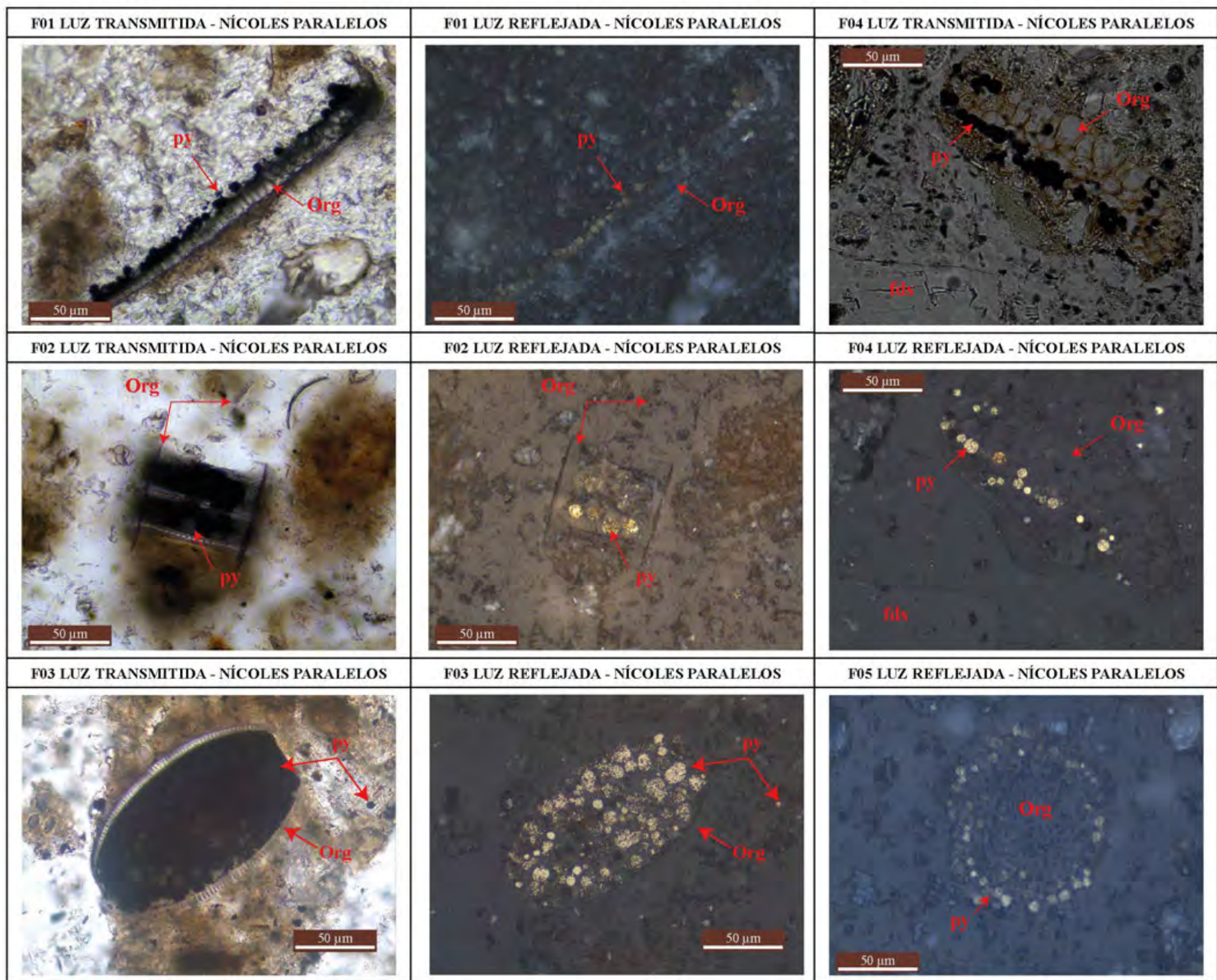


Figura 4-9: Asociación de pirita framboidal dentro y alrededor de restos orgánicos.

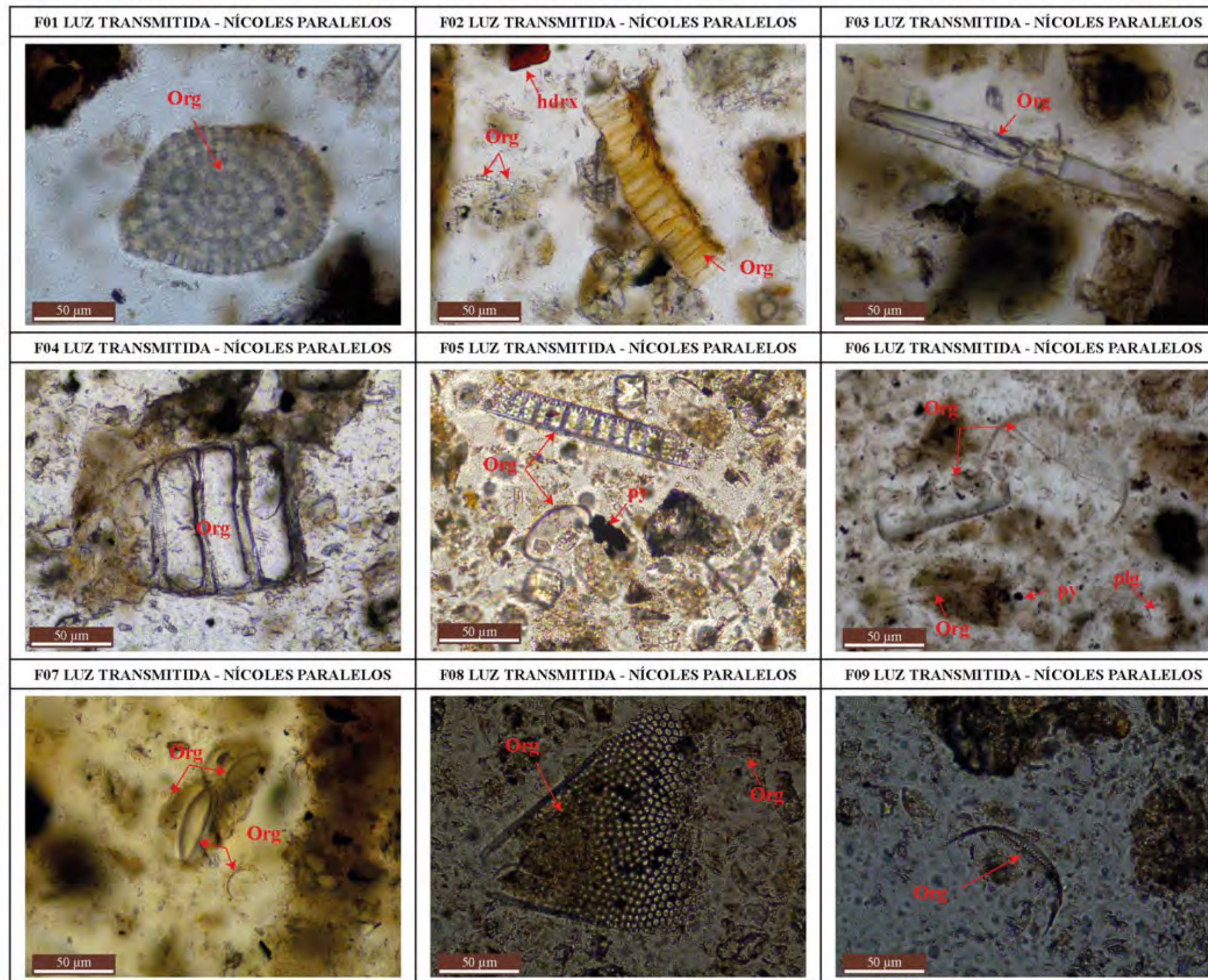


Figura 4-10: Restos orgánicos observados en las muestras. F01: Organismos carbonatados. F02: Organismos con valvas silíceas cubiertos de óxidos. F03: Organismos alargados con una estructura tubular interna. F04: Algas. F05: Algas con estructuras rectangulares. F06: Diatomea discoidal. F07: Diatomeas ovoides F08: Diatomeas triangulares. F09: Diatomea con forma de medialuna.

4.5. Modelamiento geoquímico

Empleando los datos geoquímicos y la base de datos LLNL (por los motivos indicados en el apartado de “Análisis de agua”), se procedió a calcular los índices de saturación (SI, por sus siglas en inglés) de las especies de Fe presentes. Se observó que la temperatura promedio de las muestras de agua poral (17.59°C,) es mayor que la de columna de agua (5.99°C, analizadas al instante) en 11.6°C (Figura 4-11). Como se indicó en el apartado de “Muestreo en el sedimento”, la obtención del agua de poros (proceso que se extendió por más de 8 horas) se realizó en el laboratorio húmedo del buque, cuya temperatura es similar a la obtenida en dichas muestras. Asimismo, cabe recordar que los testigos se dejaron reposar durante 24 horas, previo al proceso de perforación utilizando los rhizon. Ambos factores pudieron alterar tanto la temperatura (aumentándola) como el potencial redox (condiciones más oxidantes que las presentes en el fondo marino).

Por los motivos anteriormente expuestos, se optó por simular los índices de saturación corrigiendo la temperatura (restando 5 y 10°C). Adicionalmente, como la medición del Eh se realizó días después de la obtención del testigo, también se optó por realizar una corrección de este parámetro restando hasta 0.65 V (para situarse dentro del campo de estabilidad del agua, Figura 4-12) de la medición en campo, con una resolución de 0.05 V. Cabe resaltar que dichas correcciones únicamente se realizaron con las muestras de agua intersticial, puesto que en la columna de agua las mediciones se realizaron al momento de la toma de la muestra.

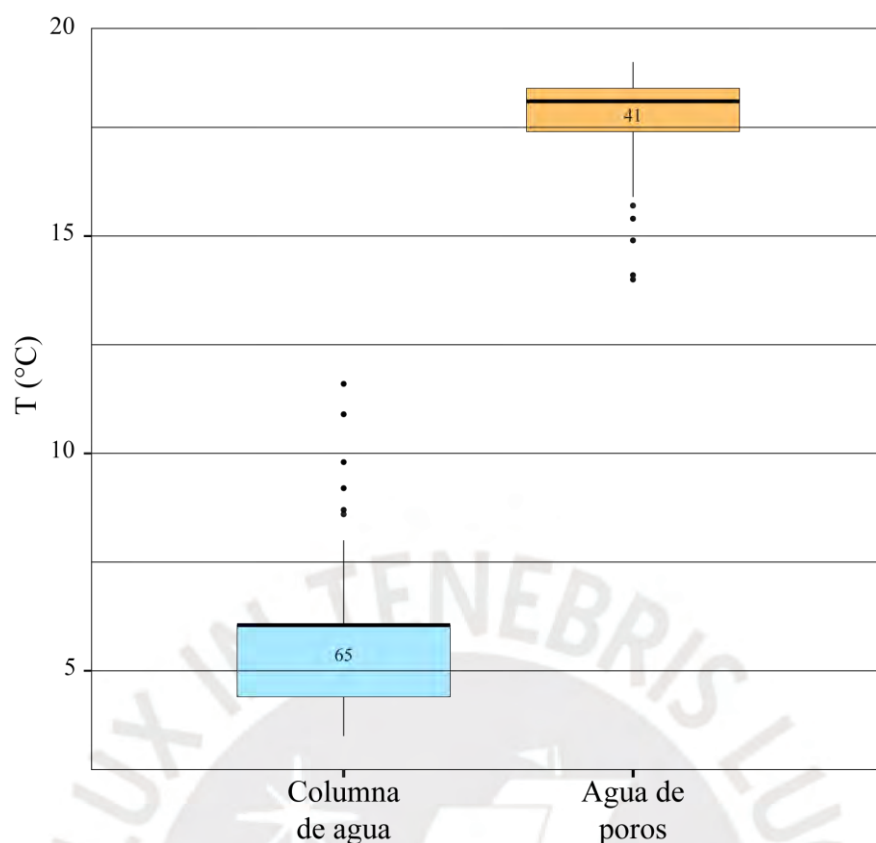


Figura 4-11: Boxplot de la temperatura por tipos de muestra. Las muestras de agua poral muestran una temperatura más homogénea y considerablemente mayor a las obtenidas en la columna de agua marina, lo cual se debería al almacenamiento del testigo previo a la medición. No se excluyen las muestras con error en mediciones geoquímicas ni aquellas de la estación BE. Solo un *outlier* de las muestras de columna de agua fue tomada en el testigo (AC1/2cm fondo).

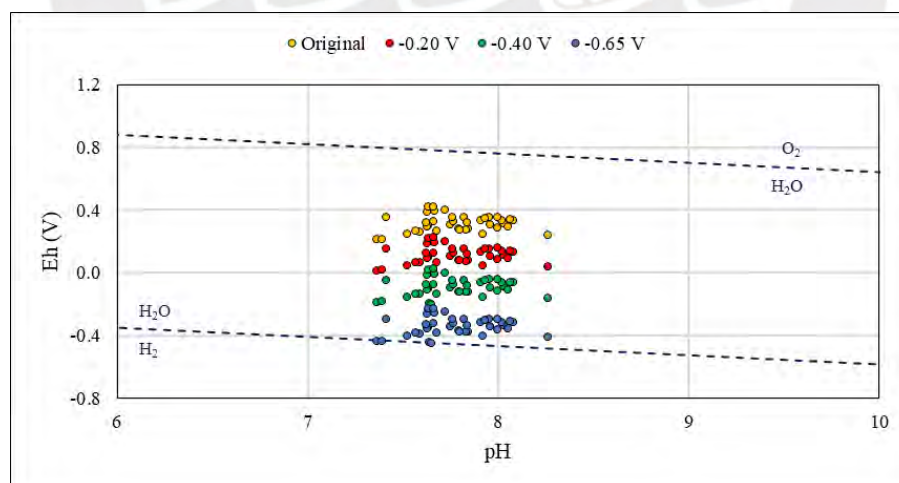


Figura 4-12: Ploteo del pH junto a las correcciones de Eh. En azul se observa el campo de estabilidad del agua.

Las principales especies de hierro presentes fueron: hidróxido férrico, hematita, jarosita, goethita, magnetita y cromita. Para poder esquematizar mejor el SI se recurrió a graficar las ecuaciones de disolución-precipitación de los compuestos, considerando las actividades de las

especies que participan en dichas reacciones. Así, las muestras ubicadas por debajo, sobre o por encima de la línea (considerando una constante de equilibrio según la temperatura de la muestra) poseerán un SI negativo, cero o positivo, respectivamente. Según la base de datos empleadas, dichas reacciones son:



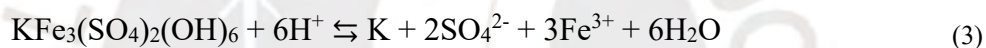
$$\text{Log}[\text{Fe}^{3+}] = K - \text{pH}$$

Ecuación (1): Disolución-precipitación del hidróxido férrico



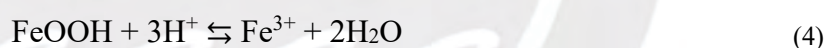
$$\text{Log}[\text{Fe}^{3+}] = 0.5K - 3\text{pH}$$

Ecuación (2): Disolución-precipitación de la hematita



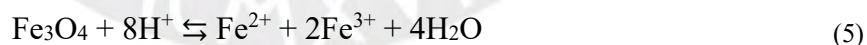
$$3\text{Log}[\text{Fe}^{3+}] + 2\text{Log}[\text{SO}_4^{2-}] + \text{Log}[\text{K}^+] = K - 6\text{pH}$$

Ecuación (3): Disolución-precipitación de la jarosita



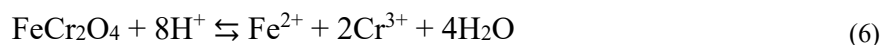
$$\text{Log}[\text{Fe}^{3+}] = K - 3\text{pH}$$

Ecuación (4): Disolución-precipitación de la goethita



$$2\text{Log}[\text{Fe}^{3+}] + \text{Log}[\text{Fe}^{2+}] = K - 8\text{pH}$$

Ecuación (5): Disolución-precipitación de la magnetita



$$\text{Log}[\text{Fe}^{2+}] + 2\text{Log}[\text{Cr}^{3+}] = K - 8\text{pH}$$

Ecuación (6): Disolución-precipitación de la cromita

En la columna de agua, las principales especies encontradas en la base de datos se muestran en la Tabla 4-5. Los sulfuros, cloruros, sulfatos y carbonatos muestran un SI menor a 0 en la totalidad de las muestras (60, Tabla 4-5). Los óxidos e hidróxidos de Fe^{2+} también presentan un SI negativo; aunque tres muestras de la estación AC2, caracterizadas por valores de potencial de reducción (en adelante *pe*) menores a 7.1, presentan un SI ligeramente positivo (entre 0.4 y 2.3). En estos grupos minerales, el hidróxido férrico es el único compuesto de Fe^{3+} que posee siempre un SI negativo, mientras que la goethita y la hematita tienen siempre un SI positivo (Figura 4-13).

Tabla 4-5: Número de muestras con un SI negativo por compuesto y tipo de muestra

Grupo	Compuesto	Agua poral	Columna de agua
Hidróxidos	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	41	60
	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	6	60
	Goethita	0	0
Óxidos	Cromita	2	57
	Magnetita	0	60
	Hematita	0	0
	FeO	41	60
Cloruros	Lawrencita	41	60
	Molisita	41	60
Carbonato	Siderita	41	60
Silicatos	Fayalita	41	*
	Hedenbergita	41	*
Sulfatos	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	41	60
	FeSO_4	41	60
	Melanterita	41	60
	Jarosita	34	60
	Jarosita-Na	41	60
Sulfuros	Troilita	41	60
	Pirrotina	41	60
	Pirita	41	60

NOTA: No se consideraron las muestras adquiridas en la estación BE, muestras que no presentaron mediciones de pH y Eh, ni aquellas descartadas en el apartado de Tratamiento de datos. (*) Especies no presentes según la base de datos utilizada.

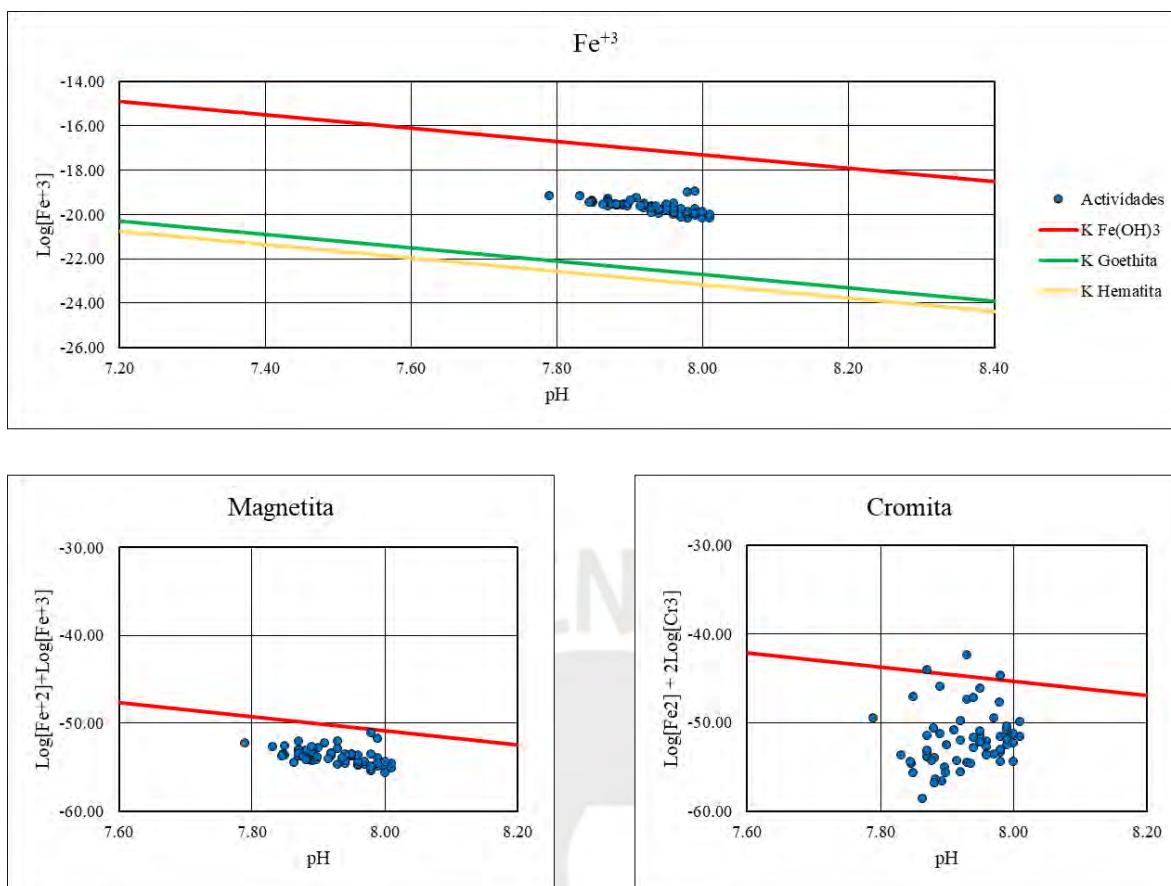


Figura 4-13: SI del hidróxido férrico, goethita, hematita, magnetita y cromita en la columna de agua. No se consideran las muestras AC3/160, AC3/180 (ver apartado de “Tratamiento de datos”) ni de la estación BE.

En el agua intersticial, los sulfuros, sulfatos (salvo la jarosita), silicatos, carbonatos, cloruros y óxidos ferrosos (salvo la cromita) presentan un SI negativo en la totalidad de las muestras (41, Tabla 4-5). La jarosita posee un SI mayor a 0 (entre 0.3 a 1.5) en siete muestras de la estación AC1, las cuales se caracterizan por presentar condiciones reductoras (p_e entre 3.4 y 4.7) junto a un pH cercano al neutro (entre 7.4 y 7.8). La cromita solo posee un SI ligeramente negativo (-0.4 y -0.1) en dos muestras de la estación AC3, las cuales destacan por presentar condiciones oxidantes (p_e de 7.2 y 7.4). El caso opuesto ocurre con los hidróxidos y óxidos de Fe^{3+} (Figura 4-14), ya que, con excepción del hidróxido férrico, estos minerales presentan un SI positivo en la totalidad de las muestras. El hidróxido férrico presenta un SI ligeramente negativo (entre -0.3 a -0.1) únicamente en 6 muestras que poseen un pH básico (entre 7.7 y 8.1).

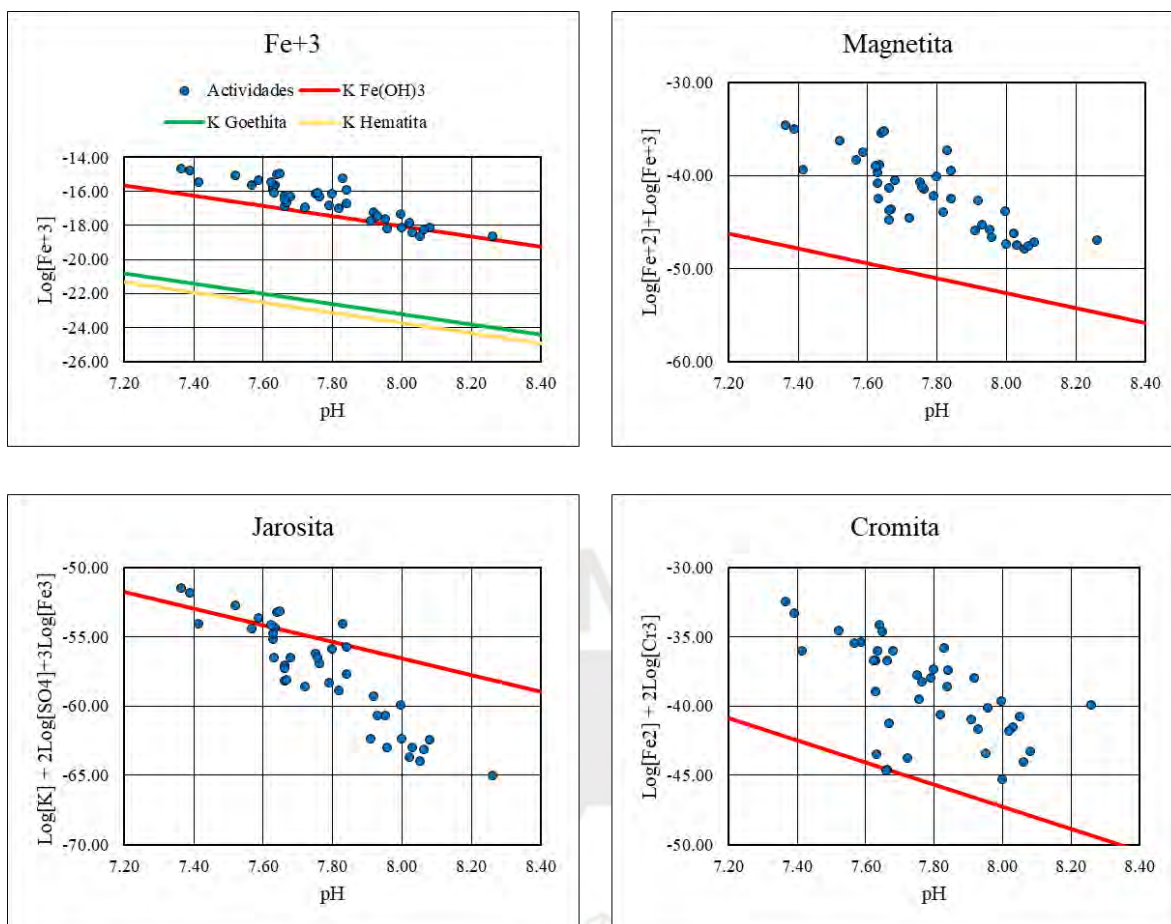


Figura 4-14: SI del hidróxido férrico, goethita, hematita, magnetita, jarosita y cromita en el agua de poros. No se consideran las muestras AC1/P10 ni AC1/P35 (ver apartado de “Tratamiento de datos”).

A pesar de modificar el Eh y la temperatura, el óxido e hidróxido ferroso, los cloruros, sulfatos (con excepción de la jarosita) y silicatos presentaron un SI menor a 0 en la totalidad de las muestras (Tabla 8-13). La jarosita necesita únicamente una corrección de -0.16 V para que todas las muestras posean un SI negativo. Esta corrección necesaria es menor (-0.12 V) si se disminuye también la temperatura en 10°C. Con excepción de dos muestras (AC1/G220 y AC1/G245), la siderita presenta un SI negativo a pesar de variar el Eh y la temperatura. Dichas excepciones ocurren al disminuir el Eh en 0.10 V (o en 0.16 V a -10 °C) y desaparecen al disminuirlo en más de 0.55 V. Por otro lado, al variar ligeramente ya sea la temperatura (-5°C) o el Eh (-0.05V), ninguna muestra presenta cromita con un SI negativo.

El número de muestras en donde los óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} poseen un SI negativo aumenta al reducir la temperatura o al disminuir el Eh (Tabla 8-13). Para que el hidróxido

férrico presente un SI negativo en la totalidad de las muestras es necesario disminuir el Eh en 0.28 V, si se mantienen las temperaturas originales. Si bien el cambio de temperatura no modifica considerablemente la cantidad de Eh a disminuir (0.24 V) para que el SI sea menor a 0 en todas las muestras, el número de muestras que logran un SI negativo es notoriamente mayor al considerar temperaturas menores, especialmente con una disminución del Eh en hasta -0.22 V (Figura 4-15).

La goethita empieza a presentar un SI menor a 0 al reducir el Eh en -0.40 V (2 muestras) y no es hasta que se reduce en -0.60 V que esto ocurre en la totalidad de las muestras. Si bien el rango de corrección de Eh para lograr el mismo efecto se mantiene, una menor temperatura propicia ligeramente que más muestras presenten un SI negativo para una misma corrección de Eh (Figura 4-15). Algo similar ocurre con el rango de corrección para la magnetita (desde -0.40 hasta -0.65 V) y la hematita (desde -0.43 hasta -0.65 V), cuya variación al disminuir la temperatura es mínima (-0.35 hasta -0.60 V y -0.40 hasta -0.60 V, respectivamente), aunque permite obtener un SI menor a 0 en más muestras con una menor corrección de Eh (Figura 4-15).

La variación del SI de los sulfuros presenta un comportamiento opuesto al de los óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} al cambiar los parámetros fisicoquímicos (Tabla 8-13). A partir de una reducción de Eh de -0.40 V la pirita comienza a presentar un SI positivo, mientras que la troilita y la pirrotina lo hacen a partir de una corrección de -0.42 V, aunque no es hasta disminuir 0.65 V que dichos compuestos poseen un SI mayor a 0 en la totalidad de las muestras. A diferencia de lo que sucede con los óxidos e hidróxidos de hierro, el efecto de la temperatura en el SI es despreciable (Figura 4-15).

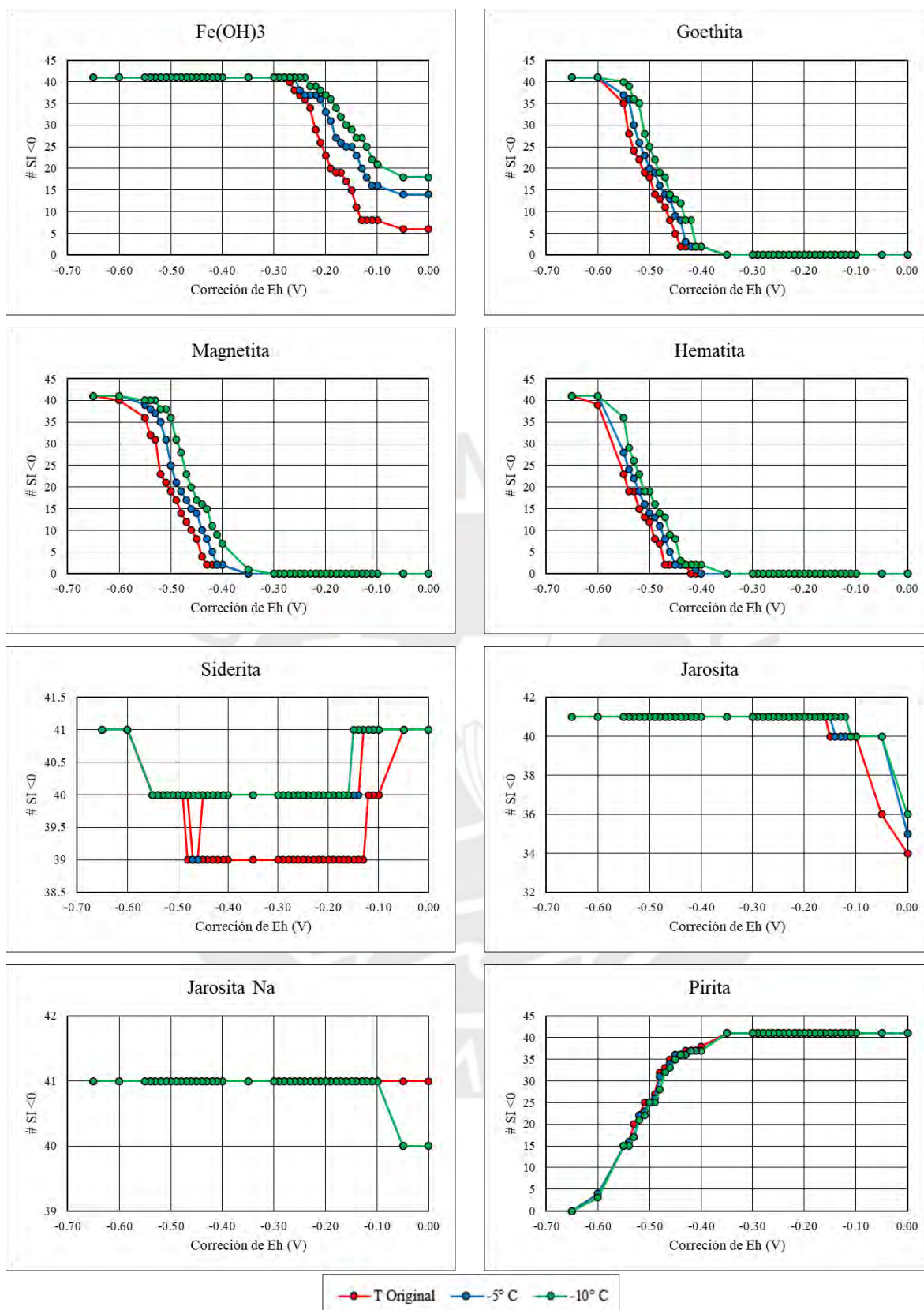


Figura 4-15: Número de muestras con un SI negativo por especie al cambiar el Eh. No se consideran las muestras AC1/P10 ni AC1/P35 (ver apartado de “Tratamiento de datos”).

5. Discusión

5.1. Elementos mayores

Los elementos mayoritarios que se presentan como aniones monovalentes son el Br y Cl, mientras que el S se presenta como ion sulfato (SO_4^{2-}). Debido a que el Cl (18670-20530 mg/L) y SO_4^{2-} (2490-2790 mg/L) se encuentran en altas concentraciones en la columna de agua y poseen una alta solubilidad, estos aniones no son afectados por procesos de sorción (Appelo & Postma, 2005). Esto permite que las pequeñas variaciones de su concentración se reflejen en la estratificación de la columna de agua (Figura 8-1), permitiendo su uso como guía para identificar dichos estratos o capas en AC1 y AC2. Por otro lado, el Br (Esquema 8-3) se presenta en una concentración de dos a tres órdenes de magnitud menor (26.6-74.3 mg/L - Tablas 8-10 y 8-11), por lo cual es más susceptible a factores externos y no refleja dicha estratificación.

Rakusa-Suszczewski (1980) identificó que las escorrentías superficiales y el deshielo de bloques que se desprenden de los glaciares aledaños generan cambios rápidos de salinidad y temperatura en la bahía Almirantazgo. El efecto de la dilución se observa también en las muestras de agua marina en caleta Cardozo analizadas por Dold et al. (2013), las cuales son influenciadas por el DAR y poseen una concentración promedio de Cl (Esquema 8-4) y SO_4^{2-} (Esquema 8-14) considerablemente menor (60% y 44%, respectivamente) a lo encontrado en las estaciones de la ensenada Ezcurra (AC1, AC2 y AC3). Adicional a las escorrentías e *icebergs*, un tercer factor que podría causar una variación de la concentración de Br en la columna de agua es la producción de diatomeas planctónicas, puesto que su pared celular es rica en Br (Santos et al., 2007). No obstante, este factor sería menos relevante ya que solo 2 de las 53 especies de diatomeas encontradas por Fernandes et al. (2014) son planctónicas (las restantes son bentónicas).

La estación AC3 exhibe un comportamiento diferente, donde la concentración de los aniones mayoritarios en su columna de agua (incluyendo el Br) presentan una variación ínfima (Tabla 8-10), lo cual se refleja en perfiles del CTDO sin quiebres abruptos (Figura 8-1). Los perfiles evidencian una menor temperatura en la estación AC3, aunque los datos de conductividad eléctrica y oxígeno disuelto poseen rangos similares a los observados en otras estaciones (comparados hasta una misma profundidad máxima). Asimismo, el pH muestra valores más cercanos al neutro, mientras que el Eh evidencia condiciones más oxidantes, ambos con poca variación en comparación con las otras estaciones (Figura 4-1).

Rakusa-Suszczewski (1980) identificó que el agua del estrecho de Bransfield ingresa a profundidad a la bahía Almirantazgo y que, debido al *upwelling*, asciende hasta llegar a la superficie, cerca del límite de la bahía con la ensenada Ezcurra (Figura 2-2). Pruszek (1980) y Rakusa-Suszczewski (1980) coinciden en que hay un sistema de flujo de dos fases (Figura 5-1): un flujo predominante controlado por la marea (la cual varía irregularmente) y otro superficial controlado por el viento. También señalan que se pueden diferenciar ambos flujos y hasta observar una estratificación en la columna de agua en condiciones de poco viento. La presencia del flujo superficial se evidencia en el área de estudio en los primeros metros (10 m en AC1 y 5 m en AC2) de los perfiles del CTDO, en los cuales se observan menores valores de los tres parámetros medidos (conductividad eléctrica, temperatura y oxígeno disuelto, Figura 8-1). El flujo proveniente del estrecho de Bransfield causaría una mezcla de agua durante su ascenso, aproximadamente donde se ubica la estación AC3, lo cual explicaría que las concentraciones y parámetros fisicoquímicos sean más homogéneos en este punto.

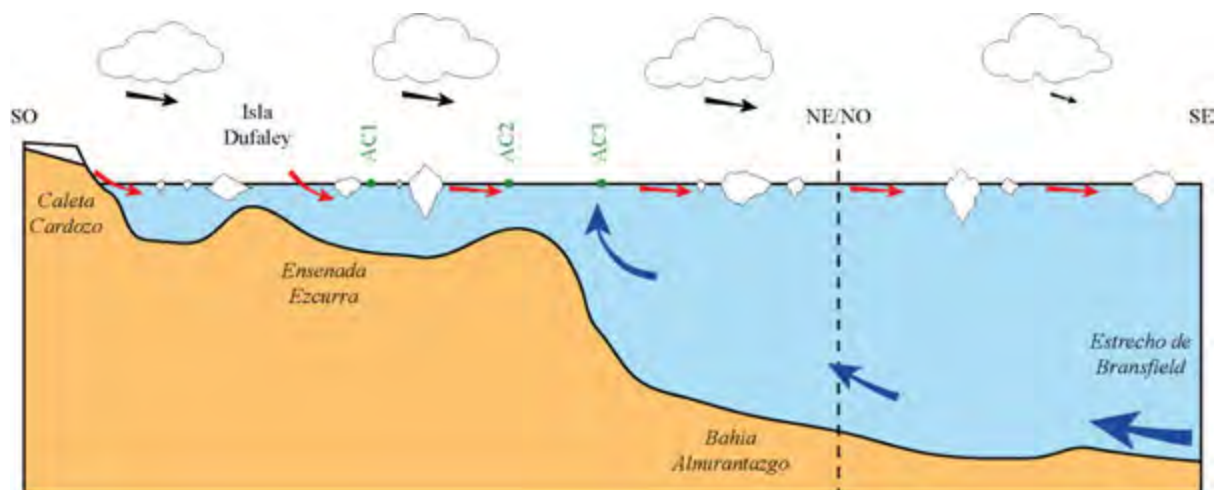


Figura 5-1: Corte esquemático de ensenada Ezcurra (SO-NE) y bahía Esperanza (NO-SE). Las flechas azules indican el ingreso del agua proveniente del estrecho de Bransfield y las rojas indican el flujo superficial producido por escorrentías superficiales y deshielo de *icebergs*. La dirección de viento (flechas negras) dominante es SO-NE (mayor tamaño). Elaborado con la información presentada por Plenzler et al. (2019), Pruszek (1980) y Rakusa-Suszczewski (1980).

5.2. Azufre

La considerable disminución de la concentración de SO_4^{2-} disuelto a mayor profundidad en el agua de poros no se observa en los otros aniones mayoritarios (Br y Cl), los cuales mantienen una concentración aproximadamente constante. Esto es un primer indicio de que el SO_4^{2-} precipita en fase sólida con la profundidad, ya que también se corresponde con un aumento en la abundancia de pirita framboidal (fase en la cual precipitaría) en AC2 y AC3. Sin embargo, la pirita framboidal encontrada durante el estudio microscópico se encuentra en niveles de traza ($<0.5\%$), por lo que no se refleja en el perfil de S_{tot} (0.21-1.56%) en el sedimento. Así, la disminución del sulfato en el agua se explicaría por la reducción del azufre con la profundidad, formando compuestos intermedios (SO_3^{2-} , $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ o S^0) que se mantendrían en solución (Jørgensen et al., 2019).

Por otro lado, la cuantificación de pirita primaria mediante microscopía óptica muestra que ésta controla la concentración de S_{tot} en el sedimento, el cual se caracteriza por su heterogeneidad debido a los diferentes mecanismos de transporte propios de un ambiente glaciar. Destaca el tramo entre 90 a 250 cm de profundidad del testigo AC1, el cual posee altas

concentraciones de pirita primaria (~3%, Figura 5-2), As y S, así como menor contenido de Al, Cr, Fe y V. La baja concentración de Fe, a pesar de la abundante pirita primaria (~ 3%), se debe a la escasez de hidróxidos de Fe en estas profundidades, los cuales en conjunto pueden llegar a superar el 10% en otras muestras. Este tramo de sedimento también se caracteriza por su predominante color gris oscuro, el cual no se observa en otros testigos. La baja concentración de C_{org} obtenido mediante LECO (<0.05%), junto a los escasos restos orgánicos observados bajo el microscopio descartan que dicha coloración del sedimento se deba a la presencia de materia orgánica.

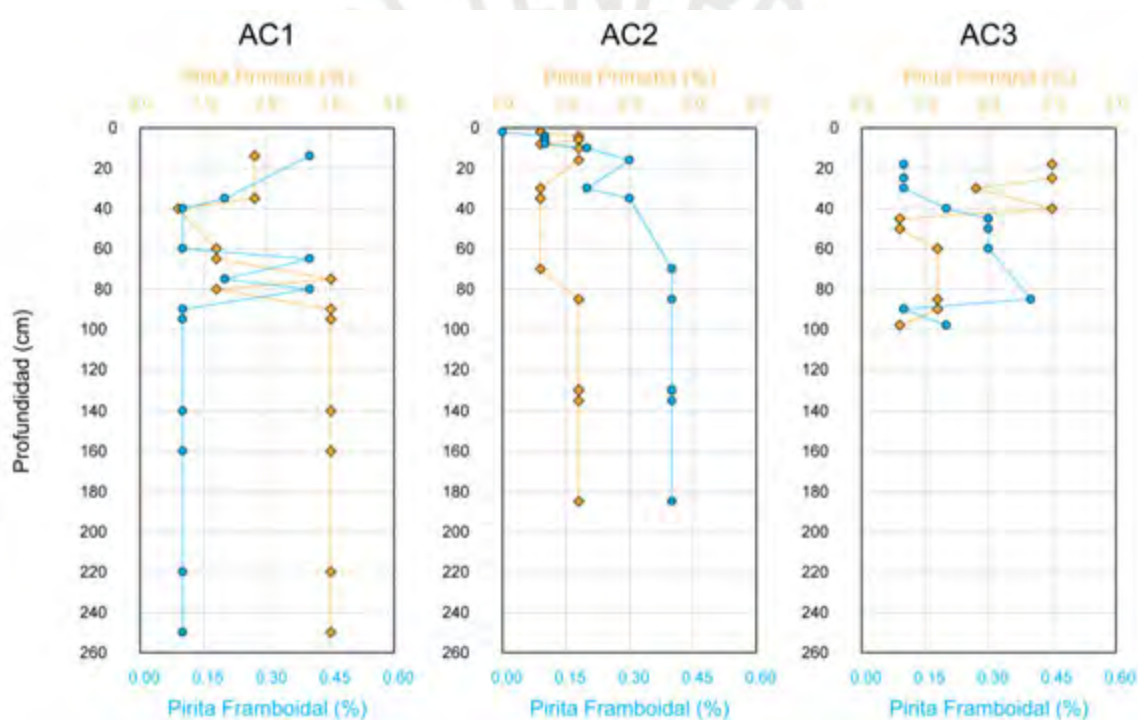


Figura 5-2: Distribución vertical de la pirita primaria (hipógena) y framboidal en el sedimento en los testigos AC1, AC2 y AC3.

Berbel & Braga (2014) analizaron sedimentos marinos someros de las ensenadas Ezcurra y Mackellar, obteniendo valores de hasta 0.5% y 1.6% de S_{tot} , respectivamente. Dichas concentraciones, al igual que las obtenidas en las estaciones AC1, AC2 y AC3 (entre 0.21 y 1.56% de S_{tot} , Tabla 8-12) son notoriamente mayores a las esperadas en mares aeróbicos (<0.13%; Berbel & Braga, 2014). Esto se debe al aporte sedimentario de la costa noroeste de

la ensenada Ezcurra y de la isla Dufaley, lugares donde afloran los Grupos Caleta Cardozo e Isla Dufaley (Figura 2-7), caracterizados por contener gran cantidad de piritita diseminada (Barton, 1965; Birkenmajer, 1980, 1989; Dold et al., 2013; Hawkes, 1961; Soliani & Bonhomme, 1994). Por otro lado, el hecho de que el As muestre un patrón similar al S en AC1 y AC3 (Figura 8-5) sugiere que este elemento estaría incorporado en la piritita primaria.

5.3. Materia orgánica

La concentración de C_{org} es baja (entre 0.04 y 0.62%, Tabla 8-12), y es similar a los valores obtenidos en la zona de estudio por Berbel & Braga (2014), Khim et al. (2001), Khim & Yoon (2003) y Potapowicz et al. (2020), los cuales no superan el 0.6%. Si bien Sanders et al. (2010) y Santos et al. (2007) reportan valores notoriamente superiores (alrededor de 8%), estos no son resultados de mediciones directas, sino que corresponden a la suposición de que la totalidad del LOI se debe al contenido de materia orgánica.

Por un lado, Berbel & Braga (2014) sugieren que la baja concentración de C_{org} es producto de la descomposición de la materia orgánica debido a las condiciones oxidantes del fondo marino, lo cual concuerda con los datos obtenidos por el CTDO en las tres estaciones. Asimismo, la disminución del sulfato en el agua de poros con la profundidad, indicaría un consumo de materia orgánica por microorganismos anaeróbicos, como bacterias sulfato-reductoras (Berner, 1985; Jørgensen et al., 2019; Mozer, 2010). Por otro lado, Khim et al. (2001) identificaron una mayor producción biótica en los últimos años en la confluencia de las ensenadas Mackellar y Martel. En la zona de estudio, el testigo AC1 (menos afectado por las aguas de la bahía Almirantazgo) evidencia una mayor producción de vida en la ensenada Ezcurra. En esta estación, el sedimento muestra mayores concentraciones de C_{org} hacia superficie, observándose una concentración promedio de 0.3% en los primeros 85 cm, la cual contrasta con los tramos más profundos (0.05% en promedio). En este caso, se descarta la

posibilidad de que la materia orgánica se haya degradado totalmente en los niveles más profundos debido a que no se observaron restos de diatomeas bajo el microscopio (Figura 5-3), a diferencia de los niveles más someros. Estas algas marinas unicelulares poseen una frústula compuesta principalmente por sílice biogénica, por lo cual no es afectada por la respiración anaeróbica de estos microorganismos.

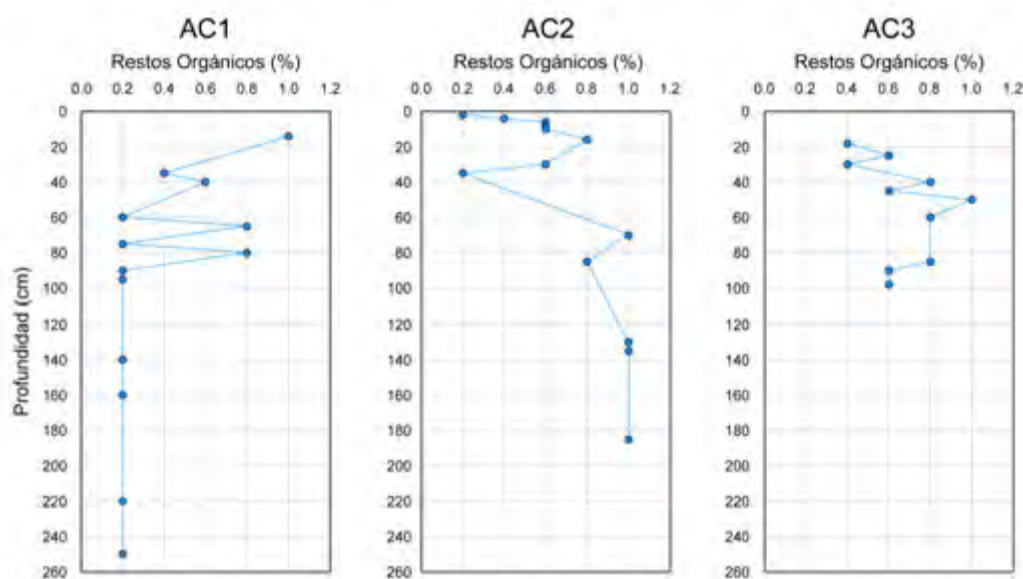


Figura 5-3: Distribución vertical de los restos orgánicos cuantificados bajo el microscopio óptico en el sedimento en los testigos AC1, AC2 y AC3.

Adicionalmente, la composición relativa de los géneros de bacterias obtenidas en los tres testigos (Figura 8-7, artículo no publicado) muestra una evolución de condiciones oxidantes en la interfase agua-sedimento hacia un ambiente reductor en profundidad. Los niveles más someros se caracterizan por presentar al género *Actibacter*, el cual decrece en los primeros 12 cm. Esta es una bacteria principalmente aeróbica (Kim et al., 2008), aunque al ser un organismo anaeróbico facultativo puede realizar respiración anaeróbica (Hyun et al., 2015). A profundidades intermedias (y también altas en el caso de AC1) se aprecia un aumento del género *Desulfatiglans*, una bacteria sulfato-reductora (Kevorkian et al., 2022; Xie & Müller, 2018) que indica la reducción del sulfato del agua marina mediante la degradación de la materia orgánica (Jørgensen et al., 2019) y está relacionada con la formación de pirita framboidal

(Berner, 1985; Jørgensen et al., 2019; Mozer, 2010). Finalmente, a mayor profundidad (90 cm en AC1, 80 cm en AC2 y 55 cm en AC3) se observa un incremento del género *Atribacteria bacterium*, un organismo con respiración anaeróbica asociado a producción de metano en sedimentos marinos (Hoshino et al., 2017), el cual indicaría condiciones aún más reductoras (zona de metanogénesis, Jørgensen et al., 2019).

5.4. Hierro

Potapowicz et al. (2020) y Szopińska et al. (2018) concluyen que el Fe en el agua marina de la costa sureste de la ensenada Ezcurra es producto del intemperismo de los afloramientos, los cuales contienen pirita diseminada (Mozer, 2012). Krogulec et al. (2017) reportaron concentraciones entre 0.018 y 0.171 ppm en la misma zona, mientras que el agua marina afectada directamente por el DAR de caleta Cardozo posee concentraciones entre 0.148 y 0.153 ppm de Fe disuelto (Dold et al., 2013). Adicionalmente, se observó un fuerte intemperismo químico a lo largo de la costa noreste de la ensenada Ezcurra durante la campaña de campo del presente estudio (Figura 5-4). A pesar de no haberse encontrado una pluma de altas concentraciones de Fe que refleje una influencia directa del DAR, la concentración promedio de Fe en las estaciones (AC1, AC2 y AC3) es entre 25 y 92% mayor a las encontradas en bahía Esperanza (Tabla 8-10), lo cual refleja que el intemperismo de los afloramientos aporta concentraciones significativas de Fe al mar en toda la zona.

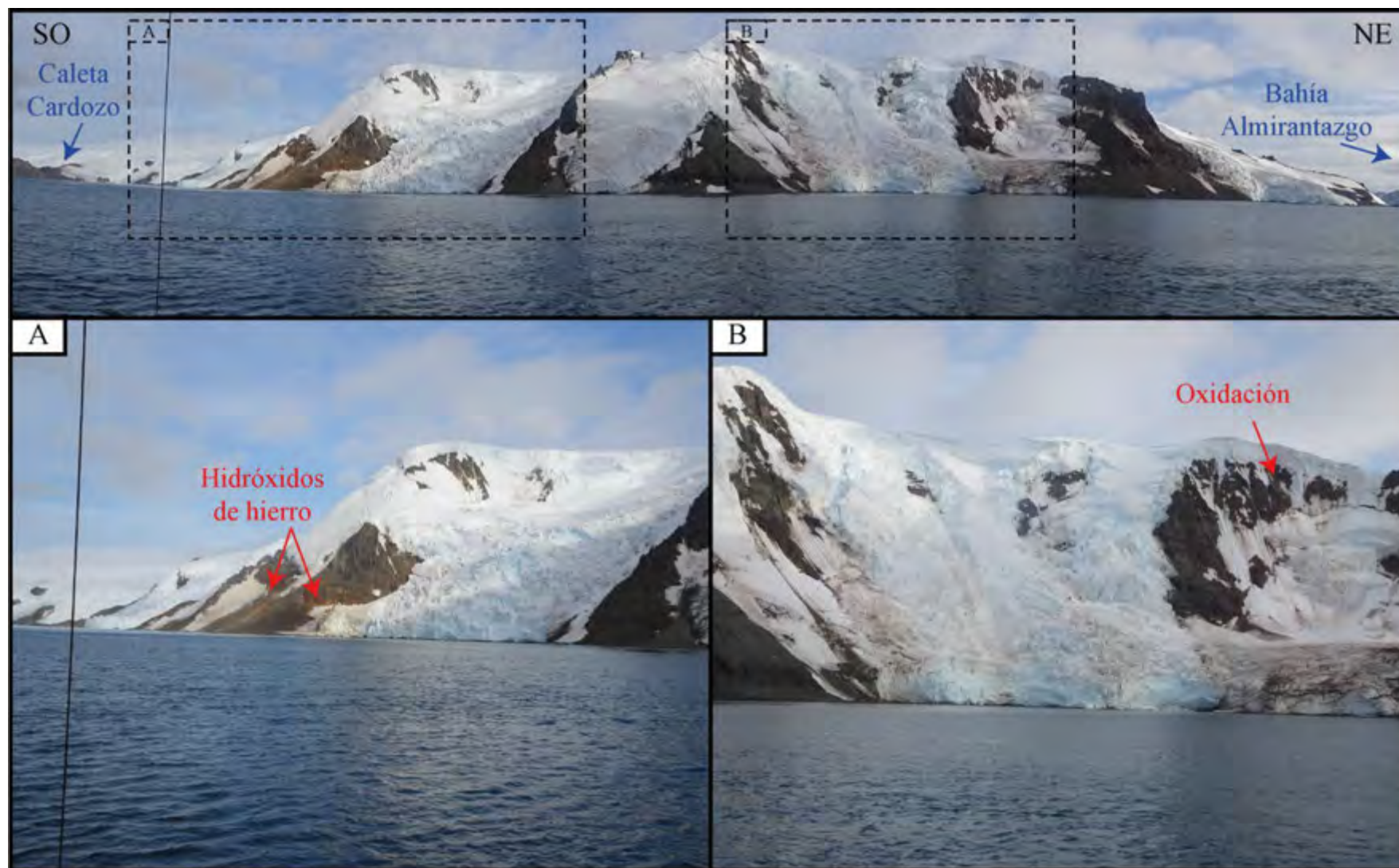


Figura 5-4: Intemperismo observado a lo largo de la costa noreste de la ensenada Ezcurra. (A) Precipitación de hidróxidos de hierro (coloración anaranjada) producto del intemperismo químico. (B) Oxidación de minerales de hierro que tiñe le otorgan al hielo y nieve una tonalidad parda rojiza.

