

Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas

Trabajo Final de Licenciatura

**REACTIVIDAD ÁLCALI SÍLICE (RAS) EN HORMIGÓN DE
LOS DEPOSITOS PLIO-PLEISTOCENOS ACTUALES, CUENCA
BAJA DEL PLATA, ARGENTINA.**



Autora: Magaly Quintrein

Director: Adrián Silva Busso

Co-Director: José Salminci

2024

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	4
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
Objetivos	5
Reacción álcali agregado	5
Ubicación y accesos	7
Metodología	8
REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE (RAS)	15
Factores que influyen en la RAS	18
Agregados reactivos	18
Contenido de álcalis	20
Humedad	21
Producto de la RAS	21
Formación del gel	21
Antecedentes	23
Normativa Nacional	29
IRAM 1512 (2013): Agregado. Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos.	29
IRAM 1531 (2022): Agregado. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos.	30
IRAM 1649 (2008): Examen petrográfico de agregados para hormigón	31
IRAM 1674 (1997): Agregado. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.	32
CAPITULO 2: MARCO GEOLÓGICO	35
ANTECEDENTES DE LA GEOLOGÍA REGIONAL	35
ESTRATIGRAFÍA	36
Precámbrico	38
Paleoproterozoico	38
Mesozoico	38
Jurásico	38
Jurásico-Cretácico	39
Cenozoico	39
Paleógeno	39

Neógeno	40
Neógeno - Cuaternario.....	44
Cuaternario	45
Holoceno	48
GEOMORFOLOGÍA.....	49
EVOLUCIÓN GEOLÓGICA.....	52
CAPITULO 3: RESULTADOS	53
Análisis de la calcedonia ante la RAS	53
Desempeño de arenas silíceas de las Facies Fluviales Actuales del lecho del Río Paraná, entre el kilómetro 632 y el kilómetro 230.	56
CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFIA.....	65
ANEXOS.....	79
Anexo 1: Perfiles estratigráficos en canteras	79
Perfil FC-Aldea Brasilera	79
Perfil CV-Paraná	83
Perfil FC-Colón:.....	86
Anexo 2: Examen petrográfico	88
Anexo 2.A: Petrografía canto rodado Colón	88
Anexo 2.B: Petrografía de las Formaciones Paraná e Ituzaingó.....	91
Formación Paraná	91
Formación Ituzaingó.....	92
Anexo 3: Areneras y canteras relevadas.	95

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

RESUMEN

El presente trabajo de licenciatura aborda como principal temática la reactividad álcali-sílice (RAS) de ciertos minerales en agregados utilizados para el hormigón. Materiales como el cuarzo microcristalino, cuarzo deformado, calcedonia, ópalo, tridimita, cristobalita y vidrio volcánico, pueden causar fracturas y geles en presencia de humedad y álcalis.

El estudio se llevó a cabo en la Cuenca baja del Plata, provincia de Entre Ríos, dentro de la Cuenca Chacoparanense donde se realizaron trabajos de levantamiento geológico y muestreo de sedimentos fluviales a lo largo de 400 Km en ámbito del río Paraná.

Mediante el análisis de muestras de agregados, realizados en el laboratorio del Departamento de Geología y Medioambiente del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) se determinó, por un lado, el límite máximo admisible de calcedonia que es el mineral potencialmente reactivo principal de las muestras analizadas y por el otro, la reacción álcali sílice (RAS) de los agregados naturales obtenidos a distintas latitudes de la sección del río estudiada.

Para ello se realizaron ensayos bajo normativa nacional (IRAM) y mediante la conformación de muestras de agregado con diferentes dosificaciones de calcedonia. Los resultados indican que este mineral es reactivo a partir de un contenido del 3%, y se identificó un efecto pessimum a los 5,9% de calcedonia.

Los resultados son un aporte sobre el comportamiento general de los agregados entrerrianos frente a la RAS y sobre los límites máximos admisibles de minerales potencialmente reactivos que deberían considerarse para el desarrollo normativo, en este sentido, los resultados sugieren la revisión de los límites normativos para la calcedonia.

Palabras clave: reactividad álcali-sílice, calcedonia, ensayo de barra de mortero, normativas IRAM.

INTRODUCCIÓN

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo contribuir al conocimiento referente a la reacción álcali sílice mediante la evaluación del desempeño de distintas muestras de agregado, proveniente de canteras y areneras de las provincias de Entre Ríos, Santa Fe y Buenos Aires, en Argentina. Por ello, se realizaron ensayos físicos conforme las normas IRAM 1512 (2013) e IRAM 1531 (2022) y se estableció el límite máximo admisible de la calcedonia presente en los distintos agregados.

Reacción álcali agregado

El hormigón es una mezcla de materiales constituida por agregados pétreos, cemento y agua, a la que se le pueden añadir aditivos químicos suplementarios. Estos componentes se combinan químicamente a través de un proceso denominado hidratación, lo que resulta en el fraguado del hormigón y su endurecimiento gradual (Giovambattista et al. 1981; Traversa, 2004, 2012). Los agregados, o áridos, para la incorporación en el hormigón provienen tanto de depósitos naturales como por la trituración de rocas de forma artificial. Según el tamaño de las partículas, se clasifican como agregado grueso (mayores a 4,75 mm) o agregado fino (menores a 4,75 mm).

En presencia de humedad, ciertos minerales presentes en los agregados pueden reaccionar químicamente con los iones (OH) y álcalis (Ca, Na y K) contenidos en la solución dentro de los poros del mortero u hormigón. Esta interacción da lugar a lo que se conoce como reacción álcali agregado (RAA).

La manifestación de esta reacción en una estructura de hormigón tiene efectos nocivos no deseados, tales como deformaciones excesivas, formación de geles expansivos, fisuras, grietas y fracturas, entre otros. El gel se expande dependiendo de factores como la humedad y la temperatura en el interior del hormigón; esta expansión puede generar microfisuras en la estructura (tanto en la matriz como en el agregado), que tienden a interconectarse a medida que crecen. Como resultado, se reduce la vida útil (o prestación de servicio) del hormigón debido a la disminución en su resistencia y al aumento de la permeabilidad en la estructura (Chen et al., 2010; Gadea et al., 2010). Por estas razones, la RAA es considerada el segundo problema relacionado a la durabilidad y deterioro del hormigón, luego de la corrosión de las armaduras, a nivel mundial, especialmente en infraestructuras civiles como puentes, pavimentos, fundaciones y represas (Fanijo et al., 2021; Sims y Poole, 2017; Vila et al., 2022).

Según la composición mineralógica del o de los minerales reactivos presentes en el agregado, se clasifica a la reacción en:

- a) reacción álcali-carbonato (RAC), es causada en agregados dolomíticos o con compuestos carbonáticos.
- b) reacción álcali-sílice (RAS), se produce en agregados que contienen sílice metaestable como ópalo, tridimita, cristobalita, vidrio volcánico, calcedonia, cuarzo microcristalino y/o fuertemente tensionado.

Para que se desencadene la RAS deben combinarse simultáneamente varios factores: una concentración mínima de iones alcalinos en el fluido de los poros, presencia de un agregado reactivo con contenido de sílice metaestable y alto nivel de humedad relativa (Fanijo et al., 2021; Zoilo et al., 2013). Si bien, existen otros factores que influyen en la velocidad y magnitud de expansión como la temperatura, granulometría, mineralogía, naturaleza, textura y tamaño del agregado, área de la superficie específica del material, presión de confinamiento y la contribución del material alcalino exterior, estos no son considerados los principales desencadenantes de la reacción (Fernández Canovas, 1991; Lindgård et al., 2012; Prizskulnik, 2005).

La RAS en estructuras de hormigón ha emergido como un tema de creciente interés para la comunidad científica e ingenieril a nivel mundial (Trent, 2018). Durante más de 80 años, se han documentado y analizado casos de deterioro en diversos países. En ese contexto, se han llevado a cabo numerosos ensayos sobre las rocas, morteros u hormigón con el objetivo de identificar los constituyentes que, al ser expuestos a una solución alcalina, generan reacciones deletéreas en las estructuras. Asimismo, se han buscado las condiciones óptimas para evaluar el comportamiento en cada tipo de agregado mediante la utilización de métodos seguros y eficientes.

Entre las técnicas empleadas para identificar y cuantificar los componentes reactivos en el agregado se encuentran: estudio petrográfico (norma IRAM 1649), método acelerado de barra de mortero (norma IRAM 1674), ensayo de prisma de hormigón (norma IRAM 1700) y métodos químicos. Estas metodologías han sido normalizadas en varios países y, a partir de investigaciones y observaciones en el campo, se han ido modificando. Algunas modificaciones incluyen cambios de la temperatura, el tamaño de probetas o morteros, el tiempo de ensayo y las condiciones de exposición (Milanesi et al, 2021), aunque es importante destacar que uno de los principales problemas con estos ensayos, es que al someter a los agregados a condiciones

extremas y acortar los tiempos de reacción los resultados pueden ser erróneos (Cys y Pouhet, 2015).

En el presente trabajo se ha optado por los análisis mediante el examen petrográfico y el método acelerado de la barra de mortero debido a la capacidad de los laboratorios y el tiempo disponible, dejando para otra etapa de investigación los estudios químicos y de prisma de hormigón. El examen petrográfico permite determinar las características mineralógicas, así como describir y clasificar los constituyentes de la muestra, identificando las cantidades relativas de aquellos componentes potencialmente reactivos o perjudiciales. Esta información es fundamental para su posterior evaluación según el uso al que se destina. Por otro lado, el método acelerado de barra de mortero permite evaluar el desempeño del agregado en un período de 16 días y advertir el grado de reactividad.

Ubicación y accesos

La zona de estudio se encuentra localizada en el Delta del Río Paraná, Cuenca baja del Plata, en la provincia de Entre Ríos. Se extiende entre las coordenadas 31°42'44.03"S – 60°34'7.63"O y 34° 1'33.71"S – 59° 6'43.08"O (Figura 1). En total, se relevaron catorce establecimientos: diez areneras y cuatro canteras (Anexo 3: Areneras y canteras relevadas). Dos de estas canteras se encuentran en el departamento de Colón, allí se extraen canto rodado y arenas de la Formación Ubajay. Las otras dos canteras están ubicadas en Aldea Brasileira e Isla del Ibicuy donde se extraen arenas blanquecinas de la Formación Paraná y depósitos cuaternarios de origen eólico, respectivamente. Las areneras están situadas a lo largo del Río Paraná, entre el kilómetro 532 y el kilómetro 230 del río, donde se extrae áreas de los depósitos de canal actual mediante dragado del lecho.

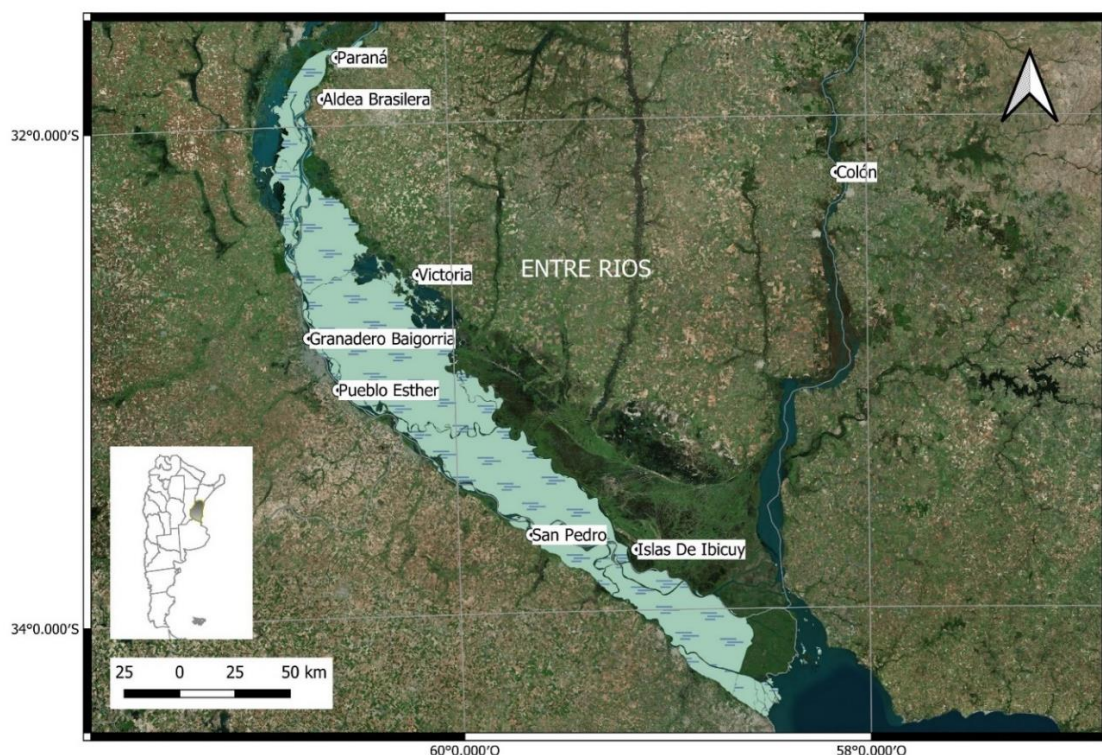


Figura 1: Mapa de ubicación de las zonas de estudio en la provincia de Entre Ríos.

Metodología

La metodología de trabajo se dividió en tres etapas:

Etap 1 -Trabajo de gabinete: consistió en una exhaustiva búsqueda bibliográfica para conocer la información actualizada sobre los fundamentos de la reacción álcali sílice (RAS), los factores que controlan el proceso expansivo, los agregados reactivos y los límites del porcentaje de minerales potencialmente reactivos establecidos. También se estudiaron las técnicas para evaluar la RAS y metodologías normalizadas de estudio. La bibliografía recopilada se complementó con antecedentes técnicos obtenidos de la base de datos del Departamento de Geología y Medioambiente (Dpto. GyM), del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), desde 2012 hasta la fecha. Además, se llevó a cabo una búsqueda de proveedores de áridos en las provincias de Entre Ríos, Santa Fe y Buenos Aires. Finalmente, se recopilaron antecedentes geológicos relevantes de las zonas de estudio, se analizaron imágenes satelitales de Google Earth y se interpretaron a partir del Mapa Geológico de la Provincia de Entre Ríos (Bertolini, 1995), la hoja geológica 3360-IV Gualaguaychú (Pereyra et al. 2002) y diversos trabajos publicados.

Etap 2 - Trabajo de campo: se realizaron dos campañas de campo a distintas canteras y areneras ubicadas en las provincias de Entre Ríos, Santa Fe y Buenos Aires. El trabajo consistió

en el relevamiento de datos, observaciones en el campo y la toma de muestras in situ del frente de explotación y de las pilas de acopio de canteras y areneras. Los puntos de muestreo de cada establecimiento y las muestras de agregado fueron georeferenciados mediante GPS (ver ubicación en Figura 2). En las pilas de acopio, se removió la capa superficial para evitar la segregación del material (Figura 3).

Por otra parte, se extrajeron muestras con altos porcentajes de calcedonia obtenidas de canteras y del margen del río Uruguay en Colón, con la finalidad de poder realizar pruebas con distintos porcentajes de este componente potencialmente reactivo para el hormigón y así obtener el límite máximo admisible.

Finalmente, se realizó un relevamiento y descripción de perfiles estratigráficos (Anexo 2: Perfiles estratigráficos) en los frentes de cantera ubicados en las localidades de Aldea Brasileira (cantera Cristamine), Paraná (Camping Toma Vieja) y Colón (cantera La Chola II), con la finalidad de aportar información sobre algunas áreas de aporte de sedimentos del río Paraná y determinar la mineralogía con enfoque en la presencia de minerales reactivos. Estos corresponden a las Formaciones Paraná, Ituaingó y Ubajay, respectivamente.

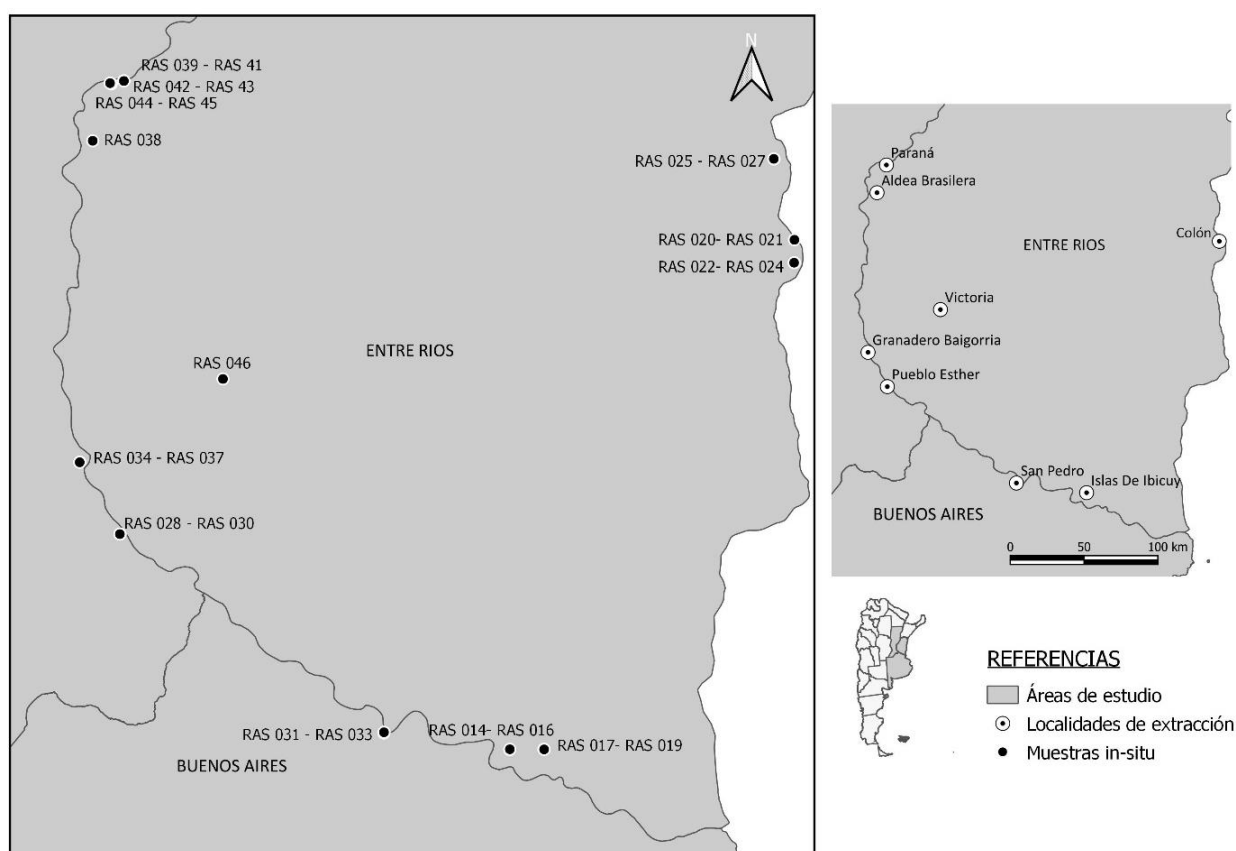


Figura 2: Ubicación de los sitios de muestreo e identificación de las muestras.



Figura 3: Método de extracción in situ de muestras en pilas de acopio.

Etapas 3 - Trabajo de laboratorio: por un lado, se elaboraron “agregados de síntesis” para poder establecer el porcentaje del mineral potencialmente reactivo y así, determinar el límite máximo para la calcedonia y, por otro lado, se ensayaron las muestras de canteras y de areneras de forma directa para evaluar el desempeño de las arenas silíceas correspondientes a las Facies Fluviales Actuales del lecho en el Río Paraná.

Se realizaron ensayos conforme a las especificaciones de las normas IRAM 1512 (2013) y 1531 (2022), que establecen los requisitos y las metodologías para evaluar la aptitud de los agregados para el uso en hormigón. Los ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios de Geología y Medioambiente, del INTI, e incluyeron: método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz 75 μm (nº 200) (norma IRAM 1540:2004), análisis granulométrico (norma IRAM 1505:2003), examen petrográfico de agregados para hormigón (norma IRAM 1649:2008) y método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674:1997) los cuales se detallan a continuación:

Análisis granulométrico

La muestra se seca hasta alcanzar el peso constante y se cuartea para obtener una masa “m”, determinada por la norma IRAM 1505, en función a su tamaño máximo nominal. Posteriormente, se lava por el tamiz IRAM 200 y se seca. Seguidamente, se tamiza por los tamices indicados en la norma, siendo estos: tamiz IRAM 4,75 mm, tamiz IRAM 2,32 mm, tamiz IRAM 1,18 mm, tamiz IRAM 0,6 mm, tamiz IRAM 0,3 mm y tamiz IRAM 0,15 mm. Las fracciones resultantes deben separarse individualmente (Figura 4).



Figura 4: Ensayo granulométrico (IRAM 1505).

Examen petrográfico

El examen se realiza siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1649 (2008) y los requisitos establecidos en la norma IRAM 1512 y 1531. Las muestras fueron lavadas y tamizadas en las fracciones establecidas por la norma para ser observadas y descriptas con lupa binocular marca Nikon, con un alcance de hasta 40X (Figura 5, A). Para las descripciones microscópicas se utilizó el microscopio petrográfico de polarización marca Zeiss (Figura 5, B). Se realizaron cálculos ponderados, considerando los porcentajes retenidos en cada tamiz, y se determinó la composición del agregado.

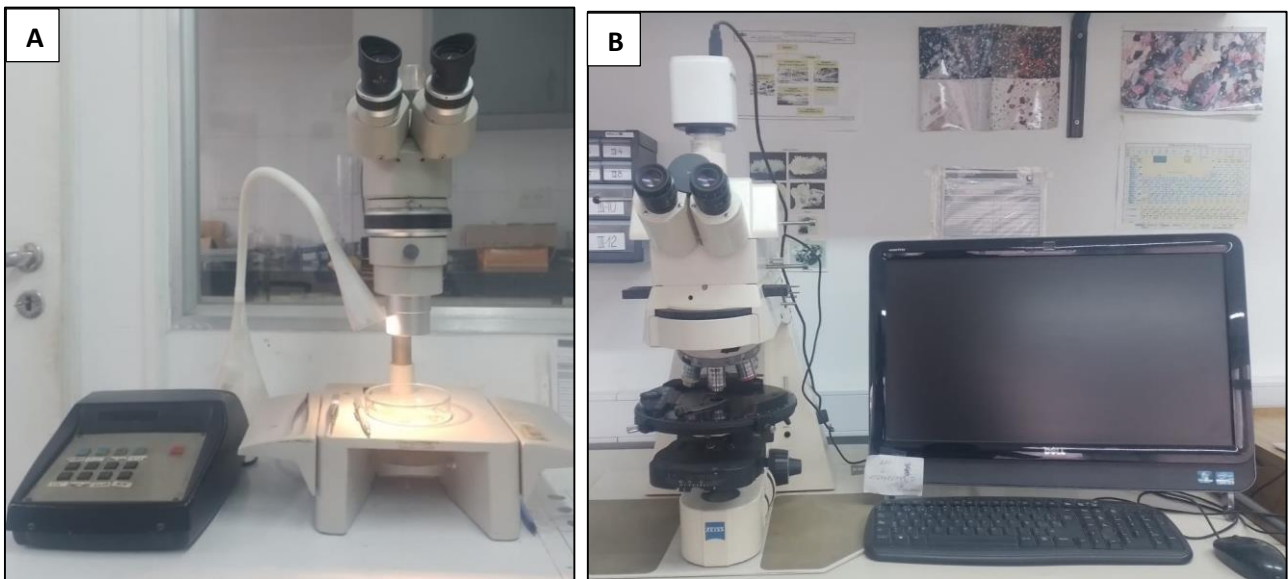


Figura 5: Instrumentos utilizados para el examen petrográfico. A. Lupa binocular; B. Microscopio petrográfico.

Método acelerado de la barra de mortero

Se elaboraron, como mínimo, tres barras de mortero por cada muestra de agregado de 25 mm x 25mm x 245 mm de largo, utilizando una proporción de una parte de cemento por 2,25 partes de agregado y una relación agua:cemento de 0,47. Las muestras de agregados gruesos fueron trituradas, tamizadas, lavadas y secadas a 105 °C, hasta alcanzar masa constante. Las muestras de agregado fino se tamizaron, lavaron y secaron. Las dosificaciones utilizadas se indican en el Cuadro 1.

AGREGADO			
Abertura nominal del tamiz		Masa	
Pasa por	Retenido en	%	gramos
IRAM 4,75 mm	IRAM 2,36 mm	10	125
IRAM 2,36 mm	IRAM 1,18 mm	25	312,5
IRAM 1,18 mm	IRAM 600 μ m	25	312,5
IRAM 600 μ m	IRAM 300 μ m	25	312,5
IRAM 300 μ m	IRAM 150 μ m	15	187,5
Total		100	1250
CEMENTO			
Masa en gramos		555	
AGUA			
Masa en gramos		261	

Cuadro 1: Dosificación para la confección de barras de mortero, según norma IRAM 1674:1997

Las barras confeccionadas, se curaron durante 24 horas en una cámara húmeda a temperatura ambiente (Figura 6). Después de este periodo, se desmoldaron y se tomó la lectura de la longitud inicial en aire utilizando un comparador analógico (Figura 7, A).



Figura 6: A. Moldes utilizados para la confección de barras de mortero. B. Barras de mortero confeccionadas.

Las barras fueron sumergidas en un recipiente con agua a $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, registrándose la lectura correspondiente. Finalmente, se sumergieron durante 14 días en un recipiente con solución de NaOH 1N a $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ y se registraron mediciones de longitud periódicamente (Figura 7, B).

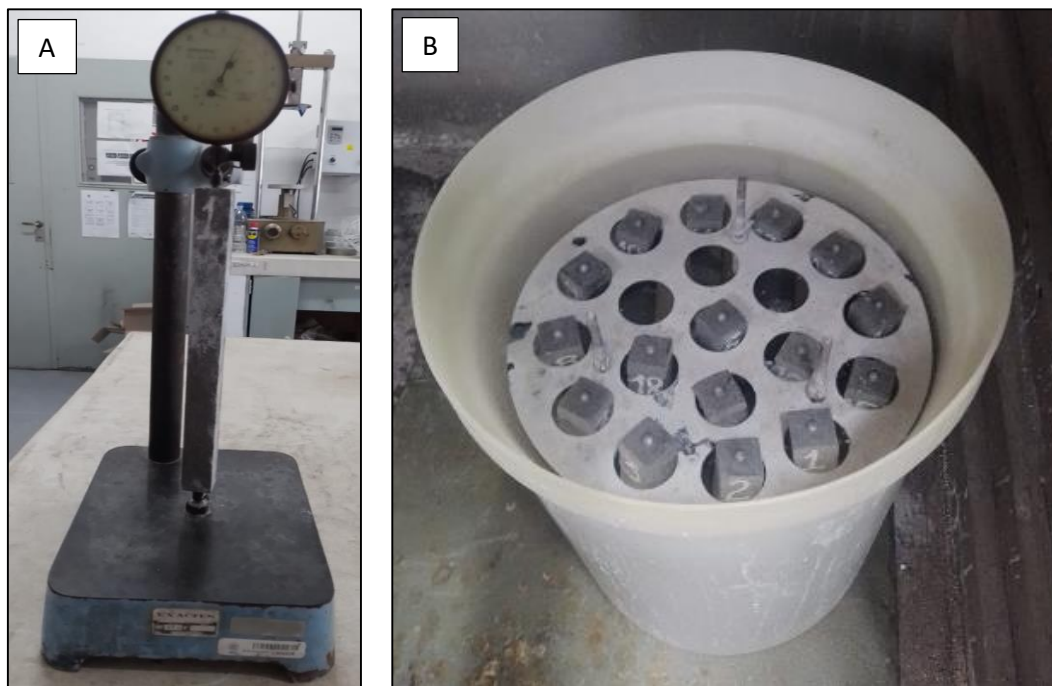


Figura 7: A. Comparador analógico para medición de longitudes. B. Barras de mortero en solución de NaOH 1N a 80°C .

Para evaluar el comportamiento de la calcedonia se realizaron “agregados de síntesis” compuestas por un agregado no reactivo (cuya aptitud se evaluó con anterioridad) y un agregado reactivo en distintas proporciones.

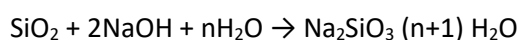
La muestra reactiva utilizada se obtuvo a partir de una selección petrográfica de canto rodado constituido puramente por este mineral reactivo (ver examen petrográfico en Anexo 2.A: Petrografía canto rodado Colón). Las muestras fueron extraídas de canteras y del margen del río Uruguay, en la localidad de Colón. Con ellas, se prepararon las dosificaciones indicadas en el Cuadro 2, y se evaluaron a 16 días.

Contenido de calcedonia (%)	MUESTRA Masa en %	
	Calcedonia	Muestra no reactiva
0,6	0	100
1,0	0,4	99,6
1,5	0,9	99,1
2	1,4	98,6
3	2,4	97,6
3,5	2,9	97,1
10	9,4	90,6
15	14,4	85,6
20	19,4	80,6
100	100	0

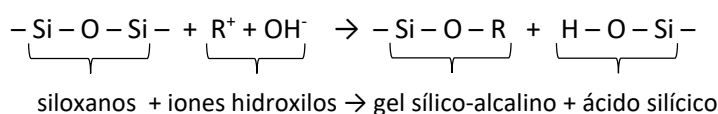
Cuadro 2: Dosificaciones de los “agregados de síntesis” utilizadas para analizar el desempeño de la calcedonia. Consistió en la mezcla de dos muestras de agregado, una reactiva (calcedonia) y otra no reactiva.

REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE (RAS)

La RAS es una reacción ácido-base donde la sílice presente en los agregados actúa como el ácido reactante, y los hidróxidos de sodio (NaOH) y potasio (KOH), presentes en la solución dentro de los poros del hormigón, se comportan como la base. La combinación química de estos reactivos produce un silicato calco-alcálido hidratado (gel) y la disolución del calcio en la solución de los poros. Este calcio reacciona con los silicatos alcalinos, formando geles de naturaleza expansiva que resultan en el deterioro de las propiedades mecánica de los materiales (Dron y Brivot, 1992; Alaejos y Bermúdez, 2003; Coelho dos Santo, 2018; Lanza Fernández, 2012; Saouma, et al., 2015) según la siguiente reacción:

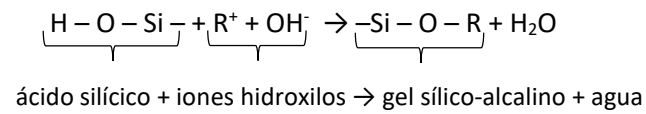


Para comprender mejor la reacción Powers y Steinour (1955,a), Ichikawa y Miura (2007) y Moura, et al. (2016) propusieron un modelo simplificado (Figura 8), que comienza con una etapa inicial de hidrólisis de la sílice reactiva. En esta etapa, cada átomo de silicio conectado a la red mediante cuatro enlaces siloxanos se rompe por la acción de los iones OH^- , formando un gel sílico-alcálido y ácido silícico según:



R es un ion alcálido (Na o K)

El ácido silícico siendo débil, reacciona inmediatamente con el hidróxido que es liberado en el agua y los álcalis para transformarse en silicato alcalino hidratado según:



Como producto final, se forma un gel sílico-alcalino higroscópico que, al absorber agua, genera una presión expansiva induciendo a desarrollo de fisuras y/o fracturas en el agregado y en el mortero y, posteriormente, el deterioro en la estructura de hormigón según:

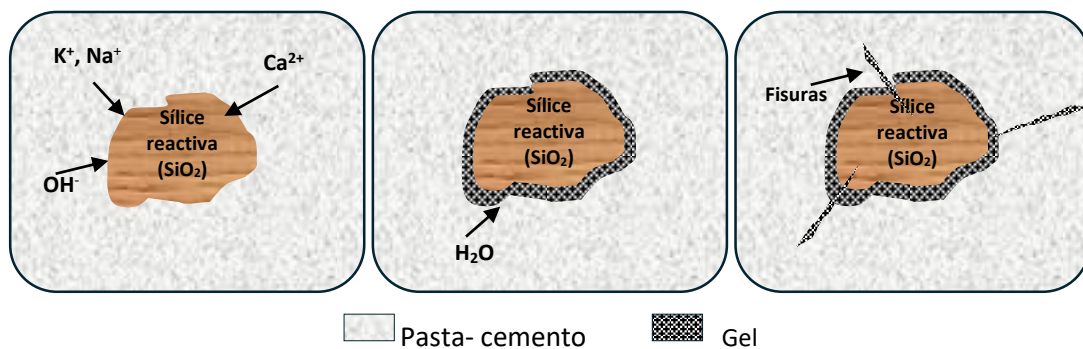
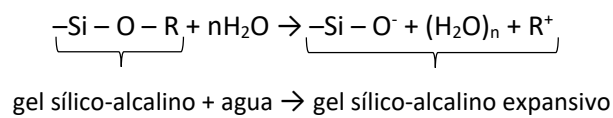


Figura 8: Mecanismo de ocurrencia de la reacción álcali sílice, modificado de Ichikawa y Miura (2007).

Saouma et al. (2015), a partir de exámenes petrográficos, propusieron una serie de estadios en el desarrollo de rasgos deletéreos y de productos consecuentes de la RAS, los cuales son:

- 1) Formación de bordes de reacción y exudación.
- 2) Exudación de agregado en estado sólido-gel sobre el agregado, relleno de los poros de la pasta del hormigón.
- 3) Agrietamiento del área del agregado reactivo, juntamente con relleno de gel.
- 4) Propagación radial y expansión de las grietas rellenas con gel, desde el interior del agregado hacia la pasta.
- 5) Precipitación del gel en poros rellenos de aire a lo largo de las grietas propagadas del agregado.

Además, establecieron un modelo matemático para explicar las evidencias físicas de la reacción, relacionándolo con los cambios observados en la petrografía. En base a ello, clasificaron cuatro etapas de evolución (Figura 9):

- A. Etapa de micro-nucleación: alrededor del agregado reactivo, sin expansión.
- B. Etapa de desarrollo de la reacción dentro del agregado: el gel es confinado en las micro-texturas.
- C. Etapa de aceleración de la reacción y deterioro: producida hacia la pasta del cemento ocasionando crecimiento de las grietas.
- D. Etapa de deterioro severo: se desarrollan fallas estructurales.

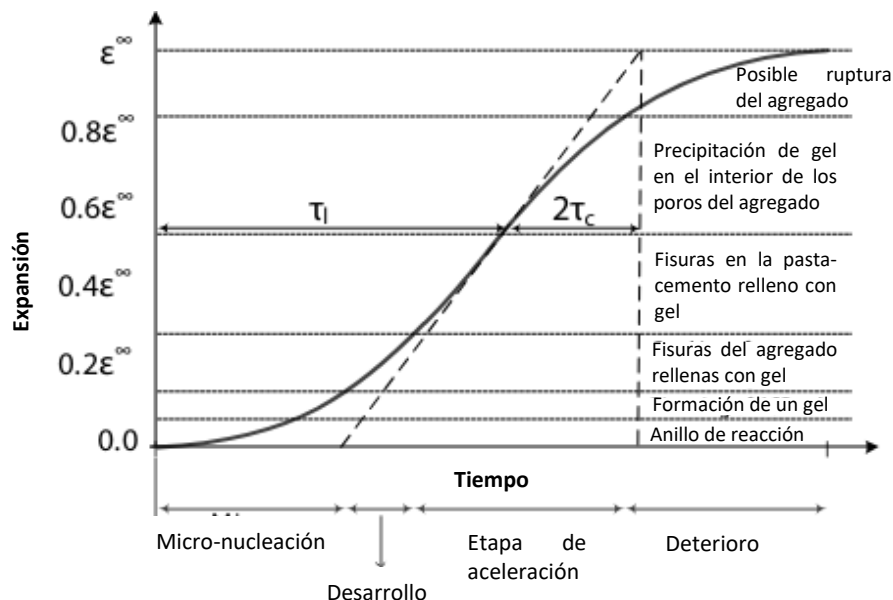


Figura 9: Relación entre la aparición de rasgos y productos de la RAS y la cinética de la reacción álcali sílice (modificado Saouma et al., 2015).

Estos estadios y etapas son importantes para entender el desarrollo y las consecuencias de la RAS en las estructuras de hormigón, permitiendo una mejor planificación en la prevención y reparación de daños estructurales.

Los autores concluyen que, en agregados de reacción rápida, las coronas de reacción se desarrollan de forma visible, mientras que, en agregados de reacción lenta la corona de reacción es menos visible.

Factores que influyen en la RAS

Para que la RAS se desarrolle, según Stark (1991), deben combinar tres factores simultáneamente: 1) componentes silíceos potencialmente reactivos en el agregado, 2) concentración suficiente de álcali en la solución intersticial del hormigón y 3) presencia de agua.

Cuando estas condiciones se cumplen, comienzan a observarse los primeros productos de la RAS mediante la formación de geles expansivos que provocan el agrietamiento del hormigón.

Agregados reactivos

En Argentina, se utiliza una amplia variedad de materiales para la elaboración de hormigón, incluyendo rocas con diversas génesis, composición y textura (Batic et al., 2005). Los principales tipos de agregados son naturales (arena y canto rodado) y artificiales (piedra partida). Dependiendo de la composición y textura de estos agregados se puede ocasionar un deterioro estructural en armaduras de hormigón.

La reactividad de los agregados está influenciada por varios factores, entre ellos la cristalinidad de los minerales potencialmente reactivos, su tamaño, origen geológico, composición, textura y estructura, aunque es posible que agregados del mismo origen o incluso del mismo macizo rocoso presenten distintos potenciales ante la RAS (Pezhman, et al. 2022). Aunque todos los minerales silíceos pueden reaccionar con soluciones alcalinas, aquellos agregados que contienen sílice con estructura cristalina no son susceptible a la RAS, por lo que suelen hacerlo en cantidades insignificantes y de manera superficial. En contraste, aquellos que contienen sílice amorfa y carecen de estructura cristalinas (vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, opalo) reaccionan rápidamente, generando pequeñas grietas en el interior del agregado, permitiendo la circulación de la solución alcalina (Fanijo, et al., 2021).

Las distintas especies de sílice, tanto cristalinas como amorfas, se clasifican dentro de la clase de los silicatos, subclase tectosilicatos (Klein y Hurlbut, 1998). El dióxido de silicio presenta varias formas cristalográficas, donde el silicio está rodeado en forma tetraédrica por átomos de

oxígeno. Estas formas se representan en el gráfico de presión-temperatura (Figura 10), y se conocen nueve polimorfos, cada polimorfo presenta sus propias características como grupo espacial, dimensiones de celda, morfología y energía reticular, siendo esta última la que determina el grado de estabilidad del polimorfo (Coelho dos Santos, 2018).

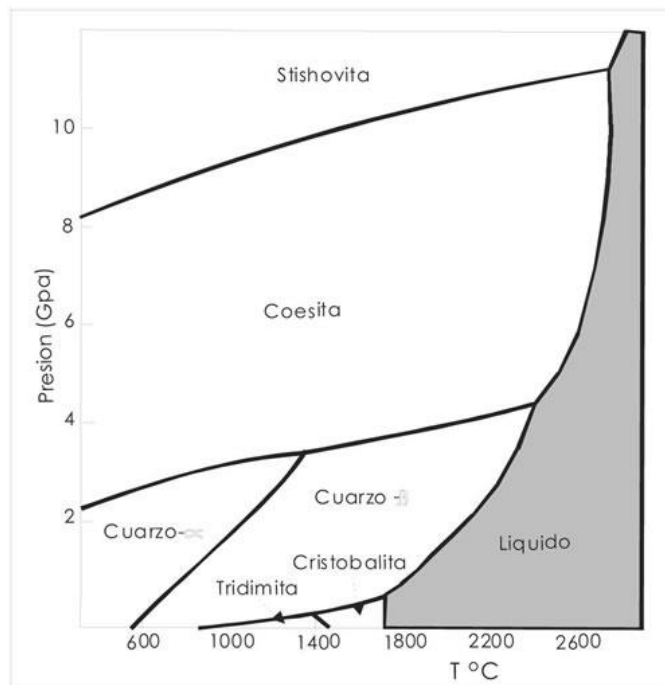


Figura 10: Polimorfos de la sílice (modificado de Klein y Hurlbut, 1998).

La fase polimórfica cuarzo- α es la forma estable de cuarzo sobre la superficie de la tierra. A medida que aumenta la temperatura, se transforma en el polimorfo tridimita y cristobalita, seguidamente por cuarzo- β y finalmente en fase líquida. Por otro lado, el aumento de presión favorece la cristalización de polimorfos que ocupen el menor espacio posible, como la cohesita y la estishovita (Swamy y Saxena, 1994).

La conversión de cuarzo, tridimita y cristobalita requiere la ruptura y formación de enlaces. Si bien, estas formas están presentes en la naturaleza, el cuarzo- α es termodinámicamente estable a temperatura ambiente, mientras que la tridimita y cristobalita se encuentran exclusivamente en rocas ígneas volcánicas formadas a partir de gases calientes al final del periodo magmático (Lanza Fernández, 2012).

Según Ponce y Batic (2006) y Lanza Fernández (2012), los agregados reactivos se clasifican según la mineralogía y la velocidad con la que se manifiestan los productos de la RAS en el hormigón en:

- Agregado de reacción rápida: contienen minerales de sílice amorfo en bajas concentraciones (< 5%), como la calcedonia y/o chert, tridimita, cristobalita, ópalo, vidrio volcánico y cuarzo microcristalino (principalmente en la matriz de las rocas volcánicas intermedias a ácidas). Estos pueden causar daños en un plazo de 1 a 5 años después de la construcción, debido a tensiones internas entre interfase del agregado y la pasta del cemento, que resultan de la expansión de los geles y provocan el desarrollo de micro y macrofisuras desde las zonas de reacción hacia la pasta de cemento.
- Agregados de reacción lenta: Están asociados principalmente con el cuarzo fuertemente tensionado y/o deformado (contenido en rocas como milonitas, migmatitas, granitos, gneis, cuarcitas, etc), aunque diversos autores, como Rao y Sinha (1989) y Tiecher et al. (2017), han incluido en este grupo bandas de deformación, mirmequitas y subgranos de cuarzo. Los daños se detectan a partir de 10 a los 20 años después de la construcción y la reacción se localiza principalmente en el interior de los agregados. En estos casos, no aparecen bordes de reacción en el exterior de los agregados y presentan pocas fisuras (Saouma et al., 2015).

El grado de reactividad de un agregado también está influenciado por el tamaño de las partículas reactivas. Foray et al. (2004) destacan que el tamaño de las partículas tiene un impacto significativo en la RAS, aunque no se observa una relación directa entre la deformación producida y la superficie específica del agregado. Los agregados de reacción rápida tienden a causar una mayor expansión cuando su tamaño es menor, lo cual se asocia con el aumento de la superficie específica. Sin embargo, partículas de tamaños muy finos pueden inhibir la reactividad al producir un efecto puzolánico.

Por otro lado, los agregados de reacción lenta muestran una mayor expansión en las fracciones gruesas (Lanza Fernández, 2012). Adicionalmente, el trabajo de Zhang et al. (1999), indican que el hormigón con contenido de agregado reactivo fino tiende a expandirse en etapas tempranas, mientras que el hormigón conformado con agregado reactivo grueso muestra una expansión más lenta y continua con el tiempo.

Contenido de álcalis

En la RAS, los hidróxidos alcalinos (NaOH y KOH) actúan como la base reactante. Para que esta reacción se produzca, la concentración de álcali en la solución de los poros debe ser suficientemente alta. Los álcalis solubles son aportados principalmente por el cemento, aunque pueden provenir en menor proporción de aditivos químicos, minerales silíceos, agua de la mezcla y salmueras industriales, entre otros (Bérubé et al., 2002).

La velocidad de la reacción depende del pH de la solución, el cual varía con el contenido de álcali disponible. Se asume que la reacción se desarrolla si el pH está por encima del “umbral alcalino” y la concentración de sílice es suficiente (Coelho dos Santos, 2018).

Según Saouma et al. (2015), en el cemento portland los álcalis se encuentran principalmente en forma de sulfatos o aluminatos alcalinos y en solución sólida de belita. El sulfato alcalino, que es la fase dominante y soluble en agua, permanece en la solución de los poros en la etapa de hidratación temprana. Al concluir la precipitación de la etringita, el contraíón del álcali se convierte en hidróxido, lo que aumenta el pH de la solución de los poros, mientras que, los iones alcalinos y de hidroxilos se concentran lo suficiente como para atacar la sílice reactiva del agregado y formar un gel expansivo.

Además, algunos componentes minerales que conforman al agregado, como los feldespatos alterados (microtexturas), micas, arcillas, zeolitas, entre otras, también pueden suministrar cantidades significativas de álcali en la solución contenida en los poros del hormigón (Saouma et al., 2015).

Humedad

Cuando el medio circundante presenta una humedad relativamente alta (>80%) contribuye a la reacción álcali sílice, permitiendo el desarrollo de tensiones internas y posterior agrietamiento superficial de la estructura. La humedad, al igual que la temperatura del medio, están relacionada con la formación y el desarrollo de grietas en la superficie, además de aquellas originadas por la expansión de los materiales al embeber agua circundante (Kagimoto et al., 2016).

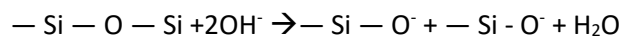
Producto de la RAS

Formación del gel

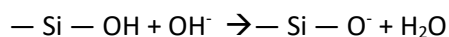
La formación del gel en la RAS ocurre cuando los iones silicatados reaccionan con los cationes presentes en la disolución porosa, precipitando en forma de geles expansivos C-S-H (silicatos cálcicos hidratados) y/o geles C-A-S-H (silicatos calcoalcalinos hidratados). El grado de expansión del gel sílico-calco-alcalino está influenciado por las valencias y las concentraciones relativas de cationes. Los iones bivalentes producen menor densidad de carga superficial en comparación con los iones monovalentes, resultando geles menos expansivos con alta concentración de calcio y bajo contenido de álcali.

Lanza Fernández (2012), en su trabajo doctoral, describe el mecanismo de formación del gel en cuatro etapas:

- a. Formación de la disolución alcalina: durante la hidratación inicial del cemento se forman los productos como geles C-S-H, portlandita (hidróxido cálcico) y solución intersticial en los poros del hormigón. Esta solución está compuesta principalmente por hidróxidos alcalinos, y su concentración depende del cemento y la relación agua/cemento. Cuando se modifica el equilibrio químico, la portlandita y los hidróxidos alcalinos proporcionan iones de Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y OH^- .
- b. Disolución de la sílice: las estructuras cristalinas del SiO_2 son disueltas en el medio alcalino proporcionado por el hormigón, rompiendo los enlaces siloxanos que las mantienen unidas. Este proceso ocurre en dos etapas (García Díaz et al., 2006):
 - Formación de Q3: se produce por la rotura de un enlace siloxano debido al ataque del ion hidroxilo.



- Disolución de la sílice: los iones hidroxilos atacan a los enlaces siloxanos restantes, generando iones silicatos y pequeños polímeros. En paralelo a la reacción, en el caso de la sílice amorfa formadas por una cadena suelta de tetraedros alrededor del átomo de silicio unido a iones de O_2 y OH^- , el ataque a los enlaces siloxanos se acompaña de una reacción de neutralización ácido-base entre los grupos silanos y los iones OH^- de la disolución.



- c. Formación del gel: cuando aumenta el contenido de la disolución y no hay posibilidad que continúe formándose el gel C-S-H, comienza a desarrollarse los geles S-A-H (silicato alcalino hidratado) y S-C-A-H (silicato calco alcalino hidratado) por la reacción con la portlandita.



La capacidad de expansión y la viscosidad de estos geles están relacionadas con la cantidad de CaO en el medio. El límite máximo de contenido de Ca en el hormigón para que expanda el gel es del 30% (Lanza Fernández, 2012; Freyburg y Berninger, 2004). A medida que el gel aumenta su expansión y viscosidad también lo hace su potencial para desarrollar fracturas (Thomas et al., 2013).

Los geles sílico-alcalinos, al absorber moléculas de agua, aumentan su volumen provocando una presión interna que puede superar los límites de consistencia del hormigón y provocar fracturas mecánicas en la estructura.

Antecedentes

La reacción álcali sílice fue reportada por primera vez en California, Estados Unidos, en la década de 1930 por Thomas E. Stanton (Stanton, 1940). Stanton, observó que varias estructuras de hormigón presentaban agrietamientos y expansiones poco tiempo después de su construcción, y demostró que el deterioro se debía a la reacción entre los minerales silíceos del agregado y el álcali del cemento, denominando inicialmente a esta reacción como “álcali agregado” (RAA). Posteriormente, Stanton y sus colaboradores acuñaron el término “reacción álcali sílice” (RAS) para describir la interacción entre los álcalis del cemento y los minerales reactivos presentes en el agregado. Este hallazgo impulsó una serie de estudios e investigaciones, que convirtieron a la RAS en un tema ampliamente discutido a nivel mundial, especialmente debido a la creciente demanda en la industria de la construcción. Asimismo, surgió la necesidad de estandarizar ensayos para evaluar el desempeño de los agregados frente a la RAA.

En la década de 1950, Estados Unidos introdujo los primeros ensayos estandarizados para evaluar esta patología. Los ensayos fueron desarrollados por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y, posteriormente, adoptados por diversas asociaciones internacionales, incluyendo la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción (RILEM), la Asociación Canadiense de Normas (CSA), la Asociación Brasileña del Cemento Portland (ABCP), la Asociación Española de Normalización (UNE), el Organismo Italiano de Normalización (UNI), el Instituto Alemán de Normalización (DIN) y el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), entre otros.

Con el tiempo, las metodologías establecidas en estas normas fueron modificadas en base a nuevas investigaciones y experiencia en el campo, adaptándose a diferentes condiciones de temperaturas, tamaño de probetas o morteros, tiempo de ensayo y condiciones de exposición (Milanesi et al., 2021). Además, la petrografía en los agregados y hormigones ha adquirido un rol crucial, complementando las metodologías tradicionales para caracterizar al material de manera más efectiva.

Actualmente, países como Estados Unidos, Brasil, Japón, Canadá, España, Italia, Portugal, Alemania y Argentina, emplean técnicas petrográficas en combinación con ensayos físicos (método acelerado de barra de mortero y ensayo del prisma de hormigón) y químicos para evaluar la reactividad de los agregados de forma rápida y eficiente. El examen petrográfico permite identificar si un agregado contiene algún componente reactivo con la suficiente cantidad para desencadenar la RAS. Sin embargo, este método no es extrapolable entre distintos países debido a las diferencias en la composición y la geología regional y estructural de cada uno

de ellos. Por lo tanto, cada país ha desarrollado normativas específicas y adaptadas al tipo de agregado presente en su territorio, estableciendo límites máximos de minerales o rocas reactivas.

Wigum et al. (2007), en su trabajo “Key parameters influencing the alkali aggregates reaction”, describieron metodologías utilizadas en diferentes países, detallando los límites máximos admisibles de los minerales potencialmente reactivos. Por otro lado, Chak y Chan (2005), realizaron una recopilación de las metodologías existentes para clasificar a los agregados de acuerdo con su reactividad.

A continuación, se presentan algunos de los límites admisibles detallados en las publicaciones mencionadas:

- Washington State Department of Transportation, C295

Minerales /Rocas	Contenido máximo (%)
Componentes álcali-sílice de cuarzo ópticamente deformado, microfisurado o microcristalino	5
Chert	3
Calcedonia	
Tridimita	1
Cristobalita	
Ópalo	0,5
Vidrio volcánico natural	3

- US Army Corps of Engineers (2000)

Minerales /Rocas	Contenido máximo (%)
Partículas que contengan cuarzo deformado cuyo ángulo de extinción medio sea menor a 15º	20
Partículas de grauwacas, argilita, filita o limonita	15
Calcedonia y/o chert	5
Tridimita	1
Cristobalita	
Partículas de rocas ígneas vítreas que contengan presencia de vidrio volcánico ácido o intermedio	3
Presencia de ópalo	

- Irlanda

Minerales /Rocas	Contenido máximo (%)
Cuarzo micro y criptocristalino	5
Calcedonia	5
Vidrio volcánico	5
Presencia de ópalo, cristobalita y tridimita	

- Brasil (ABNT NBR 15577-3)

Minerales /Rocas	Contenido máximo (%)
Cuarzo microgranulado o deformado	5
Calcedonia	3
Tridimita o cristobalita	1
Vidrio volcánico	3
Ópalo	0,5

- Gran Bretaña (Malvar, et al., 2002), clasifica como agregado reactivo a aquel que contenga ópalo o más del 3% de calcedonia y/o chert.
- Dinamarca

Minerales (% en volumen)	Ambiente
2% sílex reactivo	Moderado
2% sílex reactivo	Agresivo
1% sílex reactivo	Muy agresivo

- Noruega: se limita el contenido en rocas reactivas en el 20% en peso del total, es decir, si el agregado contiene 20% o más de su volumen en rocas consideradas reactivas, el agregado es calificado potencialmente reactivo.
- Alemania (CEN, 1995)

Minerales /Rocas	Contenido máximo (%) en peso de los componentes		
	Agregado inicuo	Aplicación condicionada	Agregado reactivo
Arenisca con ópalo-ópalo de otra procedencia en agregados con tamaño mayor a 1 mm. Incluye al sílex de tamaños que varía de 1 mm a 4mm	<0,5	0,5-2	>2
Sílex reactivo con tamaños >4mm	<3	3-10	>10
Arenisca con ópalo + ópalo de otra procedencia + sílex reactivo	<4	4-15	>15

- En Argentina, la norma IRAM 1512 (2013) establece los máximos admisibles de minerales potencialmente reactivos en los agregados finos (Cuadro 3). No obstante, es importante destacar que la norma está siendo revisada por el Comité General de Normas (IRAM) y, al igual que la norma IRAM 1531 (2022), como parte de esta revisión se pretende eliminar

los incisos relacionados con el examen petrográfico, lo que podría influir en los métodos de evaluación de la reactividad de los agregados.

Minerales/Rocas	Máximo admisible (%)
Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	5
Cuarzo microcristalino (<62µm)	
Ftanita, chert	3
Calcedonia	
Tridimita	1
Cristobalita	
Ópalo	0,5
Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3

Cuadro 3: Minerales potencialmente reactivos y sus máximos admisibles en el agregado (norma IRAM 1512:2013).

La norma IRAM 1531 (2022), a diferencia de la IRAM 1512 (2013), detalla un listado de minerales y rocas consideradas reactivas, aunque no establece límites (Cuadro 4).

Tipo de material	Reacción frente a los álcalis
Calcedonia	Reactivo, posiblemente por su fino tamaño cristalino
Cristobalita	Reactivo, debido a su <i>meta-estabilidad</i> térmica y a su pequeño tamaño cristalino
Ópalo (sílice amorfa)	Altamente reactivo, por su pobre arreglo estructural y su pequeño tamaño cristalino
Cuarzo (sílice cristalina)	Puede ser reactivo cuando se presenta <i>deformado-tensionado</i> o en un tamaño de grano muy pequeño, o ambos
Vidrio (volcánico natural y artificial)	Tanto el vidrio volcánico amorfo como el desvitrificado son reactivos. La tridimita o cristobalita, o ambas, podrían estar presentes cuando se desvitrifica. El vidrio volcánico alterado o parcialmente desvitrificado o hidratado es especialmente deletéreo
Granos y subgranos	La presencia de subgranos, sobre todo de cuarzo, es importante para determinar la reactividad de un agregado
Tridimita	Altamente reactivo debido a su <i>meta-estabilidad</i> y pequeño tamaño cristalino
Andesita	Cristobalita/tridimita, vidrio intersticial en la pasta o desvitrificado. Ópalo o calcedonia en vesículas
Basalto	Cristobalita/tridimita, vidrio intersticial en la pasta o desvitrificado. Ópalo o calcedonia en vesículas
Riolita	Vidrio o vidrio desvitrificado. Tridimita o cristobalita, o ambas. Venillas y vesículas con ópalo o calcedonia. Cuarzo micro o criptocristalino. Venillas o vesículas rellenas con ópalo o calcedonia
Toba/ignimbrita	Vidrio silíceo desvitrificado. Tridimita, cristobalita o cuarzo microcristalino o criptocristalino. Venillas o vesículas rellenas con ópalo o calcedonia En las ignimbritas hay pómez o trizas vítreas, o ambas, o <i>fiammes</i> (vidrio deformado)

Granito/ granodiorita	Puede poseer cuarzo tensionado, o microcristalino, así como vetillas de cuarzo micro y criptocristalino o rellenas con ópalo o calcedonia
Gneis/esquisto/ granulita	Cuarzo altamente tensionado o cuarzo intersticial pobremente cristalino (micro y criptocristalino), o ambos El tamaño de grano del cuarzo es fundamental, no sólo la textura o el grado de deformación
Milonita/ pseudotaquillita/ brecha de falla/cataclasita	Cuarzo microfracturado (cataclasitas), cuarzo tensionado (milonitas), matriz de vidrio o sílice de grano muy fino y escasamente cristalino (pseudotaquillitas), o ambos
Pizarra	Cuarzo micro o criptocristalino
<i>Hornfels</i>	Cuarzo muy fino, micro y criptocristalino
Cuarcita	Cuarzo altamente tensionado o límites escasamente cristalinos entre los granos de cuarzo, o ambos. También cuarzo micro o criptocristalino, calcedonia u ópalo, o ambos como cemento de los granos de cuarzo
Arenisca/limolita	Cuarzo de grano muy fino o cuarzo pobremente (micro/cripto) cristalino, o ambos, cuarzo tensionado, o rocas cementadas con ópalo, calcedonia, y cuarzo micro o criptocristalino
<i>Chert</i> /pedernal	La sílice en el <i>chert</i> /pedernal generalmente tiene una estructura cristalina poco desarrollada y contiene especies hidratadas. Cuarzo micro o criptocristalino o calcedonia, o ambos. Algunas variedades pueden tener ópalo
Grauvaca	Cuarzo de grano muy fino con una gran superficie accesible o la presencia de cuarzo micro o criptocristalino, o ambos
Caliza/marga/ creta	Cuarzo finamente diseminado, ópalo o calcedonia. Ftanita o pedernal asociado
Dolomía	Cuarzo finamente diseminado, ópalo o calcedonia
NOTA. Información extraída de RILEM AAR-1.1	

Cuadro 4: Minerales y rocas potencialmente reactivos en el agregado (norma IRAM 1531:2022).

Finalmente, el Reglamento CIRSOC 201-2005, establece que los agregados que contengan más de 5% de cuarzo deformado, microfisurado o microcristalino, o más de 2% de arcillas de tipo esméctitas contenidos en las masas de basaltos, deben considerarse potencialmente reactivos.

El método acelerado de barra de mortero, desarrollado por Overholster y Davies en Sudáfrica en 1986, fue formalmente estandarizado en 1989 en Estados Unidos, bajo la denominación ASTM C09.26. Tras varias modificaciones se publicó en el libro de normativa ASTM como P214 y, en 1994, se completó con la publicación del actual ensayo acelerado ASTM C1260 (Alaejos et al., 2014). Este método se ha normalizado en varios países como Argentina (IRAM 1674), Canadá (CSA A23.2-25A), Australia (RTA T363), España (UNE 146508 EX) y Europa (RILEM TC-191 ARP AAR-2). El mismo permite determinar si un agregado es reactivo o no, de acuerdo con la expansión (E) que experimentan las barras al ser sometidas en una solución de NaOH (1N) a 80°C. En base a ello, cada país establece el límite de expansión según su experiencia.

