



## TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Título: Nuevas metodologías de control mineral en la explotación de yacimientos de calizas y su impacto desde la extracción hasta el producto final. Aplicación a la producción de cal en la provincia de San Juan.

Autor: Geol. Claudio Asiales

Directora:Dra. Liliana Castro  
Codirector: Dr. Eduardo Rossello

2022



## RESUMEN

Las calizas son explotadas en la República Argentina desde el siglo XIX, siendo la principal fuente de  $\text{CaCO}_3$  dentro de las rocas carbonáticas. Su formación en ambientes marinos, genera de grandes yacimientos a partir de diferentes ambientes de formación y diagénesis posdeposicional (silicificación y dolomitización) que condicionan su calidad química y geológica. Se reseñan las características geológicas y mineras de los principales depósitos en explotación localizados en las provincias de Buenos Aires, Córdoba y San Juan. El presente trabajo se focaliza en el estudio de las calizas de la Formación San Juan, de edad cambro-ordovícica, de gran extensión en la Precordillera. En particular, la Formación la Silla, posee las mejores condiciones para la generación de cal que se obtiene por la calcinación de calizas en hornos de alta tecnología. Las calizas, con o sin procesamiento posterior a su extracción, aportan la materia prima para satisfacer la demanda local para la construcción, la agricultura, remediación ambiental e industria química. El aumento del consumo de cal en las operaciones mineras consume importantes volúmenes de reservas que obliga a las empresas a buscar nuevos yacimientos en ambientes cada vez más complejos. Por ello, los nuevos equipamientos y metodologías geológicas resultan fundamentales para un buen aprovechamiento de los recursos basados en el control mineral que permite la incorporación de calizas, con menor contenido de impurezas y características físicas más adecuadas para la trituración y calcinación desde la cantera. Para ello es necesaria la interpretación geológica más detallada de los frentes de voladura, con un enfoque operativo, además del análisis de datos químicos ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pérdida por calcinación) y propiedades morfológicas de los fragmentos. Considerando el crecimiento de esta industria en la provincia de San Juan, haciendo imprescindible la evaluación del impacto ambiental, social y económico para que se mantenga como una industria sustentable en la provincia de San Juan.

## ABSTRACT

Limestone has been exploited in the República Argentina since the 19th century, being the main source of  $\text{CaCO}_3$  within carbonate rocks. Its formation in marine environments generates deposits of large extensions from different environmental and diagenetic variables (silicification and dolomitization) that condition its chemical and geological quality. The geological and mining characteristics of the main deposits in operation located in the provinces of Buenos Aires, Córdoba and San Juan are reviewed. The present work focuses on the study of San Juan Formation limestones (Cambro-Ordovician age), with great extension in the Precordillera. In particular, La Silla Formation has the best conditions for the generation of lime, which is obtained by calcining limestone in high-tech kilns. Limestone, with or without processing after its extraction, provides the raw material to meet local demand for construction, agriculture, environment reclamation and chemical industry. The progress of mining operations consumes significant volumes of reserves, forcing companies to search for new deposits in increasingly complex environments. For this reason, new equipment and geological methodologies are essential for a good use of resources based on mineral control. That it means, the incorporation into the industrial treatment of limestone with a lower impurities content and more suitable physical characteristics for crushing and calcination from the quarry. This requires a more detailed geological interpretation of the blasting fronts, with an operational approach, in addition to the analysis of chemical data ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , loss on ignition) and morphological properties of the fragments. Considering the growth of this industry, associated with the lime demand in the province of San Juan, the environmental, social and economic impact must be evaluated in parallel to sustainable development.

## Tabla de contenido

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 2: OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 4: LAS ROCAS CARBONÁTICAS .....</b>	<b>17</b>
4.1. Génesis de las rocas carbonáticas.....	17
4.1.1 Depósitos sedimentarios .....	17
4.1.2. Depósitos de origen metamórfico .....	19
4.1.3. Depósitos de origen ígneo (Carbonatitas) .....	19
4.2. Mineralogía .....	20
4.3 Clasificación de rocas carbonáticas .....	21
4.4. Proceso de silicificación de carbonatos .....	23
4.4.1 Isotopía del chert .....	24
4.5 Proceso de dolomitización.....	26
<b>CAPÍTULO 5: LOS EVENTOS CARBONÁTICOS Y LOS DEPÓSITOS DE ROCAS CARBONÁTICAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA.....</b>	<b>31</b>
5.1 Eventos carbonáticos .....	31
5.2. Principales manifestaciones y depósitos carbonáticos .....	33
5.2.1 Región Noroeste .....	33
5.2.2 Región Centro - Cuyo .....	34
5.2.3 Cuenca Neuquina .....	34
5.2.4 Provincia de Buenos Aires.....	35
5.2.5 Otros.....	35
<b>CAPÍTULO 6: LOS DEPÓSITOS CARBONÁTICOS DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN .....</b>	<b>37</b>
6.1. La estratigrafía como guía de prospección .....	37
6.2. Los componentes silíceos de las sucesiones carbonáticas en Precordillera .....	39
6.3. Características y potencial de la Formación la Silla .....	40
6.4. Principales canteras de la provincia de San Juan.....	44
<b>CAPÍTULO 7: EXPLORACIÓN DE CANTERAS Y PROCESAMIENTO DE ROCAS CARBONÁTICAS.....</b>	<b>46</b>
7.1 Características generales de la explotación.....	46
7.1.2. Los equipos utilizados en la explotación de canteras.....	46
7.2. El procesamiento de rocas carbonáticas .....	47

<b>CAPÍTULO 8. PRODUCCIÓN DE CAL .....</b>	<b>49</b>
8.1. Introducción .....	49
8.2 Los hornos para producción de cal .....	52
<b>CAPÍTULO 9: EL CONTROL MINERAL. APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE CAL EN LA PROVINCIA DE SAN JUAN .....</b>	<b>57</b>
9.1. Influencia del control mineral .....	57
9.1.1. Problemas más comunes en el proceso por la calidad de la roca .....	60
9.1.2. La utilidad de los fotomosaicos.....	62
9.1.3. Geoquímica como herramienta de control. ....	67
9.1.4 Otros ensayos.....	70
9.2. Mezclas operativas en cantera .....	73
<b>CAPÍTULO 10: ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD.....</b>	<b>75</b>
10.1 Aspectos ambientales .....	75
10.2. Seguridad e higiene.....	77
<b>CAPÍTULO 11: LICENCIA SOCIAL Y LA RELACIÓN CON LAS COMUNIDADES.....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO 12: ASPECTOS ECONÓMICOS .....</b>	<b>80</b>
12.1. Introducción .....	80
12.2. Mercado mundial.....	81
12.2.1. Producción .....	81
12.2.2. Exportaciones.....	84
12.2.3. Importaciones .....	84
12.3 Potencial minero de calizas en la República Argentina .....	84
12.4. La industria de la cal en provincia de San Juan.....	85
12.4.1. Introducción .....	85
12.4. 2. Mercado .....	89
12.4.3. Empresas.....	90
12.4.4.Cadenas de valor y costos.....	91
<b>CAPÍTULO 13: CONCLUSIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>CAPÍTULO 14: RECOMENDACIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>CAPÍTULO 15: AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>99</b>
<b>CAPÍTULO 16: BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>100</b>

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En los últimos años la explotación de rocas y minerales carbonáticas empezaron a tener un rol muy importante dentro de la minería de recursos naturales. Durante muchos años, estas explotaciones fueron predominantemente llevadas a cabo por pequeñas empresas y en algunos casos en forma artesanal. Sin embargo, hoy en día por una creciente demanda de estas materias primas, es necesario mejorar nuevas metodologías y prácticas para poder aprovechar de mejor manera los recursos.

Este trabajo se focaliza en el análisis de la producción de calizas y depósitos carbonáticos, en particular en la provincia de San Juan. Las calizas están formadas principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), aunque el concepto incluye una gran variedad de rocas carbonáticas. Estas rocas tienen que tener más del 50% de carbonato mineral, ya sea calcita (puro  $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ) o ambos (Bliss *et al.* 2008). El origen de estas calizas se vincula a procesos biogenéticos y/o por precipitación inorgánica asociado a plataformas carbonáticas. Pueden constituir depósitos de grandes extensiones, de cientos y miles de kilómetros cuadrados.

Las calizas tienen muchos usos industriales, con o sin procesamiento posterior a su extracción, aportando la materia prima para una gran variedad de productos para construcción, agricultura, medioambiente, e industria química. Estas rocas son la principal materia prima para producir cal ( $\text{CaO}$ ) que se utiliza para el tratamiento de suelo, la purificación de aguas, en pinturas, en la industria química y sobretodo en construcción, entre otras. Las dolomitas son en general menos útiles que las calizas para las distintas industrias (Bliss *et al.* 2008).

Los requerimientos o especificaciones técnicas (químicas, físicas, granulométricas, texturales, entre otras) difieren radicalmente de una industria a otra y definen así la aptitud de calizas y dolomías para cada destino (SEGEMAR-UNSAM 2008). Según el tratamiento de la piedra caliza es la materia prima que podemos obtener: carbonato de calcio natural, cal viva (por calcinación), cal apagada o hidratada (por hidratación) y carbonato de calcio precipitado (por carbonatación).

La provincia de San Juan se caracteriza por producir cal desde hace más de un siglo, debido a sus excepcionales afloramientos de rocas carbonáticas, los cuales destacan no solo por sus leyes sino también por sus volúmenes. Las secuencias de plataforma carbonática cambro-ordovícica de la Precordillera oriental y central definen una faja portadora de importantes depósitos de calizas y dolomías sedimentarias (Gozalvez *et al.* 2004). Estas rocas se originaron por precipitación química, en ambiente de plataforma marina somera, bajo condiciones climáticas cálidas y pueden alcanzar una potencia de 2500 metros. Están presentes en las Formaciones La Laja, La Silla, La Flecha, Zonda y San Juan. Constituyen las mayores reservas de alta calidad en el cono sur continental (Castro *et al.* 2007). Los distritos más importantes de calizas son: Los Berros-Pedernal, Jáchal, Sierras de Villicum y Sierra Chica del Zonda (SEGEMAR - UNSAM 2008). Estos se distribuyen como cordones montañosos elongados con un rumbo norte-sur (Fig.1).

Estos depósitos de Precordillera tienen un importante control estructural que resulta clave para hacer el modelamiento, realizar el control mineral y elegir el método de explotación. La configuración actual generó una serie de pliegues con orientación N-S y fallamientos inversos del mismo rumbo producidas durante el Ciclo Ándico. A su vez se acentuaron las deformaciones más antiguas y favorecieron la inversión tectónica, aunque también hay estructuras antiguas que se han preservado. La deformación de Precordillera es descripta por diferentes autores como faja corrida y plegada (Cardó *et al.* 2020). Teniendo en cuenta este contexto, los depósitos carbonáticos cambro-ordovícicos, fueron expuestos a diferentes

ciclos de esfuerzos y deformación, que se superponen en muchos casos, dando una complejidad que debe ser descripta para su correcta explotación. Tener un buen modelo estructural puede hacer la diferencia entre el éxito o fracaso a largo y mediano plazo de los proyectos

Aproximadamente el 55% de la producción de cal del país proviene de la provincia de San Juan (Solsona y Rogosz 2018). Este valor hace a la provincia a la mayor productora de cal del país, por lo que obtener el mayor rendimiento de las canteras y plantas, sería una forma muy práctica de ahorrar tiempo y aprovechar equipos. Considerando la creciente demanda de cal por parte de las diferentes industrias, principalmente la industria minera es necesario poder optimizar su producción y aumentar la vida útil de las canteras. Esto implica mayor control en cantera para mantener la calidad y los volúmenes adaptándose a las exigencias y requisitos del mercado.

En relación con la producción de cal, la República Argentina posee una balanza comercial positiva, siendo Chile el principal comprador de cal viva y cal hidratada. En menor medida se exporta manufactura a Brasil y Bolivia.

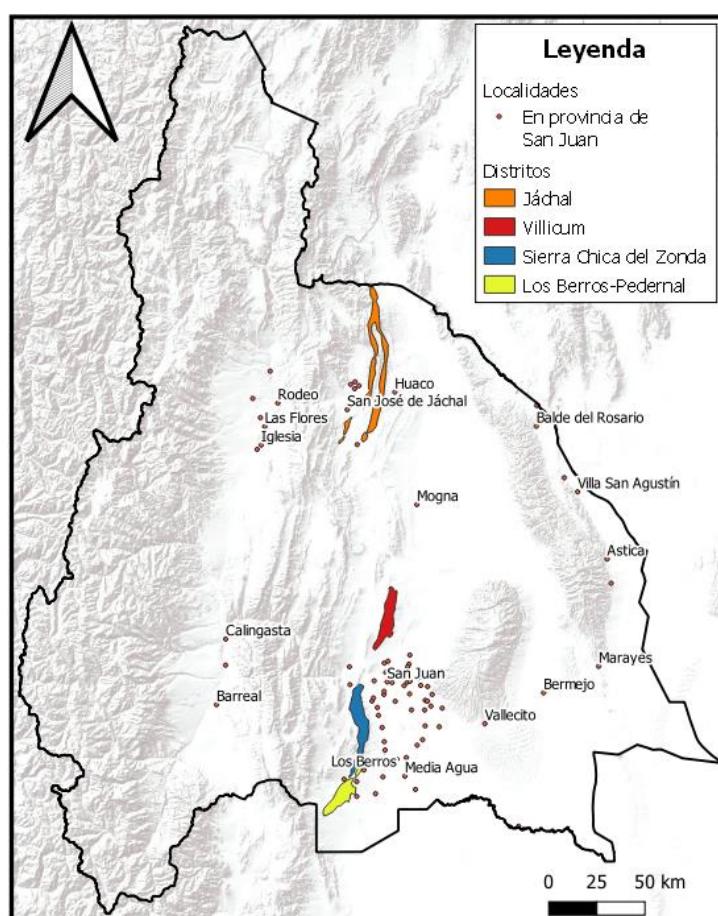


Figura 1. Mapa de la provincia de San Juan, con las áreas de producción de calizas.

Con este trabajo se espera aportar nuevas herramientas prácticas para la explotación de yacimientos de rocas carbonáticas, principalmente para los depósitos de calizas utilizadas para la industria de la cal, a través de una metodología de control mineral, que permita tener un manejo eficiente desde la cantera. El desarrollo de esta metodología puede mejorar la calidad y cantidad del material que se produce en las operaciones a cielo abierto para este tipo de depósitos. Esto permitirá extender la vida útil de los proyectos mineros en todas las escalas, demostrando su impacto en las reservas de mineral.

La aplicación de nuevas tecnologías como control topográfico con GPS geodésico y la introducción de tecnologías de relevamiento como drones y la aplicación de los conocimientos de la geología estructural, la geoquímica, la geotecnia y la estratigrafía por un profesional geólogo, puede dar un salto significativo al estudio de estos depósitos. Por ejemplo, puede ayudar a un mejor control de las voladuras y del material que se va movilizando en la operación tanto del mineral como el estéril. Estas innovaciones pueden hacer esta industria aún más sustentable y segura en todos los aspectos de la producción

## CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

- ✓ Integrar los conocimientos adquiridos en la carrera de Especialización, con un aspecto práctico a la explotación de yacimientos de calizas.
- ✓ Realizar una revisión bibliográfica sobre la génesis, y ambientes de formación de las calizas y demás rocas carbonáticas.
- ✓ Presentar una síntesis de los depósitos carbonáticos en la República Argentina.
- ✓ Caracterizar una metodología de control mineral para la extracción de calizas para la producción de cales. Ejemplificarlo con la producción de calizas que se desarrolla actualmente en la Precordillera en la provincia de San Juan.
- ✓ Analizar desde el punto de vista ambiental, social y económico de la zona de Precordillera donde se desarrolla la explotación de yacimientos de calizas para tender a un desarrollo sustentable.
- ✓ Considerar los beneficios y la posibilidad de extrapolar las nuevas tecnologías y metodologías a la pequeña y mediana minería en otro tipo de depósitos.
- ✓ Comparar los resultados de la aplicación de la metodología de control mineral propuesta con los de las antiguas prácticas de explotación de yacimientos de calizas para la industria de la cal. Cuantificar el impacto del control mineral en los procesos de extracción y producción.
- ✓ Presentar una actualización del panorama de la industria de la cales en la provincia de San Juan y en la República Argentina, considerando su creciente demanda y su posible atención en el futuro cercano como materia prima.
- ✓ Identificar los mercados en desarrollo, los cuales requieren de la cal como materia para su proceso, como los son principalmente las operaciones mineras metalíferas o la producción de litio a partir de salmueras.
- ✓ Evaluar el potencial de abastecimiento de calizas para la República Argentina y América latina, aprovechando la calidad y volúmenes que se disponen en el país.

## CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el Trabajo Final Integrador (TFI) en primer lugar se realizó una recopilación de información a partir de fuentes y base de datos de libre acceso, además del material provisto por el equipo docente de la Carrera de Especialización en Geología Minera con fines académicos.

También se dispuso de la información y los datos técnicos por parte de empresas de la industria de la cal, los cuales se usaron de forma esquemática para conservar la confidencialidad de estos.

Con la información obtenida se hizo una evaluación sobre la producción de calizas y la industria de la cal en la provincia de San Juan. Algunos de los programas que se utilizaron para el manejo de los datos y del armado de gráficos son QGIS, Stereonet, Google Earth, los cuales son programas de libre acceso. Se complementó con el análisis y construcción de gráficos, mapas y esquemas.

Se recopila y describe las tareas realizadas para el control mineral en algunas operaciones a cielo abierto, donde se extraen actualmente calizas para la producción de cal en la provincia de San Juan. El mismo inicia con las actividades de campo, toma de datos con brújula geológica, muestreos geoquímicos, descripciones geológicas, entre otras.

Se complementa con relevamientos de topografía como GPS diferencial y drones para la obtención de información base para la construcción de mapas y perfiles (Fig.2). Esto permite tener un mejor control de la operación, al ajustar el cálculo de volúmenes explotados, hacer un análisis espacial de datos y apoyo para el modelado de los cuerpos geológicos.



**Figura 2. Estación del GPS geodésico, utilizado para la medición topográfica y corrección de puntos en las canteras en operación.**

Al mismo tiempo se analiza los procesos de tratamiento a los cuales donde se incorpora la caliza y los productos obtenidos sobre los cuales se determina su composición química, la distribución granulométrica y el índice de calcinación. Con los datos obtenidos se evalúa en gabinete de manera cualitativa y cuantitativa el impacto del control mineral desde la extracción hasta el producto final en el proceso de producción de cal.

Finalmente, se redactó el informe final, para cumplimentar con las exigencias del Trabajo Final Integrador, a fin de obtener el título de Especialista en Geología Minera de la Universidad de Buenos Aires.

#### ❖ La recopilación de información

Se realizó una recopilación bibliográfica sobre rocas carbonáticas, su génesis, mineralogía, clasificaciones. Se describieron brevemente de los principales cuerpos de rocas carbonáticas y operaciones del país. Esto incluye características geológicas y metalogenéticas, como así también cuestiones al procesamiento y producción de estos. Se evaluó la información relacionada con el mercado mundial y en particular en la República Argentina.

#### ❖ El armado del modelo geológico

El armado de la base de datos, incluye datos geoquímicos, estructurales, estratigráficos para llegar a modelos de mejor calidad. Estos datos se ubican geográficamente en el espacio, para poder realizar mapas (de calidad química o geológico-estructural) que permiten entender mejor los cuerpos mineralizados.

La información geoquímica se obtiene con muestreos de tipo rock chip y de perforación con diamantina o aire reverso. Cada muestra tiene su procedimiento de extracción correspondiente. La figura 3 muestra la distribución de las unidades geológicas según las observaciones de campo en superficie y su vínculo con los sondeos de la exploración con diamantina, en las canteras de La Laja, provincia de San Juan.

Se realiza un análisis de las muestras en laboratorio donde se analizan los elementos mayoritarios. Los resultados analíticos se expresan en forma de óxidos, principalmente de calcio, magnesio, y otros óxidos presentes (de silicio, hierro y aluminio). El estudio se concentra en estos elementos principales ya que pueden definir las calidades en función de su abundancia en este tipo de rocas.

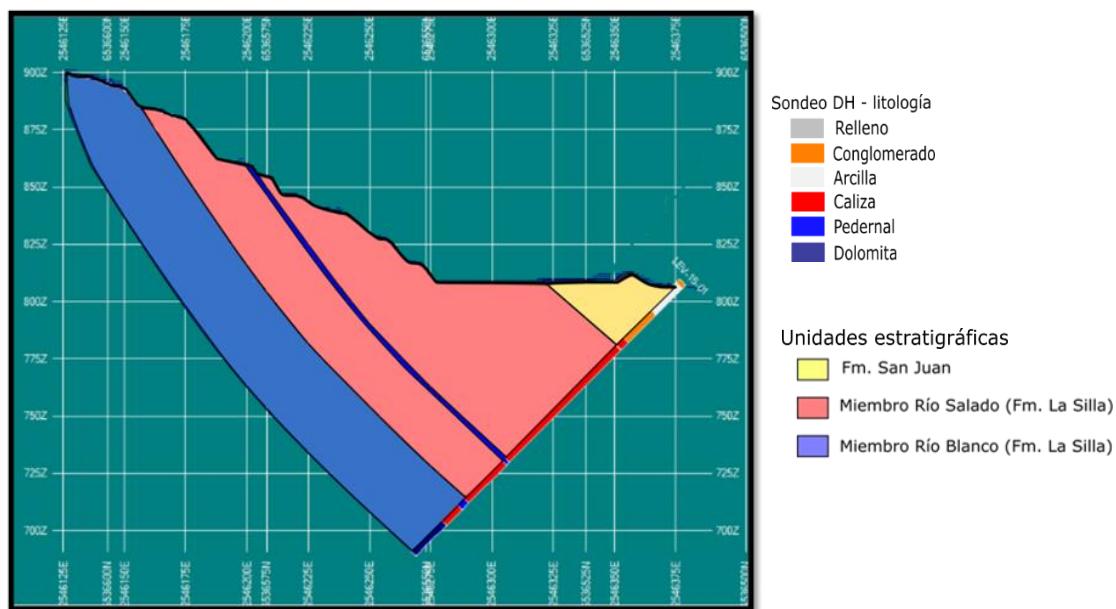
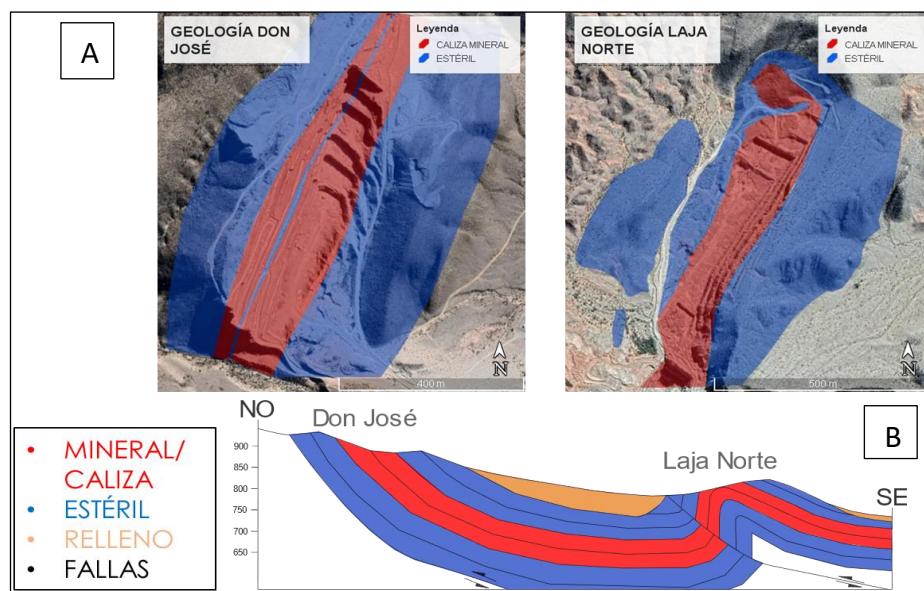


Figura 3. Perfil geológico oeste-este, con las unidades estratigráficas vinculando las observaciones de campo y un sondeo de la exploración de diamantina, en las canteras de La Laja, provincia de San Juan.

Para el armado de los modelos geológicos es necesario hacer un modelo de elevación digital de alta resolución. Otra opción es realizar un modelo de curvas de nivel de alta resolución. Un adecuado modelo

topográfico ayuda al modelado geológico y posterior modelado de mina. Estos modelos se pueden obtener con relevamientos aéreos por dron que es una metodología nueva para estas operaciones, con un precio razonable y resultados óptimos. Un relevamiento con dron mensual permite obtener un modelo de elevación digital de alta resolución como así también una imagen formada por un mosaico de fotos de alta resolución. Los modelos de elevación deben tener la superficie del cuerpo a minar donde se va a combinar junto al mapeo. Los mapas que se realicen tienen que estar en escalas de trabajo similares para permitir ajustar de mejor manera el modelo geológico.

La figura 4 muestra un ejemplo de mapeo de campo, a nivel de cantera, usando un criterio operativo, delimitando los cuerpos en función de calidad química y litología. A su vez, incluye la Interpretación geológica de los mapeos realizados y los datos estructurales obtenidos, volcados en un perfil geológico esquemático.