La concentración del Fe disuelto en la columna de agua estaría controlada por la disolución de sólidos en suspensión y el aporte en forma de Fe^{2+} desde caleta Cardozo (Dold et al., 2013). Si bien se analizó la fracción disuelta, el filtro empleado ($0.2\ \mu\text{m}$) no permite diferenciar coloides ($0.01\text{-}1\ \mu\text{m}$) ni nanopartículas ($0.005\text{-}0.1\ \mu\text{m}$) de la fracción acuosa ($<0.02\ \mu\text{m}$; Raiswell & Canfield, 2012). A pesar de que la columna de agua posee condiciones oxidantes y alcalinas (Figura 4-4), los hidróxidos ferrosos y férricos de la totalidad de las muestras poseen un SI negativo, lo que implica una tendencia a la disolución de estos compuestos para alcanzar el equilibrio químico. Esto también se observa en los sulfatos (más solubles) y sulfuros (inestables en condiciones oxidantes) que contienen Fe (Tabla 4-5), lo cual dificulta identificar la reacción que prevalece sobre las demás. Es probable que el aporte de los sulfatos se limite únicamente en los niveles más someros debido a su alta solubilidad.

En el agua de poros se observa una marcada tendencia de mayores concentraciones de Fe en condiciones más reductoras y cercanas a un pH neutro (Figura 4-4). Esta tendencia podría indicar una disolución reductiva de hidróxidos de Fe (Appelo & Postma, 2005; Smuda et al., 2014). Si bien con los datos obtenidos en campo, el hidróxido férrico posee un SI positivo en la gran mayoría de muestras (indicando una sobresaturación y tendencia a precipitar), basta una corrección de $-0.28\ \text{V}$ en el Eh para que el SI sea negativo en la totalidad de las muestras. Esta corrección se sustenta en el tiempo transcurrido, hasta obtener el agua de poros, y en la diferencia de temperatura con las muestras de la columna de agua (ver apartado de “Modelamiento geoquímico”).

Santos et al. (2007) analizaron muestras de sedimentos marinos someros en las ensenadas Martell y Mackellar, las cuales mostraron una clara tendencia hacia condiciones más reductoras conforme se incrementa la profundidad, patrón atribuido a la respiración microbiana. El Eh en dichas muestras llega incluso a ser negativo (Figura 5-5), lo cual es notoriamente menor que el obtenido en AC1, AC2 y AC3 (entre 196 y $422\ \text{mV}$, Tabla 8-3). Si bien los autores no indican

si dichos valores han sido expresados en SHE, esta transformación implicaría un aumento de aproximadamente 220 mV, con lo cual los valores obtenidos en dicho estudio continúan siendo menores a los observados en la ensenada Ezcurra. Cabe resaltar que Santos et al. (2007) señalan que las mediciones de pH y Eh se realizaron inmediatamente luego de la obtención del testigo para que las mediciones sean fiables, por lo que únicamente se realizaron en los primeros 10 cm.

Asimismo, la distribución de la concentración relativa de bacterias encontradas (ver apartado de “Pirita framboidal”, Figura 8-7) muestra una tendencia hacia condiciones reductoras en profundidad, lo cual no se observa en los perfiles de Eh. Debido a que la identificación de las bacterias presentes en el sedimento no es afectada por la demora en el muestreo (a diferencia del Eh), se considera que estas son un indicador más preciso del tipo de ambiente. Este patrón es coherente con los resultado de Eh obtenidos por Santos et al. (2007) y comprueba la necesidad de corregir este parámetro en las muestras de la ensenada Ezcurra, lo cual a su vez refuerza la hipótesis de que la concentración de hierro está controlada por la disolución reductiva de hidróxidos.

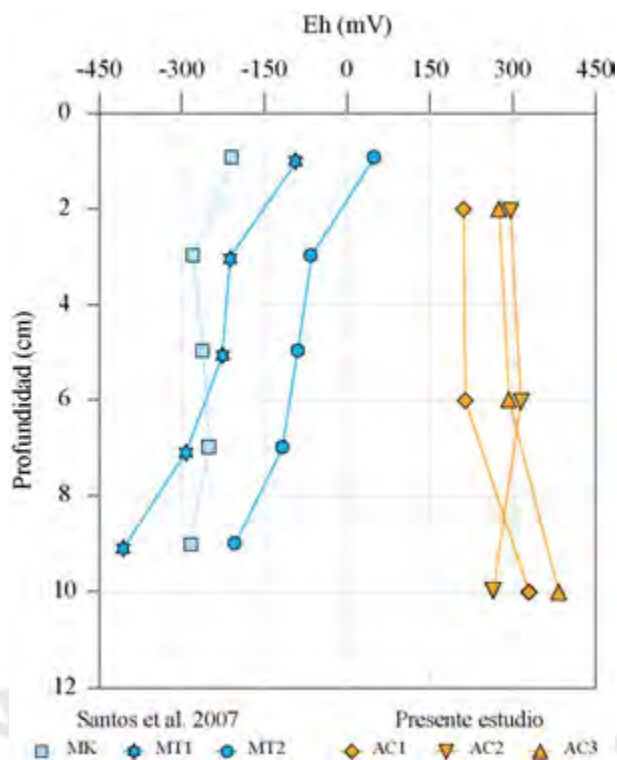


Figura 5-5: Comparación del Eh de las estaciones AC1, AC2 y AC3 con los resultados obtenidos por Santos et al. (2007) en muestras de sedimentos marinos someros (~30 m) en las ensenadas Martel (MT1 y MT2) y Mackellar (MK).

Respecto al hierro en el sedimento, en la estación AC1 se observó que, a partir de los 95 cm de profundidad, los hidróxidos de hierro conformados por impregnaciones finas sobre litoclastos (FeOH-G2) disminuyen considerablemente (Figuras 5-6 y 5-7). A pesar de que este tramo más profundo se caracteriza también por una gran abundancia de pirita primaria (Figura 5-2), la menor abundancia de hidróxidos se refleja en una menor concentración de hierro en el sedimento (Esquema 8-8), lo cual resalta la importancia de este grupo mineral. Asimismo, la pirita primaria presente en este tramo no posee signos de disolución por acidez, a diferencia de las muestras más someras (F09 de la Figura 4-8). En las muestras de los tres testigos estudiados, los tramos más someros (especialmente en los primeros 10 cm) poseen adicionalmente una mayor concentración de hidróxidos de hierro y jarosita, los cuales se habrían formado producto del intemperismo químico (DAR) en la costa de caleta Cardozo y ensenada Ezcurra.

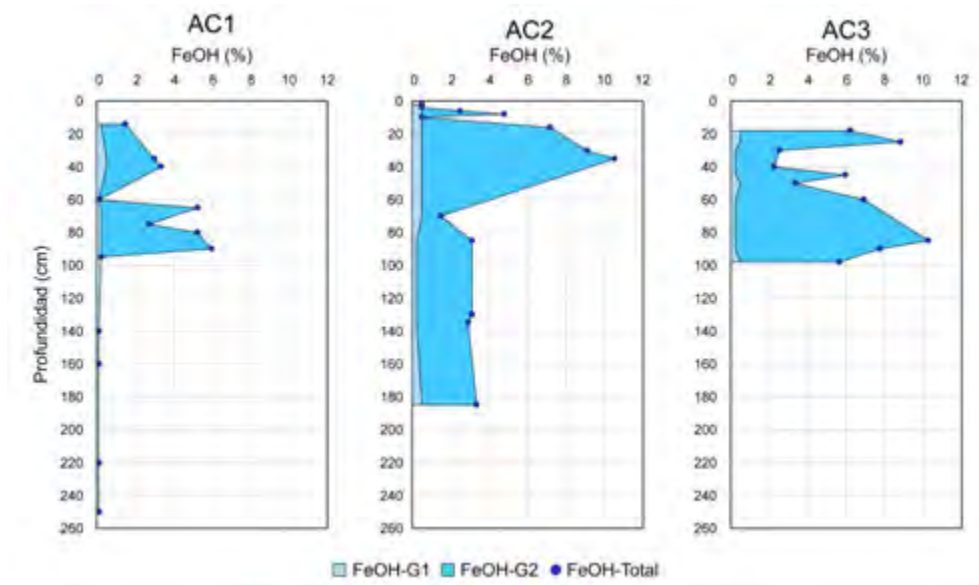


Figura 5-6: Distribución de los hidróxidos de hierro de los grupos FeOH-G1 (agregados aislados, cemento de litoclastos o en moldes de ferromagnesianos) y FeOH-G2 (impregnaciones finas en litoclastos).

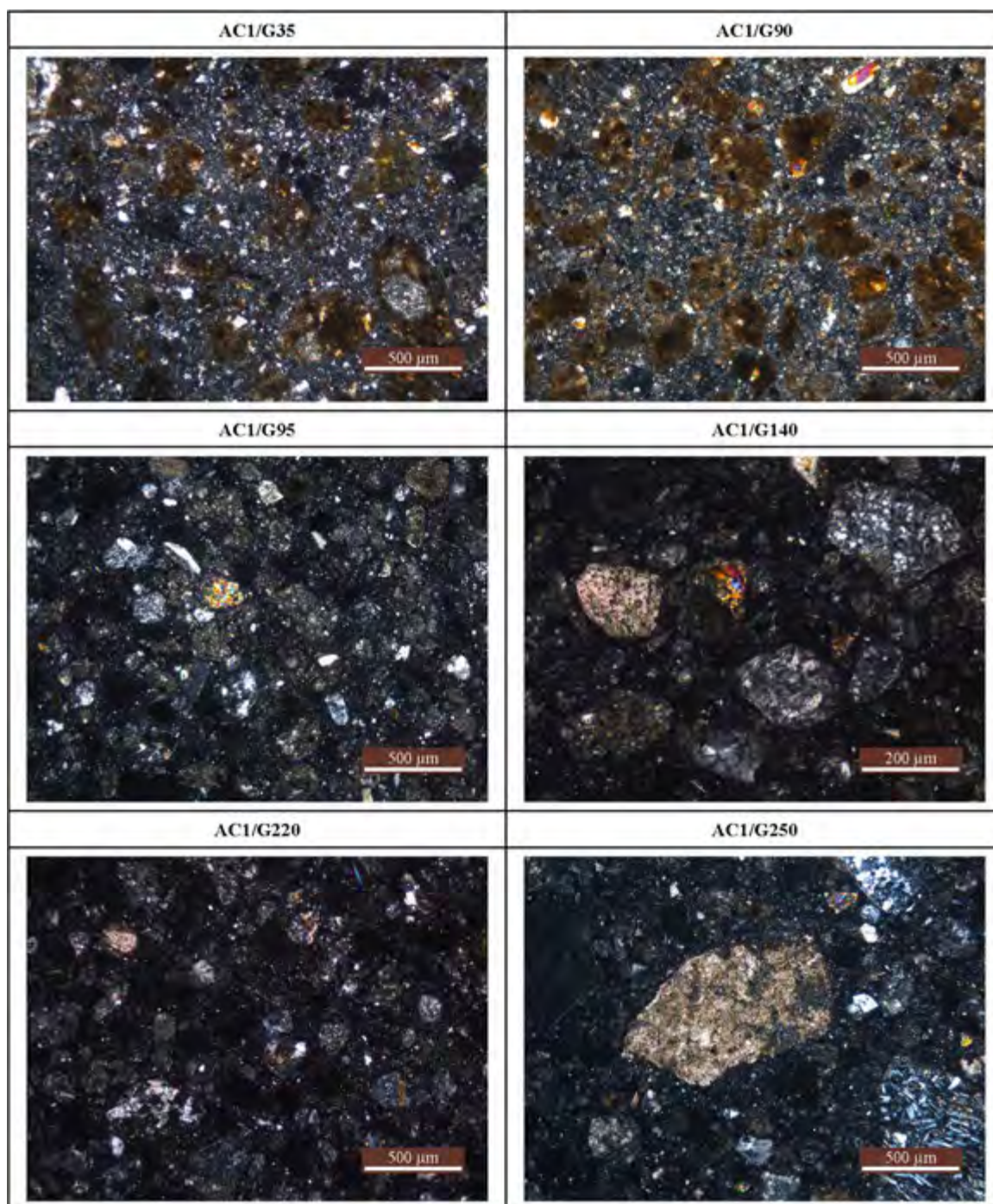


Figura 5-7: Contraste en la abundancia de impregnaciones de hidróxidos de hierro en AC1 a partir de 95 cm de profundidad. Los litoclastos de las muestras más someras (≤ 90 cm) poseen abundantes impregnaciones de hidróxidos de hierro y finos, a diferencia de las muestras más profundas (≥ 95 cm)

La ausencia de esta textura de disolución, junto a la escasa concentración de óxidos e hidróxidos de hierro, significa que la pirita primaria estuvo aislada del oxígeno atmosférico, probablemente por encontrarse cubierta por una capa de hielo. Esto permitió que la pirita sea transportada hacia la ensenada sin ser alterada (aporte principalmente glaciario, evidenciado en

mayor granulometría y heterogeneidad), lo cual explica su mayor abundancia respecto a otros tramos del testigo (Figura 5-2). La pirita habría comenzado su exposición a la atmósfera entre 270 y 690 años atrás, según los ratios de sedimentación (1.3 - 3.3 mm/año) reportados por Khim et al. (2001), Ribeiro et al., (2009) y Sanders et al.(2010). Determinar con precisión el ratio de sedimentación en la estación AC1 podría, eventualmente, permitir establecer conclusiones acerca de una posible influencia antropogénica en el retroceso glaciar de la zona de estudio, para lo cual es necesario realizar dataciones.

Adicionalmente, Rakusa-Suszczewski (1980) y Simões et al. (2004) identificaron que el retroceso glaciar predominó en los alrededores de bahía Almirantazgo entre 1956 y 1979. Sin embargo, este no fue uniforme, llegando a observarse incluso avance glaciar en algunas zonas de caleta Cardozo durante estos años. Esta irregularidad entre el retroceso y el avance glaciar explicaría el hecho de que el horizonte entre 72 a 76 cm sea similar al tramo de profundidad mayor a 95 cm en AC1: coloración grisácea (Figura 4-5), alto contenido de pirita primaria (Figura 5-2) y escasos hidróxidos de hierro (Figura 5-6) y restos orgánicos (Figura 5-3).

5.5. Pirita framboidal

El S y el Fe se relacionan con la materia orgánica puesto que los organismos con respiración anaeróbica la descomponen y generan la reducción de ambos elementos, lo cual culmina en la precipitación de pirita framboidal (Berner, 1985; Jørgensen et al., 2019; Mozer, 2010). A pesar de que el SI de la pirita es negativo en la totalidad de las muestras (indicando una tendencia a su disolución en lugar de a su precipitación), se observó pirita framboidal en el microscopio a partir de los 6 cm de profundidad en las tres estaciones. Como la observación bajo el microscopio es más confiable que los índices químicos, puesto que estos últimos dependen de las bases de datos empleadas y de la precisión de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos (Appelo & Postma, 2005), la presencia de pirita framboidal es otro

argumento para la necesidad de una corrección del Eh obtenido en campo. No obstante, la corrección necesaria para la precipitación de pirita es mucho mayor a la necesaria para la disolución reductiva de hidróxidos férricos, puesto que se necesita adicionalmente la reducción del sulfato marino.

Mozer (2010, 2013) identificó la presencia de pirita framboidal en las rocas del Grupo Punta Hennequin (costa sur de la ensenada Martel), mientras que en la costa sur de la ensenada Ezcurra reportó exclusivamente pirita primaria (Mozer, 2012). La dirección de las corrientes de agua marina y del viento (Plenzler et al., 2019; Pruszek, 1980; Rakusa-Suszczewski, 1980) descarta un aporte sedimentario de la ensenada Martel en la ensenada Ezcurra, mientras que las condiciones oxidantes observadas en el CTDO descartan la formación de pirita framboidal en columna de agua (Raiswell & Berner, 1985; Wilkin et al., 1996). Autores como Khim & Yoon (2003) y Santos et al. (2007) descartan la formación de pirita framboidal en la zona, debido al bajo ratio entre carbono orgánico total y azufre total presentado por Berner & Raiswell (1984). No obstante, este ratio fue presentado como una herramienta para distinguir entre ambientes de agua dulce y salada y, según los propios creadores, no es aplicable para contenidos de C_{org} menores al 1%, como es el caso de la ensenada Ezcurra. Por ello, lo más probable es que los framboides observados bajo el microscopio se hayan originado en el sedimento marino de la ensenada Ezcurra bajo condiciones reductoras.

Por otro lado, Wilkin et al. (1996) presentaron una compilación de sedimentos marinos en los cuales se cuantificó la pirita framboidal y, empleando la microscopía electrónica de barrido (SEM), midieron la variación del tamaño de su radio con la profundidad. Estos autores determinaron que el diámetro promedio oscila entre 5.8 a 11.9 μm y es independiente de la profundidad, lo cual es similar al promedio general de 10.6 μm obtenido en las estaciones AC1, AC2 y AC3. Los diámetros encontrados por Wilkin et al. (1996) muestran una distribución normal ya que los framboides tienden a formarse al mismo tiempo; sin embargo, observaron

también un sesgo positivo debido a la agregación de microcristales, conformando framboides de hasta 40 μm . Sawłowicz (2000) denomina a estos agregados poli-framboides y concuerda con Rickard (2019) en que se forman debido a la heterogeneidad de las condiciones fisicoquímicas del medio. Si bien estos poli-framboides pueden presentarse como agregados irregulares, en ocasiones también se forman en espacios confinados dentro de fósiles, mostrando un tamaño homogéneo, tal como se ha observado en las tres estaciones de ensenada Ezcurra (Figura 4-9).

La pirita framboidal reportada por Mozer (2010, 2013) se encontró en los niveles con mayor contenido de restos vegetales y en donde la granulometría es más fina, lo cual favorece un mayor flujo de componentes necesarios para su formación y crecimiento (Rickard, 2019). En las muestras de sedimento observadas bajo el microscopio se encontraron algunos niveles profundos con escasos restos orgánicos y pirita framboidal (a pesar de las condiciones reductoras confirmadas por los géneros de las bacterias), así como otros niveles someros con abundantes restos orgánicos y pirita framboidal. Como la abundancia, forma y tamaño de la pirita framboidal depende en gran medida de los restos orgánicos (Figuras 4-9 y 5-8), es posible que estos generen un microambiente reductor, en el cual se reduzca tanto el hierro (liberado por disolución de hidróxidos férricos) como el azufre (presente como sulfato en el agua marina) hasta precipitar pirita framboidal. Adicionalmente, diversos autores (Mozer, 2010; Sawłowicz, 2000; Smuda et al., 2014) han reportado que algunos elementos (As, Co y Cu, presentes mayoritariamente como complejos aniónicos) pueden precipitar junto con la pirita framboidal, pero para determinar si esto ocurre en el área de estudio es necesario emplear otros métodos analíticos (como la microsonda electrónica).

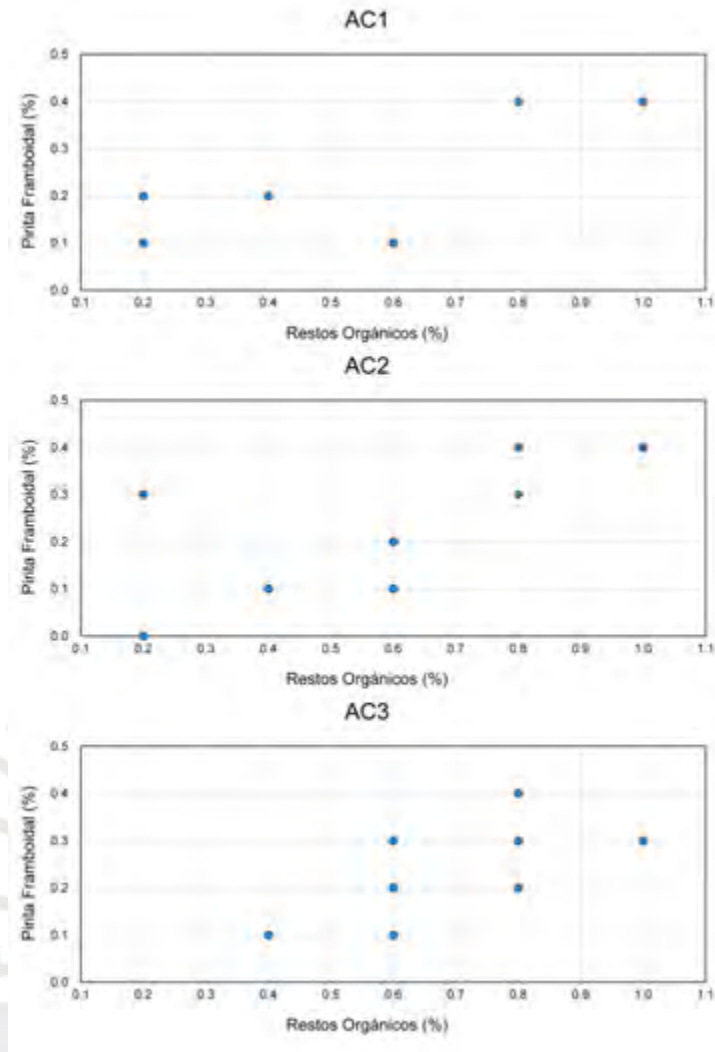


Figura 5-8: Correlación de la abundancia de pirita framboidal con los restos orgánicos.

En las estaciones AC2 y AC3, la cantidad de pirita framboidal se incrementa con la profundidad (Figura 5-2). Como se desarrolló en apartados anteriores, estas estaciones (Figuras 2-2 y 5-1) están influenciadas por aguas provenientes del estrecho de Bransfield, lo cual se refleja en mayores concentraciones de hidróxidos de hierro en el sedimento. En AC2, a partir de los 70 cm de profundidad, se observa una gran saturación de las cavidades de los restos orgánicos en pirita framboidal (F03 de la Figura 4-9), tramo que coincide con la zona de metanogénesis (identificada por la aparición de la *Atribacteria bacterium*). Esto evidencia que la formación de pirita framboidal (y con ello el secuestro de S y Fe en el sedimento) en estas estaciones, está controlada por la reducción del sulfato marino.

En AC1, la tendencia de la pirita framboidal con la profundidad es opuesta a la observada en las otras estaciones, siendo muy escasa a profundidades mayores a los 90 cm (Figura 5-2). En este tramo se observaron altas concentraciones de Fe en el agua de poros (Esquema 8-8); sin embargo, las muestras recolectadas por los rhizon mostraron una coloración amarilla, la cual indica la presencia de partículas sólidas en suspensión. Esta coloración persistió, inclusive tras emplear el filtro de 0.2 μm usados en las muestras de columna de agua, por lo que no se pudo separar estas nanopartículas previo al análisis de las muestras en el laboratorio. Canfield et al. (1992) sostiene que la formación de pirita framboidal depende del ratio de reducción del sulfato y también de la reactividad que tengan los minerales de hierro respecto al H_2S . Estos autores señalan que los óxidos e hidróxidos de hierro son más propensos a reaccionar con el H_2S (a diferencia de la magnetita o los silicatos de Fe) de lo que el sulfato lo es a reducirse en ambientes marinos. Por ello, la precipitación de pirita framboidal en este segmento del testigo está limitada por la falta de minerales de hierro que reaccionen con el H_2S . Asimismo, la mayor granulometría, la escasez de hidróxidos de hierro que aporten hierro disuelto y la ausencia de materia orgánica, no permiten la precipitación de pirita framboidal en bahía Esperanza (punto de control).

El tramo final del testigo AC1 también se caracteriza por presentar escasos restos orgánicos e impregnaciones de hidróxidos de hierro. Durante esta época, el aporte del hierro consistía en óxidos (magnetita y hematita primarias), pirita y epidota. Se ha demostrado que los hidróxidos con bajo grado de cristalinidad (como la ferrihidrita, formada en el DAR), constituyen una fuente de hierro aprovechable por los organismos marinos, a diferencia de especies más estables de hierro (Raiswell et al., 2008; Yoshida et al., 2002). De esta forma, la menor producción biótica en el pasado se debería a la falta de hierro biológicamente disponible, debido a la ausencia del DAR producto de la cobertura glaciaria. Por ello, en la

actualidad, este drenaje ácido contribuye con el secuestro del CO₂ atmosférico mediante la producción de vida en ensenada Ezcurra y su posterior soterramiento en el sedimento marino.

Desde el punto de vista numérico, las especies de Fe³⁺ predominan ampliamente sobre las de Fe²⁺, empleando los datos originales de campo. A partir de una reducción de 0.1 V las especies de Fe²⁺ comienzan a ser mayoritarias en algunas muestras, pero no es hasta disminuir 0.3 V que se convierten en predominantes en la totalidad de las muestras (Figura 5-9), lo cual explica la tendencia a disolución de los hidróxidos férricos a partir de -0.28 V (ver apartado de “Modelamiento geoquímico”). Por otro lado, las especies de S⁶⁺ (principalmente SO₄²⁻) predominan en todas las muestras hasta una reducción de 0.4 V en el Eh (Figura 5-10). A partir de dicho valor, se empieza a observar una predominancia de S²⁻ en algunas muestras, lo cual se refleja en un SI de pirita positivo (Figura 4-15).

A pesar de reducir el Eh hasta cerca del límite de estabilidad del agua (Figura 4-12) y obtener valores similares a Santos et al. (2007), algunas muestras poseen cantidades exiguas de S²⁻. Este es el caso de la muestra AC3/G40, donde a pesar de predominar el sulfato, se han observado clústeres de pirita framboidal dentro de restos orgánicos. Es probable que esto se deba a que la muestra obtenida por el rhizon corresponde a la mezcla del agua intersticial de un horizonte de sedimento de 4 cm (radio de influencia), lo cual no refleja correctamente las condiciones locales, especialmente a escala microscópica. Así, la precipitación de pirita framboidal se explicaría por la presencia de microambientes reductores formados en los restos orgánicos.

Cabe resaltar que, según los resultados obtenidos en PHREEQC, la variación del Eh ocasiona que el S⁶⁺ se reduzca a S²⁻, sin observarse especies de S⁺², S⁺³, S⁺⁴ ni S⁺⁵, lo cual es poco probable en la naturaleza. Esto puede deberse a las reacciones incorporadas en la base de datos empleada, las cuales no consideran la intervención de materia orgánica. De confirmarse

una transición menos abrupta, estas especies explicarían la disminución del sulfato en profundidad, la cual no puede ser explicada en su totalidad por la precipitación de pirita framboidal. Adicionalmente, es probable que haya otros factores que no se estén tomando en consideración.

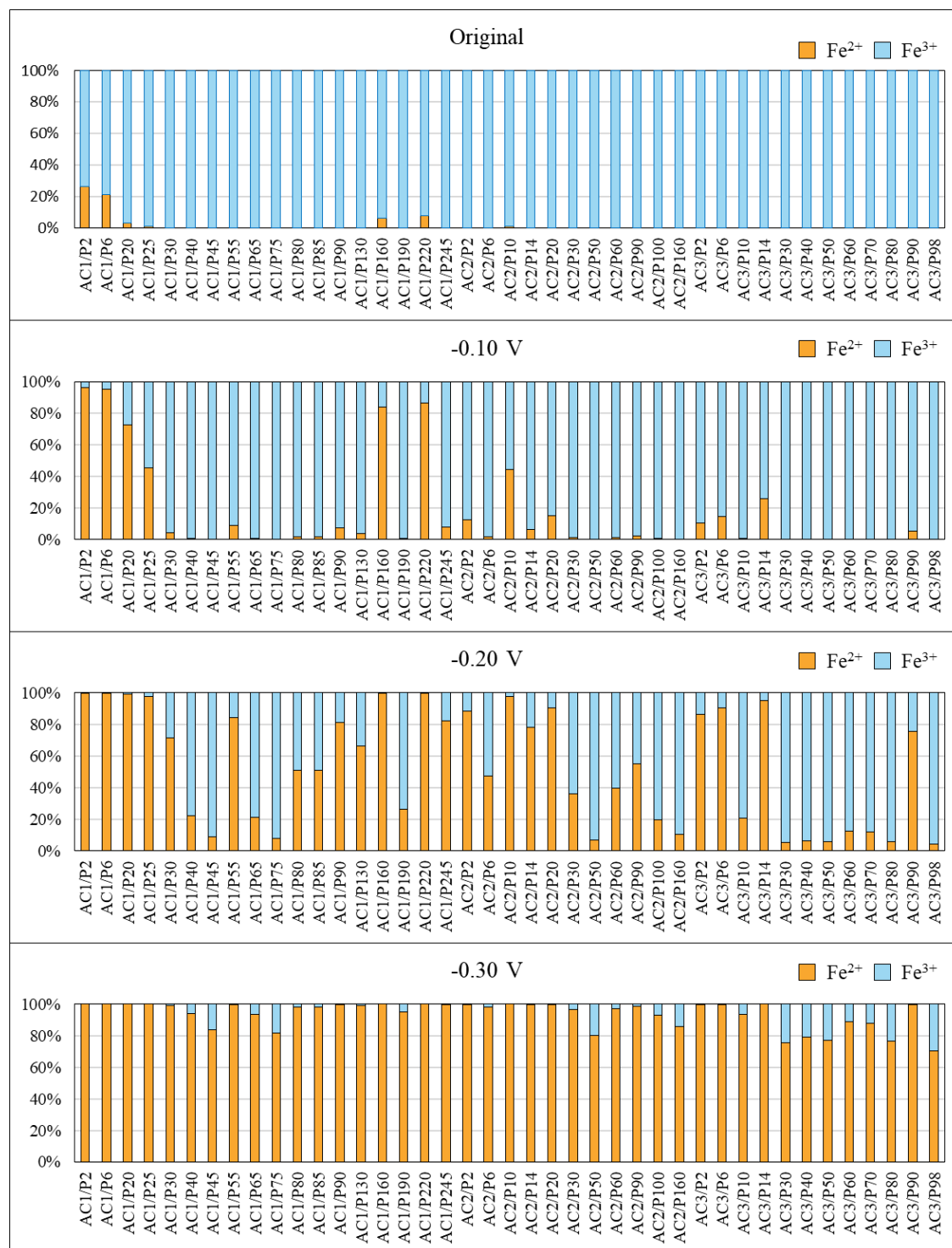


Figura 5-9: Abundancia relativa de los estados de oxidación del Fe (Fe^{2+} y Fe^{3+}) conforme se reduce el Eh (V) sin modificar la temperatura.



Figura 5-10: Abundancia relativa de los estados de oxidación del S (S^{2-} y S^{6+}) conforme se reduce el Eh (V) sin modificar la temperatura.

5.6. Elementos traza

Únicamente el Cr, Mo y W se presentan como oxi-aniones (MoO_4^{2-} , CrO_4^{2-} y WO_4^{2-} , respectivamente), mientras que los otros elementos traza (Al, As, C, Co, Cu, Ga, Hf, Nb, P, Te

y V) forman diversos compuestos aniónicos al asociarse con O^{2-} , H^+ , CO_3^{2-} y Cl^- (Tablas 8-8 y 8-9) en las condiciones de pH y Eh observadas en los tres testigos. Los elementos considerados comúnmente como mayores, que también se presentan como complejos aniónicos son el Al (bajo la forma de $Al(OH)_4^-$) y el P (bajo la forma de $NaHPO_4^-$, como segunda especie predominante). Sin embargo, el P únicamente supera el límite de detección en el agua de poros, mientras que el Al siempre se encontró por debajo, motivo por el cual han sido agrupados junto con los elementos traza.

La relación entre oxi-aniones y el pH ha sido detallada por Appelo & Postma (2005), Smuda et al. (2014) y Stumm & Morgan (1996). La superficie de los sólidos, especialmente de óxidos e hidróxidos, puede cargarse positiva o negativamente dependiendo del pH del medio, lo cual determina la movilidad de determinados elementos (Appelo & Postma, 2005). Stumm & Morgan (1996) mostraron que la superficie de la goethita se carga negativamente en un medio con un pH cercano a 8 (Figura 5-11A). Adicionalmente, estos autores calcularon que elementos como el Cr, V, As y en menor proporción el P, cuando se presentan como oxi-aniones, se liberan de la superficie de hidróxidos férricos conforme se incrementa el pH (Figura 5-11B y C), producto de la repulsión de cargas negativas. Cabe resaltar que los valores de pH relacionados a la carga de superficies y de adsorción dependen de la temperatura, composición y concentración del medio. Asimismo, Smuda et al. (2014) realizaron un estudio de evolución geoquímica en relaveras de Chuquicamata (Chile), donde determinaron que el As y Mo se liberaban de la superficie de hidróxidos de Fe cuando el pH del medio se tornaba alcalino.

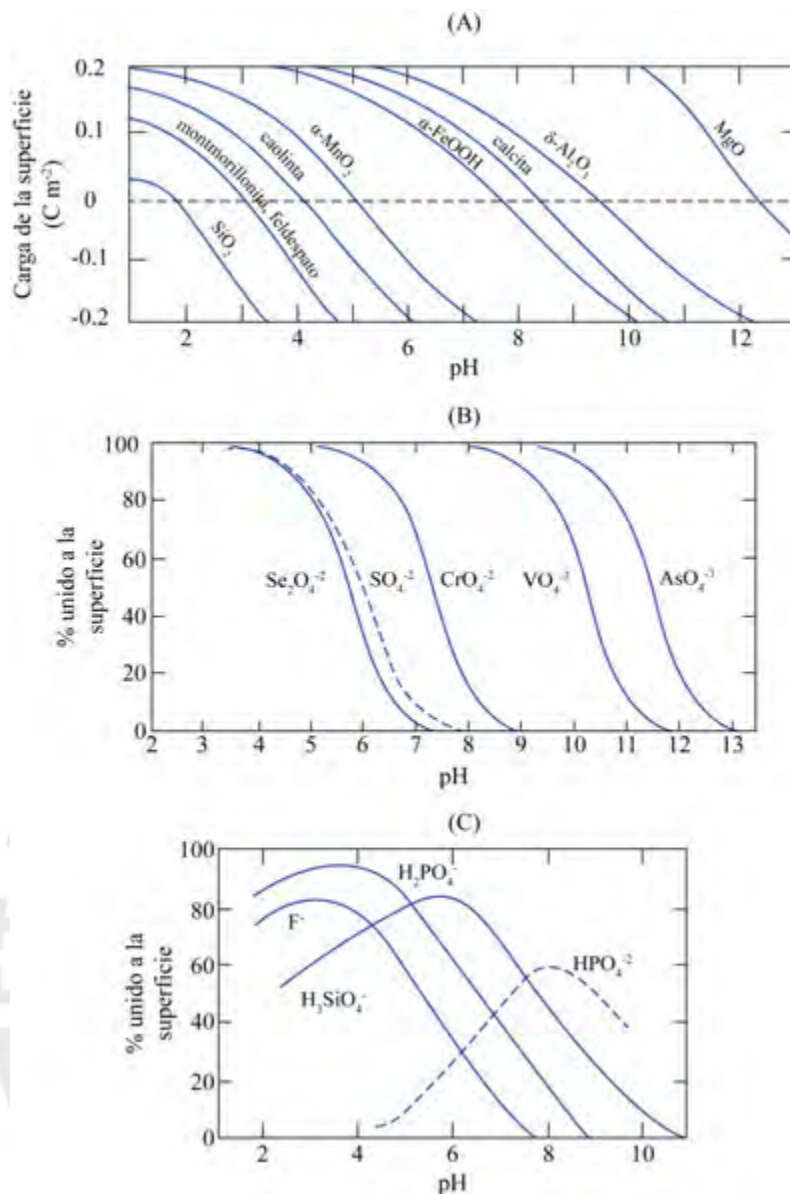


Figura 5-11: (A) Efecto del pH en la carga de distintos coloides. Modificado Stumm & Morgan (1996). (B) Aniones adsorbidos a la superficie de hidróxidos férricos, basado en data de Dzombak & Morel (1990). Modificado Stumm & Morgan (1996). (C) Adsorción de P, F y Si en la superficie de goethita empleando las constantes de equilibrio de Sigg & Stumm (1981). Modificado de Stumm & Morgan (1996).

Por ello, la tendencia de mayores concentraciones de Cr, Mo y W (oxi-aniones traza) conforme se incrementa el pH (Figuras 8-3 y 8-4) sugiere que se está produciendo una desorción de la superficie de sólidos en suspensión como hidróxidos de hierro, aunque también óxidos de manganeso o arcillas (Figura 5-11A). Como la carga de la superficie del hidróxido férrico disminuye con el aumento del pH, se espera que éste repela con mayor intensidad otras partículas con carga negativa, por lo que la concentración del As, U y V también estarían controladas por procesos de desorción de sólidos en suspensión.

De este modo, se distinguen tres subgrupos de elementos, cuya concentración en el agua de poros y en la columna de agua estaría controlada, principalmente, por la desorción de la superficie de hidróxidos. El primer subgrupo se compone del Cr (Esquema 8-6) y U (Esquema 8-16), y se caracteriza por tener altas concentraciones en el DAR generado en caleta Cardozo; sin embargo, se observa una rápida dilución a tal punto que en la ensenada Ezcurra la concentración es similar a la de la columna de agua en bahía Esperanza. El segundo grupo se compone por el As (Esquema 8-2), el cual se identifica por tener concentraciones similares en el DAR y en la columna de agua tanto en ensenada Ezcurra como en bahía Esperanza. Finalmente, el tercer grupo lo compone el Mo (Esquema 8-11) y V (Esquema 8-17), los cuales no fueron analizados en el DAR, pero sus concentraciones en la ensenada Ezcurra son similares a la bahía Esperanza.

El Co (Esquema 8-5) y Cu (Esquema 8-7) presentan concentraciones particularmente altas en el DAR, por lo cual se esperaría un enriquecimiento de ambos elementos en el agua de ensenada Ezcurra. El Co posee concentraciones promedio entre 19 y 89%, superiores a las encontradas en bahía Esperanza (Tabla 8-10), mientras que el Cu solo lo hace en la estación AC2. Si bien ambos elementos provienen principalmente del intemperismo de las rocas aledañas, el Co está relacionado con las secuencias volcánicas de composición basáltica en la zona, a diferencia del Cu, el cual está asociado a hidrotermalismo y elementos como el Fe (posiblemente de la pirita), Ag y Zn (Potapowicz et al., 2020). Dichos eventos hidrotermales generan mineralización principalmente en la costa norte de la ensenada Ezcurra, la cual presenta una cantidad considerablemente menor de roca expuesta en comparación con la costa sur (Figura 2-7), compuesta por secuencias vulcano-sedimentarias con menor contenido de pirita. La diferencia en el origen y la abundancia en los afloramientos sería la causa de un mayor aporte de Co a lo largo de la ensenada Ezcurra, mientras que las altas concentraciones de cobre se encontrarían en zonas con abundante pirita y fuerte intemperismo. Mientras que

por un lado el Co no muestra una correlación consistente con el pH, el Cu solo la muestra en el agua de poros, donde su concentración estaría determinada por la desorción de hidróxidos de hierro. La falta de correlación del Cu con el pH en la columna de agua se explicaría con el hecho que éste se presenta predominantemente como un complejo neutro (CuCO_3), el cual no se vería afectado por la superficie de los sólidos en suspensión, al no tener carga.

Así, el pH y su efecto sobre la desorción de la superficie de sólidos, ya sea en suspensión (columna de agua y agua de poros) o del sedimento (agua de poros), determinaría la concentración de los elementos anteriormente descritos (a excepción del Co, ver más adelante) en el agua marina, más allá que por el aporte del DAR. Appelo & Postma (2005) describen dos casos en los que la oxidación de pirita causó la incorporación de metales traza en acuíferos de Dinamarca y Países Bajos. En ambos casos la concentración de metales traza (As, Co, Ni y Zn) fue alta exclusivamente cerca de la fuente, mientras que la concentración de sulfato (cuya alta solubilidad no lo hace susceptible a procesos de sorción) aumentó a lo largo del acuífero. En ambos casos la diferencia de concentraciones fue atribuida a adsorción de dichos metales a la superficie de sólidos, por lo que es posible que el aporte del DAR de los elementos traza se vea amortiguado por los procesos de sorción. Para confirmar que los procesos de desorción controlan las concentraciones de estos elementos en la zona de estudio, podría realizarse un ensayo de extracción secuencial en el sedimento (similar al descrito por Smuda et al., 2014), con el fin de cuantificar la proporción de estos metales, que se encuentran adsorbidos a hidróxidos de hierro, en zonas más cercanas a caleta Cardozo.

Si bien en los casos señalados por Appelo & Postma (2005) el Co se ve afectado por procesos de sorción, las altas concentraciones del Co junto a la falta de correlación con el pH indica que éste no es el caso en la ensenada Ezcurra. Otras bases de datos disponibles en PHREEQC que contienen datos termodinámicos del Co son “minteq.dat”, “sit.dat” y ThermoddemV1.10_15Dec2020.dat. Al realizar la especiación con estos datos, todas coinciden

en que la especie predominante del Co es el Co^{2+} , la cual es la segunda especie al emplear la base de datos LLNL. Por ello, lo más probable es que la especie predominante de Co en las muestras sea en su forma de catión divalente (Co^{2+}), en lugar de como un complejo aniónico (HCoO_2^-), lo cual explicaría la no correlación de este elemento con el pH.

El P (Esquema 8-13) no se analizó en el DAR, y en la columna de agua se encontró por debajo del límite de detección. En el agua de poros solo se observan tendencias generales entre su concentración y el pH (a diferencia de los otros complejos aniónicos), aunque su especie mayoritaria no presente carga. Berbel & Braga (2019) analizaron sedimentos someros de las ensenadas Ezcurra, Martel y Mackellar, determinando que el P se encuentra principalmente en apatito (ígneo y metamórfico) y como P autógeno; es decir, formando esqueletos de animales, carbonatos unidos a fosfatos y fluorapatito de carbonato (formado durante la diagénesis temprana). Si bien el fluorapatito no se encuentra en la base de datos LLNL, hidroxilapatito sí lo hace, presentando un índice de saturación positivo en todas las muestras, lo que puede interpretarse como una tendencia a precipitar en fase sólida (Appelo & Postma, 2005). Estos autores también señalan que los restos orgánicos que contienen P lo liberan durante su recristalización diagenética, pudiendo ser absorbido en hidróxidos de Fe. Esto explicaría la correlación positiva general del P con el pH; sin embargo, la diversidad en la que se presenta exige emplear métodos adicionales para determinar con mayor precisión los procesos involucrados.

El Al (Esquema 8-1) y en especial el W (Esquema 8-18) presentan altas concentraciones en el DAR; sin embargo, ambos elementos se encontraron por debajo del límite de detección tanto en ensenada Ezcurra como en bahía Esperanza. Esto indicaría una rápida precipitación de dichos elementos al entrar en contacto con el agua marina, por lo cual el DAR no tendría efectos mar adentro en estos elementos. Esta interpretación se apoya en la observación de precipitados color blanquecino durante el estudio de Dold et al. (2013), los cuales podrían

corresponder a hidróxidos de aluminio, demostrando que estos elementos precipitarían al contacto con el agua de mar de pH básico. Finalmente, se optó por la no interpretación del comportamiento de Ga (Esquema 8-9), Hf (Esquema 8-10), Nb (Esquema 8-12) y Te (Esquema 8-15), por no haber sido analizados en el DAR y además porque en la mayoría de las muestras poseen una concentración por debajo del límite de detección o muy cercanos a éste.



6. Conclusiones

- Los puntos de quiebre en las curvas de concentración de Cl y SO_4^{2-} permiten identificar las diferentes capas presentes en la columna de agua de la ensenada Ezcurra (como termoclinas y haloclinas), incluyendo el flujo superficial generado por las escorrentías producto del deshielo.
- Las aguas de la ensenada Ezcurra cercanas a isla Dufaley (AC1) son fuertemente influenciadas por el DAR de caleta Cardozo y alrededores, mientras que aquellas cercanas a bahía Almirantazgo (AC2 y AC3) son influenciadas por el flujo ascendente que proviene del estrecho de Brasnfield. Este *upwelling* genera que las aguas se mezclen y muestren perfiles con poca variabilidad de las concentraciones de aniones mayoritarios y de los parámetros fisicoquímicos.
- La concentración de S y As en el sedimento está controlada por la abundancia de pirita primaria, especialmente a partir de los 90 cm de profundidad en AC1, donde se ha identificado un cambio en el proceso sedimentario predominante. El tramo entre 90 y 250 cm presenta una mayor abundancia de pirita primaria (hipógena), baja concentración de materia orgánica (0.04 - 0.05 %), ausencia de hidróxidos de hierro y relictos de fitoplancton en el sedimento. Sin embargo, los niveles más someros (menores a 90 cm), se caracterizan por exhibir un notorio incremento de materia orgánica (0.3 % en promedio) y relictos de fitoplancton, así como por poseer litoclastos con impregnaciones de hidróxidos de hierro y pirita framboidal.
- Se interpreta que el quiebre en el récord sedimentario ocurrió entre 270 o 690 años atrás, primaba la cobertura glaciaria en la costa de la ensenada Ezcurra, la cual aislaba a las rocas que contienen mineralización de pirita del oxígeno. El aporte sedimentario de esta época fue principalmente glaciario, caracterizándose por un sedimento con abundante contenido de grava y pirita primaria. La ausencia de intemperismo químico

de la pirita no permitió un aporte de hierro al mar en la ensenada Ezcurra, ni disuelto ni bajo la forma de hidróxidos, lo cual mantuvo la baja producción biótica en esta región HNLC. Estas condiciones se observan en el sedimento a partir de los 95 cm de profundidad en el testigo AC1, donde la ausencia de minerales de hierro que reaccionen con el H₂S limitó la precipitación de pirita framboidal (y con ello el secuestro de S y Fe). Por otro lado, este periodo no se reflejó en el sedimento de AC2 y AC3, debido a la influencia del *upwelling* en estas estaciones, el cual constituye un importante aporte de hierro (bajo la forma de hidróxidos).

- A partir de 270 o 690 años, inicia el retroceso glaciar, lo cual causó la oxidación de la pirita expuesta en la costa noreste de ensenada Ezcurra. Este intemperismo químico generó el DAR, el cual aportó hidróxidos de hierro, jarosita, Ti, V, Ni, Mg, Fe, Cr y Co al agua y sedimento marino de ensenada Ezcurra. El hierro disuelto y las impregnaciones de hidróxidos en los litoclastos del sedimento generaron una mayor producción de vida marina en los últimos años, observándose una mayor cantidad de C_{org} y fitoplancton (principalmente diatomeas). Estos restos orgánicos permitirían la creación de microambientes reductores, los cuales controlan la precipitación de la pirita framboidal, lo cual se observa en las estaciones AC2 y AC3, así como en los primeros 90 cm de AC1.
- El intemperismo de las rocas que contienen pirita, favorecido por el retroceso glaciar, constituye un importante aporte de Fe en la ensenada Ezcurra, lo cual se refleja en hasta un 92% de enriquecimiento en comparación a zonas donde no se ha reportado esta mineralización (bahía Esperanza).
- A pesar del mayor contenido de Fe en el agua, no se observan grandes cantidades de C_{org}. Esto se debe a que las condiciones oxidantes del mar favorecen la descomposición

de la materia orgánica, mientras que en profundidad ésta es consumida por organismos con respiración anaeróbica.

- Las condiciones en el sedimento de la ensenada Ezcurra se tornan más reductoras con la profundidad, pasando de una zona oxidante a una zona de reducción del sulfato del agua marina y finalmente a una zona de generación de metano.
- La concentración de Fe disuelto en la columna de agua está controlada por la disolución de sólidos en suspensión (sulfatos, hidróxidos férricos y pirita).
- Es probable que la concentración de Fe disuelto en el agua de poros sea el producto de la disolución reductiva de hidróxidos de hierro, aunque es necesario obtener datos más precisos de Eh, pH y temperatura para confirmarlo.
- La concentración de elementos que conforman oxi-aniones (Cr [CrO_4^{2-}], Mo [MoO_4^{2-}] y W [WO_4^{2-}]), y algunos que se presentan mayoritariamente como complejos aniónicos (As [HAsO_4^{2-}], U [$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$] y V [$\text{VO}_3(\text{OH})^{2-}$]) está controlada por la desorción de la superficie de sólidos en suspensión (columna de agua y agua de poros) y del sedimento (agua de poros). A pesar de que estos se encuentren enriquecidos en el DAR de caleta Cardozo, no muestran un enriquecimiento en ensenada Ezcurra respecto a bahía Esperanza.
- Aun cuando el Cu y Co están enriquecidos en el DAR de caleta Cardozo, solo este último presenta un claro enriquecimiento en la columna de agua de ensenada Ezcurra en comparación a bahía Esperanza. Esto podría deberse a que el Co proviene de las secuencias vulcano-sedimentarias de composición basáltica, las cuales poseen superficies expuestas de mayor extensión que las rocas con contenido de pirita a las cuales se relaciona el Cu.
- Debido a la diversidad de orígenes del P y, a que no hay una especie o complejo que predomine notoriamente, es necesario realizar un muestreo y emplear métodos

analíticos exclusivos para determinar qué reacciones controlan su concentración en el agua y sedimento.

- El Al (y posiblemente el W), a pesar de encontrarse enriquecidos en el DAR generado en caleta Cardozo, precipita rápidamente en fase sólida al entrar en contacto con el agua marina, por lo que no se observa concentraciones sobre el límite de detección en el agua de ensenada Ezcurra.



7. Referencias

- Amstaetter, K., Borch, T., Larese-Casanova, P., & Kappler, A. (2010). Redox transformation of arsenic by Fe(II)-activated goethite (α -FeOOH). *Environmental Science and Technology*, 44(1), 102–108. <https://doi.org/10.1021/es901274s>
- APHA. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). A.A. BALKEMA PUBLISHERS.
- Australian Antarctic Division. (2002). *Antarctic weather*. Australian Antarctic Division: Leading Australia's Antarctic Program. <https://www.antarctica.gov.au/about-antarctica/weather-and-climate/weather/>
- Barker, P. F. (1982). The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. *Journal of the Geological Society*, 139(6), 787–801. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.139.6.0787>
- Barton, C. M. (1965). The geology of the South Shetland Islands - III - the stratigraphy of King George Island. In *Scientific Reports - British Antarctic Survey* (Vol. 44).
- Benaiges-Fernandez, R., Palau, J., Offeddu, F. G., Cama, J., Urmeneta, J., Soler, J. M., & Dold, B. (2019). Dissimilatory bioreduction of iron(III) oxides by *Shewanella loihica* under marine sediment conditions. *Marine Environmental Research*, 151(September). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104782>
- Berbel, G., & Braga, E. (2014). Phosphorus in Antarctic surface marine sediments - Chemical speciation in Admiralty Bay. *Antarctic Science*, 26(3), 281–289. <https://doi.org/10.1017/S0954102013000552>
- Berner, R. (1985). Sulphate Reduction, Organic Matter Decomposition and Pyrite Formation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 315(1531), 25–38.
- Berner, R., & Raiswell, R. (1984). C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *Geology*, 12, 365–368. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<365:CMFDFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<365:CMFDFF>2.0.CO;2)
- Birkenmajer, K. (1980). Geology of Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands) — An outline. *Polish Polar Research*, 1(1), 29–54.