La norma IRAM 1512 (2013), al igual que la ASTM C 1260, RILEM AAR-2 y UNE 146508EX consideran los límites de expansión indicados en el Cuadro 5.

Grado de reactividad del agregado	Método de ensayo		
	IRAM 1674 Expansión (E) del mortero a 16 días ^{a)}	IRAM 1700 (60 °C) Expansión (E) del hormigón a 13 semanas	IRAM 1700 (38 °C) Expansión (E) del hormigón a 52 semanas
No reactivo	$E \leq 0,10$	$E \leq 0,04$	$E \leq 0,04$
Moderadamente reactivo	$0,10 < E \leq 0,20$	-	-
Altamente reactivo	$E \geq 0,20$	$E \geq 0,04$	$E \geq 0,10$

Cuadro 5: Ensayos y valores para la determinación del grado de reactividad del agregado fino (IRAM 1512).

La norma IRAM 1531, en su última versión del año 2022, clasifica los agregados de acuerdo a los valores del Cuadro 6:

Clase de reactividad del agregado	Nivel de reactividad del agregado	Método de ensayo		
		IRAM 1674 Expansión (E) del mortero a 16 días ^{a)}	IRAM 1700 (60 °C) Expansión (E) del hormigón a 13 semanas	IRAM 1700 (38 °C) Expansión (E) del hormigón a 52 semanas
R0	Inocuo	$E \leq 0,10$	$E \leq 0,04 / 0,08$ ^{b)}	$E \leq 0,04$
R1	Moderadamente reactivo	$0,10 < E \leq 0,30$	$0,04 / 0,08$ ^{b)} $< E \leq 0,12$	$0,04 < E \leq 0,12$
R2	Altamente reactivo	$0,30 < E \leq 0,45$	$0,12 < E \leq 0,24$	$0,12 < E \leq 0,24$
R3	Extremadamente reactivo	$E > 0,45$	$E > 0,24$	$E > 0,24$

Cuadro 6: Ensayos y valores para la determinación del grado de reactividad del agregado grueso (IRAM 1531).

La norma RTA R363, de Nueva Gales del Sur, clasifica al agregado como inocuo si la expansión es menor a 0,10% a los 21 días, reactivo si es mayor a 0,10% a los 10 días y de reacción lenta si es mayor a 0,10% a los 21 días.

Muchas investigaciones han señalado que el tiempo de ensayo en el método acelerado de barra de mortero es aceptable para clasificar a un agregado de reacción rápida, pero insuficiente para los agregados de reacción lenta. Shayan (2007), mediante estudios del desempeño en agregados australianos propuso reducir el límite a 0,08% a 16 días en agregados de reacción lenta. Alaejos et al. (2014) sugirieron un límite de expansión de 0,2% a 90 días para agregados con cuarzo reactivo de reacción lenta, mientras que, Velasco Torres (2014) recomienda reducir el tiempo de prueba a 56 días con un límite de expansión de 0,13%.

En Argentina, el primer informe sobre la RAS data en el año 1958, en las losas de pavimento del camino a Punta Lara (Fava et al., 1961). Desde entonces, el interés en esta patología en estructuras de hormigón ha ido aumentando a nivel nacional.

El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), es el único representante de ISO en el país, y se encarga de desarrollar normas de certificación y validación en las diferentes actividades de la sociedad, incluyendo el hormigón. Además, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) tiene el objetivo de acompañar e impulsar el crecimiento de las pymes argentinas, promoviendo el desarrollo industrial federal mediante la innovación y la transferencia de tecnología; en 1964, a partir de la necesidad de contar con un reglamento nacional, en las obras públicas, redactó el primer Proyecto de Reglamento Argentino para Estructuras de Hormigón (PRAEH), el cual tomo como base desarrollos, recomendaciones y códigos del American Concrete Institute (ACI). En 1978, debido a problemas estructurales en el hormigón se creó el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC - INTI), el cual elaboró el manual CIRSOC 201 en 1982. Dentro del área de Construcciones del INTI se encuentra el Departamento de Geología y Medioambiente, el cual es el encargado, entre otras cosas, de estudiar el desempeño de los agregados en el hormigón y ante la RAS.

Normativa Nacional

IRAM 1512 (2013): Agregado. Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos.

La norma establece los requisitos para agregados finos en la elaboración de hormigones de cemento, especificando que el agregado fino es todo el material que pasa por el tamiz IRAM 4,75 mm, y que puede estar constituido por arenas naturales, de trituración o una mezcla de ellas. Asimismo, menciona que las partículas deben ser resistentes, durables, tener forma y tamaños estables, y no debe contener sustancias nocivas que superen el máximo admitido (Cuadro 7) que afecten a la durabilidad y resistencia del hormigón.

Requisitos	Máximo admisible (g/100g)	Método de ensayo
a) Finos que pasan el tamiz IRAM 75 µm:		
a.1) Elementos estructurales expuestos a clases de exposición o sujetos a desgaste	3,0	IRAM 1540
a.2) Elementos estructurales expuestos a condiciones ambiente benignas o moderadas	5,0	
b) Terrones de arcilla y partículas friables	3,0	IRAM 1647
c) Materias carbonosas		
c.1) Cuando es importante el aspecto superficial	0,5	IRAM 1647
c.2) Otros casos	1,0	
d) Sulfatos Sulfatos, expresados como SO ₃	0,1	IRAM 1647
e) Sales solubles totales	1,5	IRAM 1647

Cuadro 7: Límites admisibles de minerales perjudiciales para el hormigón (IRAM 1512).

Para agregados que estén en contacto en forma permanente o periódica con agua, suelo húmedo o atmósfera con humedad relativa mayor que 60%, la norma establece que deben evaluarse desde el punto de vista de la RAA, e indica los siguientes procedimientos a seguir:

- 1) Examen petrográfico de agregado, según la norma IRAM 1649 (2008).
- 2) Método acelerado de barra de mortero, según la norma IRAM 1647 (1997).
- 3) Método del prisma de hormigón, según la norma IRAM 1700 (2013).

Si en el examen petrográfico, el agregado supera los máximos admisibles de los minerales indicados en el Cuadro 3, debe ser considerado potencialmente reactivo. En cambio, si supera los máximos admisibles o si contiene dos o más minerales de los indicados en dicho cuadro, independientemente del contenido que presente, se debe considerar al agregado reactivo. En este último caso, la reactividad debe ser comprobada por el método acelerado de barra de mortero o el método tradicional del prisma de hormigón (Cuadro 5).

IRAM 1531 (2022): Agregado. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos.

La norma establece los requisitos para agregados gruesos en la elaboración de hormigones de cemento, especificando que el agregado grueso es todo el material que retiene el tamiz IRAM 4,75 mm, y que puede estar constituido por depósitos naturales, producto de la desintegración natural, o de la trituración y clasificación granulométrica de rocas; escoria de alto horno; y agregados gruesos reciclados obtenidos de la trituración y clasificación de residuos de hormigón.

El agregado que se emplee en hormigones masivos o que se encuentre, en forma permanente o periódica en contacto con agua, suelos húmedos o atmósferas con humedad relativa mayor

que 60%, no debe producir expansiones o deterioros, o ambos, como consecuencia de la RAA, siempre y cuando se disponga de evaluaciones de obras en servicio que no tengan evidencias de expansiones o daños ocasionados por dicha reacción.

Cuando no se tienen antecedentes del agregado, éste debe ser evaluado desde el punto de vista de la RAA, a partir de los siguientes ensayos:

- 1) Examen petrográfico de agregado, según norma IRAM 1649 (2008).
- 2) Método acelerado de barra de mortero, según la norma IRAM 1647 (1997).
- 3) Método del prisma de hormigón IRAM 1700 (2013).

Por otra parte, la norma indica aquellos minerales y rocas que son clasificadas como reactivas (Cuadro 4), aunque no especifica acerca de los límites admisibles.

Si a partir del examen petrográfico, se determina que el agregado es potencialmente reactivo, su reactividad debe ser comprobada por el método acelerado de barra de mortero o el método tradicional del prisma de hormigón (Cuadro 6).

IRAM 1649 (2008): Examen petrográfico de agregados para hormigón

El objetivo de la norma es establecer procedimientos para el examen petrográfico de muestras representativas de minerales propuestos para uso como agregados en hormigón. Define las técnicas petrográficas a emplear, especifica el instrumental y los procedimientos para preparar y analizar cortes petrográficos.

Las muestras deben proporcionar información detallada sobre el lugar exacto de extracción, la geología del área y el tipo que se llevara a cabo. Asimismo, es crucial contar con la cantidad suficiente de muestra.

Por otra parte, la norma establece que, en canteras y depósitos de arena y grava que están en explotación, se debe realizar un muestreo mínimo de 45 kg o 300 trozos. En canteras no productivas, donde no exista acopio del material procesado, se debe muestrear como mínimo 2kg de cada unidad geológica con trozos de masas iguales o mayores que 0,5 kg.

Las muestras de arena y grava destinadas para el examen petrográfico deben ser tamizadas en seco, conforme la norma IRAM 1505, para obtener sub-muestras representativas de las fracciones parciales retenidas de cada tamiz. Estas fracciones deben enviarse al petrógrafo, quien deberá identificar y contar un mínimo 500 partículas de cada fracción. En el caso de las gravas, se debe realizar un examen a ojo desnudo o lupa binocular para determinar el tipo de roca y si se presentan recubrimientos. De encontrarse, se debe informar si son materiales

propensos a ser perjudiciales para el hormigón y evaluar cualitativamente la firmeza con la que están adheridos a las partículas.

El informe del examen se divide en dos partes: el resumen y el informe completo. Debe describir cualitativa y cuantitativamente, las propiedades o constituyentes que tienen efectos desfavorables en el hormigón. Cuando los constituyentes no puedan ser cuantificados, el informe petrográfico debe incluir recomendaciones respecto a cualquier investigación adicional petrográfica, química, física o geológica. El informe como mínimo debe incluir forma de la partícula, textura superficial, tamaño de grano, estructura interna, color, composición mineral, heterogeneidades significativas, recubrimientos y presencia de constituyentes reactivos y/o perjudiciales.

Para abordar problemas particulares de los agregados o de los constituyentes seleccionados, se pueden emplear métodos adicionales como análisis de difracción de rayos X (DRX), análisis térmico diferencial (DTA), espectroscopia infrarroja, microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de rayos X (EDAX).

Finalmente, la norma también detalla cómo calcular la composición para agregados gruesos y finos. Este procedimiento implica calcular la composición de cada fracción sobre tamiz de una muestra heterogénea y el promedio ponderado de la composición de toda la muestra. La composición de cada fracción sobre tamiz se expresa en porcentaje, y se calcula cada constituyente en cada condición como un porcentaje de la cantidad total. Posteriormente se obtienen los porcentajes por pesada de la fracción sobre tamiz en el total de la muestra y se calculan los porcentajes de un constituyente en el total de la muestra en ese tamaño (porcentajes de constituyentes ponderados en la fracción de tamiz), multiplicando el porcentaje del constituyente en cada fracción de tamiz por el porcentaje de la fracción sobre tamiz en toda la muestra.

IRAM 1674 (1997): Agregado. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.

El método acelerado de barra de mortero es una técnica utilizada para caracterizar la reactividad de los agregados frente a la RAS. Permite determinar la expansión interna potencialmente deletérea en un periodo de 16 días.

En una primera instancia, la norma especifica el instrumental necesario para el ensayo, que incluye balanza, probetas graduadas, moldes, comparador de longitudes, tamices,

contenedores, estufa, pisón, llana, entre otros, así como los reactivos requeridos: hidróxido de sodio, agua destilada y solución de hidróxido de sodio.

Para preparar la muestra, se debe cuartear el agregado para obtener una muestra representativa. Si el agregado es grueso, se debe triturar de manera que la toda la fracción pase a través del tamiz IRAM 4,75 mm. Seguidamente, la muestra debe separarse en las fracciones granulométricas indicadas en el Cuadro 8, para finalmente lavarse y secarse a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas o hasta alcanzar una masa constante.

Abertura nominal del tamiz		Masa (%)
Pasa por	Retenido en	
IRAM 4,75 mm	IRAM 2,36 mm	10
IRAM 2,36 mm	IRAM 1,18 mm	25
IRAM 1,18 mm	IRAM 600 μm	25
IRAM 600 μm	IRAM 300 μm	25
IRAM 300 μm	IRAM 150 μm	15
Total		100

Cuadro 8: Dosificación de agregado para preparar las barras de mortero según la norma IRAM 1674.

Para el ensayo se deben moldear tres probetas, como mínimo, con dimensiones de 25x25x285 mm. La mezcla de materiales secos se realiza en una proporción de 1 parte de cemento por cada 2,25 partes en masa de agregado graduado. Para elaborar tres barras, se debe usar 440g de cemento y 990g de agregado, siendo la relación agua:cemento de 0,47 en masa.

El tiempo máximo permitido para el moldeo no debe exceder los 135 segundos después de completar el mezclado original del mortero. Los moldes deben llenarse en dos capas aproximadamente iguales, cada capa debe ser compactada con un pisón para evitar la formación de poros de aire en el interior de la barra. Se debe quitar el exceso de mortero al ras del molde y se alisa la superficie con una llana.

El cemento utilizado debe cumplir con la norma IRAM 50000 (2017) y debe tamizarse por el tamiz IRAM 600 μm antes de su uso. Además, los moldes y pernos deben ajustarse con los requisitos de la norma IRAM 1637 (1992).

Una vez moldeadas, las probetas deben colocarse en una cámara húmeda durante $24\text{h} \pm 2\text{h}$ para permitir el fraguado. Pasado ese tiempo, se desmoldan, se identifican y se realiza una lectura comparativa preliminar. Seguidamente, las probetas se colocan en un contenedor plástico lleno de agua de red hasta su total inmersión. El contenedor se sella y se los coloca en una estufa a $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas.

Después de las 24 horas, se mide la longitud de las barras utilizando un comparador analógico o digital. Las probetas deben retirarse una por una del contenedor y, se debe secar la superficie con un paño húmedo antes de la medición. La lectura debe realizarse en un tiempo máximo de 15 segundos, tan pronto como la probeta se encuentre en posición. Tras la medición en agua, se colocan las probetas en un contenedor con solución de hidróxido de sodio 1N a 80°C (preparada con soluto disuelto en agua destilada). El contenedor se sella y se coloca nuevamente en la estufa durante 14 días. Se deben tomar lecturas periódicas, con un mínimo de 3 lecturas intermedias durante el periodo de 14 días.

Además, se calcula la diferencia porcentual entre la lectura inicial de la probeta y las lecturas obtenidas en cada periodo, en comparación con la longitud de la barra de referencia. Esta diferencia se registra como la expansión de la probeta en diferentes periodos.

La norma recomienda consultar información suplementaria para corroborar los resultados, lo cual puede incluir: examen petrográfico identificar constituyentes reactivos, evaluación de las probetas tras realizar los ensayos para identificar productos de la RAS, como geles, fracturas o coronas de reacción, y la revisión de registros de servicio en campo para evaluar el comportamiento del material en condiciones reales.

CAPITULO 2: MARCO GEOLÓGICO

ANTECEDENTES DE LA GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se sitúa en el sector sudoeste de la provincia de Entre Ríos, y forma parte de la denominada Cuenca Chacoparanense (Fernández Garrasino, 1989b). La cuenca abarca, de manera parcial o total, a las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, Corrientes, Misiones, San Luis, Santiago del Estero, Tucumán, Salta, Formosa y Chaco, y se extiende hacia los países limítrofes. La evolución ha estado marcada por diversos procesos. Inicialmente, se produjo una sedimentación neopaleozoica controlada por subsidencia térmica de origen extensional, representada por depósitos glaciarios del Carbonífero. Esta fase fue seguida por una sedimentación eólica y fluvial del Jurásico superior- Cretácico inferior, influenciada por subsidencia extensional. Finalmente, se registró un periodo de volcanismo extensional representada por flujos de composición toleítica. La sedimentación cenozoica en la cuenca está asociada a depósitos distales de cuenca de antepaís, controlados por sistemas fluviales y aluviales efímeros.

Las primeras descripciones geológicas, estratigráficas y paleontológicas en la región fueron realizados por diversos naturalistas de origen europeo (Pereyra et al., 2002). Entre los primeros trabajos en la región se destacan Darwin (1846), D'Orbigny (1842), Muosy (1860), entre otros.

A partir de la década del ochenta, Florentino Ameghino comienza a trabajar en la región Pampeana (Ameghino, 1889 y 1898) y realizó los primeros esquemas estratigráficos. Frenguelli (1920, 1937, 1939, 1947) contribuyó significativamente al conocimiento geomorfológico y geológico general de la provincia, y propuso un esquema estratigráfico adaptado a la costa del Río Paraná, el cual fue complementado por otros autores en estudios posteriores.

La geología de subsuelo en la provincia de Entre Ríos fue reconocida desde las primeras perforaciones de la Dirección de Geología, Minas e Hidrogeología (de Minería) en el pozo YPF Nogoyá 1, con una profundidad de 2088 mbbp.

A fines de la década del cuarenta y durante la década del cincuenta, ingenieros del Ejército, a través del departamento de Geología, llevaron a cabo más investigaciones en la provincia.

Posteriormente, Chebli et al. (1989) abordó la evolución de la provincia geológica y los procesos de sedimentación y subsidencia, Pádula y Minngramm (1968) contribuyeron al conocimiento mediante sus estudios sobre la estratigrafía y la sedimentación, Urien (1966, 1967 y 1970). Ottmann y Urien (1965), Urien y Ottman (1971), Silva Busso (1999) y Mársico (2013)

proporcionaron importante información sobre los procesos de sedimentación y las características del subsuelo de Entre Ríos. Parker (1990), Parker y Marcolini (1992), Parker y Violante (1993) y Parker et al. (1990, 1994) han sido fundamentales en conocimiento más detallado de la geología, incluyen estudios sobre la estratigrafía, la sedimentología y los procesos geológicos. Asimismo, autores como Violante, et al. (1992), Violante y Parker (1993, 1999, 2000, 2004), Cavallotto (1988, 1995a, 1995b, 1996), Cavallotto et al. (1999; 2002; 2004), Silva Busso (1999), Silva Busso y Amato (2017), Silva Busso, et al. (2004, 2015), Amato y Silva Busso (2005) han aportado datos relevantes en la sedimentología, hidrogeología y geología estructural de la provincia.

La geología de la provincia está detallada en el mapa geológico del SEGEMAR a escala 1:500000, elaborado por Bertolini en 1995, y constituye la cartografía geológica de base para la región.

En cuanto a la estratigrafía del Neógeno, se realizaron varias discusiones y estudios tanto para el sector oriental como en el sector occidental de la provincia. A continuación, se presentan los principales aportes y descripciones: en el sector occidental, Tófalo (1986) describe las Formaciones Yerúa y Fray Bentos, Aceñolaza (2007) la Formación Paraná; Frenguelli (1920), De Alba (1953) y Silva Busso y Amato (2017) la Formación Ituzaingó; Silva Busso y Amato (2017) las Formaciones Alvear y Tezanos Pintos. Mientras que, en la región oriental, Rimoldi (1962) y Gentili y Rimoldi (1979) hacen referencia a la Formación Salto Chico; Reig (1956) describe la Formación Hernandarias; Gentili y Rimoldi (1979) y Silva Busso y Amato (2017) describen la Formación Ubajay, y Bertolini (1995) a las unidades más recientes, quien las atribuyó a la Formación Talavera e incluyó a otras unidades similares y/o correccionales con el complejo sistema deltaico Paraneano (Silva Busso y Amato, 2017).

ESTRATIGRAFÍA

La estratigrafía de la región de Entre Ríos ha sido objeto de numerosos estudios por parte de diversos autores, como Chebli et al. (1999); Gentili y Rimoldi (1979); Herbst (2000); Herbst et al. (2005); Iriondo y Rodríguez (1973), Iriondo (1980, 1987, 1996, 2005, 2010); Silva Busso (1999), Kröhling (2001), Silva Busso, et al. (2011), Silva Busso y Amato (2017), Mársico (2013), entre otros.

Las rocas más antiguas en la región corresponden al basamento cristalino de edad Precámbrica-Paleozoico, que está compuesto por rocas metamórficas y plutónicas ácidas. Sobre este basamento se depositan sedimentos jurásicos continentales de origen fluvial y eólico,

representados por las Formaciones Piramboia y Botucatú, denominada por White (1908) en Brasil y por Silva Busso (1999) en Argentina, y por efusivas mesozoicas de carácter básico atribuibles a la Formación Serra Geral (White, 1908). Superpuesto a la Formación Serra Geral, se encuentran sedimentitas de color rosa- rojizo, atribuidas a la Formación Puerto Yerúa (Herbst, 1969, 1971), que consisten en areniscas gruesas y medianas, seguidas por areniscas finas de la Formación Fray Bentos.

Durante el Mioceno, se deposita la Formación Paraná (d'Orbigny, 1842), compuesta por arcillas verdes con intercalaciones de arenas y fósiles marinos, que representa la ingresión del mar Paranense. Con el retroceso del mar, se desarrolló un gran sistema fluvial, representado por los sedimentos de edad Plio-Pleistocena, atribuidos a la Formación Ituzaingó (Frenguelli, 1920; De Alba, 1953). Mientras que, en el sudoeste de la provincia, se encuentran las Formaciones Alvear (Aceñalaza, 2007) y Tezanos Pintos (Silva Busso, et al., 2011). Es importante destacar, que si bien, estas tres formaciones tienen edades contemporáneas fueron depositados por diferentes procesos fluviales (Silva Busso y Amato, 2017).

En el sector oriental de la provincia, Rimoldi (1962) y Gentili y Rimoldi (1979) describieron depósitos gravosos de origen fluvial, correspondientes a la Formación Salto Chico, casi contemporánea a la Formación Ituzaingó. Subyacente a estos depósitos se encuentran arcillas limosas que intercalan con láminas de arenas y niveles yesíferos, atribuidos a la Formación Hernandarias (Reig, 1956). Estos están seguidos por la Formación Ubajay, caracterizada por depósitos de origen fluvial definida con predominancia de arenas finas a medias intercaladas con conglomerados matriz sostén. Finalmente, la Formación Tezanos Pintos (Iriondo, 1980) de origen eólico completa la secuencia estratigráfica.

La unidad más reciente en la región es la Formación Talavera (Bertolini, 1995). Además, el registro del delta del río Paraná incluyen términos correlacionales de origen estuarico marino muy diversos, como la Formación Atalaya y la Formación Playa Honda (Amato y Silva Busso, 2009).

Era/ Periodo/Época			Unidad estratigráfica		Litología		Ambiente de formación
			Oeste	Este			
CENOZOICO	Cuaternario	Actual	Facies fluviales actuales Fm. Isla Talavera		Arenas silíceas actuales		Fluvial
		Holoceno inferior- Pleistoceno tardío	Fm. Tezanos Pinto	Fm. Ubajay	Limos pardos y castaños		Eólico palustre
		Pleistoceno		Fm. Hernandarias			Fluvial Eólico
			Fm. Hernandarias				
		Plio- Pleistoceno	Fm Alvear	Fm. Salto Chico			
	Fm. Ituzaingó/ Fm Puelches		Arenas amarillentas			Fluvial	
	Terciario	Mioceno medio	Fm. Paraná		Arcillas verdes intercaladas con arenas blanquecinas		Marino
		Eoceno	Fm. Fray Bentos				
MESOZOICO	Cretácico		Fm. Puerto Yerúa		Areniscas amarillentas		
	Cretácico inferior- Jurásico superior	Fm. Serra Geral		Basaltos tolehíticos		Vulcanismo de intraplaca	
		Fm. Botucatú / Fm. Tacuarembó Fm. Piramboia		Areniscas rosadas		Eólico / Fluvial	
Precámbrico			Basamento cristalino		Rocas ígneas metamórficas		

Figura 11: Cuadro estratigráfico de las unidades geológicas en la zona de estudio (modificado de Pereira et al., 2016).

A continuación, se describen las unidades litológicas del área de estudio (Figura 11)

Precámbrico

Paleoproterozoico

Basamento cristalino

Rocas ígneo-metamórficas

El basamento cristalino, de edad precámbrica, aflora en la Isla Martín García y se profundiza hacia el eje de la Cuenca del Salado, donde puede alcanzar más de 6000 metros de profundidad (Pereyra, et al., 2022). El basamento vuelve a aflorar en el Sistema de Tandilia, donde se le denomina Complejo Buenos Aires según Di Paola y Marchese (1974).

Mesozoico

Jurásico

Formación Piramboia

La Formación Piramboia fue definida por Sanford y Lange (1960), y también es conocida como Areniscas Piramboia por Florence y Pacheco (1929). Esta formación está constituida por secuencias fluviales formadas por areniscas cuarzosas finas a muy finas con tonalidades amarillentas a rojizas. En la parte superior, presenta intercalaciones de limonitas y arcilitas. La misma fue reconocida en el subsuelo de Entre Ríos por Silva Busso (1999) y Silva Busso y Fernández Garrasino (2004).

Formación Botucatú

La Formación Botucatú fue descrita por Sanford y Lange (1960), Gonzaga de Campos (1889) y Salamuni y Bigarella (1967), también es conocida como Areniscas de Botucatú (Walther, 1911). Está conformada por sedimentos eólicos, y se divide en dos miembros: el inferior compuesto por areniscas finas y arcillosas de color gris a verdoso, areniscas rosadas y limolitas y fangolitas verdosas y rojizas; y el superior conformado por areniscas cuarzosas finas a medianas, bien seleccionadas y con escaso cemento carbonático (Silva Busso, 1999; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004).

Jurásico-Cretácico

Formación Serra Geral

La Formación Serra Geral (White, 1908) está formada por derrames basálticos tolehíticos resultante del vulcanismo extensional, hacia fines del Jurásico y durante el Cretácico, asociado a la apertura del Océano Atlántico. Se componen de dos miembros: el Miembro Solari (Herbst, 1971), constituido por areniscas rojizas de ambiente continental desértico, estratificadas y con intercalaciones de niveles de origen volcánico; y el Miembro Posadas (Gentili y Rimoldi, 1979), constituido por diferentes coladas basálticas de composición tolehíticas, color pardo rojizo, con amígdalas rellenas por amatistas, calcedonia, carbonatos y zeolitas, entre otras.

Cenozoico

Paleógeno

Formación Puerto Yerúa

La Formación Puerto Yerúa fue descrita por Frenguelli (1939) clasificándola como sedimentitas del grupo C. Posteriormente, De Alba y Serra (1959), la denominaron Formación Puerto Yerúa. La Formación se caracteriza por facies compuestas de conglomerados, areniscas con estratificación entrecruzada y pelitas, los cuales presentan una rápida variación granulométrica tanto en sentido lateral como vertical.

En la base, se observa una discordancia erosiva, mientras que hacia el techo transiciona a areniscas y pelitas (Tófaló, 1986). Este tipo de depósitos fue originado por corrientes unidireccionales con energías variables, que oscilaron entre altas y moderadas. Las secuencias superiores contienen pelitas depositadas por corrientes de baja energía y procesos de suspensión.

Neógeno

Mioceno temprano

Formación Fray Bentos

La Formación fue inicialmente denominada por Herbst (1969, 1971), aunque es conocida por varios nombres, como “Estratos de Fray Bentos”, Formación Arroyo Castillo y Formación Fray Bentos (Herbst, 1969 y 1971), y Formación Arroyo Ávalos (Gentili y Rimoldi, 1979). En el subsuelo de Buenos Aires, se denominó Formación Olivos a depósitos similares detectados a través de perforaciones.

Esta unidad está compuesta principalmente por depósitos continentales, que se caracterizan por areniscas muy finas con cemento arcilloso y calcáreo de color pardo rosado. Pueden presentarse homogéneos o con estratificación grosera. La acción del viento ha dado lugar a facies loessicas con participación restringida de procesos fluviales, resultando canales efímeros que se representan en el registro geológico por conglomerados (Chebli y Spalletti, 1987).

Los calcretes presentes son epigenéticos y derivan de la progresiva calcificación del sedimento loésico en un ambiente vadoso (Tófaló, 1987). Estas sedimentitas epiclásticas han sido asignadas al Terciario por varios autores, incluyendo Herbst (1971), Gentili y Rimoldi (1979) y Bossi (1966). Sin embargo, estudios más recientes asignan a la sección superior al Plioceno (Russo et al., 1979).

Formación Paraná

La unidad ha sido objeto de estudio por numerosos autores a lo largo de los años, incluyendo a d'Orbygni (1842) quien fue uno de los primeros en describir la unidad geológica, Aceñolaza (1976) a través de estudios enfocados en la estratigrafía y geología. Windhausen (1931) definió diferentes unidades de la formación en las Barrancas de Paraná. Camacho (1967) propuso una subdivisión de la Formación en dos unidades distintas, Formación Paraná y Formación Entre Ríos, basándose en diferencias litológicas y paleontológicas, mientras que Yrigoyen (1969)

nombró a la unidad como Formación Paraná, proporcionando una descripción más detallada de sus características principales.

La unidad corresponde a depósitos marinos miocenos, depositados en la transgresión del Mar Paranense. Esta formación se caracteriza por una sucesión de sedimentos que incluyen arenas, limolitas y arcilitas de tonalidades grises verdosas, a las que se le superponen arenas arcillosas y calizas organógenas con abundantes fósiles marinos, que, en ocasiones constituyen bancos con continuidad lateral y de gran espesor (Aceñolaza, 2000, 2007).

La sección inferior está compuesta principalmente por sedimentos arenosos cuarzosos, bien seleccionados y densos, en su base en ocasiones se detectan conglomerados compuestos por rodados de calcedonia. La sección superior es conocida, por algunos autores, como “Mioceno Verde”, está compuesta por arcillas verdosas masivas, con escasas intercalaciones de arenas y arcillas calcáreas. Estas arcillas son compactas y pueden contener yeso, restos carbonosos y alto contenido fosilífero.