**Figura 4. A.** Mapeos de campo, a nivel de cantera, usando un criterio operativo. Se observa la delimitación de los cuerpos en función de calidad. El perfil B, muestra la Interpretación geológica de los mapeos realizados y los datos estructurales obtenidos.

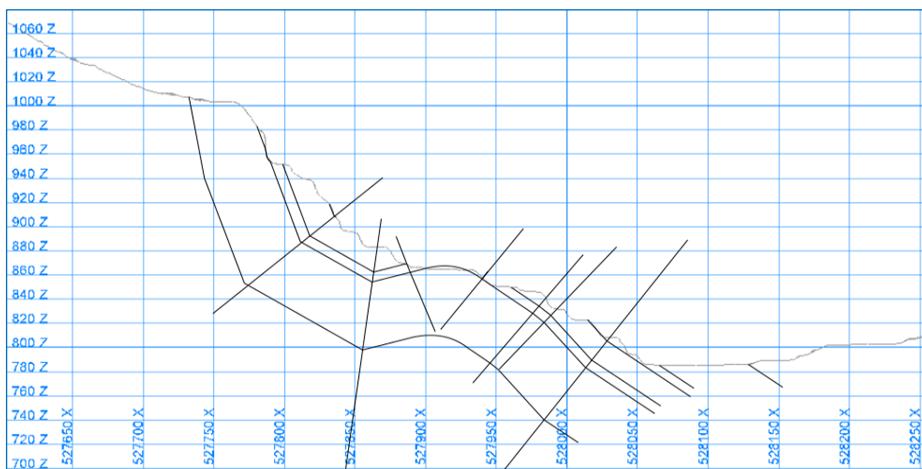
Para la confección de la base de datos de campo se hacen mediciones de rumbo y buzamiento de los cuerpos con brújula geológica y un GPS que permitan ajustar de mejor manera los contactos. Esto se acompaña con las descripciones generales de campo. Generalmente para este tipo de depósitos existe un control estructural muy fuerte por lo que es fundamental tener una densidad de datos.

Luego, toda la información obtenida se utiliza durante el trabajo con un software para modelamiento con diferentes niveles de complejidad en función del objetivo que se tenga para los modelos geológicos. Una práctica simple, pero efectiva es hacer perfiles geológicos, donde se limitan los cuerpos principales, y se destacan las características geológicas, los buzamientos y contactos.

Para realizar los perfiles se vuelca la información geológica y estructural junto a la topografía del modelo de elevación digital. Muchas veces se necesita definir los cuerpos geológicos que se van a modelar. Estos pueden tener un carácter operativo si es que se conocen las leyes de corte de los diferentes elementos y se tienen los datos químicos. Para ello se debe separar principalmente en cuerpos minerales y estériles de diferentes calidades químicas o puede hacerse una clasificación geológica en función de las litologías

principales caracterizando generalmente el tipo de caliza o carbonato que se encontraron presentes en el área. La figura 5 muestra un ejemplo de reconstrucción geológica en perfil siguiendo mediciones geológicas y datos de estratificación, con el método de Kink.

El modelamiento con el software genera una sucesión de perfiles siguiendo el rumbo de la estratificación, que se correlacionan con un distanciamiento óptimo para su modelado. La distancia entre perfiles se puede manejar entre 20 a 50 metros para tener un nivel de detalle alto, debido a que estos tipos de yacimientos de calizas tienen grandes extensiones uniformes y homogéneas. El cuerpo obtenido es un sólido simple que se puede complementar con los datos geoquímicos y químicos dando así una información más completa.



**Figura 5. Reconstrucción geológica siguiendo mediciones geológicas y datos de estratificación, con el método de Kink.**

#### ❖ **Las herramientas para control mineral**

El control mineral hace referencia a todas las actividades que se realizan para garantizar las calidades que requieren los procesos posteriores a la extracción de roca. Para ello se utiliza una serie de técnicas y metodologías que ayudan a lograr estos objetivos. En primer lugar, hay que tener en cuenta que la explotación para este tipo de depósitos son operaciones mineras a cielo abierto o canteras donde se realizan voladuras de bloques, generando bancos de explotación. En este tipo de explotación, el control mineral puede clasificarse en dos actividades principales, una orientada al relevamiento geológico estructural de los frentes de voladura y otra asociada al análisis y la estadística de datos químicos. En la primera, el geólogo hace un relevamiento del frente de voladura definiendo los cuerpos minerales y estériles distinguiendo litologías tomando datos estructurales geotécnicos. También incluye datos estratigráficos de contactos que permitan tener una primera idea de la geología del cuerpo a explotar. Esto, principalmente se hace para corroborar y justificar el modelo geológico previamente hecho. Una vez relevado el frente se hace una primera división del cuerpo, si es necesario distinguiendo las rocas con potencial de aquellas rocas estériles. Para ello, se utilizan marcas en cantera con estacas, banderines o marcas de colores. Así, se definen de manera estándar sectores con rojo como aptos para consumo o mineral, con azul para materiales estériles o para escombrera y con verde para aquellos materiales de mezcla o en espera. La figura 6 muestra la delimitación de un bloque de voladura, utilizando marcas en

cantera. Éstos se definen en función del relevamiento geológico y el análisis químico de los pozos. Es necesario realizar pozos de exploración para ir ajustando los modelos geológicos, entendiendo las limitaciones en profundidad y representatividad de los mismos.



**Figura 6. Delimitación de un bloque de voladura, utilizando estacas de 1 metro en cantera. Se define en función del relevamiento geológico y el análisis químico de los pozos. La estaca roja corresponde al mineral y la azul a estéril.**

Los bloques a explotar van a ser perforados con aire reverso que permiten perforaciones de 3 a 4" con profundidades de hasta 20mts, según disponibilidad de barra (Fig.7). La muestra obtenida en forma de cono se analiza con el fin de obtener una química promedio del bloque. Cada pozo es relevado por el equipo de topografía para tener el punto exacto de la posición del pozo y sus respectivas coordenadas X, Y, Z. Los datos de perforación deben incluir la profundidad de perforación y el ángulo. Las muestras obtenidas de la perforación se homogenizan, se cuartean, rotulan y se embolsan para ser despachadas al laboratorio para su posterior análisis.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis se hace una primera estadística de los datos para eliminar cualquier tipo de error o detectar cualquier anomalía. Una vez pasado el primer filtro se ubica cada dato químico en el punto GPS correspondiente, generando un mapa de calidades del bloque visto desde planta. Este mapa permite definir aquellos cuerpos que tengan las condiciones necesarias para ser incluidas como mineral y aquellos que van a ser estériles. Estos resultados se correlacionan con las observaciones de tipo geológico y en caso de tener una correlación positiva se hace el marcado en campo de la zona mineral y de la zona estéril para facilitar el posterior cargado de material luego de realizar la voladura por parte del personal de cantera.



**Figura 7: Equipos de perforaciones en las canteras de calizas de operaciones activas.**

La figura 8 muestra un equipo de perforación de aire reverso con los conos de material perforado correspondiente a un bloque de voladura.



**Figura 8: Equipo de perforación de aire reverso con los conos de material perforado correspondiente a un bloque de voladura, siguiendo una malla de 3 por 4 metros.**

#### ⊕ **Los softwares y las bases de datos**

La exploración como la producción de calizas, conlleva una recopilación de información geológica, estructural, geoquímica, geofísica, minera, ingenieril, geotécnica, entre otras, que ayudan a entender y producir de mejor manera los materiales.

Esta información se ubica espacialmente, y requiere de la administración de base de datos y el uso de herramientas digitales. Este es el primer eslabón del proceso en el que se basan las siguientes etapas. Las bases de datos tienen que ser simples, pero completas, con un fuerte apoyo de datos químicos y geológicos que van ser en general el control mineral en el día a día. Esto permitirá después hacer una consolidación de resultados respecto a los modelos utilizados para los planes a corto y mediano plazo.

En general, los programas a utilizar deben responder a las necesidades y los requerimientos del proceso. Estos programas deben permitir organizar los datos espacialmente, armar mapas, combinar capas

de información, como pueden ser los sistemas de información geográfica (GIS). También se pueden usar los programas de modelamiento ya sea geológico o minero, que permiten trabajar con información en 3 dimensiones, realizar cálculos geoestadísticos, interpretaciones o predicciones. Luego, las bases de datos o planillas de cálculos se utilizan, para organizar los datos en crudo, realizar gráficos, evaluar tendencias, filtrar información. También hay programas específicos, que ayudan a hacer cálculos estructurales, geotécnicos, presentaciones, edición de audiovisual, entre otras herramientas.

#### ❖ **Las cuestiones operativas**

Los trabajos de producción, incluidos dentro de la extracción, requieren las actividades del geólogo. Estas se pueden resumir como geología de mina. Llegar a las calidades requeridas suele estar asociada a un control en conjunto con otros profesionales de mina. Esto se resume en definir los frentes a explotar, las calidades de los cuerpos, la cantidad de equipos, las mezclas de los materiales, entre otros a fin de alcanzar la ley de corte (tanto del % de CaCO<sub>3</sub> como de las impurezas) y el volumen de producción diario.

Estas variables en su conjunto son las actividades a corto plazo que van consumiendo el material mineral o los movimientos de estéril.

Los equipos interdisciplinarios facilitarán la organización a corto plazo de la operación. La cantidad de frentes activos estará limitada por las maquinarias disponibles. Los equipos principales son aquellos de carguío como palas y retroexcavadoras (Fig.9). Estos tienen índices de carga, que estarán en función de la habilidad de los operarios y del tamaño del equipo.



**Figura 9. Equipos habituales para las operaciones de canteras de calizas. Movimiento del material en un frente en explotación.**

Las palas permiten mayor volumen de carga y nivelar los pisos. El tamaño de la pala disponible limitará la altura de banco que podrá volarse para estar dentro de los factores de seguridad. La retroexcavadora es una herramienta muy versátil, que ayuda a sanear los frentes volados con mayor capacidad de selección, pero en menor volumen. Son equipos útiles para movimientos de materiales en zonas de difícil acceso, emparejar frentes, realizar excavaciones en materiales blandos o liberar frentes con tamaños mayores. Además, estos equipos pueden tener accesorios que permiten picar material, reduciendo los tamaños que están fuera de la especificación para poder incorporarlos al proceso.

Los camiones de carga varían en tamaño de entre 20 a 30 toneladas y esto permite el movimiento de materiales desde los frentes hasta su destino final, ya sea a planta de trituración, escombreras, stocks intermedios. El control de los volúmenes movidos por camión permite tener un valor aproximado de la producción realizada, para ello es necesario el correcto llenado de los mismos y su pesaje en balanza para ajustar los resultados.

Los equipos de perforación de aire reverso permiten perforaciones de 3 a 4" con profundidades de hasta 20mts, según disponibilidad de barras. Generalmente disponen de orugas que le permiten acceder a diferentes terrenos y topografías, además de poder dar un azimut y ángulo de perforación variado en cada pozo. Son equipos fundamentales, ya que permiten perforar los frentes a volar, con mallas regulares en función del tamaño de material deseado y el volumen. Estos pozos cumplen dos funciones, generar el espacio de carga con explosivo para la voladura, y formar el cono de material perforado. Este cono se muestrea y se analiza, para cuantificar la química de ese pozo. Estos equipos de perforación también pueden ser usados para realizar pozos de exploración *brownfield* para ir ajustando los modelos geológicos, o en sectores donde se genere algún tipo de conflicto, entendiendo las limitaciones en profundidad y representatividad del mismo. Otros equipos que pueden usarse en las operaciones son topadoras y niveladoras, que sirven principalmente de apoyo para movimientos de material y mantenimiento de accesos y caminos.

❖ **Los aspectos ambientales, sociales, económicos, de higiene y seguridad**

Se abordaron los aspectos ambientales y de seguridad e higiene y los vinculados a la licencia social y la relación con las comunidades de las localidades involucradas. Además, se analizó el panorama de mercado y las expectativas futuras.

❖ **Los aspectos relacionados con la explotación de canteras de calizas y obtención de productos**

Se incluyeron los detalles de cómo se realiza la explotación de este tipo de minerales, sobre los equipamientos utilizados y sus características operativas. También la secuencia de operaciones industriales posteriores a la extracción de la roca de la cantera, fundamentalmente las de trituración, molienda y clasificación que llevan a la obtención de distintos productos para distintas aplicaciones (enmiendas calcáreas de suelos, cargas minerales en la fabricación de pinturas y caucho, entre otros) o de la principal materia prima para la obtención de otro producto de interés: la cal

❖ **Los aspectos relacionados con la producción de cal**

Se describió la importancia que tiene el control minero como metodología para mejorar la calidad de las cales que pueden obtenerse. Como este producto es una de las aplicaciones más importantes de la roca caliza, se incluye información relacionada con el proceso de producción de cal: los hornos, condiciones de trabajo y calidades como aspectos más relevantes.

## CAPÍTULO 4: LAS ROCAS CARBONÁTICAS

Dentro de esta denominación se incluye a todas las rocas (calizas, dolomía e incluso mármol) cuyo principal mineral constituyente es un carbonato. Como principales minerales se hace referencia a la calcita y dolomita, a pesar de ser un grupo de minerales muy amplios.

Los depósitos de rocas carbonáticas pueden dividirse en: sedimentario, metamórfico e ígneos.

### 4.1. Génesis de las rocas carbonáticas

#### 4.1.1 Depósitos sedimentarios

Los principales depósitos carbonáticos sedimentarios se forman en ambientes marinos cálidos, de salinidad normal, someros y de aporte terrígeno bajo, esto es, en las plataformas carbonáticas, y en los sistemas de barreras, lagunas costeras y llanuras intermareales asociados. También puede formarse calizas en ambientes lacustres y suelos (Tucker 1991).

Entender los ambientes de formación de las calizas es importante para predecir la calidad química y características texturales del depósito, y asociado a ello en qué sector podría utilizarse esas materias primas. Por ejemplo, las calizas de ambientes de alta energía (ejemplo barreras arrecifales y oolíticas) tienen bajo contenido de material no carbonático y son de alta pureza. Las mismas suelen ser aptas para la elaboración de cales industriales. Mientras que las de baja energía (ej. lagunas litorales o en la zona profunda de las plataformas carbonáticas) forman calizas impuras que pueden utilizarse en la fabricación de cemento y cales de menor calidad (Freas 1994). Las impurezas comunes de las rocas carbonáticas son las arcillas, el *chert*, las arenas silíceas, la materia orgánica, el fósforo y la pirita (Carr *et al.* 1994).

##### ❖ Caliza

Es una roca sedimentaria constituida por carbonato de calcio. Las calizas se forman principalmente por procesos sedimentarios biogénicos o inorgánicos.

Las calizas de origen biogénico son mayoritarias. Las mismas pueden originarse por precipitación bioinducida o por la acumulación de esqueletos calcáreos de ciertos animales (ej. Corales, briozos, moluscos, algas calcáreas). Un ejemplo conocido de caliza biogenética es la creta de aspecto poroso y grano muy fino formado principalmente de restos de algas planctónicas. La figura 10, muestra una coquina conformada por restos de caparazones.



Figura 10. Coquina. Tomado de (<https://blog.museuciencies.cat/>).

Las calizas de origen químico se originan a partir del bicarbonato contenido en agua de mar o lagos, donde precipita. El origen de calizas micríticas y oolíticas, asociado en el pasado a precipitación inorgánica,

actualmente es atribuido, al menos en parte, a la precipitación de carbonato por acción microbiológica. La figura 11 muestra una caliza oolítica al microscopio.

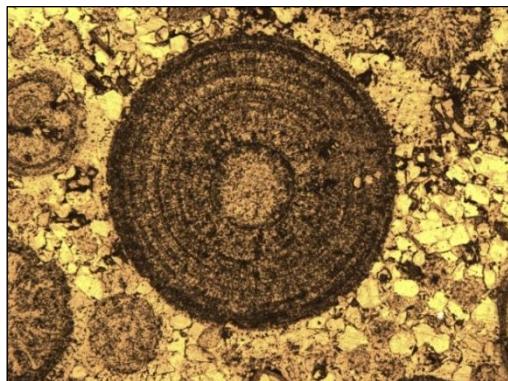


Figura 11. Caliza oolítica al microscopio Tomado de <https://www.irishnews.com/magazine/science/2018/01/19/> .

#### ❖ Dolomía

Se forma comúnmente durante la diagénesis de la caliza por efecto de las sales de magnesio contenidas en el agua de mar (dolomitización). Tanto la caliza como la dolomía pueden contener cantidades variables de otros elementos de origen detrítico, como cuarzo, arcillas y también materia orgánica. Por efecto metamórfico las calizas y dolomías dan lugar a la formación de mármoles calcíticos o dolomíticos, respectivamente (Gozalvez et al. 2004)

Están representadas en el registro geológico desde Proterozoico hasta el Cenozoico, asociadas a diferentes ambientes (depósito de plataformas carbonática, costas restringidas y lagos).

En el caso de la República Argentina, los yacimientos más significativos son las antiguas plataformas carbonáticas desarrolladas tanto en el margen del cráton del Río de La Plata durante el Proterozoico, actualmente aflorante en el ámbito de las Sierras Septentrionales de Buenos Aires como en la plataforma de Cuyania (Paleozoico inferior) representada por los extensos depósitos de Precordillera. Importantes reservas, de edad mesozoica, se alojan en la zona de engolfamiento de la Cuenca Neuquina y en los depocentros cretácicos del noroeste argentino.

Los depósitos de rocas carbonáticas de origen sedimentario se caracterizan por contener material calcáreo de alta calidad, en comparación con el grupo de depósitos metamórficos, debido a la menor contaminación con minerales silicatados.

#### ❖ Travertino

Depósitos formados meramente por precipitación inorgánica. Presenta textura bandeadas, fibrosa y coloformes (Fig.12). Se forma de manera subaérea por sobresaturación de aguas termales carbonatadas. Un tipo de travertino de alta porosidad es el tufa calcárea. La tosca corresponde a un horizonte edáfico calcáreo, formado por ascenso capilar y posterior precipitación de soluciones carbonatadas en los poros del suelo.



**Figura 12. Travertino con textura bandeda coloforme.**

#### **4.1.2. Depósitos de origen metamórfico**

Corresponden a calizas y dolomías que por efecto del metamorfismo han experimentado un proceso de recristalización, pasando a denominarse mármoles. Son rocas cristalinas granosas a sacaroideas, que presentan sus estructuras y texturas deposicionales obliteradas. La figura 13 muestra la variedad comercial Azul Cielo. Pueden contener como impurezas diversos silicatos metamórficos, tales como epidoto, anfíboles, granates y cuarzo.

En el territorio argentino, los depósitos metamórficos se circunscriben a zonas del basamento neoproterozoico eopaleozoico del Terreno Pampia. Son calizas y dolomías metamorfizadas, en muchos casos muy impuras, y a veces íntimamente asociadas con rocas básicas en zonas de cizalla. Destaca sus grandes volúmenes de reservas existentes y en la ubicación de los yacimientos, dispuestos a lo largo del centro del país.



**Figura 13. Variedad comercial Azul Cielo.**

#### **4.1.3. Depósitos de origen ígneo (Carbonatitas)**

Son rocas carbonáticas de origen ígneo, constituidas al menos por un 50% de carbonatos de calcio, magnesio y hierro. Están asociadas a procesos extensionales de la corteza dentro de un marco tectónico de rift inicial. Su principal relevancia económica radica en su contenido de tierras raras y fosfatos.

Los yacimientos más importantes de carbonato de calcio son los depósitos de caliza y los mármoles, aunque los depósitos de carbonatitas pueden ser una fuente complementaria o alternativa.

## 4.2. Mineralogía

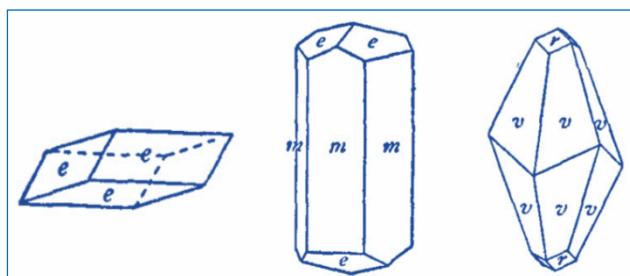
La calcita y aragonita son los minerales polimorfos de carbonato de calcio más comunes. La composición química de ambos es 56% de CaO y 44% CO<sub>2</sub>. Los carbonatos anhidros pueden clasificarse en el Grupo de la calcita que son aquellos que cristalizan en sistema trigonal o el Grupo de Aragonito que son aquellos que cristalizan en el sistema rómbico (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Grupos de carbonatos anhidros Tomado de Klein y Cornelius Jr. (2018)**

Grupo de la calcita (Sistema Trigonal)	Grupo de Aragonita (Sistema Rómbico).
Calcita (Ca CO <sub>3</sub> ) Magnesita (Mg CO <sub>3</sub> ) Siderita (Fe CO <sub>3</sub> ) Rodocrosita (Mn CO <sub>3</sub> ) Smithsonita (Zn CO <sub>3</sub> )	Aragonita (CaCO <sub>3</sub> ) Wihterita (CaCO <sub>3</sub> ) Estroncianita (SrCO <sub>3</sub> ) Cerussita (PbCO <sub>3</sub> )

### ⊕ Calcita

Este mineral tiene diferentes hábitos de los cuales destacan el prismático, romboédrico y escalenaédrico (Fig.14). El clivaje es perfecto, tiene un peso específico de 2,72 g/cm<sup>3</sup>. En la cara de exfoliación la dureza es de 3 en la escala de Mohs. Su brillo es vítreo a terroso y el color es blanco a incoloro, aunque debido a la presencia de impurezas puede presentar tonalidades grisáceas, rojizas, verdosas, azuladas, amarillentas, pardas y negras. La calcita se diferencia de la dolomita (MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) cuando es atacada con ácido clorhídrico frío: la primera desprende CO<sub>2</sub> mientras que en la segunda no en igual magnitud.



**Figura 14. Hábitos de la calcita (romboédrico, prismático y escalenaédrico).**

Existe una variedad de calcita, el espato de Islandia, que se caracteriza, por su pureza química y ser limpia e incolora. Es muy común encontrar calcita rellenando fracturas, formando así depósitos vetiformes, donde puede estar sola o asociada a otros minerales como baritina o fluorita.

#### 4.3 Clasificación de rocas carbonáticas

La calcita, la aragonita y la dolomita son los principales minerales formadores de las rocas carbonáticas. Dependiendo de las proporciones de los mismos, dichas rocas se denominan calizas, cuando predominan la calcita y/o aragonita, o dolomías, cuando la dolomita es el mineral mayoritario. Hay diferentes clasificaciones utilizadas en la industria, principalmente basadas en la composición mineralógica, química o textural.

a. Clasificación mineralógica basada en las proporciones de calcita, dolomita y otros minerales no carbonáticos (Fig.15).

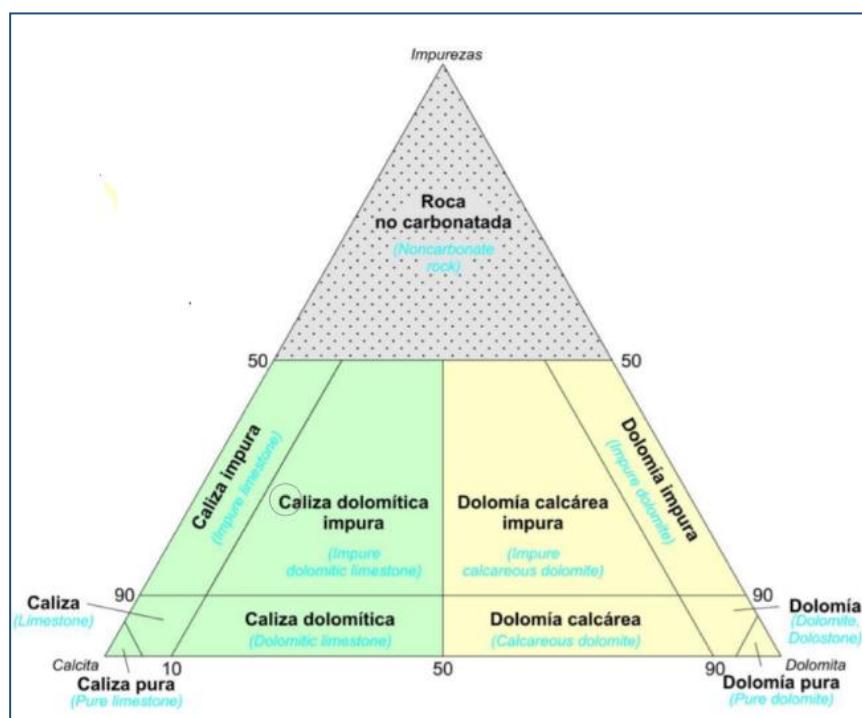


Figura 15. Clasificación de rocas carbonáticas según su mineralogía (Tomado de Freas 1994).

b. Clasificación en función del tamaño de grano (Cuadro 2)

Cuadro 2. Clasificación en función del tamaño de grano

Calcirudita	La mayoría de los constituyentes > 2mm
Calcarenita	entre los 2 y 0.062 mm
Calclilita	La mayoría de los constituyentes < a 0.062mm.

c. Clasificación química basada en el contenido de  $\text{CaCO}_3$  de la roca (o  $\text{CaO}$  equivalente). Este resulta útil para definir el posible uso del material carbonático, de acuerdo con las especificaciones químicas de cada sector consumidor (Cuadro 3).