- Birkenmajer, K. (1982). Late Cenozoic phases of block-faulting on King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). *Polish Academy of Sciences, Earth Sciences*, 30, 21–32.
- Birkenmajer, K. (1989). A guide to Tertiary geochronology of King George Island, West Antarctica. *Polish Polar Research*, 10(4), 555–579.
- Birkenmajer, K. (2002). Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. Geological map 1:50 000. In *Polish Academy of Sciences*.
- Birkenmajer, K. (2003). Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica): A geological monograph. *Studia Geologica Polonica*, 120, 1–75.
- Birkenmajer, K., Delitala, M. C., Narebski, W., Nicoletti, M., & Petrucciani, C. (1986). *Geochronology of Tertiary island-arcvolcanics and glacial deposits, King George Island, South Shetland Islands (West Antarctica)*. 34, 257–273.
- Birkenmajer, K., Francalanci, L., & Peccerillo, A. (1991). Petrological and geochemical constraints on the genesis of Mesozoic-Cenozoic magmatism of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 3(2), 2430–2432. <https://doi.org/10.1017/S0954102091000354>
- Birkenmajer, K., Guterch, A., Grad, M., Janik, T., & Perchuc, E. (1990). Lithospheric transect Antarctic Peninsula - South Shetland Islands, West Antarctica. *Polish Polar Research*, 11(3–4), 241–258.
- Birkenmajer, K., Kaiser, G., Narebski, W., Pilot, J., & Rösler, H. J. (1986). The age of magmatic complexes of the Barton Horst, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica), by K-Ar dating. *Polish Academy of Sciences, Earth Sciences*, 34, 139–155.
- Blain, S., Quéguiner, B., Armand, L., Belviso, S., Bombled, B., Bopp, L., Bowie, A., Brunet, C., Brussaard, C., Carlotti, F., Christaki, U., Corbière, A., Durand, I., Ebersbach, F., Fuda, J. L., Garcia, N., Gerringa, L., Griffiths, B., Guigue, C., Wagener, T. (2007). Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, 446(7139), 1070–1074. <https://doi.org/10.1038/nature05700>
- Boland, D. D., Collins, R. N., Miller, C. J., Glover, C. J., & Waite, T. D. (2014). Effect of solution and solid-phase conditions on the Fe(II)-accelerated transformation of

- ferrihydrite to lepidocrocite and goethite. *Environmental Science and Technology*, 48(10), 5477–5485. <https://doi.org/10.1021/es4043275>
- Bosio, G., Maliverno, E., Maria Villa, I., Di Celma, C., Gariboldi, K., Gioncada, A., Barberini, V., Mario, U., & Bianucci, G. (2019). Tephrochronology and chronostratigraphy of the Miocene Chilcatay and Pisco formations (East Pisco Basin, Peru) Giulia. In *Newsletters on Stratigraphy*. <https://doi.org/10.1127/nos/2019/0525>
- Boyd, P. W., & Ellwood, M. J. (2010). The biogeochemical cycle of iron in the ocean. *Nature Geoscience*, 3(10), 675–682. <https://doi.org/10.1038/ngeo964>
- Bradshaw, J. D. (1989). Cretaceous geotectonic patterns in the New Zeland Region. *Tectonics*, 8(4), 803–820. <https://doi.org/10.1029/TC008i004p00803>
- Cande, S. C., Herron, E. M., & Hall, B. R. (1982). The early Cenozoic tectonic history of the southeast Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 57, 63–74. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90173-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90173-X)
- Canfield, D. E., Raiswell, R., & Bottrell, S. (1992). The reactivity of sedimentary iron minerals toward sulfide. *American Journal of Science*, 292, 659–683. <https://doi.org/10.2475/ajs.292.9.659>
- Chisholm, S., Falkowski, P., & Cullen, J. (2009). Dis-Crediting Ocean Fertilization. In *Science's Compass* (Vol. 9, Issue 4, pp. 8–13). <https://doi.org/10.1108/17459265200900035>
- Coale, K. H., & Wong, M. (2018). Ocean Iron Fertilization. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (3rd ed., Vol. 3, Issue July). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10712-2>
- Das, S., Hendry, M. J., & Essilfie-Dughan, J. (2011). Transformation of two-line ferrihydrite to goethite and hematite as a function of pH and temperature. *Environmental Science and Technology*, 45(1), 268–275. <https://doi.org/10.1021/es101903y>
- DiVenere, V. J., Kent, D. V., & Dalziel, I. W. D. (1994). Mid-Cretaceous paleomagnetic results from Marie Byrd Land, West Antarctica: A test of post-100 Ma relative motion between East and West Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 99(B8), 15 115-15 139.
- Dold, B. (2003). Dissolution kinetics of schwertmannite and ferrihydrite in oxidized mine samples and their detection by differential X-ray diffraction (DXRD). *Applied*

- Geochemistry*, 18(10), 1531–1540. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(03\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(03)00015-5)
- Dold, B. (2010). Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management. *Waste Management*, March. <https://doi.org/10.5772/8458>
- Dold, B. (2014). Submarine tailings disposal (STD)—A review. *Minerals*, 4(3), 642–666. <https://doi.org/10.3390/min4030642>
- Dold, B., Aguilera, A., Cisternas, M., Bucchi, F., & Amils, R. (2013). Acid Rock Drainage and Rock Weathering in Antarctica: Important Sources for Iron Cycling in the Southern Ocean. *Environmental Science & Technology*, 47, 6129–6136. <https://doi.org/10.1021/es305141b>
- Dold, B., & Fontbote, L. (2001). Element cycling and secondary mineralogy in propgry copper tailings as function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemichal Exploration*, 74, 3–55. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00174-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00174-1)
- Dzombak, D., & Morel, F. (1990). *SURFACE COMPLEXATION MODELING - Hydrous Ferric Oxide*. JOHN WILEY & SONS, INC.
- Fernandes, L., Calixto, M., Lange, P., & Tenenbaum, D. (2014). *Benthic Diatoms in the Plankton of Admiralty Bay (Western Antarctic Peninsula): Taxonomy and Potentual Implications to the Pelagic Community*. <https://doi.org/10.4322/apa.2014.104>
- Fisk, M. R. (1990). Volcanism in the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(2–3), 91–101. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90022-S](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90022-S)
- Grunow, A. M., Dalziel, I. W. D., Harrison, T. M., & Heizler, M. T. (1992). Structural geology and geochronology of subduction complexes along the margin of Gondwanaland: new data from the Antarctic Peninsula and southernmost Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 104(11), 1497–1514. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1497:SGAGOS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1497:SGAGOS>2.3.CO;2)
- Hawkes, D. D. (1961). The geology of the South Shetland Islands - I - the petrology of King George Island. In *Scientific Reports - British Antarctic Survey* (Vol. 26).
- Hawkings, J. R., Wadham, J. L., Tranter, M., Raiswell, R., Benning, L. G., Statham, P. J., Tedstone, A., Nienow, P., Lee, K., & Telling, J. (2014). Ice sheets as a significant source of highly reactive nanoparticulate iron to the oceans. *Nature Communications*, 5(2014),

- 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms4929>
- Hoshino, T., Toki, T., Ijiri, A., Morono, Y., Machiyama, H., Ashi, J., Okamura, K., & Inagaki, F. (2017). Atribacteria from the subseafloor sedimentary biosphere disperse to the hydrosphere through submarine mud volcanoes. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01135>
- Hyun, D., Kim, J., Kim, M., Shin, N., Kim, H., Lee, J., & Bae, J. (2015). *Actibacter haliotis* sp. nov., isolated from the gut of an abalone, *Haliotis discus hannai*, and emended description of the genus *Actibacter*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65, 49–55. <https://doi.org/10.1099/ij.s.0.067041-0>
- INAP. (2014). *The Global Acid Rock Drainage Guide* (p. 473). <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>
- Jesus, J. (2018). *Maniobra de Arridado e Izado Piston Corer*. Departamento de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico de la Marina de Guerra del Perú.
- Jordan, T. A., Riley, T. R., & Siddoway, C. S. (2020). The geological history and evolution of West Antarctica. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 117–133. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0013-6>
- Jørgensen, B., Findlay, A., & Pellerin, A. (2019). The biogeochemical sulfur cycle of marine sediments. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1–27. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00849>
- Kawashita, K., & Soliani, E. (1988). A Rb-Sr isochron diagram for the Znosko Glacier Formation (Cardozo Cove Group), Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Instituto Antártico Chileno, Série Científica*, 38, 59–66.
- Kesler, S. E. (1988). Eh-pH diagrams for geochemistry. In *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Vol. 53, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90020-3)
- Kevorkian, R., Sipes, K., Winstead, R., Paul, R., & Lloyd, K. (2022). Cryptic Methane-Cycling by Methanogens During Multi-Year Incubation of Estuarine Sediment. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.847563>
- Khim, B., & Yoon, H. (2003). Postglacial marine environmental changes in Maxwell Bay, King George Island, West Antarctica. *Polar Research*, 22(2), 341–353. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2003.tb00116.x>

- Khim, B., Yoon, H., Kim, Y., & Shin, I. (2001). Late Holocene stable isotope chronology and meltwater discharge event in Maxwell and Admiralty bays, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 13(2), 167–173. <https://doi.org/10.1017/S0954102001000256>
- Kim, J., Kim, K., Hahm, Y., Kim, B., Chun, J., & Cha, C. (2008). *Actibacter sediminis* gen. nov., sp. nov., a marine bacterium of the family Flavobacteriaceae isolated from tidal flat sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58, 139–143. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65346-0>
- Kölling, M., Seeberg-Elverfeldt, J., & Schlüter, M. (2004). Rhizon - an excellent pore water sampler for low maintenance collection and filtration of small volume samples Rhizon. In *University of Bremen- Department of Geosciences* (Issue June, p. 2004).
- Kraus, S., Poblete, F., & Arriagada, C. (2010). Dike systems and their volcanic host rocks on King George Island, Antarctica: Implications on the geodynamic history based on a multidisciplinary approach. *Tectonophysics*, 495(3–4), 269–297. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.035>
- Krogulec, T., Krogulec, E., Małecki, J., Pietrzykowski, P., & Dobak, P. (2017). Charakterystyka hydrochemiczna wód w rejonie polskiej stacji polarnej im. H. Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego (Szetlandy Południowe). *Przegląd Geologiczny*, 65(11), 1306–1311.
- Leat, P., & Riley, T. (2021). Antarctic Peninsula and South Shetland Islands: volcanology. In *Geological Society, London, Memoirs*. Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/M55-2018-52>
- Lyons, T. W., Reinhard, C. T., & Planavsky, N. J. (2014). The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, 506(7488), 307–315. <https://doi.org/10.1038/nature13068>
- Martin, J. H. (1990). Glacial-Interglacial CO₂ Change: The Iron Hypothesis. *Palaeogeography*, 5(1), 1–13.
- Matsuoka, K., & Skoglund, A. (2018). *Quantarctica* 3. Norwegian Polar Institute. <https://www.npolar.no/quantarctica/>
- McCarron, J. J., & Larter, R. D. (1998). Late Cretaceous to early Tertiary subduction history of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 155(2), 255–268.

<https://doi.org/10.1144/gsjgs.155.2.0255>

- Mozer, A. (2010). Authigenic pyrite framboids in sedimentary facies of the Mount Wawel Formation (Eocene), King George Island, West Antarctica. *Polish Polar Research*, 31(3), 255–272. <https://doi.org/10.2478/v10183-010-0004-2>
- Mozer, A. (2012). Pre – glacial sedimentary facies of the Point Thomas Formation (Eocene) at Cytadela , Admiralty Bay, King George Island, West Antarctica. *Polish Polar Research*, 33(1), 41–62. <https://doi.org/10.2478/v10183>
- Mozer, A. (2013). Eocene sedimentary facies in volcanogenic succession on King George Island, South Shetland Islands: A record of pre-ice sheet terrestrial environments in West Antarctica. *Geological Quarterly*, 57(3), 385–394. <https://doi.org/10.7306/gq.1100>
- Nawrocki, J., Pańczyk, M., & Williams, I. S. (2010). Isotopic ages and palaeomagnetism of selected magmatic rocks from King George Island (Antarctic Peninsula). *Journal of the Geological Society*, 167(5), 1063–1079. <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-177>
- Pańczyk, M., Nawrocki, J., & Williams, I. S. (2009). Isotope age constraint for the Blue Dyke and Jardine Peak subvertical intrusions of king George Island, West Antarctica. *Polish Polar Research*, 30(4), 379–391. <https://doi.org/10.4202/ppres.2009.20>
- Pankhurst, R. J., & Smellie, J. L. (1983). K-Ar geochronology of the South Shetland Islands, Lesser Antarctica: apparent lateral migration of Jurassic to Quaternary island arc volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 66(C), 214–222. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90137-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90137-1)
- Plenzler, J., Budzik, T., Puczko, D., & Bialik, R. (2019). Climatic conditions at Arctowski Station (King George Island, West Antarctica) in 2013-2017 against the background of regional changes. *Polish Polar Research*, 40(1), 1–27. <https://doi.org/10.24425/ppr.2019.126345>
- Potapowicz, J., Szumińska, D., Szopińska, M., Bialik, R., Machowiak, K., Chmiel, S., & Polkowska, Ż. (2020). Seashore sediment and water chemistry at the Admiralty Bay (King George Island, Maritime Antarctica) – Geochemical analysis and correlations between the concentrations of chemical species. *Marine Pollution Bulletin*, 152(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110888>
- Pruszek, Z. (1980). Currents circulation in the waters of Admiralty Bay (region of Arctowski

- Station on King George Island). *Polish Polar Research*, 1(1), 55–74.
- Raiswell, R., Benning, L. G., Davidson, L., Tranter, M., & Tulaczyk, S. (2009). Schwertmannite in wet, acid, and oxic microenvironments beneath polar and polythermal glaciers. *Geology*, 37(5), 431–434. <https://doi.org/10.1130/G25350A.1>
- Raiswell, R., Benning, L. G., Tranter, M., & Tulaczyk, S. (2008). Bioavailable iron in the Southern Ocean: The significance of the iceberg conveyor belt. *Geochemical Transactions*, 9, 1–9. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-9-7>
- Raiswell, R., & Berner, R. (1985). Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments. *American Journal of Science*, 285, 710–724.
- Raiswell, R., & Canfield, D. E. (2012). The iron biogeochemical cycle past and present. *Geochemical Perspectives*, 1(1), 1–232. <https://doi.org/10.7185/geochempersp.1.1>
- Raiswell, R., Tranter, M., Benning, L. G., Siegert, M., De'ath, R., Huybrechts, P., & Payne, T. (2006). Contributions from glacially derived sediment to the global iron (oxyhydr)oxide cycle: Implications for iron delivery to the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(11), 2765–2780. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.12.027>
- Rakusa-Suszczewski, S. (1980). Environmental conditions and the functioning of Admiralty Bay (South Shetland Island) as part of the near shore Antarctic ecosystem. *Polish Polar Research*, 1(1), 11–27.
- Ribeiro, A. P., Figueira, R. C. L., Martins, C. C., Silva, C. R. A., França, E. J., Bícigo, M. C., Mahiques, M. M., & Montone, R. C. (2009). Arsenic content in five sediment profiles from Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. In *INCT-APA Annual Activity Report*. <https://doi.org/10.4322/apa.2014.011>
- Rickard, D. (2019). How long does it take a pyrite framboid to form? *Earth and Planetary Science Letters*, 513, 64–68. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.02.019>
- Sanders, C., Santos, I., Patchineelam, S., Schaefer, C., & Silva-Filho, E. (2010). Recent ^{137}Cs deposition in sediments of Admiralty Bay, Antarctica. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(5), 421–424. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.02.006>
- Santos, I., Fávoro, D., Schaefer, C., & Silva-Filho, E. (2007). Sediment geochemistry in coastal maritime Antarctica (Admiralty Bay, King George Island): Evidence from rare earths and other elements. *Marine Chemistry*, 107, 464–474.

<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.09.006>

Sawłowicz, Z. (2000). Framboids: From their origin to application. POLSKA AKADEMIA NAUK.

Sigg, L., & Stumm, W. (1981). The interaction of anions and weak acids with the hydrous goethite (α -FeOOH) surface. *Colloids and Surfaces*, 2(2), 101–117. [https://doi.org/10.1016/0166-6622\(81\)80001-7](https://doi.org/10.1016/0166-6622(81)80001-7)

Simões, J., Dani, N., Bremer, U., Aquino, F., & Arigony-Neto, J. (2004). Small cirque glaciers retreat on Keller Peninsula, Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4, 49–56. ISSN 0103-4049%0Awww.cnpq.br/areas/terra

Smellie, J. L., Pankhurst, R. J., Thomson, M. R. A., & Davies, R. E. S. (1984). The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. In *Scientific Reports - British Antarctic Survey* (Vol. 87).

Smellie, J. L., Panter, K. S., & Geyer, A. (2021). Introduction to volcanism in antarctica: 200 million years of subduction, rifting and continental break-up. *Geological Society Memoir*, 55(1), 1–6. <https://doi.org/10.1144/M55-2020-14>

Smuda, J., Dold, B., Spangenberg, J., Friese, K., Kobek, M., Bustos, C., & Pfeifer, H. (2014). Element cycling during the transition from alkaline to acidic environment in an active porphyry copper tailings impoundment, Chuquicamata, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 140, 23–40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.013>

Soliani, E., & Bonhomme, M. G. (1994). New Evidence for Cenozoic Resetting of K-Ar Ages In Volcanic Rocks Ff The Northern Portion Of The Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 7(1), 85–94.

Storey, B., & Granot, R. (2021). Tectonic history of Antarctica over the past 200 million years. In J. L. Smellie, K. S. Panter, & A. Geyer (Eds.), *Geological Society, London, Memoirs*. Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/M55-2018-38>

Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). Aquatic chemistry (3rd ed.). JOHN WILEY & SONS, INC.

Szopińska, M., Szumińska, D., Bialik, R. J., Chmiel, S., Plenzler, J., & Polkowska, Ż. (2018). Impact of a newly-formed periglacial environment and other factors on fresh water chemistry at the western shore of Admiralty Bay in the summer of 2016 (King George

- Island, Maritime Antarctica). *Science of the Total Environment*, 613–614, 619–634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.060>
- Tagliabue, A., Bopp, L., & Aumont, O. (2009). Evaluating the importance of atmospheric and sedimentary iron sources to Southern Ocean biogeochemistry. *Geophysical Research Letters*, 36(13), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2009GL038914>
- Tagliabue, A., Bopp, L., Dutay, J. C., Bowie, A. R., Chever, F., Jean-Baptiste, P., Bucciarelli, E., Lannuzel, D., Remenyi, T., Sarthou, G., Aumont, O., Gehlen, M., & Jeandel, C. (2010). Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory. *Nature Geoscience*, 3(4), 252–256. <https://doi.org/10.1038/ngeo818>
- Vaughan, A. P. M., & Storey, B. C. (2000). The eastern Palmer Land shear zone: A new terrane accretion model for the Mesozoic development of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 157(6), 1243–1256. <https://doi.org/10.1144/jgs.157.6.1243>
- Wilkin, R., Barnes, H., & Brantley, S. (1996). The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(20), 3897–3912. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00209-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00209-8)
- World Alliance for Breastfeeding Action (WABA). (2003). *WABA DIRECTORY* (Issue January, pp. 1–19). http://lynxdxg.com/descargas/ficheros/Directorio_WABA_2003.PDF
- Xie, X., & Müller, N. (2018). Enzymes involved in the anaerobic degradation of phenol by the sulfate-reducing bacterium *Desulfatiglans anilini*. *BMC Microbiology*, 18, 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12866-018-1238-0>
- Yoshida, T., Hayashi, K., & Ohmoto, H. (2002). Dissolution of iron hydroxides by marine bacterial siderophore. *Chemical Geology*, 184(1–2), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00297-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00297-2)
- Zhang, Z., Bi, X., Li, X., Zhao, Q., & Chen, H. (2018). Schwertmannite: occurrence, properties, synthesis and application in environmental remediation. *RSC Advances*, 8(59), 33583–33599. <https://doi.org/10.1039/C8RA06025H>

8. Anexos

8.1. Anexo I: Figuras

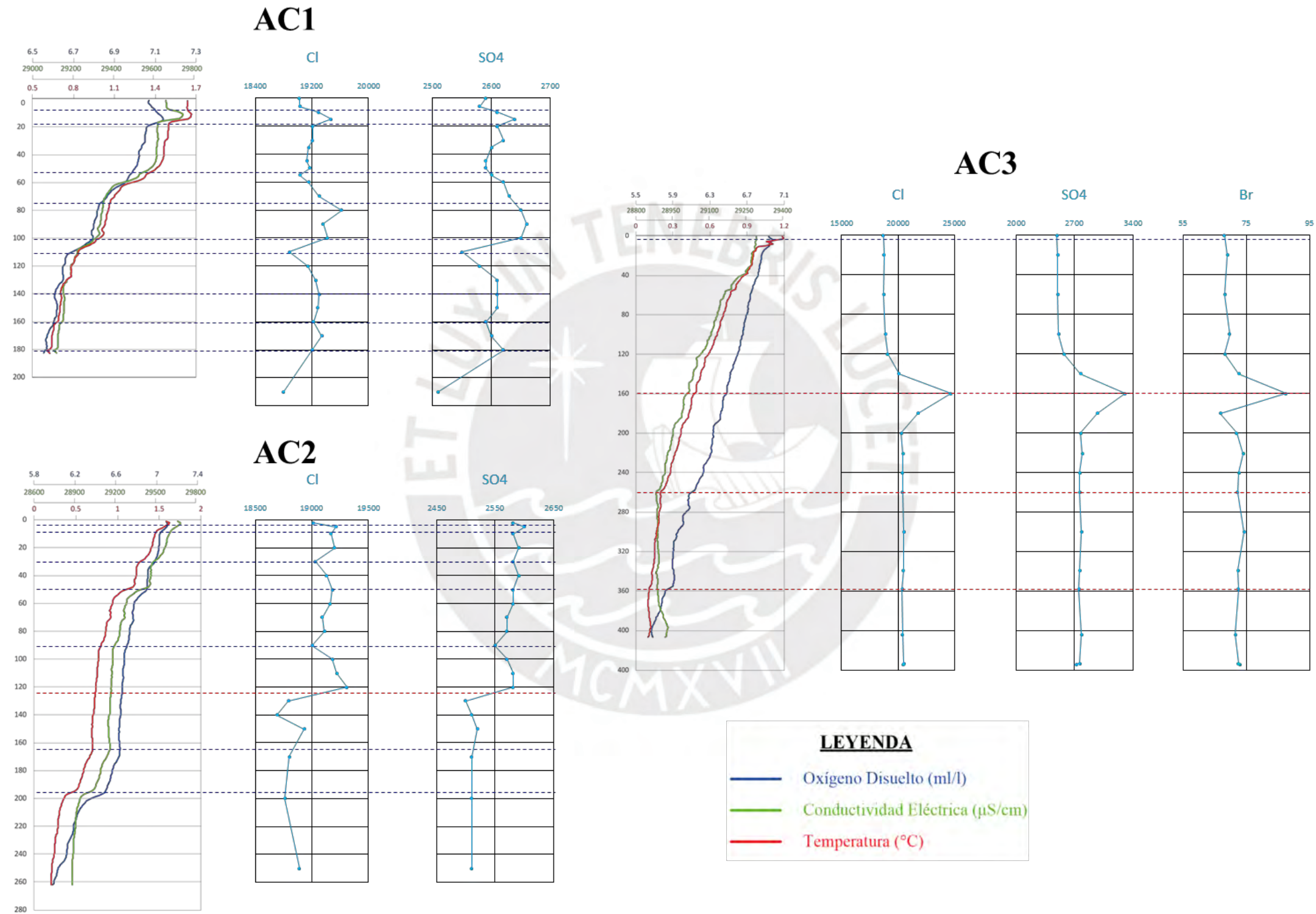


Figura 8-1: Capas de agua observadas en el CTDO y su correspondencia con los aniones mayoritarios. Las líneas punteadas azules muestran la correspondencia entre las capas observadas en el CTDO y en los aniones mayoritarios. Las líneas punteadas rojas muestran la no correspondencia entre perfiles.

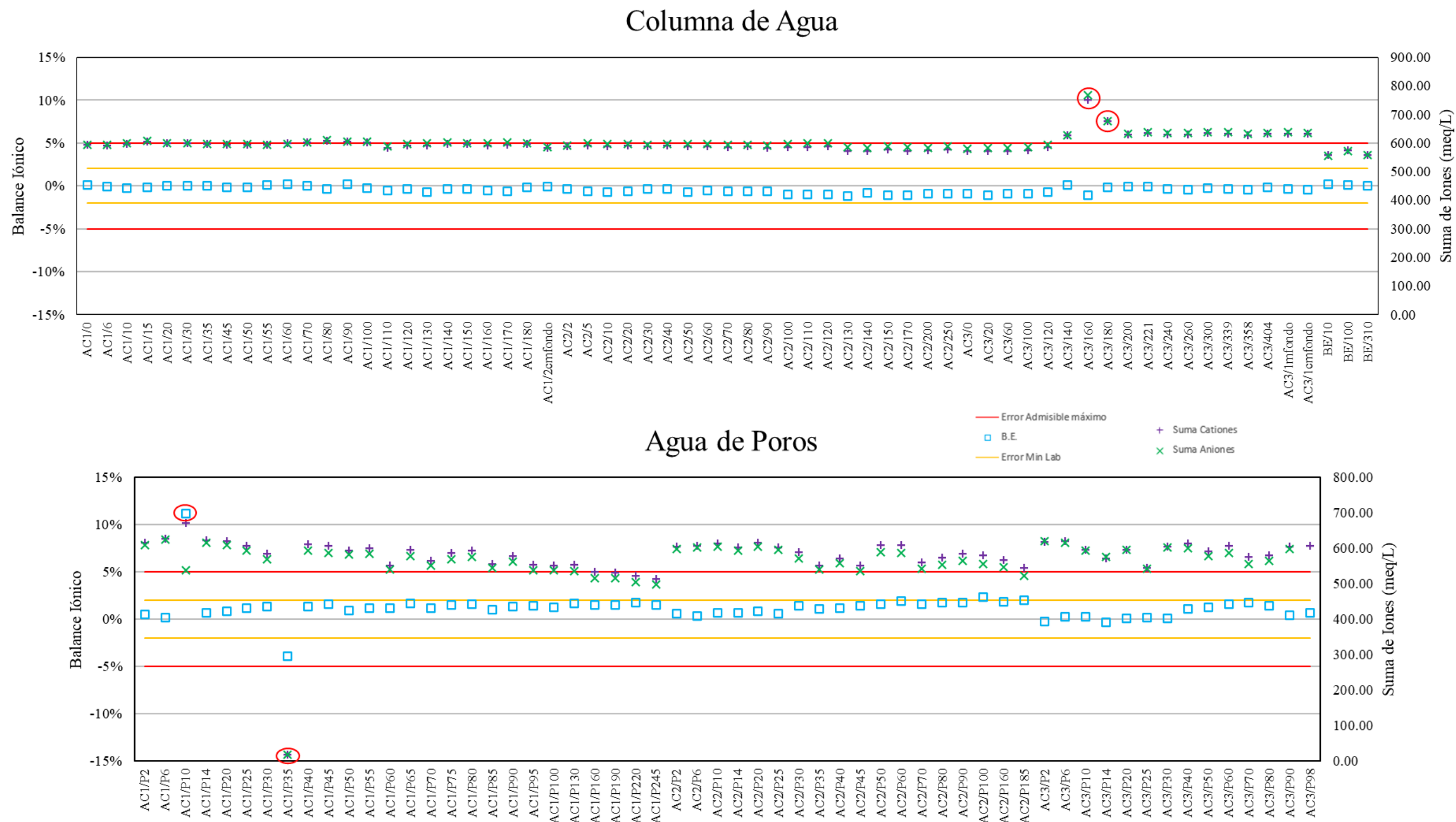


Figura 8-2: Balance iónico de las muestras de la columna de agua y agua de poros.

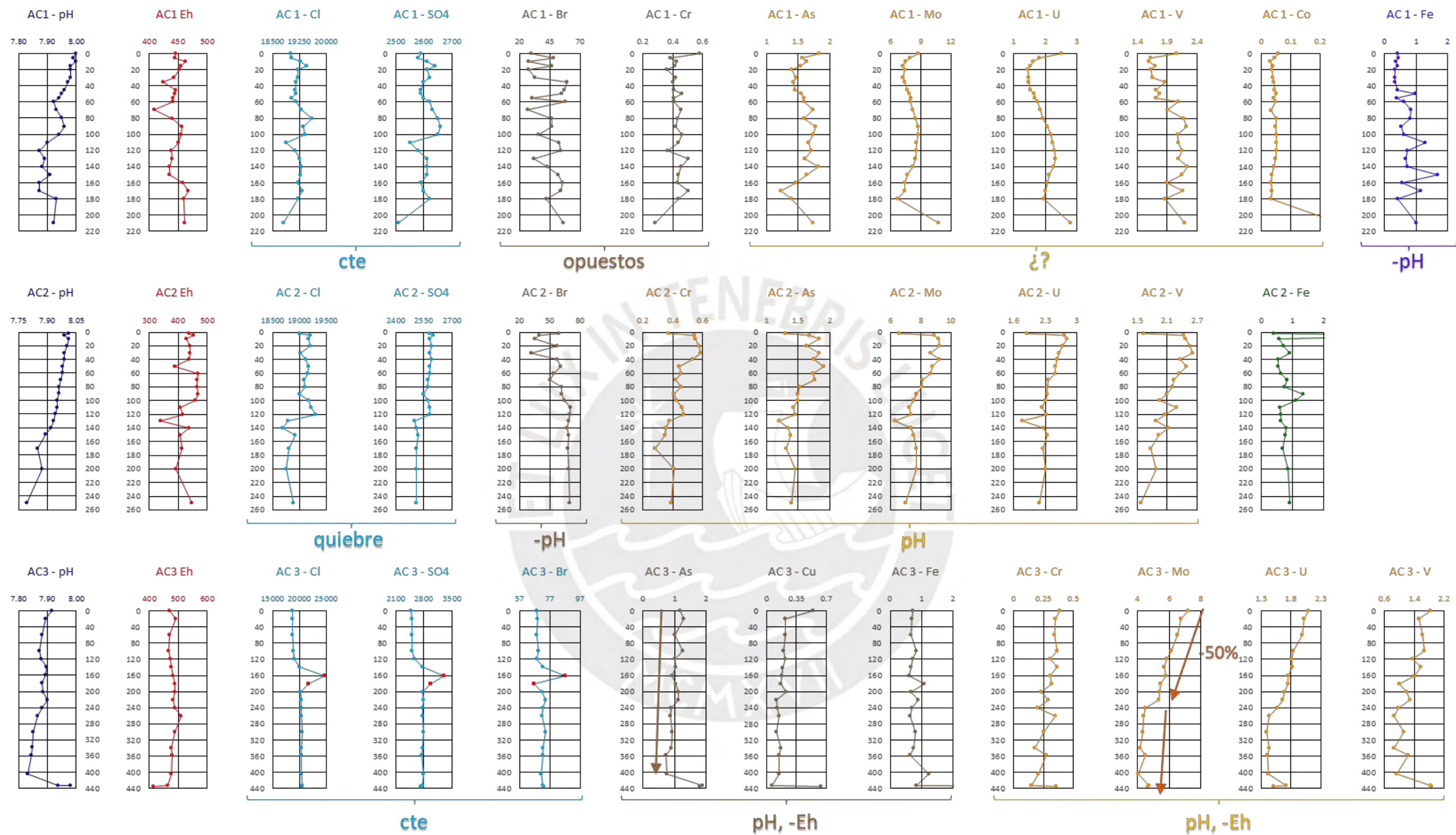


Figura 8-3: Asociaciones geoquímicas en la columna de agua con base en los perfiles. En rojo se muestran las muestras con posible error analítico.

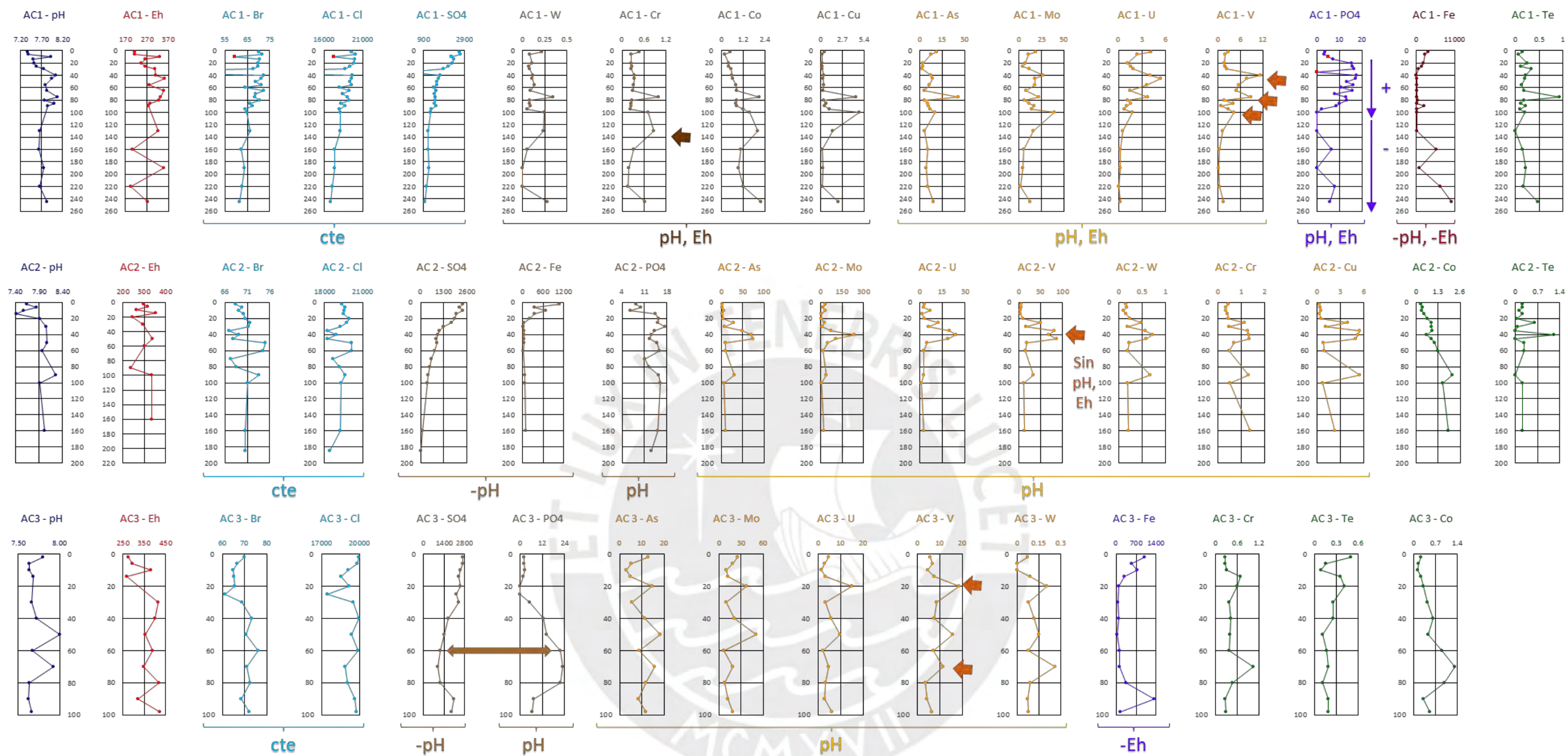


Figura 8-4: Asociaciones geoquímicas en el agua de poros con base en los perfiles. En rojo se muestran las muestras con posible error analítico.

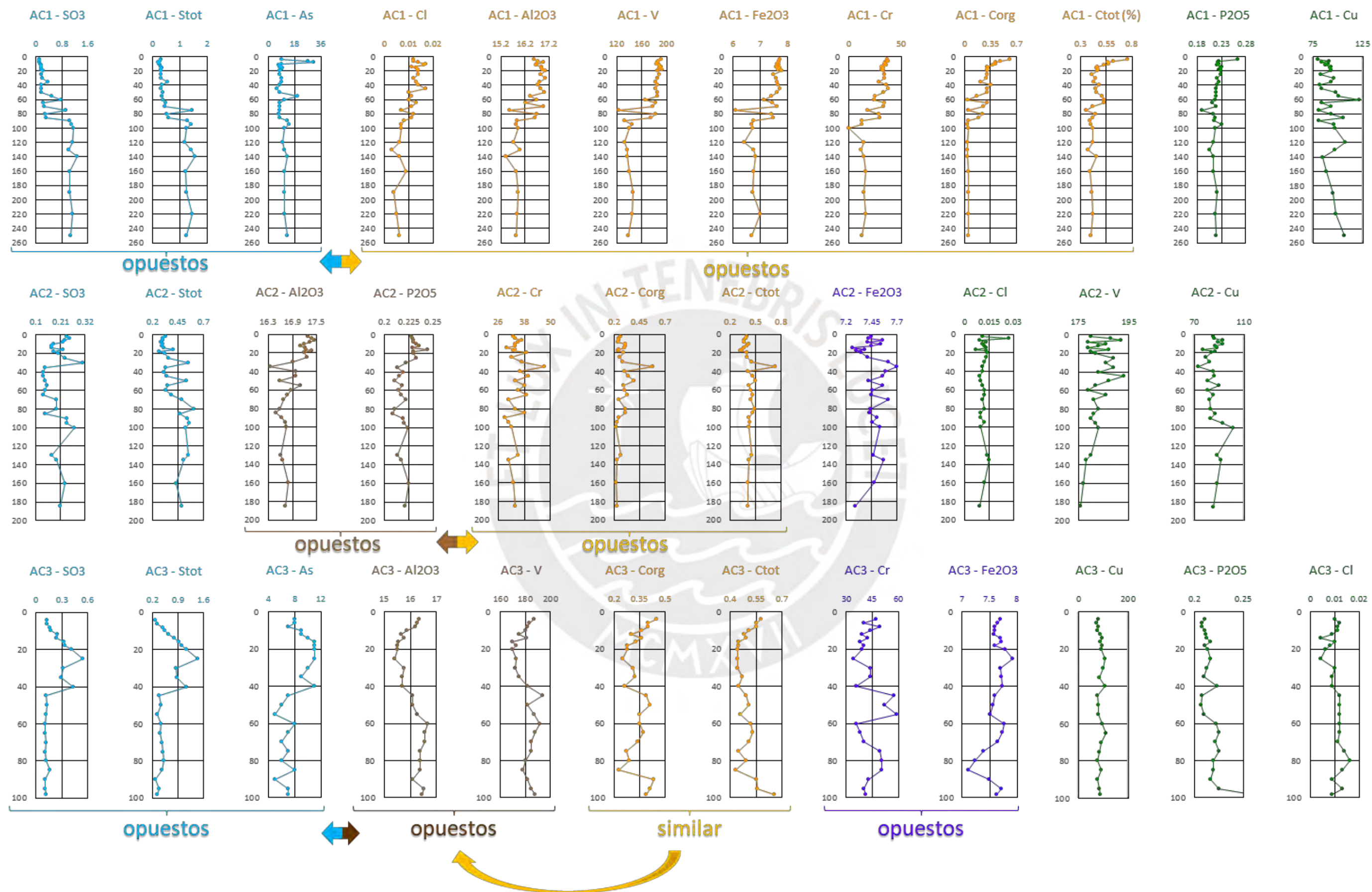


Figura 8-5: Asociaciones geoquímicas en el sedimento con base en los perfiles.

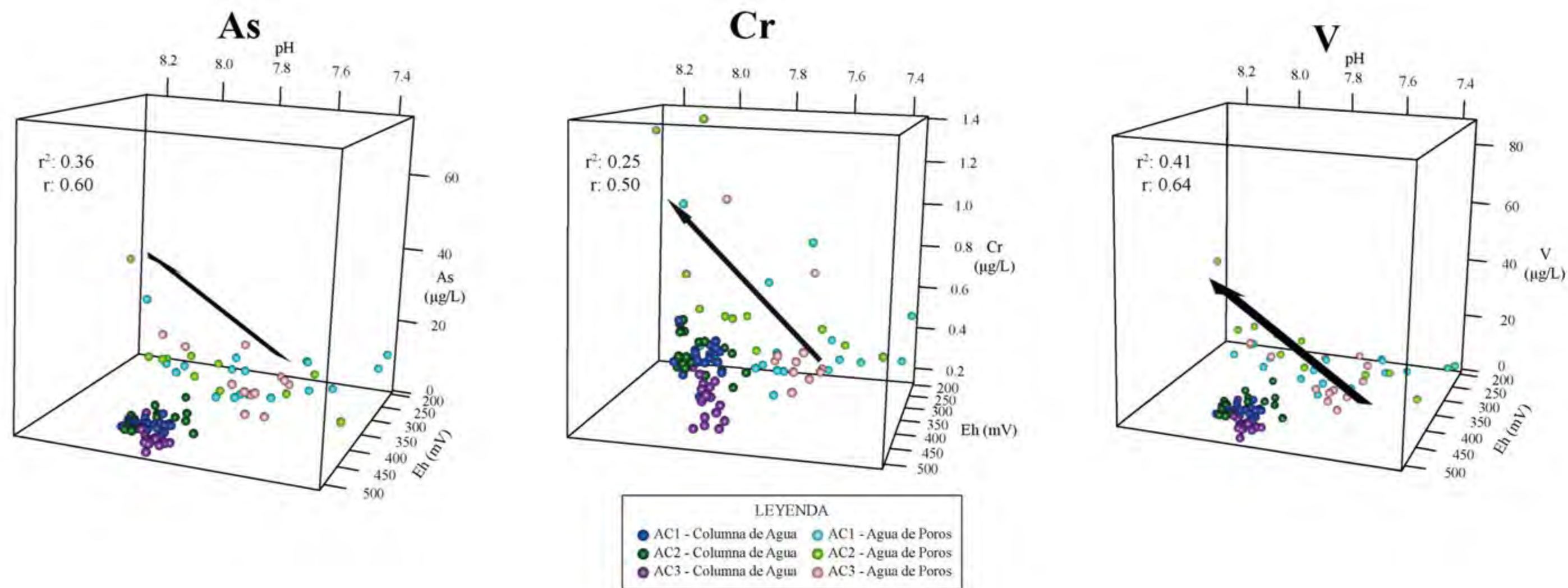


Figura 8-6: Correlación de mayor concentración de As, Cr y V a condiciones más reductoras y pH más básico

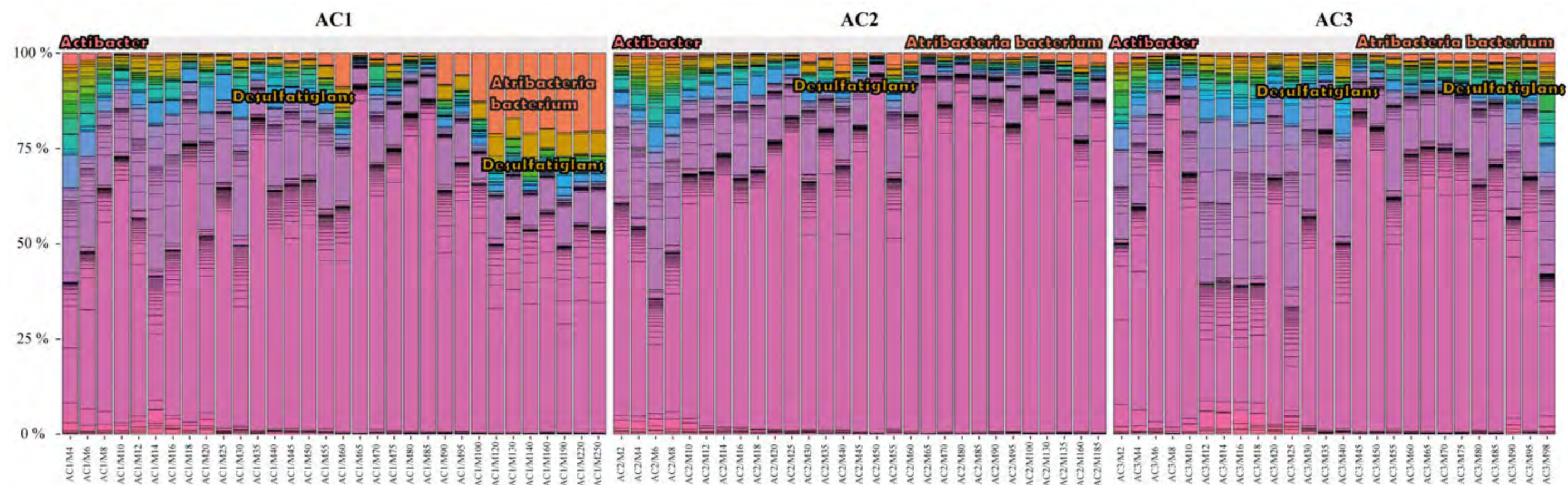
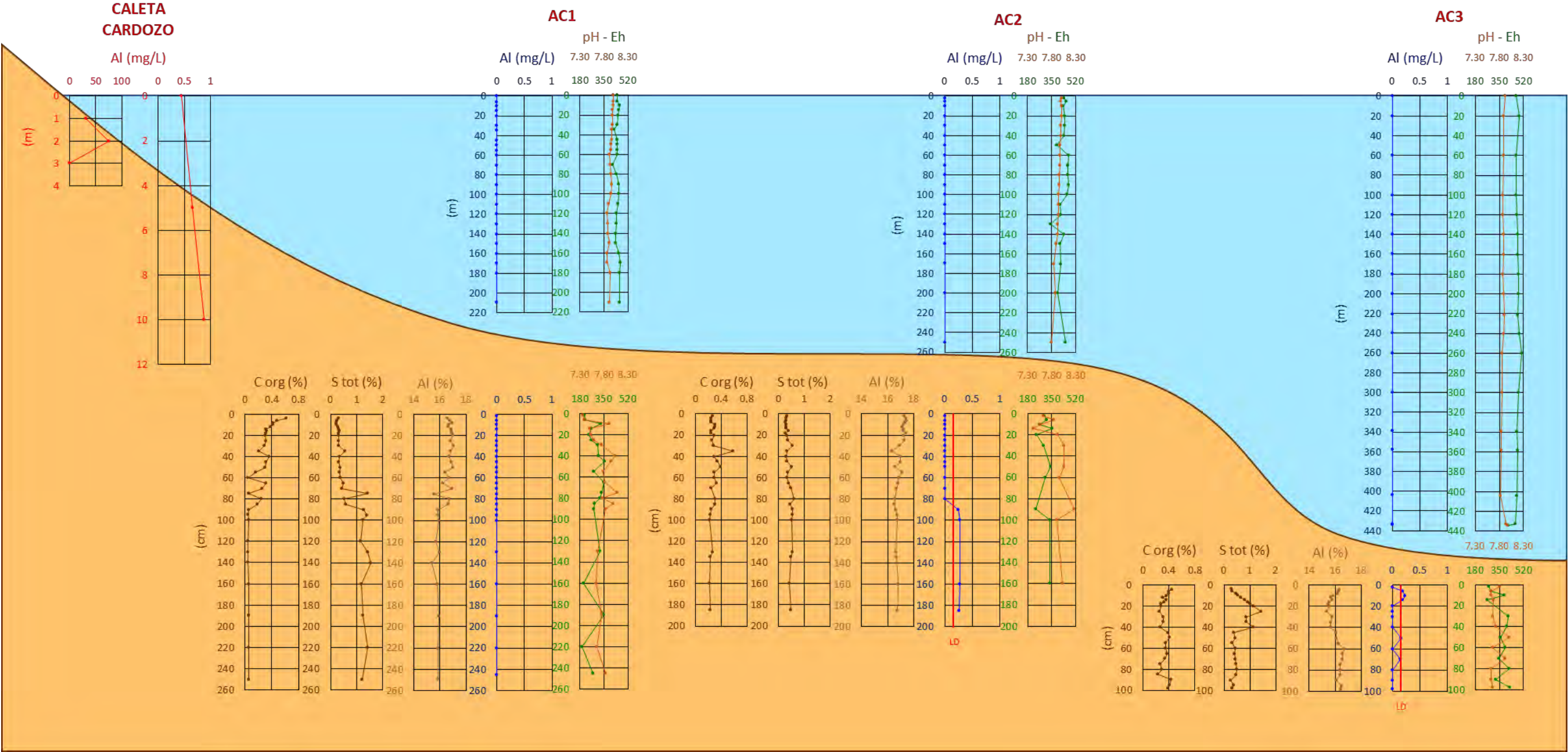


Figura 8-7: Variaciones en las concentraciones relativas de los géneros de las especies de bacterias con concentraciones mayores al 0.1%.

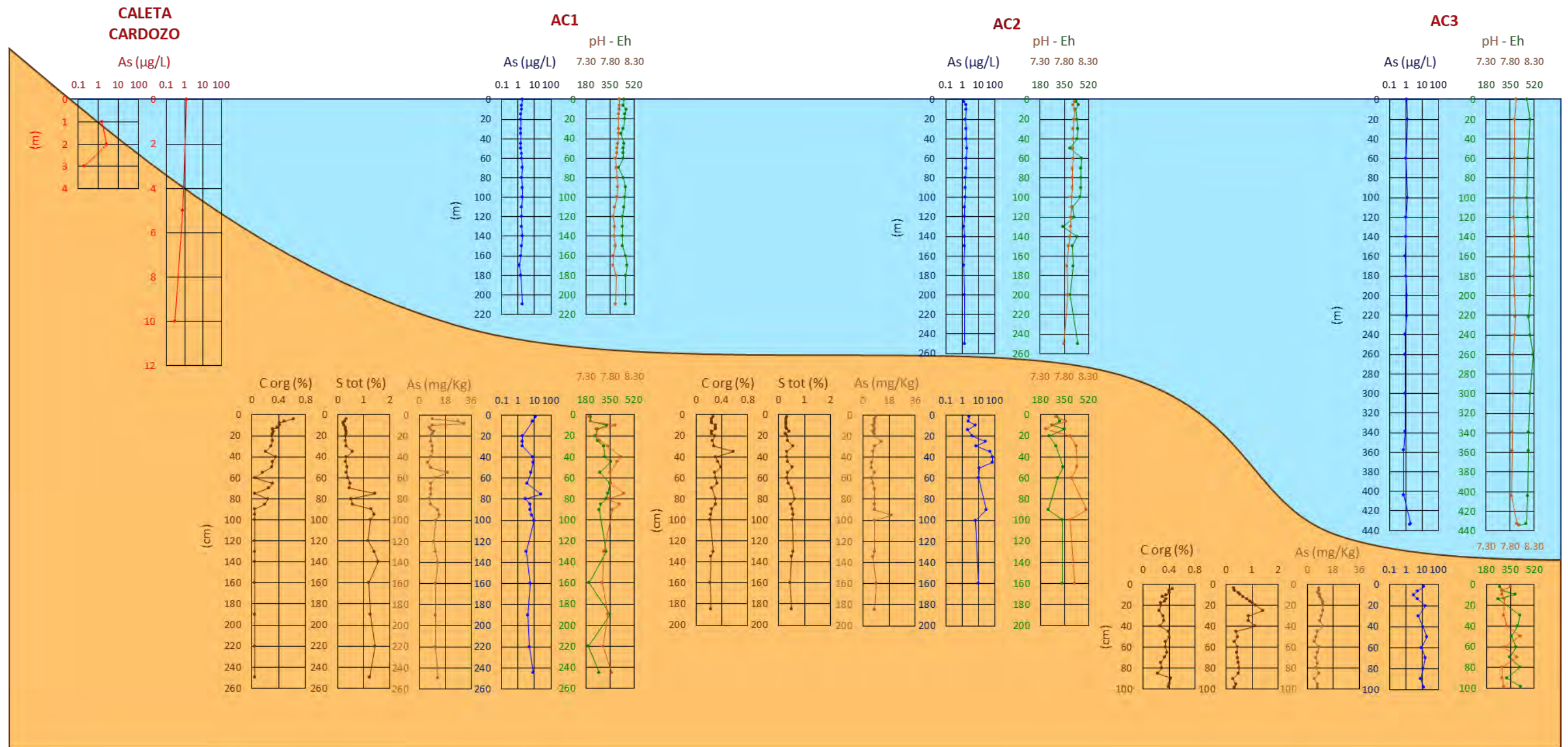
8.2. Anexo II: Esquemas

Al



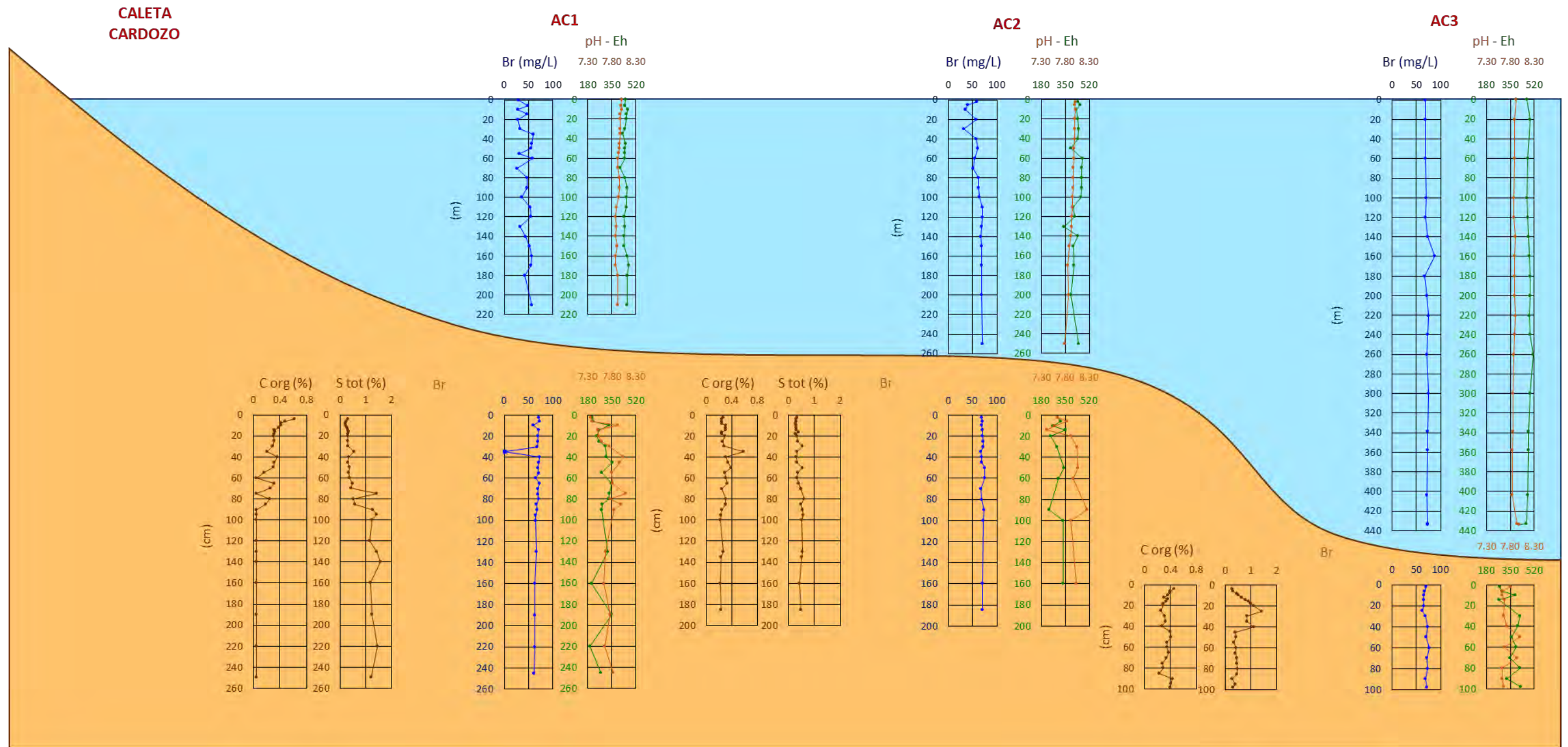
Esquema 8-1: Perfiles de concentraciones del Al en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org} , S_{tot} , pH y Eh con fines comparativos.