Russo et al. (1979) sugieren que las secuencias se depositaron en un extenso mar de poca profundidad, con aguas templadas y cálidas que cubrieron gran parte de la Cuenca Chacoparanense. Además, otros autores como Groeber (1961), Yrigoyen (1975) y Camacho (1967) documentaron la presencia de fósiles marinos de edad Mioceno medio-Mioceno superior en niveles basales y cuspidales entre las localidades de Diamante y Hernandarias.

Aceñolaza (2000), describe un afloramiento de la Formación Paraná entre la ciudad de Paraná y Aldea Brasileira hasta la desembocadura en el Paraná. Silva Busso y Weisser (2018) lo han identificado al sudeste en el cauce del Arroyo Doll (Figura 12), desde el puente de la ruta provincial 11 hasta varios kilómetros aguas abajo, donde observaron una sección de varios metros de espesor.

En la región de Victoria se localizaron afloramientos en la cuenca del Arroyo Corrales y en la cantera Tres Lagunas (actualmente inactiva), describiéndose como arena de tonalidades amarillentas con estratificación entrecruzada cuyo espesor es variable (Figura 13).

En la localidad de Aldea Brasileira, se observaron afloramientos en el frente de cantera perteneciente a la empresa Cristamine (Figura 14), cuyo perfil estratigráfico se detalla en el Anexo 1, denominado “Perfil FC-Aldea Brasileira”. Por otra parte, la petrografía de las arenas blanquecinas se detalla en el Anexo 2: “Petrográficas de las Formaciones Paraná e Ituzaingó”.



Figura 12: Arroyo Doll ($32^{\circ}18'21.96''S$ - $60^{\circ}25'33.83''O$), afloramientos Formación Paraná. A y B laterales del arroyo (lado sur del puente). C: laterales del arroyo (lado norte del puente).



Figura 13: Afloramientos de la Formación Paraná, en el frente de cantera inactivo perteneciente a la Cantera Tres Lagunas ($32^{\circ}43'23.57''S$ - $59^{\circ}58'54.72''O$) ubicada en la localidad de Victoria.



Figura 14: Frente de explotación de la Cantera de Cristamine ($31^{\circ}53'2.31''S$ - $60^{\circ}36'43.24''O$), ubicado en la localidad de Aldea Brasileira, los afloramientos corresponden a la Formación Paraná.

Plioceno a Pleistoceno inferior

Formación Ituzaingó (Plio-Pleistoceno)

La unidad ha recibido distintas denominaciones a lo largo del tiempo, incluyendo Rionegrense terrestre (Frenguelli, 1920), Formación Salto Chico (Rimoldi, 1962) y Formación Ituzaingó (De Alba, 1953). A esta, se le asignó la edad Plio-Pleistocena.

La Formación es de origen fluvial, atribuido a un viejo sistema del Paraná, y se considera como Plioceno medio hasta Pleistoceno inferior (Silva Busso et al., 2004). Se describe como una secuencia principalmente arenosa, con tamaños que varían de grueso a fino, aunque predomina las arenas de tamaño mediano. Poseen colores blanquecinos, amarillos y rojizos, presentando abundante estratificación entrecruzada planar y parcialmente solidificación con cemento ferruginoso.

El área tipo se ubica en la localidad de Ituzaingó, al norte de la provincia de Corrientes. Sus depósitos se reconocen en las provincias de Corrientes, Entre Ríos, Chaco y Santa Fe.

En la provincia de Entre Ríos, la formación está cubierta por distintas unidades sedimentarias, en los interfluvios más elevados subrayasen depósitos loésicos de la Formación Hernandarias, mientras que en las zonas con cotas menores a 20 metros es cubierta por sedimentos de terrazas litorales o planicies aluviales holocenos. En el Delta del Río Paraná, se apoya de forma erosiva sobre la Formación Paraná y está cubierta por sedimentos aluviales arenosos producto de la removilización aluvial de las arenas Puelches.

Según Chebli y Spalleti (1987), al ambiente de sedimentación lo describen como fluvial de mediana energía, cuyos sedimentos rellenaban a una cuenca con escasa subsidencia lejana con respecto a la cuenca de aporte (escudo brasileiro).

Se observaron afloramientos de la Formación en el Camping Toma Vieja, ubicado en la localidad de Paraná (Figura 15), cuyo perfil estratigráfico se detalla en el Anexo 1, denominado como "Perfil CV-Paraná". Por otra parte, la petrografía de las arenas se detalla en el Anexo 2: "Petrografías de las Formaciones Paraná e Ituzaingó".



Figura 15: Afloramiento Formación Ituzaingó (31°42'10.72"S - 60°28'56.67"O) ubicado en el Camping Toma Vieja, localidad de Paraná.

Cuaternario

Pleistoceno inferior

Formación Alvear

La Formación Alvear es descrita por Iriondo (1980) como una secuencia depositada bajo condiciones semiáridas y ambiente palustre.

Está constituida por sedimentos limo arenosos, finos, con intercalaciones fluviales y lacustres. Hacia el techo de la unidad, los sedimentos intercalan con depósitos de calcretes con estructuras pedogenéticas que conforma un piso en los cauces fluviales que atraviesan la planicie loésica, formando resaltos en el perfil longitudinal de los ríos y arroyos.

En sectores, la Formación Alvear, está integrada por nódulos y capas horizontales y verticales de carbonato formando un enrejado, los cuales presentan tonalidades blanquecinas e incluyen material pelítico de coloraciones rosa a castaño verdoso y láminas de manganeso y óxido de hierro.

Formación Hernandarias

Formación Hernandarias fue definida por Reig (1956) como una sucesión de arcillas limosas con capas finas de arena e intercalaciones de niveles yesífero. La sección inferior presenta color gris plomizo a verdoso con intercalaciones de yeso, mientras que, la sección superior es limo-arcillosa de color castaño rojizo y contiene concreciones calcáreas. Está cubierta sedimentaria se extiende sobre la mayor parte de la provincia de Entre Ríos (Silva Busso y Amato, 2017).

Formación Ubajay

La Formación Ubajay es descrita por Gentili y Rimoldi (1979) en afloramientos del Parque Nacional El Palmar, la cual también es conocida como Formación El Palmar (Iriondo, 1980). Se caracteriza por una sucesión de origen fluvial, compuesta por conglomerados matriz-sostén con clastos de calcedonia, cuarzo, ópalo y líticos (areniscas y basaltos). Los clastos son bien redondeados y de mediana a baja esfericidad, están dispuestos en una matriz arcillo arenosa de tonalidades rojizas, amarillentas y ocre, interpretadas como expresión de una terraza alta del Río Uruguay.

Los depósitos de la Formación presentan variaciones litológicas que llevan a su confusión con la Formación Salto Chico. No obstante, la Formación Ubajay se distingue por la predominancia de arenas finas a mediana de colores rojos, amarillentos y ocre, que se intercalan con niveles conglomerádicos matriz-sostén de poco espesor (Silva Busso y Amato, 2017).

Sus afloramientos se observan en canteras y arroyos del sector noreste de la provincia, aunque solo niveles cuspidales.

En la localidad de Colón se observaron afloramientos de la Formación en los frentes de explotación pertenecientes a las canteras La Chola II y El Pinar (Figura 16). En la cantera La Chola II se describió el perfil estratigráfico, el cual se detalla en el Anexo 1, denominado “Perfil FC-Colón:”.

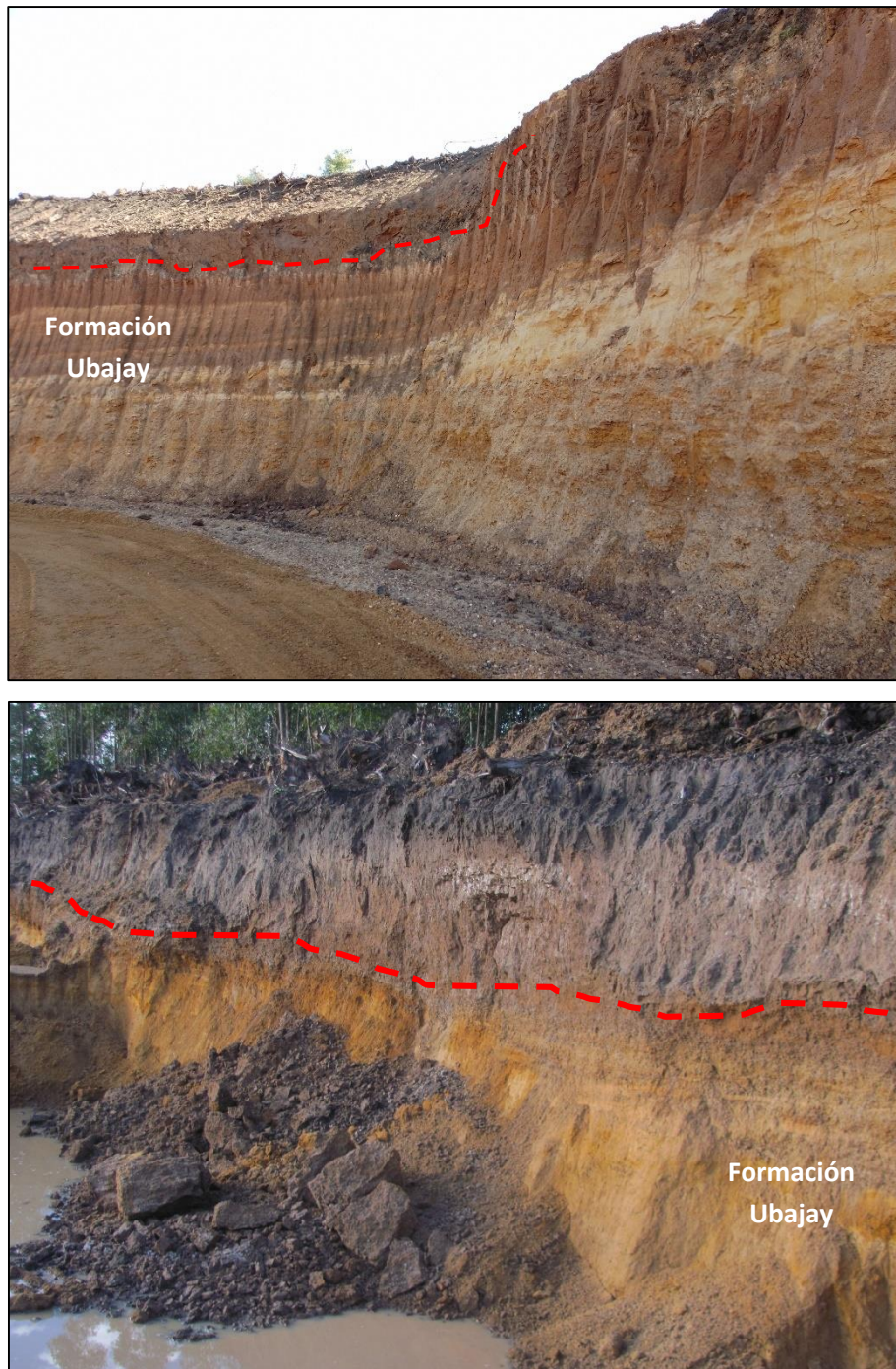


Figura 16: Afloramientos de la Formación Ubajay en frentes de cantera ubicadas en la localidad de Colón, Entre Ríos. Frente de cantera superior: Cantera La Chola II (31°59'58.23"S - 58°11'35.74"O); Frente de cantera inferior: Cantera El Pinar (32°17'56.47"S - 58° 7'47.85"O)

Formación Tezanos Pinto

La Formación Tezanos Pinto, definida por Iriondo (1980), se caracteriza por sedimentos de origen eólico depositados en un clima seco. Representa una de las unidades de loess depositado durante el Último Máximo Glacial (Iriondo y Krohling, 1995). Estos sedimentos son loess masivo, friable, de color castaño, y en ocasiones presentan concreciones de carbonatos.

La mezcla de materiales volcánoclasticos alterados y frescos en la fracción arena y limo de la Formación Tezanos Pinto indica la existencia de múltiples fuentes de procedencia. Incluye un aporte directo de lluvia de cenizas volcánicas y un aporte indirecto por removilización de depósitos volcánoclasticos andinos. Además, una fuente secundaria está compuesta por minerales provenientes de las altas cuencas de los ríos Paraná y Uruguay (Kröhling et al., 2006).

Holoceno

Formación Isla Talavera

La Formación Isla Talavera es descrita por Bertolini (1995), en el Mapa Geológico de la Provincia de Entre Ríos, corresponden a depósitos de una ingresión holocénica sobre una unidad fluvial más antigua. Durante la fase regresiva posterior, las corrientes marinas se desplazaron en dirección dextrógira, dispersando los sedimentos aportados por el Río Paraná en el margen actual de Entre Ríos (Iriando y Scotta, 1978), desarrollándose un cordón litoral que encerró un cuerpo de agua. Los afluentes comenzaron a formar deltas menores, mientras que los afluentes bonaerenses desarrollaron un amplio estuario. Durante la regresión se formaron largas series de playas paralelas (Silva Busso, et al., 2004).

Facies Fluviales Actuales

Corresponden a una serie de depósitos fluviales recientes, que incluyen sedimentos de grava, arena, limo y arcillas. Las arenas se presentan bien redondeadas, junto con las gravas son transportadas y depositadas por corrientes de alta energía. Estas facies son típicas en zonas de cauce principal y en zonas donde el río tiene una mayor velocidad. Por otra parte, los limos y arcillas se depositan en áreas donde la velocidad del agua es baja, permitiendo que estos sedimentos finos se asienten. Son comunes en áreas de inundación y en bancos de inundación de menor energía. Estos depósitos reflejan la dinámica de las corrientes y la interacción con el entorno del río.

GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio corresponde al “Delta del Río Paraná”, el cual se extiende desde la localidad de Diamante, en la provincia de Entre Ríos, hasta el sur de la localidad de San Fernando, en la provincia de Buenos Aires (Silva Busso, et al., 2004), abarcando aproximadamente 17000 kilómetros cuadrados. La evolución geomorfológica de la región ha sido investigada por diversos autores, entre los que se encuentran Páez y Prieto (1993) y Prieto (1996), Bonfils (1962), Iriondo y Scotta (1978), Parker (1990), Malvárez (1997), Cavallotto (1995, a y b), Cavallotto et al. (1999, 2004), Amato y Silva Busso (2005, 2009).

Rouiller y Silva Busso (2008), en base al conjunto de procesos y agentes que actúan en la región distinguen dos áreas, “Área de Depositación de Sedimentos Pre-Deltaicos”, de ambiente estuarino-costero, y “Área de Sedimentos Deltaicos Actuales”, de ambiente fluvio deltaico. Estas áreas se asocian a la evolución del nivel del mar en los últimos 20.000 años y se caracterizan por unidades que corresponden a los eventos ocurridos en el Cuaternario reciente (Figura 17, A).

El proceso inicia previo a un evento de carácter erosivo que acompañó al retiro del nivel del mar durante el último periodo glacial y que configuro el último paleo-valle del Río de la Plata desde el área del Paraná inferior y hacia el sureste. A partir de este evento las unidades las definen:

- Depósitos relictos del Ibicuy (12000-8000): Durante el aumento de nivel del mar y posterior al proceso erosivo y desglaciamiento, es posible que la actual zona de Isla Ibicuy en el delta pudo haber constituido una zona emergida que se preservó debido a la dinámica estuarino-marina y los vientos dominantes, durante aquel periodo y posterior al mismo. La presencia de material psamítico (arenas), facies de playa e incluso cordones de dunas vegetados son considerados relictos de condiciones ambientales diferentes a las actuales.
- Paleoambiente anastomosado (12000-8000): El aumento del nivel del mar provocó un cambio en el nivel de base de los Río Paraná y Uruguay. Los depósitos fluviales al norte del Delta lo asocian a un paleo ambiente fluvial anastomosado en equilibrio con la ingresión marina.
- Paleoambiente de interacción fluvio costera (8000-6000): Tras el máximo glacial, comenzó la trasgresión holocénica con la depositación de sedimentos finos, pre-deltaicos, aportados por la descarga del río y afectados por la aparición de una zona móvil de máximo gradiente salino. Esto generó un manto fangoso arcilloso continuo de color gris verdoso con restos aislados de molusco bivalvos. Durante las etapas finales de la transgresión, la colmatación del sistema habría provocado la conformación de áreas semiprotegidas con

generación de llanuras litorales dominadas por la acción mareal, caracterizadas por sedimentos finos de carácter limo grueso a fino y limo arcilloso.

- Paleoambientes de playa y cordones litorales (6000-3000): El descenso gradual del nivel del mar (3000-6000 AP) hasta la posición actual, provocó un fuerte avance costero, con la generación de cordones litorales sucesivos, algunos con material fosilífero de moluscos y bivalvos, vinculados a distintas líneas de playa. Estos depósitos limitados por cordones, se caracterizan por sus colores gris castaños, castaño claro o gris medio, y su composición textural entre arena muy fina-fina a limo fino arcilloso.
- Paleoambiente de planicies de marea (6000-3000): Al mismo tiempo, un nuevo desplazamiento de la Zona de Máximo Gradiente Salino (ZMGS) en sentido opuesto al registrado durante la trasgresión, favoreció a la formación de un nuevo depósito de material fino, favoreciendo a la formación de llanuras fangosas que evolucionaron, por restricción ambiental, a llanuras de marea a marismas. Estas llanuras fangosas fueron cortadas por una serie de canales de marea.
- Planicie de inundación (6000-3000): Consecuencia del retiro del ambiente estuárico-marino, las facies fluviales de los actuales ríos tributarios del Sistema del Plata progradaron sobre el anterior, constituyendo un conjunto de sedimentos limosos-arenosos o arcillo-limosos.
- Delta actual (3000-actual): A partir de los 3000 años hasta la actualidad, los depósitos de fango migraron a su posición actual, formando los depósitos pelíticos de la Bahía Samborombon y los de Barra del Indio.
- Fluvial actual (3000-actual): Se caracteriza por la existencia de múltiples cursos de tipo meandrosos, en parte sesgados, con la formación de albardones debido crecientes sucesivas. Estos albardones forman islas con bordes altos y en su interior áreas bajas y anegadizas, distribuidas con sedimentos limosos-arenoso o arenas finas-muy finas en el área de albardones perimetrales expuestos a mayor energía del medio y de tipo fango arcillosos en las áreas centrales y de abandono más protegidas.

A partir del mapa geomorfológico elaborado por Roullier y Silva Busso (2008), se realizó una ampliación de las unidades definidas por los autores. Asimismo, se definió la unidad “Depósitos de dunas actuales” correspondiente a depósitos de arenas silíceas actuales de origen eólico (Figura 17, B).

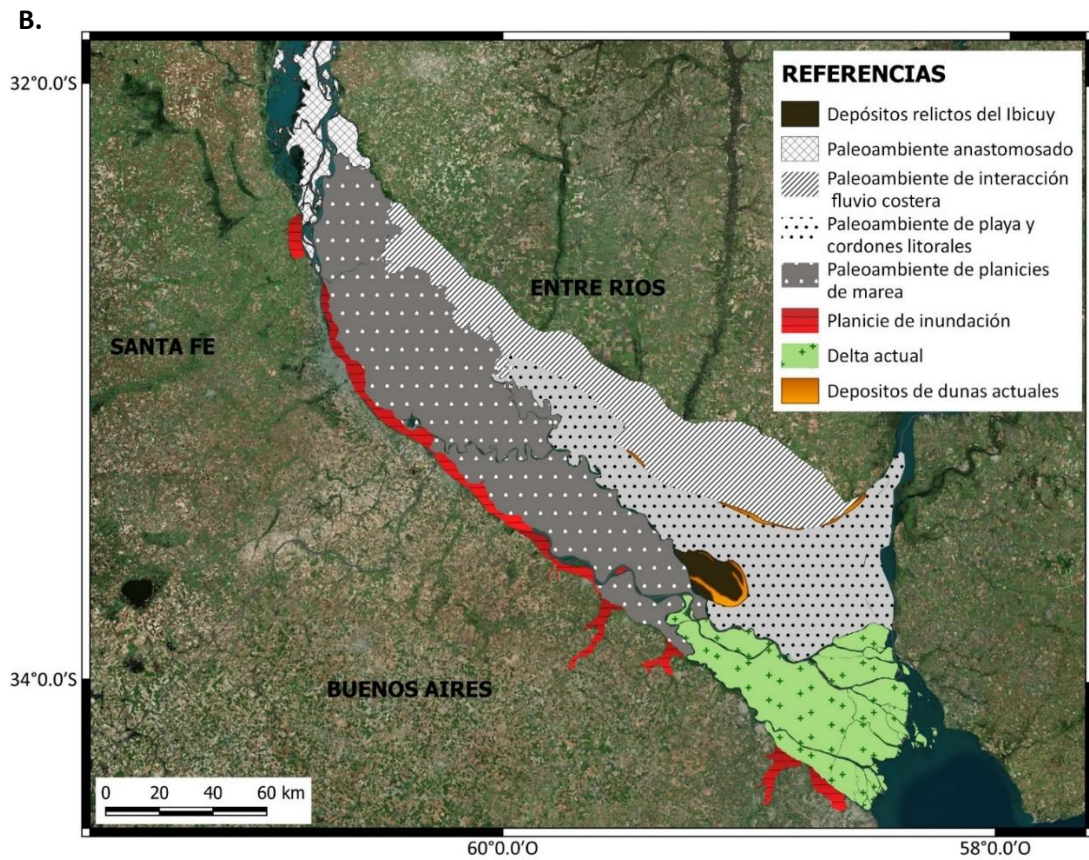
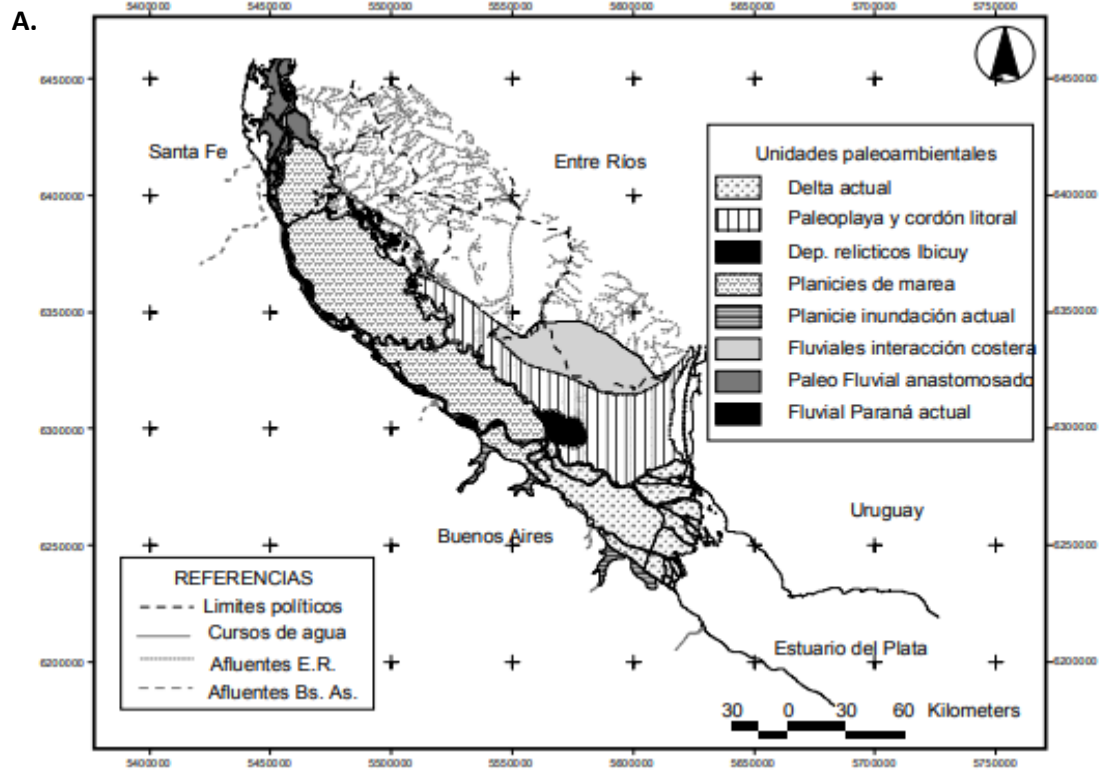


Figura 17: A. Unidades geológicas del Delta actual descritas por Roullier y Silva Busso (2008). B. Mapa geomorfológico modificado.

EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

La evolución regional de la zona ha sido descrita por Cavallotto et al. (1999), Amato y Silva Busso (2009) y Pereyra, et al. (2022). El proceso comienza durante el ciclo Brasileño, en el Precámbrico, con la intrusión de rocas ígneas correspondiente a un arco magmático asociado a la acreción continental que dio lugar a la formación de Pangea. Estas rocas presentan un grado variable de metamorfismo, de acuerdo con la evolución tectónica regional del Cratón del Río de la Plata, y fueron parcialmente cubiertas por sedimentitas de ambientes de plataforma, las cuales afloran en las Sierras Septentrionales.

Durante el Jurásico, comenzaba el desmembramiento de Gondwana y la apertura del Océano Atlántico, representado por la efusión de placas en un ambiente de rift de la Formación Serral Geral. Esta Formación está compuesta por basaltos de composición toleítica y asociados a ellos se encuentran los depósitos de sedimentitas marinas y continentales jurásicas y cretácicas.

En el Neógeno se depositaron sedimentos de las Formaciones Puerto Yerúa y Fray Bentos (Tófolo, 1986), sobre estas suprayacen arcillas verdes azuladas y verdes, con intercalaciones arenosas y abundantes fósiles marinos de edad miocenos, que se extienden en la región de la cuenca Chacoparanense, correspondientes a la Formación Paraná (Silva Busso y Amato, 2017).

Sobre la Formación Paraná y parcialmente interdigitados en su sector superior, se acumularon arenas y gravas fluviales que correspondieron a un paleosistema fluvial, el cual progrado al antiguo ambiente marino, cuyos depósitos son denominados Arenas Puelches, Formación Ituzaingó y Formación Salto Chico. Hacia el techo, interdigitan con depósitos loésicos del Pleistoceno inferior, cubiertos parcialmente por depósitos eólicos de edad Pleistoceno superior.

Finalmente, se depositaron sedimentos fluviales y eólicos del Pleistoceno superior-Holoceno (Postpampeanos), cubiertos parcialmente de depósitos marinos y estuaricos correspondientes a la ingresión holocena. Estos incluyen facies de planicies de marea y albuferas, así como facies de cordones litorales. Con el retiro del mar, se produjo la progradación de un ambiente deltaico y fluvial sobre el anterior, dando lugar al desarrollo del actual Delta del Paraná.

CAPITULO 3: RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados en relación con los objetivos establecidos en el presente trabajo de licenciatura. Para determinar el límite máximo admisible de la calcedonia, se utilizaron agregados de las Formaciones Paraná y Ubajay con el fin de elaborar “agregados de síntesis” y ensayarlos mediante el método acelerado de barra de mortero. Por otro lado, para evaluar reacción álcali sílice en agregados naturales, se utilizaron muestras de las Facies Fluviales Actuales extraídas en distintas latitudes del lecho del río Paraná mediante embarcaciones.

Análisis de la calcedonia ante la RAS

Se realizaron relevamientos y toma de muestras de dos canteras ubicadas en la localidad de Colón, provincia de Entre Ríos (Figura 18, B). Estas canteras extraen canto rodado y arena, a cielo abierto, de la Formación Ubajay (muestras RAS 022 a RAS 027, Anexo 3). Para analizar el desempeño de la calcedonia ante la RAS y, establecer un límite admisible, se llevó a cabo el examen petrográfico de las muestras, y posteriormente se separaron los clastos de calcedonia en subgrupos según su color, opacidad y estructura interna. A cada subgrupo se les realizó cortes petrográficos para determinar el contenido de calcedonia (Anexo 2.A). En base a ello, se apartó al subgrupo de clastos de calcedonia color castaño, translúcido y sin estructura interna, los cuales fueron triturados en las fracciones establecidas por la norma IRAM 1674.

Además, se realizaron “agregados de síntesis” compuestos por la mezcla entre un agregado no reactivo y la calcedonia seleccionada anteriormente, las proporciones de las muestras se detallan en el Cuadro 9. Como agregado no reactivo se utilizó la muestra RAS 038, correspondiente a la Formación Paraná; petrográficamente presenta bajo contenido de minerales potencialmente reactivo (0,6% de calcedonia y 0,1% de cuarzo microcristalino) y, en el ensayo acelerado de barra de mortero, la expansión fue de 0,1% (Cuadro 10).

Los “agregados de síntesis” fueron ensayados mediante el método acelerado de barra de mortero durante 16 días.

Contenido de calcedonia (%)	“AGREGADO DE SÍNTESIS” Masa en %	
	Calcedonia	RAS 038
0,6	0	100
1,0	0,4	99,6
1,5	0,9	99,1
2	1,4	98,6
3	2,4	97,6
3,5	2,9	97,1
10	9,4	90,6
15	14,4	85,6
20	19,4	80,6
100	100	0

Cuadro 9: Dosificaciones utilizadas para la elaboración de los “agregados de síntesis” utilizados para evaluar la calcedonia ante la RAS. Como agregado no reactivo se utilizó la muestra RAS 038 correspondiente a arenas de la Formación Paraná, mientras que la calcedonia se obtuvo de la selección de cantos rodados extraídos de la Formación Ubajay.