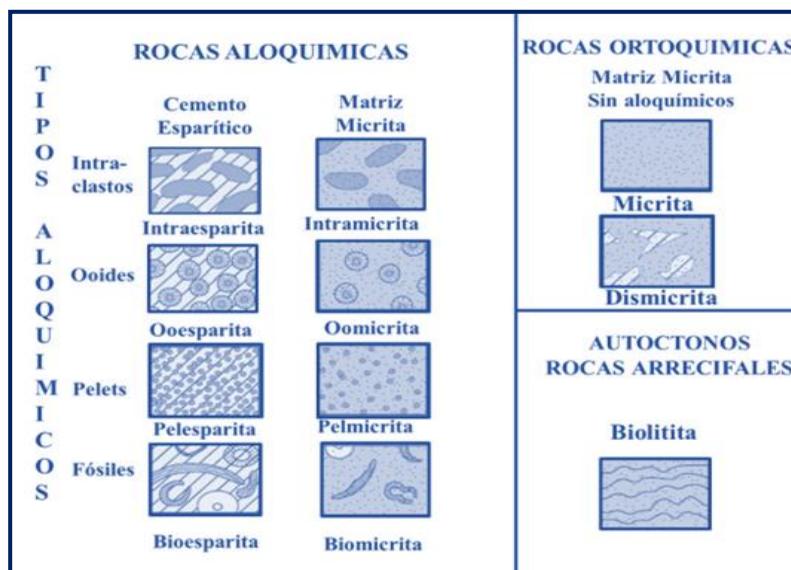
**Cuadro 3. Clasificación química basada en el contenido de CaCO<sub>3</sub> (British Geological Survey, <https://www.bgs.ac.uk>)**

CATEGORIA	COMPOSICIÓN (% CaCO <sub>3</sub> )
Muy alta pureza	> 98,5
Alta pureza	> 97,0 – 98,5
Medianamente pura	> 93,5 – 97,0
Baja pureza	85,0 – 93,5
Muy baja pureza	< 85,0

d. Clasificación de Folk (1959) divide las calizas según la predominancia de sus componentes carbonáticos: Elementos aloquímicos, los ortoquímicos y la matriz (Fig.16).

Los elementos aloquímicos son granos discretos que incluyen las oolitas, los pellets, los intraclastos y bioclastos. Las oolitas son partículas carbonáticas esféricas de estructura concéntrica, de un diámetro menor a 2mm. Los pellets son grano esféricos, elipsoidales o angulares compuestos por carbonato mircristalino sin estructura interna. Los intraclastos son fragmentos de sedimento litificado o parcialmente litificado. Los bioclastos son partículas esqueletales, correspondientes a invertebrados marinos (Tucker 1991).

Los elementos ortoquímicos es el cemento que predominantemente es calcita cristalina denominada esparita. La matriz suele ser micrita, que es un tipo de calcita microcristalina (menor a 4 micrómetros).



**Figura 16. Clasificación textural de Kendall (2005) modificado de Folk (1959).**

e. La clasificación de Dunham (1962) divide a las calizas en base a su proporción relativa de los componentes y a la distribución espacial de los mismos es decir su fábrica (Fig.17).

Las rocas carbonáticas grano-sostenidas, donde los bordes de los granos permanecen en contacto, se denomina *grainstone* cuando la roca está formada sólo por componentes alquímicos y *packstone* si hay participación de matriz.

La caliza matriz sostenida (con bordes de granos sin contacto, separados por matriz) se denomina *wackstone* y *mudstone* cuando la matriz es mayor a 90%, respectivamente. Se agregaron los términos *floatstone* y *rudstone* (en paralelismo a *wackstone* y *packstone*) cuando los componentes aloquímicos exceden los 2mm de diámetro (Embry y Klovan 1971).

Aloctonas (componentes no liagados durante la deposición)					Autóctonos con componentes ligados	
Con fango			Sin fango			
Matriz sostén		Grano sostén				
Mudstone Menos del 10% de granos	Wackstone Mas del 10% de granos	Packstone	Grainstone	Boundstone		
						

Figura 17. Clasificación textural de (Dunham, 1962)

#### 4.4. Proceso de silicificación de carbonatos

La silicificación de carbonatos es un proceso diagenético que implica un remplazo principalmente de minerales carbonáticos por minerales silíceos (fases opalinas, cuarzo y morganita), así como un proceso minoritario de cementación de sílice en las oquedades.

Cuando la silicificación es importante volumétricamente se generan rocas silíceas (sílex y rocas opalinas) que se destacan en los afloramientos de rocas carbonáticas, formando nódulos, capas, capas lenticulares, y otras acumulaciones irregulares.

La sílice necesaria para los procesos de silicificación puede obtenerse de los componentes silíceos incluidos en la misma roca carbonática (microfósiles silíceos principalmente, pero también terrígenos silíceos, arcillas, cenizas volcánicas, entre otras) o puede ser extraformacional, transportada por las aguas freáticas o hidrotermales (Ormeño y Arroqui 2003).

Los minerales opalinos que constituyen los microfósiles silíceos (diatomeas, espículas silíceas, fitolitos, etc.), durante la diagénesis, se disuelven o recristalizan como cuarzo. Esta recristalización, que implica las transformaciones de ópalo-A a ópalo-CT y finalmente a cuarzo, libera también sílice produciendo remplazos de carbonatos por sílice, cementaciones silíceas o neoformaciones de arcillas (Bustillo 2010).

Generalmente en el proceso de silicificación, el volumen de sílice precipitada es igual al volumen de calcita disuelta. Es un reemplazo pseudomórfico, y, por lo tanto, preserva las texturas y estructuras de la roca caja afectada facilitando información sobre la sedimentología, la biota y la diagénesis de dicha roca.

La mayoría de los procesos de silicificación en carbonatos continentales se interpretan como procesos diagenéticos tempranos, durante el enterramiento de sedimentos lacustres o palustres, o durante la diagénesis meteórica (generación de silcretes o procesos de silicificación de paleosuelos, calcretes y dolocretes). Se acepta generalmente, que las fluctuaciones de pH alrededor de 9, son un factor

desencadenante del proceso de silicificación, porque en este entorno de pH, existe una solubilidad inversa entre la calcita y la sílice.

Los cambios en la salinidad de los fluidos intersticiales de la roca carbonática, también inducen la precipitación de sílice. Otros factores que condicionan la silicificación son la porosidad de la roca carbonática y el flujo de agua subterránea.

El momento de la silicificación es difícil de establecer, pero en algunos casos puede ser definido por: su relación con cementaciones carbonáticas y otros procesos diagenéticos de la roca caja (compactación física o química, dolomitización, etc.), haber sido erosionada la roca silícea y estar sus fragmentos incorporados en formaciones más modernas, y por las características estructurales propias de las rocas silíceas (momento de la deshidratación, principalmente).

La composición en isótopos de oxígeno e hidrógeno en sílex formados por cuarzo se ha utilizado para interpretar las condiciones ambientales del remplazo cuarzo/carbonatos.

Debido que la mayoría de las silicificaciones de carbonatos continentales se producen en ambiente superficial, los valores isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  del cuarzo suelen registrar la composición de las aguas superficiales que están fuertemente influenciadas por la evaporación y los cambios de salinidad.

Cuando las silicificaciones son diagenéticas tempranas sinsedimentarias, la composición isotópica de los nódulos de sílex que se forman puede indicar condiciones de la misma cuenca de sedimentación. En la diagénesis por enterramiento la composición isotópica del sílex, puede marcar la historia térmica de las rocas carbonáticas. El estudio de las rocas silíceas formadas por remplazamiento (y especialmente el sílex), es una excelente herramienta para deducir muchas de las circunstancias de los depósitos carbonáticos continentales que las incluyen, y su historia diagenética (Bustillo, 2010).

#### 4.4.1 Isotopía del chert

Los isótopos de hidrógeno y oxígeno dentro de la composición del chert, han sido usados para interpretar las condiciones ambientales, esto se debe a la resistencia del cuarzo a la meteorización y diagénesis.

El ópalo reduce la calidad de los datos obtenidos, ya que el contenido de agua de ópalo no se puede eliminar fácilmente sin intercambiar oxígeno del agua de silicato (Knauth 1992). Los análisis de  $\delta^{18}\text{O}$  examinan el oxígeno estructural presente (Si-O-Si), mientras que los resultados de los análisis de  $\delta\text{D}$  reflejan la composición isotópica de los sitios OH en sílex microcristalino (Knauth y Epstein 1976; Sharp et al. 2002). Knauth (1992) indicó que los sitios OH corresponden a hidroxilo, hidrógeno y H<sub>2</sub>O atrapados como inclusiones de microfluidos derivados de reacciones de deshidratación entre grupos hidroxilo adyacentes. Si el cuarzo del pedernal se forma directamente durante la reposición de los carbonatos, las condiciones definidas son las que existían durante la silicificación, pero si el cuarzo se forma por el envejecimiento del ópalo anterior, la información obtenida solo se refiere al proceso de recristalización del ópalo.

La composición en  $\delta^{18}\text{O}$  de los pedernales incluidos en los carbonatos continentales puede ser muy variable. De hecho, puede existir una importante variabilidad isotópica dentro de un solo nódulo de pedernal. Los nódulos de mayor tamaño pueden mostrar un patrón compuesto con muchas zonas de cristalización en diferentes etapas que involucró diferentes tipos de agua (McBride et al. 1995).

Existen cambios de temperatura durante el crecimiento del pedernal. La temperatura exacta de formación del cuarzo no puede ser bien conocido debido a las incertidumbres en el fraccionamiento cuarzo/agua (Knauth y Epstein 1976), pero un rango de temperatura asociado con la variabilidad isotópica puede ser establecido asumiendo que la composición isotópica de los fluidos permaneció constante. En

diagénesis del entierro, la composición isotópica de los pedernales puede registrar la historia térmica de la roca huésped carbonatada (Fig.18).

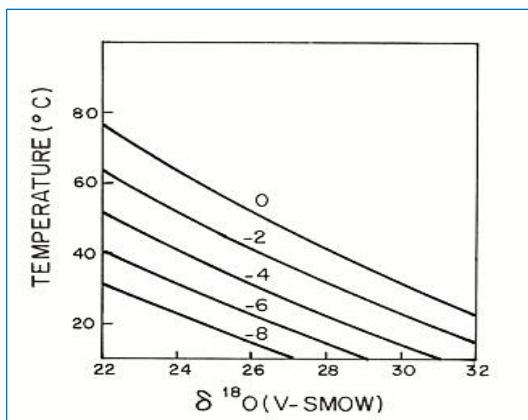


Figura 18. Temperatura frente a valores de  $\delta^{18}\text{O}$  para *cherts* que se formaron en aguas intersticiales con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de 0, -2, -4, -6 y -8 0/00 (informado en relación con el SMOW de "Standard Mean Ocean Water"), según la ecuación de Knauth y Epstein (1976).

Las aguas superficiales presentan variabilidad de la composición isotópica. La mayor parte de la silicificación de los carbonatos continentales se encuentran en ambientes superficiales. El  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  del cuarzo, por lo tanto, registra las composiciones del agua superficial que están fuertemente influenciadas por la evaporación (Abruzzese *et al.* 2005).

En gráficos de  $\delta^{18}\text{O}$  frente a  $\delta\text{D}$ , las aguas meteóricas de todo el mundo muestran una línea con una pendiente de  $\sim 8$  (la línea de agua meteórica global, o GMWL). Si la línea de correlación para los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  de los *cherts* tienen una pendiente menos pronunciada que la de la GMWL, esto puede significar que ocurrió una intensa evaporación (Abruzzese *et al.* 2005). Estos autores estudiaron la composición de isótopos de oxígeno e hidrógeno de los pedernales de agua dulce del Eoceno y Mioceno en el oeste de los Estados Unidos y encontraron valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de 11.2 0/00 a 31.2 0/00 en sílex formado por silicificación temprana de calizas lacustres. Esta amplia dispersión de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  se atribuye a la evaporación del agua superficial. Las variaciones climáticas y topográficas regionales en el Cenozoico se pueden deducir de estos datos isotópicos. La figura 19 muestra la evolución anticipada de los isótopos que componen el agua y el chert en equilibrio. El chert en equilibrio con agua meteórica a diferentes temperaturas define dominios paralelos a la *global meteoric water line*. Se da el ejemplo de silex formado con agua a  $40^\circ$  y  $0^\circ$ . X hace referencia a la composición del agua con el que se forma el silex, según la temperatura este punto se mueve sobre la línea t, que es paralela a la línea A con pendiente definida por (Knauth y Epstein 1976; Sharp *et al.* 2002). La evolución del agua por evaporación se hace a través de la línea E. El punto P corresponde a la mezcla con agua meteórica de composición Y. El isótopo resultante se encontrará en la línea de composición YP. Dentro de la Línea a XY se encontrará el rango de composición natural del agua meteórica a partir del cual se formó el pedernal (Fig.19).

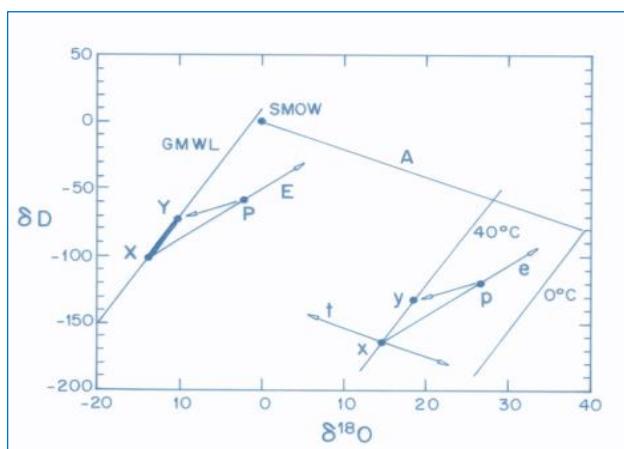


Figura 19. Evolución de los isótopos que componen el agua y el chert en equilibrio (Abruzzese *et al.* 2005).

#### 4.5 Proceso de dolomitización

Las dolomitas no son minerales simples, pueden tener variedad de orígenes. Se pueden formar por precipitación primaria, por reemplazo diagenético o como una fase hidrotermal/metamórfica. Todo lo que se requiere es permeabilidad y un mecanismo que facilite la migración de un fluido, y la suficiente disponibilidad de magnesio. A pesar de que generalmente está asociado a ambientes oceánicos, también puede formarse en aguas continentales.

Estos fluidos pueden estar enriquecidos por la liberación de Mg de los carbonatos y de las arcillas tipo esmectita. El modelo de dolomitización y la formación dependen del sitio de origen y, por último, debe existir una condición favorable para una reacción química. La dolomita puede dividirse en dos grupos según lo planteado en primaria o secundaria. La dolomita primaria precipita de manera directa de las soluciones acuosas, en temperaturas cercanas a los 20-35°, sin disolución de  $\text{CaCO}_3$  involucrado. Sin embargo, la dolomita puede aparecer como una fase secundaria reemplazando calcita (mineral precursor) en el proceso de dolomitización. La hipótesis considera dos fases: una de disolución de  $\text{CaCO}_3$  y una segunda de precipitación de dolomita. La fuente de  $\text{Ca}^{+2}$  es proporcionada por el mineral precursor y el  $\text{Mg}^{+2}$  por el fluido dolomitizante. La formación de dolomita se da en condiciones anaeróbicas (Mehmood *et al.* 2018).

La figura 20 muestra los estadios de formación desde calcita de alto magnesio a dolomita.

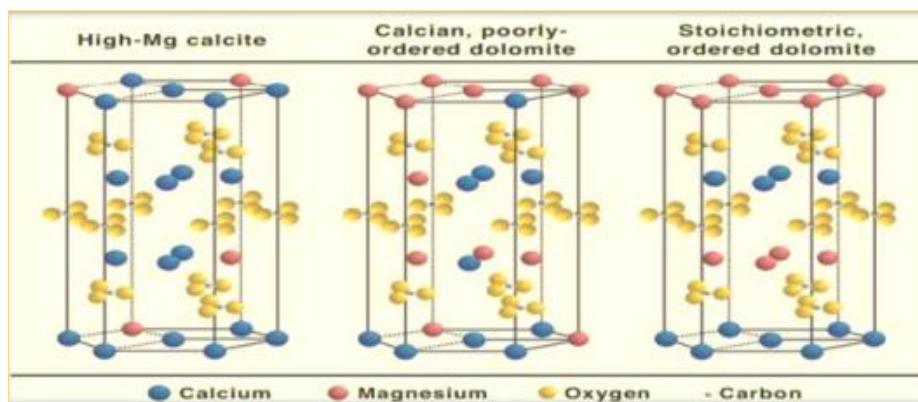


Figura 20. Estadios de formación desde calcita magnesiana a dolomita (Mehmood *et al.* 2018).

La dolomita es mineral complejo y lograr su forma artificial es difícil de estudiar con experimentos de laboratorio. Aunque es una fase mineral muy bien ordenada y efectiva para precipitar, no ha mostrado precipitación a temperaturas sedimentarias utilizando agua natural.

El control en la formación de dolomita se da por tres factores químicos a partir de experimentos a alta temperatura. Los elementos de cualquier modelo de dolomitización, como suministro de Mg y de carbonato deben ser suficientes para formar la cantidad observada de dolomita. Debe haber un mecanismo de entrega comúnmente en la forma de flujo fluido adecuado para incorporar estos iones a la estructura y, por último, debe existir una condición favorable para la reacción química. La figura 21 esquematiza el proceso.

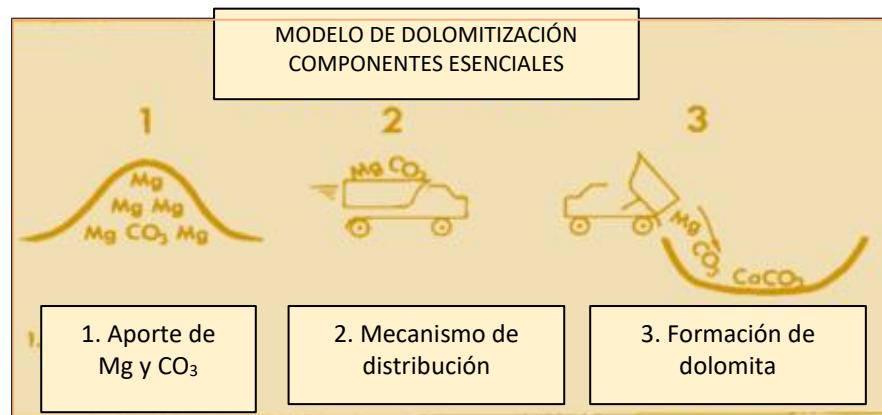


Figura 21. Modelo de dolomitización, componentes esenciales (Mehmood *et al.* 2018).

Actualmente existen cinco clases de modelos de dolomitización, cada una de las cuales tiene características únicas del fluido dolomitizante, el tipo de flujo y las características físicas (Mehmood *et al.* 2018).

❖ Dolomitización por evaporación: Se forma en ambientes de sabkhas y supramareales, intermareales altos. Las dolomitas de ambientes supramareal son precipitados por agua de mar evaporada. La precipitación temprana de yeso y aragonita, resulta en una proporción adecuada de Mg/Ca en el agua de los poros, lo que potencia la formación de dolomita (Fig.22).

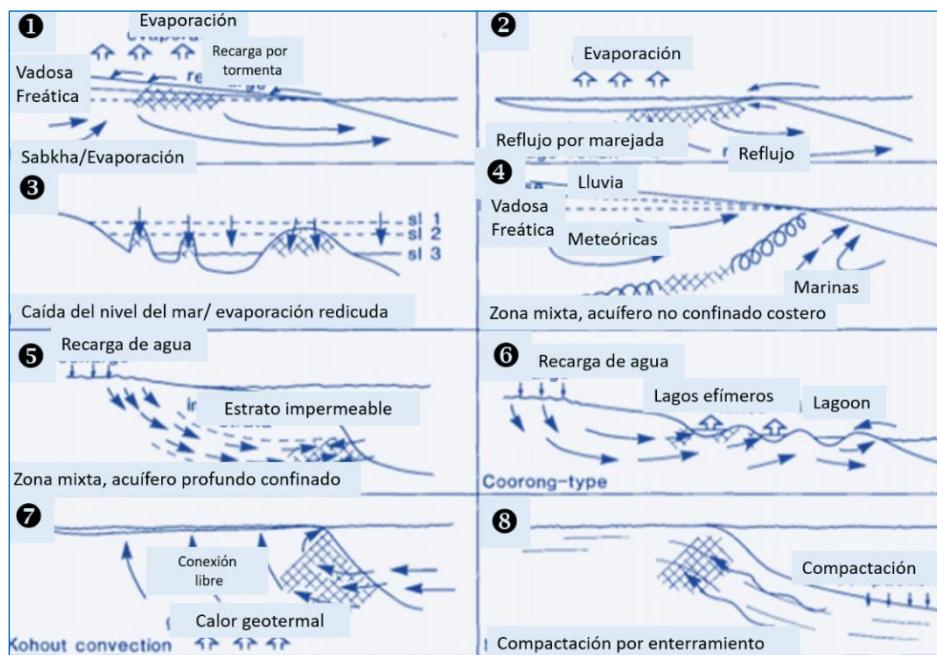


Figura 22. Modelos de dolomitización. Ilustrando la variedad de mecanismos para el movimiento de fluidos dolomitizantes a través de los sedimentos (Mehmood et al. 2018).

❖ Dolomitización por reflujo de filtración: Este proceso ocurre por la formación de soluciones dolomitizantes, por evaporación del agua de la laguna o el agua de los poros de las planicies de marea. Donde estas soluciones se incorporan en rocas carbonatadas cercanas (Fig.23).

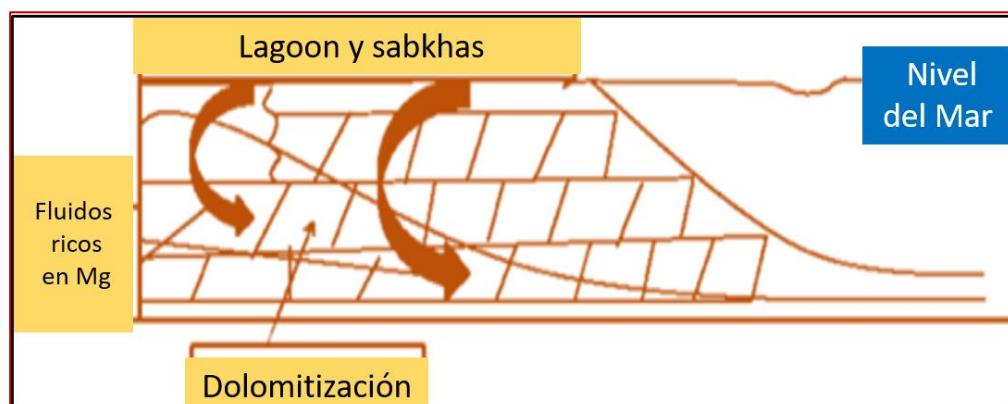


Figura 23. Dolomitización por reflujo de filtración (Mehmood et al. 2018).

❖ Dolomitización de zona de mezcla: Este tipo se forma por la mezcla de agua de mar con agua dulce. Esta agua puede provenir de lluvias (Fig.24).

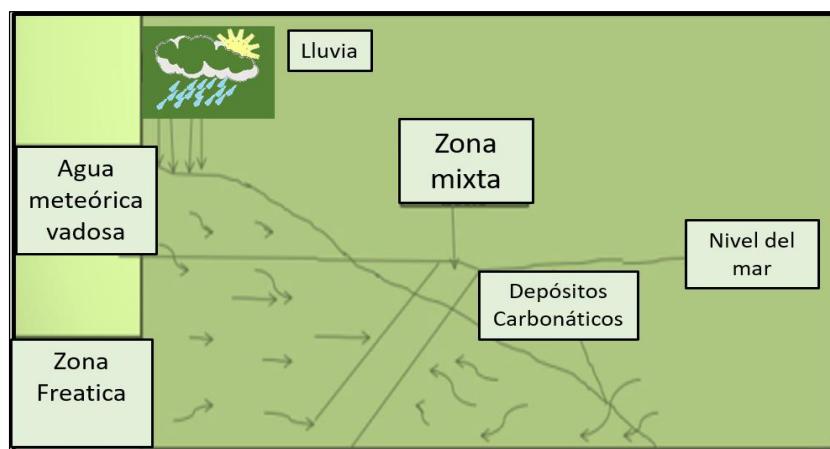


Figura 24. Dolomitización de zona de mezcla de agua de mar con agua dulce.

❖ Dolomitización por enterramiento: El mecanismo principal que involucra es la deshidratación de rocas fangosas en cuencas, debido a la compactación y remoción de fluidos ricos en Mg en el borde de la plataforma vecina. La expulsión de agua y los cambios de minerales arcillosos con enterramiento generan un aumento de temperatura que sugiere la liberación de iones de Mg junto con iones de Fe. La diagénesis de las lutitas en una cuenca es generalmente rica en materia orgánica, lo que contribuirá con aniones de  $\text{CO}_3$ .