As



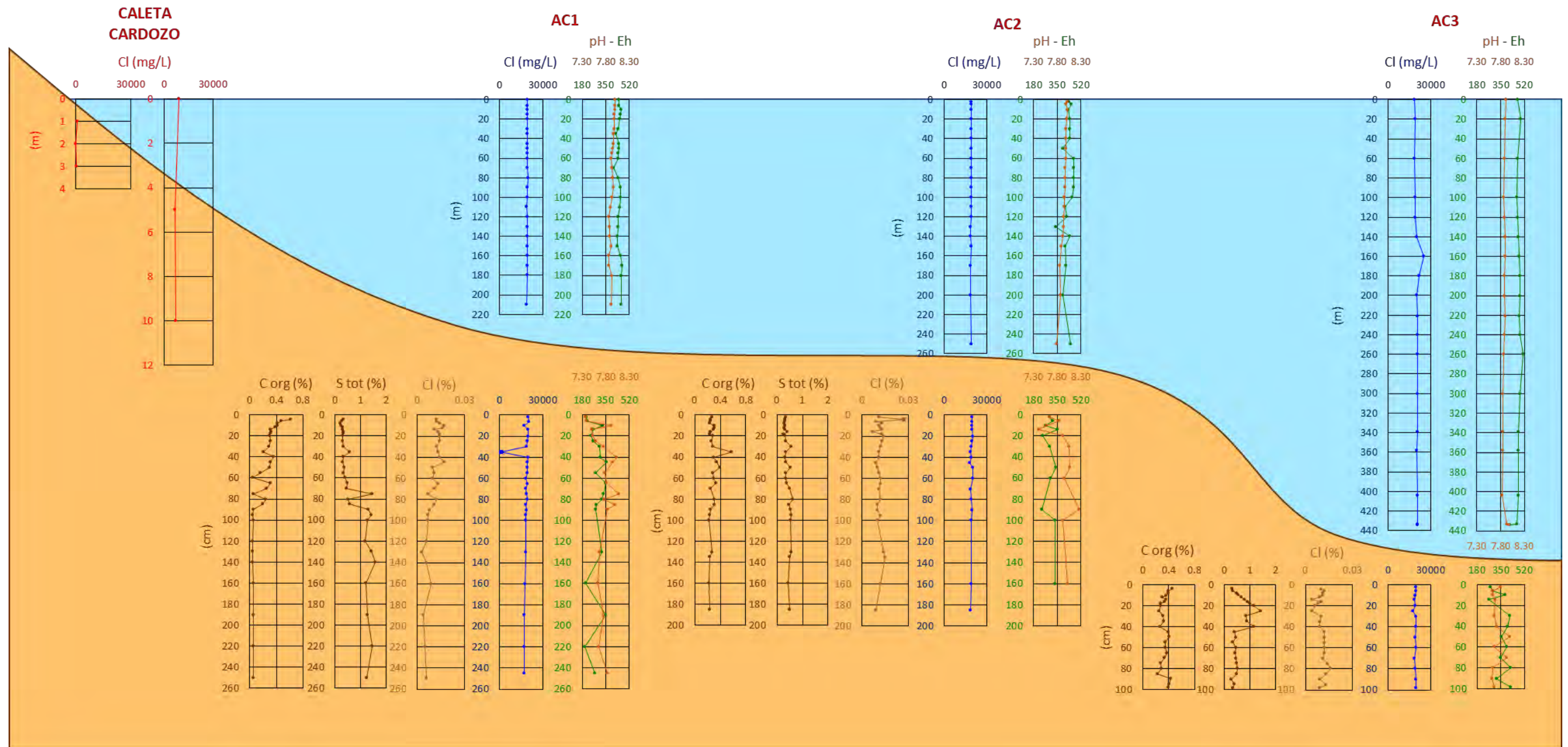
Esquema 8-2: Perfiles de concentraciones del As en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Br



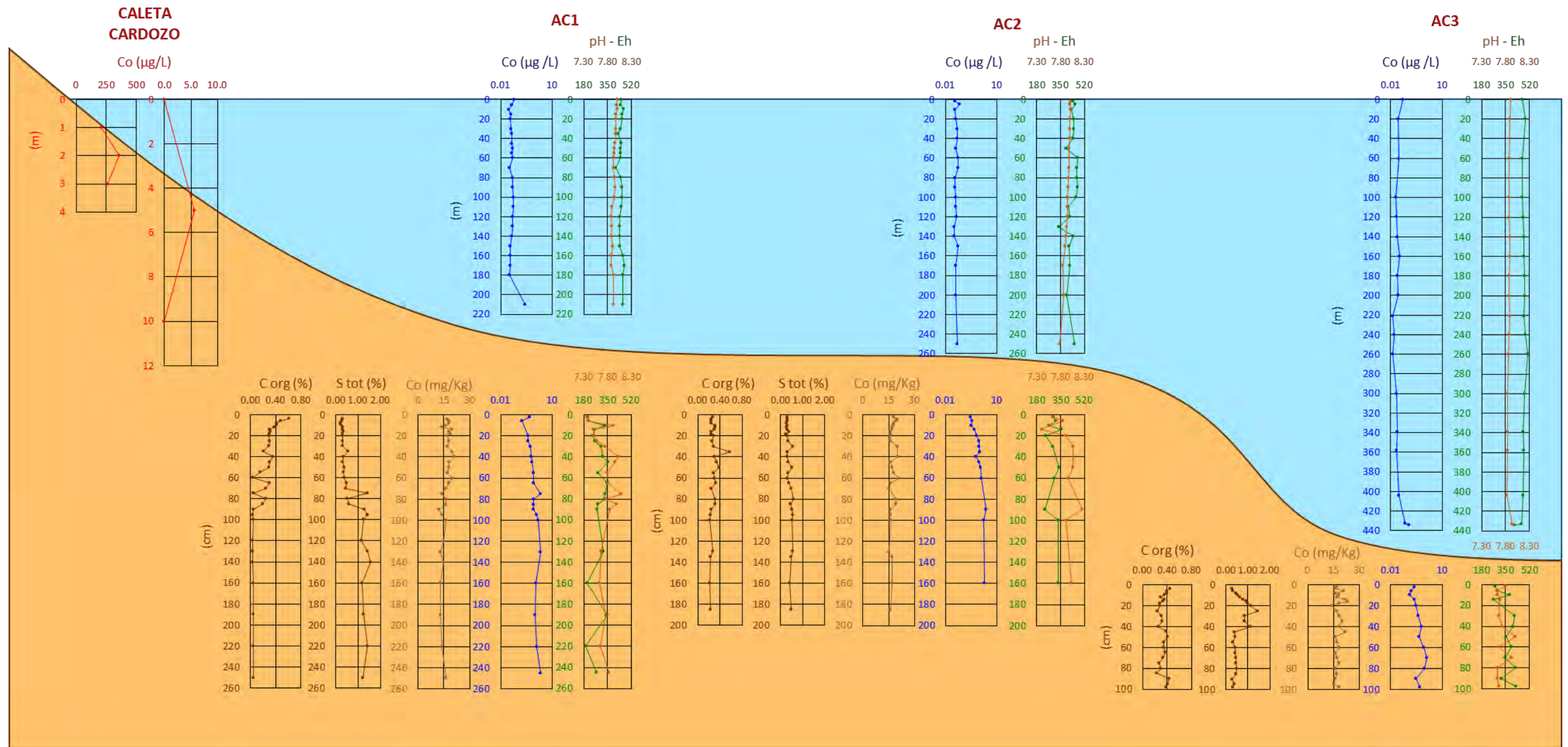
Esquema 8-3: Perfiles de concentraciones del Br en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org} , S_{tot} , pH y Eh con fines comparativos.

Cl



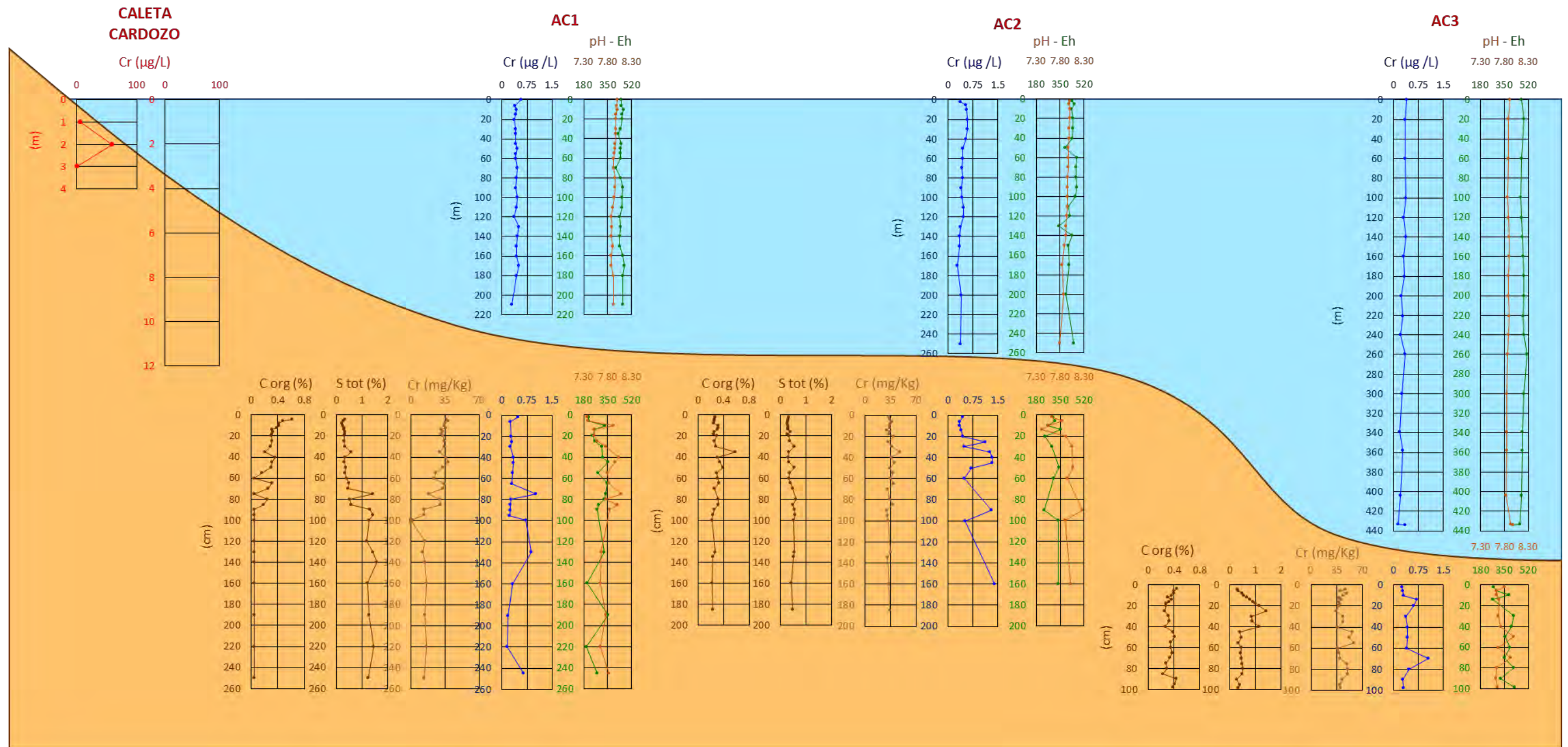
Esquema 8-4: Perfiles de concentraciones del Cl en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Co



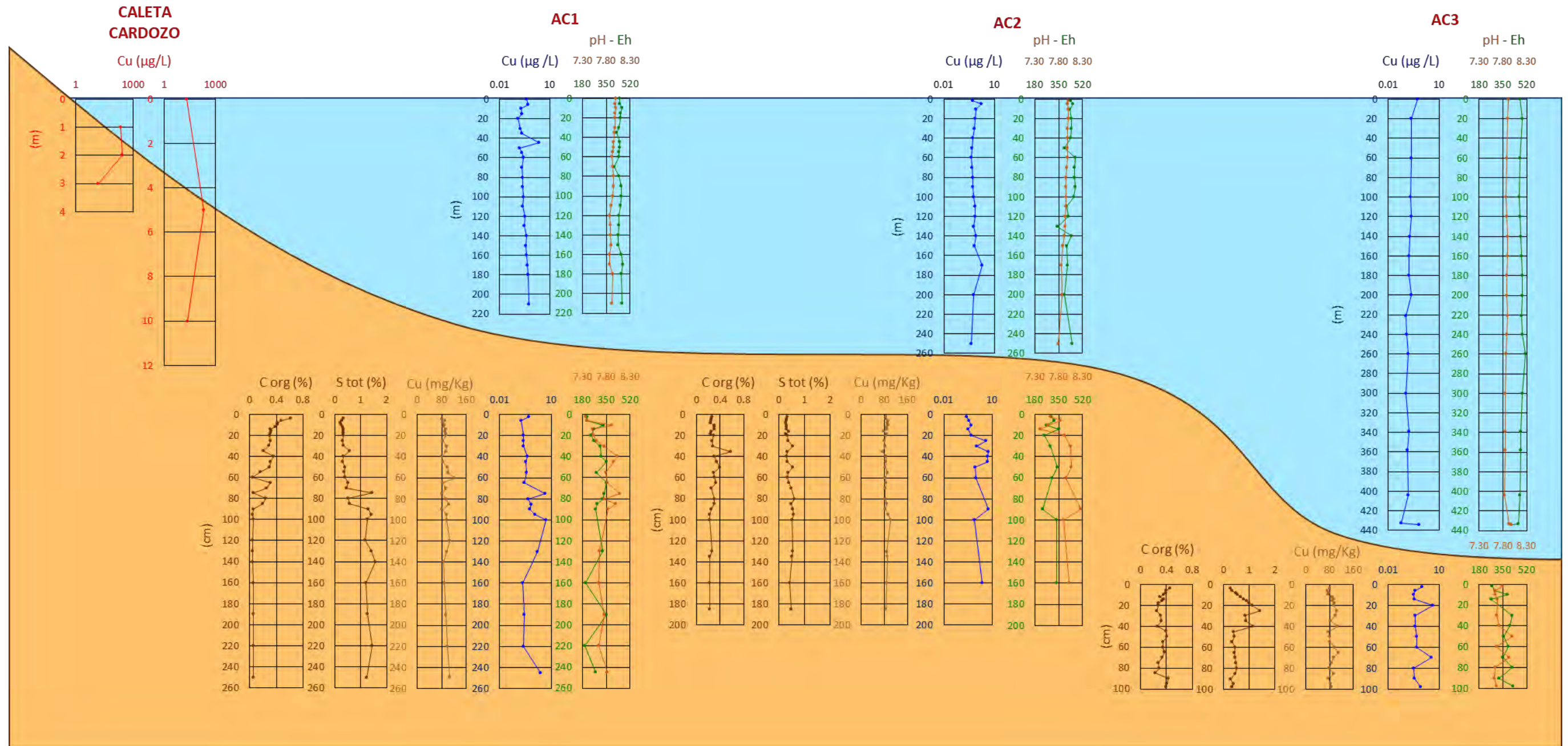
Esquema 8-5: Perfiles de concentraciones del Co en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Cr



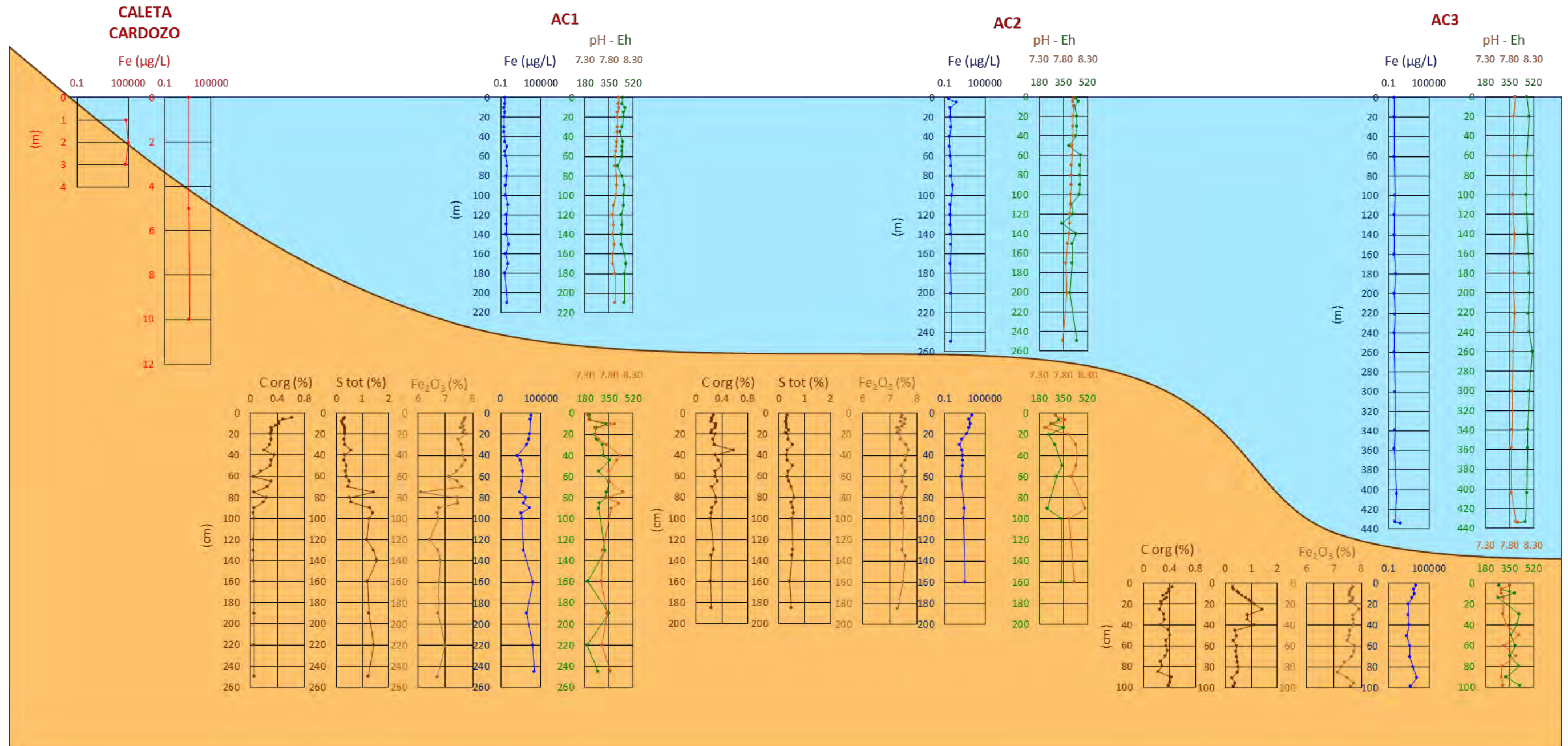
Esquema 8-6: Perfiles de concentraciones del Cr en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Cu



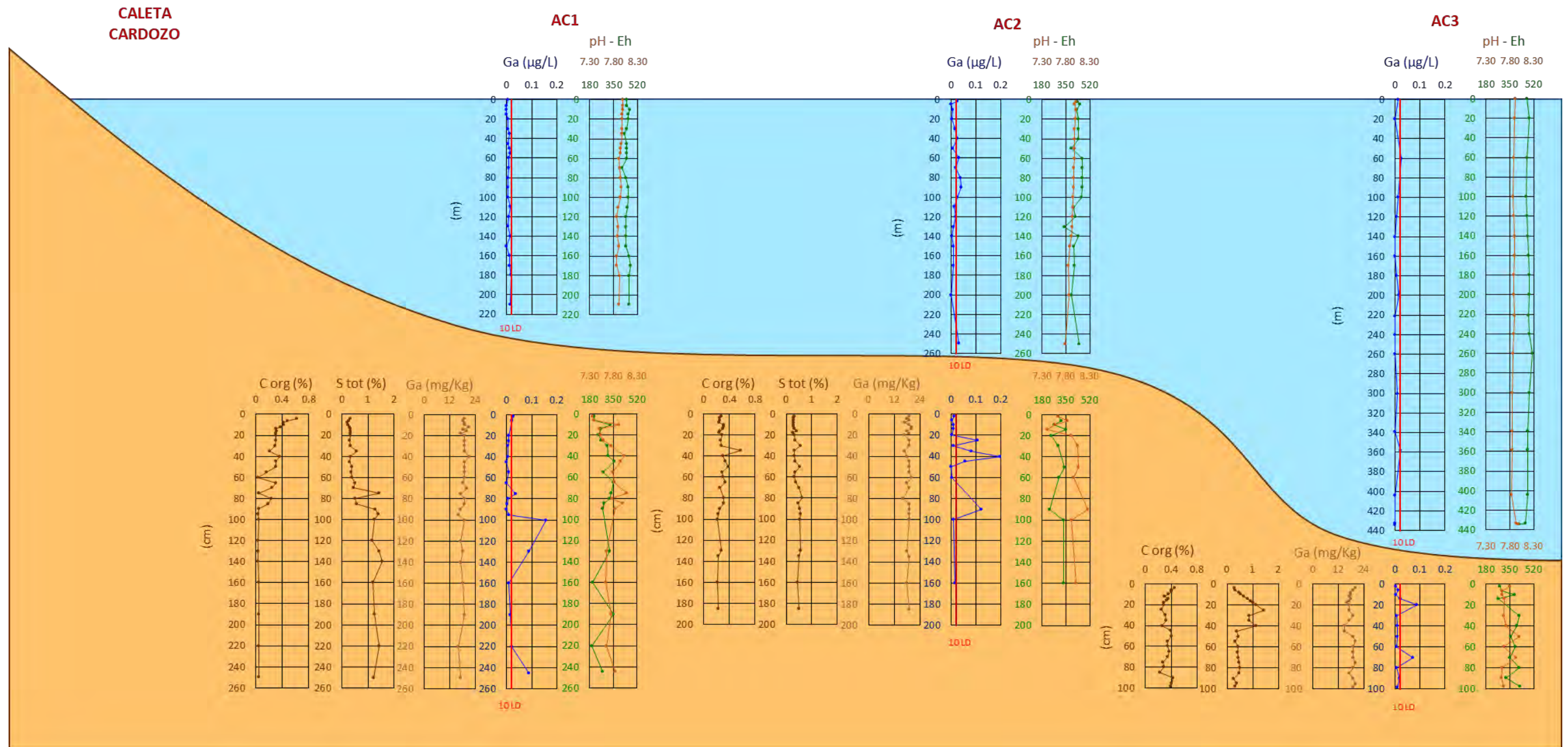
Esquema 8-7: Perfiles de concentraciones del Cu en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Fe



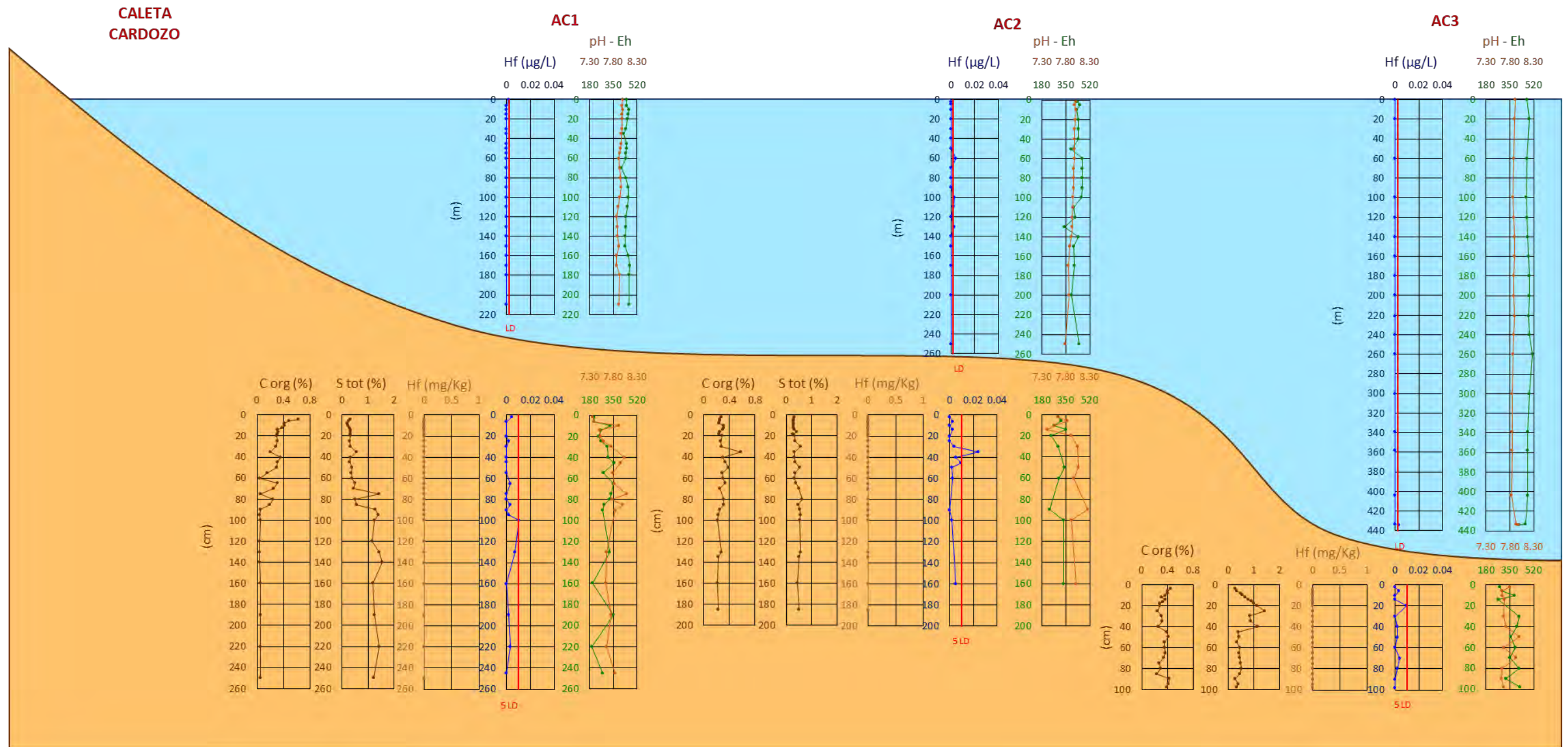
Esquema 8-8: Perfiles de concentraciones del Fe en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Ga



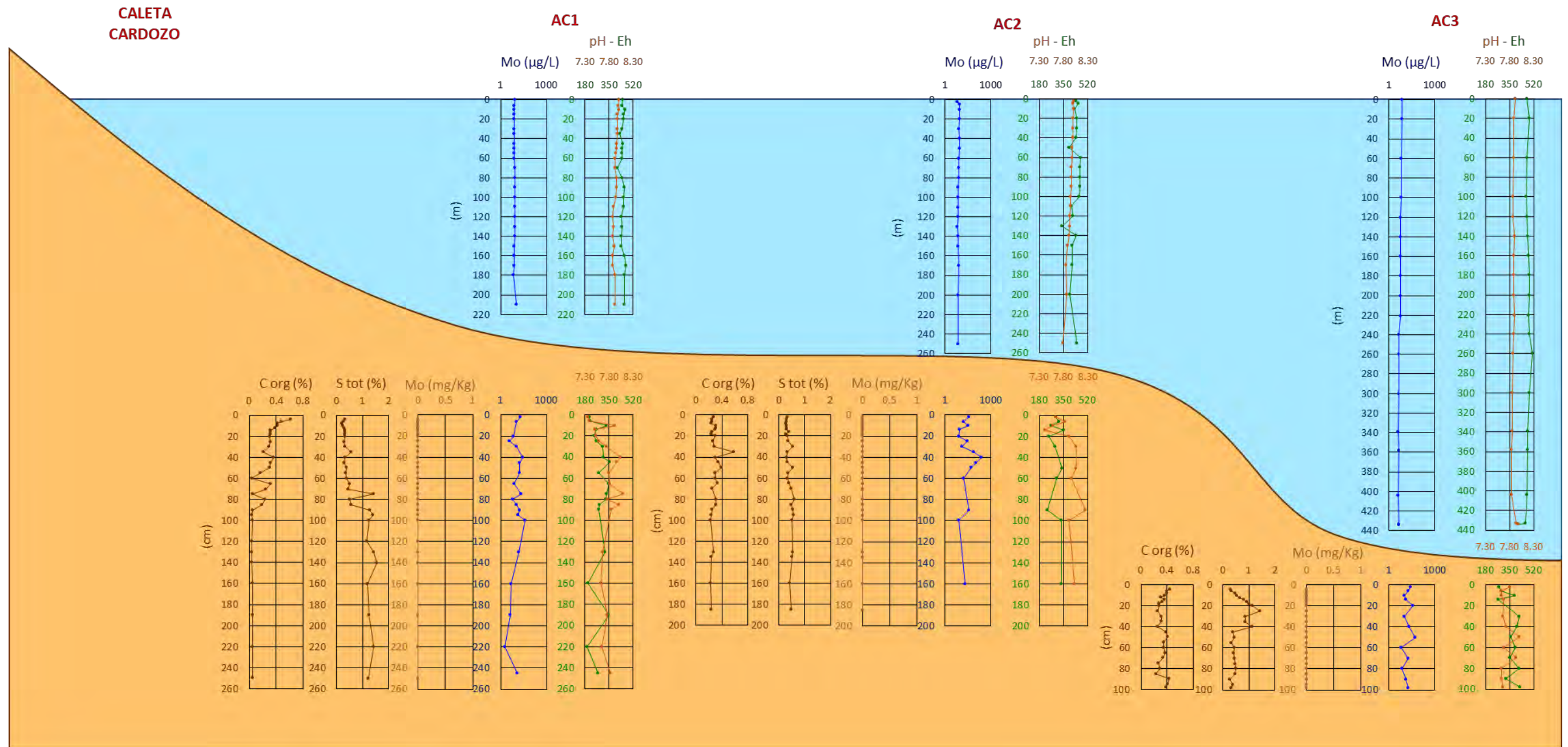
Esquema 8-9: Perfiles de concentraciones del Ga en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Hf



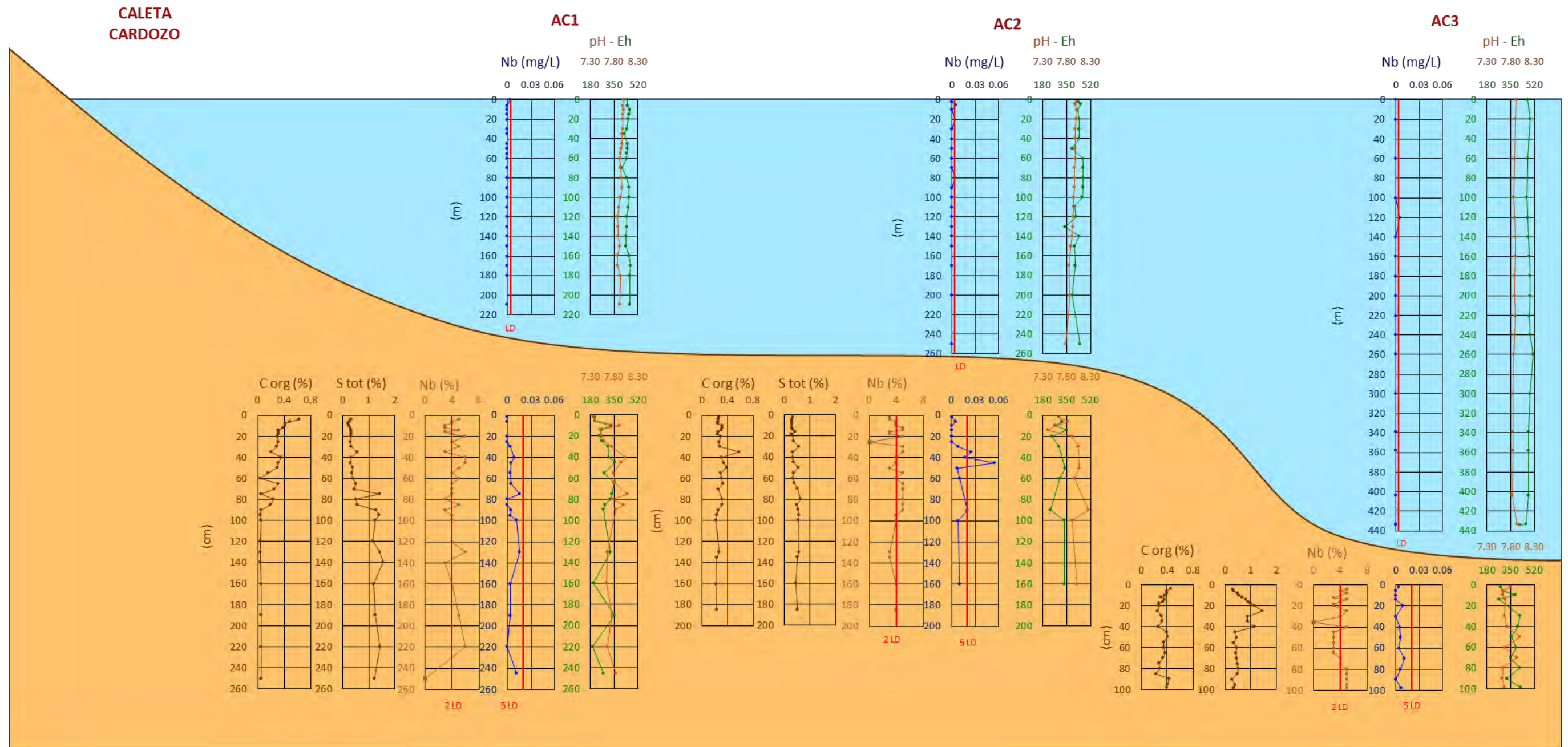
Esquema 8-10: Perfiles de concentraciones del Hf en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org} , S_{tot} , pH y Eh con fines comparativos.

Mo



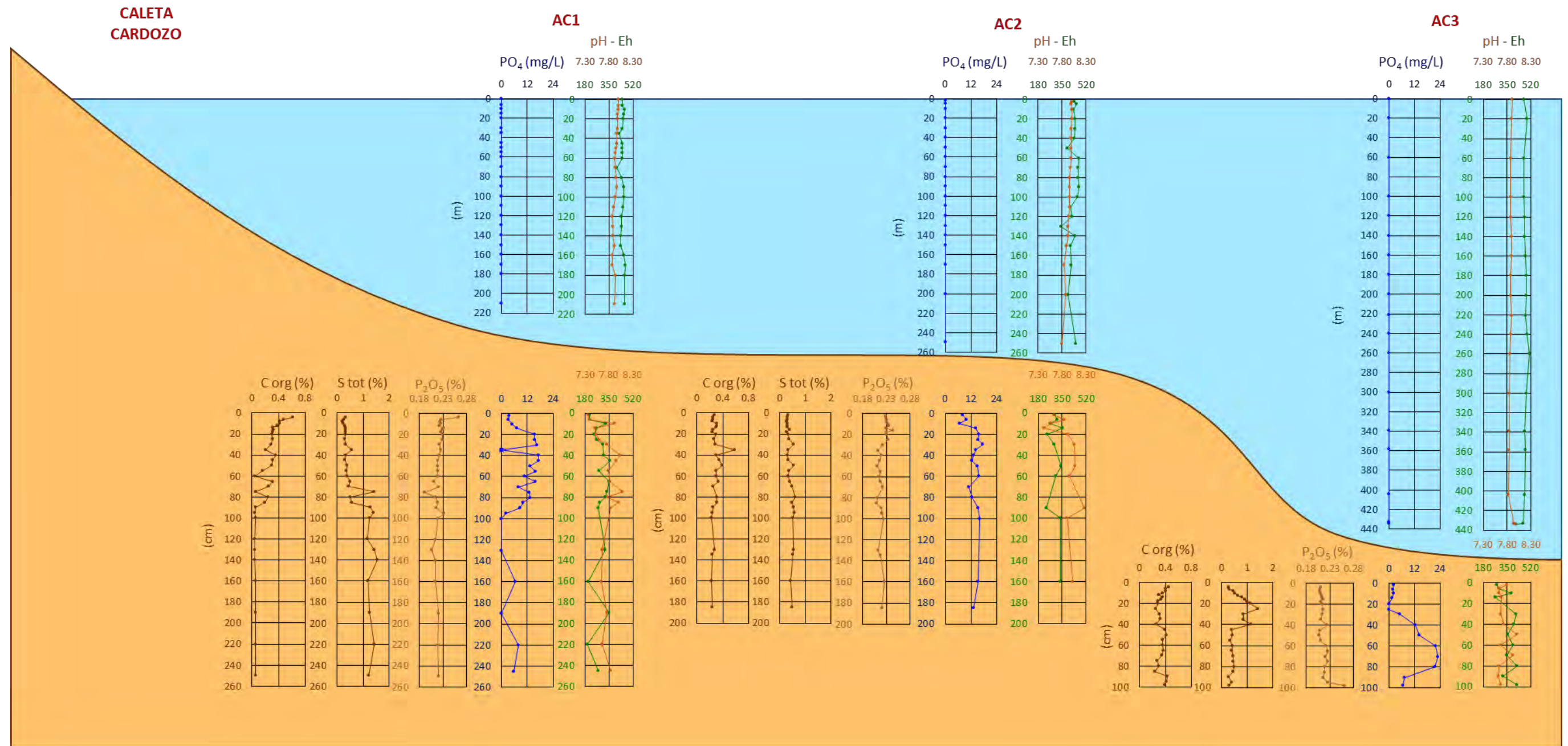
Esquema 8-11: Perfiles de concentraciones del Mo en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Nb



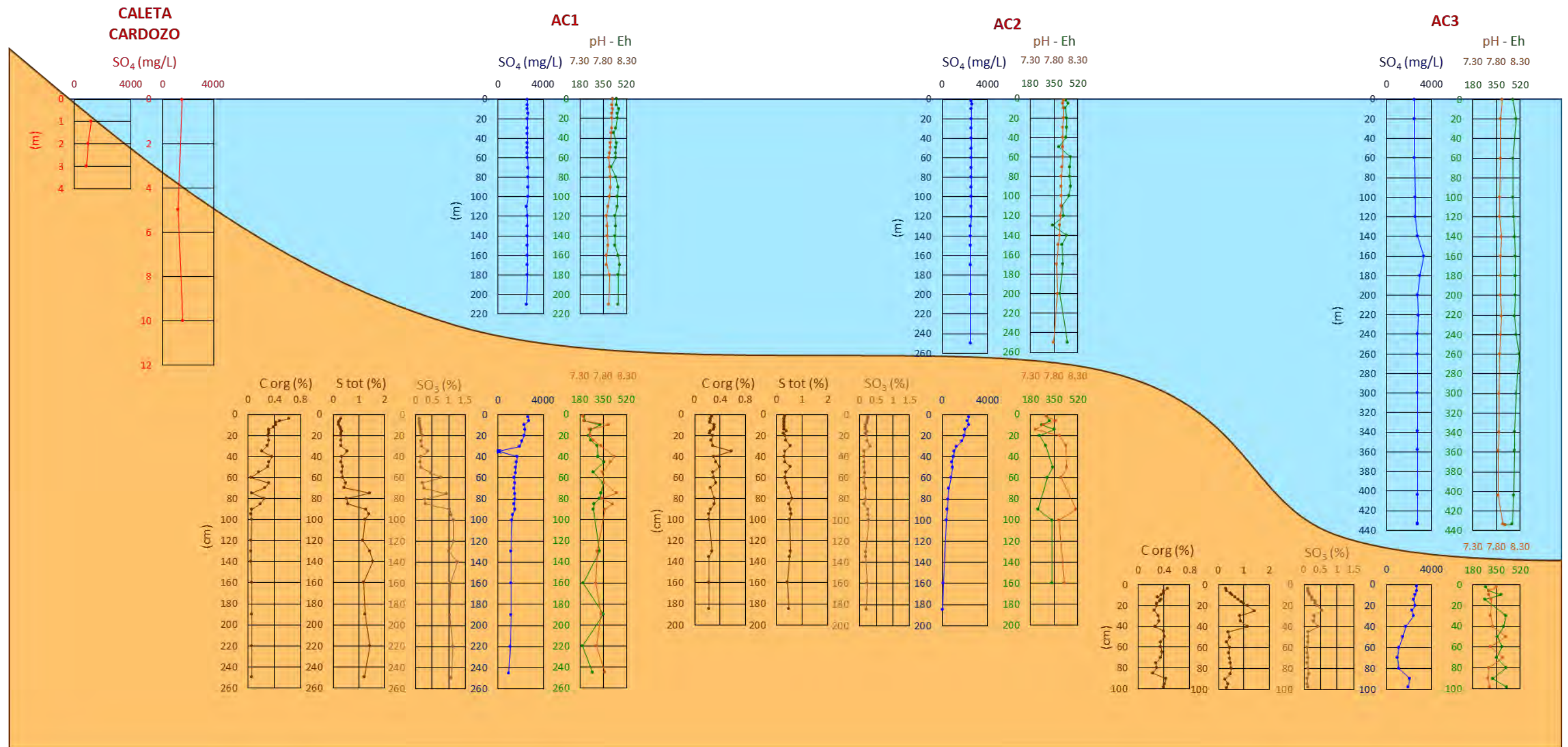
Esquema 8-12: Perfiles de concentraciones del Nb en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org} , S_{tot} , pH y Eh con fines comparativos.

P



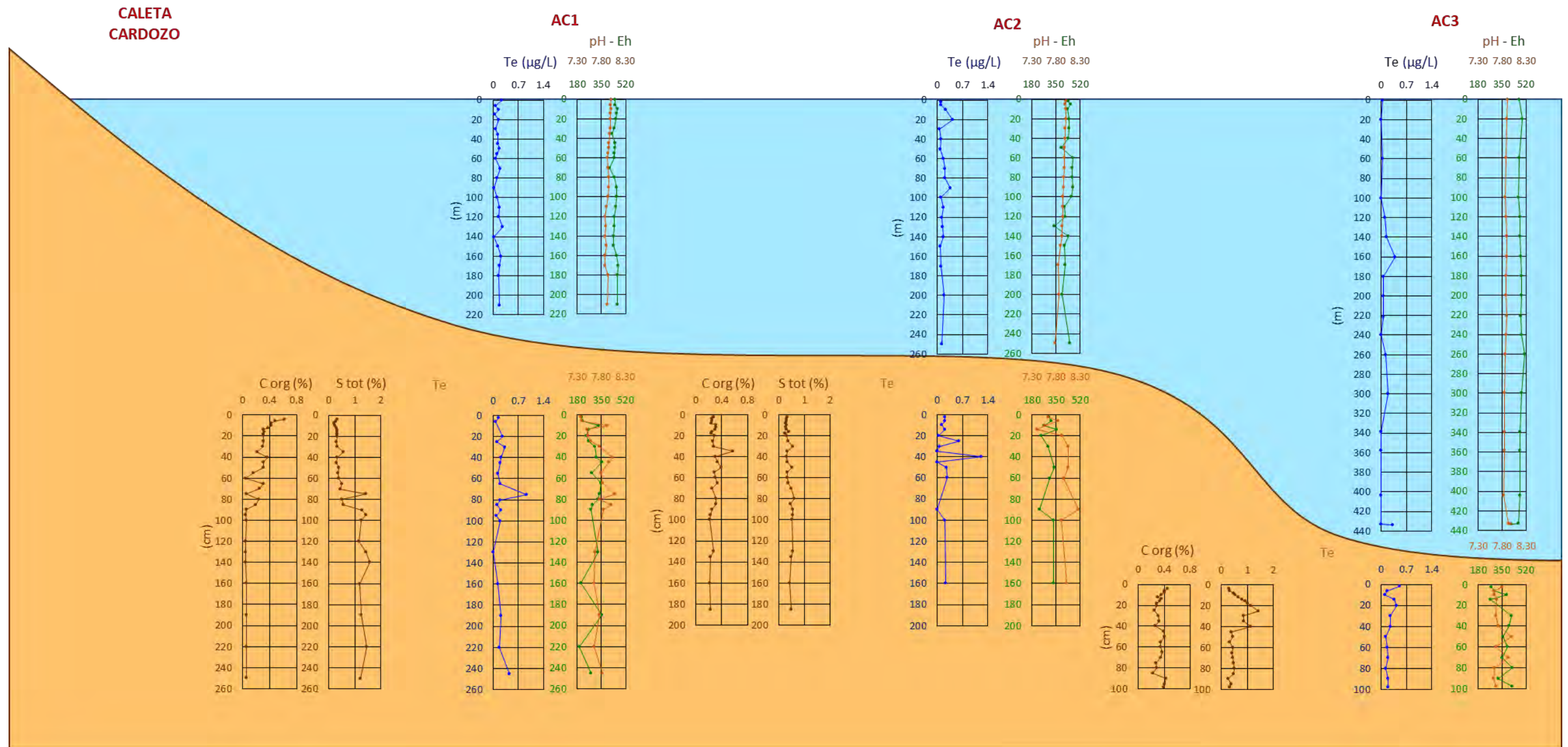
Esquema 8-13: Perfiles de concentraciones del P en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

S



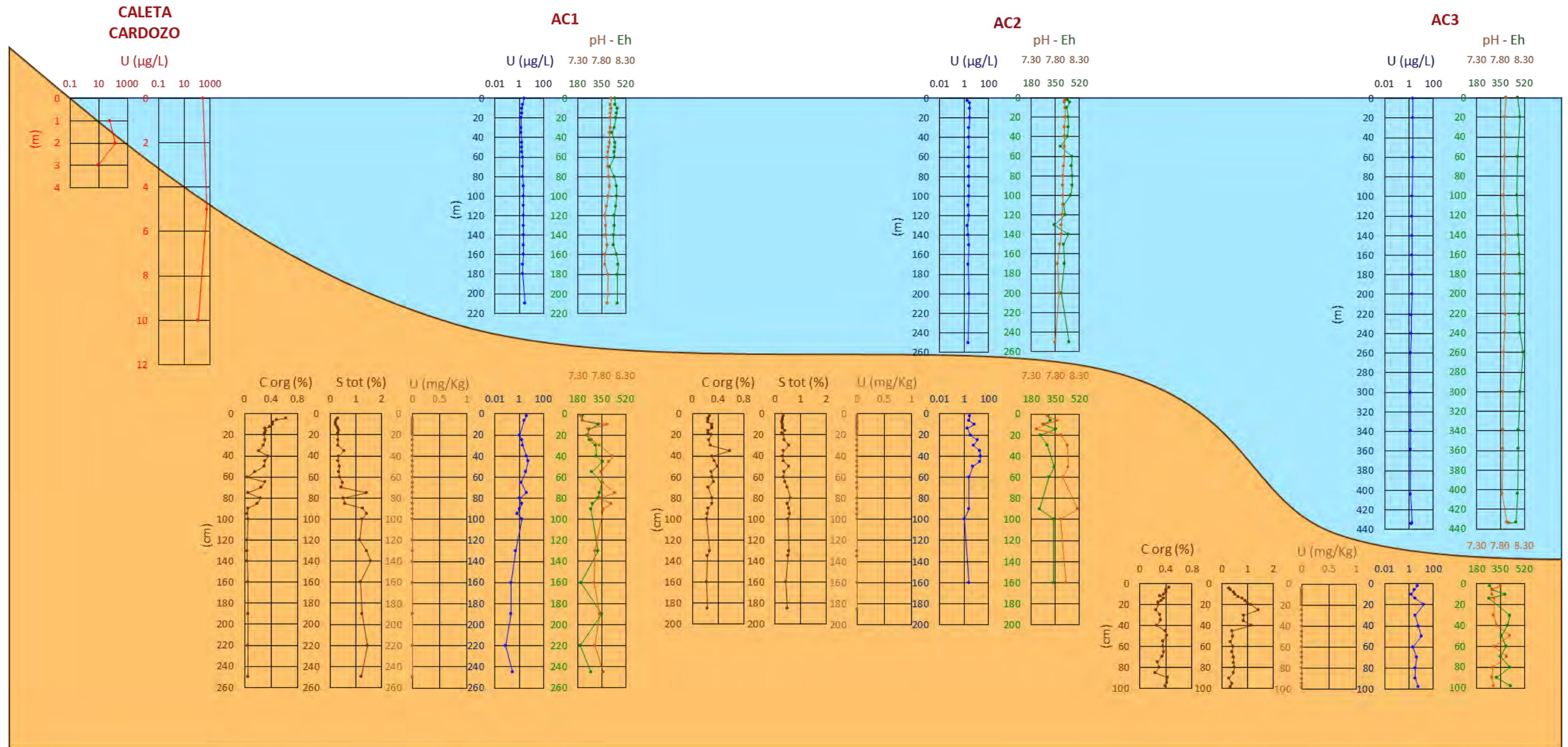
Esquema 8-14: Perfiles de concentraciones del S en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

Te



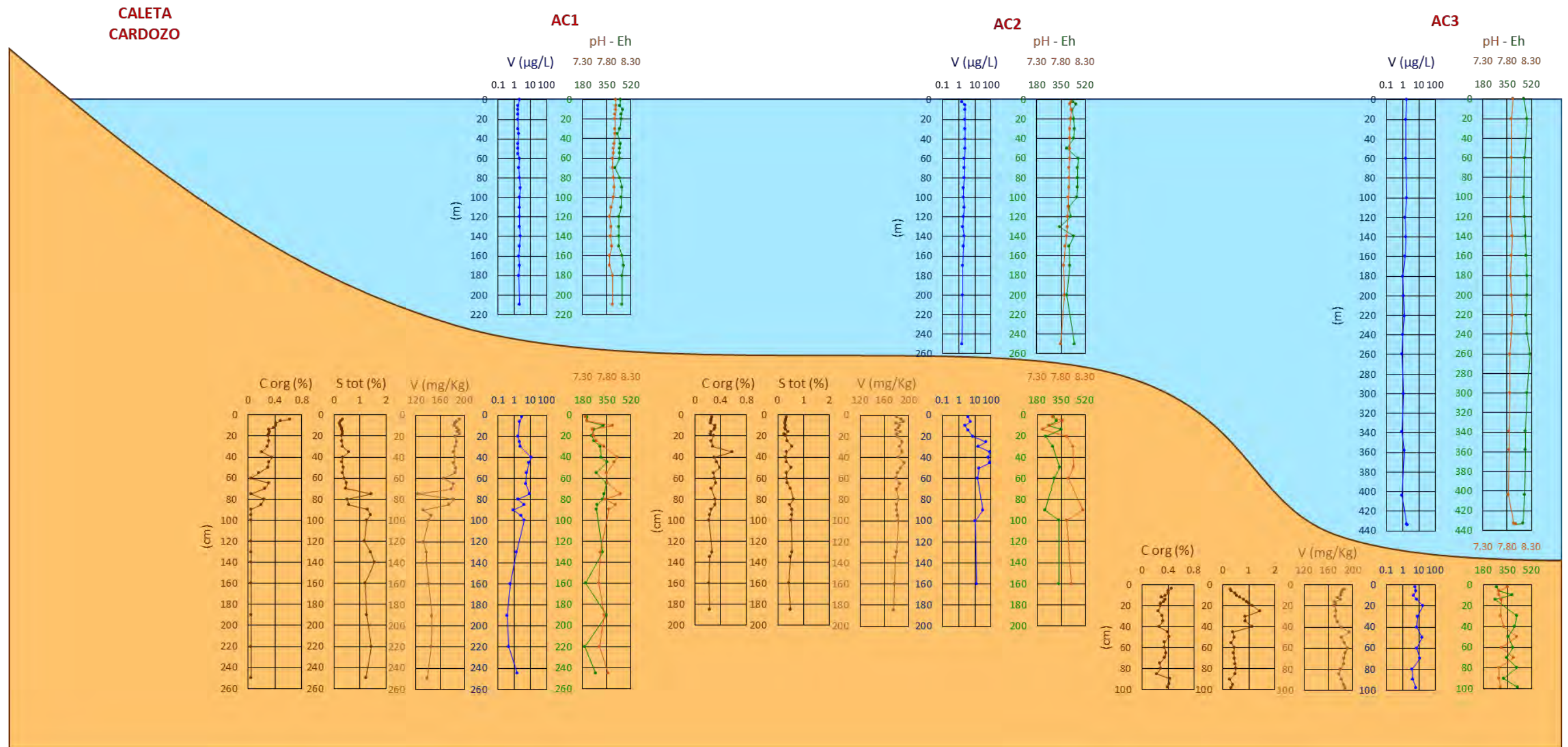
Esquema 8-15: Perfiles de concentraciones del Te en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

U



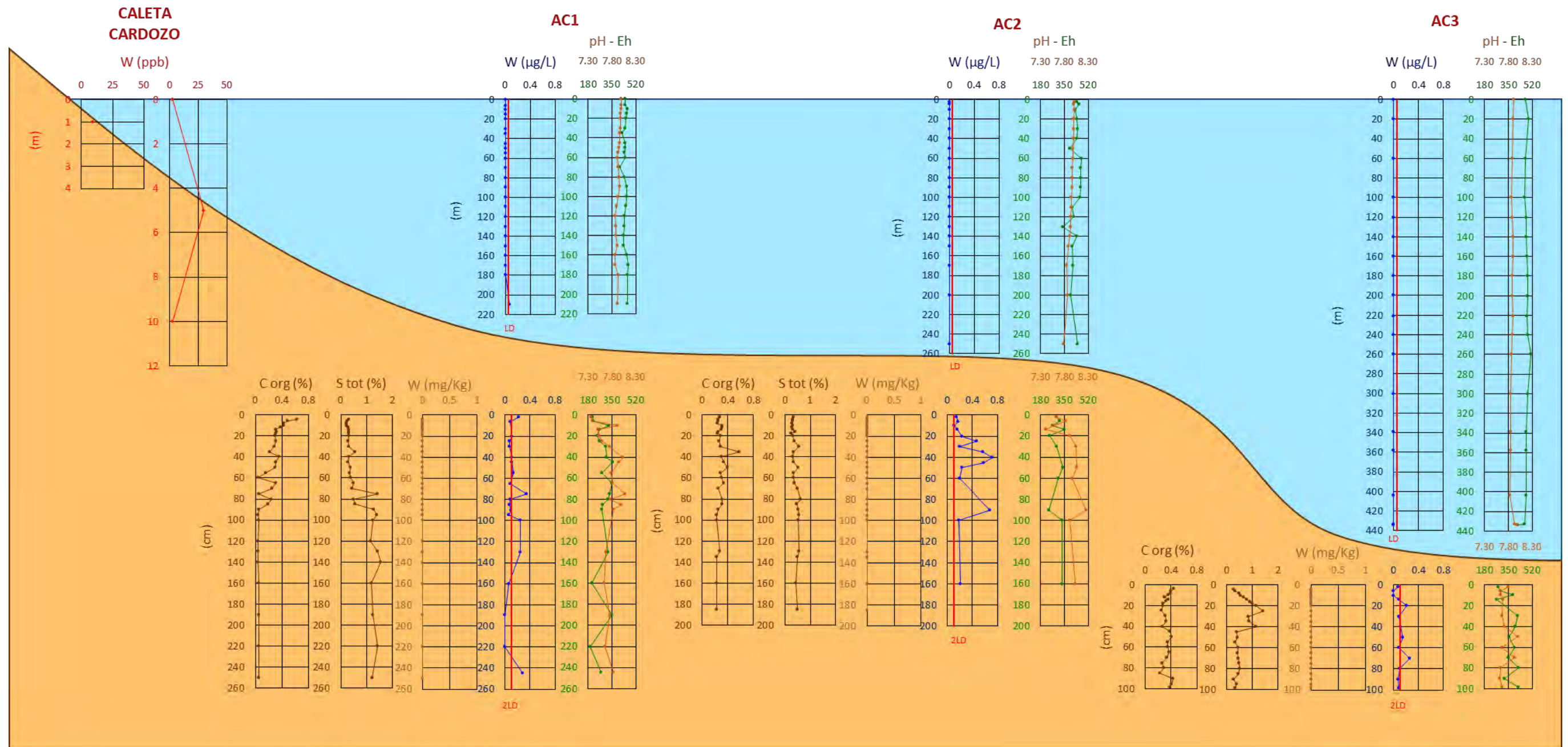
Esquema 8-16: Perfiles de concentraciones del U en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

V



Esquema 8-17: Perfiles de concentraciones del V en las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de C_{org}, S_{tot}, pH y Eh con fines comparativos.

W



Esquema 8-18: Perfiles de concentraciones del W en la fuente del DAR (rojo), las estaciones de muestreo (azul) y en el sedimento (marrón claro). Se muestran los perfiles de Corg, Stot, pH y Eh con fines comparativos.

8.3. Anexo III: Tablas

Tabla 8-1: Ubicación espacial de las estaciones de muestreo.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (m)	Longitud del testigo (cm)	Fecha
AC1	-62.1539	-58.5113	210	250.4	5/2/2020
AC2	-62.1457	-58.4808	283	188.5*	5/2/2020
AC3	-62.1363	-58.4467	434	100	2/2/2020
BE	-63.3864	-57.0103	311	-	3/2/2020

NOTA: (*) La longitud total recuperada en el punto AC2 fue de 338.5 cm. El primer y segundo segmento (38.5 y 150 cm, respectivamente) son estudiados en la presente tesis. El tercer y cuarto segmento (150 cm restantes) fueron puestos a disposición del INGEMMET.

Tabla 8-2: Lista de muestras obtenidas de la columna de agua por testigo, junto al pH, temperatura y Eh corregido.