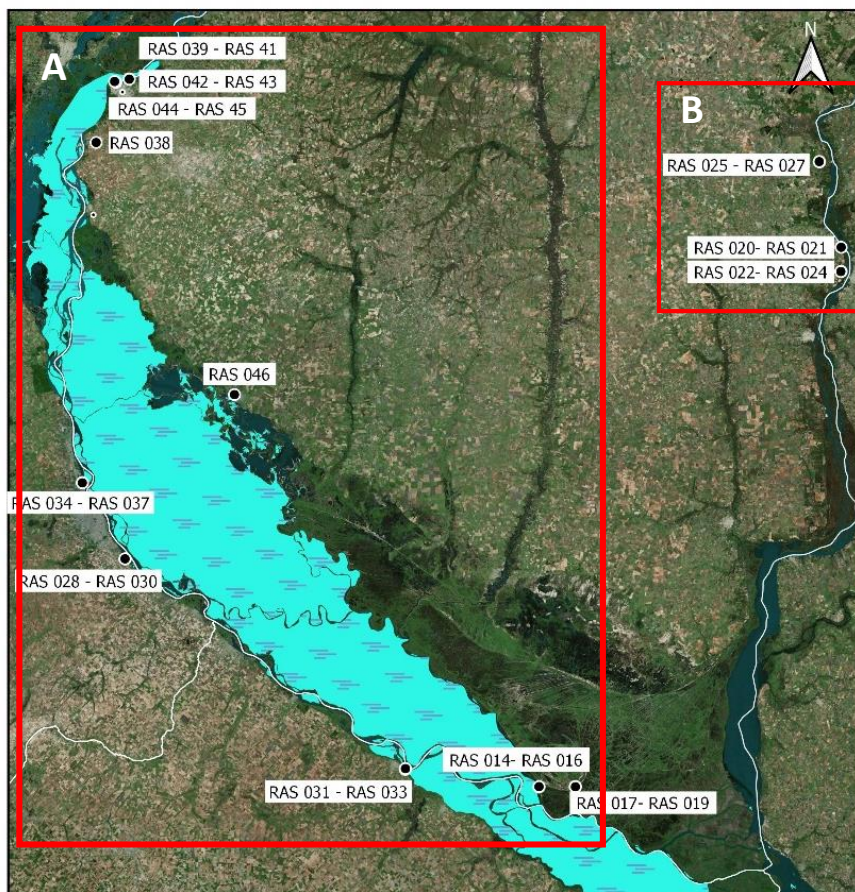


Figura 18: A. Ubicación de las pilas de acopio donde se extrajeron las muestras para evaluar la reactividad en distintas latitudes del río Paraná (dato del kilómetro de extracción otorgado por las areneras). B. Ubicación de las muestras utilizadas para evaluar el desempeño de la calcedonia ante la RAS.

Frente de cantera	Muestras	Minerales potencialmente reactivos (%)		Barra de mortero acelerado Expansión (%)
		Calcedonia	Qzr	
FC-CR2	RAS 038	0,6	0,1	0,01

Cuadro 10: Resultados de muestra RAS 038, utilizada por sus resultados en la elaboración de agregados de síntesis.

Los resultados del método acelerado de barra de mortero se presentan en la Figura 19. Se observó que los “agregados de síntesis” que contienen 3% y 5,9% de calcedonia son reactivos, según la norma IRAM 1512 (2013). En contraste, los demás agregados se clasifican como no reactivos (expansión menor a 0,1%).

La relación entre la expansión y el contenido de un agregado reactivo se debe al denominado efecto pessimum. Staton (1940), demostró que una cierta proporción de algún agregado silíceo reactivo causaba la mayor expansión del hormigón, y que la expansión disminuía cuando el contenido del agregado reactivo aumentaba o disminuía en relación a esa proporción pessimum. Asimismo, observo que, para una proporción fija de agregado reactivo, la expansión se volvía máxima en un cierto tamaño de partículas, y que la expansión disminuía o aumentaba a partir del tamaño pessimum. Esto permite explicar la disminución de expansión que presentan aquellos agregados con contenidos inferiores o superiores a 5,9% de calcedonia.

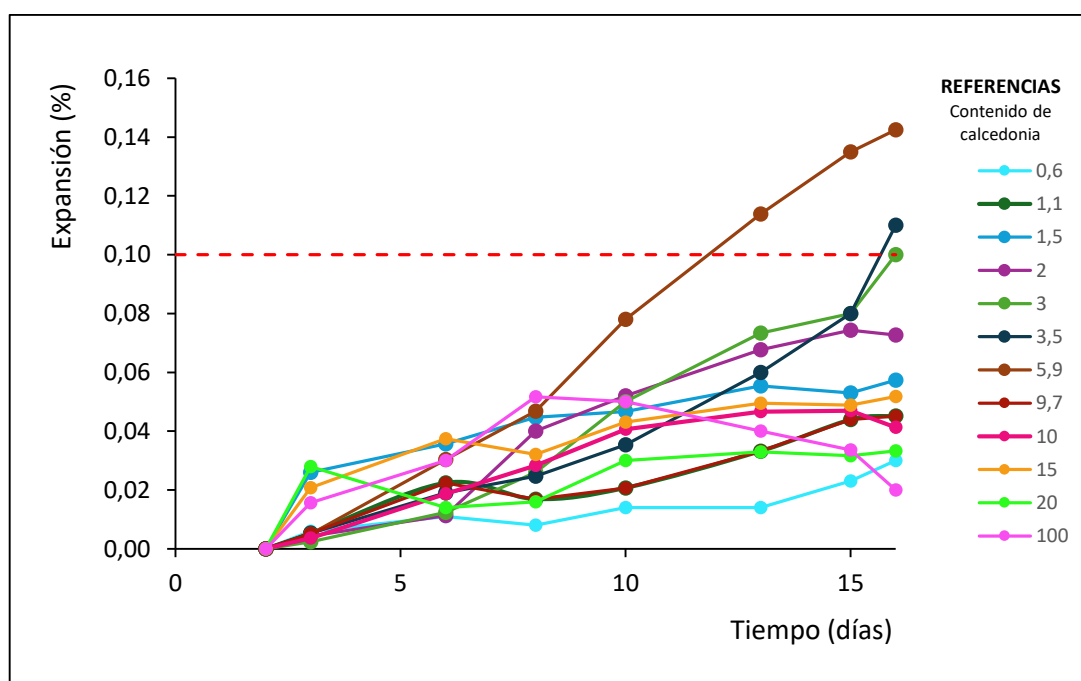


Figura 19: Gráfico Expansión (%) vs. Tiempo (días) de los “agregados de síntesis” obtenido en el ensayo acelerado de barra de mortero (IRAM 1674). El comportamiento de cada muestra es representado por una curva cuyo contenido de calcedonia se detalla en las referencias.

Por otra parte, se analizó la relación entre la expansión y el contenido de calcedonia (Figura 20), con el fin determinar el máximo admisible y la proporción pessimum. Se observó una expansión máxima en la muestra que contenía 5,9% de calcedonia y que, en aquellos agregados con mayor o menor proporción de calcedonia, la expansión disminuía.

Por otra parte, de acuerdo con la norma IRAM 1512 (2013), los agregados con contenido de calcedonia entre 3% y 7,9% son reactivos, mientras que aquellos con proporciones menores a 3% y mayores a 7,9% son inicuos o no reactivos.

Finalmente, la intersección entre la curva y el límite de expansión de 0,10% permitió determinar que el máximo admisible de calcedonia es de 3%.

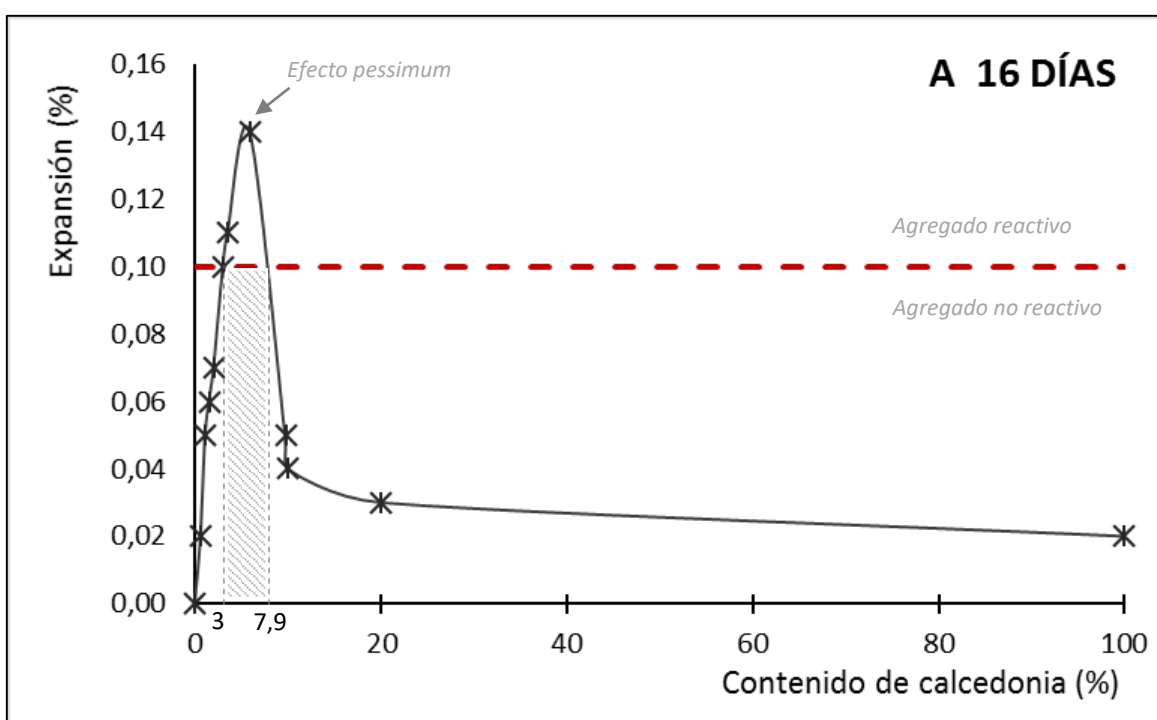


Figura 20: Gráfico de Expansión (%) vs. Contenido de calcedonia (%), en línea punteada se referencia la intersección entre la curva y el límite de expansión de 0,10%. Por otra parte, se puede observar la proporción pessimum de la calcedonia cuya expansión es la máxima alcanzada.

Desempeño de arenas silíceas de las Facies Fluviales Actuales del lecho del Río Paraná, entre el kilómetro 632 y el kilómetro 230.

Se analizó la reactividad de los agregados fluviales extraídos entre el kilómetro 632 y el kilómetro 230 del Río Paraná (Figura 18, A y Anexo 3). Para ello, se realizó el análisis granulométrico (IRAM 1505), el examen petrográfico (IRAM 1649) y el ensayo acelerado de barra de mortero (IRAM

1674) de ocho muestras distribuidas a lo largo del río, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 11.

La distribución granulométrica de las muestras se categorizó en los siguientes tamaños de grano: limo arcilla (< 75µm), arena fina (75µm a 0,6 mm), arena mediana (0,6 mm a 2,36 mm), arena gruesa (2,36 mm a 4,75mm) y grava (>4,75mm) (Figura 21). Mientras que las petrografías de las muestras se llevaron a cabo bajo lupa binocular, según los lineamientos de la norma IRAM 1649.

Id	Kilómetro sobre Río Paraná	Ubicación		Ensayo barra de mortero	Examen petrográfico	
		Latitud	Longitud	Expansión (%)	Qzm (%)	Calc (%)
RAS 039	632	31°35'56.96"	60°19'27.95"	0,19	2,4	17,5
RAS 042	631	31°35'25.41"	60°18'37.41"	0,19	1,5	18
RAS 041	609	31°41'55.84"	60°27'50.27"	0,01	0,1	4,5
RAS 043	591	31°42'45.93"	60°35'15.95"	0,01	<0,1	3,4
RAS 035	431	32°51'29.28"	60°41'14.37"	0,04	<0,1	3,6
RAS 028	405	33° 4'6.63"	60°33'16.73"	0,07	0,1	4,1
RAS 031	274	33°41'22.76"	59°37'35.02"	0,14	0	5,9
RAS 014	230	33°45'25.15"	59°10'53.22"	0,06	0,6	1,5

Cuadro 11: Identificación y ubicación de las muestras ensayadas junto con los resultados obtenidos en el ensayo de barra de mortero acelerado y en el examen petrográfico. Solo se presenta el contenido de minerales potencialmente reactivos. Ref: Qzm: cuarzo microcristalino; Calc: calcedonia.

De acuerdo con varios autores, el grado de reactividad de los agregados no solo depende de la presencia de minerales reactivo, sino que incluyen otros factores como el porcentaje y el tamaño de grano (Falcone y Coelho dos Santos, 2013). Foray et al. (2004) destacan que el tamaño de las partículas tiene un impacto significativo en la RAS, aunque no se observa una relación directa entre la deformación producida y la superficie específica del agregado. También destaca que los agregados de reacción rápida tienden a causar una mayor expansión cuando su tamaño es menor, lo que asocia con el aumento de la superficie específica expuesta. Sin embargo, partículas de tamaños muy finos pueden inhibir la reactividad al producir un efecto puzolánico.

De acuerdo con estos autores, se analizó la distribución granulométrica, los porcentajes de los minerales potencialmente reactivos (calcedonia y cuarzo microcristalino) y la expansión de los agregados del río Paraná.

Los resultados fueron correlacionados e interpretados y, permitieron definir tres secciones a lo largo del río (Figura 21):

- a. **Sección 1 - Reactivo:** Abarca el tramo desde el Km 632 hasta el Km 620 aproximadamente. Este tramo corresponde a un agregado natural con predominio de arenas medianas (58 % a 73%) y baja proporción de arena fina (16% a 34%) y gruesa (10%). Está constituida principalmente por cuarzo (77%) y calcedonia (17,5% - 18%) y en menor proporción por cuarzo microcristalino (1,5% a 2,4%), partículas friables, fragmentos líticos, restos carbonosos y minerales máficos. El ensayo de barra de mortero acelerado clasifica al agregado como reactivo.
- b. **Sección 2 – No reactivo:** abarca el tramo desde el Km 620 hasta Km 230, excepto en los alrededores del Km 274. En este tramo el agregado natural, se caracteriza por la predominancia de arenas finas que se incrementa hacia el sur (87% a 99%) y su bajo contenido de arenas medianas (0,5% a 12%) y gruesas (<1%). Petrográficamente, está constituida principalmente por cuarzo (92 a 95%) y calcedonia (2,8% a 6%) y, en proporciones menores, por cuarzo microcristalino (>0,1%), minerales máficos, partículas friables, restos carbonosos y fragmentos líticos. El ensayo de barra de mortero acelerado muestra una expansión que varía de 0,01% a 0,07%, clasificando al agregado como no reactivo. Cabe destacar que la expansión aumenta hasta alrededores del Km 274 y luego vuelve a disminuir hacia el sur.
- c. **Sección 3 – Reactivo:** alrededores del Km 274. Este tramo corresponde a un agregado natural con preponderancia de arenas finas (87%) y, en menor proporción, arenas medianas (12%) y gruesas (<1%). Está compuesto principalmente por cuarzo (93%) y calcedonia (5,9%), con menores cantidades por minerales máficos, partículas friables, restos carbonosos y fragmentos líticos. El ensayo de barra de mortero acelerado clasifica al agregado como reactivo.

A partir de las secciones definidas se concluye que el agregado es reactivo entre el Km 632 y el Km 620 aproximadamente, y en los alrededores del Km 274 del Río Paraná, y que esta reactividad está relacionada con el contenido de arenas gruesas y medianas que presentan los agregados, incrementando la superficie específica expuesta de las partículas de calcedonia y/o cuarzo microcristalino. Por otro lado, el agregado es no reactivo desde el Km 620 hasta el Km 230 del río, a excepción del Km 274, debido al alto contenido de arenas finas de las muestras lo cual puede inhibir el grado de reactividad produciendo un efecto puzolanico en el mortero, aunque en ocasiones, el bajo grado de reactividad en este tramo puede deberse al escaso contenido de minerales potencialmente reactivos.

Finalmente, se elaboró un mapa de reactividad de la zona donde se detallan los resultados expuestos (Figura 22).

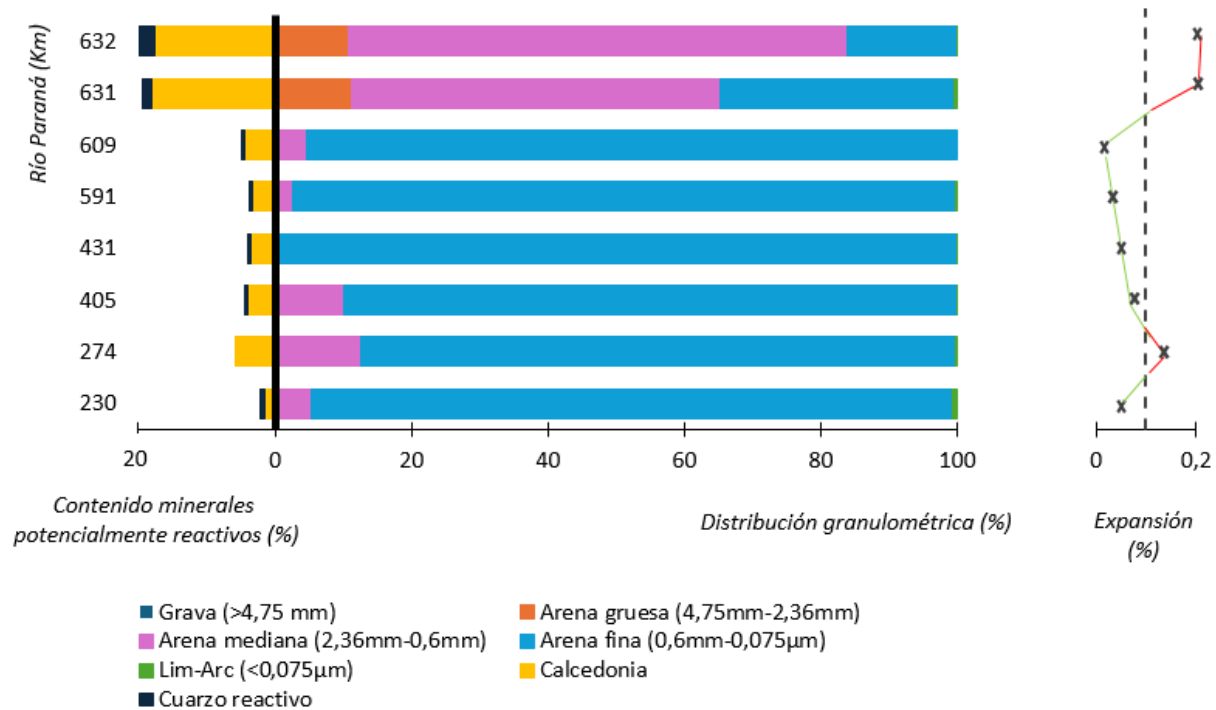


Figura 21: Gráfico representativo de los resultados obtenidos en muestras distribuidas entre el Km 632 y el Km 230 sobre el Río Paraná. Se relaciona el contenido de minerales reactivos (izq.), la distribución granulométrica (centro) y la expansión de las barras de mortero (der.).

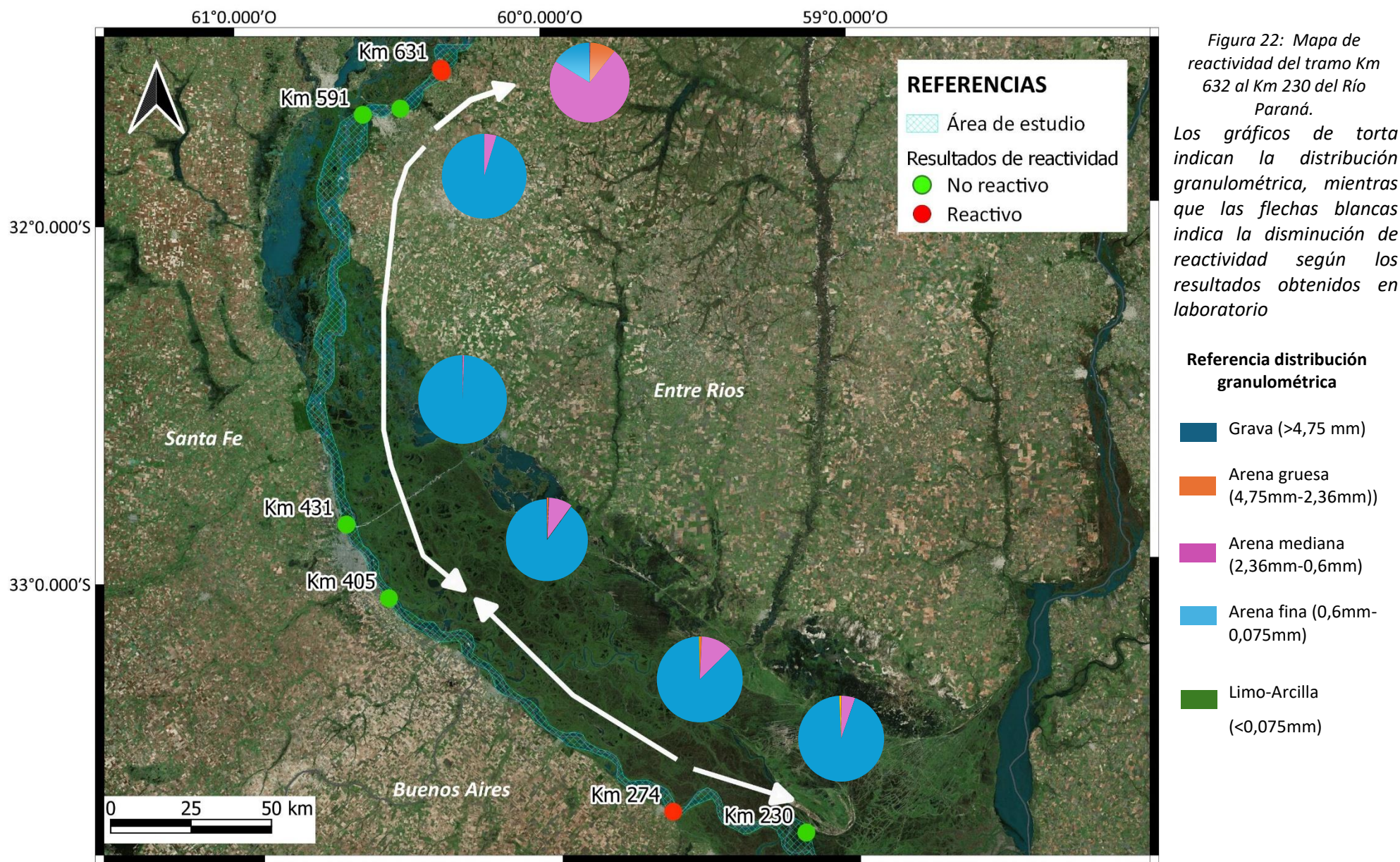


Figura 22: Mapa de reactividad del tramo Km 632 al Km 230 del Río Paraná.

Los gráficos de torta indican la distribución granulométrica, mientras que las flechas blancas indica la disminución de reactividad según los resultados obtenidos en laboratorio

CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se determina que los estudios de RAS han permitido establecer un límite máximo admisible de calcedonia del 3%, en este sentido la norma IRAM 1531 (2022) ha dejado sin efecto el límite máximo admisible, lo que ha generado incertidumbre sobre su comportamiento en los agregados, mientras que la norma 1512(2013) establece un máximo admisible del 3%. En este sentido se recomienda retrotraer la normativa IRAM 1531 a la situación anterior y, por otro lado, no alterar los límites admisibles establecido en la norma IRAM 1512 (2013), ya que aquellos límites van en línea con el del presente trabajo.

Según Binal (2015), el efecto pessimum en agregados con calcedonia se observa cuando el contenido alcanza el 50%. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que el efecto pessimum se manifiesta con un contenido de calcedonia de 5,9%. Esto sugiere que el efecto pessimum es alcanzado en contenidos de calcedonia mucho menores que el reportado por Binal (2015).

Por otro lado, se determina que a lo largo de la cuenca baja del Plata existe una variación en la composición granulométrica y mineralógica que da lugar a un diverso comportamiento frente a la RAS. Las muestras al norte del Km 620 aproximadamente son más gruesas, por lo que aumenta la superficie específica expuesta de los agregados reactivos, y presentan dos variedades de minerales reactivos en altas proporciones que dan lugar a un comportamiento deletéreo en el hormigón. Al sur del Km 620 aproximadamente las muestras presentan fracciones granulométricas más finas, que de acuerdo con Foray et al. (2004) pueden inhibir la RAS, y, si bien también presentan dos variedades de minerales reactivos, estos se encuentran en proporciones más bajas dando lugar a un comportamiento inocuo en el hormigón, a excepción de la muestra ubicada en el Km 274 la cual presenta un leve aumento de la granulometría, un solo mineral potencialmente reactivo y en proporciones intermedias que da lugar a un comportamiento deletéreo en el hormigón. Si bien el muestreo no presenta una densidad de puntos muy elevada se ha podido observar la variación en el comportamiento a lo largo de los distintos sectores sentando una base de referencia, tanto para los estudios de rutina de las areneras y canteras, como para futuros trabajos que tiendan a complementar y ampliar las observaciones y mediciones.

Respecto a los perfiles estratigráficos que se describieron en distintos frentes, el Perfil FC-Aldea Brasilera y el Perfil CV-Paraná, correspondiente a las Formaciones Paraná e Ituzaingó, se condicen a lo descrito por diversos autores que han estudiado las zonas. Mientras que el perfil estratigráfico Perfil FC-LCII no coincide con lo descrito por Frezzia et al. (2021).

La Formación Paraná corresponde depósitos marinos debido a la transgresión del Mar Paranense. Según diversos autores entre ellos Aceñolaza (2000 y 2007) y Silva Busso y Weisser (2018) está compuesta por sedimentos arenosos cuarzosos, bien seleccionados, intercalados por arcillas verdosas masivas con contenido fosilífero marino (Groeber, 1961, Yrigoyen, 1975 y Camacho, 1967). De acuerdo al perfil estratigráfico, FC-Aldea Brasilera, ubicado en el frente de explotación de la cantera Cristamine en la localidad de Aldea Brasilera (Anexo 1), los depósitos corresponden a arenas síliceas bien redondeadas, constituidas principalmente por cuarzo (97,7%), feldespatos (0,7%), calcedonia (0,6%), minerales maficos (0,5%), partículas friables (0,3%) y cuarzo microcristalino (0,1%) (petrografía en Anexo 2), y sus espesores no superan los 3 metros. Estos se encuentran intercalados con depósitos limo arcilloso de color gris con tonalidades verdosas y abundante contenido fosilífero de origen marino. Se observaron afloramientos de la Formación Paraná en el cauce del Arroyo Doll, caracterizados por una sucesión de arcillas con fósiles marinos, y en cercanías de la localidad de Victoria.

La Formación Ituzaingó es atribuida a un viejo sistema fluvial del Paraná (Silva Busso y Amato, 2017). Se describe como una secuencia principalmente arenosa, con tamaños que varían de grueso a fino, aunque predomina las arenas de tamaño mediano y colores blanquecinos, amarillos y rojizos, presentando abundante estratificación entrecruzada planar y parcialmente solidificación con cemento ferruginoso. De acuerdo al perfil estratigráfico, CV-Paraná, ubicado en el Camping Toma Vieja de la localidad de Paraná (Anexo 1) se pueden observar los depósitos arenosos amarillo claro a castaño, constituidos principalmente de cuarzo (91,7%) y calcedonia (6,7%), seguido menores por partículas friables (1,1%), cuarzo microcristalino (0,6%), minerales máficos (0,5%), feldespatos (0,2%), fragmentos líticos (<0,1%) y restos carbonosos (<0,1%) (petrografía en Anexo 2). Estos depósitos presentan estructuras de corriente entrecruzada alternadas por estratificación subhorizontal.

La Formación Ubajay, según Getilli y Rimoldi (1979) se trata de una sucesión de origen fluvial, compuesta por conglomerados matriz-sostén con clastos de calcedonia, cuarzo, ópalo y líticos (pelitas y basaltos). Los clastos son bien redondeados y de mediana a baja esfericidad, están dispuestos en una matriz arcillo arenosa de tonalidades rojizas, amarillentas y ocre. Frezzia et al. (2021), realizó un levantamiento estratigráfico en la Cantera La Chola II, en la localidad de Colón, y lo denominó "José Etchepare Hijo", aludiendo a las Formaciones San Salvador (Iriondo y Krohling, 2008) y Hernandarias. El perfil descrito de base a techo inicia intercalaciones de depósitos conglomerádicos matriz soportado de arena gruesa y cantos rodados, seguido de arenas medias a finas con laminación planar de color verde grisáceos. Suprayaciendo, un depósito de arenas muy gruesas a gruesas con laminación cruzada, color pardo grisáceo a pardo

amarillento. Continúa un estrato de arenas medias de colores grises, sin laminación y con escasos cantos rodados en la matriz, por encima, arenas verdes a pardo rojizas masivas con cantos rodados. Hacia el techo se deposita un estrato de conglomerado matriz soportados con cantos rodados de hasta 4 centímetros, mal seleccionados, en el cual se intercala un banco de arena lenticular. Finalmente, se deposita la Formación Hernandarias.

En el presente trabajo se relevó el perfil estratigráfico Perfil FC-Colón en la misma zona que relevó Frezzia et al. (2021). Se observaron depósitos fluviales compuestos por conglomerados matriz sostén intercalados de arenas gruesas a medianas de tonalidades castañas a rojizas predominantemente. Según las características evidenciadas en el frente de cantera se clasifico a dicha Formación como Ubajay, de edad Plio-Pleistocena. Aunque, en base a lo observado en el campo, el presente trabajo no concuerda con la clasificación realizada por Frezzia et al. (2021). En primer lugar, la Formación San Salvador es asignada por Iriondo y Krohling (2008) de edad Plio-Pleistocena, y sobre ella se deposita la Formación Hernandarias, sin embargo, de acuerdo al trabajo de Silva Busso y Amato (2017) los depósitos son atribuidos a la Formación Ubajay, siendo ligeramente más modernos que la Formación Hernandarias. Asimismo, los autores, hacen referencia a las variaciones litológicas las cuales pueden confundirse con la Formación Salto Chico, caracterizando a la Formación Ubajay por la predominancia de arenas finas a mediana de colores rojos, amarillentos y ocre, que se intercalan con niveles conglomerádicos matriz-sostén de poco espesor, mientras que, en la Formación Salto Chico, los depósitos conglomerádicos se tratan de clasto sostén. Por otra parte, los depósitos que Frezzia et al. (2021) consideran como Formación Hernandarias no corresponden a la formación, debido a que la Formación Ubajay es más moderna y tiene una capacidad más erosiva que la Formación Hernandarias.