❖ Dolomitización por agua de mar: El agua de mar por si solo puede ser una fuente de dolomitas porque contiene suficiente cantidad de iones de Mg con baja modificación, si es que existe algún proceso de bombeo.

Para la formación de dolomita por reemplazo de  $\text{CaCO}_3$ , puede variar desde la destrucción de la fábrica a la preservación de la misma. Algunos aspectos importantes para su formación son la mineralogía de los granos y el tamaño de los cristales, el tiempo de dolomitización y el entorno natural de los fluidos dolomitizante. La forma de los cristales de dolomita de reemplazo difiere de formas euhedrales, subhendrales y no planar (Fig.25; Sibley 1982).

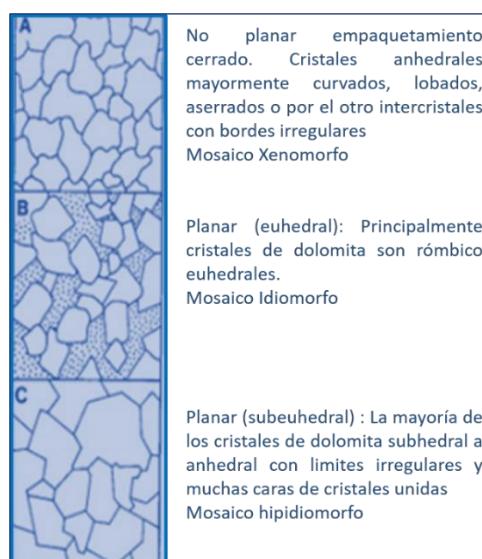
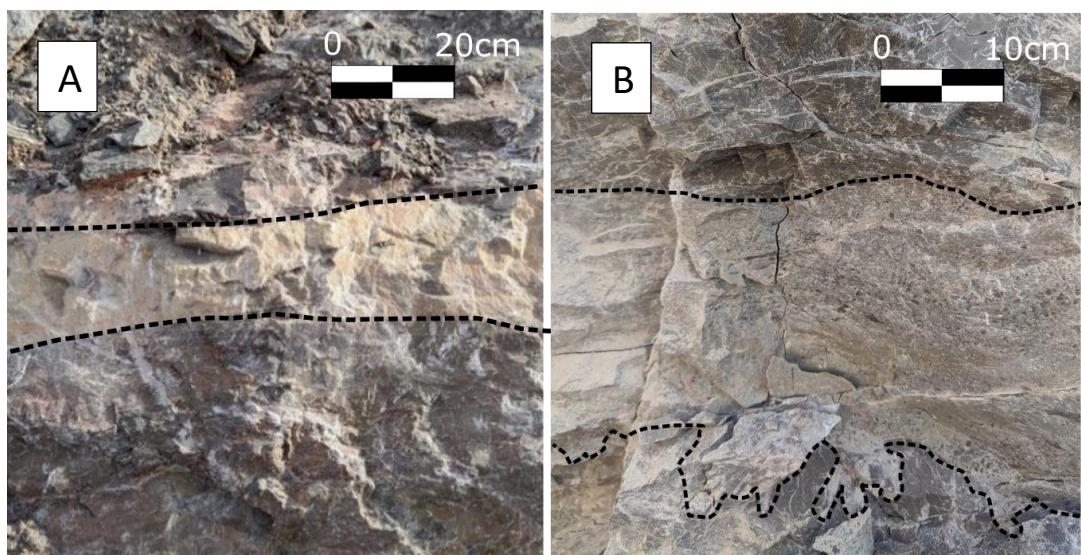


Figura 25. Texturas de reemplazo propuestas por Sibley 1982.

La figura 26 A expone un banco de dolomía color amarillo masivo, dentro de un cuerpo de calizas, con contactos netos, mientras que la figura 26 B muestra una dolomía con textura de reemplazo, con un contacto superior neto y uno inferior irregular, con porciones de caliza sin dolomitizar.



**Figura 26. A) Banco de dolomía color amarillo masivo, dentro de un cuerpo de calizas con contactos netos. B) Dolomía color amarillo con textura de reemplazo, contacto inferior irregular.**

## CAPÍTULO 5: LOS EVENTOS CARBONÁTICOS Y LOS DEPÓSITOS DE ROCAS CARBONÁTICAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

### 5.1 Eventos carbonáticos

Los modelos de depósitos minerales asocian comúnmente a las calizas y dolomitas, ya que tienen una fuerte correspondencia petrológica. Estos se encuentran dentro de los depósitos minerales asociados a sedimentos. En el contexto de Argentina existen diferentes episodios de la evolución geotectónica vinculados a la génesis de calizas y dolomitas (Gozalvez *et al.* 2004).

- ❖ Episodios prepampeano y pampeano.

Durante el Neoproterozoico (~700 Ma), en el Cratón del Río de la Plata se desarrolló una plataforma epicontinental con deposición de sedimentos pelíticos, psamopelíticos, carbonáticos cárnicos y magnesianos que dieron el origen a depósitos de arcillas plásticas y refractarias y de rocas carbonáticas (Gozalvez *et al.* 2004).

Entre 600 y 530 Ma, en el borde sur occidental de Gondwana se desarrolló una cuenca de margen pasivo (Baldo *et al.* 1997) con deposición, entre otros, de protolitos calcáreos originados por precipitación química. Al mismo tiempo se aproximaban el terreno Pampia y el borde occidental del supercontinente gondwánico durante la etapa de cierre del orógeno Pampeano. Esto generó un importante evento metamórfico en el Barroviano con la consecuente formación de depósitos de mármol de variada composición

Estos yacimientos son comunes en el basamento de Sierras Pampeanas (Córdoba, San Luis, Tucumán y Catamarca), como así también de la Cordillera Oriental (Formaciones Volcán y Las Tienditas) en Jujuy y Salta. Se ubican en una elongada faja norte-sur que podrían marcar un paleoambiente de deposición calcáreo en la antigua plataforma allí desarrollada.

- ❖ Episodios famatinianos

En el terreno Cuyania se desarrolló durante el Cámbrico y Ordovícico inferior una plataforma carbonática, aflorante actualmente en Precordillera Oriental y Central, representadas por extensos depósitos de calizas y dolomías.

- ❖ Episodios mesozoicos

En el sistema sedimentario jurásico los depósitos de calizas más importantes están representados por los sedimentos calcáreos de precipitación química de la Formación Vaca Muerta en la provincia de Neuquén. Con las diferentes facies de la transgresión maastrichtiana, que se prolongó durante el paleoceno, se vincula la generación de depósitos de calizas y caolín sedimentario en la Formación Roca en Río Negro. También se generaron yacimientos de calizas y yeso en rocas de las Formación Salamanca, en el extremo sudeste de Chubut.

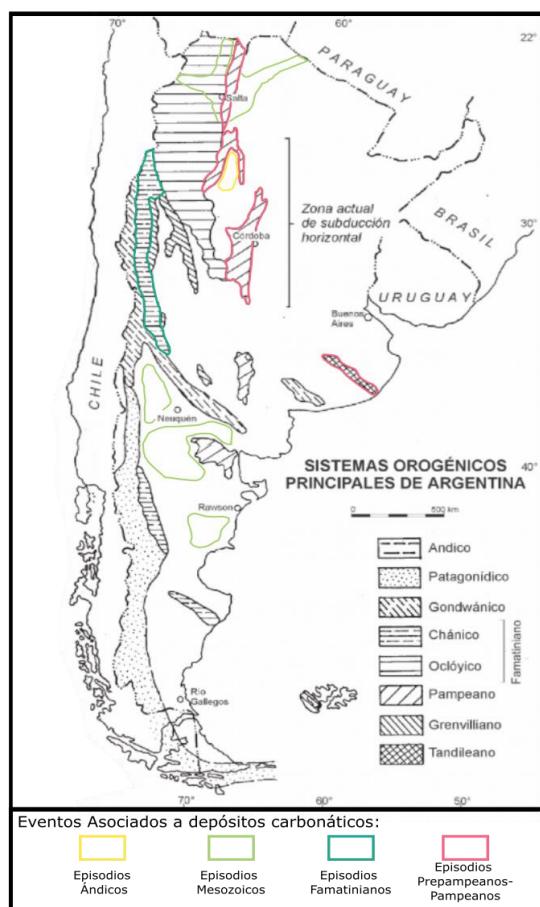
En el noroeste argentino, el desarrollo de cuencas intracratónicas durante el cretácico permitió la deposición de las secuencias del Grupo Salta. La única unidad de ambiente marino es la Formación Yacoraite, que contiene mantos de calizas oolíticas.

❖ Episodios ándicos

En la provincia de Tucumán se asocian a los sedimentos terciarios (Formación Río Salí) depósitos de yeso y de calizas. Estos episodios definen las fajas litogenéticas con potencial para encontrar depósitos de interés. Estos representan unidades geológicas vinculadas espacial y/o genéticamente a un grupo de depósitos de minerales industriales. Están constituidas por litotectos de edad y ambiente de formación conocidos, siendo factible asignarles a dichas fajas un periodo de tiempo geológico, un tipo de litología y un ambiente geotectónico.

Según la clasificación de (Zappettini 1999), de los depósitos de minerales industriales, rocas y gemas en la República Argentina, las calizas-dolomía están corresponden al modelo 9k, dentro de los depósitos sedimentarios y asociados a sedimentos. Por otro lado, el mármol está incluido en el modelo 10i que incluye rocas, dentro de los depósitos metamórficos.

La figura 27 muestra los principales sistemas orogénicos desarrollados en la Argentina con los relictos de las orogénicas preándicas y los eventos asociados a depósitos carbonáticos.



**Figura 27. Principales sistemas orogénicos desarrollados en la Argentina con los relictos de las orogénicas preándicas y los eventos asociados a depósitos carbonáticos. (Modificado de Ramos 1999).**

## 5.2. Principales manifestaciones y depósitos carbonáticos

Los depósitos de rocas carbonáticas pueden dividirse según Gozalvez et al. (2004) en:

- a) Depósitos sedimentarios (modelo 9k) de edad variada (Proterozoico hasta Cenozoico) proveniente de diferente ambientes depósitos de plataforma carbonáticas, costas restringidas y lagos.
- b) Depósitos metamórficos (modelo 10i) se circunscriben a zonas de basamento neoproterozoico-eopaleozoico del terreno de Pampia. Son calizas y dolomías metamorfizadas, en muchos casos impuras, en ocasiones íntimamente asociadas con rocas básicas en zonas de cizalla, Su importancia radica en sus cuantiosas recebas y su ubicación en el centro del país.

En La República Argentina, los depósitos más destacados son los de edad proterozoica y corresponden a las antiguas plataformas carbonáticas en el margen del Cratón del Río de la Plata hoy aflorantes en las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires y los de la plataforma de Cuyania (Paleozoico inferior) en Precordillera (Gozalvez et al. 2004).

En las Sierras Pampeanas se encuentran diversos depósitos desde Proterozoico superior hasta el paleozoico inferior. Los depósitos mesozoicos correspondientes al engolfamiento en la Cuenca Neuquina, constituyen extensos depósitos en las provincias de Neuquén y Mendoza. También se localizan depocentros en el noroeste argentino correspondientes al Grupo Salta (SEGEMAR - UNSAM 2008).

Las rocas carbonáticas de tipo calizas y dolomías, tienen una amplia distribución areal. Básicamente se distinguen las siguientes regiones geográficas donde es posible ubicar los yacimientos y depósitos (Solsona y Rogosz 2018). En la figura 28 se ubican los depósitos de rocas carbonáticas en el país.

### 5.2.1 Región Noroeste

Incluye las provincias de Jujuy – Salta - Tucumán - Catamarca - La Rioja

#### ❖ Jujuy

Las principales zonas de explotación están en Puesto viejo, en las Sierras Subandinas y Volcán Maimará en la Quebrada de Humahuaca. En Puesto Viejo afloran calizas masivas oolíticas de la Formación Yacoraite, de edad Cretácica superior. En volcán se encuentran las calizas precámbricas eopaleozoicas de la Formación Puncoviscana. En Maimará, las rocas que se explotan corresponden a la Formación Yacoraite, donde la secuencia es más reducida y arenosa (Schalamuk et al. 1983).

#### ❖ Catamarca

Los yacimientos más importantes se encuentran entre la ladera oriental de la Sierra de Ancasti y el límite con Santiago del Estero. Son calizas cristalinas de la Formación Sierra Brava, de edad precámbrica a eocámbrica (Zappettini 1999).

#### ❖ Salta

En la Sierra de Castillejos, afloran las calizas metamórficas negras de la Formación Las Tienditas, pertenecientes al basamento metamórfico de edad Proterozoica superior a Eocámbrica (Tapia Viedma y Gorustovich 2001).

❖ Tucumán

Las calizas oolíticas terciarias de la Formación Río Salí y las calizas metamórficas precámbricas-eocámbricas de la Formación Peñas Azules. Poseen alta calidad y homogeneidad química, recomendadas para la elaboración de cales industriales, limitadas por la alta complejidad estructural (González *et al.* 2000).

❖ La Rioja

En el sector oriental de la Sierra de Famatina, se encuentran lentes de caliza de la Formación Negro Peinado. Al oeste de la provincia, en las proximidades de Guandacol se encuentran calizas y dolomitas de la Formación San Juan (Schalamuk *et al.* 1983).

### 5.2.2 Región Centro - Cuyo

Incluye las provincias de San Juan - San Luis - Córdoba –Mendoza: corresponden a depósitos de basamento de cuenca.

❖ San Juan

Son los de mayor calidad química y física de Argentina. Además de contar con elevadas reservas. Los distritos más importantes de caliza son: Los Berros-Pedernal, Jáchal, Sierra de Villicum y Sierra Chica de Zonda. En los dos primeros aflora la Formación San Juan del Ordovícico mientras que las restantes se encuentran en las Formaciones La Laja, Zonda y La Flecha (Angelelli *et al.* 1980).

❖ Mendoza

Los afloramientos más importantes se encuentran en la Precordillera, que corresponden a la Formación San Juan, que en esta provincia presenta leyes variables (Herrmann y Menoyo, 1999). También son un recurso potencial las calizas mesozoicas del departamento de Malargüe con más de 100Mt y elevadas leyes (Angelelli *et al.* 1980).

❖ Córdoba

Las rocas carbonáticas de la provincia forman parte de los complejos metamórficos Sierra Chica, Guasapampa y Candelaria. De edad precámbrica superior-eocámbrica y presentan mediano a alto grado de metamorfismo (Herrmann 2001).

❖ San Luis

Los principales yacimientos de mármol se encuentran en las Sierras del Gigante, de los Comechingones y de la Estanzuela. Corresponden al basamento metamórfico precámbrico-cámbrico (Beninato 1999).

### 5.2.3 Cuenca Neuquina

Cuenca Neuquina incluye las provincias de Neuquén - Río Negro - Chubut: pertenecen a depósitos de origen marino.

❖ Chubut

Los depósitos calcáreos más importantes se encuentran en Bahía Bustamante, Sierra de Chaira y valle del Río Chubut. Corresponden a las Formaciones Salamanca y Bustamante y se formaron durante la ingresión marina senoniana del Cretácico superior – Paleoceno (Gozalvez *et al.* 2004).

❖ Río Negro

Se trata de pequeños depósitos, los más importantes se encuentran cercanos a Valcheta y en Sierra Grande. En Valcheta, afloran mármoles del Complejo Gneis Mina Gonzalito de edad proterozoica eopalozoica y de la Formación Roca del Cretácico superior. Estas no son aprovechables por su contenido de impurezas (Proyecto Minero Río Negro 1999).

En Sierra Grande, los yacimientos importantes corresponden a las calizas coquinoïdes de la formación Arroyo Salado y el fuerte del Cretácico Superior (Dalponte *et al.* 2007). También hay calizas terciarias de las Formaciones Arroyo Verde y Gaiman, cuyo potencial económico no ha sido evaluado (Dalponte *et al.* 2007). En las inmediaciones de San Antonio hay acumulaciones calcáreas holocenas, correspondientes a la Formación San Antonio (Busteros *et al.* 1998).

❖ Neuquén

La unidad más importante corresponde al Miembro Los Catutos de la Formación Vaca Muerta de edad cretácica y a la Formación Picún Leufú del Cretácico superior a Terciario inferior, al sur de la localidad de Zapala (Bruna 1991).

#### 5.2.4 Provincia de Buenos Aires

Los depósitos de origen marino de plataforma epicontinental, ubicados geográficamente en las Sierras Septentrionales.

La provincia Buenos Aires es la principal productora de calizas con extensas reservas. Las canteras se encuentran próximas a los centros de consumo. La unidad más importante es la Formación Loma Negra, de edad proterozoica, localizada entre las localidades de Olavarría y Barker (Gozalvez *et al.* 2004).

#### 5.2.5 Otros

Otras regiones tienen evidencias de cuerpos carbonáticos. Estos tienen diferentes orígenes, y se caracterizan por no tener grandes volúmenes de producción en su historia.

❖ La Pampa

La Formación San Jorge de posible edad paleozoica inferior constituye secuencia calcárea donde se diferencian un miembro sedimentario y otro metamórfico (Melchor y Casadío 2000). En la Sierra de Fresco hay materiales calcáreos de origen lacustre de edad eocena, con dimensiones y leyes desconocidas (Dalponte *et al.* 2002).

❖ Santiago del Estero

Los principales depósitos se encuentran en la Sierra de Ancaján. Consisten en mármoles del basamento pampeano (Blasco *et al.* 1994).

❖ Entre Ríos, Misiones y Corrientes

Los principales depósitos carbonáticos de la región corresponden a las Formaciones Paraná, del Mioceno medio- Plioceno medio, y Talavera, del Holoceno (Herrmann y Gozalvez 2005).

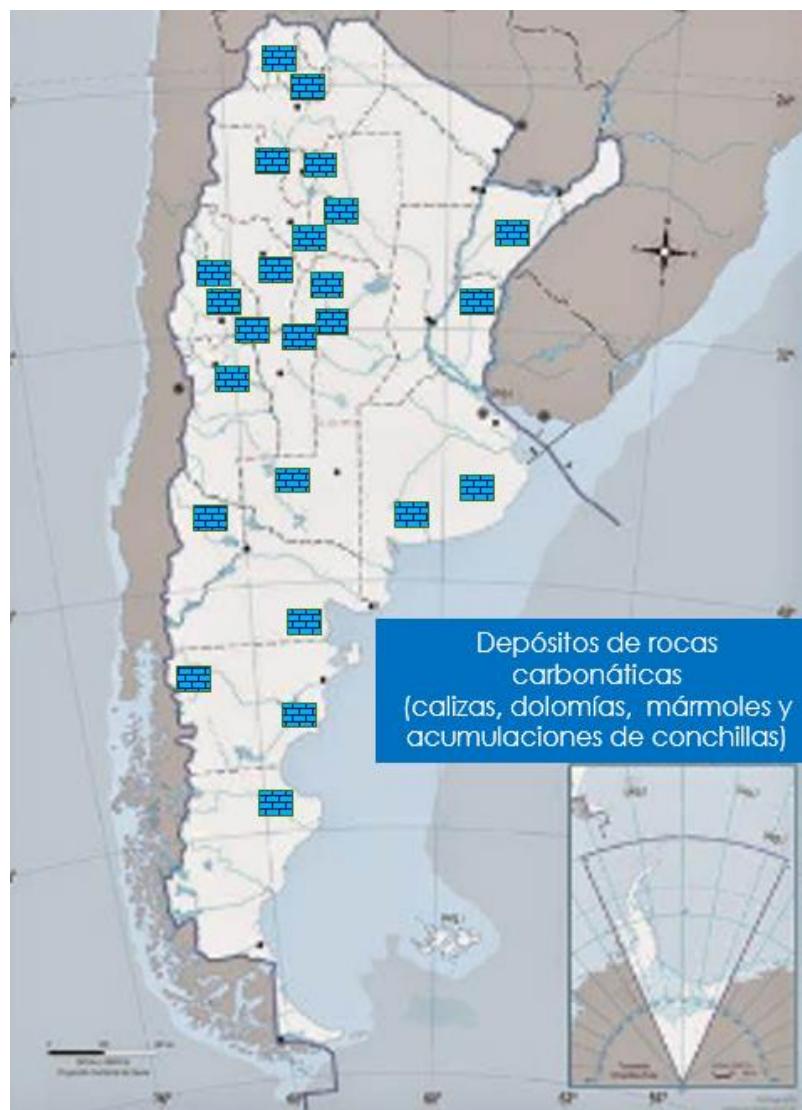


Figura 28. Manifestaciones y depósitos de rocas carbonáticas.

## CAPÍTULO 6: LOS DEPÓSITOS CARBONÁTICOS DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN

### 6.1. La estratigrafía como guía de prospección

El vínculo de la estratigrafía con la utilidad constituye un método práctico y expeditivo de prospección. En la Precordillera argentina existe una secuencia de rocas carbonáticas que fueron depositadas en una extensa plataforma somera y cálida durante los períodos Cámbrico y Ordovícico, que tiene una potencia promedio de 2200m y una extensión de afloramientos de 390km de norte a sur por 60km de este a oeste (Fig.29).

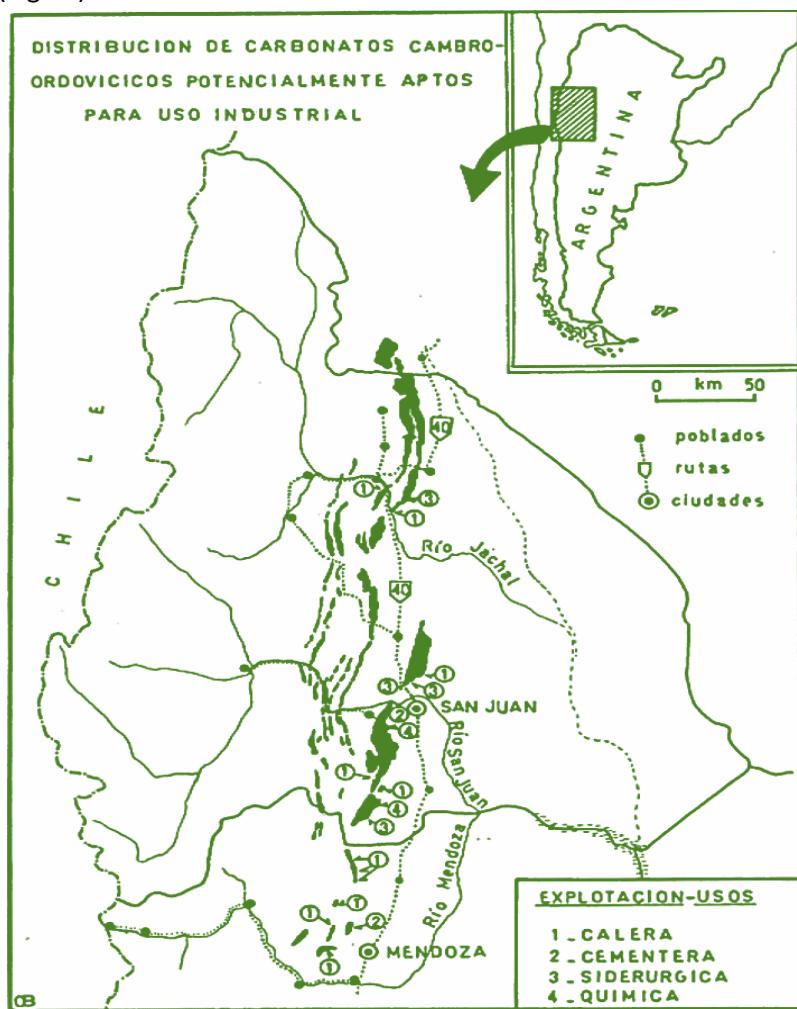
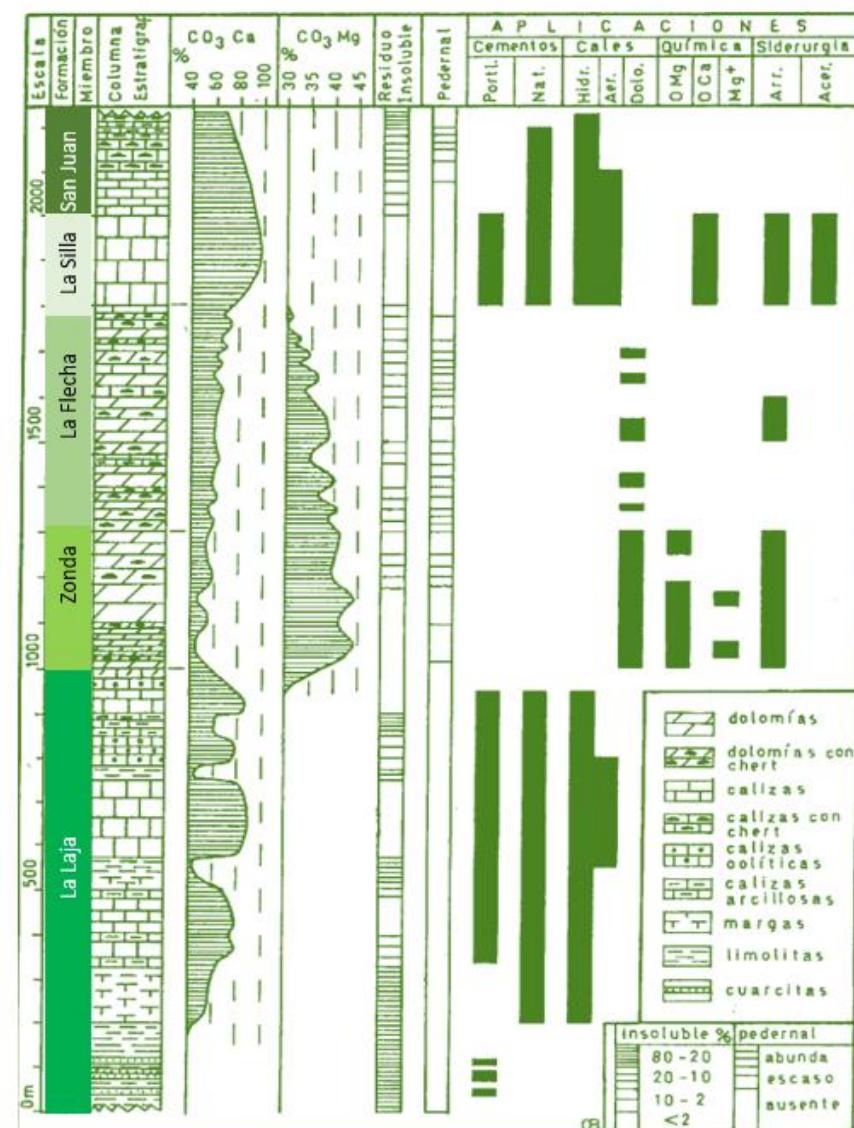


Figura 29. Mapa con distribución de carbonatos cambro-ordovícicos potenciales aptos para uso Industrial (Bordonaro 2002).