Estación	Código	Profundidad (m)	Cantidad (ml)	pH	T (°C)	SHE (mV)
AC1	AC1/0*	0	60	8.00	5.1	446
AC1	AC1/6**	6	60	7.99	5.6	445
AC1	AC1/10	10	60	8.00	4.3	462
AC1	AC1/15	15	60	7.98	5.0	455
AC1	AC1/20	20	60	7.98	4.7	451
AC1	AC1/30	30	60	7.98	4.5	442
AC1	AC1/35	35	60	7.97	5.2	425
AC1	AC1/45	45	60	7.96	5.5	446
AC1	AC1/50	50	60	7.95	6.4	444
AC1	AC1/55	55	60	7.94	6.6	442
AC1	AC1/60	60	60	7.92	8.7	442
AC1	AC1/70	70	60	7.93	7.9	408
AC1	AC1/80	80	60	7.95	5.8	440
AC1	AC1/90	90	60	7.96	4.2	457
AC1	AC1/100	100	60	7.94	5.9	455
AC1	AC1/110	110	60	7.90	9.2	451
AC1	AC1/120	120	60	7.87	10.9	439
AC1	AC1/130	130	60	7.89	9.8	440
AC1	AC1/140	140	60	7.88	9.8	435
AC1	AC1/150	150	60	7.91	9.8	435
AC1	AC1/160	160	60	7.87	9.8	458
AC1	AC1/170	170	60	7.87	8.7	468
AC1	AC1/180	180	60	7.93	8.6	460
AC1	AC1/2cmfondo	209.98	60	7.92	11.6	461

Estación	Código	Profundidad (m)	Cantidad (ml)	pH	T (°C)	SHE (mV)
AC2	AC2/2	2	60	8.01	4.6	437
AC2	AC2/5	5	60	7.99	5.0	453
AC2	AC2/10	10	60	8.01	4.0	430
AC2	AC2/20	20	60	8.00	4.4	441
AC2	AC2/30	30	60	7.99	3.9	442
AC2	AC2/40	40	60	7.99	3.6	438
AC2	AC2/50	50	60	7.98	4.2	389
AC2	AC2/60	60	60	7.98	3.5	470
AC2	AC2/70	70	60	7.97	3.5	466
AC2	AC2/80	80	60	7.96	3.8	466
AC2	AC2/90	90	60	7.96	3.8	469
AC2	AC2/100	100	60	7.95	3.5	459
AC2	AC2/110	110	60	7.95	4.2	407
AC2	AC2/120	120	60	7.94	4.1	418
AC2	AC2/130	130	60	7.93	4.3	341
AC2	AC2/140	140	60	7.92	4.4	439
AC2	AC2/150	150	60	7.89	5.6	409
AC2	AC2/170	170	60	7.85	8.0	414
AC2	AC2/200	200	60	7.87	6.8	392
AC2	AC2/250	250	60	7.79	7.6	447
AC3	AC3/0*	0	60	7.92	6.1	470
AC3	AC3/20	20	60	7.89	6.1	491
AC3	AC3/60	60	60	7.88	6.1	471
AC3	AC3/100	100	60	7.87	6.1	468
AC3	AC3/120	120	60	7.88	6.1	474
AC3	AC3/140	140	60	7.90	6.1	478
AC3	AC3/160	160	60	7.89	6.1	483
AC3	AC3/180	180	60	7.88	6.1	488
AC3	AC3/200	200	60	7.88	6.1	488
AC3	AC3/221	221	60	7.90	6.1	482
AC3	AC3/240	240	60	7.88	6.1	490
AC3	AC3/260	260	60	7.86	6.1	511
AC3	AC3/300	300	60	7.85	6.1	488
AC3	AC3/339	339	60	7.85	6.1	477
AC3	AC3/358	358	60	7.85	6.1	479
AC3	AC3/404	404	60	7.83	6.1	475
AC3	AC3/1mfondo	433	60	7.94	6.1	463
AC3	AC3/1cmfondo	433.9	60	7.98	6.1	414
BE	BE/10	10	60	7.99	5.0	450

Estación	Código	Profundidad (m)	Cantidad (ml)	pH	T (°C)	SHE (mV)
BE	BE/100	100	60	7.98	5.0	453
BE	BE/310	310	60	7.95	4.0	461

NOTA: Se obtuvieron 60 ml tanto para el análisis de cationes como el de aniones. (*) La muestra se obtuvo mediante un balde desde la cubierta. (**) La muestra se obtuvo desde un grifo del laboratorio del buque, la cual bombea agua desde 6 metros de profundidad.

Tabla 8-3: Lista de muestras de agua de poros obtenidas por testigo, junto al pH, temperatura y Eh corregido

Estación	Muestra	Profundidad (cm)	pH	T (°C)	SHE (mV)	Cationes (ml)	Aniones (ml)
AC1	AC1/P2	2	7.37	18.4	212	7	15
AC1	AC1/P6	6	7.39	18.2	215	7	15
AC1	AC1/P10	10	7.92	18.1	330	7	15
AC1	AC1/P14	14	7.51	18.5	261	7	15
AC1	AC1/P20	20	7.52	17.9	244	7	15
AC1	AC1/P25	25	7.59	17.6	261	7	15
AC1	AC1/P30	30	7.75	17.4	306	7	15
AC1	AC1/P35	35	**	**	**	7	**
AC1	AC1/P40	40	8.03	18.4	313	7	7
AC1	AC1/P45	45	7.95	17.4	354	7	15
AC1	AC1/P50	50	**	**	**	7	**
AC1	AC1/P55	55	7.79	17.8	280	7	15
AC1	AC1/P60	60	**	**	**	7	**
AC1	AC1/P65	65	7.82	17.8	350	7	15
AC1	AC1/P70	70	**	**	**	7	**
AC1	AC1/P75	75	8.08	18.9	334	7	7
AC1	AC1/P80	80	7.76	17.6	325	7	15
AC1	AC1/P85	85	8.00	18.3	285	7	15
AC1	AC1/P90	90	7.84	18.2	276	7	15
AC1	AC1/P95	95	**	**	**	7	**
AC1	AC1/P100	100	**	**	**	7	**
AC1	AC1/P130	130	7.66	18.6	323	7	7
AC1	AC1/P160*	160	7.64	18.1	203	7	15
AC1	AC1/P190*	190	7.76	17.9	351	7	15
AC1	AC1/P220*	220	7.65	18.3	196	7	15
AC1	AC1/P245*	245	7.83	18.4	274	7	7
AC2	AC2/P2	2	7.63	17.6	297	7	15
AC2	AC2/P6	6	7.84	18.2	316	7	15
AC2	AC2/P10	10	7.57	18.6	265	7	15
AC2	AC2/P14	14	7.41	18.1	353	7	15
AC2	AC2/P20	20	7.92	17.3	244	7	15
AC2	AC2/P30	30	8.05	18.2	292	7	7
AC2	AC2/P35	35	**	**	**	7	**

Estación	Muestra	Profundidad (cm)	pH	T (°C)	SHE (mV)	Cationes (ml)	Aniones (ml)
AC2	AC2/P40	40	**	**	**	7	**
AC2	AC2/P45	45	**	**	**	7	**
AC2	AC2/P50	50	8.06	18.9	340	7	15
AC2	AC2/P60	60	7.96	18.7	303	7	15
AC2	AC2/P70	70	**	**	**	7	**
AC2	AC2/P80	80	**	**	**	7	**
AC2	AC2/P90	90	8.26	18.8	237	7	**
AC2	AC2/P100	100	7.91	18.9	335	7	7
AC2	AC2/P130	130	**	**	**	**	**
AC2	AC2/P160	160	8.02	18.9	335	7	15
AC2	AC2/P185	185	**	**	**	7	**
AC3	AC3/P2	2	7.80	16.8	275	7	15
AC3	AC3/P6	6	7.63	15.7	293	7	15
AC3	AC3/P10	10	7.63	14.1	383	7	15
AC3	AC3/P14	14	7.68	18.2	266	7	15
AC3	AC3/P20	20	**	**	**	7	**
AC3	AC3/P25	25	**	**	**	7	**
AC3	AC3/P30	30	7.66	15.4	416	7	15
AC3	AC3/P40	40	7.72	15.9	400	7	15
AC3	AC3/P50	50	8.00	19.0	356	7	15
AC3	AC3/P60	60	7.67	14.9	391	7	15
AC3	AC3/P70	70	7.93	18.6	349	7	15
AC3	AC3/P80	80	7.63	15.4	419	7	15
AC3	AC3/P90	90	7.62	15.9	322	7	15
AC3	AC3/P98	98	7.66	14.0	422	7	15

NOTA: (*) Se empleó adicionalmente el filtro de 0.2 μ m ya que el agua presentó un color amarillento. (**) No se obtuvo muestra.

Tabla 8-4: Muestras de sedimento obtenidas de cada estación, según su profundidad

Testigo	Muestra	Profundidad (cm)	Cantidad (ml)
AC1	AC1/GT	0-10	60
AC1	AC1/G4	4	50
AC1	AC1/G6	6	50
AC1	AC1/G8	8	50
AC1	AC1/G10	10	50
AC1	AC1/G12	12	50
AC1	AC1/G14	14	50
AC1	AC1/G16	16	50
AC1	AC1/G18	18	50
AC1	AC1/G20	20	50
AC1	AC1/G25	25	50

Testigo	Muestra	Profundidad (cm)	Cantidad (ml)
AC1	AC1/G30	30	50
AC1	AC1/G35	35	50
AC1	AC1/G40	40	50
AC1	AC1/G45	45	50
AC1	AC1/G50	50	50
AC1	AC1/G55*	55	50
AC1	AC1/G60	60	50
AC1	AC1/G65	65	50
AC1	AC1/G70	70	50
AC1	AC1/G75*	75	50
AC1	AC1/G80	80	50
AC1	AC1/D84**	84	50
AC1	AC1/G85	85	50
AC1	AC1/G90	90	50
AC1	AC1/G95	95	50
AC1	AC1/D100**	100	50
AC1	AC1/G100	100	50
AC1	AC1/G120	120	50
AC1	AC1/G130	130	50
AC1	AC1/G140	140	50
AC1	AC1/G160	160	50
AC1	AC1/G190	190	50
AC1	AC1/G220	220	50
AC1	AC1/G250	250	50
AC2	AC2/G2	2	50
AC2	AC2/G4	4	50
AC2	AC2/G6	6	50
AC2	AC2/G8	8	50
AC2	AC2/G10	10	50
AC2	AC2/G12	12	50
AC2	AC2/G14	14	50
AC2	AC2/G16	16	50
AC2	AC2/G18	18	50
AC2	AC2/G20	20	50
AC2	AC2/G25	25	50
AC2	AC2/G30	30	50
AC2	AC2/G35	35	50
AC2	AC2/G40***	41	50
AC2	AC2/G45	45	50
AC2	AC2/G50	50	50
AC2	AC2/G55	55	50
AC2	AC2/G60	60	50
AC2	AC2/G65	65	50

Testigo	Muestra	Profundidad (cm)	Cantidad (ml)
AC2	AC2/G70	70	50
AC2	AC2/G75	75	50
AC2	AC2/G80***	81	50
AC2	AC2/G85	85	50
AC2	AC2/G90	90	50
AC2	AC2/G95	95	50
AC2	AC2/G100	100	50
AC2	AC2/G130	130	50
AC2	AC2/G135	135	50
AC2	AC2/G160	160	50
AC2	AC2/G185	185	50
AC3	AC3/G2	2	50
AC3	AC3/G4	4	50
AC3	AC3/G6	6	50
AC3	AC3/G8	8	50
AC3	AC3/G10	10	50
AC3	AC3/G12	12	50
AC3	AC3/G14	14	50
AC3	AC3/G16	16	50
AC3	AC3/G18	18	50
AC3	AC3/G20	20	50
AC3	AC3/G25	25	50
AC3	AC3/G30	30	50
AC3	AC3/G35	35	50
AC3	AC3/G40	40	50
AC3	AC3/G45	45	50
AC3	AC3/G50	50	50
AC3	AC3/G55	55	50
AC3	AC3/G60	60	50
AC3	AC3/G65	65	50
AC3	AC3/G70	70	50
AC3	AC3/G75	75	50
AC3	AC3/G80	80	50
AC3	AC3/G85	85	50
AC3	AC3/G90	90	50
AC3	AC3/G95	95	50
AC3	AC3/G98	98	50
BE	BE/15cm	15	50

NOTA: (*) Muestra extraviada. (**) Muestra para posible datación debido a que se observó un vacío en el testigo. (***) No se sigue la numeración planteada inicialmente debido a la presencia de *dropstones*.

Tabla 8-5: Análisis geoquímico en la columna de agua por estación

Estación	Muestra	Al (mg/l)	As (µg/L)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	Co (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ga (µg/L)	Hf (µg/L)	Mo (µg/L)	Nb (µg/L)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Te (µg/L)	U (µg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)
AC1	AC1/0	<0.15	1.83	30.1	19020	0.058	0.584	0.388	0.411	0.005	0.002	8.72	0.004	<1.5	2590	0.229	2.52	2.06	<0.05
AC1	AC1/6	<0.15	1.57	47.9	19030	0.045	0.386	0.493	0.449	<0.002	<0.002	7.92	<0.004	<1.5	2580	0.072	1.81	1.63	<0.05
AC1	AC1/10	<0.15	1.63	27.5	19290	0.031	0.424	0.193	0.361	<0.002	<0.002	7.46	<0.004	<1.5	2610	0.146	1.6	1.6	<0.05
AC1	AC1/15	<0.15	1.53	46.6	19470	0.039	0.416	0.219	0.405	<0.002	<0.002	7.22	<0.004	<1.5	2640	0.044	1.53	1.7	<0.05
AC1	AC1/20	<0.15	1.4	27.9	19210	0.036	0.359	0.133	0.326	0.004	<0.002	7.43	<0.004	<1.5	2610	0.15	1.43	1.63	<0.05
AC1	AC1/30	<0.15	1.47	32.7	19210	0.039	0.422	0.183	0.325	0.006	<0.002	7.24	<0.004	<1.5	2620	0.061	1.46	1.65	<0.05
AC1	AC1/35	<0.15	1.42	59.4	19150	0.043	0.402	0.214	0.342	0.01	<0.002	7.43	<0.004	<1.5	2600	0.139	1.46	1.87	<0.05
AC1	AC1/45	<0.15	1.45	56.9	19130	0.046	0.405	2.24	0.412	0.004	<0.002	7.64	<0.004	<1.5	2590	0.14	1.54	1.72	<0.05
AC1	AC1/50	<0.15	1.55	55	19170	0.051	0.46	0.16	0.986	0.012	<0.002	7.86	<0.004	<1.5	2590	0.174	1.64	1.77	<0.05
AC1	AC1/55	<0.15	1.6	30.7	19030	0.044	0.41	0.219	0.387	0.014	<0.002	8.01	<0.004	<1.5	2600	0.112	1.66	1.72	<0.05
AC1	AC1/60	<0.15	1.6	57.5	19150	0.048	0.408	0.266	0.62	0.008	<0.002	7.97	<0.004	<1.5	2620	0.065	1.76	2.09	<0.05
AC1	AC1/70	<0.15	1.74	26.6	19300	0.033	0.453	0.217	0.854	0.008	<0.002	8.23	<0.004	<1.5	2630	0.197	1.84	1.91	<0.05
AC1	AC1/80	<0.15	1.59	46.9	19620	0.051	0.431	0.244	0.799	0.004	<0.002	8.48	<0.004	<1.5	2650	0.1	1.92	2.18	<0.05
AC1	AC1/90	<0.15	1.77	47	19360	0.048	0.418	0.23	0.525	0.006	<0.002	8.71	<0.004	<1.5	2660	0.017	2.06	2.22	<0.05
AC1	AC1/100	<0.15	1.74	35.6	19420	0.053	0.461	0.271	0.603	0.004	<0.002	8.77	<0.004	<1.5	2650	0.12	2.17	2.08	<0.05
AC1	AC1/110	<0.15	1.66	52.6	18880	0.053	0.438	0.248	1.28	0.013	<0.002	8.6	<0.004	<1.5	2550	0.174	2.23	2.09	<0.05
AC1	AC1/120	<0.15	1.71	54.1	19140	0.052	0.368	0.326	0.733	0.009	<0.002	8.59	<0.004	<1.5	2580	0.159	2.3	2.15	<0.05
AC1	AC1/130	<0.15	1.61	32.3	19250	0.049	0.502	0.304	0.677	0.005	<0.002	8.45	<0.004	<1.5	2610	0.269	2.32	2.09	<0.05
AC1	AC1/140	<0.15	1.82	43.4	19300	0.043	0.454	0.394	0.713	0.014	<0.002	8.21	<0.004	<1.5	2610	0.018	2.25	2.23	<0.05
AC1	AC1/150	<0.15	1.64	51.5	19280	0.038	0.439	0.359	1.7	<0.002	<0.002	7.69	<0.004	<1.5	2610	0.129	2.13	2.15	<0.05
AC1	AC1/160	<0.15	1.46	55.7	19220	0.035	0.433	0.404	0.561	0.01	<0.002	7.45	<0.004	<1.5	2590	0.225	2.07	1.9	<0.05
AC1	AC1/170	<0.15	1.23	54.3	19340	0.037	0.501	0.441	1.14	0.012	<0.002	7.4	<0.004	<1.5	2600	0.171	2.02	2.16	<0.05
AC1	AC1/180	<0.15	1.4	42.1	19200	0.033	0.435	0.481	0.419	0.018	<0.002	6.71	<0.004	<1.5	2620	0.155	1.95	1.87	<0.05
AC1	AC1/2cmfondo	<0.15	1.74	56.1	18800	0.262	0.283	0.539	1	0.013	<0.002	10.8	<0.004	<1.5	2510	0.177	2.79	2.19	0.065
AC2	AC2/2	<0.15	1.3	59.2	19010	0.035	0.374	0.532	0.418	0.026	<0.002	6.56	<0.004	<1.5	2580	0.1	1.89	1.63	<0.05
AC2	AC2/5	<0.15	1.68	40.1	19210	0.064	0.542	1.73	5.9	<0.002	<0.002	8.88	0.005	<1.5	2600	0.103	2.72	2.43	<0.05
AC2	AC2/10	<0.15	1.83	35.6	19170	0.036	0.553	0.786	0.571	0.007	<0.002	9.21	<0.004	<1.5	2580	0.236	2.77	2.48	<0.05

Estación	Muestra	Al (mg/l)	As (µg/L)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	Co (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ga (µg/L)	Hf (µg/L)	Mo (µg/L)	Nb (µg/L)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Te (µg/L)	U (µg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)
AC2	AC2/20	<0.15	1.63	57.7	19200	0.038	0.575	0.753	0.712	0.004	<0.002	9.26	0.004	<1.5	2590	0.428	2.69	2.57	<0.05
AC2	AC2/30	<0.15	1.84	31.9	19030	0.05	0.585	0.64	0.919	0.015	<0.002	8.63	<0.004	<1.5	2580	0.055	2.6	2.61	<0.05
AC2	AC2/40	<0.15	1.75	57.2	19130	0.046	0.531	0.545	0.548	0.026	<0.002	9.22	<0.004	<1.5	2590	0.111	2.57	2.36	<0.05
AC2	AC2/50	<0.15	1.9	60.7	19180	0.04	0.441	0.493	0.544	0.008	<0.002	8.78	<0.004	<1.5	2580	0.085	2.53	2.49	<0.05
AC2	AC2/60	<0.15	1.74	53.7	19160	0.052	0.457	0.444	0.626	0.031	0.004	8.66	<0.004	<1.5	2580	0.174	2.53	2.34	<0.05
AC2	AC2/70	<0.15	1.76	50.6	19090	0.054	0.422	0.469	0.833	0.02	<0.002	8.1	<0.004	<1.5	2570	0.207	2.36	2.23	<0.05
AC2	AC2/80	<0.15	1.52	62.1	19110	0.036	0.452	0.496	0.742	0.037	<0.002	8.06	0.004	<1.5	2570	0.212	2.34	2.21	<0.05
AC2	AC2/90	<0.15	1.49	61.4	19000	0.036	0.407	0.527	1.34	0.042	<0.002	7.7	<0.004	<1.5	2550	0.371	2.35	2.09	<0.05
AC2	AC2/100	<0.15	1.5	64.4	19180	0.041	0.424	0.578	1.1	0.026	0.003	7.54	<0.004	<1.5	2570	0.095	2.31	1.95	<0.05
AC2	AC2/110	<0.15	1.43	70.6	19220	0.041	0.462	0.725	0.61	0.013	0.002	7.21	<0.004	<1.5	2580	0.162	2.23	2.3	<0.05
AC2	AC2/120	<0.15	1.45	69.4	19310	0.042	0.475	0.712	0.636	0.018	<0.002	7.37	<0.004	<1.5	2580	0.133	2.32	2.05	<0.05
AC2	AC2/130	<0.15	1.2	69.1	18790	0.033	0.375	0.61	0.647	0.009	0.003	6.28	<0.004	<1.5	2500	0.136	1.8	1.88	<0.05
AC2	AC2/140	<0.15	1.34	67.2	18690	0.032	0.351	0.766	0.804	0.005	<0.002	7.35	<0.004	<1.5	2510	0.174	2.27	2.13	<0.05
AC2	AC2/150	<0.15	1.38	68.6	18930	0.052	0.348	0.66	0.788	0.01	<0.002	7.53	<0.004	<1.5	2520	0.071	2.35	1.94	<0.05
AC2	AC2/170	<0.15	1.31	68.1	18800	0.038	0.28	1.79	0.683	0.01	<0.002	7.72	<0.004	<1.5	2510	0.11	2.25	1.77	<0.05
AC2	AC2/200	<0.15	1.45	69	18760	0.041	0.406	0.553	0.851	<0.002	<0.002	7.69	<0.004	<1.5	2510	0.188	2.31	1.88	<0.05
AC2	AC2/250	<0.15	1.39	69.9	18890	0.049	0.387	0.403	0.911	0.033	<0.002	6.98	<0.004	<1.5	2510	0.116	2.17	1.58	<0.05
AC3	AC3/0	<0.15	1.17	68.1	18670	0.051	0.389	0.549	0.71	0.011	<0.002	7.21	<0.004	<1.5	2490	0.04	2.1	1.83	<0.05
AC3	AC3/20	<0.15	1.28	69.1	18780	0.028	0.351	0.222	0.694	<0.002	<0.002	6.76	<0.004	<1.5	2500	<0.01	2.03	1.53	<0.05
AC3	AC3/60	<0.15	1.02	68.2	18710	0.03	0.34	0.226	0.665	0.024	<0.002	6.53	<0.004	<1.5	2500	0.042	1.99	1.62	<0.05
AC3	AC3/100	<0.15	1.27	69.7	18870	0.021	0.362	0.199	0.831	0.012	<0.002	6.14	<0.004	<1.5	2510	<0.01	1.84	1.67	<0.05
AC3	AC3/120	<0.15	1.02	68.2	19090	0.022	0.301	0.226	0.71	0.006	<0.002	5.83	0.005	<1.5	2570	0.09	1.81	1.36	<0.05
AC3	AC3/140	<0.15	1.04	72.7	20090	0.024	0.36	0.191	0.672	<0.002	<0.002	5.66	<0.004	<1.5	2770	0.139	1.83	1.57	<0.05
AC3	AC3/160	<0.15	0.931	87.4	24690	0.035	0.303	0.175	0.591	<0.002	<0.002	5.78	<0.004	<1.5	3300	0.383	1.75	1.41	<0.05
AC3	AC3/180	<0.15	1.05	66.8	21740	0.025	0.322	0.167	1.08	0.007	<0.002	5.45	<0.004	<1.5	2970	0.05	1.75	0.996	<0.05
AC3	AC3/200	<0.15	1.12	71.9	20270	0.027	0.232	0.23	0.673	0.015	<0.002	5.38	<0.004	<1.5	2770	0.051	1.69	1.19	<0.05
AC3	AC3/221	<0.15	1.13	74	20440	0.014	0.288	0.114	0.874	<0.002	<0.002	5.36	<0.004	<1.5	2790	0.053	1.66	1.29	<0.05
AC3	AC3/240	<0.15	0.898	72.7	20380	0.016	0.199	0.126	0.7	<0.002	<0.002	4.49	<0.004	<1.5	2760	<0.01	1.58	0.984	<0.05
AC3	AC3/260	<0.15	0.87	72.2	20390	0.014	0.352	0.146	0.632	<0.002	<0.002	4.38	<0.004	<1.5	2760	0.116	1.44	0.868	<0.05

Estación	Muestra	Al (mg/l)	As (µg/L)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	Co (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ga (µg/L)	Hf (µg/L)	Mo (µg/L)	Nb (µg/L)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Te (µg/L)	U (µg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)
AC3	AC3/300	<0.15	0.926	74.3	20500	0.022	0.255	0.111	0.813	0.009	<0.002	4.31	<0.004	<1.5	2780	0.181	1.4	1.13	<0.05
AC3	AC3/339	<0.15	0.906	72.4	20470	0.024	0.174	0.171	0.753	<0.002	<0.002	4.15	<0.004	<1.5	2760	<0.01	1.44	0.867	<0.05
AC3	AC3/358	<0.15	0.72	72.5	20350	0.022	0.275	0.144	0.646	0.021	<0.002	4.46	<0.004	<1.5	2750	<0.01	1.41	1.24	<0.05
AC3	AC3/404	<0.15	0.742	71.6	20410	0.031	0.207	0.146	1.22	<0.002	<0.002	4.02	<0.004	<1.5	2780	<0.01	1.42	0.917	<0.05
AC3	AC3/1mfondo	<0.15	1.87	72.5	20530	0.075	0.146	0.06	0.82	<0.002	<0.002	4.72	<0.004	<1.5	2760	<0.01	1.73	1.84	<0.05
AC3	AC3/1cmfondo	<0.15	1.79	73.1	20480	0.114	0.354	0.636	4.99	<0.002	0.003	4.63	<0.004	<1.5	2720	0.308	1.52	1.87	<0.05
BE	BE/10	<0.15	1.31	61.3	17840	0.034	0.376	0.555	0.56	<0.002	0.002	7.15	<0.004	<1.5	2440	0.189	2.02	1.87	<0.05
BE	BE/100	<0.15	1.45	63.6	18340	0.023	0.318	0.486	0.52	<0.002	<0.002	7.04	<0.004	<1.5	2510	0.255	1.93	2.12	<0.05
BE	BE/310	<0.15	1.27	60.8	17880	0.027	0.321	0.419	0.524	0.009	<0.002	6.54	<0.004	<1.5	2440	0.064	1.86	1.96	<0.05

NOTA: Los elementos menores (expresados en µg/L) y mayores (expresados en mg/L) de analizaron con ICP-OES ye ICP-MS, respectivamente.

Tabla 8-6: Análisis geoquímico en el agua de poros por estación

Estación	Muestra	Al (mg/l)	As (µg/L)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	Co (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ga (µg/L)	Hf (µg/L)	Mo (µg/L)	Nb (µg/L)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Te (µg/L)	U (µg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)
AC1	AC1/P2	<0.15	11.3	70.2	19600	0.506	0.474	0.471	3322	0.027	0.004	18.9	<0.004	3.68	2650	0.143	4.08	2.86	0.221
AC1	AC1/P6	<0.15	7.34	71.6	20110	0.175	0.253	0.184	2489	0.02	<0.002	10.3	<0.004	3.14	2700	0.064	2.43	2.06	0.082
AC1	AC1/P10	<0.15		59.4	17270									4.96	2290				
AC1	AC1/P14	<0.15		70.5	19950									7.25	2400				
AC1	AC1/P20	<0.15	1.93	69.8	19820	0.415	0.26	0.25	2002	0.009	<0.002	6.41	<0.004	15.4	2310	0.254	1.13	1.74	0.108
AC1	AC1/P25	<0.15	1.84	69.9	19350	0.406	0.283	0.237	1498	0.009	0.002	3.81	<0.004	15.6	2130	0.111	1.54	2.02	0.075
AC1	AC1/P30	<0.15	1.75	67.7	18670	0.533	0.252	0.239	675	0.005	<0.002	11	0.004	16.4	1870	0.332	1.86	2.31	0.076
AC1	AC1/P35	<0.15		<5	620									<1.5	50				
AC1	AC1/P40	<0.15	7.37	72.5	19690	0.607	0.347	0.403	27.4	0.004	<0.002	26.7	0.009	17.4	1720	0.221	3.98	11.3	0.113
AC1	AC1/P45	<0.15	8.71	71.3	19530	0.633	0.334	0.332	95.8	<0.002	<0.002	18	0.005	17.1	1650	0.205	5.33	7.82	0.104
AC1	AC1/P50	<0.15		68.6	19390									13.2	1580				
AC1	AC1/P55	<0.15	6.11	71.3	19500	0.81	0.31	0.354	198	0.007	<0.002	17.9	0.004	16	1580	0.126	3.59	5.6	0.132
AC1	AC1/P60	<0.15		64.2	17990									10.6	1420				
AC1	AC1/P65	<0.15	3.37	72.2	19250	0.837	0.304	0.261	162	<0.002	0.003	7.99	0.005	15.8	1520	0.188	1.48	5	0.087
AC1	AC1/P70	<0.15		68.7	18380									7.81	1440				
AC1	AC1/P75	<0.15	25.8	68.5	19010	2.09	1.01	4.38	66.4	0.035	<0.002	21.7	0.016	12.9	1490	0.939	3.72	8.81	0.345

Estación	Muestra	Al (mg/l)	As (µg/L)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	Co (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ga (µg/L)	Hf (µg/L)	Mo (µg/L)	Nb (µg/L)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Te (µg/L)	U (µg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)
AC1	AC1/P80	<0.15	2.98	70.6	19200	0.836	0.275	0.429	512	0.004	<0.002	6.03	<0.004	13.3	1500	0.188	1.13	1.72	0.079
AC1	AC1/P85	<0.15	5.37	66.3	18170	0.803	0.245	0.682	257	0.003	0.003	10.9	<0.004	9.99	1440	0.117	1.61	4.11	0.077
AC1	AC1/P90	<0.15	5.66	67.2	18730	0.838	0.242	0.521	2206	<0.002	<0.002	17.1	0.005	8.51	1510	0.218	1.07	0.822	0.091
AC1	AC1/P95	<0.15	7.12	64.1	18040	1.21	0.224	1.08	120	0.008	0.002	14.1	0.004	2.16	1270	0.098	0.728	2.73	0.056
AC1	AC1/P100	<0.15	9.95	64.8	18070	1.57	0.711	4.81	146	0.159	0.01	38.8	0.012	<1.5	1240	0.198	1.75	4.27	0.241
AC1	AC1/P130	<0.15	3.28	66.3	18050	2.01	0.866	1.47	280	0.088	0.007	16.1	0.016	<1.5	1130	<0.01	0.525	1.28	0.239
AC1	AC1/P160	<0.15	5.4	62.4	17400	1.09	0.317	0.212	5583	0.007	<0.002	5.05	0.004	6.53	1140	0.14	0.218	0.546	0.055
AC1	AC1/P190	<0.15	4.08	63.6	17350	0.959	0.188	0.26	828	0.014	0.002	4.09	0.004	<1.5	1160	0.217	0.204	0.347	<0.05
AC1	AC1/P220	<0.15	5.17	62.7	17020	1.2	0.16	0.25	6919	0.019	0.003	1.85	<0.004	7.71	1070	0.17	0.078	0.457	<0.05
AC1	AC1/P245	<0.15	8.93	61.6	16870	2.16	0.635	2.24	10020	0.088	<0.002	12.2	0.012	5.76	970	0.464	0.263	1.56	0.285
AC2	AC2/P2	<0.15	2.87	68.4	19350	0.277	0.455	0.269	1079	0.014	<0.002	36.7	<0.004	8.28	2380	0.216	2.85	3.96	0.151
AC2	AC2/P6	<0.15	2.44	69.9	19620	0.359	0.349	0.361	358	0.003	0.003	16.8	0.005	10	2210	0.216	2.57	5.61	0.166
AC2	AC2/P10	<0.15	6.84	69.1	19590	0.302	0.357	0.504	683	0.01	<0.002	34.6	<0.004	6.59	2380	0.123	6.7	2.46	0.104
AC2	AC2/P14	<0.15	2.28	70.1	19480	0.485	0.405	0.332	359	0.009	0.003	8.68	<0.004	14.3	2020	0.215	1.78	3.81	0.16
AC2	AC2/P20	<0.15	4.25	70.5	19930	0.657	0.441	0.474	195	0.004	<0.002	7.81	<0.004	15.5	1940	0.049	3.38	7.89	0.235
AC2	AC2/P25	<0.15	27.8	71.7	19730	0.884	1.13	3.93	40	0.108	<0.002	30.4	<0.004	15.2	1720	0.6	12.4	49.7	0.475
AC2	AC2/P30	<0.15	7.19	71.2	19240	0.918	0.501	1.08	18.1	0.01	0.004	13.4	0.008	17.4	1280	0.066	6	15.7	0.192
AC2	AC2/P35	<0.15	50.2	66.9	18270	0.966	1.26	5.5	39.7	0.082	0.024	74.5	0.025	14.2	1040	<0.01	19.6	81.7	0.572
AC2	AC2/P40	<0.15	69.6	69.1	18950	0.603	1.32	5.27	45.9	0.196	0.005	235	0.017	13.1	980	1.22	23.7	69.1	0.72
AC2	AC2/P45	<0.15	74.2	67.8	18220	0.904	1.34	4.93	44.9	0.057	0.01	110	0.055	12.6	880	<0.01	18.7	87	0.587
AC2	AC2/P50	<0.15	10.7	75.1	20130	1.07	0.698	0.839	46.4	0.002	0.002	52.3	0.007	14.9	930	0.267	4.93	18.2	0.23
AC2	AC2/P60	<0.15	9.84	74.4	20110	1.26	0.485	0.94	27.3	0.004	0.003	17.1	0.01	15.7	780	0.269	2.6	14.7	0.194
AC2	AC2/P70	<0.15		67.3	18710									11.1	590				
AC2	AC2/P80	<0.15		68.6	19180									12.5	520				
AC2	AC2/P90	0.246	30.4	73.6	19610	2.15	1.3	5.44	73.7	0.123	<0.002	38.1	0.02	15.4	430	<0.01	2.38	33.1	0.675
AC2	AC2/P100	0.283	6.83	71.1	19310	1.58	0.507	0.748	54.8	0.01	0.002	8.56	0.008	15.9	360	0.223	0.993	11	0.187
AC2	AC2/P160	0.28	10.2	70.5	19230	1.91	1.39	2.26	92.8	0.015	0.005	20.2	0.01	15.2	110	0.225	2.59	13.1	0.204
AC2	AC2/P185	0.259		70.5	18420									13.1	30				
AC3	AC3/P2	<0.15	13	70	19960	0.242	0.264	1.04	982	0.002	<0.002	24.9	0.004	2.21	2680	0.505	4.88	5.76	0.074
AC3	AC3/P6	0.183	5.23	66.7	19810	0.161	0.267	0.392	538	0.013	0.003	18.3	<0.004	1.85	2680	0.158	2.87	6.95	<0.05
AC3	AC3/P10	0.238	3.04	65	19100	0.136	0.312	0.326	738	0.004	<0.002	10.2	<0.004	2.42	2540	0.089	1.52	4.52	<0.05
AC3	AC3/P14	0.196	4.96	65.1	18540	0.236	0.688	0.349	294	0.022	<0.002	12.5	<0.004	1.61	2430	0.358	3.33	7.33	0.091
AC3	AC3/P20	<0.15	14.8	65.7	19160	0.316	0.604	4.22	84.6	0.087	0.01	37.6	0.009	<1.5	2530	0.416	15.3	18.8	0.207
AC3	AC3/P25	<0.15		61.2	17480									<1.5	2250				

Estación	Muestra	Al (mg/l)	As (µg/L)	Br (mg/l)	Cl (mg/l)	Co (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Ga (µg/L)	Hf (µg/L)	Mo (µg/L)	Nb (µg/L)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Te (µg/L)	U (µg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)
AC3	AC3/P30	<0.15	5.69	69	19510	0.431	0.373	0.373	71	0.005	<0.002	9.73	<0.004	5.09	2400	0.253	3.24	8.63	0.081
AC3	AC3/P40	<0.15	11.5	73	19950	0.61	0.421	0.405	97.7	0.009	0.002	21.2	0.005	12.5	1720	0.255	5.76	7.62	0.116
AC3	AC3/P50	0.167	18.4	70.5	19340	0.475	0.407	0.455	42.1	0.009	0.002	50	0.006	14.3	1420	0.11	9.88	15.7	0.149
AC3	AC3/P60	<0.15	8.81	76.1	19880	0.897	0.392	0.456	130	0.007	<0.002	6.58	0.004	21.7	1140	0.167	2.04	7.09	0.081
AC3	AC3/P70	0.153	15.6	70.9	18860	1.33	1.05	3.41	119	0.072	0.004	19	0.011	22.9	980	0.187	4.59	11.3	0.264
AC3	AC3/P80	<0.15	11.7	72.4	19060	0.974	0.463	0.328	342	0.007	0.002	7.58	0.006	21.5	1140	0.113	3.24	3.66	0.093
AC3	AC3/P90	<0.15	8.43	68.4	19600	0.308	0.281	0.333	1337	0.02	<0.002	12.2	<0.004	7.29	2090	0.191	3.07	4.17	0.076
AC3	AC3/P98	<0.15	11.9	72	19750	0.505	0.291	0.772	166	0.01	<0.002	18.8	0.007	6.46	1900	0.192	6.04	6.49	0.082

NOTA: Los elementos menores (expresados en µg/L) y mayores (expresados en mg/L) de analizaron con ICP-OES y ICP-MS, respectivamente.

Tabla 8-7: Análisis geoquímico del sedimento por estación

Estación	Muestra	As (mg/kg)	Cl (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ga (mg/kg)	Hf (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Nb (mg/kg)	P ₂ O ₅ (%)	U (mg/kg)	V (mg/kg)	W (mg/kg)	LOI (%)	Suma (%)	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	S _{tot} (%)
AC1	AC1/M4	9	0.012	0.11	16.56	17	37	80	7.72	19	<19	<8	5	0.263	<6	192	<12	8.35	99.72	0.76	0.62	0.32
AC1	AC1/M6	27	0.012	0.11	16.75	18	38	91	7.69	18	<20	<8	4	0.226	<6	187	<12	7.97	99.75	0.62	0.48	0.26
AC1	AC1/M8	31	0.014	0.11	16.96	18	35	84	7.67	19	<19	<8	4	0.224	<6	185	<12	7.67	99.75	0.56	0.42	0.21
AC1	AC1/M10	9	0.017	0.13	16.71	16	34	90	7.62	19	<19	<8	3	0.225	<6	184	<12	7.58	99.74	0.57	0.42	0.23
AC1	AC1/M12	7	0.016	0.15	16.66	14	36	87	7.68	21	<19	<8	3	0.222	<6	188	<12	7.39	99.73	0.53	0.38	0.29
AC1	AC1/M14	8	0.011	0.17	16.89	20	31	93	7.57	18	<20	<8	5	0.231	<6	191	<12	6.88	99.73	0.46	0.31	0.31
AC1	AC1/M16	10	0.013	0.16	16.89	18	33	92	7.71	20	<19	<8	3	0.228	<6	189	<12	6.94	99.73	0.45	0.32	0.33
AC1	AC1/M18	9	0.014	0.17	16.93	19	31	93	7.65	17	<20	<8	4	0.226	<6	193	<12	6.83	99.71	0.47	0.31	0.32
AC1	AC1/M20	8	0.014	0.21	17.03	17	33	93	7.77	19	<19	<8	6	0.228	<6	185	<12	6.8	99.73	0.46	0.3	0.31
AC1	AC1/M25	8	0.014	0.16	16.84	18	34	83	7.48	19	<19	<8	4	0.229	<6	188	<12	6.52	99.73	0.41	0.31	0.3
AC1	AC1/M30	9	0.012	0.18	17.05	17	34	96	7.59	19	<20	<8	5	0.222	<6	185	<12	6.88	99.73	0.44	0.29	0.32
AC1	AC1/M35	9	0.013	0.38	16.81	20	29	93	7.63	19	<19	<8	3	0.226	<6	182	<12	6.37	99.72	0.43	0.21	0.56
AC1	AC1/M40	8	0.014	0.16	16.73	21	36	82	7.64	21	<19	<8	6	0.222	<6	185	<12	6.95	99.74	0.48	0.36	0.33
AC1	AC1/M45	6	0.017	0.15	16.86	18	38	84	7.72	19	<20	<8	6	0.219	<6	182	<12	7.05	99.72	0.44	0.31	0.3
AC1	AC1/M50	8	0.01	0.17	17.01	18	33	98	7.62	19	<19	<8	5	0.219	<6	186	<12	7.33	99.73	0.45	0.3	0.37
AC1	AC1/M55	20	0.011	0.48	16.43	17	25	101	7.41	19	<19	<8	4	0.219	<6	185	<12	6.4	99.74	0.51	0.16	0.34

Estación	Muestra	As (mg/kg)	Cl (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ga (mg/kg)	Hf (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Nb (mg/kg)	P ₂ O ₅ (%)	U (mg/kg)	V (mg/kg)	W (mg/kg)	LOI (%)	Suma (%)	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	S _{tot} (%)
AC1	AC1/M60	11	0.01	0.77	16.7	20	24	121	7.13	19	<19	<8	5	0.218	<6	166	<12	5.34	99.73	0.53	0.04	0.38
AC1	AC1/M65	8	0.013	0.21	16.23	18	34	84	7.43	18	<19	<8	4	0.211	<6	182	<12	7.47	99.73	0.53	0.31	0.49
AC1	AC1/M70	8	0.011	0.25	16.97	16	33	93	7.6	20	<19	<8	4	0.22	<6	178	<12	6.88	99.73	0.42	0.25	0.44
AC1	AC1/M75	8	0.007	0.93	15.57	14	18	81	6.1	17	<19	<8	4	0.191	<6	123	<12	4.49	99.76	0.35	0.05	1.43
AC1	AC1/M80	7	0.012	0.29	16.71	16	29	93	7.41	19	<19	<8	3	0.214	<6	183	<12	6.86	99.71	0.44	0.24	0.51
AC1	AC1/M85	8	0.011	0.3	16.62	16	30	105	7.47	19	<19	<8	5	0.218	<6	175	<12	6.81	99.72	0.42	0.19	0.57
AC1	AC1/M90	13	0.008	1.03	15.86	12	13	81	6.75	17	<19	<8	3	0.216	<6	132	<12	4.63	99.74	0.39	0.05	1.28
AC1	AC1/M95	14	0.007	1.09	15.84	14	13	96	6.7	16	<20	<8	4	0.231	<6	145	<12	4.5	99.72	0.4	0.04	1.41
AC1	AC1/M100	11	0.007	1.15	15.93	16	<12	97	6.72	19	<19	<8	4	0.218	<6	141	<12	4.5	99.73	0.42	0.05	1.25
AC1	AC1/M120	10	0.006	1.14	15.71	15	14	107	6.41	17	<19	<8	4	0.213	<6	133	<12	4.26	99.75	0.42	0.04	1.16
AC1	AC1/M130	11	0.003	1.02	15.98	13	12	97	6.74	18	<19	<8	6	0.205	<6	137	<12	4.49	99.73	0.37	0.04	1.42
AC1	AC1/M140	13	0.006	1.27	15.41	15	14	85	6.82	17	<19	<8	3	0.214	<6	138	<12	4.62	99.72	0.45	0.04	1.56
AC1	AC1/M160	11	0.009	1.05	15.82	13	16	88	6.75	18	<19	<8	4	0.213	<6	141	<12	4.57	99.73	0.39	0.05	1.19
AC1	AC1/M190	11	0.004	1.04	15.9	13	14	95	6.72	19	<19	<8	5	0.221	<6	147	<12	4.61	99.71	0.41	0.05	1.25
AC1	AC1/M220	11	0.005	1.13	15.88	14	16	98	6.98	16	<19	<8	6	0.218	<6	145	<12	4.65	99.73	0.42	0.05	1.44
AC1	AC1/M250	13	0.006	1.08	15.84	16	13	106	6.7	17	<19	<8	<2	0.22	<6	139	<12	4.4	99.71	0.4	0.05	1.22
AC2	AC2/M2	9	0.011	0.24	17.28	18	33	85	7.45	19	<19	<8	3	0.228	<6	180	<12	6.23	99.71	0.4	0.27	0.33
AC2	AC2/M4	8	0.027	0.25	17.37	20	34	86	7.42	18	<20	<8	3	0.229	<6	188	<12	6.11	99.7	0.38	0.25	0.3
AC2	AC2/M6	8	0.009	0.23	17.44	19	37	93	7.56	19	<19	<8	4	0.23	<6	192	<12	6.02	99.73	0.36	0.25	0.3
AC2	AC2/M8	8	0.013	0.22	17.34	18	35	89	7.41	17	<20	<8	4	0.23	<6	179	<12	6.05	99.7	0.36	0.24	0.28
AC2	AC2/M10	7	0.011	0.18	17.19	18	34	93	7.54	19	<19	<8	4	0.233	<6	186	<12	6.33	99.72	0.42	0.31	0.3
AC2	AC2/M12	8	0.012	0.17	17.1	17	34	87	7.45	20	<19	<8	5	0.236	<6	183	<12	6.26	99.71	0.39	0.31	0.29
AC2	AC2/M14	8	0.013	0.17	17.21	17	30	88	7.26	20	<19	<8	5	0.229	<6	179	<12	5.97	99.73	0.36	0.3	0.31
AC2	AC2/M16	7	0.007	0.22	17.24	16	34	77	7.38	18	<19	<8	3	0.244	<6	187	<12	6.08	99.73	0.34	0.25	0.4
AC2	AC2/M18	8	0.013	0.18	17.38	16	33	87	7.3	19	<19	<8	3	0.23	<6	180	<12	5.71	99.74	0.32	0.24	0.26
AC2	AC2/M20	8	0.014	0.2	17.19	16	39	84	7.35	17	<19	<8	5	0.23	<6	182	<12	5.97	99.72	0.39	0.29	0.32
AC2	AC2/M25	13	0.013	0.23	17.25	16	32	79	7.41	19	<20	<8	<2	0.233	<6	189	<12	5.99	99.69	0.39	0.26	0.36
AC2	AC2/M30	8	0.012	0.31	16.92	20	37	82	7.61	19	<20	<8	5	0.222	<6	186	<12	6.32	99.72	0.45	0.28	0.55
AC2	AC2/M35	7	0.011	0.14	16.34	17	47	73	7.7	17	<19	<8	5	0.213	<6	189	<12	7.72	99.75	0.73	0.58	0.33

Estación	Muestra	As (mg/kg)	Cl (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ga (mg/kg)	Hf (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Nb (mg/kg)	P ₂ O ₅ (%)	U (mg/kg)	V (mg/kg)	W (mg/kg)	LOI (%)	Suma (%)	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	S _{tot} (%)
AC2	AC2/M40	7	0.011	0.13	16.99	20	36	85	7.59	18	<20	<8	4	0.219	<6	183	<12	6.69	99.76	0.41	0.3	0.31
AC2	AC2/M45	6	0.009	0.13	16.97	16	40	86	7.56	19	<19	<8	4	0.215	<6	193	<12	7.21	99.73	0.46	0.34	0.34
AC2	AC2/M50	6	0.01	0.14	16.59	17	34	81	7.42	19	<19	<8	3	0.211	<6	187	<12	7.31	99.72	0.5	0.39	0.53
AC2	AC2/M55	8	0.011	0.15	17.1	18	38	90	7.56	19	<19	<8	5	0.218	<6	182	<12	6.9	99.73	0.42	0.29	0.35
AC2	AC2/M60	6	0.012	0.14	16.87	21	35	81	7.46	20	<19	<8	4	0.214	<6	179	<12	7	99.73	0.44	0.3	0.33
AC2	AC2/M65	7	0.012	0.13	16.78	16	39	85	7.45	18	<20	<8	5	0.217	<6	186	<12	7.01	99.73	0.46	0.33	0.38
AC2	AC2/M70	8	0.011	0.19	16.68	15	31	82	7.61	19	<19	<8	5	0.222	<6	181	<12	6.59	99.71	0.44	0.25	0.49
AC2	AC2/M80	8	0.012	0.19	16.58	19	34	83	7.44	16	<20	<8	5	0.211	<6	183	<12	6.96	99.73	0.48	0.31	0.61
AC2	AC2/M85	8	0.01	0.14	16.5	19	38	87	7.43	19	<19	<8	5	0.209	<6	181	<12	7.38	99.73	0.46	0.31	0.47
AC2	AC2/M90	8	0.01	0.24	16.62	16	29	83	7.5	19	<19	<8	5	0.219	<6	180	<12	6.54	99.72	0.42	0.25	0.54
AC2	AC2/M95	20	0.012	0.24	16.73	16	31	93	7.46	19	<19	<8	4	0.22	<6	182	<12	6.61	99.74	0.43	0.23	0.56
AC2	AC2/M100	8	0.01	0.27	16.74	16	32	101	7.53	19	<20	<8	4	0.224	<6	183	<12	6.41	99.73	0.42	0.22	0.52
AC2	AC2/M130	8	0.014	0.17	16.6	15	35	88	7.47	18	<20	<8	3	0.213	<6	180	<12	6.96	99.67	0.45	0.27	0.55
AC2	AC2/M135	7	0.015	0.19	16.66	17	31	91	7.57	19	<19	<8	3	0.217	<6	178	<12	6.8	99.72	0.42	0.23	0.5
AC2	AC2/M160	9	0.012	0.23	16.8	17	33	88	7.48	18	<19	<8	4	0.225	<6	177	<12	6.58	99.73	0.41	0.22	0.43
AC2	AC2/M185	8	0.009	0.21	16.73	16	34	85	7.29	19	<19	<8	4	0.221	<6	176	<12	6.36	99.74	0.41	0.23	0.49
AC3	AC3/M4	8	0.01	0.13	16.32	16	47	80	7.69	20	<19	<8	5	0.211	<6	187	<12	7.67	99.74	0.58	0.45	0.28
AC3	AC3/M6	8	0.012	0.13	16.25	21	40	73	7.65	19	<19	<8	4	0.208	<6	183	<12	7.52	99.71	0.55	0.4	0.32
AC3	AC3/M8	7	0.011	0.16	16.18	16	49	79	7.59	18	<19	<8	5	0.208	<6	182	<12	7.57	99.76	0.55	0.4	0.47
AC3	AC3/M10	9	0.011	0.17	15.86	18	44	75	7.6	18	<19	<8	4	0.211	<6	180	<12	7.07	99.74	0.51	0.36	0.53
AC3	AC3/M12	9	0.009	0.25	15.66	17	39	89	7.57	17	<20	<8	3	0.212	<6	175	<12	6.51	99.75	0.48	0.3	0.65
AC3	AC3/M14	10	0.004	0.24	15.75	22	42	95	7.7	18	<19	<8	5	0.213	<6	181	<12	6.66	99.72	0.49	0.36	0.79
AC3	AC3/M16	11	0.01	0.33	15.54	23	38	89	7.71	17	<20	<8	4	0.216	<6	170	<12	6.22	99.73	0.45	0.33	0.91
AC3	AC3/M18	11	0.008	0.34	15.5	18	40	96	7.6	16	<19	<8	3	0.211	<6	173	<12	6.22	99.77	0.45	0.28	1
AC3	AC3/M20	11	0.006	0.41	15.51	14	39	93	7.79	17	<19	<8	3	0.214	<6	170	<12	6.2	99.73	0.44	0.28	1.13
AC3	AC3/M25	11	0.004	0.54	15.38	17	34	105	7.92	17	<20	<8	5	0.216	<6	173	<12	6.13	99.75	0.44	0.25	1.43
AC3	AC3/M30	10	0.01	0.31	15.76	18	44	100	7.69	19	<19	<8	4	0.213	<6	172	<12	6.36	99.75	0.44	0.31	0.85
AC3	AC3/M35	9	0.009	0.29	15.67	20	44	85	7.71	17	<20	<8	<2	0.21	<6	175	<12	6.64	99.74	0.47	0.32	0.86
AC3	AC3/M40	11	0.009	0.44	15.67	18	36	106	7.73	15	<20	<8	5	0.223	<6	182	<12	6.35	99.74	0.45	0.26	1.14

Estación	Muestra	As (mg/kg)	Cl (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ga (mg/kg)	Hf (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Nb (mg/kg)	P ₂ O ₅ (%)	U (mg/kg)	V (mg/kg)	W (mg/kg)	LOI (%)	Suma (%)	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	S _{tot} (%)
AC3	AC3/M45	7	0.012	0.12	16.1	22	57	77	7.6	15	<20	<8	3	0.208	<6	194	<12	6.8	99.73	0.49	0.39	0.39
AC3	AC3/M50	6	0.012	0.13	16.07	16	52	81	7.56	19	<20	<8	3	0.207	<6	182	<12	7.16	99.73	0.51	0.41	0.43
AC3	AC3/M55	5	0.012	0.12	16.26	17	59	81	7.5	20	<19	<8	3	0.21	<6	187	<12	6.85	99.75	0.46	0.35	0.33
AC3	AC3/M60	8	0.012	0.11	16.65	18	36	97	7.76	19	<19	<8	3	0.222	<6	192	<12	8.36	99.73	0.52	0.35	0.44
AC3	AC3/M65	7	0.012	0.11	16.55	16	38	109	7.74	19	<19	<8	3	0.225	<6	188	<12	8.16	99.74	0.53	0.37	0.41
AC3	AC3/M70	6	0.011	0.12	16.57	17	40	93	7.65	19	<19	<8	4	0.221	<6	185	<12	7.91	99.74	0.51	0.34	0.45
AC3	AC3/M75	7	0.014	0.11	16.37	18	49	86	7.39	20	<19	<8	4	0.225	<6	185	<12	6.92	99.74	0.45	0.27	0.47
AC3	AC3/M80	6	0.016	0.12	16.36	16	50	78	7.24	19	<19	<8	5	0.219	<6	180	<12	6.71	99.72	0.49	0.29	0.5
AC3	AC3/M85	8	0.013	0.16	16.37	17	50	93	7.12	17	<19	<8	5	0.219	<6	178	<12	6.5	99.73	0.43	0.23	0.46
AC3	AC3/M90	5	0.009	0.11	16.1	16	43	77	7.49	19	<19	<8	5	0.216	<6	182	<12	7.56	99.72	0.55	0.43	0.27
AC3	AC3/M95	7	0.013	0.1	16.5	15	40	85	7.72	20	<19	<8	5	0.225	<6	185	<12	8.48	99.76	0.56	0.41	0.39
AC3	AC3/M98	7	0.009	0.12	16.46	18	41	87	7.62	19	<19	<8	5	0.26	<6	188	<12	7.91	99.76	0.66	0.39	0.32

NOTA: Los valores de C_{org}, C_{tot} y S_{tot} se obtuvieron con el ensayo LECO.