A continuación, se describen las conclusiones que se han alcanzado con la presente investigación:

- En el presente trabajo se definió un límite máximo admisible de 3% para la calcedonia evaluado a 16 días, que es equivalente al valor de referencia indicado en la norma IRAM 1512 (2013). En este sentido se recomienda reincorporar este valor límite que fue eliminado en la nueva norma IRAM 1531 y que el mismo no sea modificado de la norma IRAM 1512 (2013) la cual está siendo debatida por el Comité IRAM.
- El efecto pesimum en agregados con contenido de calcedonia se alcanza con un contenido del 5,9%.

- El ensayo acelerado de barra de mortero, según la norma IRAM 1674, es efectivo para la detección del grado de reactividad en agregados de reacción rápida, lo cual ha sido demostrado en el desempeño de las muestras analizadas.
- Actualmente, la norma IRAM 1512 está en debate por el Comité IRAM, al igual que la norma IRAM 1531, se pretende modificar y eliminar los límites admisibles vigentes. Los resultados de esta investigación confirman que el límite admisible para la calcedonia es adecuado. Sin embargo, para minerales de reacción lenta, se recomienda reevaluar los tiempos de ensayo y límites establecidos para una evaluación precisa del agregado.
- La distribución granulométrica de las arenas que conforman el tramo del Río Paraná desde el tramo Km 532 hasta el Km 230 está influenciada por el caudal, el transporte y el aporte de origen de los sedimentos. Al norte predominan las arenas medianas y gruesas, mientras que hacia el sur predominan las arenas finas. Petrográficamente, se observó una disminución del contenido de calcedonia hacia el sur. Sin embargo, en el Km 274 del Río Paraná, se incrementa el contenido de calcedonia y en menor medida también aumenta el tamaño de las arenas, mostrando un comportamiento reactivo del agregado. Esto puede estar relacionado con las características de los bancos de arena del lecho del río donde se extrajeron las muestras analizadas y/o debido a la erosión y retrabajo de paleoformas del sistema fluvial a nivel local.
- Si bien gran parte de la carga sedimentaria es transportada desde las zonas de la cuenca alta del río Paraná existe una correspondencia entre la mineralogía estudiada en base a los perfiles de las Formaciones Paraná e Ituzaingó.
- Las descripciones de los perfiles de la Formación Paraná y la Formación Ituzaingó y su mineralogía sirven como base para el desarrollo de futuras investigaciones en relación a la reactividad que estos pueden presentar en su uso en el hormigón.

BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 15577-3. Agregados- Reactividad Alkali Agregado – Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Associacao Brasileira de Normas Técnicas.

Aceñolaza, F. 1976. Consideraciones bioestratigráficas sobre el Terciario marino de Paraná y alrededores. *Acta Geológica Lilloana*. (13): 91–107.

Aceñolaza F. 2000. La Formación Paraná (Mioceno Medio): Estratigrafía, distribución regional y unidades equivalentes. En: Aceñolaza, F. y Herbst, R. (eds.) *El Neógeno de Argentina*. Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica 14: 9 27.

Aceñolaza F. 2007. *Geología y Recursos Geológicos de la Mesopotamia Argentina*. Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie de Correlación Geológica 22, Tucumán. 150 p.

Alaejos, P., Bermúdez M. A. 2003. Durabilidad y procesos de degradación del hormigón en presas. Ministerio de Fomento. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. España. 168 p.

Alaejos, P., Lanza Fernández, V., Bermúdez, M.A, Velasco, A. 2014. Effectiveness of the accelerated mortar bar test to detect rapid reactive aggregates (including their pessimum content) and slowly reactive aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 58: 13-19.

Amato, S., Silva Busso A. 2005. Análisis de Interrelación Geológica-Hidrogeológica en el área del Delta del Río Paraná, Provincias de Entre Ríos y Buenos Aires, República Argentina. 16º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 697-705, La Plata.

Amato S., Silva Busso A. 2009. Estratigrafía Cuaternaria del Subsuelo de la Cuenca Inferior del Río Paraná. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4): 594-602.

Ameghino, F. 1889. Contribución al conocimiento de los mamíferos fósiles de la República Argentina. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias de la República Argentina en Córdoba* (6). 1027 p.

Ameghino, F. 1898. Sinopsis geológico-paleontológica. Segundo Censo de la República Argentina. Vol. I (3): 113-255, Buenos Aires.

ASTM C 295, 2012. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete.

ASTM C 1260, 2023. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). 5p.

Batic, O., Sota, J, Falcone, D. 2005. RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta. Revista Ciencia y Tecnología 12. 13 p.

Bertolini, J. C. 1995. Mapa geológico de la Provincia de Entre Ríos. Secretaría de Industria, Comercio y Minería. Subsecretaría de Minería. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.

Bérubé, M.A., Duchesne, J., Dorion, J.F, Rivest, M. 2002. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. Cement and Concrete Research 32(8): 1215-1227.

Binal, A. 2015. The Pessimum Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction. Procedia Earth and Planetary Science, Vol. 15: 725-731.

Bonfils, C. G. 1962. Los suelos del Delta del Río Paraná. Factores generadores, clasificación y uso. Revista de Investigaciones Agrícolas, Vol. 16: 257-370.

Bossi, J. 1966. Geología del Uruguay. Colección Ciencias Nº 2. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. 469 p. Montevideo.

Camacho, H. 1967. Las transgresiones del Cretácico superior y del Terciario de la Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 22: 253-280.

Cavallotto, J.L., 1988. Descripción e interpretación morfológica del Río de la Plata. Simposio Internacional sobre el Holoceno de América del Sur - Paraná, Entre Ríos. Resúmenes expandidos: 65-68.

Cavallotto, J.L. 1995a. Evolución geomorfológica de la llanura costera ubicada en el margen sur del Río de Plata. Tesis Doctoral No. 635, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (inédita), 237p., La Plata.

Cavallotto, J.L. 1995b. Descripción de la unidad morfológica Río de la Plata. 4° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas I: 231-238, Junín - Buenos Aires.

Cavallotto, J.L. 1996. Estratigrafía del Holoceno de la Llanura costera del margen sur del Río de la Plata. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 4: 51- 68, Buenos Aires.

Cavallotto, J.L., Violante, R.A., Parker, G. 1999. Historia evolutiva del Río de la Plata durante el Holoceno. XIV Congreso Geológico Argentino, Salta, Actas I: 508–511.

Cavallotto, J.L., Colombo, F., Violante, R. A. 2002. Evolución reciente de la llanura costera de Entre Ríos. XV Congreso Geológico Argentino, El Calafate, Santa Cruz, Tomo II: 500-505.

Cavallotto, J.L., Violante, R.A., Parker, G. 2004. Sea-level fluctuations during the last 8600 years in the de la Plata river (Argentina). Quaternary International 114: 155–165.

CEN, 1995. Regional Specifications and Recommendations for the avoidance of damaging alkali silica reactions in concrete. European Committee for Standardization. 63p.

Chak, Y.H., Chan, Y. C. 2005. The 2004 review on prevention of alkali silica reaction in concrete. Geo Report No. 167 (second edition). Civil engineering and development department geotechnical engineering office. 81 p. Hong Kong.

Chebli, G., Spalletti, L. 1987. Cuencas Sedimentarias Argentinas. Simposio Cuencas Sedimentarias Argentinas del X Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán. 512p.

Chebli, G., Tófaló, O., Turazzini, G. 1989. Mesopotamia. En: Chebli, G. y L. Spalletti (Ed.) Cuencas Sedimentarias Argentinas. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica Nº 6: 79-100, Tucumán.

Chebli, G., Mozetic, M.E., Rossello, E.A. y Bühler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales: 29 (20): 627-644.

Chen, J., Jayapalan, A. R., Kim, J. Y., Kurtis, K. E., Jacobs, L. J. 2010. Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique. Cement and Concrete Research 40 (6): 914-923.

CIRSOC 201. 2005. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Secretaría de Obras Públicas de la Nación. CIRSOC, INTI. 666p.

Coelho dos Santos, G. 2018. Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali-sílice (RAS). Departamento de Geología. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur (inédita). 323p., La Plata.

Cys, M., Pouhet, R. 2015. Resistance to alkali–aggregate reaction (AAR) of alkali activated cement–based binders. Handbook of Alkali–Activated Cements Mortars and Concretes: 397–422.

D'Orbigny, A. 1842. Voyage dans l'Amérique Meridionale. Paleontologie, 3 (4): 1-152. Paris & Strassbourg

Darwin, C. 1846. Geological observations on the volcanic islands and parts of South America visited during the voyage of H. M. S. Beagle. 648 p.

De Alba, E. 1953. Geología del Alto Paraná en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 8 (3): 129-161.

De Alba, E., Serra, N. 1959. Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. Informe sobre las condiciones y características geológicas. Dirección Nacional de Geología y Minería Anales 11, Buenos Aires, Argentina. 162p.

Di Paola, E., Marchese, H.G. 1974. Relación entre la tecto-sedimentación, litología y mineralogía de arcillas del Complejo Buenos Aires y la Formación La Tinta (prov. de Buenos Aires). Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología 5(3-4): 45-58.

Dron, R., Brivot, F. 1992. Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 1: concepts. Cement and Concrete Research 22 (5): 941-948.

Falcone, D. D., Coelho dos Santos, G. S. 2013. Influencia del tamaño de las partículas del agregado reactivo frente a los álcalis en las barras de mortero. Revista de Geología a la Ingeniería y al Ambiente, 30: 23-30.

Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Almakrab, A. 2021. Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States. Case Studies in Construction Materials 15.

Fava, A., Manuele, R., Colina, J., Cortelezzi, C. 1961. Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento pórtland. Revista Técnica LEMIT Serie II N° 85. 40 p.

Fernández Canovas, M. 1991. Influencia de la temperatura de curado sobre la evolución de las resistencias a compresión de hormigones fabricados con distintos tipos de cemento. Materiales de construcción 41 (222): 37-46.

Fernández Garrasino, C. 1989b. La Cuenca Chacoparanense argentina. Sus tendencias evolutivas y algunas posibilidades exploratorias. Boletín de Informaciones Petroleras Tercera época 6 (18): 2-17.

Florence, G., Pacheco, J. 1929. Carta geológica do Estado de São Paulo. Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo.

Foray, G., Poyet, S., Capra, B. (2004). Assessment at the laboratory scale of several factors affecting ARS reaction, to build a model validation database. 12th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction in Concrete, 12: 708-715. China.

Frenguelli, J. 1920. Contribución al conocimiento de la geología de Entre Ríos. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, vol. 24: 55–256.

Frenguelli, J. 1937. Estratigrafía y tectónica de la región del Litoral. Publicación Universidad de La Plata.

Frenguelli, J. 1939. El río Uruguay entre Salto Grande y Paso Hervidero. Anales Sec. Cient. Arg. Edición 6.

Frenguelli, J. 1947. Nota de la Geología Entrerriana. Revista Sociedad Geológica Argentina II (2): 126-140.

Freyburg, E., Berninger, A. 2004. Micro processes being connected with alkali silica reaction. 12 th International Conference on Alkali. Aggregate in Concrete. China.

Frezza, S. A., Patterer, N. I., Zucol, A. F. 2021. Registro paleobotánico del Plio–Pleistoceno Inferior en el Valle del río Uruguay. Caracterización fitolítica de la Formación San Salvador, este de la provincia de Entre Ríos, Argentina. Publicación Electrónica. Asociación Paleontológica Argentina. 18 p.

Gadea, J., Soriano, J., Martín, A., Campos, P. L., Rodríguez, A., Junco C., Adán, I., Calderón, V. 2010. Reactividad árido-álcali en áridos empleados para hormigón. Materiales de construcción 60 (299): 69-78.

García Díaz, E., Riche, J., Bulteel, D., Vernet, C. 2006. Mechanism of damage for the alkali–silica reaction. Cement and Concrete Research 36 (2): 395-400.

Gentili, C., Rimoldi, H. 1979. Mesopotamia. Academia Nacional de Ciencias, Segundo Simposio Geología Regional Argentina, Córdoba 1: 185-223.

Giovambattista, A., Batic, O.R., Traversa, L.P. 1981. Durabilidad de hormigones de cemento pórtland. Revista Hormigón, AATH 5. 20 p.

Gonzaga de Campos, L. 1889. Anexo Relatório 1889 Seção Geológica. Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo, São Paulo: 21-34.

Groeber, G. 1961. Contribución al conocimiento geológico del Delta del Paraná y alrededores. Anales Comisión de Investigaciones Científicas, 2: 9-54. Provincia de Buenos Aires.

Herbst, R. 1969. Nota sobre la geología de Corrientes. Actas IV Jornadas Geológicas de Argentina, 3: 87-95. Mendoza.

Herbst, R. 1971. Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes, República Argentina. Revista Asociación Geológica Argentina, 26 (2): 221-243.

Herbst, R. 2000. La Formación Ituzaingó (Plioceno). Estratigrafía y distribución. En Aceñolaza, F.G. y Herbst, R. (Editores), El Neógeno de Argentina. Revista del Instituto Superior de Correlación Geológica. Serie Correlación Geológica, 14: 181-190. Tucumán.

Herbst, R., Santa Cruz, J. N., Zabert, L. L. 2005. Avances en el conocimiento de la estratigrafía de la Mesopotamia Argentina, con especial referencia a la provincia de Corrientes. Natura Neotropicalis, 1(7): 101-121.

Ichikawa, T., Miura, M. 2007. Modified model of alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research, 37 (9): 1291- 1297.

IRAM 1505, 2003. Agregados. Análisis granulométrico. 12 p.

IRAM 1512, 2013. Agregado fino para hormigón de cemento. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 25p.

IRAM 1531, 2016. Agregado grueso para hormigón de cemento. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 27p.

IRAM 1531, 2022. Agregado grueso para hormigón de cemento. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 27p.

IRAM 1540, 2004. Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μ m, por lavado. 12p.

IRAM 1637, 1992. Reacción álcali-agregado. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método de la barra de mortero. 18p.

IRAM 1649, 2008. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 4p.

IRAM 1674, 1997. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 14p.

IRAM 1700, 2013. Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado. 16 p.

IRAM 50000, 2024. Cementos para uso general. Composición y requisitos. 16P.

Iriondo M., 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral, 11: 125–144.

Iriondo, M. H. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe. D'Orbignyana, Corrientes, 4. 54p.

Iriondo, M. H. 1996. Estratigrafía del Cuaternario de la cuenca del río Uruguay. XIII Congreso Geológico Argentino y III de Exploración de Hidrocarburos. Actas 4: 15- 25.

Iriondo, M. H. 2005. El cuaternario de Entre Ríos. Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral, 11: 125–141.

Iriondo, M. 2010. Geología del Cuaternario en Argentina. Editorial Moglia, Corrientes, Argentina.

Iriondo, M., Kröhling, D. 1995. El Sistema Eólico Pampeano. Subsecretaría de Cultura. Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino", 5: 1–68. Santa Fé.

Iriondo, M., Kröhling, D. 2008. Cambios ambientales en la cuenca del río Uruguay desde dos millones de años hasta el Presente. Universidad Nacional del Litoral: 127-144.

Iriondo, M., Rodriguez, E. D., 1973. Algunas características sedimentológicas de la Formación Ituzaingó entre La Paz y Pueblo Brugo (Entre Ríos). V Congreso Geológico Argentino. Actas 1. p. 317-331.

Iriondo, M., Scotta, E. 1978. The evolution of the Paraná river delta. Internacional Symposium on coastal evolution in the Quaternary. Actas 405-418. Brasil.

Kagimoto, H., Yasuda, Y., Kawamura, M. 2016. Effects of expansion behavior of ASR-affected concrete in atmospheres with various values of relative humidity on surface cracking. Proceedings of the 15th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Sao Paulo, Brazil. 12 p.

Klein, C., Hurlbut, C. 1998. Manual de mineralogía. Translated by J. Aguilar Peris Edition 4. Ed. Reverté. 390 p.

Kröhling, D., 2001. Quaternary paleosol – loessic sequences of southwestern Entre Ríos Province, Northern Pampa, Argentina. VI International Symposium and Field Workshop on Paleopedology, Abstracts, Montecillo, Mexico: International Commission on Paleopedology, International Union of Quaternary Research (INQUA). International Union of Soil Sciences (IUSS).

Kröhling, D., Passeggi, E., Zucol, A. F., Aguirre, M., Miquel, S., Brea, M. 2006. Sedimentología y bioestratigrafía del loess pampeano del Pleistoceno tardío (Fm Tezanos Pinto) en el SO de Entre Ríos. IV Congreso Latinoamericano de Sedimentología y XI Reunión Argentina de Sedimentología. Resúmenes: 127. Bariloche.

Lanza Fernández, V. 2012. Estudio de la reactividad álcali-sílice originada por componentes reactivos minoritarios. Departamento de Ingeniería Civil. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (inédita). 408p.

Lindgård, J., Andiç-Çakır, O., Özge, Fernandes, I., Rønning, T.F., Thomas, M. D. A. 2012. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. Cement and Concrete Research, 42 (2): 223-243.

Malvar, L. J., Cline, G. D., Burke, D. F., Rollings R., Sherman, T. W., Greene, J. L. 2002. Alkali-silica reaction mitigation: State of the art and recommendations. ACI Materials Journal, 99: 480-489.

Malvárez, A., 1997. Las comunidades vegetales del Delta del Río Paraná. Su relación con factores ambientales y patrones de paisaje. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. 179p.

Mársico, D. 2013. Aportes a la perspectiva geológica e hidrogeológica regional en el sector centro este de la Cuenca Chacoparana. Tesis doctoral, Universidad de La Coruña (inédita). 209p. España

Milanesi, C., Giaccio, G., Falcone, D., Giovambattista, A., Zerbino, R. 2021. Una visión actualizada sobre la reacción álcali-sílice en Argentina y el diseño y construcción de estructuras de hormigón. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 60: 16-35.

Moura, A., López, C. M., Aguado, A. 2016. Diffusion–reaction model for the internal sulfate attack in concrete. *Construction and Building Materials*, 102: 531-540.

Moussy, V. M. 1860. *Description géographique et statistique de la Confederation Argentine. I-III.* París.

Ottmann, F., Urien, C. M. 1965. Observaciones preliminares sobre la distribución de los sedimentos en la zona externa del Río de la Plata. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*: 283-289.

Pádula, E., Mingramm, A. 1968. Estratigrafía, distribución y cuadro geotécnico – sedimentario del Triásico en el subsuelo de la llanura Chaco – Paranense. *Tercer Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1*: 291-331.

Páez, M.M., Prieto, A.R., 1993. Paleoenvironmental reconstruction by pollen analysis from loess sequences of Southeast of Buenos Aires (Argentina). *Quaternary International*, 17: 21–26.

Parker, G., 1990. Estratigrafía del Río de la Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 45 (3–4): 193–204.

Parker, G., Marcolini, S. 1992. Geomorfología del Delta del Paraná y su extensión hacia el Río de la Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 47 (2): 243-249.

Parker, G., Violante, R.A. 1993. Río de la Plata y regiones adyacentes. En: *El Holoceno en la Argentina*, M.Iriondo (Ed.), *CADINQUA 2*: 163-229.

Parker, G., Paterlini, C.M. y Violante, R.A. 1994. Edad y génesis del Río de la Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 9 (1-2): 11-18.

Parker, G., Paterlini, C.M., Costa, P., Violante, R.A., Marcolini, S., Cavallotto, J.L. 1990. La sísmica de alta resolución en el estudio de la evolución costera del noreste bonaerense durante el Cuaternario. *Simposio Internacional sobre costas cuaternarias: evolución, procesos y cambios futuros*, La Plata. *Resúmenes*: 49-50.

Pereira, M. S., Latrubesse, E. M., Hurtado, M. A. 2016. El Río Paraná: geomorfología y morfodinámica de barras e islas en un gran río anabranching. Tesis de Doctoral. Universidad Nacional de La Plata (inédita). 381 p.

Pereyra, F., Tchilinguirian, P., Beumann, V. 2002. Hoja Geológica 3360-IV, Gualetuyachú. *Cartografía Geológica de Llanura. SEGEMAR*. 62p.

Petrografía, Guía de Trabajos Prácticos, Segunda Parte. Departamento de Geología, FCEN, Universidad de Buenos Aires. 17p.

Pezhman, K., Mohammad, R. N., Mashalah, K., Paritos, G., Shim, T., Simón, M. C. 2022. Assessment of Alkali-Silica Reaction Potential in Aggregates from Iran and Australia Using Thin-Section Petrography and Expansion Testing. *Materials (Basel)*, 15 (12).

Ponce, J., Batic, O. 2006. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according. *Cement and Concrete Research*, 36: 1148-1156.

Powers, T., Syeinour, H.H. 1955a. An interpretation of some published researchers on alkali aggregate reaction. Part 1-The chemical reactions and mechanism of expansion. *Journal of the American Concrete Institute*, 51: 497-516.

Prieto, A.R. 1996. Late Quaternary vegetational and climatic changes in the Pampa grassland of Argentina. *Quaternary Research*, 45: 73-88.

Priszkulnik, S. 2005. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado, ISAIA, G. C. (Ed.), *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2: 1017-1071.

Rao, L.H., Sinha, S. K. 1989. Textural and microstructural features of alkali reactive granite rock. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto. 495-499.

Reig, O. 1956. Sobre la posición sistemática de "Zygolestesparanensis" Amegh. y de "Zygolestes entrerrianus" Amegh., con una reconsideración de la edad y correlación del "Mesopotamiense". *Holmbergia*. Revista del centro de estudiantes de ciencias naturales, Federación universitaria de Buenos Aires. Tomo 5: 209-227.

RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali. Aggregate Reactions in New Concrete Structures. RILEM State of the art Reports, 17. 181p.

Rimoldi, H.V. 1962. Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. Estudio geológico geotécnico para la presa de compensación proyectada en Paso Hervidero, provincia de Entre Ríos. 1as. Jornadas Geológicas Argentinas (San Juan): 287-310.

Rouiller, G., Silva Busso, A. 2008. Relación entre aspectos geológicos y fitológicos de los ambientes de humedales en el delta del Paraná. Cuarto Congreso de la Ciencia Cartográfica y XI Semana Nacional de la Cartografía. Buenos Aires, Argentina. 25-27 de Julio de 2008 en CD.

RTA T363, 2012. Accelerated Mortar Bar Test for the Assessment of Alkali-Reactivity of Aggregate. Transport, Roads y Maritime services. 9p.

Russo, A., Ferello, R., Chebli, G. 1979. Llanura Chaco-pampeana. En J.C. Turner (Ed.), 2do Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 1: 139–183.

Salamuni, R., Bigarella, J. 1967. The Botucatú Formation. Centro Nacional de Pesquisas. En: Bigarella, J., R. Becker e I. Pinto (Ed.): Problems in Brazilian Gondwana Geology: 197-206.

Sanford R., Lange F. 1960. Basin study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, South Brazil. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 44 (8): 1316-1370.

Saouma, V.E., Martin, R.A, Hariri-Ardebili M. A., Katayama, T. 2015. A mathematical model for the kinetics of the alkali–silica chemical reaction. Cement and Concrete Research, 68: 184-195.

Shayan, A. 2007. Field evidence for inability of ASTM C 1260 limits to detect slowly reactive Australian aggregates. Australian Journal of Civil Engineering, 3 (1): 13-26.

Silva Busso, A. 1999. Contribución al conocimiento geológico e hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense oriental argentina. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Tesis de doctorado.

Silva Busso, A., Amato, S. 2017. Depósitos fluviales del Plio-Pleistoceno-Holoceno de la provincia de Entre Ríos y sus implicancias hidrogeológicas. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 3: 338-356.

Silva Busso, A., Fernández Garrasino, C. 2004. Presencia de las Formaciones Piramboia y Botucatú (Triásico-Jurásico) en el subsuelo oriental de la provincia de Entre Ríos. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59 (1): 141-151.

Silva Busso, A., Weisser, S. 2018. Aspectos hidrogeológicos del acuífero de la Formación Paraná en área del delta y estuario del Plata, Argentina. Hidrogeología Regional, 2. 8p.

Silva Busso, A., Amato, S., Seoane, N., Pittau, M. 2004. Aportes al conocimiento de la geología del subsuelo del Delta del Río Paraná. Instituto Nacional del Agua. Proyecto “Simulación y predicción del crecimiento del frente del Delta del Río Paraná”. 47p.

Silva Busso, A., Machado, P., Cosentino, J., 2011. Propuesta de control de las estructuras del subsuelo sobre la geología Terciario-Cuaternario y su relación con la geomorfología fluvial de la provincia de Entre Ríos. Convenio YPF-UTN Facultad Regional de Concordia. 235p.

Silva Busso, A., Amato, S., Rouiller, G. 2015. Características del acuífero Paraná en la región sudoccidental de la provincia de Entre Ríos. Presentada en XXV Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2015. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Sims, I., Poole, A. 2017. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete A World Review. CRC Press. 804p.

Stanton, T. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. American Society of Civil Engineers, 66: 1781-1811.

Stark, D. 1991. The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity. 2^o International Conference on Durability of Concrete. ACI Publication SP: 973-987.

Swamy, V., Saxena, K. S. 1994. A thermodynamic assessment of silica phase diagram. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 99 (B6): 11575-12315.

The Institution of Engineers of Ireland and Irish Concrete Society, 2003. Alkali-Silica reaction in concrete. General Recommendations and guidance in the specification of Building and Civil Engineering Works. 23 p.

Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J. 2013. Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book. U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration. Final report. 211 p.

Tiecher Bonsembiante, F., Gomes Boscato, M., Dal Molin, D., Hasparyk, N., Monteiro, P. 2017. Relation between Degree of Deformation in Quartz and Silica Dissolution for the Development of Alkali-Silica Reaction in Concrete. Materials, 10 (9). 1022 p.

Tófaló, O. 1986. Caracterización sedimentológica y estratigráfica de las Formaciones Yerúa y Arroya Avalos, provincias de Entre Ríos y Corrientes. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita). 208p.

Tófaló, O. 1987. Facies de loess y calcretes pedogenicos de la Formación Arroyo Avalos (Oligoceno) Entre Ríos y Corrientes, Argentina

Traversa, L. 2004. Patología de las estructuras de hormigón armado. Ciencia y Tecnología del Hormigón, 11: 41-48.

Traversa, L. 2012. Durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Anales LEMIT, Serie III, Año 1, N° 2. 119 p.

Trent, D. 2018. Effects of Alkali-Silica Reaction on the Fracture Behavior of Concrete. Tesis de maestría, Universidad de Tennessee.

UNE 146508:1999 EX. Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero.

UNI 8520-22:2002 Aggregati per confezioni di calcestruzzi - Determinazione della potenziale reattività degli aggregati in presenza di álcali. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

Urien, C. M., 1966. Distribución de los sedimentos modernos del Río de la Plata Superior. Boletín del Servicio de Hidrografía Naval. Nº III (3). p. 197-203.

Urien, C. M., 1967. Los sedimentos modernos del Río de la Plata exterior, Argentina. Servicio de Hidrografía Naval, Boletín Nº 4 (2): 113-213.

Urien, C. M., 1970. Les rivages et le plateau continental du sud du Bresil, de l' Uruguay et de l'Argentine. Quaternaria XII: 57-69.

Urien, C. M., Ottman, F. 1971. Historie du Rio de la Plata au Quaternaire. Quaternaria XIV: 51-59.

US Army Corps of Engineers, 2000. Standard Practice for Concrete for Civil Works Structures. Department of the army. Whashington. 124 p. (D-4).

Velasco Torres, A. 2014. Estudio experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta. Departamento de Ingeniería Civil. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 421 p.

Vila, P. E., Bonjour, H.L., Díaz, L., Pereyra, M. 2022. Potencialidad reactiva de agregados para hormigón en Uruguay. Correlación entre la metodología de la barra de mortero y el prisma de hormigón (acelerada y tradicional). Revista de la Asociación Latinoamericana del Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 13(1): 45-60.

Violante R.A., Parker, G. 1993. Evidencias de una ingresión marina intercalada entre el Interensenadense y el Belgranense ("Pampeano") en las áreas costeras y marinas del noreste bonaerense. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Mendoza, II: 252-259.

Violante, R.A., Parker, G. 1999. Historia evolutiva del Río de la Plata durante el Cenozoico superior. XIV Congreso Geológico Argentino, Salta. Acta I: 504-507.

Violante, R.A., Parker, G. 2000. El Holoceno en las regiones costeras y marinas del noreste de la Provincia de Buenos Aires. Revista Asociación Geológica Argentina, 55 (4): 337-351.