Esta secuencia está integrada por rocas carbonáticas tales como limolitas calcáreas, margas, calizas arcillas, calizas puras, calizas dolomíticas y dolomías puras. Mediante el detallado conocimiento estratigráfico y paleoambiental de estas rocas, es posible relacionar cada nivel estratigráfico con los diferentes usos actuales (Cuadro 4). La figura 30 muestra las formaciones dentro de la secuencia estratigráfica de Precordillera, con las aplicaciones industriales tanto actuales como potenciales de las rocas carbonáticas, identificadas con cada unidad.

**Cuadro 4. Secuencia estratigráfica de Precordillera**

<b>Fm. San Juan</b> (Ordovícico medio- inf)	Calizas lajosas, arcillas y margas y frecuentes intercalaciones de pedernal.
<b>Fm La Silla</b> (Cámbrico sup. -Ordovícico inf.)	Calizas macizas micríticas (Keller <i>et al.</i> 1994). Tienen el mayor contenido de calcio de toda la secuencia.
<b>Fm. La Fecha</b> (Cámbrico sup.)	Alternancia cíclica de calizas y dolomías con abundante pedernal y estructuras algales (Baldis <i>et al.</i> 1981).
<b>Fm. Zonda</b> (Cámbrico sup.)	Dolomías y dolomías cárnicas con estratificación laminada, gruesa y maciza, con colores grises claros, oscuros y blanquecinos (Baldis <i>et al.</i> 1981)
<b>Fm La Laja</b> (Cámbrico medio)	Calizas, calizas arcillosas, margas y limolitas, con estratificación lajosas y colores pardos, amarillos y grises (Bordonaro 1980).



**Figura 30. Columna estratigráfica con las aplicaciones industriales tanto actuales como potenciales de las rocas carbonáticas, identificadas con cada unidad estratigráfica (Bordonaro 2002).**

La síntesis de la estratigrafía permite usarse como una guía con utilidad industrial porque muestra en el Cuadro 5 la utilidad de las calizas según la formación.

**Cuadro 5. La utilidad de las calizas según la formación (tomado de Bordonaro 2002)**

Fm. San Juan	Industria química, siderúrgica, calera y cementera
Fm La Silla	Industria química, siderúrgica, calera y cementera
Fm. La Fecha	Poca utilidad
Fm. Zonda	Útil para fabricar cales industriales químicas y siderúrgicas
Fm La Laja	Útil para fabricar cementos y cales para construcción

## 6.2. Los componentes silíceos de las sucesiones carbonáticas en Precordillera

Según la definición de Iijima y Tada (1981) adaptada por Laschet (1984), el chert es una roca compacta dura y prácticamente vítreo con baja porosidad (entre 0 y 15%). Está compuesta principalmente por fases no detríticas de sílice (cuarzo macro y microcristalino, calcedonia y ópalo), de origen orgánico o inorgánico, y que muestra una pequeña cantidad de impurezas (0 a 10%).

Se consideran tres posibles fuentes de aporte de sílice al agua de mar. La sílice proveniente de la disolución de organismos silíceos como consecuencia de la actividad volcánica y de la meteorización química de las rocas continentales bajo clima húmedo o semihúmedo, siendo esta última la principal fuente capaz de producir silicificación de grandes extensiones y volúmenes (Ormeño y Arroqui 2003).

Los diferentes estudios estratigráficos, sedimentológicos y geoquímicos de detalle realizados por Arroqui Langer (1998) y sucesivas campañas exploratorias con fines geológico-económicos han reconocido distintas morfologías de chert con características definidas en Precordillera. Estos tipos son: a) diseminado ultramicroscópico asociado a laminación criptoalgal, b) microcristalino, c) moteado, d) asociado a estructuras estromatolíticas y trombolíticas, e) laminado, relleno de grietas de desecación, f) parches y g) bancos.

La morfología de chert abarca desde tamaño solo reconocible con la ayuda de microscopía electrónica del orden de pocos micrones, hasta bancos de chert de cuarenta centímetros de espesor con gran continuidad lateral. Las formas mayores son fácilmente reconocibles por su color negro y en segundo lugar por su coloración castaño rojizo o blanco. Destaca en la superficie por su mayor resistencia a la meteorización con respecto al carbonato (Ormeño y Arroqui 2003).

De un análisis detallado de las sucesiones carbonáticas cambro-ordovícias de la Precordillera Oriental se evidencian condiciones genéticas favorables para la dolomitización y la formación de chert, coincidente con lo enunciado por Laschet (1984). Además de la sílice en forma de chert, aparece en algunas localidades como relleno hidrotermal de brechas tectónicas y/o niveles estratigráficos. La alteración silícea de grado varía entre débil a muy intensa, en general con moderada a fuerte oxidación asociada. También se observan

rocas silíceas densas, de textura fina y homogénea, coloración gris, rojiza, rosada o roja y aspecto similar al jaspe producido por la obliteración total del protolito.

En la figura 31 se observan niveles de pedernal dentro de una sucesión de calizas. Los mismos forman un cuerpo continuo en forma de banco, lenticular o nodular. Las figuras 32 A y B muestran el contacto entre calizas, chert y dolomía, y pedernal en forma de lentes, donde se observa brillo vítreo, color gris a negro, respectivamente.



Figura 31. Niveles de pedernal dentro de una sucesión de calizas. Correspondientes al Miembro Río Blanco de la Formación la Silla.

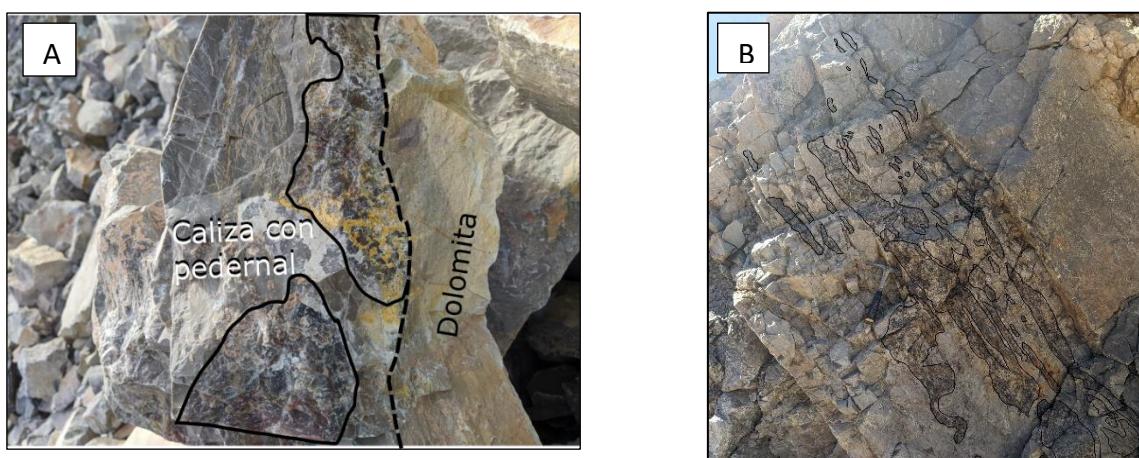
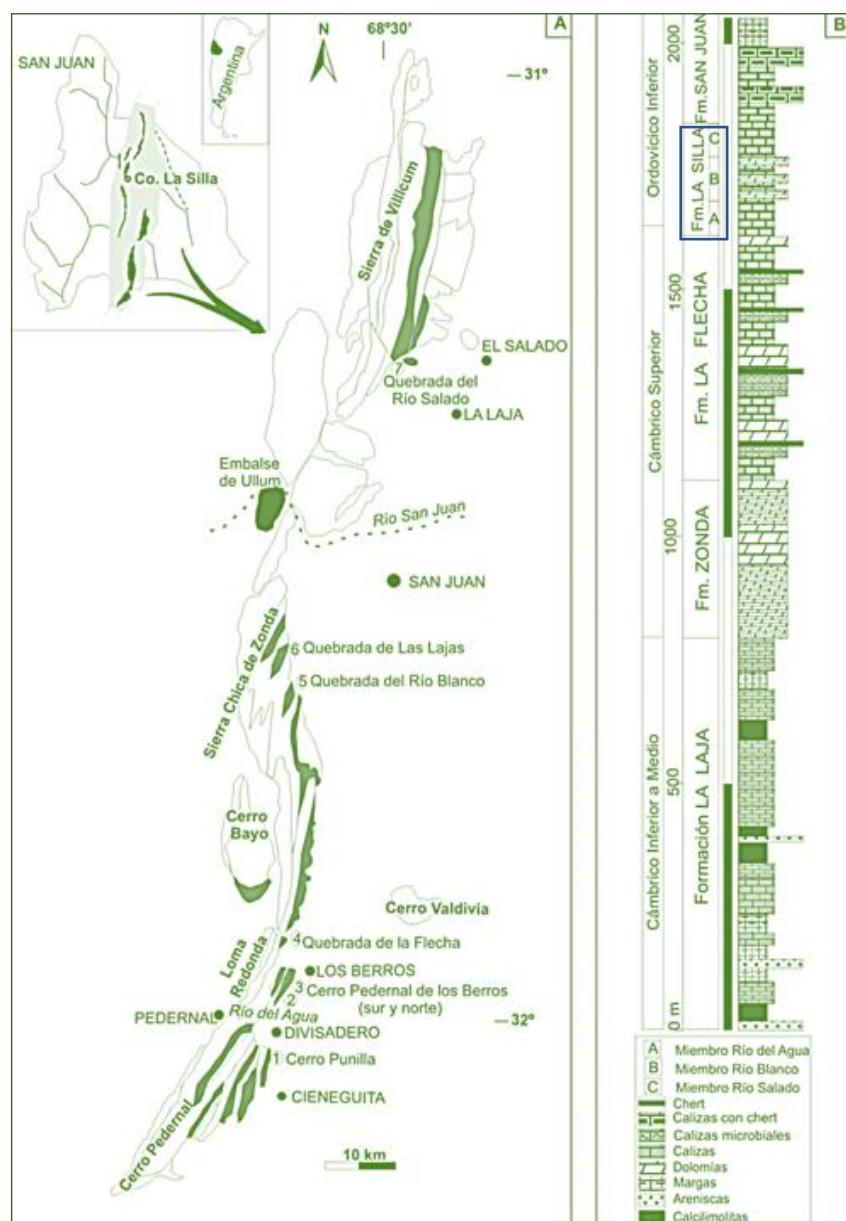


Figura 32. A) Contacto entre calizas, chert y dolomía. B) Pedernal en forma de lentes, donde se observa brillo vítreo, color gris a negro.

### 6.3. Características y potencial de la Formación la Silla

La Formación la Silla (Keller et al. 1994), abarca desde el Cámbrico Superior al Ordovícico inferior (Fig.33). Los autores la separaron de la Formación San Juan como una unidad distinta. Se destaca particularmente la parte superior de la Formación por su gran importancia económica para la industria de la cal, debido a la pureza excepcional.



**Figura 33. A) Mapa geológico simplificado mostrando los afloramientos de la Formación La Silla en la Precordillera Oriental en las cercanías a la ciudad de San Juan. B) Columna estratigráfica carbonática desde el Cámbrico Inferior al Ordovícico Inferior (Raviolo *et al.* 2007).**

Keller (1999) realizó una subdivisión tripartita informal de la Fm. La Silla en la que cada unidad representa una sucesión somerizante. De base a techo se definen los siguientes miembros (Raviolo *et al.* 2007).

◊ **Miembro Río del Agua.** Esta unidad tiene un espesor promedio de 85 m. Se caracteriza principalmente por tener calizas macizas de color gris medio y que pertenecen principalmente a las facies de grainstone peloidal, rudstone intracálico y grainstone oolítico. Este Miembro no posee bancos de dolomías excepto en el perfil de la quebrada de Las Lajas, que presenta escasos niveles de dolomías hacia la base, cercanos al contacto con Formación La Flecha. En algunos de los perfiles hay bancos de chert con base y techo planos, concordantes con la estratificación, intercalados entre las calizas. El contacto entre este miembro y la Fm. La Flecha es gradual, con una disminución de las estructuras microbianas

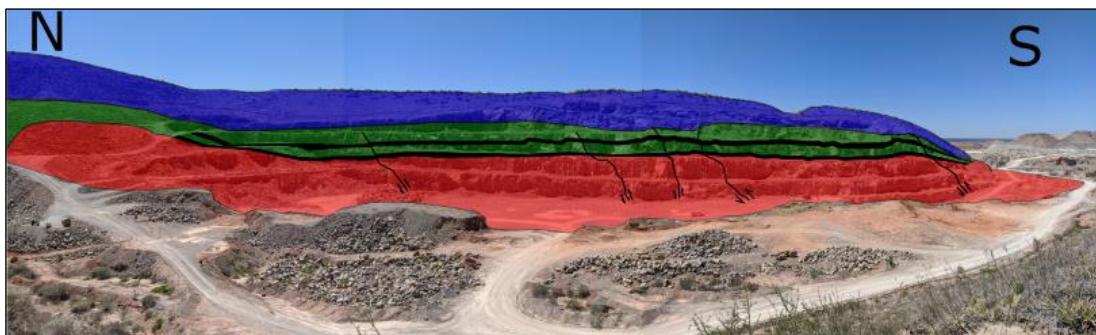
características de la Fm. La Flecha hacia la base de la Fm. La Silla. En algunos casos, se coloca el límite formacional al techo del último nivel dolomítico de la Fm. La Flecha que tiene evidencias de erosión y retrabajo. La intercalación litológica entre calizas y dolomías, y por lo tanto la variación de colores de afloramiento, le da a este Miembro un aspecto bandeadado. El contacto entre calizas y dolomías puede ser gradual o neto. Los bancos de dolomías, en su mayoría con chert de variadas morfologías (lentes, nódulos, capas con base y techo planos), pueden ser lenticulares o poseer continuidad lateral por grandes distancias.

◊ **Miembro Río Blanco:** El espesor promedio es de 140 metros. Está definido por una importante alternancia de calizas macizas grises con dolomías amarillentas laminadas y/o macizas. El espesor de los bancos de dolomías varía entre un máximo de 5 m (perfil Río Salado) hasta un mínimo de decenas de centímetros. Se observa un promedio de 14 bancos de dolomías, aunque en el perfil del río Blanco se registran 26 bancos en total. La base y el techo de este miembro son superficies netas, se eligen siempre a la base y al techo de bancos de dolomías macizas, por encima o por debajo de los cuales, se desarrolla un paquete de calizas peloidales entre 40-80 m sin intercalaciones dolomíticas.

◊ **Miembro Río Salado.** Esta unidad tiene un aspecto macizo, con un espesor de 81 m en promedio. Está compuesto principalmente por calizas grises de la facies grainstone peloidal, sin intercalaciones de dolomías. La dolomitización es parcial y escasa y suele estar relacionada a esporádicas bioturbaciones. Hacia el techo del Miembro, cerca del contacto superior, la estratificación se hace lajosa o nodular y las calizas cambian de color a gris muy oscuro. Este Miembro es el más explotado desde hace más de 50 años, debido a su favorable ubicación en la mayoría de los casos (próximos a los caminos) y por poseer potentes espesores de calizas de muy buena calidad. El límite entre la Fms. La Silla y San Juan es un tramo de transición marcado por superficies netas de calizas nodulares fosilíferas oscuras que están en contacto con las calizas peloidales grises características de la Fm. La Silla. El contacto entre el Mb. Río Salado y la Fm. San Juan se coloca arbitrariamente en la base del primer banco de calizas nodulares, eligiendo este criterio ya que el contacto entre ambas unidades es gradual y concordante, con la alternancia de dos o tres veces de bancos de las dos formaciones por unos seis metros en promedio antes del completo desarrollo de la Fm. San Juan.

La definición de Miembros en la Formación La Silla es importante no sólo para la estratigrafía regional, sino también porque esta subdivisión es útil para la prospección y explotación de yacimientos de calizas de las canteras actuales y de otras en el futuro, ya que permite realizar una explotación selectiva de niveles óptimos.

La figura 34 muestra el contacto entre la Fm. La Silla color rojo y Fm. San Juan color azul con una zona de transición color verde que corresponde a calizas de baja calidad. El contacto se fue siguiendo en orientación norte sur al generar el banqueo de la cantera.



**Figura 34. Contacto entre la Formación La Silla (color rojo) y Formación San Juan (color azul) con una zona de transición (color verde) que corresponde a calizas de baja calidad. Corresponde a explotación de un yacimiento de calizas en la Sierra de Villicum, provincia de San Juan.**

Los frentes en explotación dentro del Miembro Salado de la Formación La Silla, muestran uniformidad en color y textura, presentan un nivel de alteración casi nulo, principalmente cuando están conservados por estar con una cobertura (Fig.35). Éste presenta homogeneidad, un color gris plomizo característico. Los fragmentos de caliza micrítica de esta Formación se visualizan en la figura 36. Las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  son mayores a 97% en la zona de explotación. No presentan venillas ni fracturamiento intenso. Las impurezas son muy puntuales. El color gris plomo de la caliza es muy característico (Fig.36).



**Figura 35. Frente en explotación dentro del Miembro Río Salado de la Formación La Silla.**



**Figura 36. Fragmento de caliza micrítica color gris plomo, correspondiente al Miembro Salado de la Formación La Silla.**

#### 6.4. Principales canteras de la provincia de San Juan

En la provincia de San Juan se explotan los yacimientos calcáreos más importantes de Argentina. Las leyes oscilan entre 92,2 y 98,8% de CaCO<sub>3</sub> y 0,7- 3,5% de residuo insoluble. Los afloramientos carbonáticos en esta provincia, no solamente se destacan por su calidad química sino además por el gran volumen de sus reservas geológicas

Las áreas productoras históricas que se han caracterizado por los numerosos hornos criollos distribuidos desde Jáchal y Niquivil en el norte, hasta Pedernal y Cienaguita en el sur, pasando por Talacasto, Albardón, Pie de Palo, Zona, Pocito, Carpintería y Los Berros. De menor importancia fueron las explotaciones temporales del Cerro Blanco y de la Quebrada del Durazno (Castro *et al.* 2007).

Las formaciones calcáreas se distribuyen en cordones montañosos elongados según el rumbo general norte-sur (Fig.37). Estos se extienden en una delgada franja de 370km con un máximo de 8000 metros en su sector más ancho (Castro *et al.* 2007).

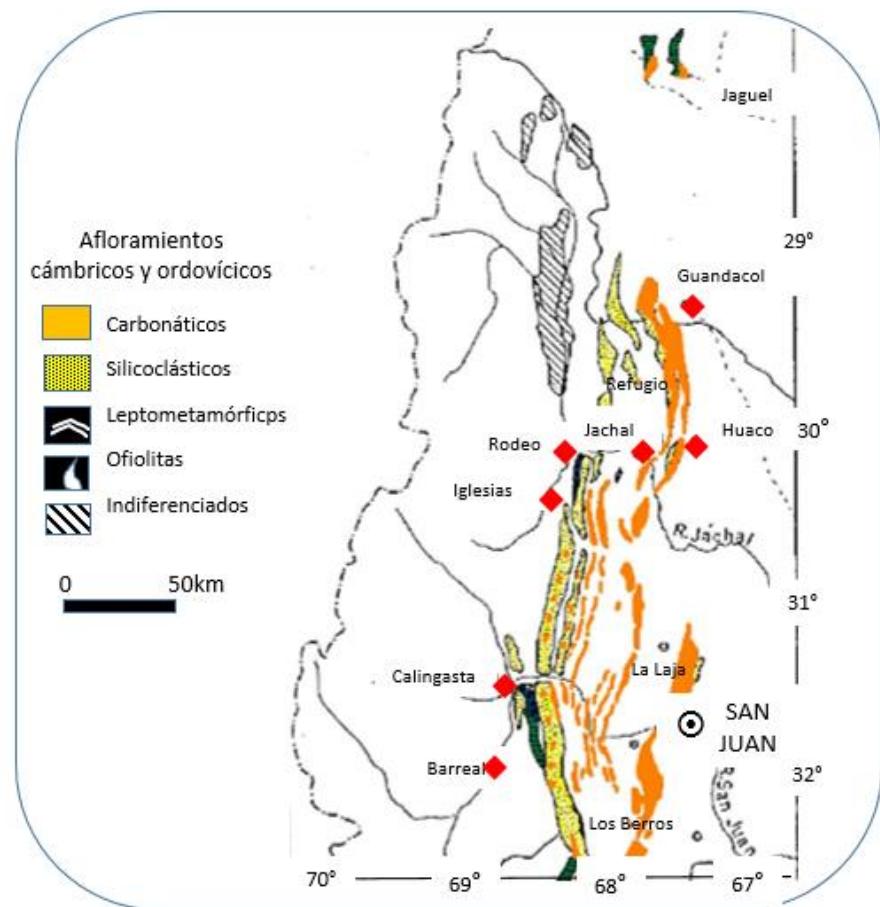


Figura 37. Afloramientos de caliza en la provincia de San Juan (Modificado de <http://www.criba.edu.ar>)

La figura 38 muestra canteras en operación en el Departamento de Sarmiento en las cercanías a la localidad de Cienaguita. El principal medio de transporte de los materiales producidos (calizas y cales) es por camión combinado en algunos casos con el sistema ferroviario (Castro *et al.* 2007).



Figura 38: Canteras en operación en el departamento de Sarmiento en cercanías a Cienaguita.

Las calizas y dolomías como se mencionó tienen un espesor total de unos 2500m y se encuentran en las Formaciones La Laja, La Flecha, Zonda y San Juan, siendo estas rocas de alta calidad para uso como materia prima para diversas industrias en todo el cono sur continental. Se definen 4 sectores productivos (Castro *et al.* 2007).

❖ Sector Jáchal: Corresponde a las calizas de la Fm. San Juan, distribuidas sobre la vertiente oriental de la Precordillera. Se trata de un bloque ascendido por fallas y volcado hacia el oeste, con laderas muy abruptas. Corresponde a bancos de diferentes espesores de color gris claro y textura fina, en algunos casos tiene lentes erráticos de pedernal. Los contenidos de  $\text{CaCO}_3$  van de 97,8 y 98,9% con 1,5 a 2,8 % de  $\text{MgCO}_3$  y 0,7 a 1,8% de minerales insolubles.

❖ Villicum – La Laja: En el faldeo sur-oriental del Cerro Villicum se caracteriza con potentes formaciones calcáreas con alto contenido en magnesio, clasificadas en consecuencia como “dolomitas”. Las leyes promedian un 19,4% de  $\text{MgO}$ , 32,25% de  $\text{CaO}$  y 1,5% de residuo insoluble. En el sector de la Laja, ubicado directamente al este del anterior, se explotan formaciones calcáreas que afloran en serranías más bajas y de relieve más suave. Se trata de calizas ordovícicas de alta calidad con valores de 52.5 a 53.8% de  $\text{CaO}$  y promedios menores a 0,5% de  $\text{MgO}$  y 1,0% de residuos insolubles.

❖ Sierra Chica de Zonda: En el sector más cercano a la ciudad capital de la provincia, hacia el oeste. Este yacimiento, ubicado en el borde oriental de la Sierra, presenta un potente paquete de bancos de calizas oscuras, grano fino y fractura concoidea. Las leyes llegan a 51,82% de  $\text{CaO}$  y 1,35% de  $\text{MgO}$ , con 3,52% de residuo insoluble.