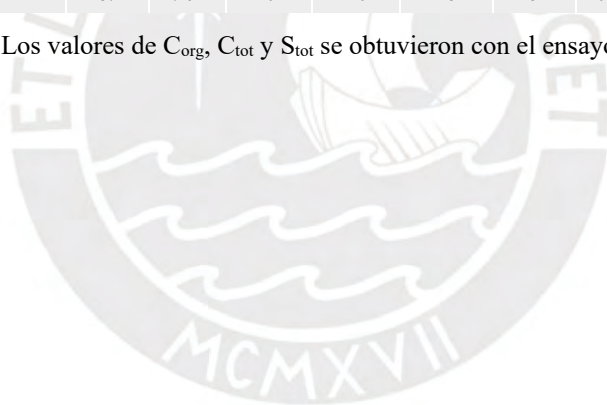


Tabla 8-8: Especiación de los elementos en la columna de agua por estación

Muestra	As	Br	C	Cl	Co	Cr	Fe	Mo	S	U	V
AC1/0	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/6	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/10	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/15	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/20	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/30	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/35	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/45	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/50	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/55	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/60	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/70	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/80	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/90	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/100	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/110	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/120	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/130	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/140	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/150	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/160	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/170	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/180	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/2cmfondo	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC2/2	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC2/5	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻

Muestra	As	Br	C	Cl	Co	Cr	Fe	Mo	S	U	V
AC3/240	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/260	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/300	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/339	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/358	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/404	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/1mfondo	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
AC3/1cmfondo	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
BE/10	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
BE/100	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻
BE/310	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (OH) ₂	VO ₃ (OH) ²⁻

Tabla 8-9: Especiación de los elementos en el agua de poros

Muestra	As	Br	C	Cl	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	P*	S	U	V
AC1/P2	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P6	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P20	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P25	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P30	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P40	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCO ₃	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P45	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	CuCO ₃	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P55	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P65	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCO ₃	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P75	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	CrO ₄ ²⁻	CuCO ₃	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P80	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCO ₃	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P85	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P90	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCl ₃ ²⁻	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	MgHPO ₄	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻
AC1/P130	HAsO ₄ ²⁻	Br ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCoO ₂ ⁻	Cr(OH) ₂ ⁺	CuCO ₃	Fe(OH) ₃	MoO ₄ ²⁻	-	SO ₄ ²⁻	UO ₂ (CO ₃) ₂ ²⁻	VO ₃ (OH) ²⁻

Tabla 8-10: Estadísticas de la geoquímica en columna de agua por estación

Elemento	AC1					AC2					AC3					TOTAL					BE				
	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana
Al (mg/l)	<0.15	0	<0.15	0	0	<0.15	0	<0.15	0	0	<0.15	0	<0.15	0	0	<0.15	0	<0.15	0	0	<0.15	0	<0.15	0	0
As (µg/L)	1.23	1.59	1.83	0.15	1.60	1.20	1.54	1.90	0.21	1.50	0.72	1.11	1.87	0.33	1.03	0.72	1.45	1.90	0.30	1.48	1.27	1.34	1.45	0.09	1.31
Br (mg/l)	26.6	44.6	59.4	11.2	47.0	31.9	59.3	70.6	11.7	61.8	68.1	71.5	74.3	2.1	72.3	26.6	56.7	74.3	14.7	58.5	60.8	61.9	63.6	1.5	61.3
Cl (mg/l)	18800	19207	19620	180	19210	18690	19043	19310	178	19100	18670	19902	20530	762	20365	18670	19338	20530	542	19180	17840	18020	18340	278	17880
Co (µg/L)	0.031	0.053	0.262	0.045	0.045	0.032	0.043	0.064	0.008	0.041	0.014	0.033	0.114	0.026	0.024	0.014	0.044	0.262	0.033	0.040	0.023	0.028	0.034	0.006	0.027
Cr (µg/L)	0.283	0.429	0.584	0.056	0.428	0.280	0.442	0.585	0.082	0.433	0.146	0.287	0.389	0.077	0.295	0.146	0.395	0.585	0.097	0.408	0.318	0.338	0.376	0.033	0.321
Cu (µg/L)	0.133	0.382	2.240	0.411	0.269	0.403	0.711	1.790	0.376	0.594	0.060	0.219	0.636	0.155	0.181	0.060	0.448	2.240	0.396	0.374	0.419	0.487	0.555	0.068	0.486
Fe (µg/L)	0.325	0.668	1.700	0.349	0.582	0.418	1.009	5.900	1.170	0.727	0.632	1.025	4.990	1.067	0.710	0.325	0.877	5.900	0.899	0.697	0.520	0.535	0.560	0.022	0.524
Ga (µg/L)	<0.002	0.007	0.018	0.005	0.007	<0.002	0.017	0.042	0.013	0.014	<0.002	0.006	0.024	0.008	0.000	<0.002	0.010	0.042	0.010	0.009	<0.002	0.003	0.009	0.005	0.000
Hf (µg/L)	<0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	<0.002	0.001	0.004	0.001	0.000	<0.002	0.000	0.003	0.001	0.000	<0.002	0.000	0.004	0.001	0.000	<0.002	0.001	0.002	0.001	0.000
Mo (µg/L)	6.71	8.04	10.80	0.82	7.95	6.28	7.94	9.26	0.89	7.71	4.02	5.25	7.21	1.01	5.04	4.02	7.26	10.80	1.51	7.50	6.54	6.91	7.15	0.33	7.04
Nb (µg/L)	<0.004	0.000	0.004	0.001	0.000	<0.004	0.001	0.005	0.002	0.000	<0.004	0.000	0.005	0.001	0.000	<0.004	0.000	0.005	0.001	0.000	<0.004	0.000	<0.004	0.000	0.000
PO ₄ (mg/l)	<1.5	0	<1.5	0	0	<1.5	0	<1.5	0	0	<1.5	0	<1.5	0	0	<1.5	0	<1.5	0	0	<1.5	0	<1.5	0	0
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2510	2605	2660	32	2610	2500	2558	2600	34	2575	2490	2686	2790	122	2760	2490	2611	2790	84	2590	2440	2463	2510	40	2440
Te (µg/L)	0.017	0.135	0.269	0.065	0.143	0.055	0.163	0.428	0.095	0.135	<0.01	0.064	0.308	0.087	0.041	<0.01	0.126	0.428	0.090	0.118	0.064	0.169	0.255	0.097	0.189
U (µg/L)	1.43	1.94	2.79	0.36	1.94	1.80	2.37	2.77	0.25	2.35	1.40	1.68	2.10	0.24	1.68	1.40	2.01	2.79	0.40	2.03	1.86	1.94	2.02	0.08	1.93
V (µg/L)	1.6	1.9	2.2	0.2	2.0	1.6	2.1	2.6	0.3	2.2	0.9	1.4	1.9	0.4	1.3	0.9	1.9	2.6	0.4	1.9	1.9	2.0	2.1	0.1	2.0
W (µg/L)	<0.05	0.00	0.07	0.01	0.00	<0.05	0.00	<0.05	0.00	0.00	<0.05	0.00	<0.05	0.00	0.00	<0.05	0.00	0.07	0.01	0.00	<0.05	0.00	<0.05	0.00	0.00

NOTA: Para el promedio, desviación estándar (sd) y mediana se reemplazaron los valores por debajo del límite de detección por 0. El resumen total no contempla los datos de la estación BE. No se consideraron las muestras AC3/160 ni AC3/180 debido a las observaciones descritas en el apartado de Tratamiento de datos.

Tabla 8-11: Estadísticas de la geoquímica del agua de poros por estación

Elemento	AC1					AC2					AC3					TOTAL				
	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana
Al (mg/l)	<0.15	0.00	<0.15	0.00	0.00	<0.15	0.06	0.28	0.11	0.00	<0.15	0.07	0.24	0.09	0.00	<0.15	0.04	0.28	0.08	0.00
As (µg/L)	1.75	6.67	25.80	5.27	5.53	2.28	21.04	74.20	24.53	9.84	3.04	10.24	18.40	4.66	11.50	1.75	12.13	74.20	15.33	7.27
Br (mg/l)	61.6	67.8	72.5	3.4	68.6	66.9	70.3	75.1	2.3	70.3	61.2	69.0	76.1	3.9	69.5	61.2	68.9	76.1	3.4	69.5

Elemento	AC1					AC2					AC3					TOTAL				
	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana
Cl (mg/l)	16870	18714	20110	962	18870	18220	19282	20130	581	19330	17480	19286	19960	679	19425	16870	19040	20130	825	19245
Co (µg/L)	0.175	0.984	2.160	0.574	0.837	0.277	0.955	2.150	0.568	0.904	0.136	0.509	1.330	0.358	0.431	0.136	0.847	2.160	0.553	0.807
Cr (µg/L)	0.16	0.38	1.01	0.23	0.29	0.35	0.80	1.39	0.43	0.51	0.26	0.45	1.05	0.22	0.39	0.16	0.53	1.39	0.35	0.40
Cu (µg/L)	0.184	0.953	4.810	1.347	0.379	0.269	2.192	5.500	2.147	0.940	0.326	0.989	4.220	1.282	0.405	0.184	1.350	5.500	1.690	0.464
Fe (µg/L)	27.4	1870.3	10020.0	2709.6	593.5	18.1	210.5	1079.0	303.4	54.8	42.1	380.1	1337.0	407.6	166.0	18.1	948.0	10020.0	1913.8	196.5
Ga (µg/L)	<0.002	0.025	0.159	0.041	0.009	0.002	0.043	0.196	0.059	0.010	0.002	0.021	0.087	0.027	0.009	<0.002	0.030	0.196	0.044	0.010
Hf (µg/L)	<0.002	0.002	0.010	0.003	0.000	<0.002	0.004	0.024	0.006	0.003	<0.002	0.002	0.010	0.003	0.000	<0.002	0.003	0.024	0.004	0.002
Mo (µg/L)	1.85	13.45	38.80	8.95	11.60	7.81	46.94	235.00	59.07	30.40	6.58	19.12	50.00	12.53	18.30	1.85	25.45	235.00	36.49	16.95
Nb (µg/L)	<0.004	0.005	0.016	0.005	0.004	<0.004	0.011	0.055	0.014	0.008	<0.004	0.004	0.011	0.004	0.004	<0.004	0.007	0.055	0.009	0.005
PO ₄ (mg/l)	<1.5	9.4	17.4	5.9	9.3	6.6	13.4	17.4	2.8	14.3	<1.5	8.6	22.9	8.5	5.8	<1.5	10.5	22.9	6.2	12.5
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	970	1620	2700	488	1505	30	1143	2380	781	955	980	1993	2680	611	2170	30	1560	2700	695	1505
Te (µg/L)	<0.01	0.220	0.939	0.196	0.188	<0.01	0.246	1.220	0.310	0.216	0.089	0.230	0.505	0.126	0.191	<0.01	0.231	1.220	0.220	0.192
U (µg/L)	0.078	1.836	5.330	1.530	1.510	0.993	7.412	23.700	7.464	3.380	1.520	5.058	15.300	3.762	3.330	0.078	4.451	23.700	5.193	2.860
V (µg/L)	0.347	3.368	11.300	3.006	2.185	2.460	27.802	87.000	29.528	14.700	3.660	8.309	18.800	4.485	7.090	0.347	12.342	87.000	19.584	5.685
W (µg/L)	<0.05	0.12	0.35	0.09	0.09	0.10	0.32	0.72	0.22	0.20	<0.05	0.10	0.26	0.07	0.08	<0.05	0.18	0.72	0.17	0.11

NOTA: Para el promedio, desviación estándar (sd) y mediana se reemplazaron los valores por debajo del límite de detección por 0. No se consideraron las muestras AC1/P10 ni AC1/P35 debido a las observaciones descritas en el apartado de Tratamiento de datos.

Tabla 8-12: Estadísticas de la geoquímica del sedimento de cada estación

Elemento	AC1					AC2					AC3					TOTAL				
	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana
As (mg/kg)	6	11	31	5	9	6	8	20	3	8	5	8	11	2	8	5	9	31	4	8
Cl (%)	0.003	0.011	0.017	0.004	0.011	0.007	0.012	0.027	0.003	0.012	0.004	0.010	0.016	0.003	0.011	0.003	0.011	0.027	0.003	0.011
SO ₃ (%)	0.11	0.52	1.27	0.43	0.27	0.13	0.19	0.31	0.05	0.19	0.10	0.21	0.54	0.12	0.13	0.10	0.32	1.27	0.31	0.19
Al ₂ O ₃ (%)	15.41	16.44	17.05	0.51	16.68	16.34	16.94	17.44	0.31	16.92	15.38	16.06	16.65	0.39	16.10	15.38	16.50	17.44	0.54	16.61
Co (mg/kg)	12	16	21	2	17	15	17	21	2	17	14	18	23	2	17	12	17	23	2	17
Cr (mg/kg)	<12	26	38	10	31	29	35	47	4	34	34	44	59	6	42	<12	34	59	10	34
Cu (mg/kg)	80	93	121	9	93	73	86	101	5	86	73	88	109	10	87	73	89	121	9	88
Fe ₂ O ₃ (%)	6.1	7.3	7.8	0.5	7.5	7.3	7.5	7.7	0.1	7.5	7.1	7.6	7.9	0.2	7.7	6.1	7.4	7.9	0.3	7.6

Elemento	AC1					AC2					AC3					TOTAL				
	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana	Min	Prom	Max	Sd	Mediana
Ga (mg/kg)	16	18	21	1	19	16	19	20	1	19	15	18	20	1	19	15	18	21	1	19
Hf (mg/kg)	<20	0	<19	0	0	<20	0	<19	0	0	<20	0	<19	0	0	<20	0	<19	0	0
Mo (mg/kg)	<8	0	<8	0	0	<8	0	<8	0	0	<8	0	<8	0	0	<8	0	<8	0	0
Nb (mg/kg)	<2	4	6	1	4	<2	4	5	1	4	<2	4	5	1	4	<2	4	6	1	4
P ₂ O ₅ (%)	0.191	0.221	0.263	0.011	0.220	0.209	0.223	0.244	0.009	0.222	0.207	0.217	0.260	0.011	0.214	0.191	0.220	0.263	0.010	0.219
U (mg/kg)	<6	0	<6	0	0	<6	0	<6	0	0	<6	0	<6	0	0	<6	0	<6	0	0
V (mg/kg)	123	169	193	23	182	176	183	193	4	182	170	181	194	7	182	123	177	194	16	182
W (mg/kg)	<12	0	<12	0	0	<12	0	<12	0	0	<12	0	<12	0	0	<12	0	<12	0	0
C _{tot} (%)	0.35	0.46	0.76	0.08	0.44	0.32	0.42	0.73	0.07	0.42	0.43	0.50	0.66	0.06	0.49	0.32	0.46	0.76	0.08	0.45
C _{org} (%)	0.04	0.22	0.62	0.16	0.25	0.22	0.29	0.58	0.07	0.27	0.23	0.34	0.45	0.06	0.35	0.04	0.28	0.62	0.12	0.30
S _{tot} (%)	0.21	0.69	1.56	0.48	0.41	0.26	0.40	0.61	0.11	0.36	0.27	0.61	1.43	0.32	0.47	0.21	0.57	1.56	0.36	0.44

NOTA: Para el promedio, desviación estándar (sd) y mediana se reemplazaron los valores por debajo del límite de detección por 0. Los valores de C_{tot}, C_{org} y S_{tot} se obtuvieron mediante LECO.



Tabla 8-13: Variación del número de muestras con SI negativo por especie mineral al cambiar el Eh y la temperatura.

Corrección		Hidróxidos			Óxidos				Cloruros		Carbonato	Silicatos		Sulfatos					Sulfuros		
T (°C)	Eh (V)	Fe(OH) ₂	Fe(OH) ₃	Goethita	Cromita	Magnetita	Hematita	FeO	Lawrencita	Molita	Siderita	Fayalita	Hedenbergita	Fe ₂ (SO ₄) ₃	FeSO ₄	Melanterita	Jarosita	Jarosita-Na	Troilita	Pirrotina	Pirita
0	0.00	41	6	0	2	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	34	41	41	41	41
0	-0.05	41	6	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	36	41	41	41	41
0	-0.10	41	8	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
0	-0.11	41	8	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
0	-0.12	41	8	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
0	-0.13	41	8	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
0	-0.14	41	11	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
0	-0.15	41	15	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
0	-0.16	41	17	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.17	41	19	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.18	41	19	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.19	41	20	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.20	41	23	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.21	41	26	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.22	41	29	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.23	41	34	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.24	41	36	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.25	41	37	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.26	41	38	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.27	41	40	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.28	41	41	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.29	41	41	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.30	41	41	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.35	41	41	0	0	0	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0	-0.40	41	41	2	0	2	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	38
0	-0.41	41	41	2	0	2	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	37
0	-0.42	41	41	2	0	2	0	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	39	40	37
0	-0.43	41	41	2	0	2	2	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	37	37	37
0	-0.44	41	41	2	0	4	2	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
0	-0.45	41	41	5	0	8	2	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
0	-0.46	41	41	8	0	10	2	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	37	37	35
0	-0.47	41	41	11	0	12	2	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	36	36	33
0	-0.48	41	41	13	0	14	7	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	36	36	32
0	-0.49	41	41	14	0	17	8	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	34	34	27
0	-0.50	41	41	18	0	19	12	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	32	32	25
0	-0.51	41	41	19	0	21	13	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	30	30	25
0	-0.52	41	41	22	0	23	15	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	27	27	22
0	-0.53	41	41	24	0	31	19	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	25	25	20
0	-0.54	41	41	28	0	32	19	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	23	24	16
0	-0.55	41	41	35	0	36	23	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	22	22	15
0	-0.60	41	41	41	0	40	39	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	11	11	4
0	-0.65	41	41	41	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	1	1	0
-5	0.00	41	14	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	35	40	41	41	41

Corrección		Hidróxidos			Óxidos			Cloruros			Carbonato	Silicatos		Sulfatos					Sulfuros		
T (°C)	Eh (V)	Fe(OH) ₂	Fe(OH) ₃	Goethita	Cronita	Magnetita	Hematita	FeO	Lawrencita	Molista	Siderita	Fayalita	Hedenbergita	Fe ₂ (SO ₄) ₃	FeSO4	Melanterita	Jarosita	Jarosita-Na	Troilita	Pirrotina	Pirita
-5	-0.05	41	14	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	40	41	41	41
-5	-0.10	41	16	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-5	-0.11	41	16	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-5	-0.12	41	18	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-5	-0.13	41	20	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-5	-0.14	41	23	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-5	-0.15	41	25	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.16	41	25	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.17	41	26	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.18	41	27	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.19	41	31	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.20	41	33	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.21	41	36	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.22	41	37	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.23	41	37	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.24	41	37	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.25	41	38	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.26	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.27	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.28	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.29	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.30	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.35	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-5	-0.40	41	41	2	0	2	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	37
-5	-0.41	41	41	2	0	2	1	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	37
-5	-0.42	41	41	2	0	5	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	39	39	37
-5	-0.43	41	41	3	0	8	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
-5	-0.44	41	41	8	0	10	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
-5	-0.45	41	41	9	0	14	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
-5	-0.46	41	41	13	0	15	5	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	36	36	34
-5	-0.47	41	41	14	0	17	8	41	41	41	39	41	41	41	41	41	41	41	36	36	32
-5	-0.48	41	41	16	0	19	11	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	36	36	31
-5	-0.49	41	41	19	0	21	13	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	33	33	26
-5	-0.50	41	41	20	0	25	14	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	32	32	25
-5	-0.51	41	41	23	0	31	16	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	28	30	23
-5	-0.52	41	41	26	0	35	19	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	25	26	22
-5	-0.53	41	41	30	0	37	22	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	25	25	17
-5	-0.54	41	41	36	0	38	24	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	23	23	16
-5	-0.55	41	41	37	0	39	28	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	22	22	15
-5	-0.60	41	41	41	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	9	9	4
-5	-0.65	41	41	41	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	0	0	0
-10	0.00	41	18	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	36	40	41	41	41
-10	-0.05	41	18	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	40	41	41	41
-10	-0.10	41	21	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-10	-0.11	41	22	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41
-10	-0.12	41	25	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.13	41	27	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41

Corrección		Hidróxidos			Óxidos				Cloruros		Carbonato	Silicatos		Sulfatos					Sulfuros		
T (°C)	Eh (V)	Fe(OH) ₂	Fe(OH) ₃	Goethita	Cromita	Magnetita	Hematita	FeO	Lawrencita	Molista	Siderita	Fayalita	Hedenbergita	Fe ₂ (SO ₄) ₃	FeSO ₄	Melanterita	Jarosita	Jarosita-Na	Troilita	Pirrotina	Pirita
-10	-0.14	41	27	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.15	41	29	0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.16	41	30	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.17	41	32	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.18	41	34	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.19	41	36	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.20	41	37	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.21	41	38	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.22	41	39	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.23	41	39	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.24	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.25	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.26	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.27	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.28	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.29	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.30	41	41	0	0	0	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.35	41	41	0	0	1	0	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
-10	-0.40	41	41	2	0	7	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	37
-10	-0.41	41	41	2	0	9	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	37
-10	-0.42	41	41	8	0	11	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	38	38	37
-10	-0.43	41	41	8	0	15	2	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
-10	-0.44	41	41	12	0	16	3	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	37	37	36
-10	-0.45	41	41	13	0	17	8	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	37	37	35
-10	-0.46	41	41	14	0	20	9	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	36	36	33
-10	-0.47	41	41	18	0	23	13	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	36	36	32
-10	-0.48	41	41	19	0	28	14	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	35	35	28
-10	-0.49	41	41	22	0	31	16	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	33	33	25
-10	-0.50	41	41	25	0	36	19	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	32	32	25
-10	-0.51	41	41	28	0	38	19	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	28	28	22
-10	-0.52	41	41	35	0	38	23	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	25	25	21
-10	-0.53	41	41	36	0	40	26	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	25	25	17
-10	-0.54	41	41	39	0	40	29	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	22	22	15
-10	-0.55	41	41	40	0	40	36	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	22	22	15
-10	-0.60	41	41	41	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	6	8	3
-10	-0.65	41	41	41	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	0	0	0

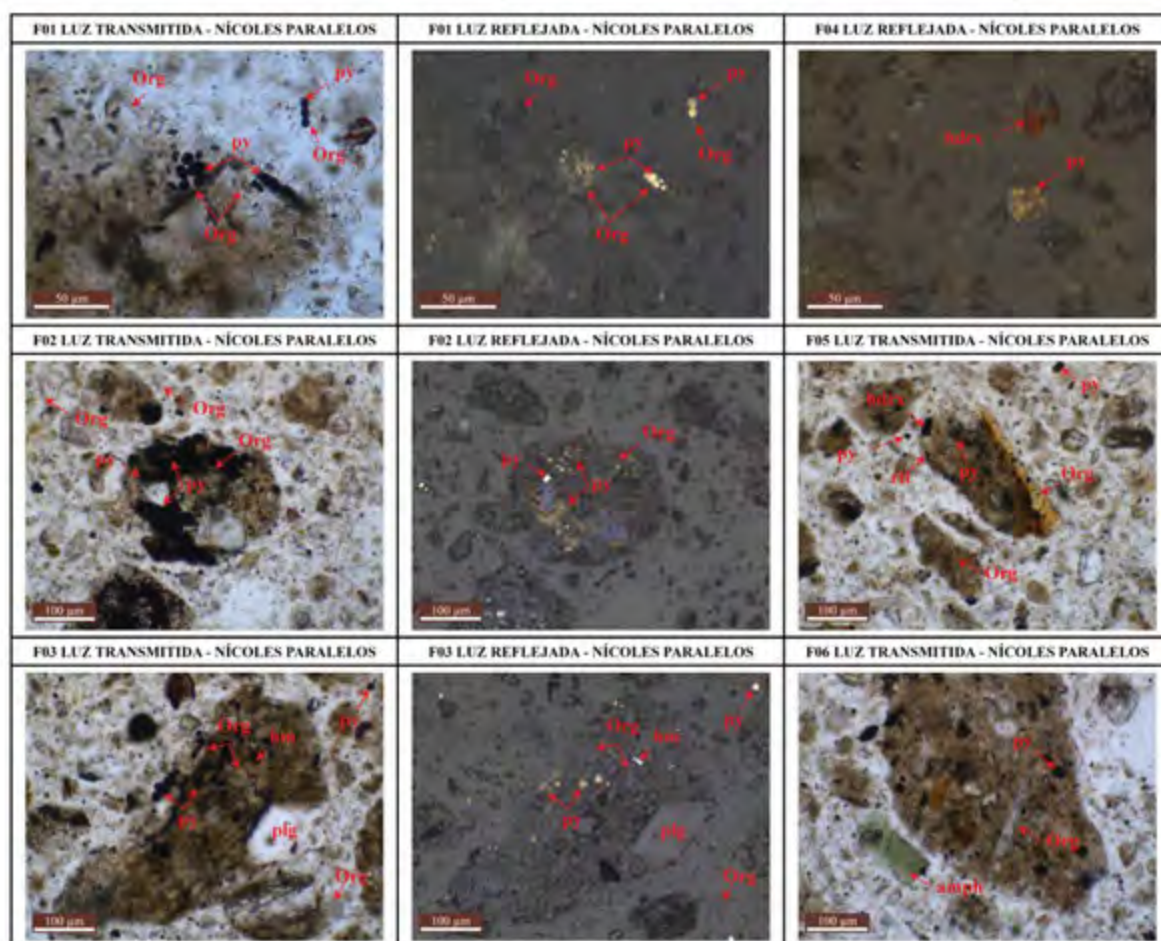
8.4. Anexo IV: Fichas

Tabla 8-14: Tabla de abreviaturas empleadas en las fichas

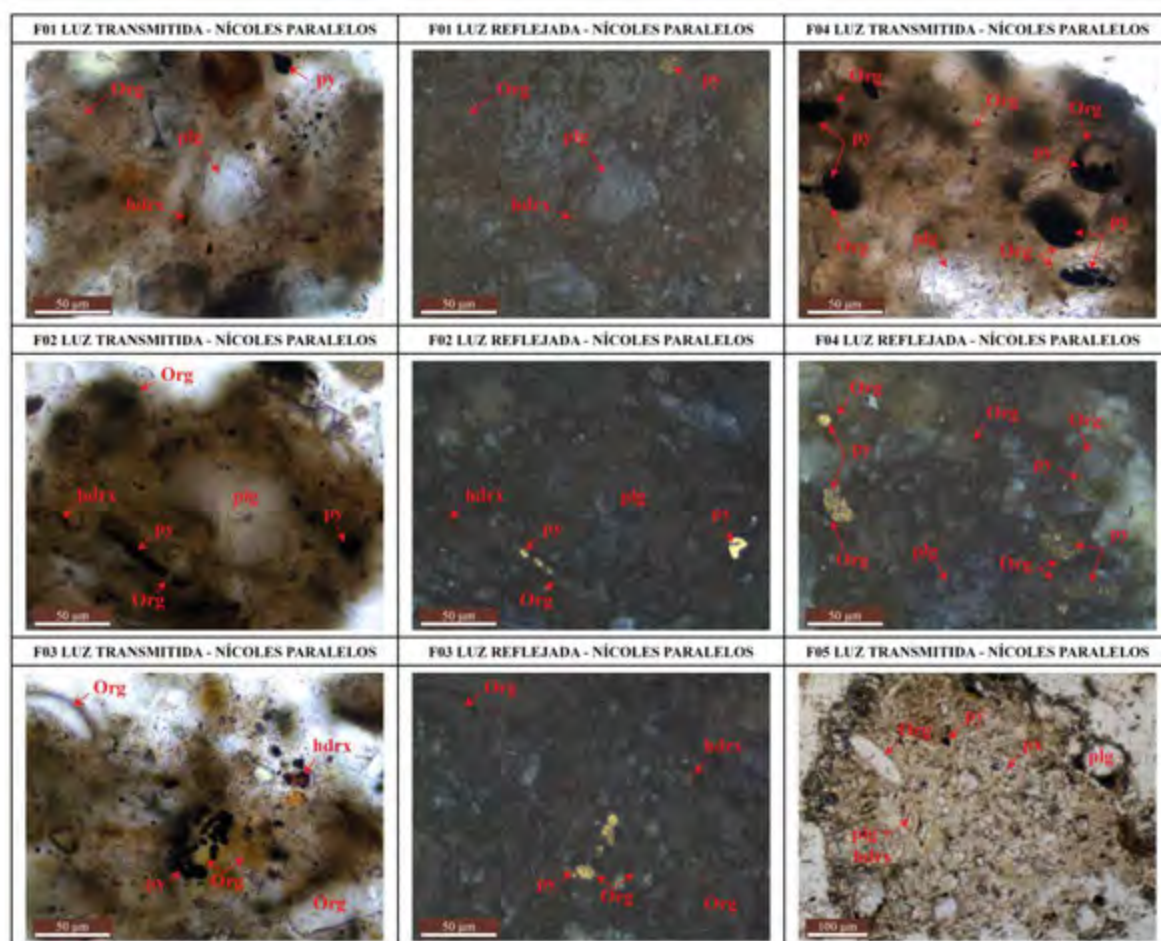
Mineral	Abreviatura
Anfíbol	amph
Carbonatos	cc
Cloritas	chl
Cuarzo	qtz
Epidota	ep
Feldespato	fds
Glauconita	glt
Grafito	C
Hematita	hm
Hidróxidos	hdrx
Jarosita	jar
Magnetita	mt
Materia Orgánica	Org
Óxidos	ox
Pirita	py
Piroxeno	px
Plagioclasa	plg
Rutilo	rtl

NOTA: El grafito presente en las muestras AC2/G2, AC2/G4 AC2/G6 y AC2/G10 se debe a un error durante la preparación. En dichas muestras se adicionó grafito granulado para que actúe como matriz y separe los clastos para el análisis por microscopía electrónica.

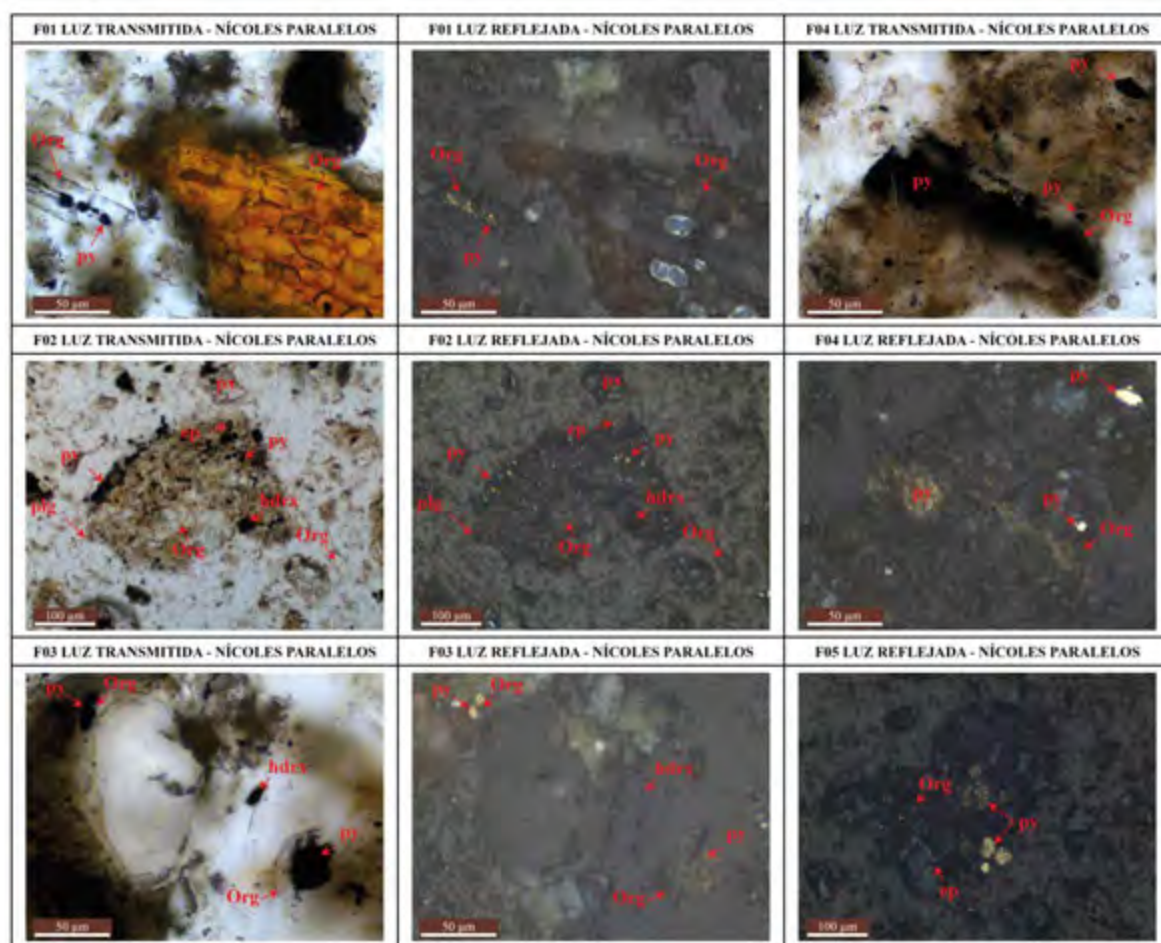
Muestra con alto contenido de restos orgánicos (5/5), compuestos principalmente por diatomeas ovoides dentro de litoclastos. La cantidad de pirita primaria es moderada (3/5), mientras que la pirita framboidal es abundante (4/5), encontrándose numerosos clústeres de framboides dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante se resume a litoclastos de cuarzo recubiertos de carbonatos, plagioclasa aislada, anfíboles cloritizados, epidota asociada a litoclastos de cuarzo, rutilo cubierto por leucoxeno, diseminaciones de hematita y magnetita, biotita alterada y serpentina. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas y en menor cantidad de hidróxidos de hierro.



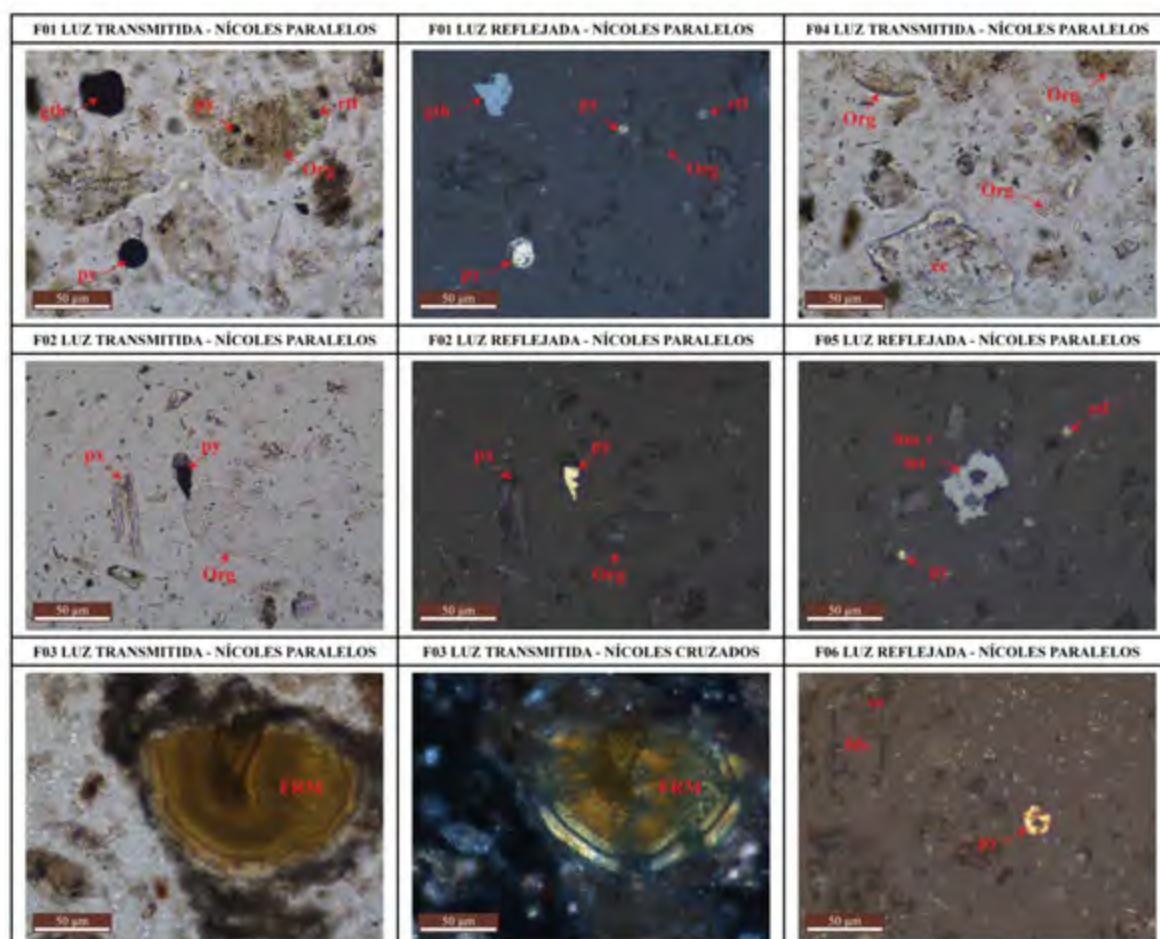
Muestra con restos orgánicos poco abundantes (2/5), destacando diatomeas ovoides dentro de litoclastos y encontrándose gasterópodos. La pirita primaria es moderada (3/5) y la framboidal es poco abundante (2/5); sin embargo, los litoclastos con clústeres de pirita framboidal poseen abundantes framboides. La mineralogía restante se compone de abundante plagioclasa (aislada y dentro de litoclastos), cuarzo aislado, epidota aislada y dentro de litoclastos de feldespatos, cloritas relleno de vesículas volcánicas, anfíboles cloritizados, hematita y ortopiroxenos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas y en menor cantidad de hidróxidos de hierro.



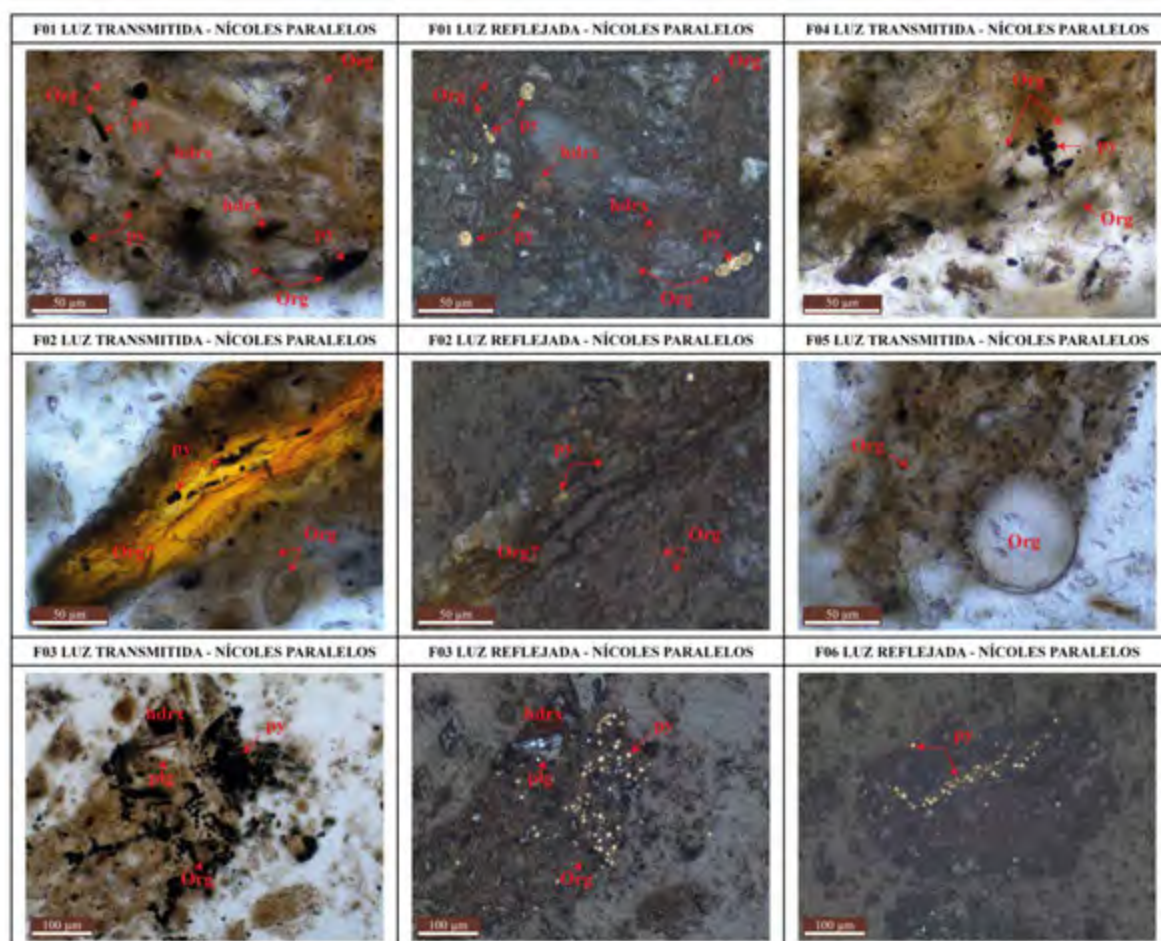
Muestra con moderada cantidad de restos orgánicos (3/5), destacando las diatomeas oviformes dentro de litoclastos y encontrándose gasterópodos. En menor proporción se encontraron organismos alargados con una estructura tubular interna y valvas silíceas recubierta de óxidos. Tanto la pirita primaria como la framboidal son escasas (1/5), aunque esta última se encuentra frecuentemente en clústeres de abundantes framboides dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante se resume a cuarzo y plagioclasa tanto aislados como dentro de litoclastos recubiertos por carbonatos, epidotam anfíboles cloritizados, cloritas dentro de litoclastos, carbonatos aislados con bordes irregulares, agregados aislados de hidróxidos, ortopiroxenos y serpentina. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados por hidróxidos de hierro y arcillas en similar proporción.



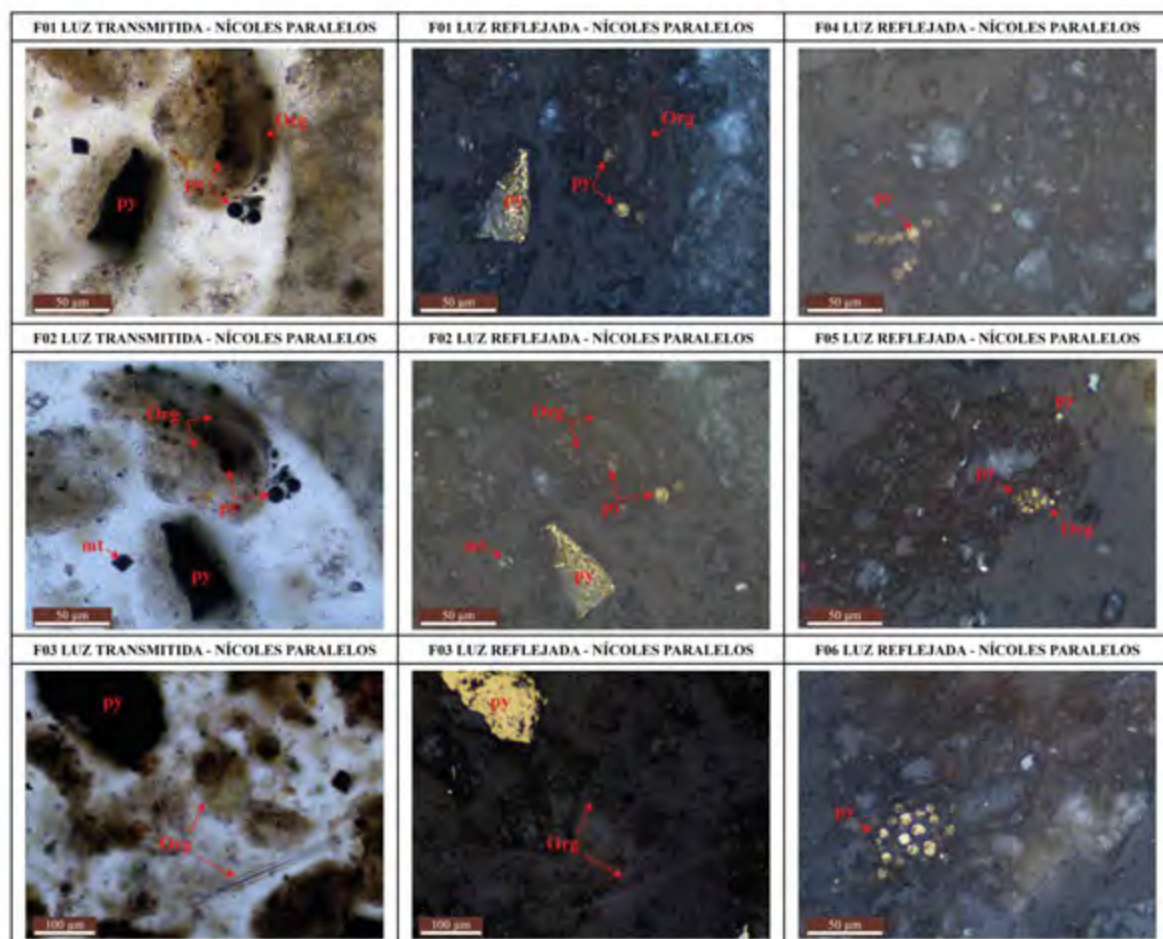
Muestra con escaso contenido de restos orgánicos (1/5) compuestos principalmente por fragmentos de diatomeas discoidales. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la framboidal es escasa (1/5) al no encontrarse clústeres por lo que destacan aquellos framboides aislados por su mayor tamaño (20 μm). La mineralogía se completa con litoclastos de feldespatos y cuarzo parcialmente cubiertos por carbonatos, magnetita martitizada, cloritas y carbonatos con bordes sinuosos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).



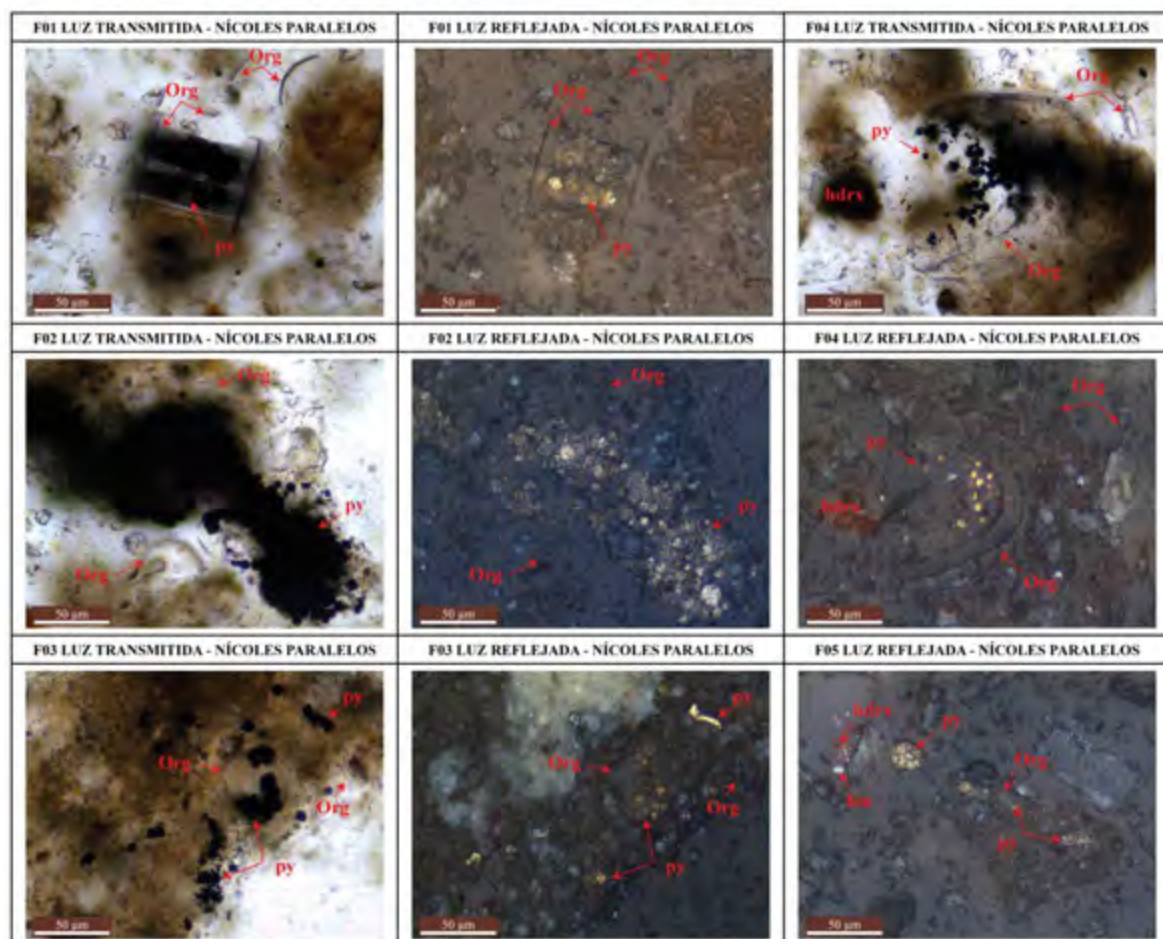
Muestra con abundantes restos de materia orgánica (4/5), especialmente dentro de los litoclastos, presentando gran variedad (diatomeas discoidales y ovoides, valvas silíceas alargadas cubiertas por óxidos e incluso gasterópodos). La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la framboidal es abundante (4/5), mostrando un tamaño, forma y disposición supeditados a los restos orgánicos. La mineralogía también se compone de litoclastos de cuarzo, feldespatos, carbonatos y epidota cubiertos de arcillas e hidróxidos de hierro. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas y en menor cantidad de hidróxidos de hierro.



Muestra con escasos restos de materia orgánica (1/5), compuestos mayoritariamente por organismos alargados con una estructura tubular interna y, en menor medida, diatomeas ovoides e incluso gasterópodos. Si bien la pirita primaria se presenta en altas concentraciones (5/5), la pirita framboidal es poco abundante (2/5) y se restringe a clústeres dentro de materia orgánica. La mineralogía restante se encuentra conformada por litoclastos de feldespatos y cuarzo, plagioclasa cementada por hidróxidos, epidota (abundante), carbonatos, cloritas, anfíboles cloritizados, hematita y magnetita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas y en menor cantidad de hidróxidos de hierro.

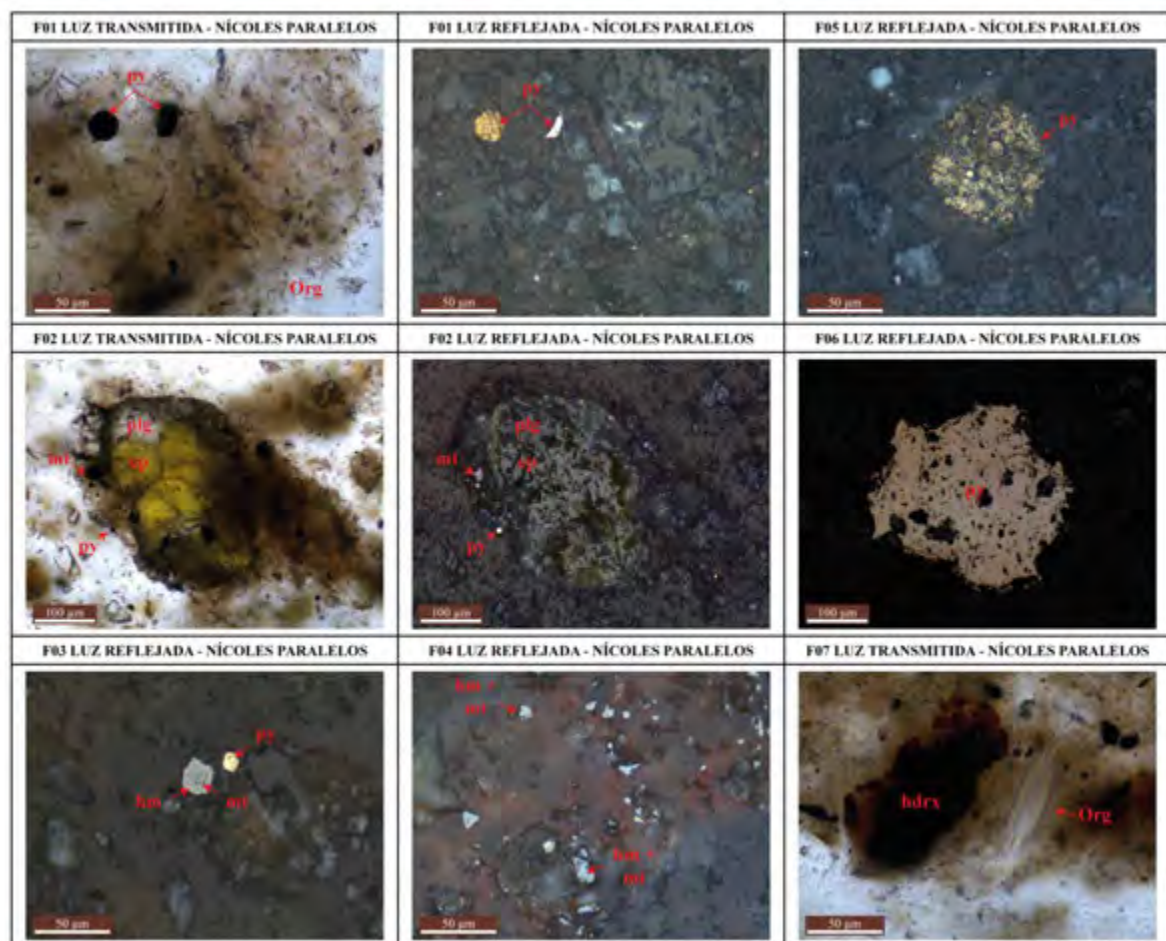


Esta muestra contiene abundantes restos orgánicos (4/5) compuestos principalmente por diatomeas ovoides tanto dentro como fuera de litoclastos y encontrándose gasterópodos. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la framboidal es abundante (4/5), encontrándose numerosos clústeres con abundantes framboides dentro y alrededor de la materia orgánica. La mineralogía restante se resume a plagioclasa y cuarzo (aislados y conformando litoclastos), cloritas, epidota, magnetita martitizada, hematita y carbonatos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.