- Violante R.A., Parker, G. 2004. The post-last glacial maximum transgression in the de la Plata River and adjacent inner continental shelf, Argentina. *Quaternary International*, 114: 167-181.
- Violante, R. A, Parker, G., Cavallotto, J. L., Marcolini, S. 1992. La secuencia depositacional del Holoceno en el Río de la Plata y la Plataforma del noreste bonaerense. Resumen. IV Reunión Argentina de Sedimentología. La Plata - Buenos Aires, Acta I: 275-282.
- Walther, K. 1911. Über Permotriassische Sandsteine und Eruptivdecken ausdem Norden der Republik Uruguay. *Neues Jahrbuch Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Beilage Band 31*, Stuttgart: 575-609.
- White, I.C. 1908. Relatório sobre as "Coalmea-sures" e rochas associadas do Sul do Brasil. Relatório final da Comissao de Estudos das Minas de Carvao de Pedra do Brasil, Rio de Janeiro. 300p.
- Wigum, B. J., Padersen, L.T., Grelk, B., Lindgard, J. 2007. Partner Report N° 2.1. State-of-the art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction. SINTEF Building and Infrastructure. 55p.
- Windhausen, A. 1931. Geología Argentina. Segunda Parte. *J. Peuser Lda Buenos Aires*. Editores. 650p.
- Yrigoyen, M. 1969. Problemas estratigráficos del Terciario de Argentina. *Ameghiniana* 6 (4): 315-329.
- Yrigoyen, M. 1975. Geología del Subsuelo y Plataforma Continental. 6º Congreso Geológico Argentino (Buenos Aires, 1975). Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires: 139-168.
- Zhang, C, Wang, A., Tang, M., Wu, B., Zhang, N. 1999. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 29 (9): 1393-1396.
- Zoilo, C., Akasaki, J., Fioriti, C., Bernardes H., Salles M. F., Pereira A. 2013. Estudio cualitativo sobre figuración debida a la reacción álcali-sílice en el forjado de la represa hidráulica de Jaguari. *Revista ingeniería de construcción*, 28 (3): 290-299.

ANEXOS

Anexo 1: Perfiles estratigráficos en canteras

Durante las campañas a la provincia de Entre Ríos, se relevaron y describieron tres perfiles estratigráficos correspondientes a las Formaciones Paraná (localidad de Aldea Brasilera), Ituzaingó (localidad de Paraná) y Ubajay (localidad de Colón), identificados como FC-Aldea Brasilera, CV-Paraná y FC-Colón, respectivamente (Figura 23).

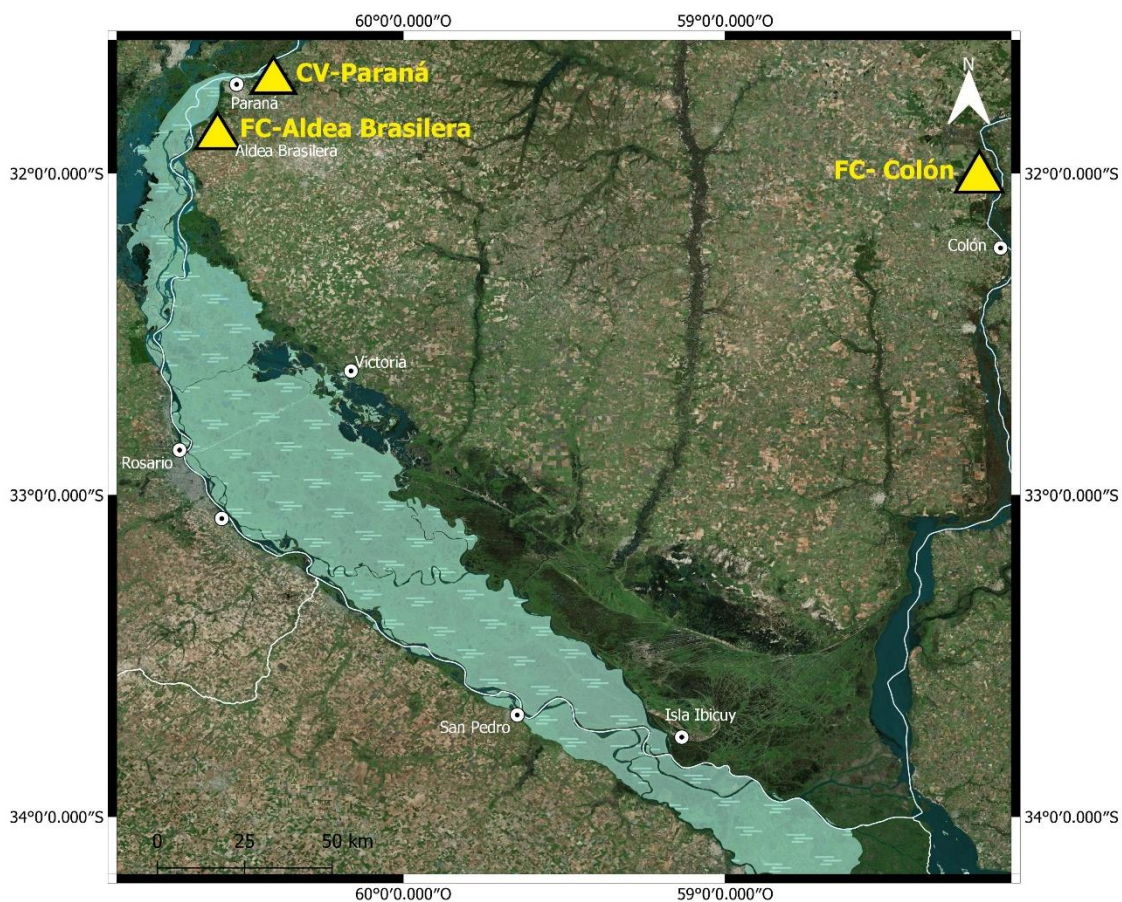


Figura 23: Ubicación de las zonas de relevamiento de los perfiles estratigráficos.

Perfil FC-Aldea Brasilera

El perfil estratigráfico corresponde a afloramientos de la Formación Paraná, ubicado en el frente de explotación de la cantera Cristamine (Figura 24), en la localidad de Aldea Brasilera, provincia de Entre Ríos.

Está constituido por depósitos de origen marino. De base a techo (Figura 25), se observa arenas silíceas blanquecinas, bien seleccionadas, medianas a finas con laminación entrecruzada planar

(inclinación 25°), intercaladas con delgadas láminas de arcillas limosas. Por encima, se deposita una secuencia limo-arcillosa de color gris con tonalidades verdosas, cohesiva y con abundante contenido fosilífero marino, continuando, una secuencia de arenas finas blanquecinas con un espesor de 3 metros, seguidas por un nivel superior de coquinas de 1 metro. Subyace una secuencia de arena fina – arcilla de color gris con tonalidades verdosas, con un espesor que varía de 1 a 2 metros, sobre las que se depositan arenas blanquecinas similares a las descritas anteriormente. En su techo se deposita la Formación Alvear.

En el cauce del Arroyo Doll (32°18'21.96"S – 60°25'33.83"O), la Formación Paraná está representada por una sucesión de arcillas con fósiles marinos que transicionan a arenas margosas de color castaño y calizas blanquecinas (Figura 12).

La petrografía de las arenas blanquecinas que constituyen a la Formación se describen en el Anexo 2.B.

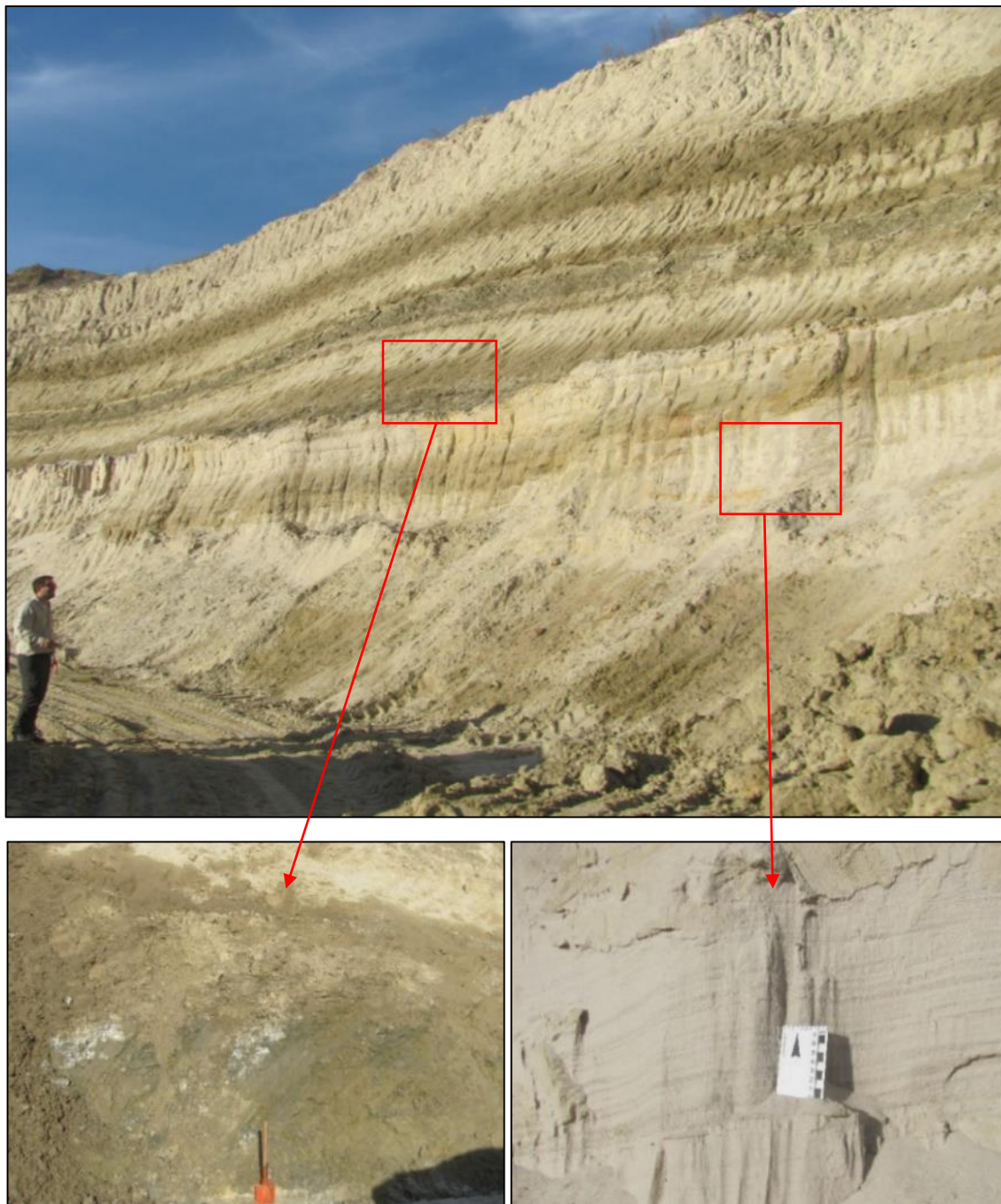


Figura 24: Frente de explotación de la cantera Cristamine ($31^{\circ}52'50,97''S$ y $60^{\circ}36'51,76''O$), ubicada en la localidad de Aldea Brasileira, los afloramientos corresponden a la Formación Paraná.

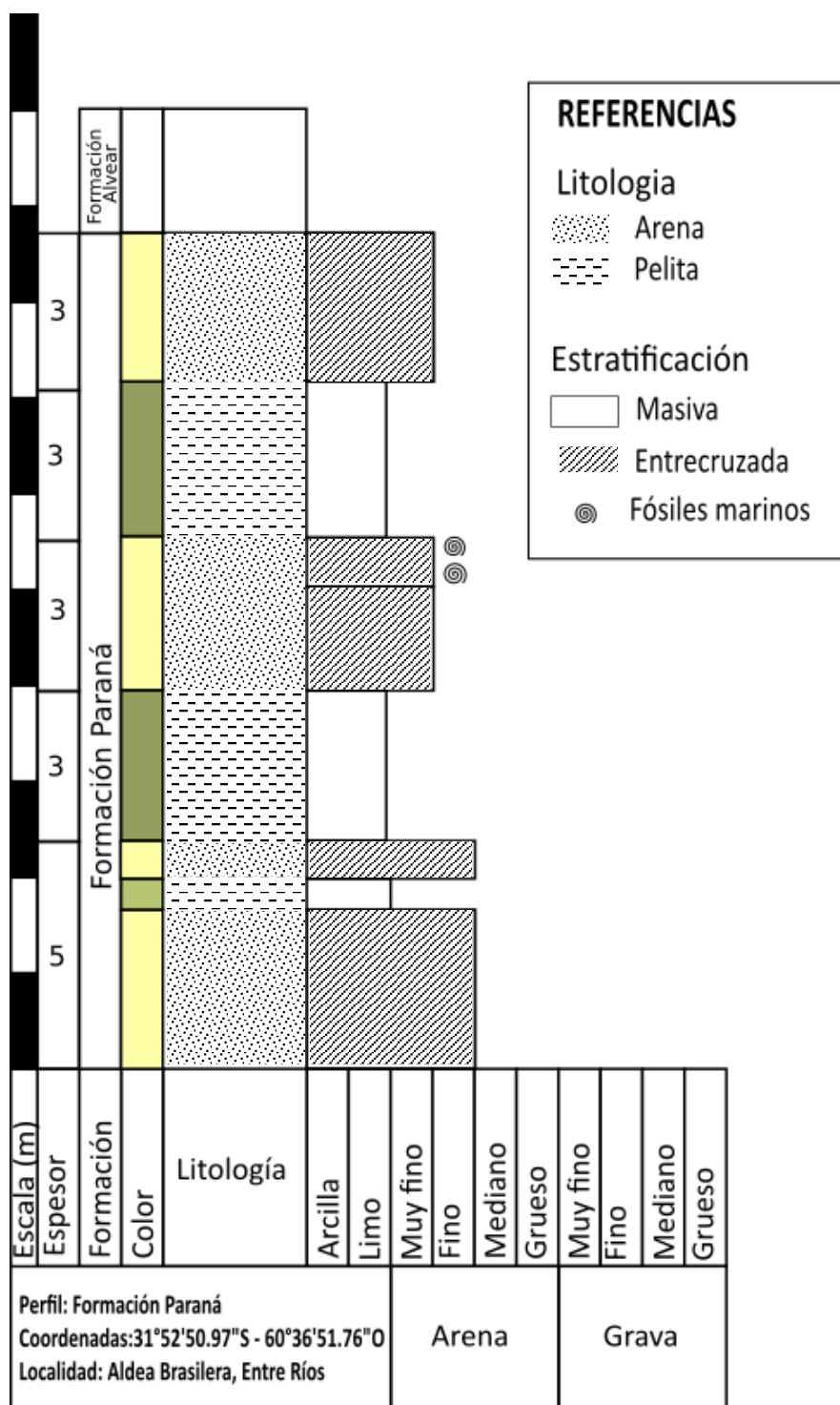


Figura 25: Perfil estratigráfico de la Formación Paraná.

Perfil CV-Paraná

El perfil estratigráfico corresponde a afloramientos de la Formación Ituzaingó, ubicado el Camping Toma Vieja de la localidad Paraná, provincia de Entre Ríos (Figura 26).

De base a techo (Figura 28), se observa un nivel conglomerádico fino, con clastos bien redondeados predominantemente cuarzosos y matriz arenosa, posiblemente derivado por remoción de la Formación Paraná (Figura 27, B). Continúa, con un banco de arena fina de color castaño claro a blanquecino con estratificación plana, hacia el techo intercala con calcretes limo-arcillosos de color castaño oscuro. Sobre estas, se deposita una secuencia granodecreciente de arenas silíceas de color amarillo claro a castaño, con tamaño de grano medio a fino y alternancia de estructuras de corriente entrecruzadas y estructuras subhorizontales (Figura 27, A). En algunos sectores, se observa cementación ferruginosa con alternancia de pequeñas laminas limo-arcillosa de color gris verdosas, masivas y sin consolidar. Hacia el techo, se depositan secuencias de arena fina a mediana de color castaño amarillento a castaño claro con estratificación plana, en contacto erosivo subyace la Formación Hernandarias (Figura 27, C). La petrografía de las arenas se detalla en el Anexo 2.B.

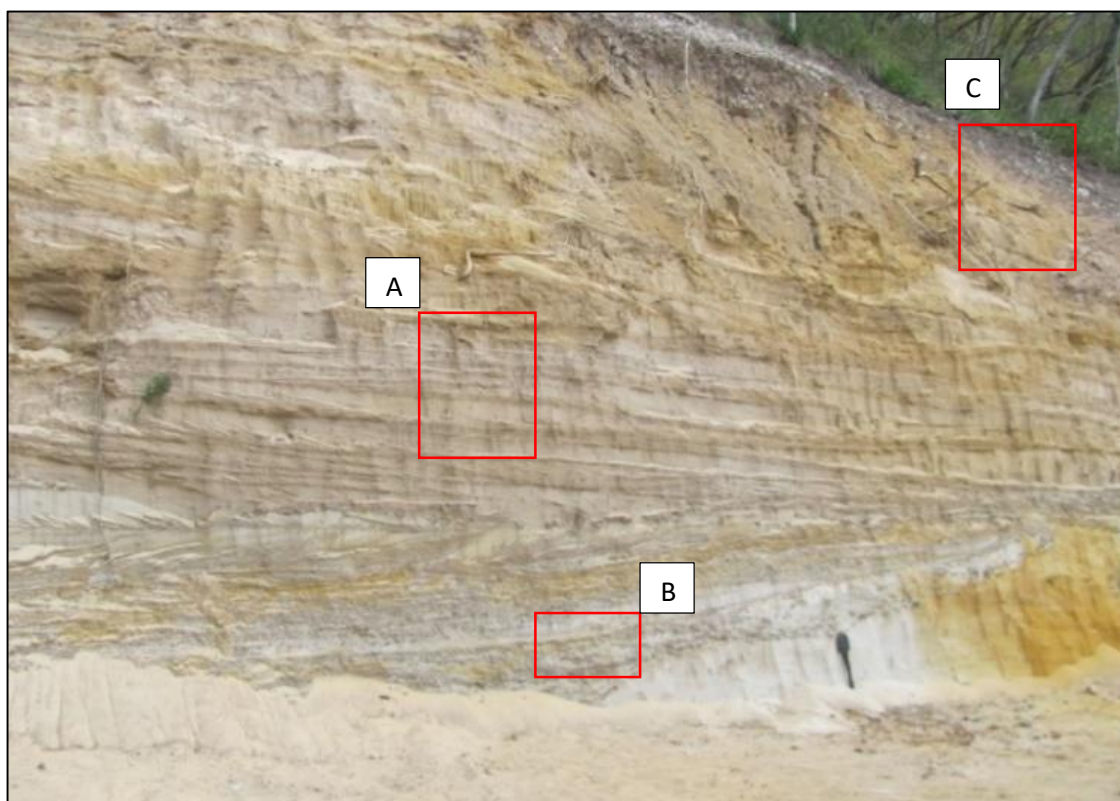


Figura 26: Afloramiento Formación Ituzaingó (31°42'10,72''S y 60°28'56,67''O), ubicados en el Camping Toma Vieja, Paraná, Entre Ríos.

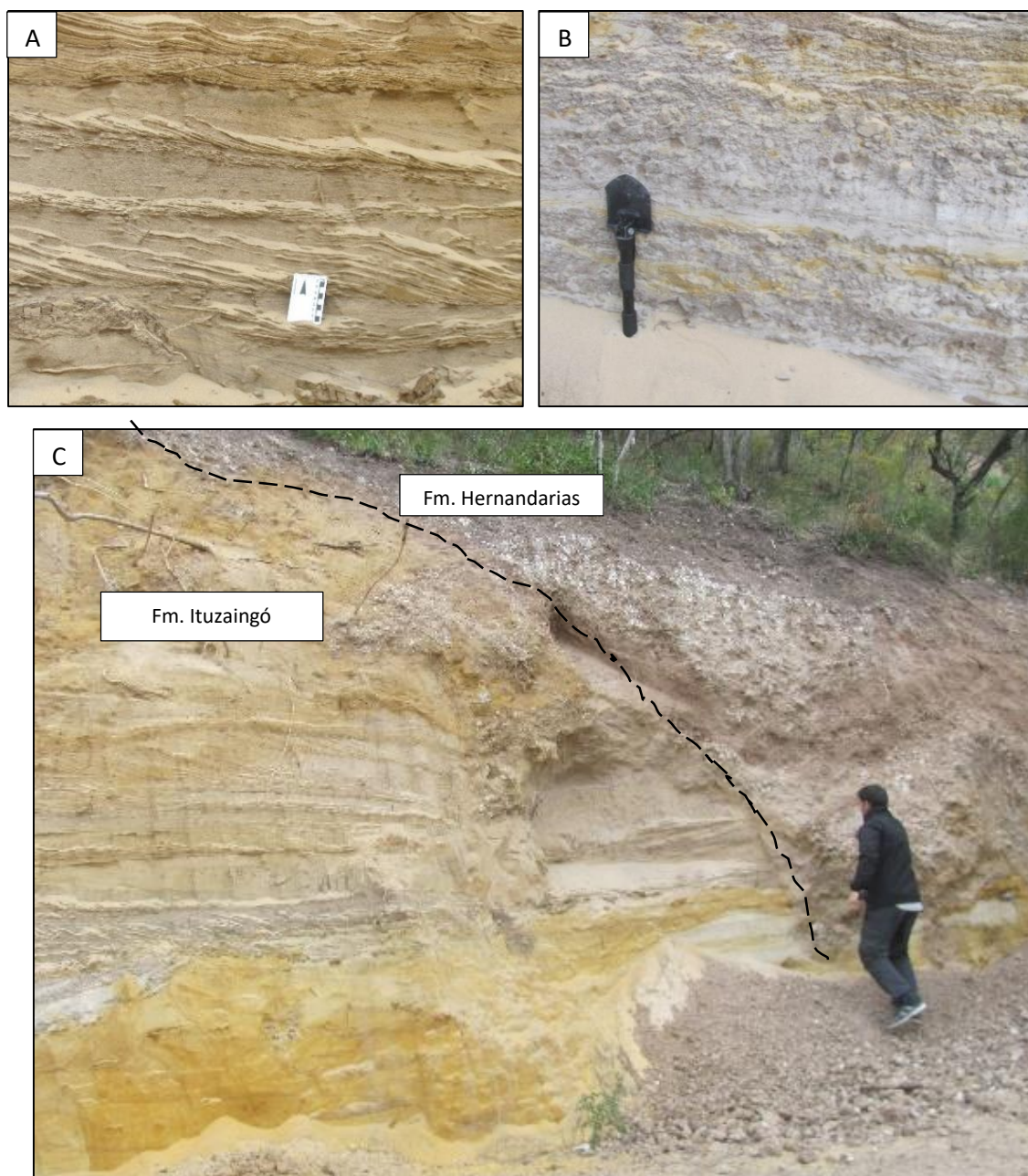


Figura 27: Detalles del afloramiento de la Fm. Ituzaingó. A. depósito de arena con estratificación entrecruzada, B. depósito de conglomerado fino, C. contacto erosivo de la Fm. Hernandarias sobre la Fm. Ituzaingó.

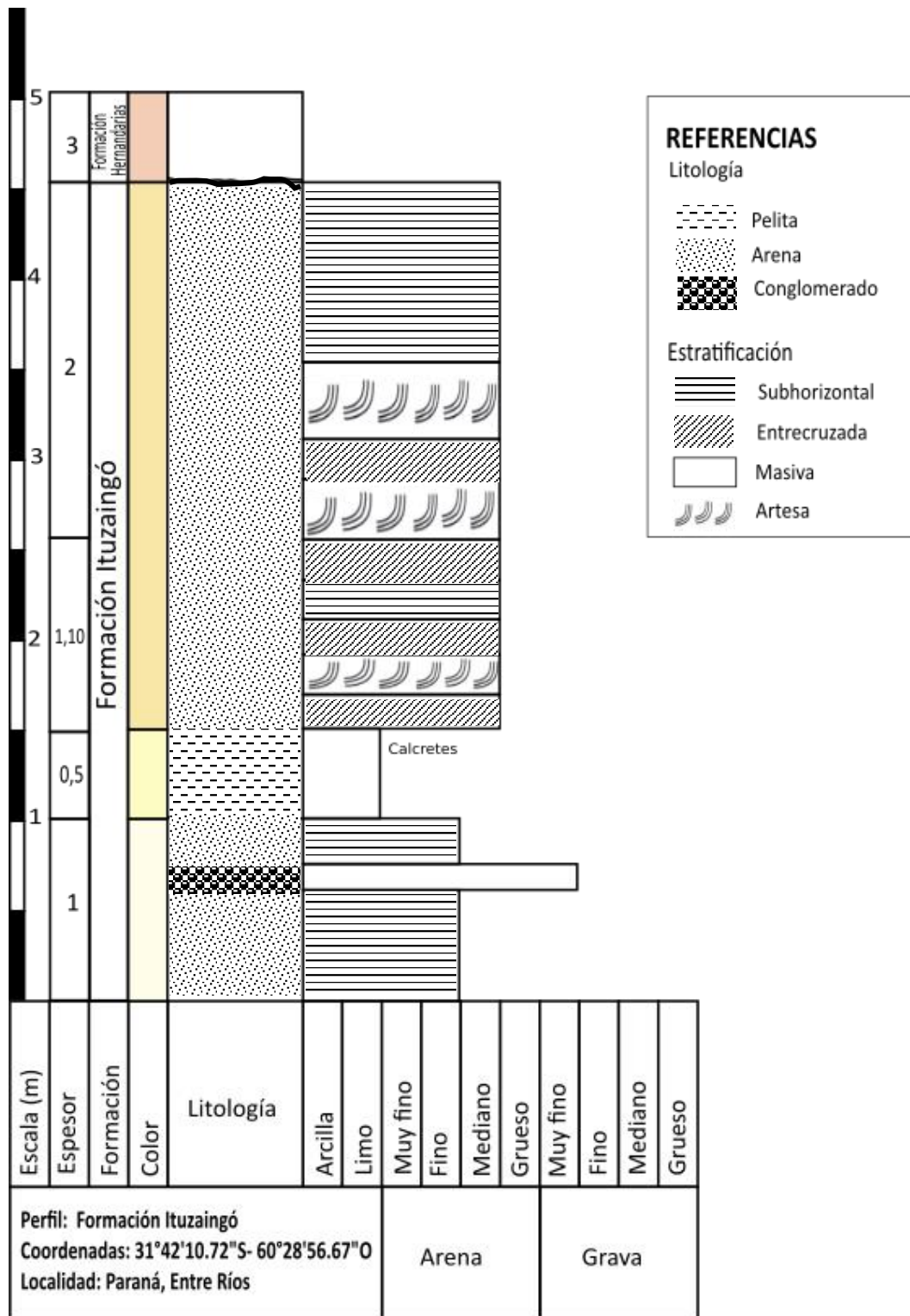


Figura 28: Perfil estratigráfico de la Formación Itzaingó.

Perfil FC-Colón:

El perfil estratigráfico corresponde a afloramientos de la Formación Ubajay, ubicados en el frente de explotación de la cantera La Chola II (Figura 29), en la localidad de Colón, provincia de Entre Ríos.

De base a techo (Figura 30), está conformada por una secuencia conglomerádica matriz sostén de 1,5 m de espesor, compuesto por clastos de composición cuarzosa (calcedonia, cuarzo y líticos), de buena redondez y poco consolidados, inmersos una matriz arenosa de color castaño claro a amarillento, el cual intercala con bancos de arena mediana color castaño rojizo a pardo. Continúa una secuencia de arena, medianas a gruesas, de 0,3 m de espesor, color castaño amarillento con laminación, seguido por un depósito de arena gris pardo cuyo espesor es de 0,8 m, y se encuentra en contacto erosivo con bancos conglomerádicos matriz sostén, castaño oscuro a rojizos, con características litológicas similares a la de la base. Hacia el techo culmina con un banco de arenas gris pardo a castañas con laminación horizontal, de 0,2 m de espesor. Se observaron lentes de arena con estratificación entrecruzada correspondiente a paleocauces.

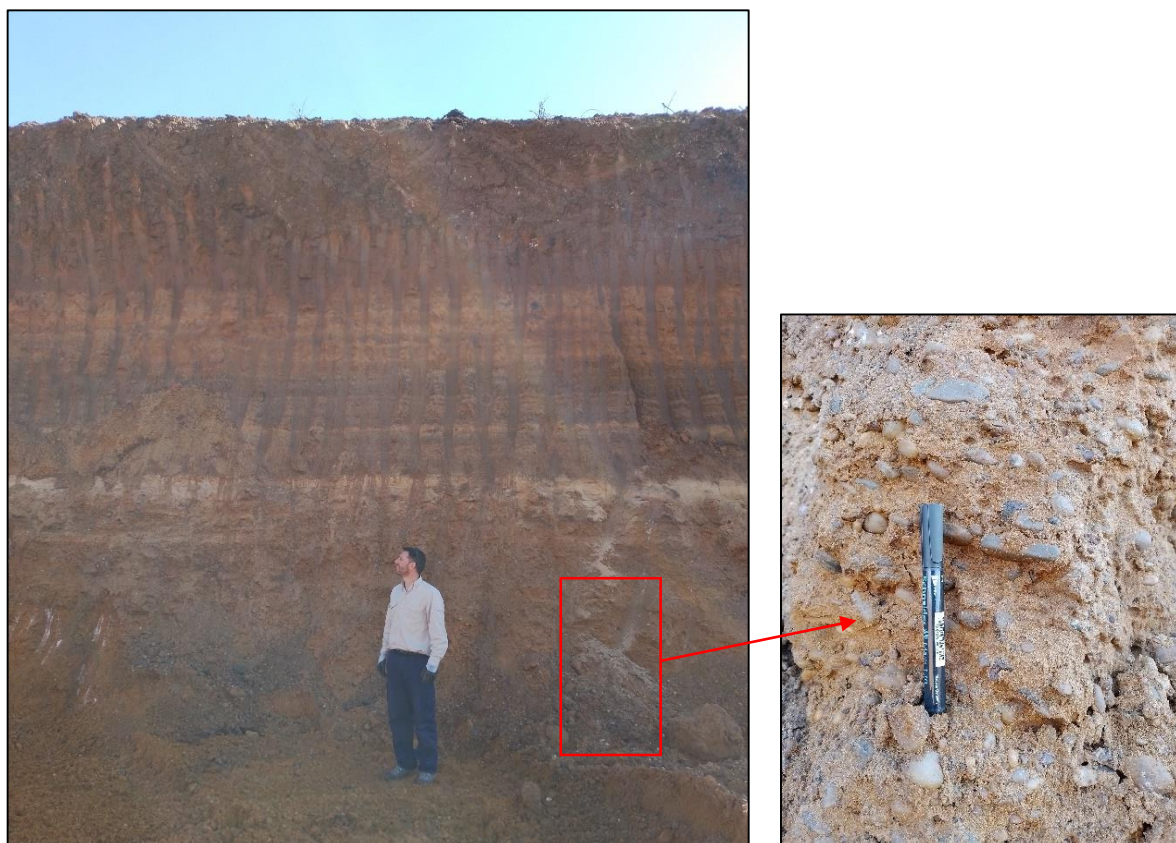


Figura 29: Frente de explotación de la cantera La Chola II(31°59'58,23''S y 58°11'35,74''O), ubicada en la localidad de Colón, los afloramientos corresponden a la Formación Ubajay.