❖ Los Berros-Pederal: En este sector se ubica el núcleo calero históricamente más importante de la provincia de San Juan y de todo el país. Las leyes llegan a 52,54% de  $\text{CaO}$  y 1,55% de residuo insoluble. El producto originalmente destinado en su totalidad a la construcción.

La mayor parte de la producción de piedra caliza y dolomitas de las canteras sanjuaninas se destina a la elaboración de cales tanto para construcción como para diversas industrias consumidoras, mientras que los despachos de piedra natural se destinan a siderurgia en clases granulométricas cerradas, a granel.

## CAPÍTULO 7: EXPLORACIÓN DE CANTERAS Y PROCESAMIENTO DE ROCAS CARBONÁTICAS

### 7.1 Características generales de la explotación

El método de explotación para los depósitos de calizas en la República Argentina es, principalmente en explotaciones a cielo abierto, en canteras por banqueos. Solo en algunos casos excepcionales para depósitos vetiformes de calcita, la explotación fue subterránea.

En algunas explotaciones se siguen utilizando métodos rudimentarios de arranque de mineral, manejados generalmente por capataces que se apoyan en su experiencia práctica ante la ausencia de una dirección con conocimiento profesional. Sin embargo, aún hoy en día se observan métodos de explotación por “destace”, generando frentes y taludes muy altos, quitándole vida útil a las canteras (Fig.39 A). Este método consiste en volar grandes frentes, aprovechando la verticalidad de los cuerpos estratificados, haciendo voladuras en la base de los taludes, ayudando a ceder el material de los planchones por gravedad. Este método artesanal se practica al margen de las disposiciones vigentes sobre polvorines, uso y manejo de explosivos, obviando normativas elementales desde el punto de vista de la seguridad del personal (Sanchez 2012).

En la actualidad se realiza explotación por banqueo, de esta manera se aprovecha mucho mejor el recurso a pesar de que se suma mayor movimiento de material estéril (Fig.39 B y C). Este sistema de bancos tiene una distribución de las perforaciones y de carga de explosivos de cada tipo, para producir en cantera una granulometría controlada, conocido como método sueco (Castro *et al.* 2007).

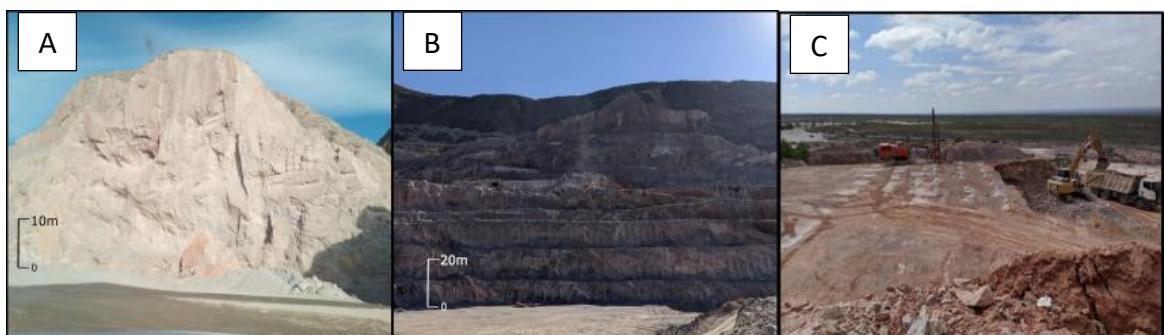


Figura 39. A) Frente con más de 30 metros, explotado por destace. B) Banqueo en nivel inferior de cantera, siguiendo bancos de 10 metros. C) Perforación siguiendo malla para banqueo en operaciones de calizas en el departamento de Sarmiento, provincia de San Juan.

#### 7.1.2. Los equipos utilizados en la explotación de canteras

Los equipos de perforación utilizados, son de aire reverso, estos también utilizados para hacer pozos de exploración avanzada. Generalmente, disponen de un sistema de orugas que permiten acceder a diferentes terrenos y topografías, además de poder dar un azimut y ángulo de perforación variado en cada pozo. Son equipos fundamentales, ya que permiten perforar los frentes a volar, con mallas regulares en función del tamaño de material deseado y el volumen. A diferencia de otros sistemas de perforación tiene

una limitación de profundidad, llegando hacer hasta pozos de 25-30 metros con diámetros de 3 a 4 pulgadas. Estos pozos cumplen dos funciones, generar el espacio de carga con explosivo para la voladura, y formar el cono de material perforado, que es muestreado y analizado para cuantificar la química de ese pozo. Pero además se necesitan otro tipo de equipos para el movimiento y transporte de las rocas extraídas.

Las palas son los equipos de carga utilizados y que ayudan a nivelar los pisos. El tamaño de la pala disponible limitará la altura de banco que podrá volarse para estar dentro de los factores de seguridad. El volumen de los baldes de carga varía entre equipos, y está entorno a los 4 a 6 metros cúbicos. Esto va a afectar directamente la velocidad de carga de los equipos.

La retroexcavadora es una herramienta muy versátil, que ayuda a sanear los frentes volados con mayor capacidad de selección, pero en menor volumen movido. Son equipos útiles para movimientos de materiales en zonas de difícil acceso, emparejar frentes, realizar excavaciones en materiales blandos o liberar frentes con tamaños mayores. Además, estos equipos pueden tener accesorios que permiten picar material, reduciendo los tamaños que están fuera de la especificación para poder incorporarlos al proceso.

Los camiones de carga varían en tamaño de entre 20 a 30 toneladas y esto permite el movimiento de materiales desde los frentes hasta su destino final, ya sea a planta de trituración, escombreras, stocks intermedios. El control de estos permite tener un valor aproximado de la producción realizada, para ello es necesario el correcto llenado de los mismos y su pesaje en balanza para ajustar los resultados.

También pueden usarse topadoras y niveladoras, que sirven principalmente de apoyo para movimientos de material y mantenimiento de accesos y caminos.

## 7.2. El procesamiento de rocas carbonáticas

El carbonato de calcio constituye una importante materia prima para muchas industrias. Sin embargo, los requerimientos o las especificaciones químicas, físicas, granulométricas, texturales, entre otras, difieren radicalmente de una industria a otra y definen así la aptitud de calizas y dolomías para cada destino (SEGEMAR-UNSAM 2008). El valor de las calizas está dado por su contenido efectivo disponible de CaO. Siendo las impurezas mayormente arcillas, menos duras que el mineral, durante la clasificación se suelen eliminar en los finos. Otras impurezas menores que se presentan en el orden de ppm son P, S, As, F y Sr.

En general, el objetivo del procesamiento de las rocas carbonáticas es la modificación de sus propiedades físicas y a veces químicas. Según el tratamiento que se da a la piedra caliza, diferente será el producto o la materia prima que podemos obtener: carbonato de calcio natural molido o micronizado, cal viva (por calcinación), cal apagada o hidratada (por hidratación posterior a la calcinación) y carbonato de calcio precipitado (por carbonatación).

La caliza es el principal componente para producir cal (CaO), la cual tienen como uso, tratamiento de suelo, purificación de aguas, pinturas, industria química y construcción. Las dolomitas son en general menos útiles que las calizas para la industria (Bliss *et al.* 2008).

Para la producción de fachada, lápidas, y otros usos ornamentales es muy distinta a la de rocas trituradas. Ya que no se utilizan explosivos. La roca se corta en bloques de aproximadamente 1,2 por 15-30m y una profundidad de 3m utilizando un hilo de corte.

Las rocas extraídas de la mina pasan por varias etapas de trituración, seguida de un proceso de clasificación. Si la roca triturada contiene humedad elevada será necesario secarla antes de proceder a la

clasificación en zarandas. Dependiendo del volumen de roca a procesar, y el tipo de explotación, la trituración puede llevarse en la mina o en la planta de procesamiento (SEGEMAR-UNSAM 2008).

La trituración primaria puede realizarse por compresión o por impacto. Los equipos que trabajan por compresión son adecuados para rocas duras (índices de Mohs 3-4), abrasivas y de gran tamaño. Los equipos que trabajan por impacto permiten obtener tamaños, más pequeños, evitando a veces la molienda secundaria, aunque para trabajar con volúmenes elevados de producción se prefieren molinos de bolas. La clasificación del producto triturado se realiza en zarandas inclinadas con uno o más pisos si se desea separar más de dos productos. La molienda secundaria se realiza con molinos de martillos de alta velocidad, los cuales operan entre 2000 a 6000 rpm. Obteniendo granulometrías menores a 50 micrómetros.

Si en el frente de explotación se presentan zonas de distinta coloración, luego de ser extraído y triturado, el mineral puede ser purificado por selección manual sobre cintas transportadoras, donde los operarios descartan los trozos coloreados. Esta selección también puede ser realizada por separadores ópticos (*sorters*) que desvían mediante una corriente de aire las partículas que difieren de un color estándar (Gutschick 2000).

La purificación mediante un proceso de flotación se justifica si existe un mercado que pague el costo adicional de aumentar la pureza o que no acepte cierta impureza. La flotación es un proceso fisicoquímico de separación de minerales o compuestos finamente molidos, basado en las diferencias de las propiedades superficiales de los mismos (mojabilidad). Un mineral queda en suspensión acuosa, mientras que otro es retirado por una espuma mineralizada que flota en la superficie. La mojabilidad puede ser modificada por reactivos. El colector es un compuesto orgánico heteropolar que se adsorbe selectivamente sobre la superficie de determinadas partículas, volviéndolas hidrófobas. Algunas veces es necesario usar un activador que modifica selectivamente la superficie de las partículas para permitir que el colector absorba sobre éstas, mientras que otras veces se usa un depresor que modifica la superficie de las mismas volviéndolas hidrófilas o inhibiendo la adsorción del colector.

En relación con el uso del proceso de flotación para la concentración y purificación de calcita, Lima y Luvizzotto (2007), realizaron estudios sobre la flotabilidad de la apatita, calcita y dolomita en presencia de diferentes reactivos determinando la condición de máxima flotabilidad para estos minerales.

## CAPÍTULO 8. PRODUCCIÓN DE CAL

### 8.1. Introducción

La provincia de San Juan es uno de los polos de producción de cales más importantes de Argentina, junto con el distrito de Olavarría en Buenos Aires abarca gran parte de la producción nacional cubriendo las necesidades de las industrias en la República Argentina y de los países limítrofes, entre ellos Chile.

La caliza es el principal componente para producir cal (CaO), la cual tienen como uso, tratamiento de suelo, purificación de aguas, pinturas, industria química y construcción. Las dolomitas son en general menos útiles que las calizas para la industria (Bliss *et al.* 2008).

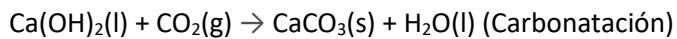
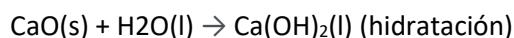
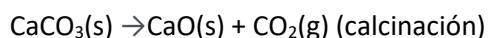
La cal es un reactivo que se obtiene por descomposición mediante calcinación, del carbonato contenido en las calizas. Este proceso está controlado por la calidad y granulometría del material, la cual puede controlarse en el inicio de la operación en la cantera.

Los hornos a lo largo de los años han mejorado las tecnologías, aumentando la cantidad de material que pueden procesar y la eficiencia energética, como también la adaptabilidad de combustibles, mantenimiento, reducción de polvillo, entre otros avances.

El diagrama de flujo de la figura 40 corresponde a la producción de cal a partir de calizas. Se resume en una primera etapa de extracción, donde se prepara el material. Luego el mineral es transportado a una etapa de trituración de varias etapas seguido de un proceso de clasificación y la roca molida se destina a los diferentes sectores o mercados (SEGEMAR-UNSAM 2008). El material se acumula en silos, hasta que es enviado al circuito de producción de cal.

Durante la calcinación de las calizas se obtiene óxido de calcio, también conocido como *cal viva*. Ésta puede ser comercializada de esa manera o generalmente se suma otro proceso que es la hidratación.

Las siguientes fórmulas muestran la reacción química de cada proceso y los productos obtenidos (SEGEMAR-UNSAM 2008):



Para la obtención de cal viva, es necesario sobrepasar la presión de disociación del carbonato correspondiente mediante reacción endotérmica, obteniendo el óxido y liberando el anhídrido.



La reacción comienza desde el exterior, y va avanzando hacia el centro. Mientras esto ocurre el CO<sub>2</sub> liberado debe hacerse camino hacia el exterior. Por lo que la calcinación está limitada por la difusividad del gas carbónico, las impurezas y la estructura cristalográfica de la roca.

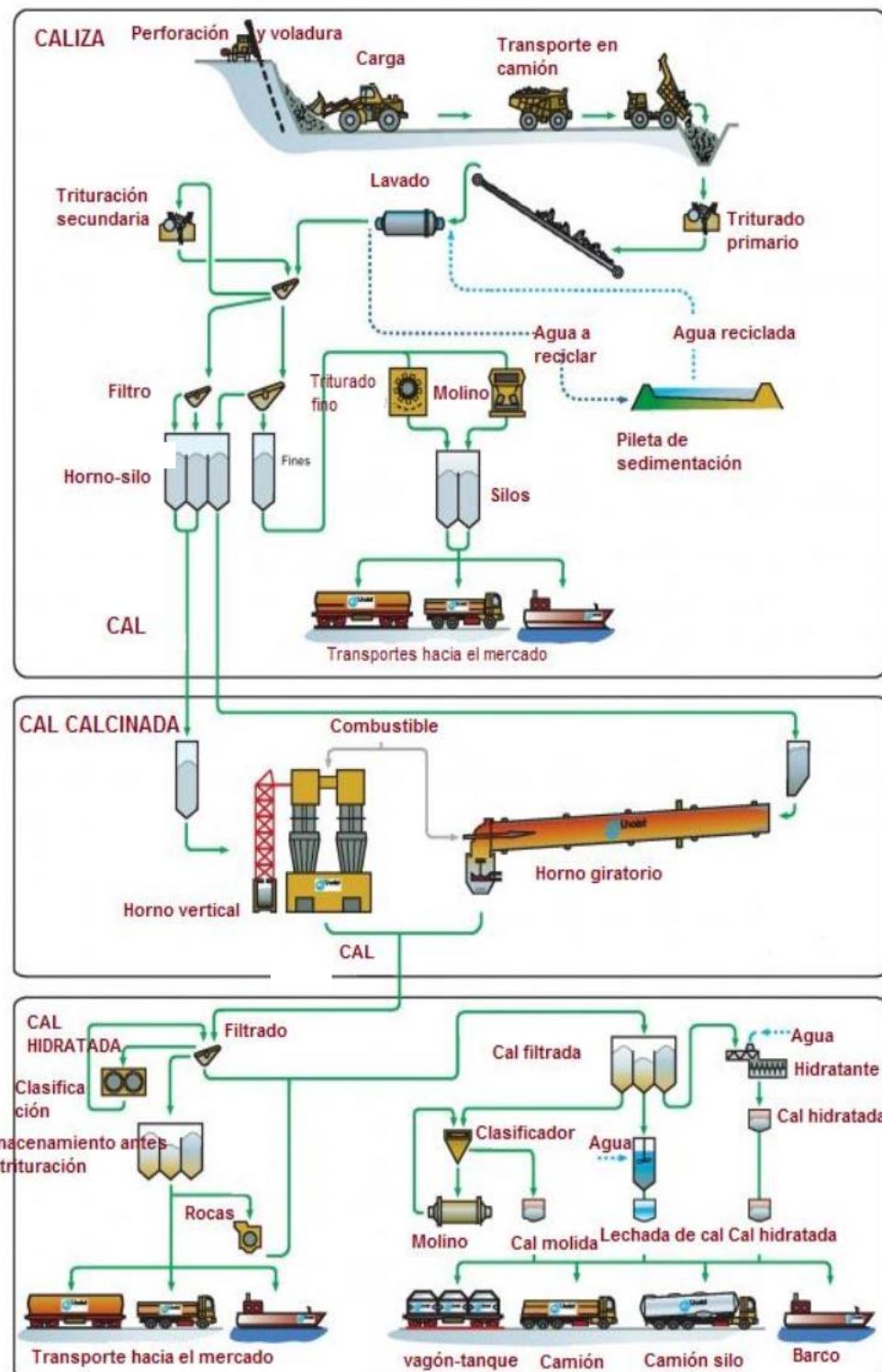


Figura 40. Diagrama de flujo que corresponde a la producción de cal a partir de calizas (Tomado de <https://www.lhoist.com/es>).

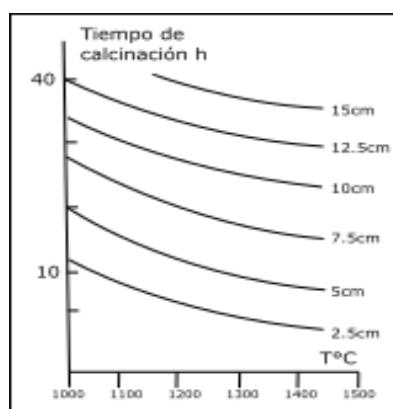
Si la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera circundante es mayor que la presión de equilibrio, la reacción dada será la inversa de la descomposición, y eventualmente la cal llega a transformarse totalmente en carbonato (causa por la cual no existe en la naturaleza cal viva o apagada).

El aire atmosférico contiene 0.03% de CO<sub>2</sub> en volumen, a una presión de 760 mmHg, le corresponde una presión parcial de CO<sub>2</sub> de 0,23 mmHg. Por lo que mientras no se supere esta presión, no se logrará la disociación. A 550° C a presión atmosférica en teoría se debería iniciar la descomposición, sin embargo, la reacción a esta temperatura es demasiado lenta. Ya a los 882°C la descomposición es total, siempre y cuando se elimine el gas generado. Para lograr una velocidad económica de descomposición se trabaja entre los 1100 y 1200°C. En condiciones extremas de calcinación (temperatura alta o exceso de tiempo en el horno) se produce un requemado, que densifica la roca al reducirse el volumen de roca, se ocluye los microporos y se reduce considerablemente la reactividad (SEGEMAR-UNSAM 2008).

Con el fin de evitar la obtención de cal con crudo en el centro o requemado, se recomienda trabajar con una alimentación de tamaño de roca que se encuentre entre determinado rango de diámetros, 10-20cm, 2.5-5cm y de 0.6-1.3 cm. Siendo la relación aproximada de x2 entre el mínimo y máximo.

La cal es enfriada con aire, y en este proceso ocurre una recarbonatación debido a la humedad contenida en el aire, sin embargo, este fenómeno es mínimo y no influye sobre la reactividad de la cal (SEGEMAR-UNSAM 2008).

En la figura 41 se observan los tiempos usuales de calcinación para rocas esféricas de caliza de diferentes diámetros en función de la temperatura (Gutschick 2000). El tiempo de calcinación se ve influenciado con mayor magnitud por cambios de diámetro en el material al calcinar que por la temperatura.



**Figura 41.** Se muestra los resultados empíricos del tiempo de calcinación para calizas de diferentes diámetros y temperaturas. Tomado de Gutschick 2000.

La calcinación es una operación sencilla, hablando del punto de vista química, ya que se usan hoy una gran variedad de hornos. Los convencionales pueden ser Verticales o Rotatorios o no convencionales como el de múltiple eje (SEGEMAR-UNSAM 2008).

Para la producción de cal a partir de las calizas de la provincia de San Juan existen dos limitantes, el primero es la presencia de silicio en forma de *chert* y el segundo las altas concentraciones de dolomita, ya que estas afectan casi de manera directa los procesos de calcinación, al tener diferentes comportamientos químicos.

Es en este punto que resulta clave hacer un correcto control mineral en los frentes de voladura y la cantera. Ya que agregar desviaciones de calidad ocasiona una variable más para la calcinación. Por esta razón es muy importante una buena delimitación en campo de los cuerpos mineralizados y estériles para permitir un mejor control de calidad del material que entra a planta. Es necesario evaluar la forma de optimizar las mezclas que se envían a trituración con el fin de obtener un ingreso de horno lo más estable y constante posible.

## 8.2 Los hornos para producción de cal

Los hornos para calcinación son de diversas formas según el tipo de caliza o dolomita procesada, distinguiéndose en general dos grupos principales: verticales y horizontales. En la provincia de San Juan prácticamente todos los hornos en operaciones son del tipo vertical.

Los verticales se pueden subdividir según una o dos cubas, con capacidad para producir de 150 a 350 t/día de cal en condiciones normales. Estos hornos consumen fuel-oil y/o gas natural.

Todos los demás hornos son de una cuba, incluyendo los clásicos llamados "criollos" (Fig.42), que aún se pueden ver en pequeñas empresas mineras, aunque tienen muchas desventajas para llegar a buenas calidades, además de ser equipos riesgosos. Dentro de estos últimos hay unos 140, que se denominan "mejorados" ya que utilizan carbón residual de petróleo como combustible en lugar de la clásica leña. Por lo general, la actividad artesanal se practica al margen de las disposiciones vigentes sobre polvorines, uso y manejo de explosivos; obviando normativas elementales desde el punto de vista de la seguridad del personal (elementos de seguridad, A.R.T., etcétera).

En la provincia de San Juan prácticamente todos los hornos en operaciones son del tipo vertical.

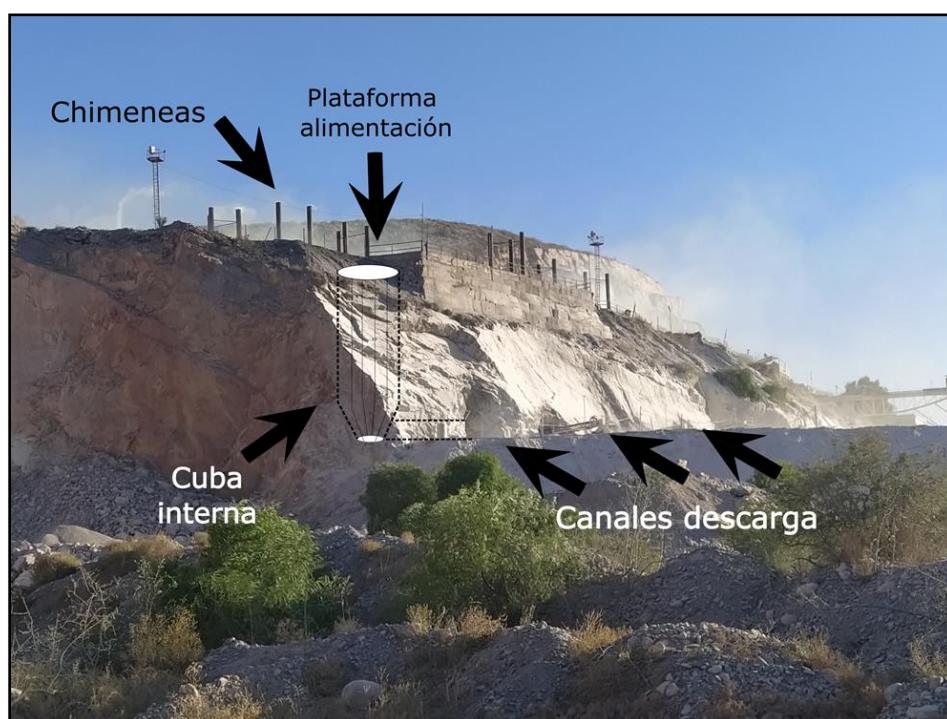


Figura 42. Zona con hornos criollos en funcionamiento ubicados en el departamento de Sarmiento, provincia de San Juan. Se esquematizan la plataforma de alimentación, el sistema de chimeneas, una de las cubas en el interior de la roca, y los canales horizontales de descarga de cada horno.

Los hornos verticales de una cuba que funcionan a gas son de operación continua. En la provincia existen unos veinte con capacidad para 30 a 150 t/día (Fig.43) Los demás son llamados hornos de lecho mixto, denominación que surge de la distribución en capas sucesivas de piedra caliza y carbón residual (o leña), en proporciones que cada operador estima más adecuada según su experiencia, en base a calidad y granulometría de la alimentación.



**Figura 43. Hornos verticales en el Departamento de Sarmiento, provincia de San Juan.**

Con el método tradicional de combustión a leña, la operación era discontinua, vaciándose el horno una vez alcanzada la calcinación total, para luego preparar una nueva carga y reiniciar el proceso. Con el uso de carbón, esta operación se realiza actualmente en forma continua, como en los hornos de una cuba modernos; la capacidad de producción varía entre 20 y 100 t/día. Muchos de estos hornos tradicionales están excavados en lomadas arcillosas al norte de Los Berros, y otro grupo se distribuye a lo largo de las barrancas del Río de Pedernal. El revestimiento consiste de piedras no reactivas, por lo general areniscas metamorfizadas de las zonas vecinas (Castro *et al.* 2007). Las áreas históricamente productoras, se han caracterizado por los numerosos hornos criollos distribuidos desde Jachál y Niquivil en el norte, hasta Pedernal y Cienaguita en el sur, pasando por Talacasto, Albardón, Pie de Palo, Zona, Pocito, Carpintería y Los Berros (Castro *et al.* 2007).

Actualmente existen hornos industriales con avances tecnológicos y automatización donde se pueden controlar con precisión las diferentes variables, por ejemplo; el horno tipo *Maerz*, que predomina en la industria de la cal en la República Argentina (Fig.44).