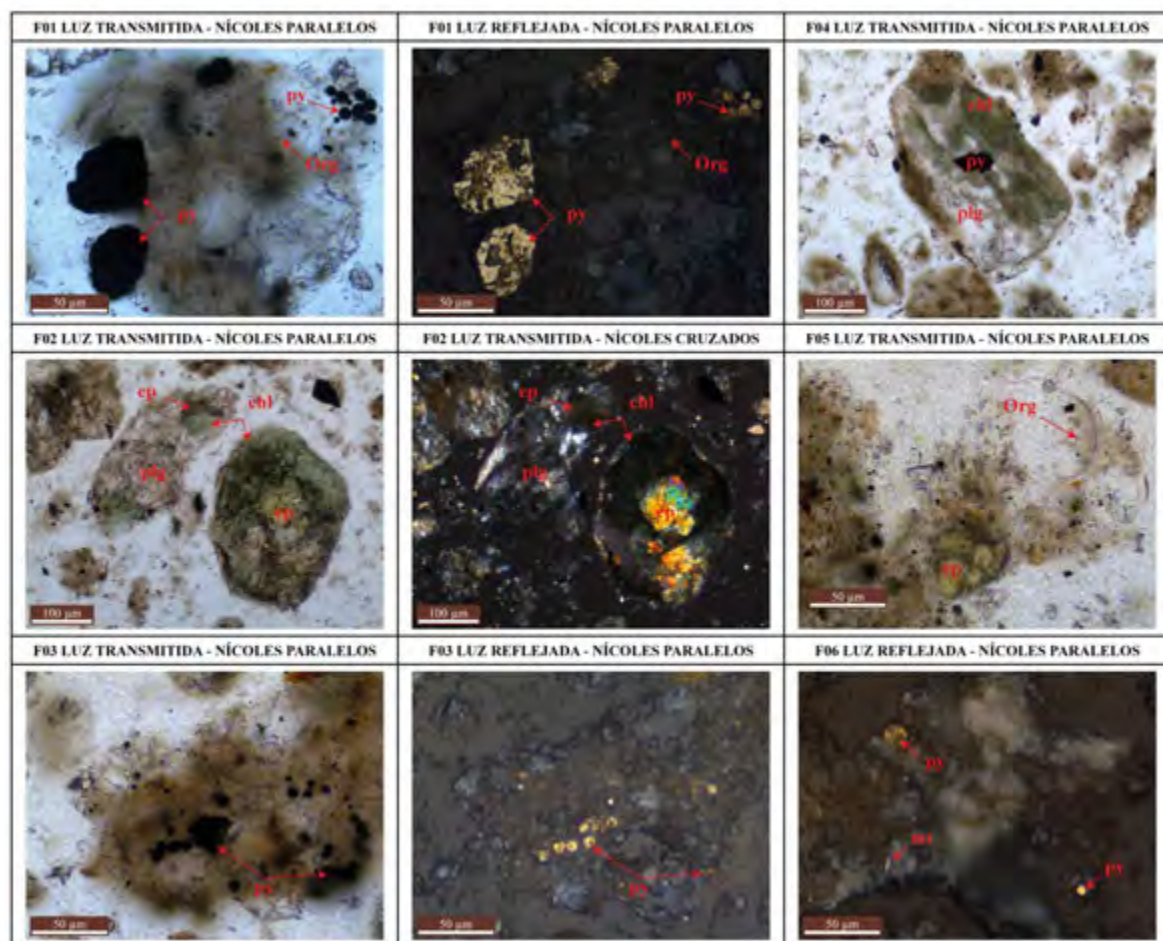


AC1/G90

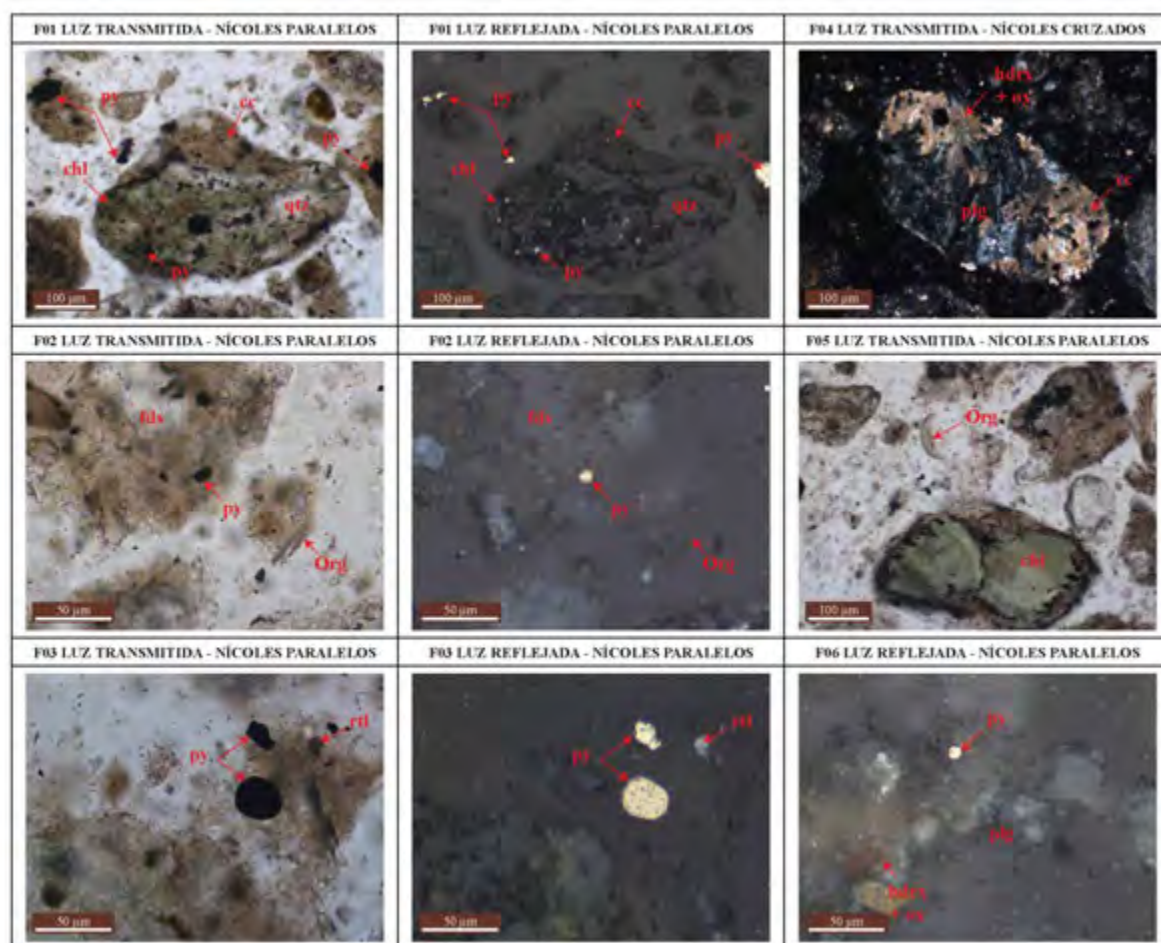
En esta muestra los restos orgánicos son escasos (1/5), predominando los organismos alargados con una estructura tubular interna sobre las diatomeas. Si bien la pirita primaria se presenta en altas concentraciones (5/5), la pirita framboidal es escasa (1/5), aunque destaca un solo gran clúster de framboides. La mineralogía restante se compone de plagioclasa y cuarzo (dentro y fuera de litoclastos), epidota (abundante), disseminaciones de hematita y magnetita, carbonatos y cloritas. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



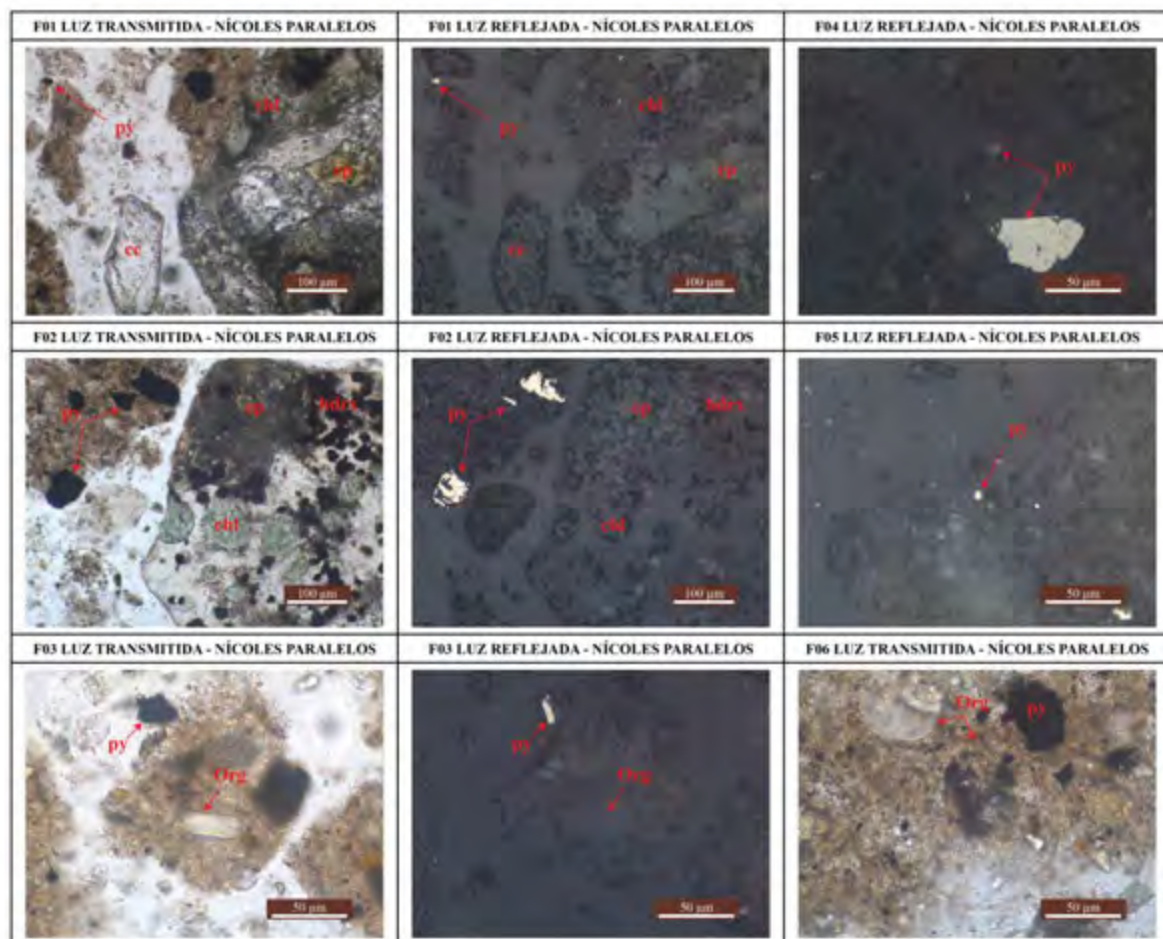
Muestra con escasos restos orgánicos (1/5), destacando las diatomeas ovoides dentro de litoclastos. La pirita primaria se encuentra en altas concentraciones (5/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5), con framboides alineados según la materia orgánica. La mineralogía restante se compone de litoclastos de feldespatos y cuarzo, epidota (abundante), cloritas, ortopiroxenos, magnetita y carbonatos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).



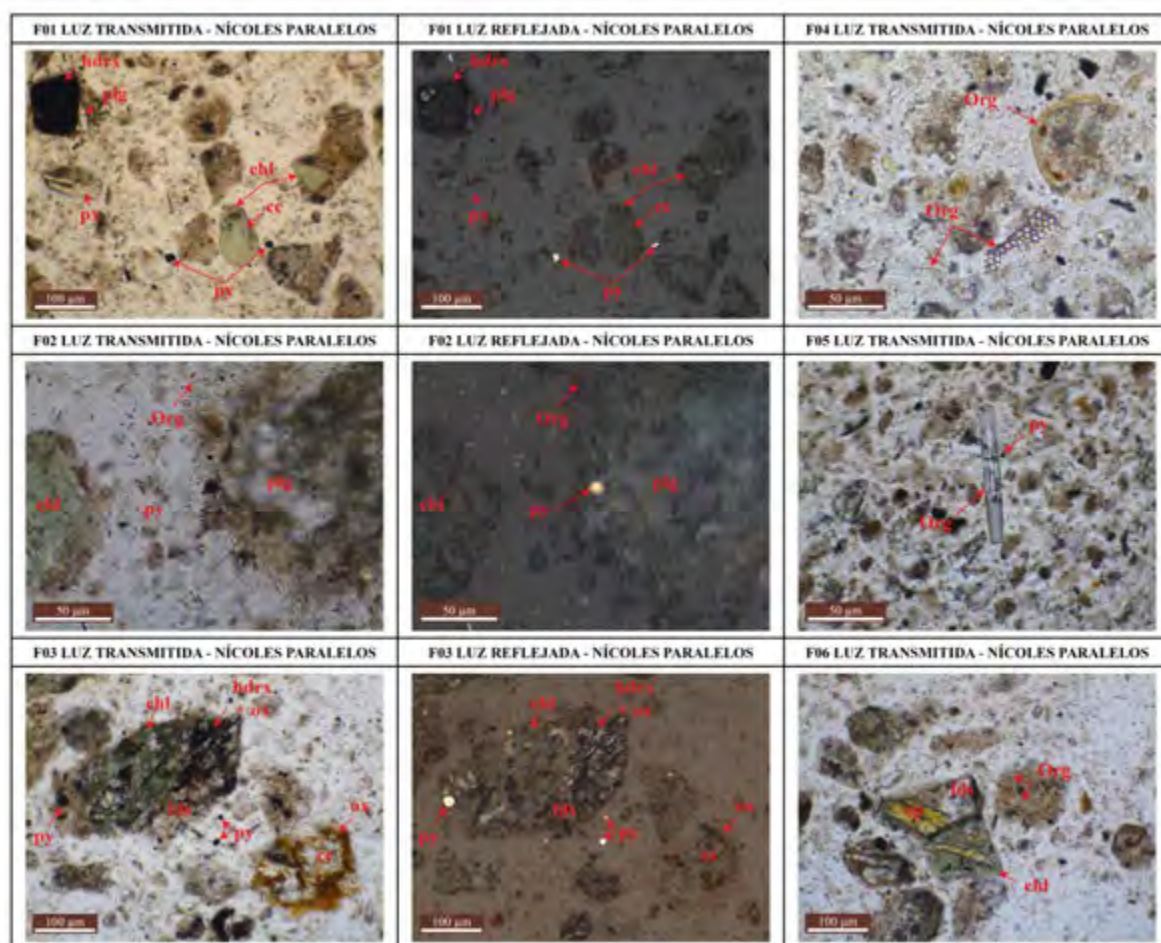
La muestra presenta escasos restos orgánicos (1/5), destacando los organismos alargados con una estructura tubular interna sobre las diatomeas. Las concentraciones de pirita primaria son altas (5/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5). Si bien no se encuentran clústeres dentro de litoclastos, se observaron framboides aislados de hasta 30 μm . La mineralogía restante se compone de litoclastos de cuarzo y plagioclasa parcialmente cubiertos de carbonatos, epidota, carbonatos, leucóxeno, magnetita martitizada, hematita, glauconita, sericita y cloritas. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).



Muestra con escasos restos orgánicos (1/5), destacando las diatomeas ovoides dentro de litoclastos. La pirita primaria se encuentra en altas concentraciones (5/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5) y se presenta como framboides aislados. La mineralogía restante se compone de litoclastos de cuarzo, carbonatos, cloritas y magnetita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).

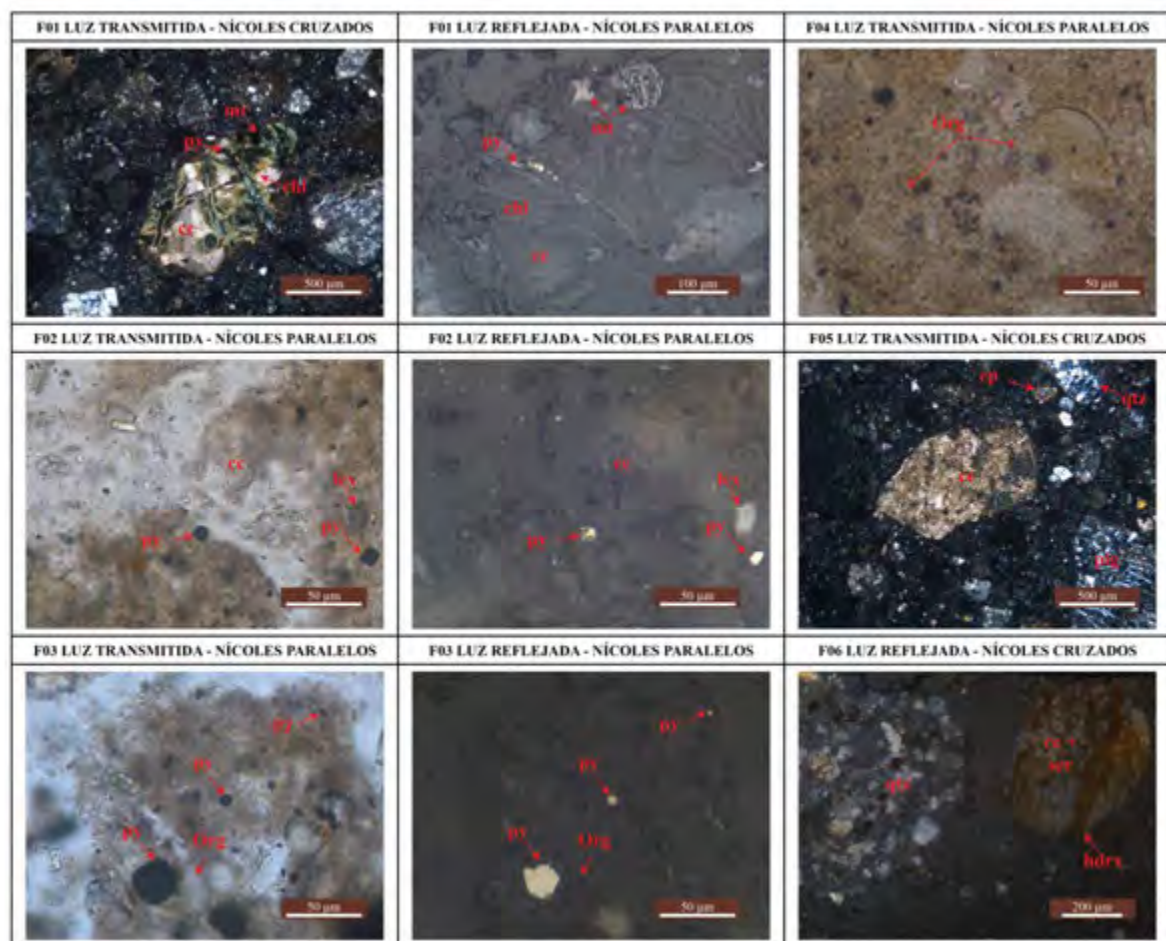


Esta muestra posee escasos restos orgánicos (1/5) compuestos de organismos alargados con una estructura tubular interna y fragmentos de diatomeas. La concentración de pirita primaria es alta (5/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5) por lo que solo se encuentran framboides solitarios en litoclastos. La mineralogía restante está conformada por litoclastos de cuarzo y feldespatos cubiertos de carbonatos, anfíboles cloritizados, cloritas, ortopiroxenos, carbonatos con bordes irregulares, magnetita martitizada, glauconitas, biotita y plagioclasa cementada por hidróxidos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).

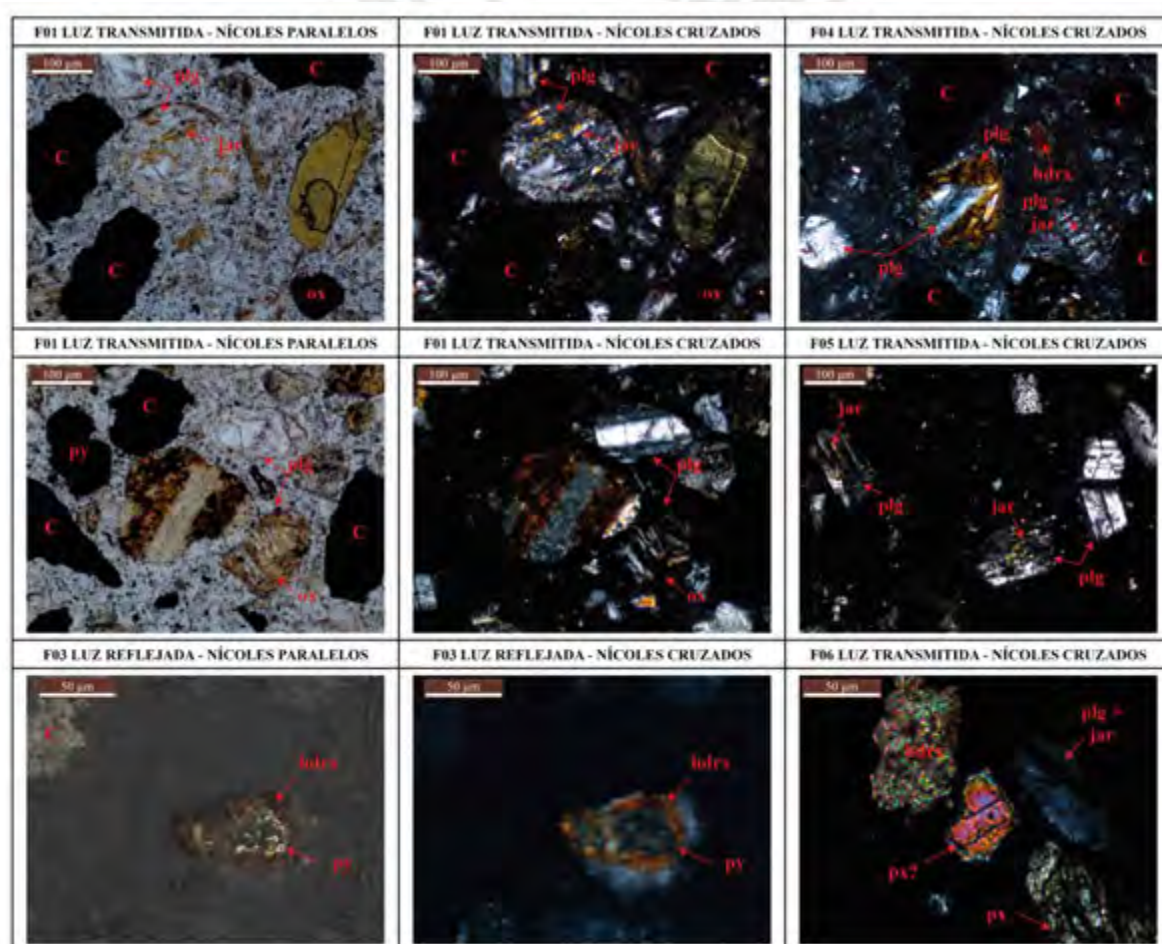


AC1/G250

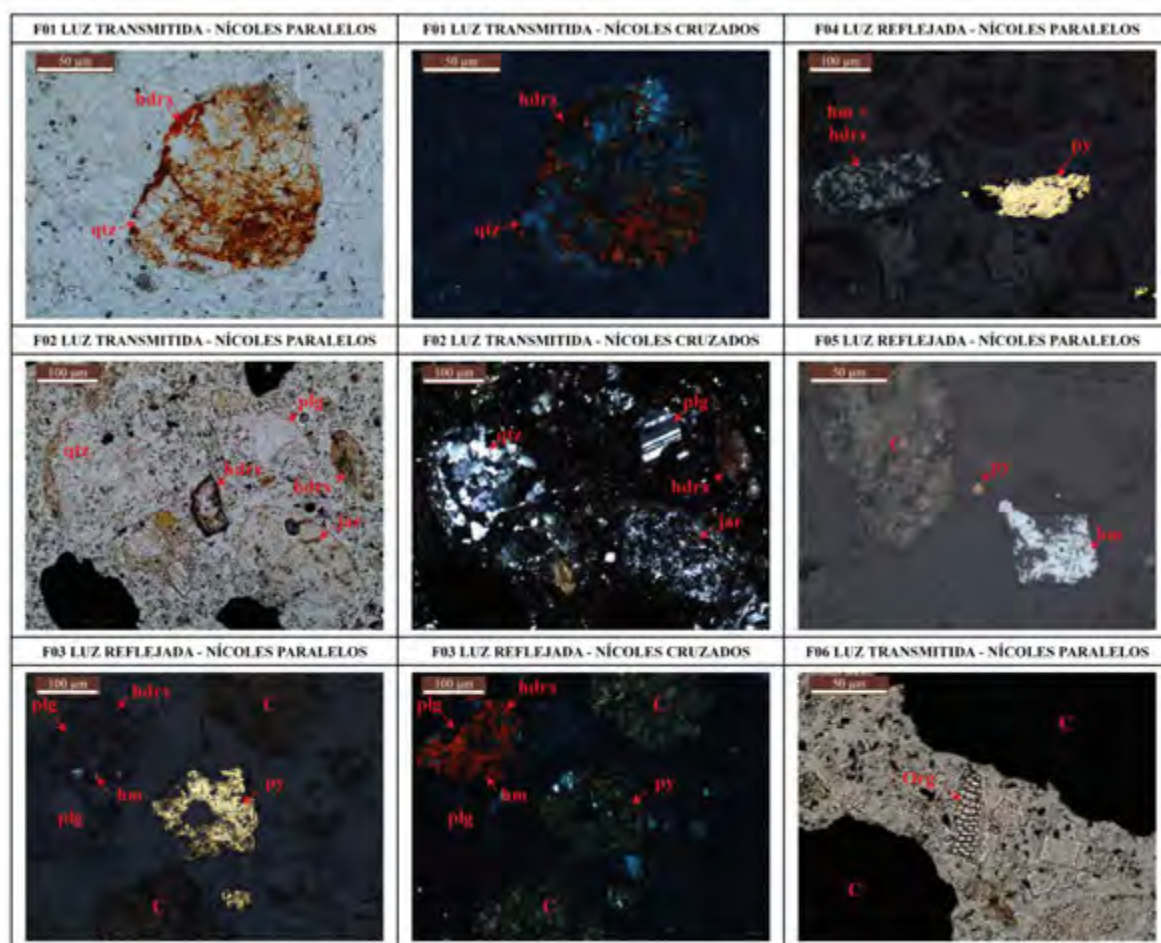
Muestra con escasos restos orgánicos (1/5), destacando las diatomeas ovoides y discoidales dentro de litoclastos. La pirita primaria se encuentra en altas concentraciones (5/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5), presentada como framboides aislados. La mineralogía restante se compone de litoclastos de feldspatos y cuarzo, epidota (abundante), magnetita y moldes de anfíboles cloritizados y reemplazados posteriormente por carbonatos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).



En esta muestra los restos orgánicos son escasos (1/5), restringiéndose a fragmentos de algas aisladas. La pirita primaria es escasa (1/5) y no se encontró pirita framboidal (0/5). Parte de la pirita presenta un recubrimiento de hidróxidos, así como bordes corroídos por acidez, así como los carbonatos presentes. La mineralogía restante se compone de plagioclasa aislada con jarosita en los planos de fractura, epidota, agregados redondeados de hidróxidos, cloritas y piroxenos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).

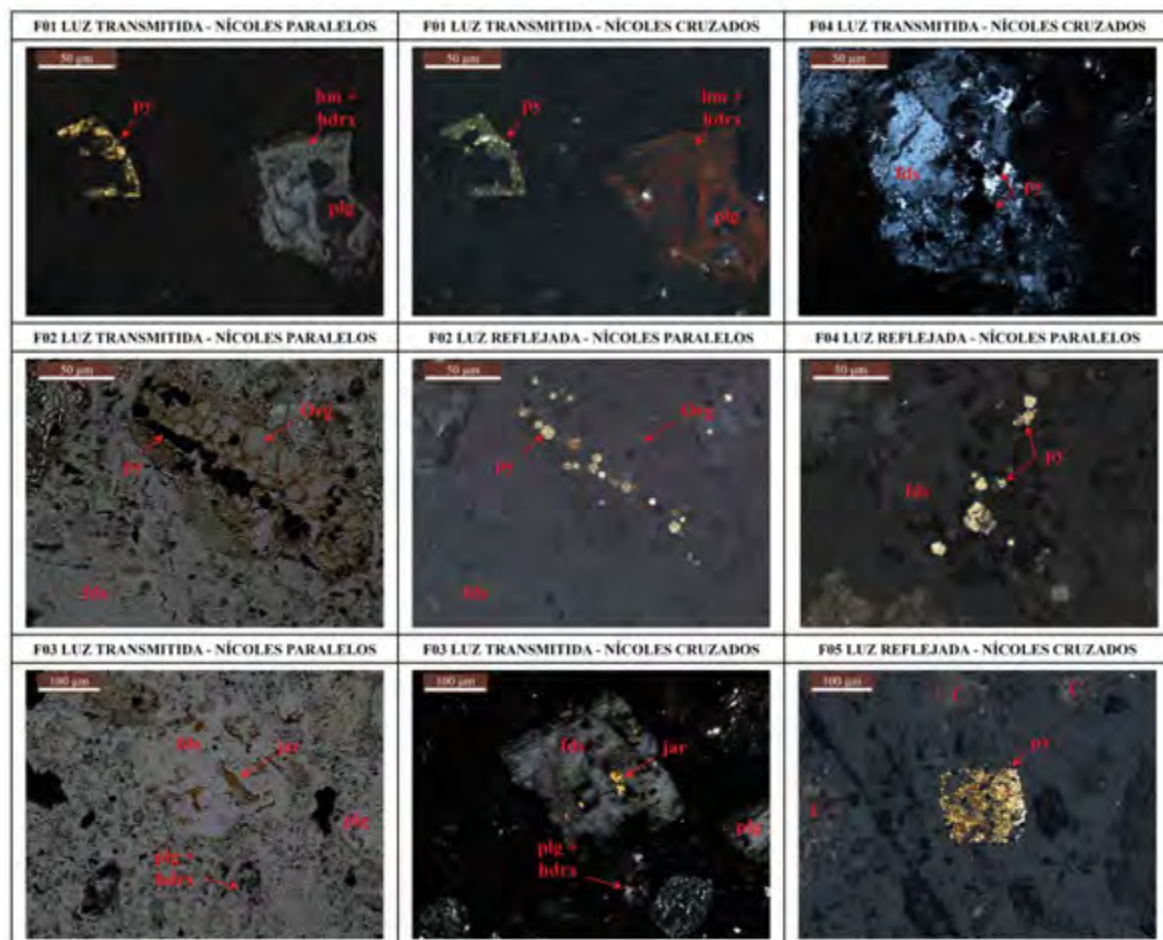


En esta muestra se encontraron restos orgánicos poco abundantes (2/5), primando fragmentos de algas. La pirita primaria también es poco abundante (2/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5), encontrándose solo framboides aislados. La pirita primaria presenta un alto grado de fracturamiento, así como bordes irregulares producto de la disolución por acidez. La mineralogía restante está conformada por litoclastos de cuarzo sub granular y plagioclasa con jarosita en las fracturas, cloritas, vesículas volcánicas llenadas de cloritas cubiertas por hidróxidos de hierro, disseminaciones de hematita y magnetita, rutilo y plagioclasa cementada por hidróxidos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).

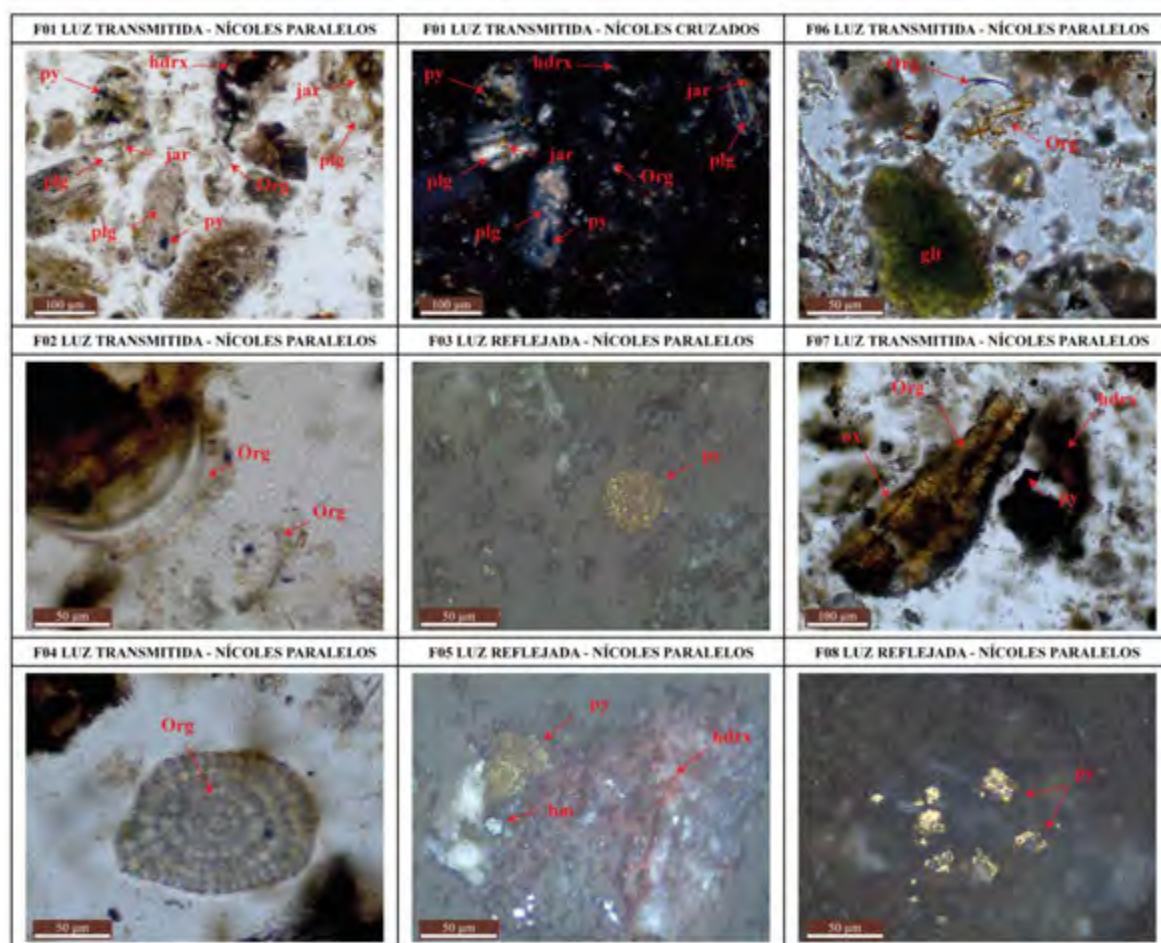


AC2/G6

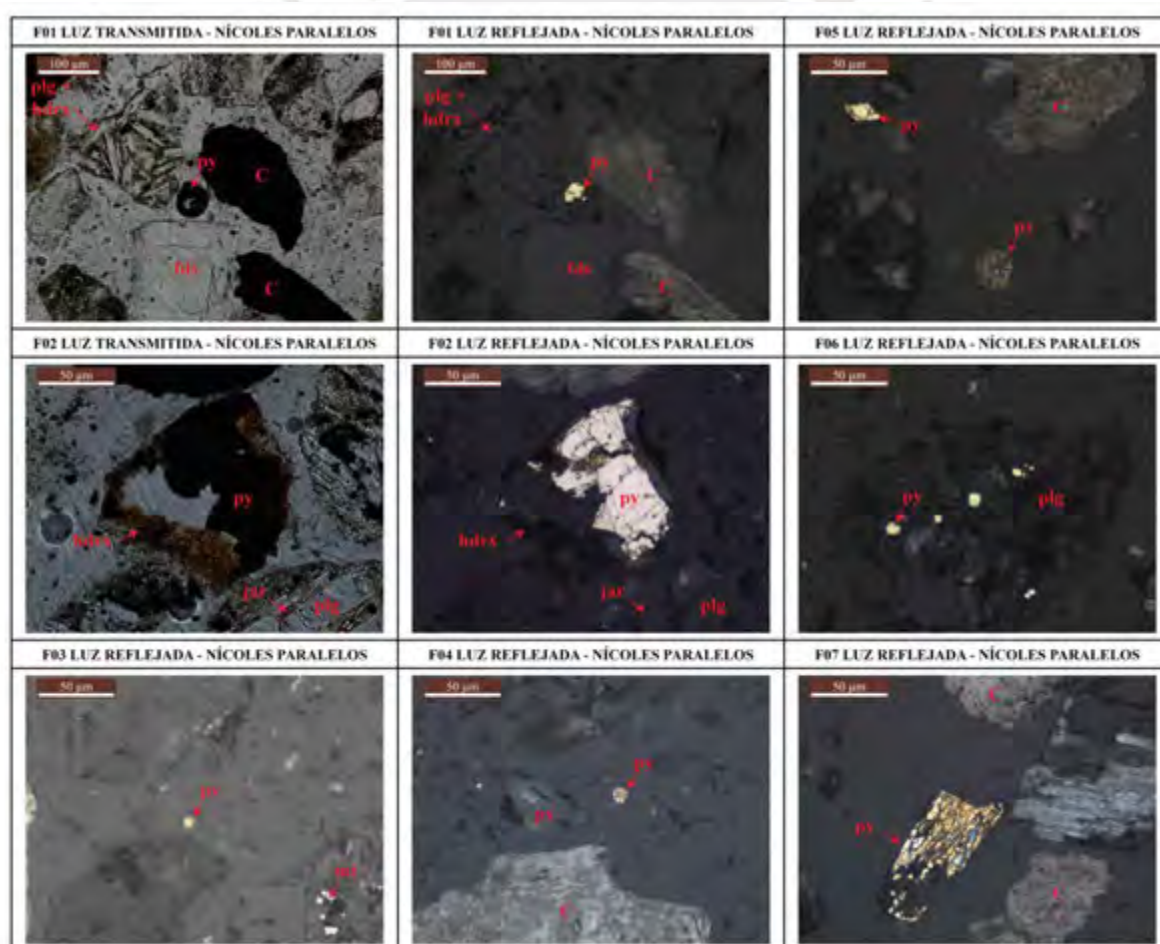
En esta muestra la cantidad de restos orgánicos es moderada (3/5), compuestos mayoritariamente por fragmentos de algas silíceas, aunque se encontraron organismos con valvas silíceas cubiertos por óxidos. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5), aunque se encontró un único clúster alineado con valvas silíceas. La pirita primaria se encuentra altamente fracturada y posee bordes irregulares producto de la acidez. La mineralogía restante se compone plagioclasa (aislada y dentro de litoclastos) con jarosita en los planos de fractura, cuarzo aislado, piroxenos y cloritas. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



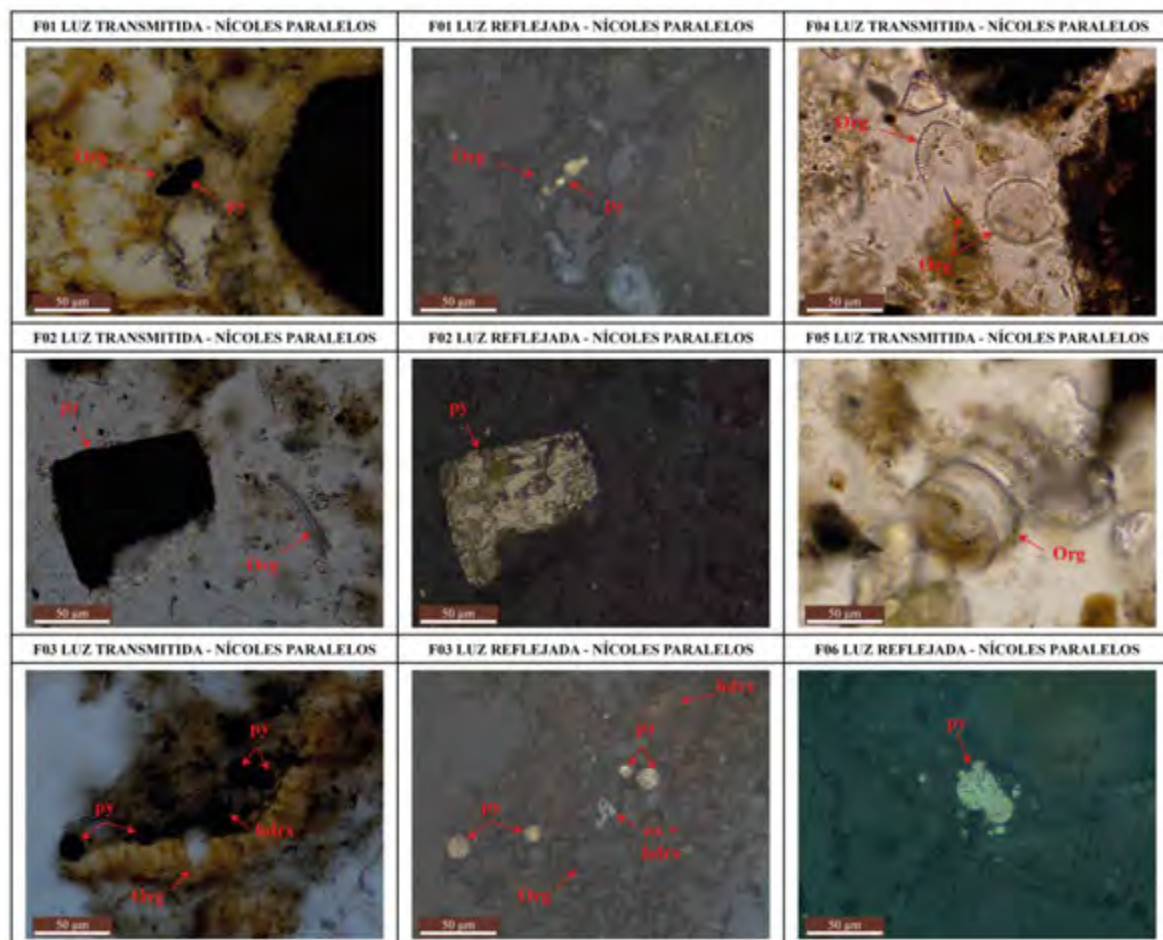
En esta muestra la cantidad de restos orgánicos es moderada (3/5), destacando las diatomeas discoidales, aunque también se observaron organismos con valvas silíceas cubiertos por óxidos, organismos carbonatados y organismos alargados con una estructura tubular interna. Tanto la pirita primaria como la frambooidal son escasas (1/5), encontrándose contados clústeres de framboides dentro de materia orgánica. La mineralogía restante está conformada por cristales aislados de plagioclasa (con jarosita en los planos de fractura), cuarzo, carbonatos con bordes irregulares, cloritas, anfíboles, epidota, magnetita martitizada, serpentina, glauconita y biotita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



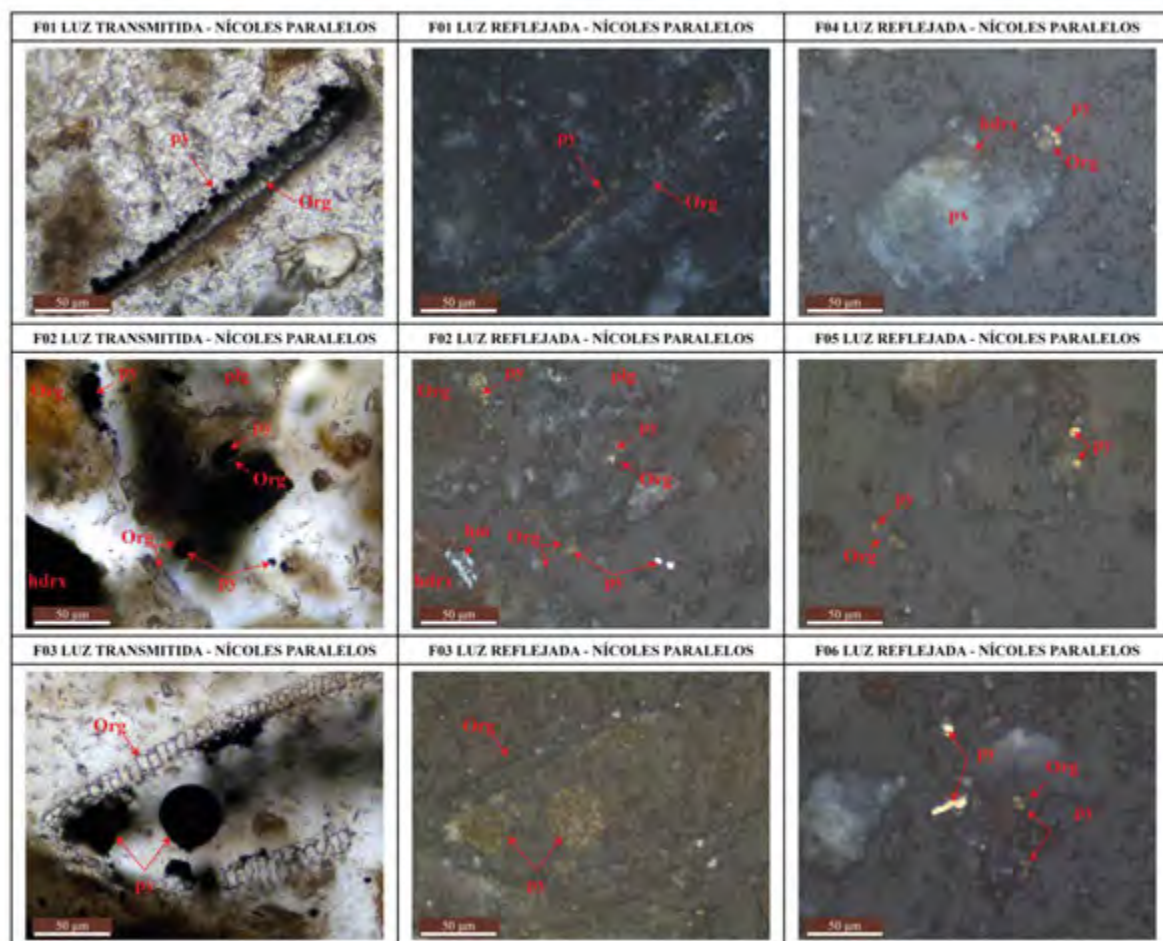
En esta muestra se observó cantidades moderadas de restos orgánicos (3/5), destacando las diatomeas. La pirita primaria es poco abundante (2/5) y presenta bordes irregulares producto de la acidez, mientras la framboidal (2/5) se presenta principalmente como framboides aislados y escasamente como clústeres dentro de materia orgánica. La mineralogía restante se compone de plagioclasa (con jarosita en los planos de fractura), cuarzo, carbonatos que reemplazan plagioclasas, epidota, anfíboles, ortopiroxenos, óxidos de manganeso, hematita y magnetita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas, mientras que las impregnaciones de hidróxidos de hierro son muy escasas (niveles de traza).



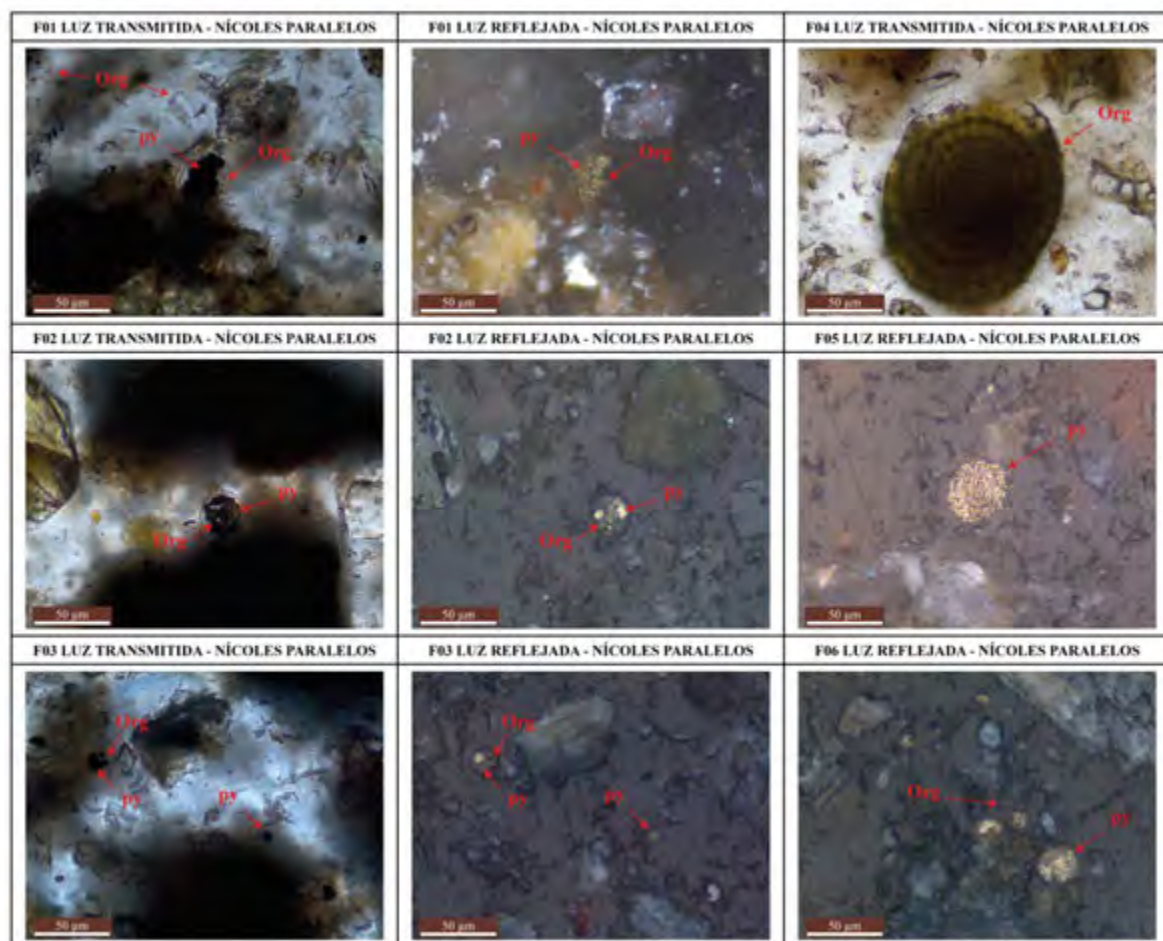
En esta muestra los restos orgánicos son abundantes (4/5), compuestos principalmente por diatomeas, aunque se observaron organismos con valvas silíceas cubiertos por óxidos. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras la cantidad de pirita framboidal es moderada (3/5) y está asociada espacialmente a la materia orgánica. La mineralogía restante está compuesta de litoclastos (compuesto de feldespatos, cuarzo y epidota), anfíboles ligeramente cloritizados, epidota, cloritas, magnetita martitizada, jarosita (en los planos de fracturas de plagioclasas), glauconita, piroxenos, óxidos de manganeso, serpentina y agregados de hidróxidos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.



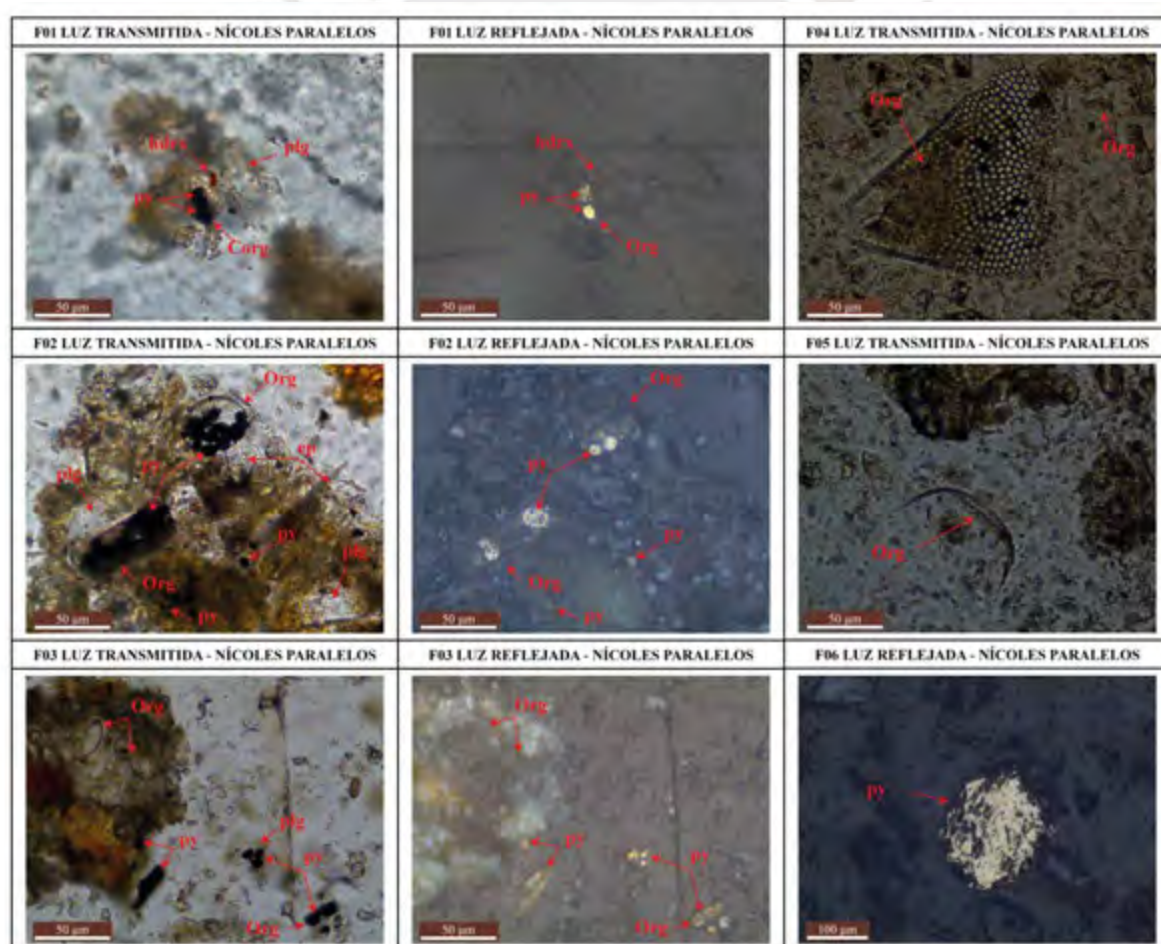
En esta la cantidad de restos orgánicos es moderada (3/5), destacando las diatomeas ovoides dentro de litoclastos. La pirita primaria es escasa (1/5) y, si bien la framboidal es poco abundante (2/5), se observó que los clústeres poseen numerosos framboides cuya disposición y tamaño es controlado por los restos orgánicos. La mineralogía restante se compone de cuarzo, plagioclasa (tanto aislada como cementada por hidróxidos), epidota, anfíboles ligeramente cloritizados, glauconita, hematita, magnetita y piroxenos (posiblemente augita). Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



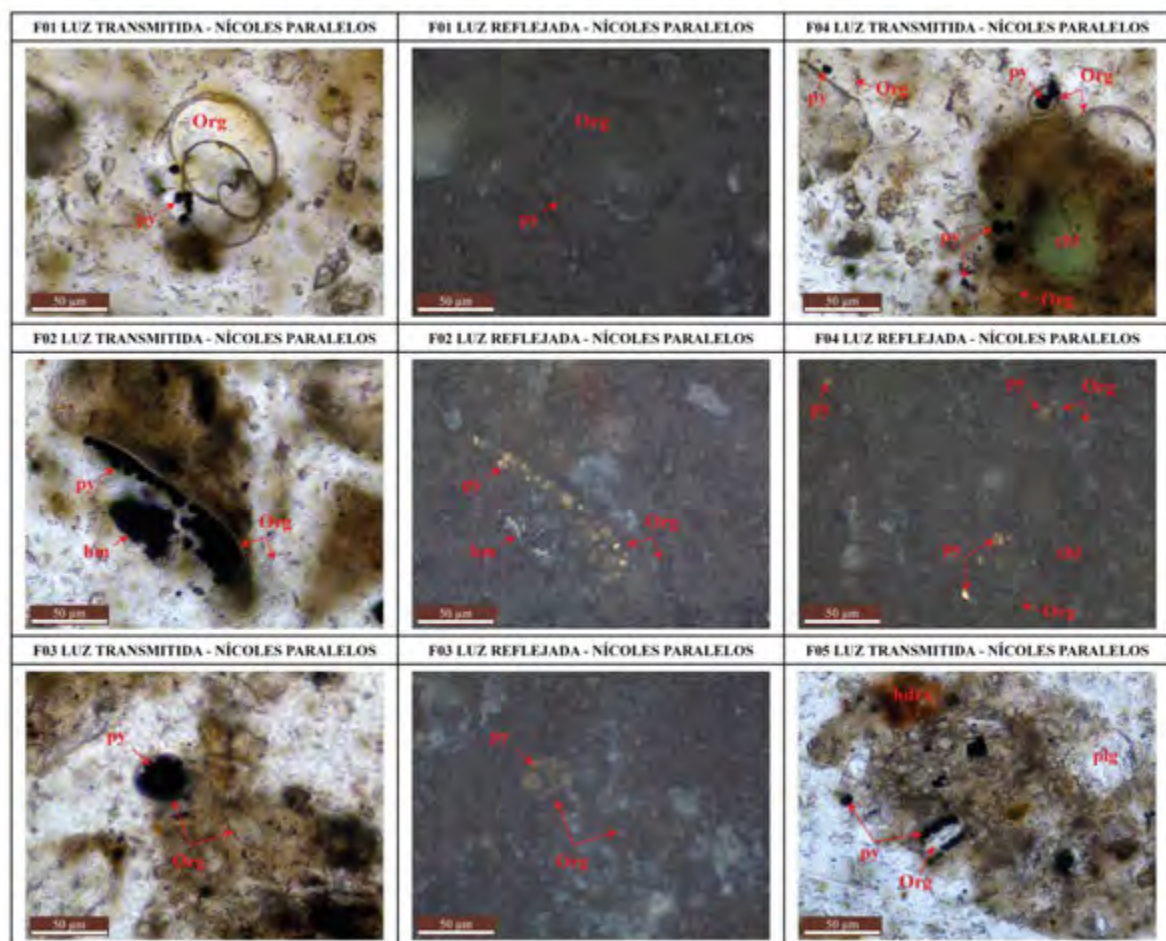
En esta muestra los restos de materia orgánica poco abundantes (2/5), primando las diatomeas, aunque también se observaron organismos carbonatados. La pirita primaria es escasa (1/5), mientras que la framboidal se encuentra en concentraciones moderadas (3/5), presentándose en clústeres dentro de materia orgánica. La mineralogía restante está conformada por feldespatos, cuarzo, anfíboles, magnetita martitizada, agregados de hidróxidos, magnetita martitizada y óxidos de manganeso. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.