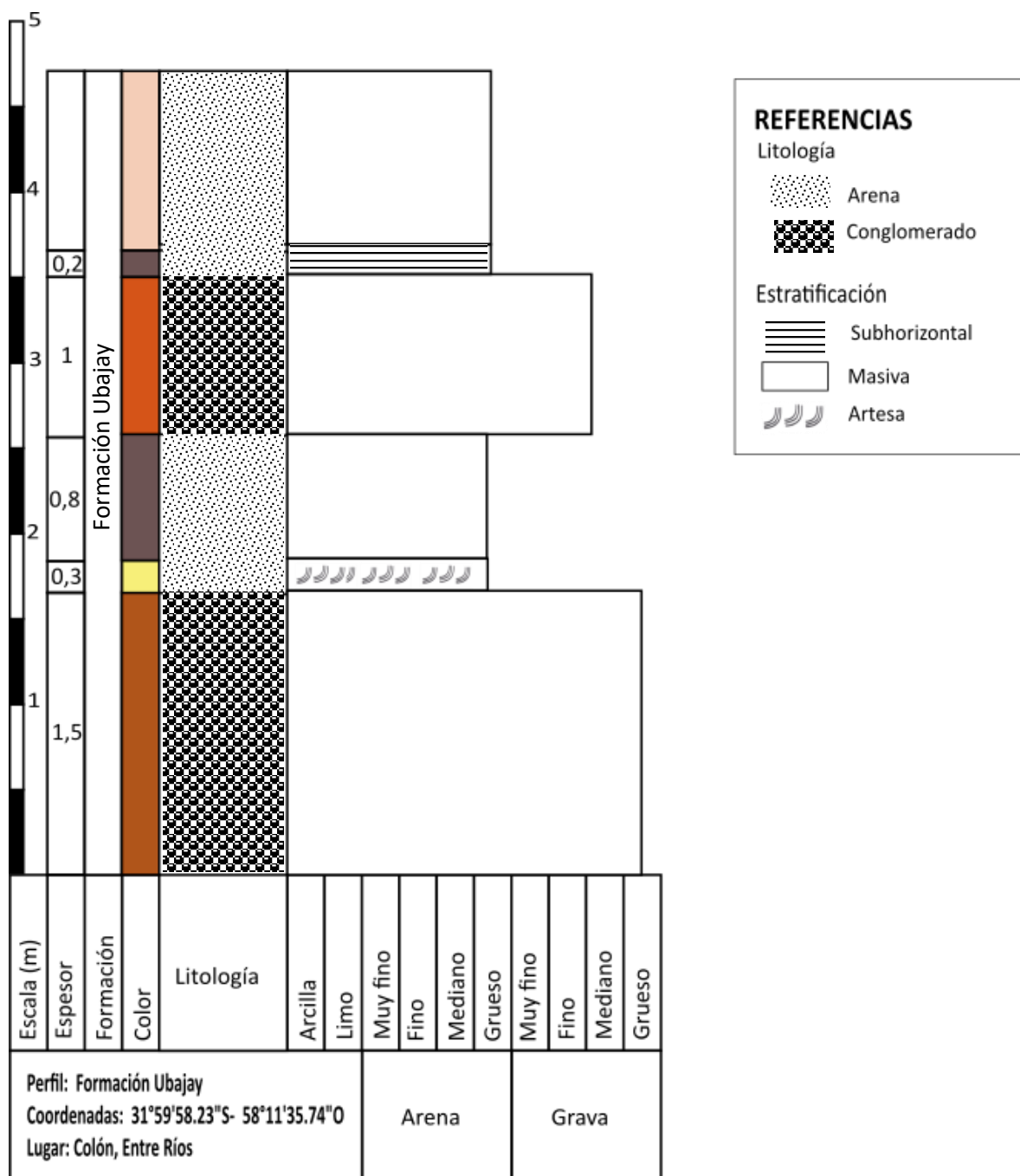


Figura 30: Perfil estratigráfico de la Formación Ubajay, Colón, provincia de Entre Ríos.

Anexo 2: Examen petrográfico

Anexo 2.A: Petrografía canto rodado Colón

Se analizaron dos muestras de agregado grueso natural, identificadas como RAS 024 y RAS 025 (Anexo 3). Estas corresponden a la Formación Ubajay, la cual es explotada a cielo abierto en los frentes de canteras de los establecimientos La Chola II y El Pinar (Figura 2 y Figura 18).

Se realizó el examen petrográfico de las muestras bajo lupa binocular (Anexo 3), y posteriormente se seleccionaron únicamente a los clastos de calcedonia y se separaron en subgrupos (Figura 31) para determinar su porcentaje, para ello, se consideró el color, estratificación interna y opacidad. Finalmente, se realizaron cortes petrográficos para determinar el contenido de calcedonia (Figura 32) y se seleccionó el subgrupo con mayor contenido para realizar pruebas de laboratorio.



Figura 31: Subgrupos de calcedonia. **A.** Traslúcidas sin estructura interna. **B.** Traslúcida con bandeamiento. **C.** Traslucida, con estratificación interna y núcleo de cuarzo microcristalino. **D.** Opaca, con estratificación interna. **E.** Opaca sin estructura interna.

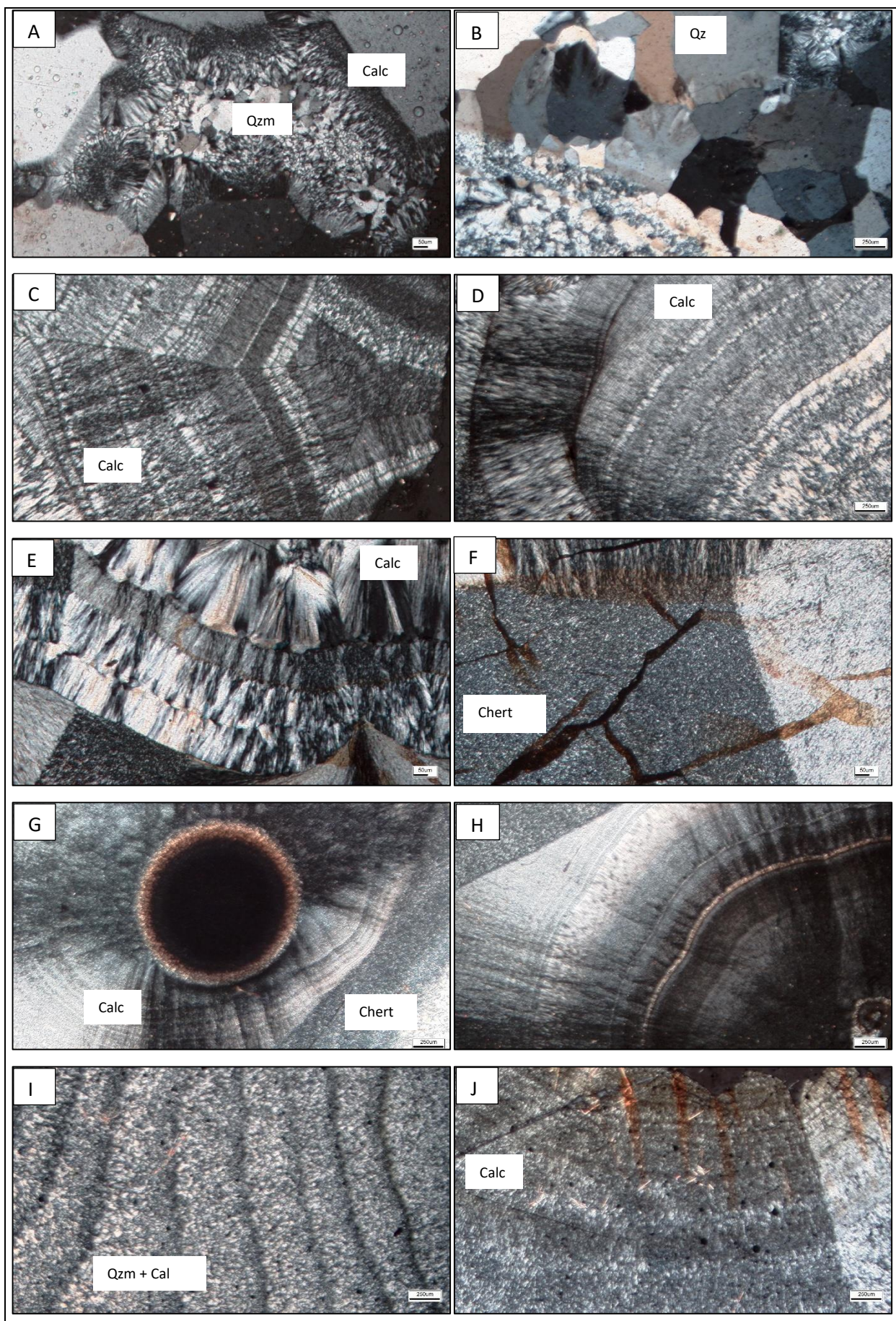


Figura 32: Microfotografías clastos de calcedonia, con luz polarizada cruzada. **A y B:** Subgrupo de clastos traslúcidos y sin estructura interna. **C y D:** Subgrupo de clastos traslúcidos y con estructura interna. **E y F:** Subgrupo de clastos traslúcidos con estructura bandeamiento en escarapela. **G y H:** Subgrupo de clastos opaco con estructura interna. **I y J:** Subgrupo de clastos opaco y sin estructura interna. Ref: Qz: cuarzo; Calc: calcedonia; Qzm: cuarzo microcristalino.

Anexo 2.B: Petrografía de las Formaciones Paraná e Ituzaingó.

Formación Paraná

Descripción macroscópica (bajo lupa binocular): Agregado natural que corresponde a una arena fina redondeada y de moderada esfericidad (Figura 33). Está constituida principalmente por cuarzo (97,3%) y, en proporciones menores, por feldespatos (0,9%), calcedonia (0,6%), minerales máficos (0,6%) y partículas friables (0,5%) y cuarzo microcristalino (0,1%).

El cuarzo es monocristalino, incoloro, posee fractura irregular, se lo observa mayormente límpido, aunque algunos individuos presentan inclusiones de minerales máficos y otros una pátina superficial de óxidos de hierro. El feldespato presenta colores blanquecinos. La calcedonia puede presentarse con tonos que varían de castaño claro a grisáceos, a veces translúcida y otras con brillo vítreo, y se identifica principalmente por su estructura botroidal, textura bandeada y fractura concoide. Los minerales máficos presentan color negro y brillo vítreo. Las partículas friables presentan tonalidades grisáceas y están formadas por material fino desmenuzable aglomerado por un cemento. El cuarzo microcristalino posee colores con tonalidades blanquecinas y lo conforma un agregado muy fino de cristales de cuarzo de tamaño medio menor a 62 μm .

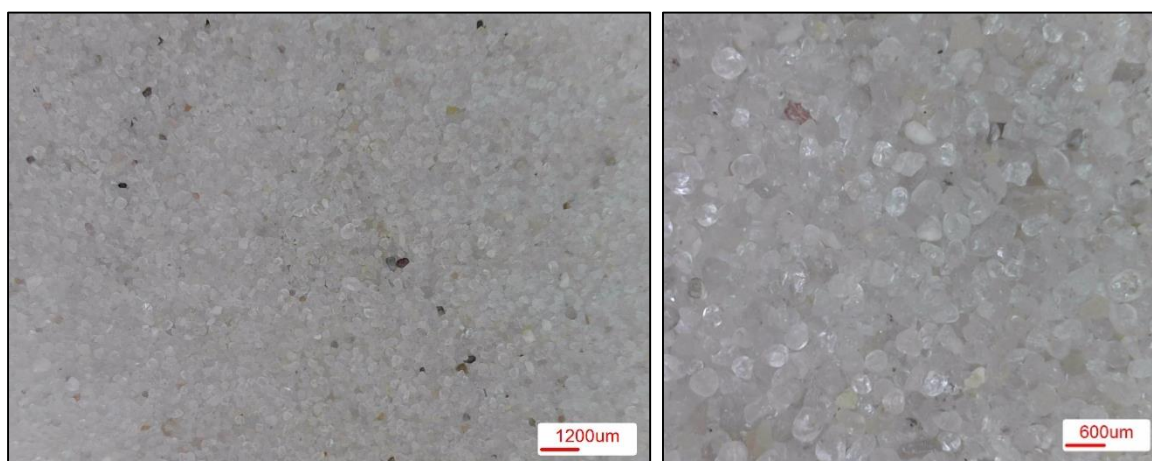


Figura 33: Arena natural correspondiente a la Formación Paraná, bajo lupa binocular.

Descripción microscópica: Agregado natural que corresponde a una arena fina redondeada y de alta esfericidad (Figura 34). Está constituida principalmente por cuarzo (98,1%), seguido en proporciones menores de feldespato (0,7%), calcedonia (0,6%), minerales máficos (0,5%) y cuarzo microcristalino (0,1%).

El cuarzo es monocristalino de formas redondeadas a subredondeadas con extinción normal, se observan límpidos y con bordes netos. El feldespato presenta formas subangulosas. La calcedonia es subredondeada, color castaño claro a incolora, presenta habito fibroso y, en ocasiones, estructura bandeada. El cuarzo microcristalino o policristalino es anhedral y presenta extinción en mosaico o sacaroide. Los minerales máficos presentan pleocroísmo de castaño claro a incoloro y forma subhedral.

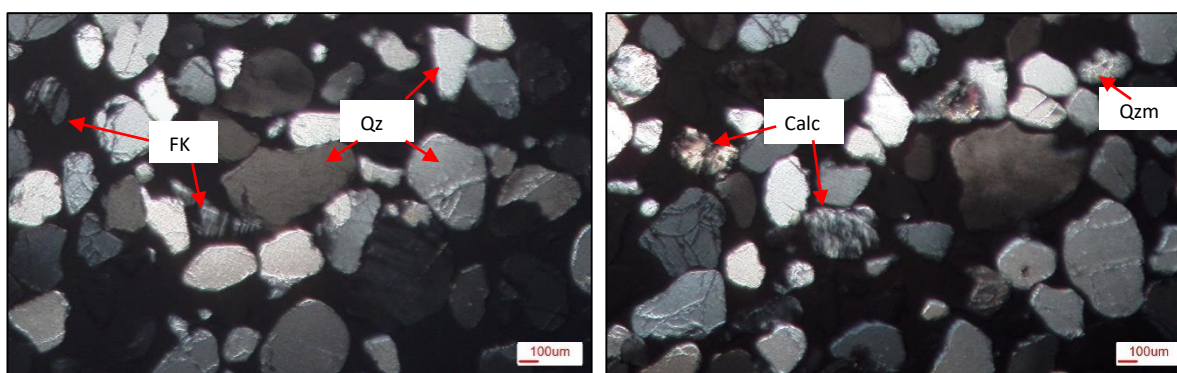


Figura 34: Microfotografía de arenas a grano suelto de la Formación Paraná. Ref: FK: feldespato potásico, Qz: cuarzo, Calc: calcedonia, Qzm: cuarzo microcristalino.

Formación Ituzaingó

Descripción macroscópica (bajo lupa binocular): Agregado natural, corresponde a arena fina, sub-redondeada y de moderada esfericidad (Figura 35). Está constituida principalmente por cuarzo (90,8%) y calcedonia (6,7%), seguido en proporciones menores por partículas friables (1,1%), cuarzo microcristalino (0,6%), minerales máficos (0,5%), feldespatos (0,2%), fragmentos líticos (<0,1%) y restos carbonosos (<0,1%).

El cuarzo es incoloro, posee fractura irregular y se lo observa mayormente límpido, aunque algunos individuos presentan una pátina superficial de óxidos de hierro. La calcedonia puede presentarse con tonos que varían de castaño claro, a veces translúcida y, otras con brillo vítreo, y se identifica principalmente por su estructura botroidal, textura bandeada y fractura concoide. Las partículas friables presentan tonalidades grisáceas y están formadas por material fino desmenuzable aglomerado por un cemento. El cuarzo microcristalino posee colores con

tonalidades blanquecinas y lo conforma un agregado muy fino de cristales de cuarzo de tamaño medio menor a 62 μm . Los minerales máficos están representados por minerales ferromagnesianos de color negro con habito prismáticos y laminares, y brillo vítreo. El feldespato presenta colores blanquecinos. Los fragmentos líticos corresponden principalmente a sedimentitas duras de color castaño con tonalidades grisáceas a rojizas y textura muy fina. Los restos carbonosos corresponden a partículas quebradizas de aspecto carbonizado.

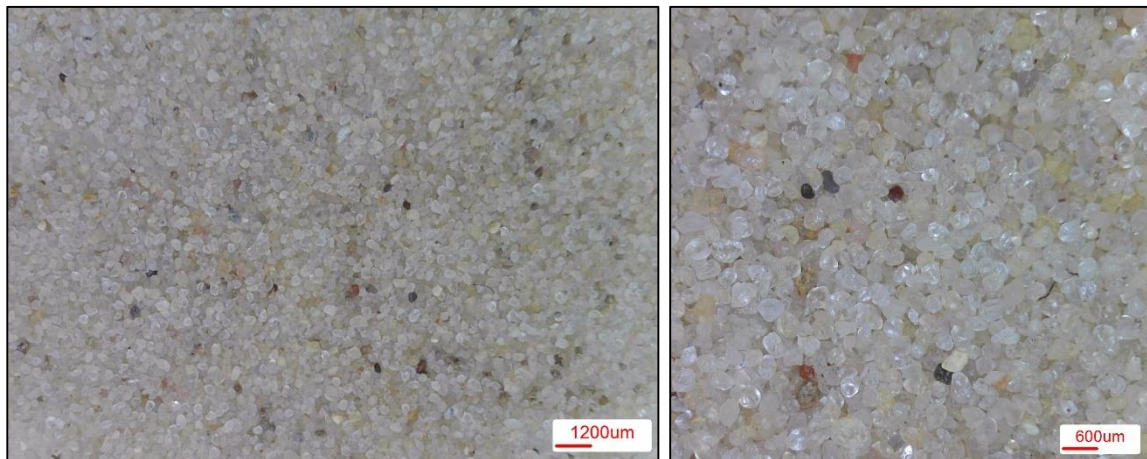


Figura 35: Arena natural correspondiente a la Formación Itzaingó, bajo lupa binocular.

Descripción microscópica: Agregado natural que corresponde a una arena fina redondeada y de alta esfericidad (Figura 36). Está constituida principalmente por cuarzo (95,1%) y calcedonia (3%), seguido en proporciones menores de cuarzo microcristalino (0,6%), feldespato (0,3%) y minerales máficos (1%).

El cuarzo es monocristalino de formas redondeadas a subredondeadas, generalmente con extinción normal, límpidos y con bordes netos. La calcedonia es subredondeada y de color castaño claro, presenta habito fibroso, y estructura bandeada. El cuarzo microcristalino o policristalino es anhedral y presenta extinción en mosaico o sacaroide. El feldespato potásico es subanguloso, y leve alteración a sericita. Los minerales máficos son subangulosos, con pleocroísmo que varía de verde oscuro a verde claro y alto relieve.

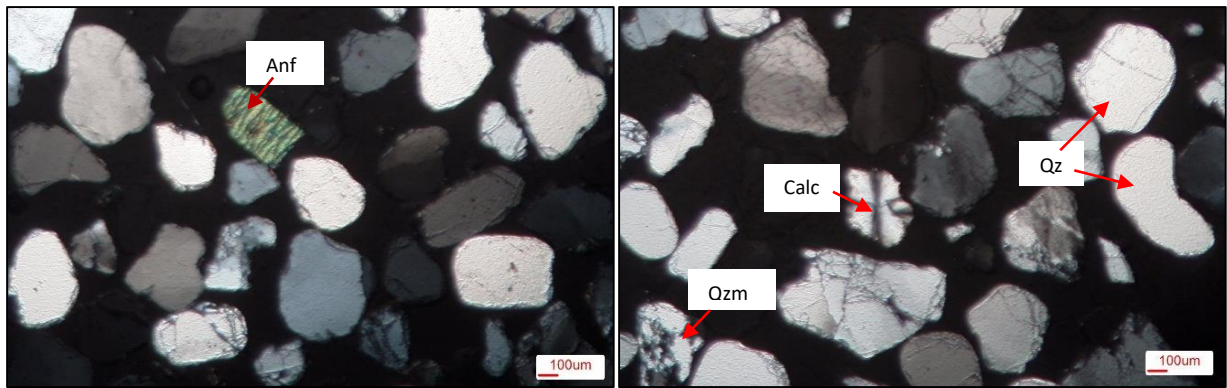
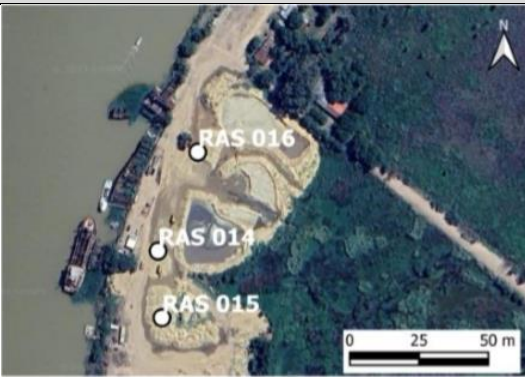


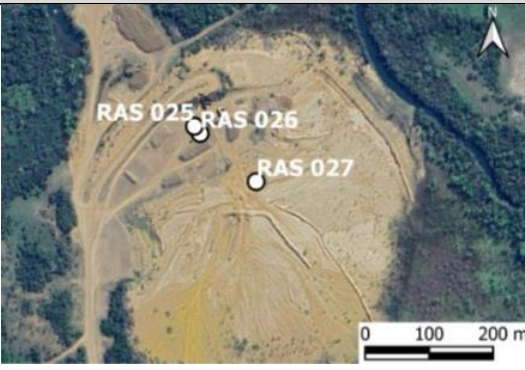




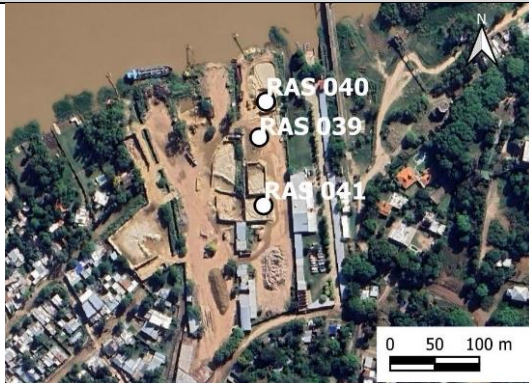





Figura 36: Microfotografía de arenas a grano suelto de la Formación Itzaingó. Ref: Qzm: cuarzo microcristalino; Qz: cuarzo; Calc: calcetonia; Anf: anfíbol.

Anexo 3: Areneras y canteras relevadas.

<p>Arenera Pto. Ib</p> 	<p>Ubicación: Isla de Ibicuy, Entre Ríos</p> <p>Coordenadas: Latitud 33° 45' 15" S – Longitud 59° 10' 42" W</p> <p>Descripción: Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p>Muestras: se extrajeron 3 muestras de las pilas de acopio las cuales se denominaron RAS 014, RAS 015 y RAS 016, diferenciadas por el día se secado.</p>
<p>Cantera Crist - Ib</p> 	<p>Ubicación: Isla de Ibicuy, Entre Ríos</p> <p>Coordenadas: Latitud 33° 45' 19.77" S – Longitud 59° 3' 14.95" W</p> <p>Descripción: Método de extracción a cielo abierto por retroexcavadora.</p> <p>Muestras: se extrajeron 3 muestras de las pilas de acopio: RAS 017, RAS 018 y RAS 019.</p>
<p>Cantera EP</p> 	<p>Ubicación: Colón, Entre Ríos</p> <p>Coordenadas: Latitud 32° 17' 56.47" S – Longitud 58° 7' 47.85" W</p> <p>Descripción: La arenera comercializa arena y canto rodado para la construcción. Método de extracción a cielo abierto.</p> <p>Muestras: se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 022, RAS 023 y RAS 024.</p>
<p>Cantera LC II</p> 	<p>Ubicación: Colón, Entre Ríos</p> <p>Coordenadas: Latitud 31° 59' 5.52" S – Longitud 58° 11' 48.47" W</p> <p>Descripción: Método de extracción a cielo abierto por retroexcavadora.</p> <p>Muestras: se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 025, RAS 026 y RAS 027.</p>

<p>Arenera Alz</p> 	<p>Ubicación: Pueblo Esther, Santa Fe</p> <p>Coordenadas: Latitud 33° 4'18.99"S – Longitud 60°33'44.87"W</p> <p>Descripción: Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p>Muestras: se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 028, RAS 029 y RAS 030.</p>
<p>Arenera SP</p> 	<p>Ubicación: San Pedro, Buenos Aires</p> <p>Coordenadas: Latitud 33°41'43.79"S – Longitud 59°38'0.55"W</p> <p>Descripción: Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p>Muestras: se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 031, RAS 032 y RAS 033.</p>
<p>Arenera Bai</p> 	<p>Ubicación: General Baigorria, Santa Fe</p> <p>Coordenadas: Latitud 32°51'4.51"S – Longitud 60°41'47.95"W</p> <p>Descripción: Método de extracción en el lecho activo, frente del establecimiento.</p> <p>Muestras: se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 034, RAS 035, RAS 036 y RAS 037.</p>
<p>Cantera Crist - AB</p> 	<p>Ubicación: Aldea Brasilera, Entre Ríos</p> <p>Coordenadas: Latitud 31°52'50.97"S – Longitud 60°36'51.76"W</p> <p>Descripción: Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p>Muestras: se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras denominadas como RAS 038</p>

Arenera TN	Ubicación: Paraná, Entre Ríos
	<p><u>Coordenadas:</u> Latitud 31°42'24.78"S – Longitud 60°29'41.02"W</p> <p><u>Descripción:</u> Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p><u>Muestras:</u> se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 039, RAS 040 y RAS 041</p>
Arenera Gr	Ubicación: Paraná, Entre Ríos
	<p><u>Coordenadas:</u> Latitud 31°42'49.74"S – Longitud 60°32'24.08"W</p> <p><u>Descripción:</u> Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p><u>Muestras:</u> se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 042 y RAS 043.</p>
Arenera Hor	Ubicación: Paraná, Entre Ríos
	<p><u>Coordenadas:</u> Latitud 31°42'43.25"S – Longitud 60°32'39.46"W</p> <p><u>Descripción:</u> Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p><u>Muestras:</u> se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras: RAS 044 y RAS 045.</p>
Arenera Sof	Ubicación: Victoria, Entre Ríos
	<p><u>Coordenadas:</u> Latitud 32°36'47.69"S – Longitud 60°10'25.83"W</p> <p><u>Descripción:</u> Método de extracción en el lecho activo, Río Ibicuy, frente del establecimiento.</p> <p><u>Muestras:</u> se extrajeron de las pilas de acopio 3 muestras denominadas como RAS 046.</p>

A continuación, en el Cuadro 12, se detallan los resultados obtenidos en las muestras extraídas durante las campañas de campo (Figura 2).

Muestra	Tipo	Qzm (%)	Calc (%)	Expansión (%)
RAS 014	AGF	0,6	1,5	0,06
RAS 015	AGF	0,9	1,9	-
RAS 016	AGF	1	1,6	-
RAS 017	AGF	-	1,1	-
RAS 018	AGF	0,1	1,2	-
RAS 019	AGF	0,3	1,1	0,04
RAS 020	AGF	-	-	-
RAS 021	AGF	-	-	-
RAS 022	AGF	0,5	9,7	0,15
RAS 023	AGG	1,5	50,0	-
RAS 024	AGG	1,4	48,0	-
RAS 025	AGG	1,8	51,3	-
RAS 026	AGG	-	-	-
RAS 027	AGF	0,2	13,9	0,2
RAS 028	AGF	0,1	4,1	0,07
RAS 029	AGF	0,2	3,8	-
RAS 030	AGF	0,1	4,9	-
RAS 031	AGF	-	5,9	0,14
RAS 032	AGF	0,7	4,7	-
RAS 033	AGF	<0,1	5,0	-
RAS 034	AGF	0,3	4,0	-
RAS 035	AGF	<0,1	3,6	0,04
RAS 036	AGF	0,1	6,8	-
RAS 037	AGF	0,1	4,4	-
RAS 038	AGF	0,1	0,6	-
RAS 039	AGF	2,4	17,5	0,19
RAS 040	AGF	0,6	8,9	-
RAS 041	AGF	0,1	4,5	0,01
RAS 042	AGF	1,5	18,0	0,19
RAS 043	AGF	<0,1	3,4	0,01
RAS 044	AGF	0,1	5,0	-
RAS 045	AGF	0,9	11,3	0,2
RAS 046	AGF	<0,1	2,8	0,03

Cuadro 12: Resultados obtenidos en el examen petrográfico y barra de mortero de las muestras extraídas en canteras y areneras. Referencias: AGF- Agregado fino, AGG- agregado grueso, Qzm- cuarzo microcristalino, Cal- calcedonia.