**Figura 44. Dos Hornos Maerz en una operación activa en el Departamento de Sarmiento, provincia de San Juan.**  
**Visto desde dos ángulos, frontal y lateral.**

Hornos verticales: admiten un diámetro de roca mayor que otros hornos. Generalmente consumen gas natural, combustibles líquidos o coque, pero los diseños más modernos permiten el uso de carbón pulverizado volviendo económica su operación. El consumo de combustible es de aproximadamente 3,5 Gj/t de cal.

A pesar de que existen distintos tipos, en general, se pueden identificar 4 zonas (Fig.45).

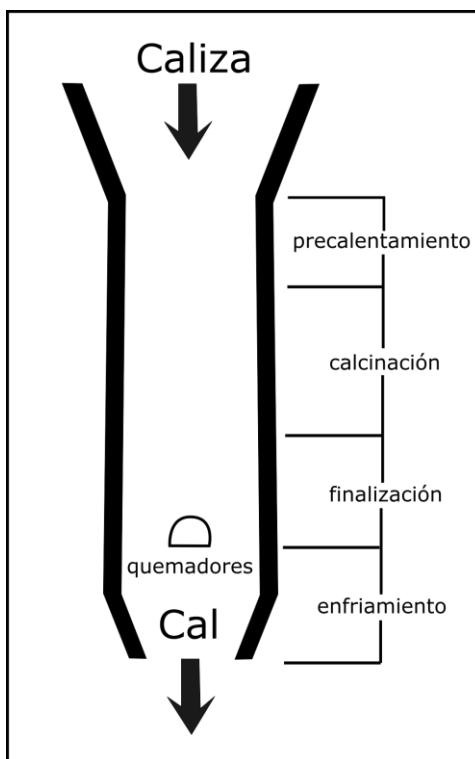
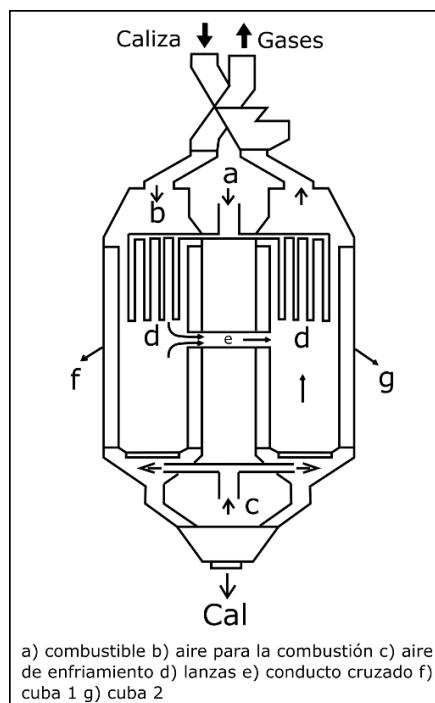


Figura 45. Se observa las zonas por la cual transita la caliza para ser calcinada (Tomado de SEGEMAR-UNSAM 2008). Estos hornos van moviendo el material por la propia gravedad.

En la zona de precalentamiento los gases de recirculación precalientan la roca preparándola para la etapa siguiente. Luego en la zona de calcinación, ocurre el 95% de la reacción. Luego se encuentran los quemadores en los cuales termina la calcinación. En la última zona, la de enfriamiento, se inyecta aire en contracorriente enfriando la cal y recuperando calor que será entregado en la zona de calcinación.

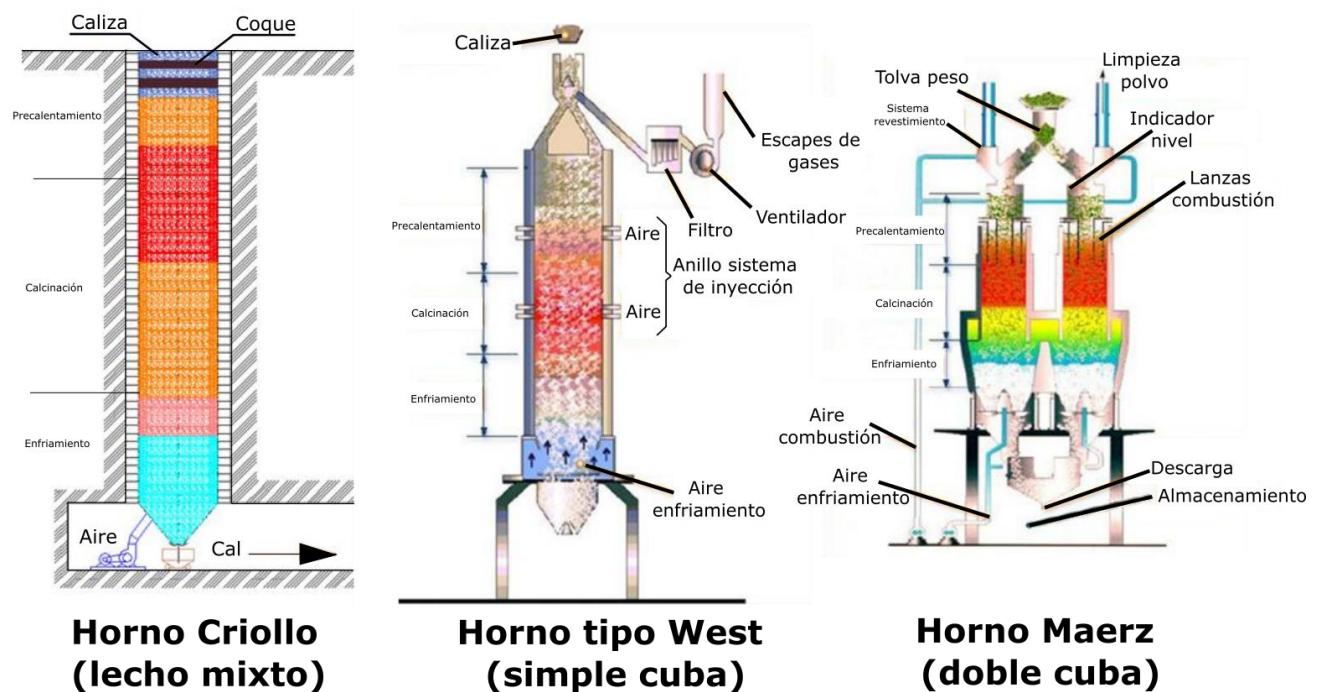
Horno de flujo paralelo regenerativo: Este horno acepta una alimentación de roca de 5 a 12 cm y su capacidad varía de 90 a 550 t/día. Consiste en dos o tres cámaras interconectadas en la zona de calcinación y mientras en una se lleva a cabo la calcinación en la otra se hace circular los gases de combustión de contracorriente con la alimentación de caliza para precalentárla (Fig.46). Luego de 15 minutos de calcinación se procede a invertir el proceso, calcinando en la otra cámara. El aire de enfriamiento es inyectado al final de cada calcinación mezclándose con los gases de combustión que son usados para el precalentamiento. La calcinación a los 1100°C se completa favoreciendo la obtención de una cal altamente reactiva con bajo contenido de carbonato.

Como resultado de este proceso secuenciado de calcinación se logra un consumo de 3770 Kj/kg de cal.



**Figura 46. Horno de flujo paralelo regenerativo.** Estos hornos son los más eficientes en el mercado actual, manejándose con dos cubas principalmente. Es el esquema que corresponde a los Hornos Maerz.

Otros tipos de hornos que existen para el proceso de calcinación son los rotatorios, los de alimentación mixta, los de eje doblemente inclinado, los de eje anular, los de flujo paralelo regenerativo. Sin embargo, los hornos criollos, verticales y Maerz resultan los más representativos, en la industria de la cal en la República Argentina (Fig.47).



**Figura 47. Principales hornos de la industria de la cal, con sus componentes (traducido de Peluc y Gonzalez Abone 2018).**

Otras tecnologías modernas de calcinación de finos de caliza como la calcinación en lecho fluidizado, fueron estudiadas y puestas a prueba (Videla y Azocar 1996).

El Cuadro 6 enumera las cantidades de hornos y número de operarios según categoría.

**Cuadro 6. Cantidad de hornos y número de operarios en la provincia de San Juan según categoría. Tomado de (Sánchez, 2012).**

Categoría	Cantidad	Nº Operarios
Artesanales	25	84
Industriales	10	661

Hoy en día, las empresas que han invertido en hornos con tecnologías avanzadas sufren la limitación en el suministro de gas durante los meses de invierno. Esto provoca la necesidad de disponer de un cupo de combustible sólido en invierno, debido al aumento de consumo de gas para calefacción domiciliaria, y hacer un cambio a *pet coque*, para compensar estas condiciones.

Frente a la necesidad de disponer de cales de alta reactividad la opción pasa por una mayor disponibilidad de gas o invertir para la reconversión de hornos a gas, lo que implica proceder a la pulverización total del carbón buscando el modo de reemplazar el poder calórico del gas como combustible.

Sin embargo, el uso de carbón aumenta los contenidos de partículas de carbón o restos de azufre, que afectan de manera directa la calidad, además de tener comportamientos de calcinación sutilmente diferentes, pero suficientes para generar complicaciones. Muchas veces estas variaciones en cuanto al combustible usado modifican la calidad obtenida. Para evitar la disminución de la calidad de la cal, se intentan compensar con el uso de calizas de mayor pureza.

Finalmente, la industria de la cal enfrenta otro problema asociado el crecimiento de la demanda: la falta de capacidad de transporte (Sánchez 2012). Cabe consignar, por otra parte, que las tareas de transporte se realizan en vehículos obsoletos, los cuales se desplazan sin encarpado de modo que incorporan al ambiente, sin posibilidad de control alguno, polvo de cal, coque y fracciones menudas de piedra caliza. En el mismo orden, no existe posibilidad alguna de control de los eyectos que, bajo la forma de gases, son liberados al ambiente.

## CAPÍTULO 9: EL CONTROL MINERAL. APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE CAL EN LA PROVINCIA DE SAN JUAN

### 9.1. Influencia del control mineral

El control mineral comienza con el mapeo de frentes de voladura. Se releva cada frente haciendo énfasis en aspectos estructurales y sedimentológicos.

Algunas de las descripciones más importantes son la textura y estructura de la roca. En caso de ser calizas es importante definir las texturas, ya que está vinculada estrechamente con su calidad como materia prima. El color, la mineralogía y las alteraciones, también son características que ayudan a entender la calidad de los cuerpos. El enfoque siempre tiene que ser operativo. Algunas observaciones secundarias, como lo son los fósiles, la geomorfología, adquieren importancia al momento de estar asociado a alguna característica del cuerpo mineral.

El método clásico se basa en hacer correcciones luego de ver variaciones o respuestas del proceso de trituración en la banda transportadora, que es al paso previo a la calcinación de la roca. El control mineral, propone un método predictivo, donde al realizar el análisis en cantera, se podrá predecir el comportamiento del material que se dispondrá para consumir luego de la trituración (Fig.48).

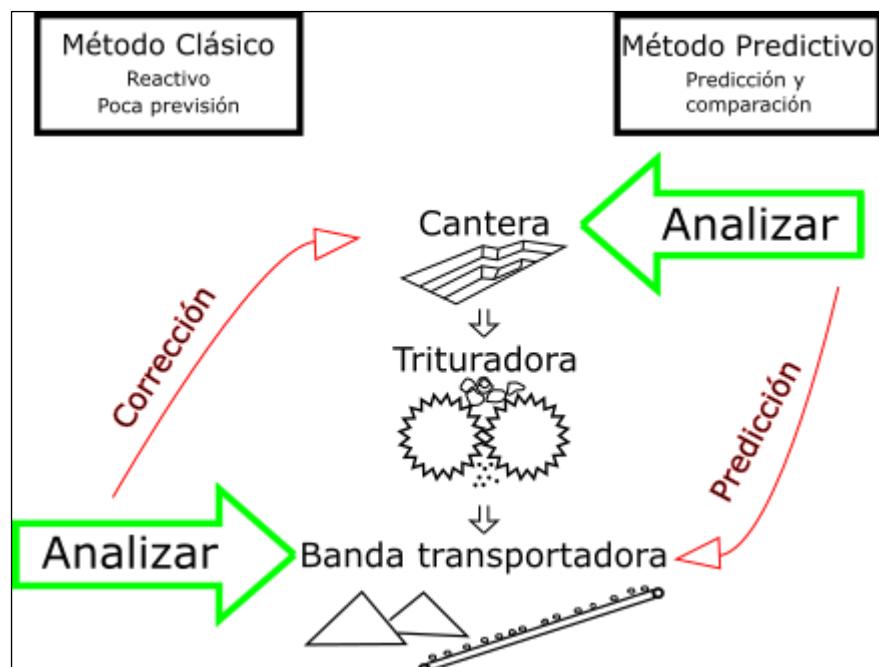
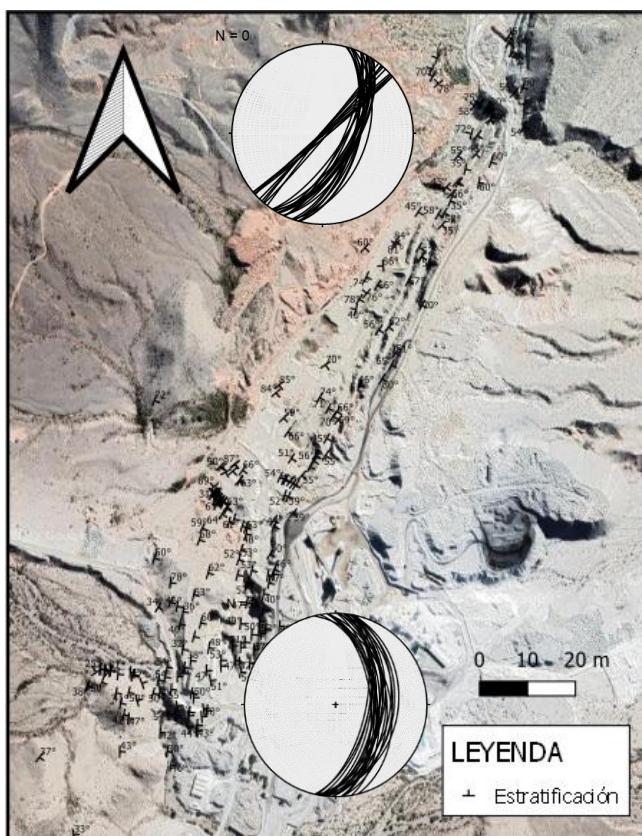


Figura 48. Diagrama de análisis del proceso inicial para la producción de calizas.

Conjuntamente con estas observaciones se deben realizar mediciones con brújula: azimut del frente, estratificación, fallas principales, fracturas. A mayor densidad de datos se podrá hacer estadística con red estereográfica, para entender el comportamiento estructural en cualquier punto, permitiendo adquirir un enfoque geotécnico/operativo. La figura 49 refleja la recopilación de datos de estratificación en las canteras

de La Laja, en la provincia de San Juan, donde se marca el sector norte un anticlinal y hacia el sur, solo un flanco de la estructura.



**Figura 49. Recopilación de datos de estratificación en las canteras de La Laja, San Juan. Se observa un pliegue en el sector norte, con dos grupos de datos bien marcados, correspondientes a cada flanco. En el sector sur, el comportamiento es homoclinal, correspondiente solo al flanco este.**

Al momento de recopilar esta información, se debe hacer una primera caracterización operativa de los cuerpos, definiendo aquellos con potencial como “mineral” o material para producción por textura y tipo de roca, y aquellos que se descartan como “estéril” con destino a escombrera.

Este primer análisis se debe acompañar de la perforación de voladura. Estos cuerpos se explotan en cuerpos y bancos. Cada pozo perforado debe tener sus correspondientes coordenadas, la profundidad de perforación, el ángulo y el azimut. Este se puede medir con equipos de alta precisión, como lo son los GPS diferenciales, que se adaptan bien a este tipo de operación. En caso de no disponer, se utiliza GPS estándar, y se realiza correcciones posteriores según la desviación del equipo. Además, con estos equipos se debe realizar la medición del perímetro del cuerpo a volar, y la medición de las alturas de los bancos. Esto permite calcular con exactitud los volúmenes de los cuerpos, en conjunto con los modelos de elevación de detalle. Se muestrea cada pozo en particular. El cono generado, debe ser dividido en dos por una canaleta de aproximadamente 5 cms. Esto permite muestrear la totalidad del material perforado. Se toman aproximadamente 0,5kg de muestra de material fino generado.

Los análisis deben cuantificar el contenido de los elementos y los resultados deben estar expresados analíticamente en: porcentajes de CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, pérdida por calcinación (PPC), y otras impurezas. En casos particulares puede realizarse el análisis de otros elementos, según las especificaciones de los clientes.

Todo este conjunto de información, correspondientes al control mineral ayuda a planificar la explotación de la mina, de manera prolífica, en conjunto con los coordinadores de extracción dentro de lo que se conoce como geología de mina.

Las voladuras se dividen en tres cuerpos operativos, independientemente de la geología: cuerpo mineral, estéril y de mezcla. El cuerpo mineral, corresponde a la caliza con calidad química dentro de la ley de corte de  $\text{CaCO}_3$ , con características texturales apropiadas, e impurezas por debajo de las especificaciones. Este material tendrá como destino directo la planta de trituración primaria que actúa como el cliente interno de las operaciones de cantera.

El cuerpo estéril, corresponde a todas las rocas no carbonáticas, arcillas, gravas, dolomitas, o calizas con impurezas, por debajo de la ley de corte. El destino de estos materiales son las escombreras dispuestas en la operación.

El cuerpo de mezcla, corresponde a calizas, de calidad media, por debajo de la ley de corte, pero aptas para ser mezcladas con material de alta calidad, que permitan en promedio ser incorporadas en el proceso. Estas pueden ser incorporadas de manera directa en caso de disponer de diferentes frentes activos, o puede ser acumulado en stocks intermedios.

Toda esta primera etapa de control mineral, ayuda a entender la geología y química de los cuerpos explotados. Un buen trabajo en cantera, puede ayudar a predecir el comportamiento químico y reológico de los siguientes procesos. El siguiente proceso es la trituración, donde se armarán stocks con granulometrías y químicas definidas. Asegurar la calidad desde cantera es fundamental, ya que cualquier variación, puede afectar todo el proceso, desde la trituración, calcinación, hidratación o incluso despachos.

La figura 50 muestra el stock de material acopiado con tamaños de partícula de 2-4" luego del proceso de trituración, previo a la incorporación al proceso de calcinación.



**Figura 50. Stock de material acopiado 2-4" luego del proceso de trituración, previo a la incorporación al proceso de calcinación.**

### 9.1.1. Problemas más comunes en el proceso por la calidad de la roca.

◊ **No tener calidad constante.** El principal problema es no tener material con una química constante y esto conlleva a tener que hacer cambios de configuración y de parámetros en los hornos y equipos, ya que la temperatura óptima para la calcinación se modifica con los cambios en la composición química. Esto genera deficiencias de calcinación, creándose materiales crudos o requemados. Los materiales crudos son aquellos sin calentar y los requemados son aquellos donde el CaO se recristaliza. Ambos generan problemas de calidad y reactividad. La solución es tener un control mineral constante, asegurado con análisis químico representativo y permitiendo hacer mezclas de cuerpos de alta y media calidad.

◊ **Incorporar material estéril.** También conocido como contaminación, no debe ocurrir, ya que afecta de manera directa e inmediata el proceso, generando material fuera de especificación y perdieron stocks que se encontraban en condiciones. Ocurre en general por errores operativos de los equipos de carga en cantera, o incluso, pueden ocurrir contaminaciones en los stockpiles de material triturados, al incorporar material de la base de los stocks. La figura 51 muestra el movimiento de material para alimentación de cinta de hornos. Este movimiento se realiza para ordenar los stocks piles, puede generar contaminaciones en caso no se siga el piso. El movimiento del equipo reduce el tamaño del material sobre el cual se mueve, aumentando la cantidad de finos.

◊

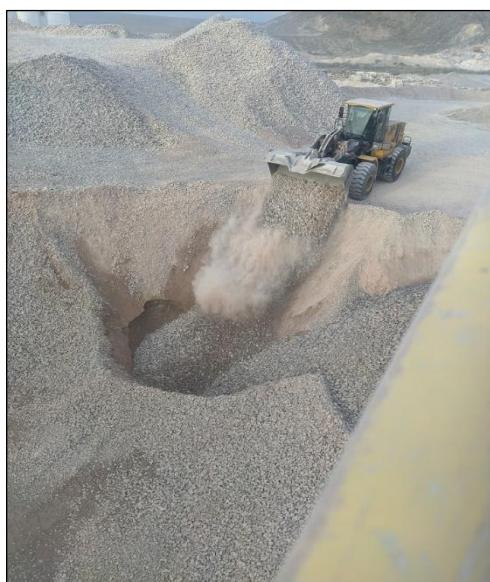


Figura 51. Movimiento de material para alimentación de cinta de hornos.

◊ **Problemas de granulometría.** En algunas ocasiones los materiales responden diferente al proceso de trituración. Esto genera desviaciones menores de granulometría en los stocks. Los hornos deben tener una relación entre el material de menor y mayor tamaño, una relación 1:3 aproximadamente. Además, es necesario identificar los materiales lajosos en cantera, ya que estos muchas veces no son eficientes al ser triturados. El contenido de materiales de mayor tamaño generará materiales con núcleo crudos, en cambio si es de menor tamaño al especificado, generará requemados.

⊕ **Decrepitación o generación de finos.** La calcita cristalizada, puede ser un problema, ya que no tiene el mismo comportamiento al calentarse que las calizas. A pesar de ser químicamente lo mismo, hay diferencias texturales que generan comportamientos diferentes. La calcita cristalizada, al calentarse genera un fenómeno llamado decrepitación, donde se expande, hasta desintegrarse en partículas finas. Este material fino reduce la porosidad interna de los hornos, generando problemas de calcinación, o incluso, este material fino va aglomerando caliza, teniendo problemas graves en los hornos. Este fenómeno es frecuente también con los mármoles donde hay una importante recristalización de calcitas.

La figura 52 exhibe venas de calcita, dentro del cuerpo de caliza micrítica. Estos conservan la deformación sufrida, permitiendo entender el comportamiento de los esfuerzos y espacios de dilatación. Otras variedades de calcita, se observan con texturas variadas, llenando principalmente cavernas y zonas de dilatación, entre las más comunes están, las drusiforme (Fig.53), diente de perro, geodas.



**Figura 52.** Venas de calcita, dentro del cuerpo de calcita micrítica. Se observa la deformación sufrida en las sucesiones carbonáticas.



**Figura 53.** Calcita cristalizada textura “diente de perro” de relleno drusiforme, dentro de caverna en los frentes de caliza.

⊕ **Materia orgánica.** Esto no resulta un problema operativo, pero concentraciones altas de materia orgánica en las rocas, puede afectar la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del horno, afectando los sensores, y

enmascarando los valores reales de calcinación que son parámetros de interés para el control de los hornos. Además, es un problema ambiental, al aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> generado.

### 9.1.2. La utilidad de los fotomosaicos

En las actividades de control mineral, resulta práctico trabajar con fotomosaicos de los frentes de voladura. Este permite distinguir la estructuración del cuerpo, como la presencia de flexuras, fallas y zonas de alteración. En la figura 54 se destacan en un frente de voladura en cantera de la zona de los Berros, donde se identifican características litológicas, fallas, planos de estratificación e impurezas como arcillas, zonas de cavernas.



Figura 54. Frente de voladura en cantera de la zona de los Berros. Con rojo se marcan los cuerpos de buena calidad, que incluye variedades de caliza micrítica, en azul cuerpos de pedernal, y en verde dolomita se incorpora la estratificación que define la estructura en ese sector, que corresponde a una flexura. Se marca la zona con arcilla con color marrón y fallas con relleno de calcita en trazos blancos.

A la misma interpretación se la clasifica en unidades operativas (Fig.55). El cuerpo marcado en rojo (M3) corresponde a un cuerpo de caliza con características definidas de calidad, que en este caso contiene 95% de CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> de 2% y valores de MgO de 3%. En azul se destaca el cuerpo E2 que corresponde a un cuerpo de caliza de baja calidad intercalada con bancos de pedernal y dolomita.

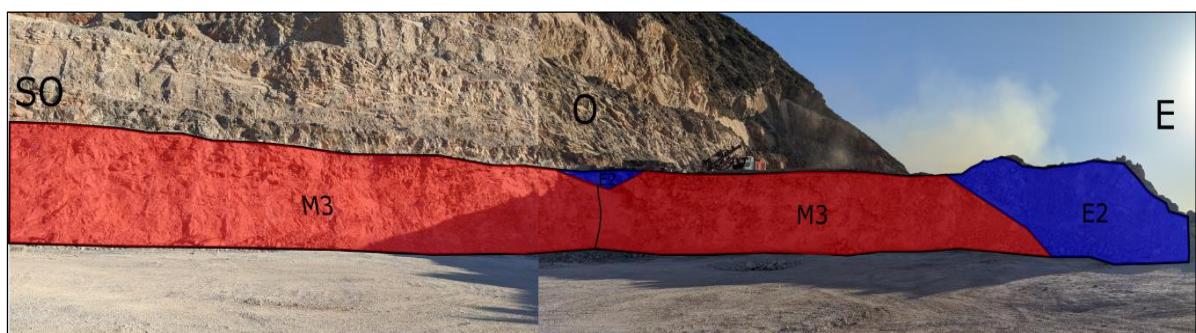


Figura 55. Clasificación en unidades operativas. M3 en rojo cuerpo de caliza con características definidas de calidad y E2 cuerpo de caliza de baja calidad intercalada con bancos de pedernal y dolomita

En la exploración de rocas carbonáticas, se observa continuidad lateral de las características geológicas y espesores, para las unidades estratigráficas en grandes extensiones. El levantamiento de una

columna geológica, con espesores, litologías principales, tipos de contactos, estructuras sedimentológicas y texturas, permite ubicar estratigráficamente dentro de la columna geológica regional (Fig.56).