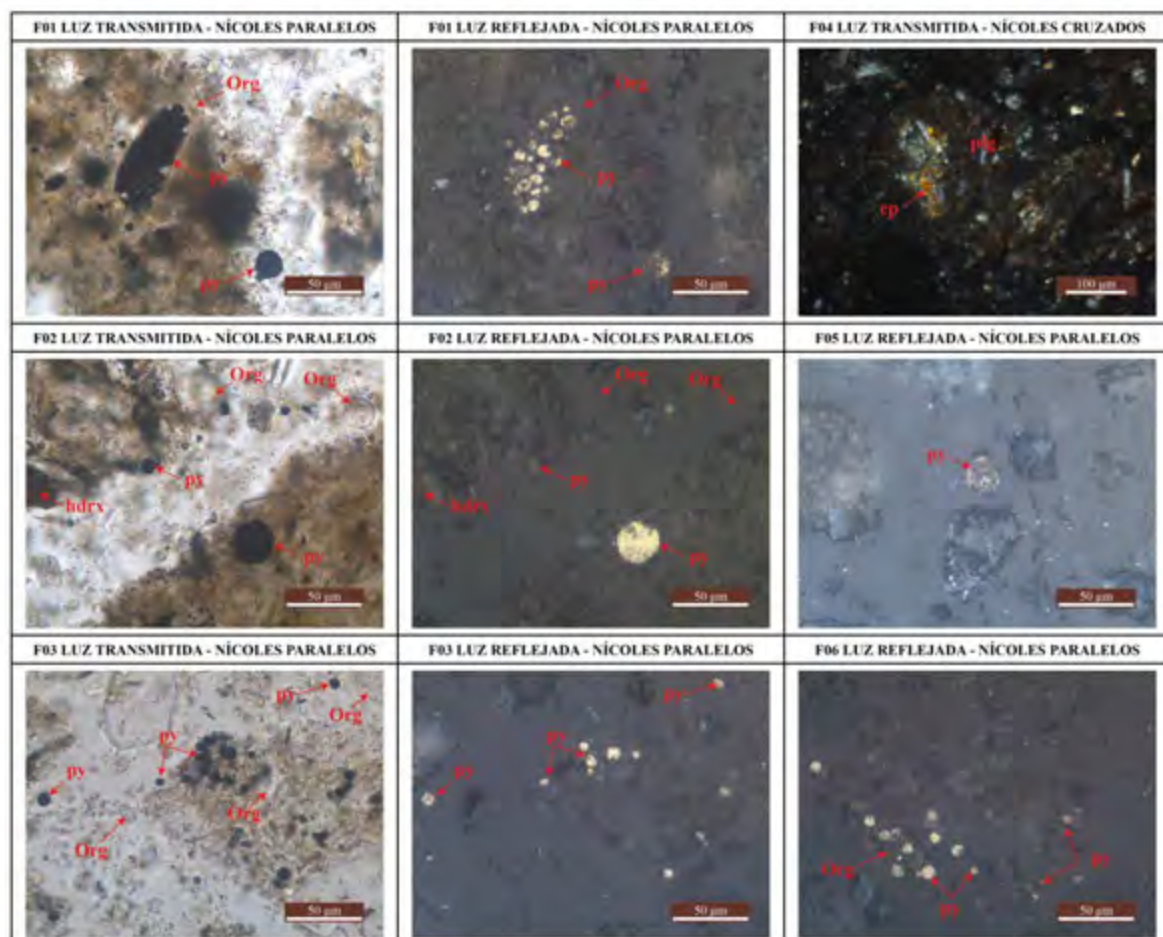
En esta muestra se encontraron altas concentraciones de restos orgánicos (5/5), encontrándose diatomeas discoidales, triangulares y conformas de medialuna. La pirita primaria es escasa (1/5), mientras que la framboidal es abundante (4/5), encontrándose numerosos clústeres de framboides dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante está conformada por litoclastos de cuarzo y plagioclasa (reemplazada por carbonatos), epidota, magnetita martitizada, hematita, agregados de hidróxidos, anfíboles cloritizados, piroxenos, cloritas, glauconita y serpentina. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas y en menor cantidad de hidróxidos de hierro.



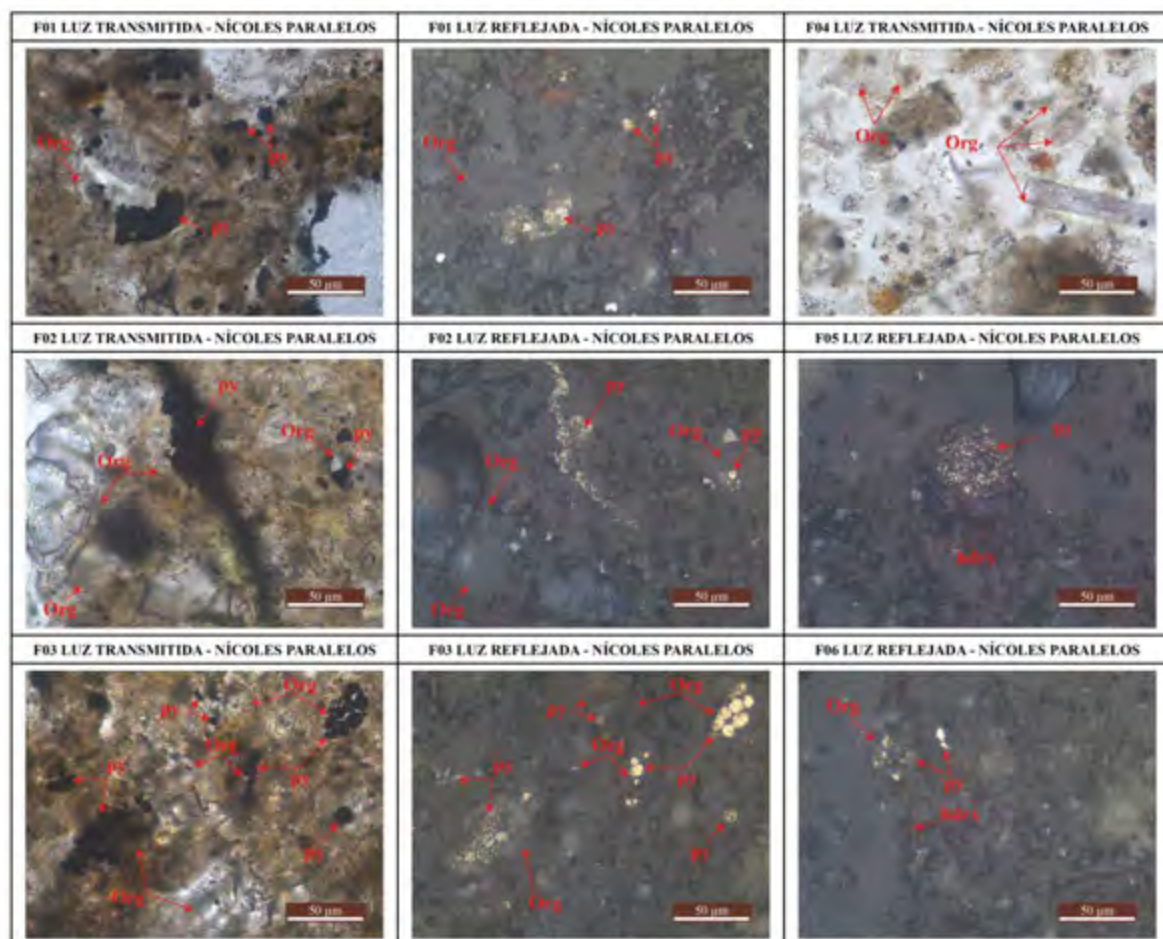
En esta muestra se encontraron abundantes restos orgánicos (4/5), principalmente compuestos por diatomeas ovoides dentro de litoclastos e incluso gasterópodos. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la pirita framboidal es abundante (4/5), encontrándose dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante se compone de cuarzo, feldespatos, anfíboles cloritizados, epidota, cloritas, piroxenos, óxidos de manganeso, magnetita y serpentina. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



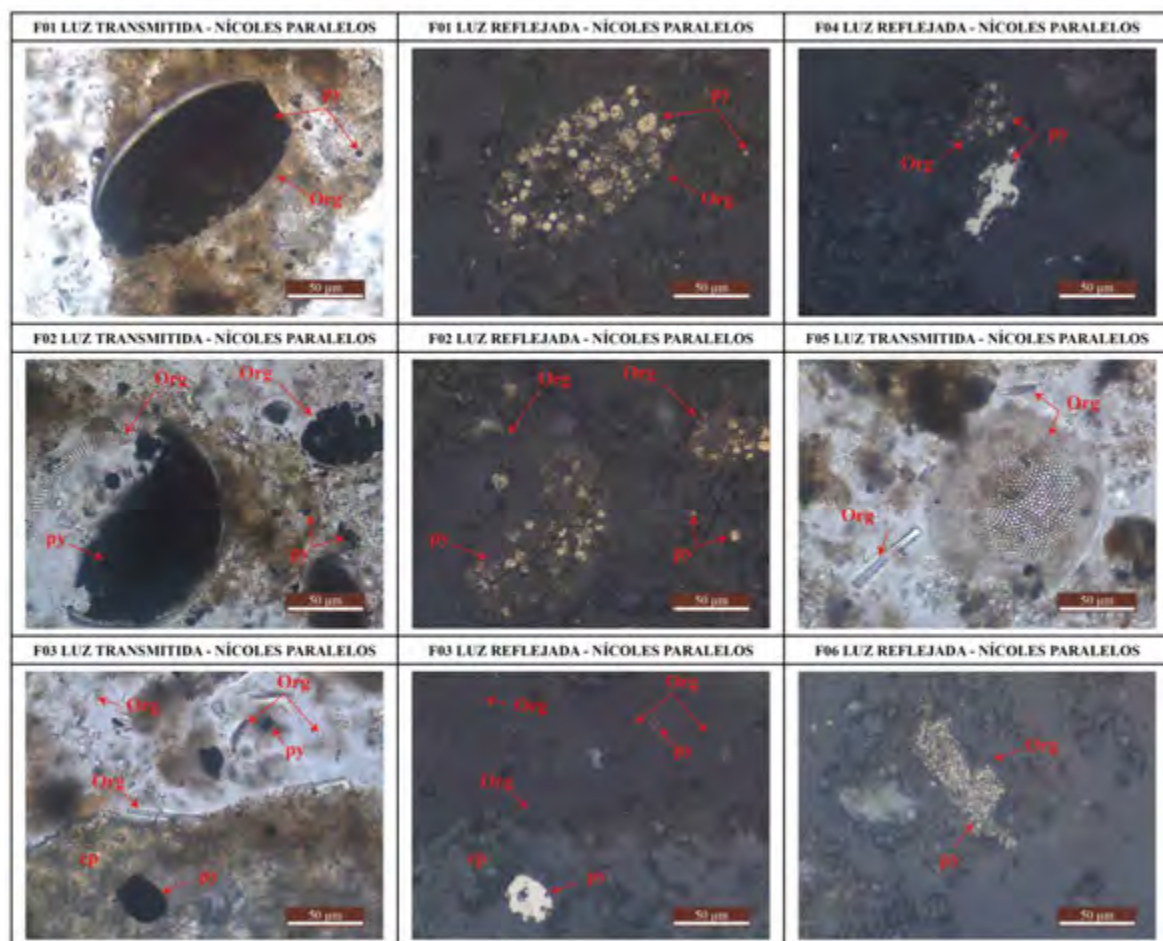
En esta muestra se encontraron altas concentraciones de restos orgánicos (5/5), encontrándose restos orgánicos ovoides, diatomeas discoidales y organismos alargados con una estructura tubular interna. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la framboidal es abundante (4/5), encontrándose clústeres de framboides dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante está conformada por litoclastos de cuarzo y plagioclasa (reemplazada por carbonatos y epidota), glauconita, moldes de anfíboles cloritizados e impregnaciones de óxidos de hierro y arcillas. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



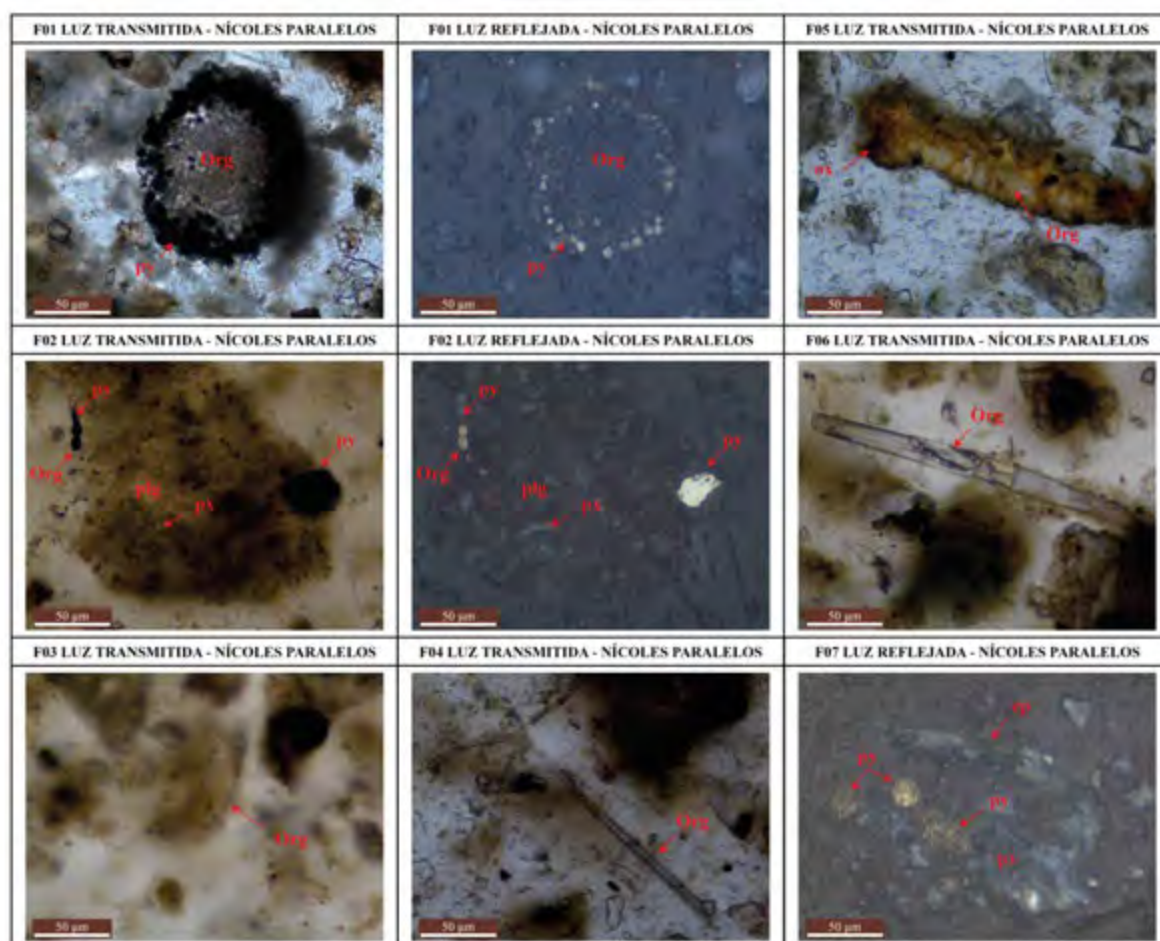
En esta muestra se encontraron altas concentraciones de restos orgánicos (5/5), principalmente compuestos por diatomeas ovoides y discoidales, organismos alargados con una estructura tubular interna y restos alargados de algas. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la pirita framboidal es abundante (4/5), rellenando cavidades de restos orgánicos. La mineralogía restante se compone de cuarzo, feldespatos, anfíboles cloritizados, rutilo cubierto por leucoxeno, epidota, cloritas, carbonatos y hematita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.



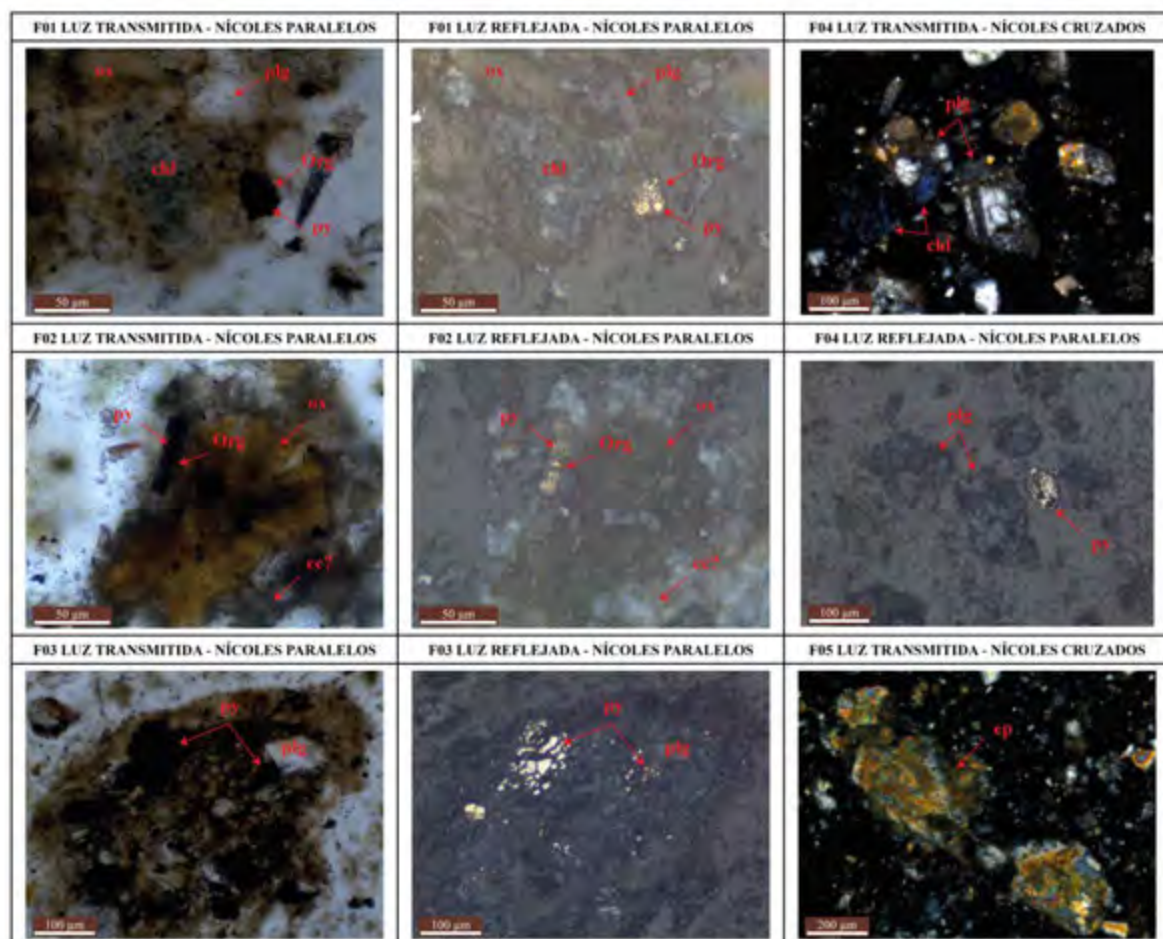
En esta muestra se encontraron altas concentraciones de restos orgánicos (5/5), encontrándose restos diatomeas ovoides y discoidales, organismos alargados con una estructura tubular interna y gasterópodos. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la framboidal es abundante (4/5), encontrándose restos orgánicos con su interior parcial o totalmente llenado por clústeres de framboides. La mineralogía restante está conformada por litoclastos de cuarzo y plagioclasa, carbonatos y moldes de anfíboles cloritizados. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



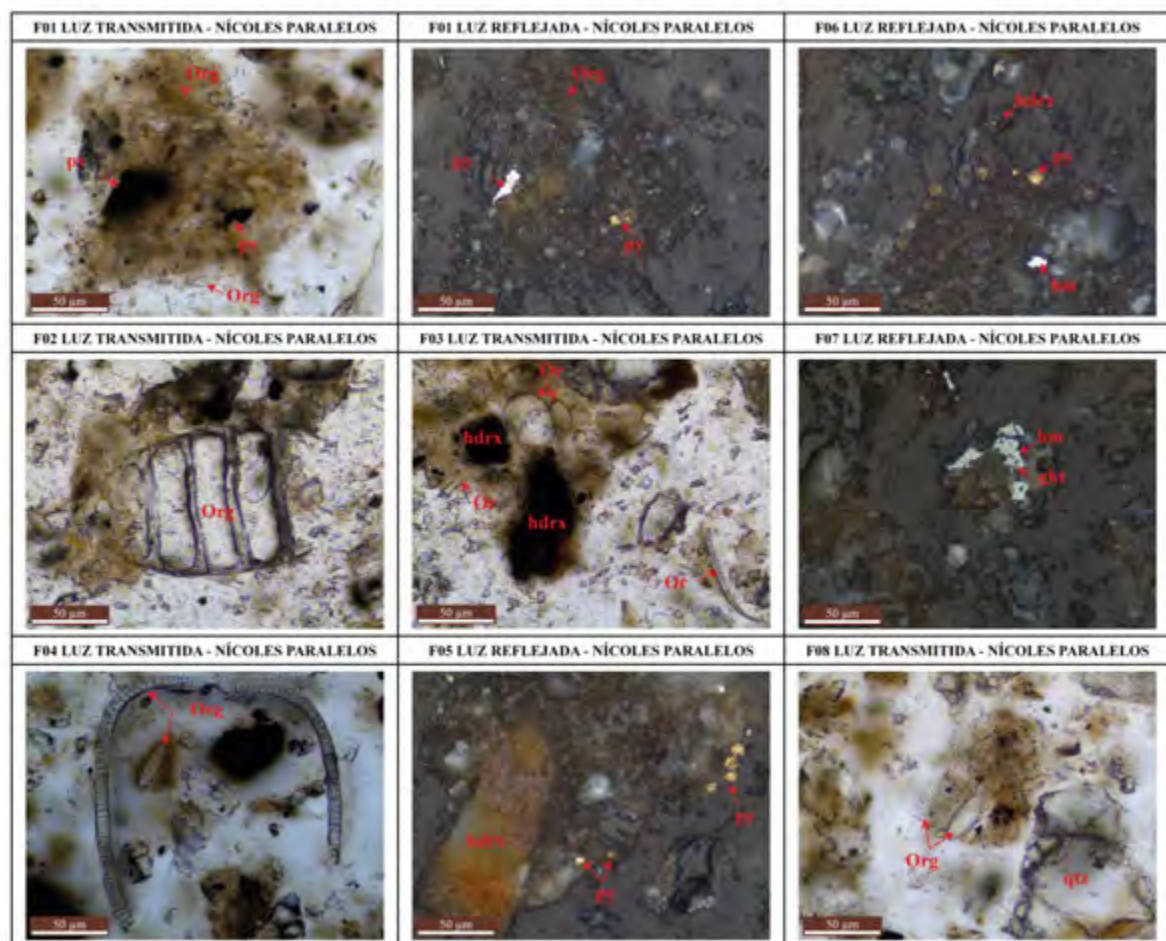
En esta muestra los restos orgánicos son poco abundantes (2/5), destacando los organismos alargados con una estructura tubular interna, aunque también se encontraron fragmentos de diatomeas, organismos carbonatados discoidales y organismos con valvas silíceas cubiertos por óxidos. Las concentraciones de pirita primaria son altas (5/5), mientras que la framboidal es escasa (1/5), encontrándose mayormente framboides aislados (con excepciones relacionadas a restos orgánicos). La mineralogía predominante se compone de plagioclasa (tanto aislada como cementada por hidróxidos), litoclastos de cuarzo impregnados de carbonatos, anfíboles cloritizados, piroxenos, epidota, carbonatos, glauconita, magnetita martitizada, hematita y agregados de hidróxidos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



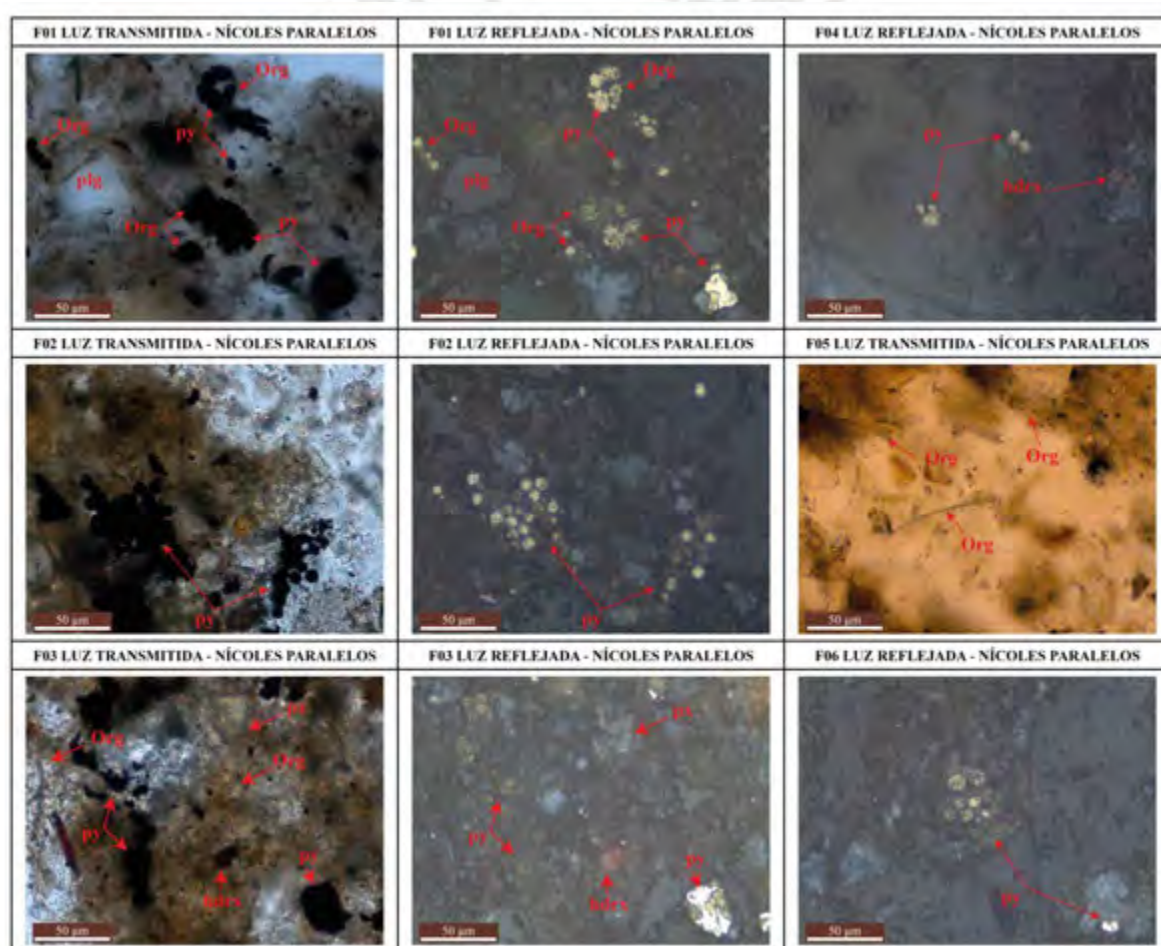
En esta muestra la cantidad de restos orgánicos es moderada (3/5), destacando los organismos alargados con estructura tubular interna, aunque también se encontraron diatomeas y foraminíferos. Las concentraciones de pirita primaria son altas (5/5), mientras que la pirita framboidal es escasa (1/5), cuyos clústeres están relacionados a los restos orgánicos. La mineralogía restante está conformada por litoclastos de feldespatos, cuarzo y epidota, carbonatos, anfíboles cloritizados, hematita, cloritas, piroxenos y glauconita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.



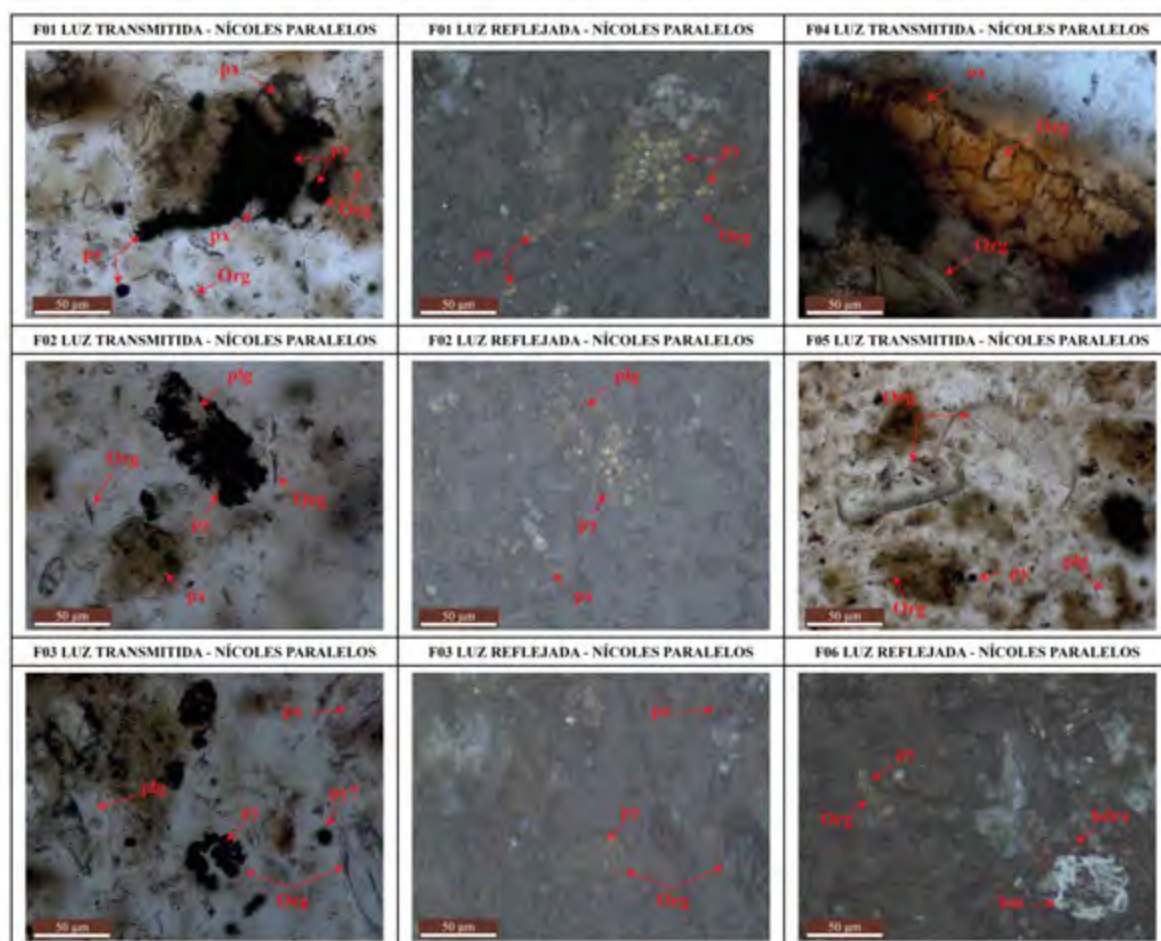
En esta muestra los restos orgánicos son poco abundantes (2/5), con distintas variedades de diatomeas e inclusive gasterópodos. La cantidad de pirita primaria es moderada (3/5), mientras que la framboidal es escasa (1/5). Si bien los clústeres de framboides son más frecuentes en los litoclastos con materia orgánica, estos se encuentran mayoritariamente en los bordes exteriores. La mineralogía restante se compone de cuarzo (aislado o como sub granos), feldespatos, carbonatos, piroxenos, anfíboles, magnetita martitizada, leucoxeno y cloritas. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



En esta muestra los restos orgánicos son abundantes (4/5) y están conformados principalmente por diatomeas. La concentración de pirita primaria es alta (5/5), mientras que la pirita framboidal es poco abundante (2/5), aunque los clústeres poseen abundantes framboides y se encuentran relacionados a materia orgánica. La mineralogía restante está compuesta por litoclastos de cuarzo, feldespatos y pirita primaria, epidota, anfíboles cloritizados, cloritas, magnetita martitizada, carbonatos, piroxenos y glauconita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.

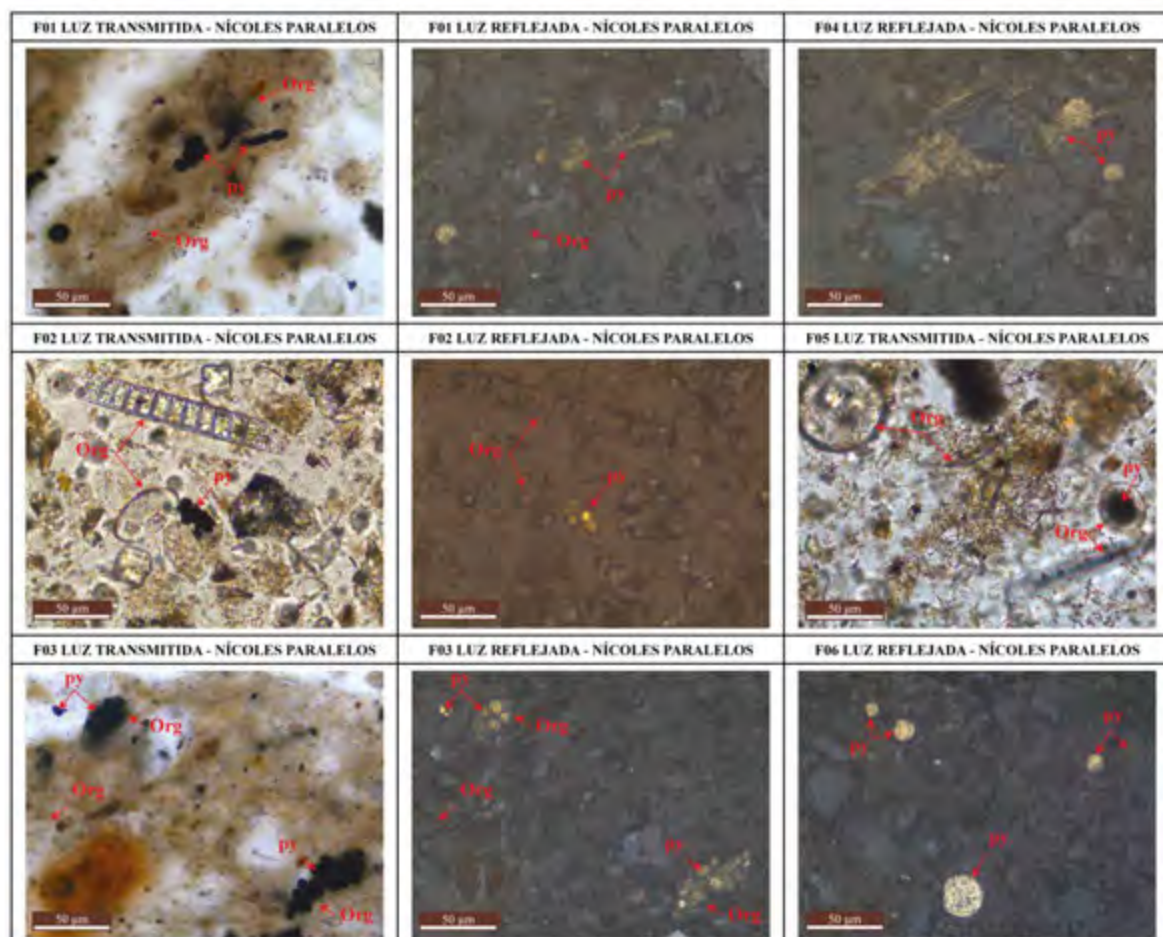


La concentración de restos orgánicos en la muestra es moderada (3/5), destacando las diatomeas, aunque se encontraron organismos con valvas silíceas cubiertos por óxidos. La pirita primaria es escasa (1/5), mientras que la framboidal se encuentra en cantidades moderadas (3/5), aunque los clústeres poseen abundantes framboides y se encuentran dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante se compone de plagioclasa (ocasionalmente cementada por hidróxidos), cuarzo, anfíboles, cloritas, epidota, magnetitas, agregados de hidróxidos y glauconita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.

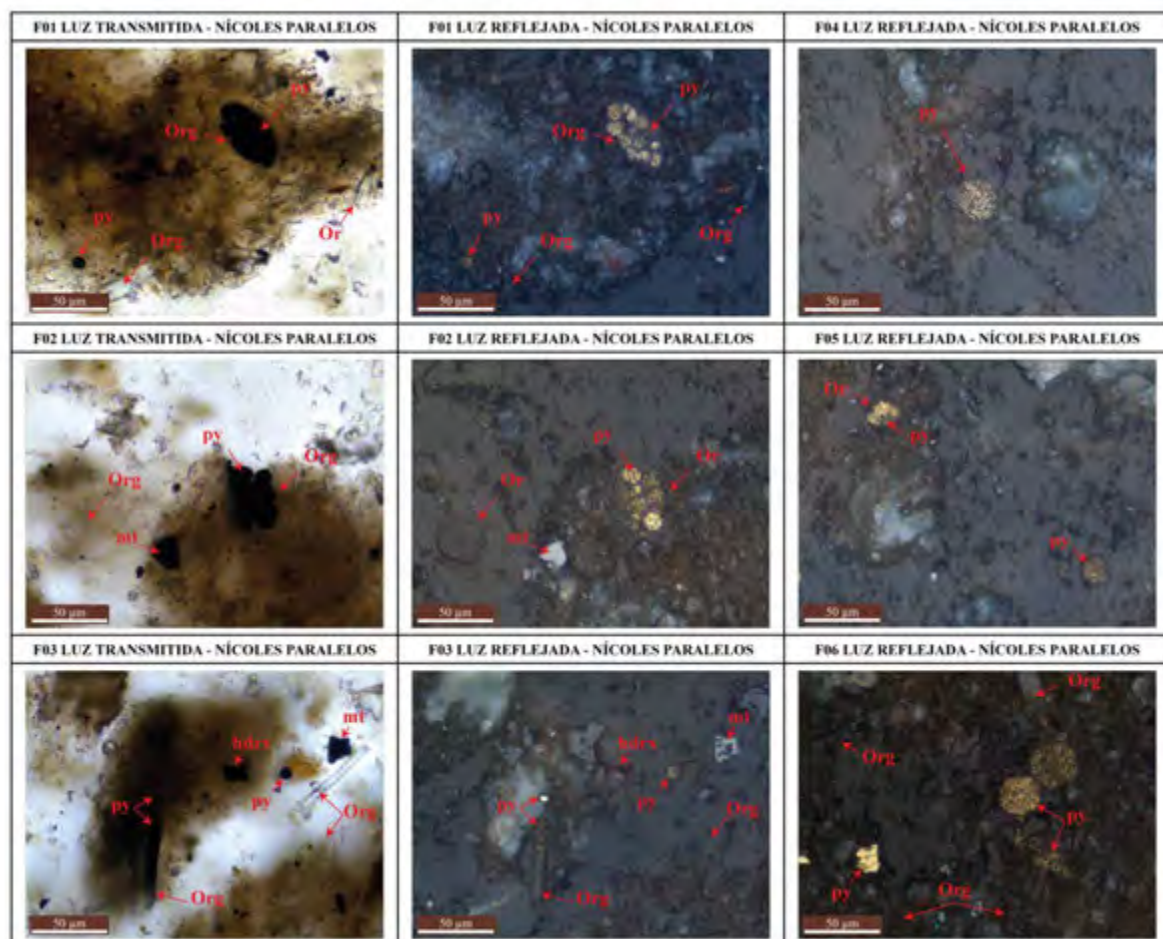


AC3/G50

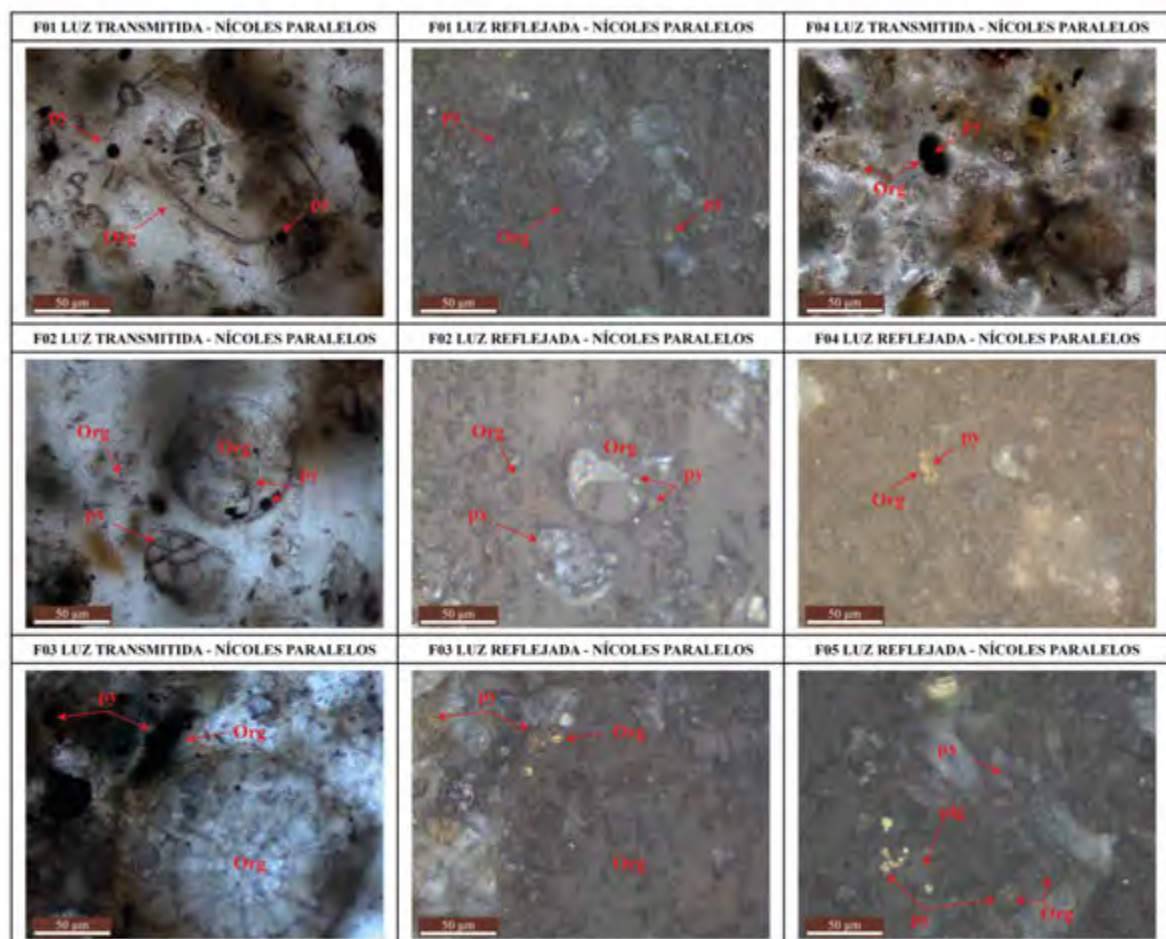
En esta muestra la concentración de restos orgánicos es elevada (5/5) y se componen de distintas variedades de diatomeas, aunque también se encontraron organismos con valvas silíceas cubiertos por óxidos. La pirita primaria es escasa (1/5), mientras que la framboidal se encuentra en concentraciones moderadas (3/5), comúnmente en clústeres con abundantes framboides dentro de materia orgánica. La mineralogía restante está conformada por feldespatos, cuarzo, carbonatos con bordes irregulares, epidota, clorita y glauconita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en similar proporción.



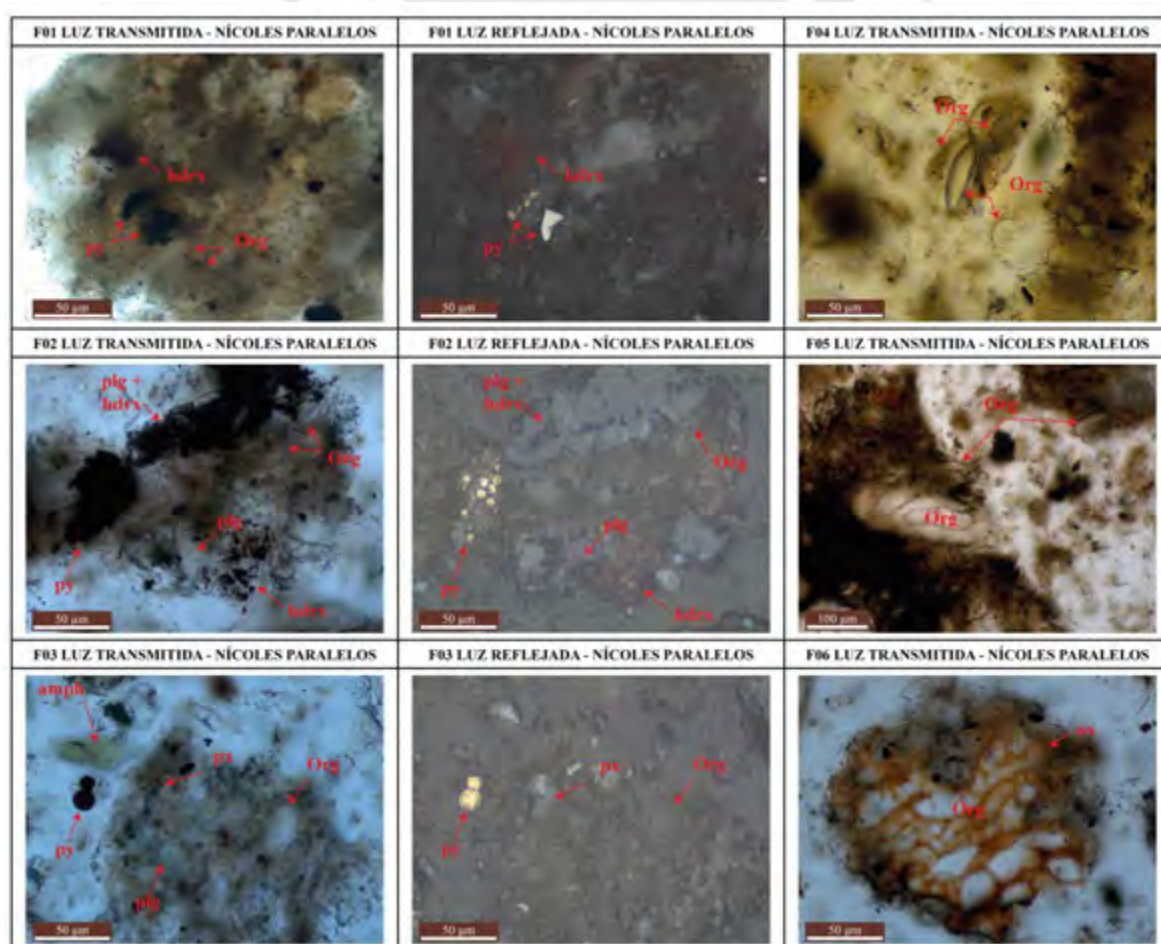
En esta muestra los restos orgánicos son abundantes (4/5), primando los organismos alargados con una estructura tubular interna por sobre las diatomeas ovoides. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la cantidad de pirita framboidal es moderada (3/5), formando clústeres dentro de restos orgánicos. La mineralogía restante se compone de feldespatos, cuarzo, magnetita martitizada, hematita, óxidos de manganeso, carbonatos y agregados de hidróxidos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.



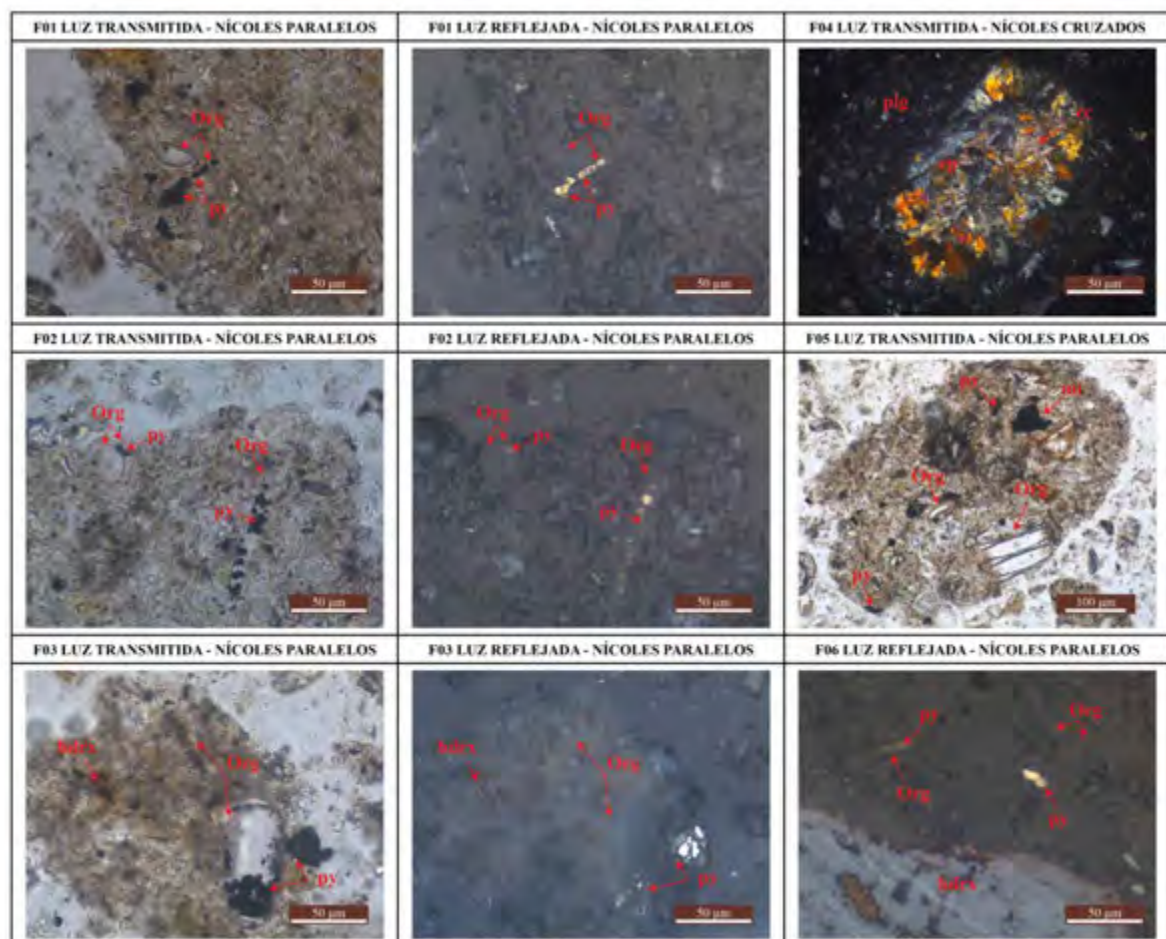
En esta muestra se encontraron abundantes restos orgánicos (4/5), destacando los organismos alargados con una estructura tubular interna y diversas variedades de diatomeas. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la framboidal es abundante (4/5), asociada espacialmente a restos orgánicos. La mineralogía restante está compuesta de cuarzo, feldespatos, epidota, piroxenos, magnetita y agregados de hidróxidos. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de hidróxidos de hierro y en menor cantidad de arcillas.



En esta muestra la cantidad de materia orgánica es moderada (3/5), destacando los organismos alargados con una estructura tubular interna sobre las diatomeas y organismos con valvas silíceas cubiertos de óxidos. La pirita primaria es poco abundante (2/5), mientras que la secundaria es escasa (1/5), encontrándose principalmente dentro de materia orgánica. La mineralogía se compone de litoclastos de cuarzo y feldespatos, anfíboles, magnetita martitizada, hematita, cloritas, epidota, carbonatos, agregados de hidróxidos, glauconita y biotita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados principalmente de arcillas y en menor cantidad de hidróxidos de hierro.



En esta muestra se encontraron cantidades moderadas de restos orgánicos (3/5), destacando restos orgánicos ovoides y organismos alargados con una estructura tubular interna. La pirita primaria es escasa (1/5) mientras que la framboidal es poco abundante (2/5), asociada espacialmente a restos orgánicos. La mineralogía restante está compuesta de cuarzo, feldespatos, epidota, moldes de anfíboles, glauconita, jarosita, leucoxeno e impregnaciones de arcillas, hidróxidos y jarosita. Los litoclastos y minerales se encuentran impregnados de arcillas e hidróxidos de hierro en proporciones similares.



BE/15cm

En esta muestra de control no se encontraron restos orgánicos de ningún tipo. La pirita es muy escasa en la muestra; únicamente se encontraron 3 cristales aislados de pirita primaria y dos framboides en un litoclasto. A diferencia de las muestras adquiridas en ensenada Ezcurra, los carbonatos libres son escasos, mientras que la epidota no está presente. Por otro lado, el contenido de cuarzo y feldespato potásico aumenta considerablemente. Finalmente, la mineralogía se completa con anfíboles levemente cloritizados, magnetita ligeramente martitizada y piroxenos. A diferencia de las muestras de caleta Cardozo, el contenido de finos (partículas tamaño limo y arcilla) se encontró en niveles de trazas.