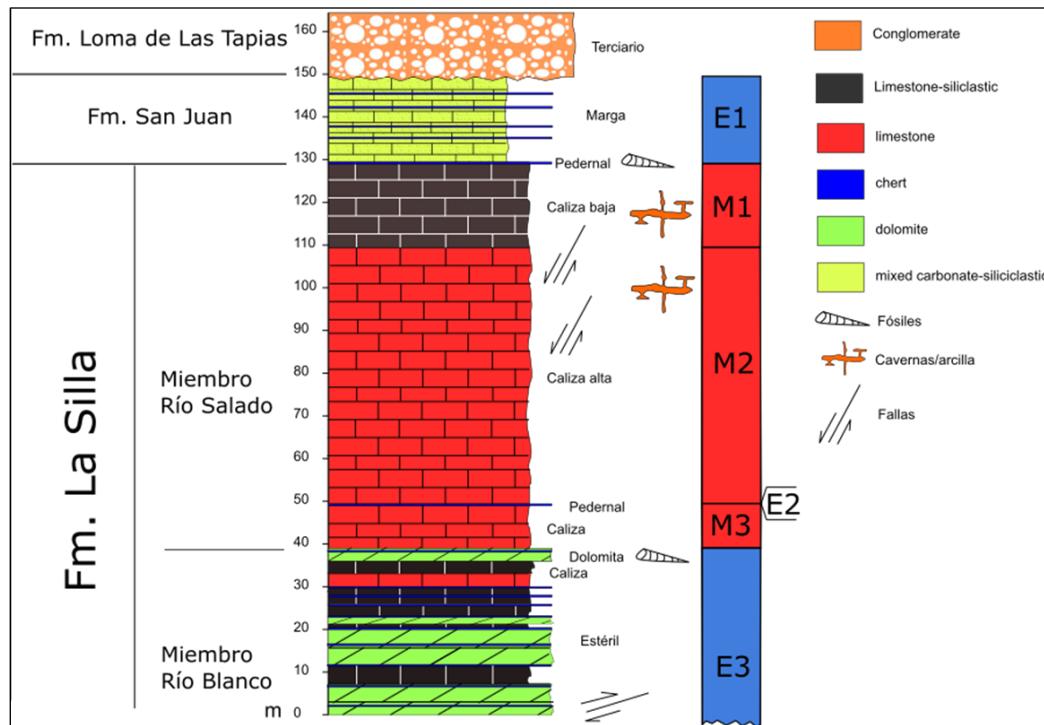


Figura 56. Columna geológica realizada con datos obtenidos en la zona de La Laja, San Juan. Donde se asocia unidades estratigráficas, características sedimentológicas/ petrológicas y clasificación de unidades operativas .

La Precordillera dispone de varias unidades carbonáticas, sin embargo, tiene diferencias, que definirán su uso. En general los cuerpos se encuentran en forma de fajas superpuestas, con orientación norte sur. Es un error pensar que los cuerpos son únicamente homoclinales. Algunas fajas tienen plegamientos de gran magnitud, formando anticlinales y sinclinales, o en algunos casos, se generan flexuras (Fig.57).

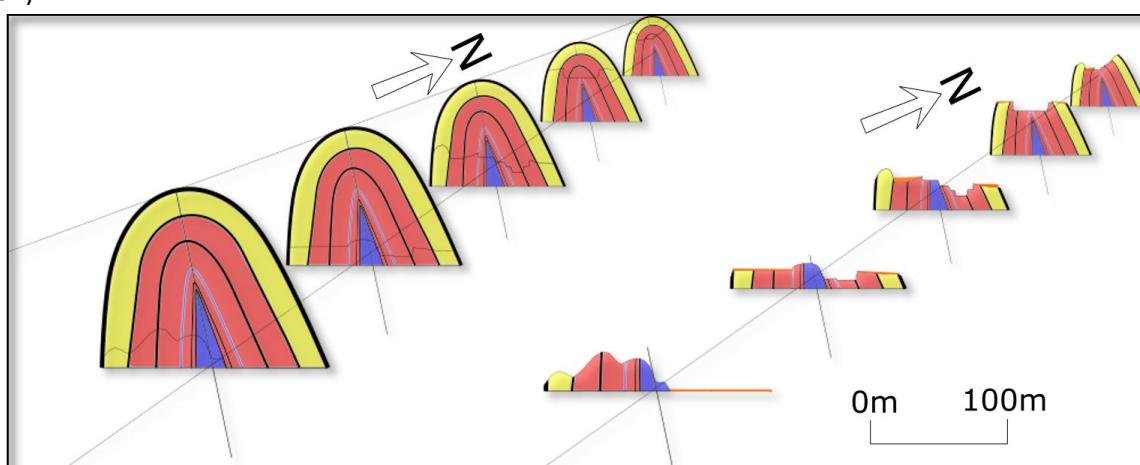


Figura 57. Esquema propio que muestra el plegamiento anticlinal de los cuerpos de caliza en la zona de La Laja, San Juan. Con diferentes cortes Oeste-este. A la derecha se observa corregido con la topografía actual, y la conservación del pliegue en los diferentes sectores.

Los mapeos deben identificar esta estructura, ya que va a orientar el foco de búsqueda. Es común que estas rocas tengan superposición de eventos. Además de la estructura previamente mencionada, se observa niveles de metamorfismo bajo grado, alteración hidrotermal, dolomitización, ambientes kársticos, metasomatismo.

Estos eventos tienen una incidencia directa en la calidad de la roca y en casos locales, pueden no ser detectados con los sondeos. En ambientes kársticos se forman cavernas aisladas por disolución, de algunos metros de largo, y hasta 2 metros de altura, que pueden generar problemas para la perforación y para la voladura. Esto se traduce en la desviación de los pozos y problemas de carga con explosivo, al aumentar el volumen anular de los pozos. Otro verdadero problema es que, estas cavernas en general, se encuentran con un relleno arcilloso, plástico, con colores que varían de amarillo a naranja y tiñen la roca adyacente. Además, aportan valores considerables de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , por lo que cada caverna tiene un radio de influencia, donde reduce drásticamente la calidad química. La figura 58 muestra un frente de caliza micrítica, con cavernas llenas de arcilla y material detrítico.



Figura 58. Frente de caliza micrítica, con cavernas llenas de arcilla y material detrítico.

Es conveniente analizar el drenaje a nivel de cantera. Analizando las imágenes satelitales en diferentes épocas, es posible identificar las zonas con drenaje de mayor densidad, que estarán asociadas a las zonas con mayor posibilidad de tener fenómenos de disolución propia ambientes kársticos. En la imagen 59 se puede ver el drenaje en el flanco explotado, previo a la formación de la cantera.



Figura 59. Imagen satelital del 2004, mostrando el drenaje previo a la formación de la cantera correspondiente a la zona de La Laja, San Juan. El sector norte con mayor densidad de drenaje, coincide con el volumen de cavernas observado en la actual explotación.

Es frecuente encontrar diferentes situaciones en los frentes de explotación, donde la caliza tiene intercalado un banco o estrato con impurezas como chert, dolomita o una combinación de ambos. El ángulo en el cual se encuentran va a definir la zona de mezcla o estéril que va contaminar la voladura. Esta zona de mezcla disminuirá a medida que el buzamiento de los cuerpos aumente, permitiendo su separación óptima con equipos de cargueros (Fig.60). Por otro lado, cuando los niveles con impurezas se encuentran en forma horizontal o subhorizontal atravesando todo el frente, van a generar una gran zona de mezcla, aunque la relación de volumen caliza/impureza sea muy alta.

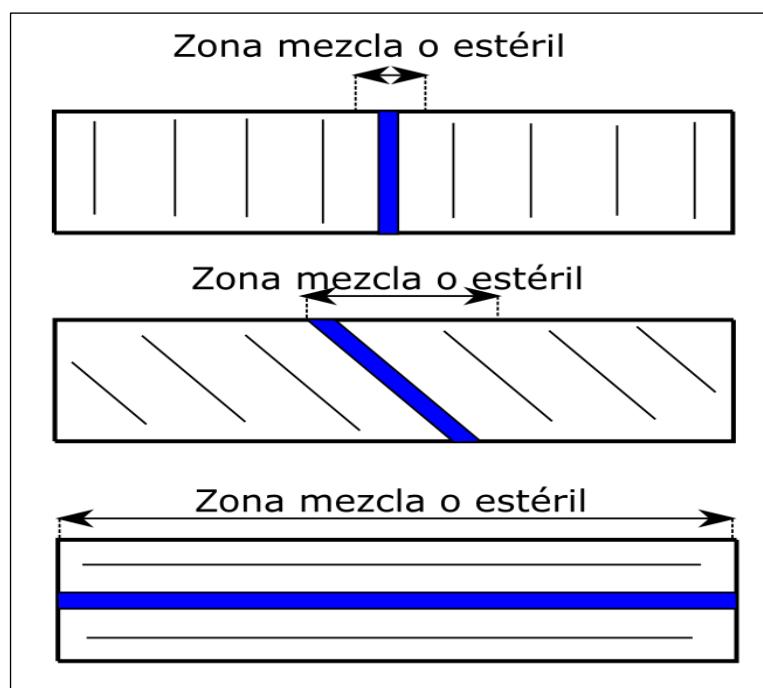


Figura 60. Esquema de frentes de voladuras, con cuerpo estratificado de impureza. Aumenta la zona de mezcla o estéril a menor sea el buzamiento de los cuerpos.

En función de lo mencionado se pueden dar diferentes escenarios que deben evaluarse de manera particular para cada frente. Es necesario entender que se generaran zonas de dilución, donde se ve afectada la calidad química general de la caliza. Estas zonas deben ser luego, en función de la química de los pozos de voladura, definidos como zonas de mezcla o estéril. En el caso de ambientes kársticos, las zonas de dilución están definidas por la longitud de la caverna. En muchos casos el relleno de estas cavernas es de textura fina y friable, por lo que puede ser eliminado en gran parte en los procesos de trituración, volviendo a recuperar la calidad química de la roca (Ejemplo A en Fig.61).

Otra posibilidad es definir dos zonas de dilución siguiendo el volumen y tipo de impurezas (Ejemplo B en Fig.61). Los procesos hidrotermales pueden generar estas zonas complejas, donde un cuerpo estratificado de caliza, tiene impurezas siguiendo las estratificación o estructuras transversales, como fallas o cavernas.

Por último, el contacto entre la zona mineral y estéril, también puede definir una zona de dilución, dependiendo del ángulo de contacto y de la posición estratigráfica de los cuerpos. Lo más recomendable es que esta zona de dilución se defina aquellos casos donde el mineral esté suprayacente al estéril (Ejemplo C en Fig.61). En este caso, se puede definir como estéril operativo, a aquel volumen de mineral, que no puede ser separado por los equipos de carguío.

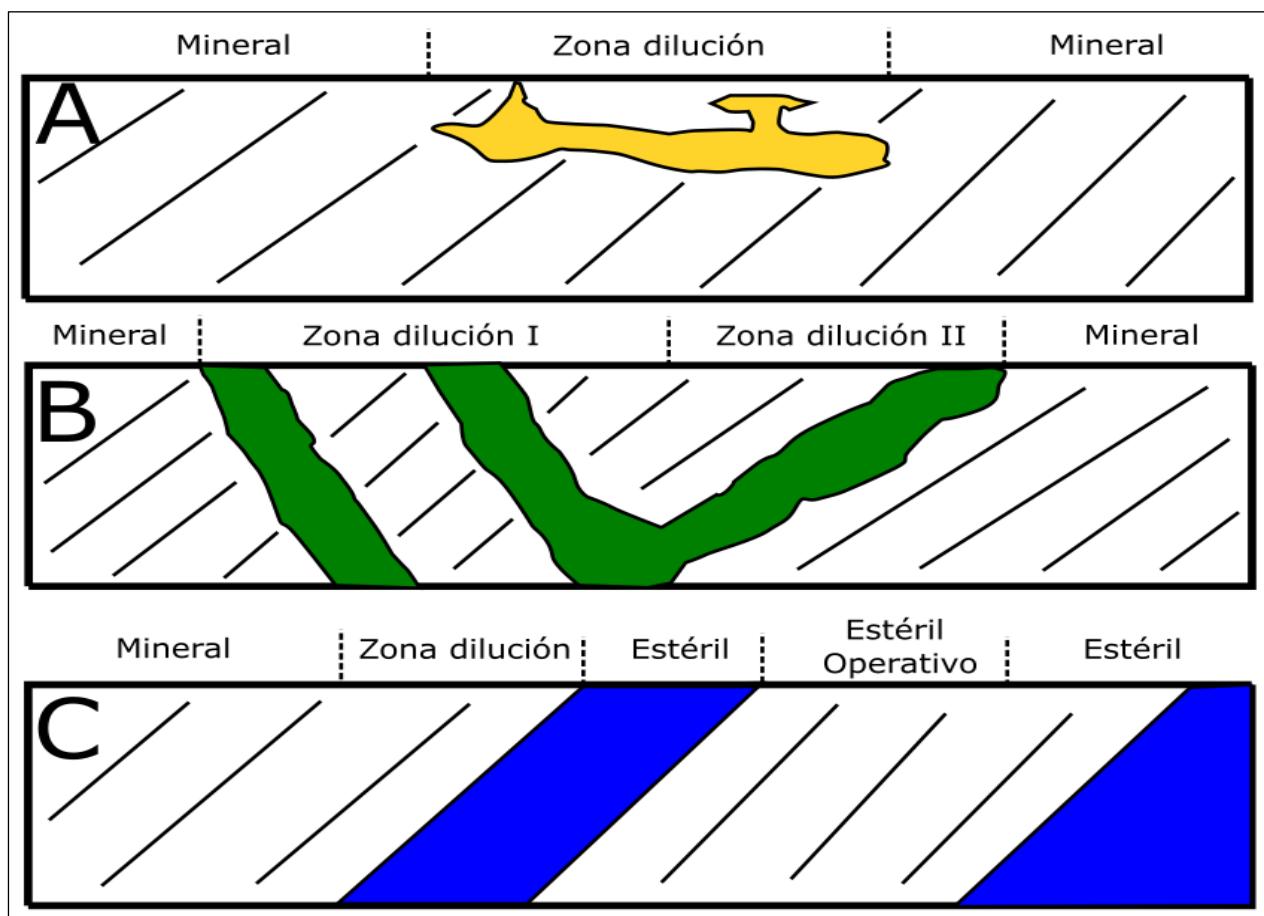


Figura 61. A) Delimitación de frente en ambiente kárstico, con la formación de caverna y relleno. B) Delimitación de frente en ambiente de alteración hidrotermal. C) Delimitación de frente en ambiente con intercalación de cuerpos estratificados de impurezas.

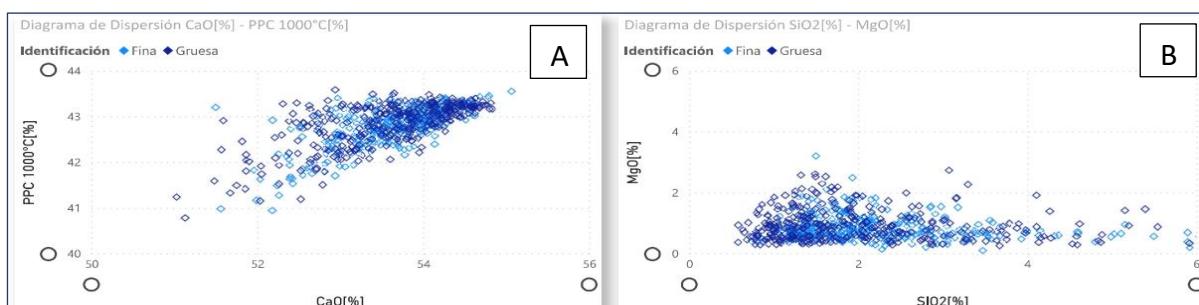
### 9.1.3. Geoquímica como herramienta de control.

El control químico y geoquímico desde la exploración permite tener materiales de mayor calidad. Sin embargo, estos datos se valorizan enormemente cuando se correlacionan con el contexto geológico.

Tanto en la roca como en el material triturado o polvos de perforación, se realiza un análisis químico cuantitativo completo de elementos mayoritarios, en los que informan los contenidos de los elementos presentes expresados como CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SO<sub>3</sub>. Estos pueden adquirir mayor o menor importancia según las características del depósito.

Para el análisis de los cationes presentes se utilizan diferentes técnicas como la fluorescencia de Rayos X, determinaciones por volumetría, análisis por plasma inducido acoplado (ICP), entre otros. Es recomendable siempre conocer la metodología de análisis utilizada en la obtención de los datos, ya que, al momento de realizar interpretación o cruce de información, se puede llegar a conclusiones erróneas, las técnicas tienen límites de sensibilidad diferentes a la concentración de los elementos analizados. Las figuras 62 A y B muestran dos diagramas con cruce de datos químicos para entender comportamiento geoquímico del proceso. La relación entre la pérdida por calcinación (PPC) y el CaO es siempre lineal, las variaciones importantes pueden estar asociadas a la incorporación de dolomita.

Por otro lado, el MgO y el SiO<sub>2</sub>, no tienen una relación directa, generalmente en concentraciones de un 2% de ambos compuestos, indican zonas de alteración hidrotermal. Por lo general predomina uno de los óxidos, indicando los procesos de dolomitización o silicificación. Con valores menores a 1% pueden estar asociados a valores normales dentro de la caliza.



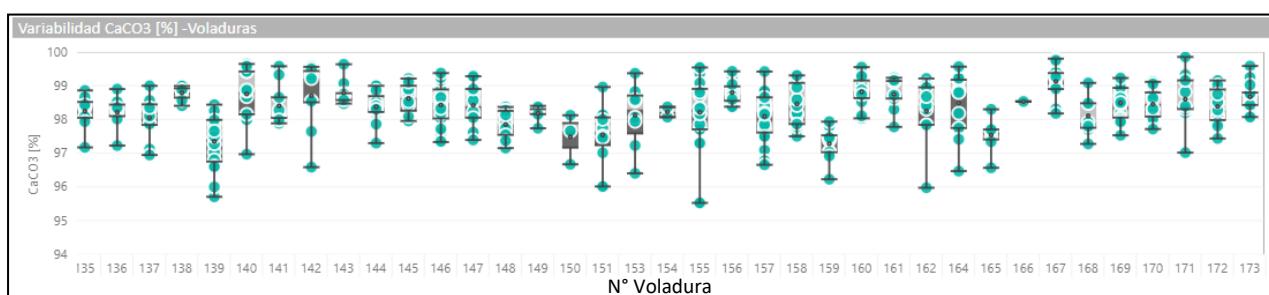
**Figura 62 A y B: Diagramas con el cruce de datos químico para entender comportamiento geoquímico del proceso (Un total de 730 muestras, correspondientes a la caliza triturada fina y gruesa de un año completo).**

La medición de CO<sub>2</sub> se conoce como pérdida por calcinación PPC (o también es común encontrarlo como *Loss of ignition* LOI). La medición de este parámetro se realiza de manera directa con equipo de medición de gases o indirecta por calcinación al medir la diferencia de peso antes y después. Los valores en porcentaje son altos en caliza, mientras para la cal, solo queda pequeños porcentajes asociados a material no calcinado. Este material no calcinado, presenta mayor resistencia mecánica, por lo que, en el proceso, los valores altos de PPC se irán concentrando en las fracciones más gruesas.

El muestreo resulta muy importante para poder tener buenos resultados químicos. La cantidad de muestra, es un factor que ayuda a reducir problemas por heterogeneidad. En estos depósitos, la heterogeneidad está asociada al SiO<sub>2</sub> y es un condicionante químico de la calidad de los materiales. En este caso la heterogeneidad está asociado a los minerales garga como chert o pedernal. Este material se va

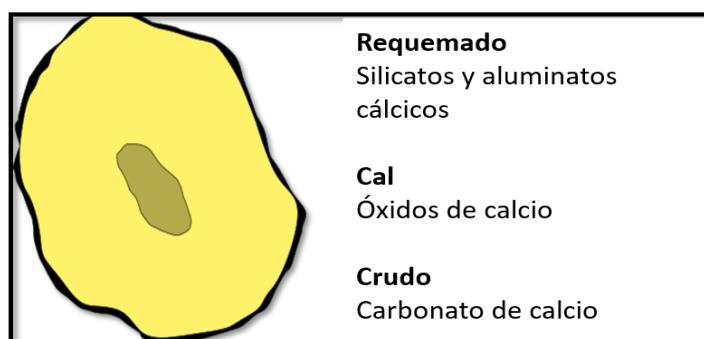
fraccionando y concentrando en las fracciones más finas cuando atraviesa las etapas del circuito desde la voladura en cantera, hasta calcinación.

La figura 63 muestra un ejemplo de la variabilidad de  $\text{CaCO}_3$  para varias voladuras correspondientes a una misma cantera. El rango de calidad está definido por un diagrama de caja para cada voladura, donde se ven reflejado las calidades de cada pozo que compone el bloque volado (puntos verdes). Este análisis permite entender las calidades a diferentes escalas: pozos perforados, voladura y a nivel de cantera. En este ejemplo vemos que en general las voladuras tienen valores mayores a 95% de  $\text{CaCO}_3$ . Este tipo de información puede ser analizada siguiendo criterios de estadística y geoestadística, con el fin de definir por ejemplo los niveles dentro de la cantera con mayor variabilidad. Es recomendable hacer el mismo análisis para las concentraciones de impurezas ( $\text{MgO}$  y  $\text{SiO}_2$  principalmente).



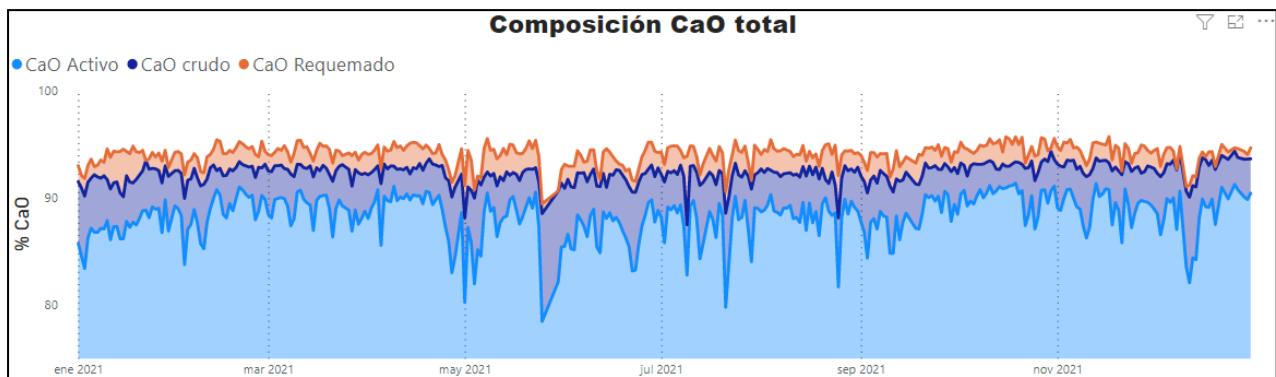
**Figura 63: Ejemplo del  $\text{CaCO}_3$  para diferentes voladuras. Este tipo de análisis permite observar la variabilidad de  $\text{CaCO}_3$  a nivel de pozos, voladura y cantera.**

Sobre la cal, también se realizan distintos controles químicos que permiten obtener información sobre el proceso de calcinación. Se miden por análisis químicos la concentración de CaO total (por medio de fluorescencia de rayos x), CaO activo (análisis de volumetría), y la PPC (ensayo de calcinación). El valor de cal se obtendrá con el CaO activo de manera directa. El material crudo remanente en la cal, se calculará con el porcentaje de PPC, que corresponde al  $\text{CO}_2$ , que liberará la porción de caliza no calcinada. El requerido no puede ser medido de manera directa por lo que se calculará como la diferencia del CaO total menos el CaO activo y el CaO correspondiente a material crudo determinado. La figura 64 esquematiza un fragmento de cal luego de pasar por el ciclo de calcinación.



**Figura 64. Esquema de un fragmento de cal luego de pasar por el ciclo de calcinación. El color negro representa el requemado, el amarillo la cal, y el marrón el material crudo sin calcinar.**

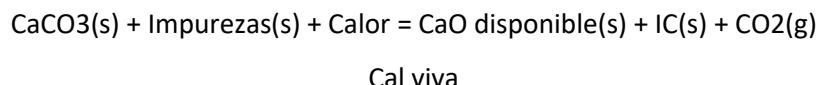
En resumen, el CaO Total corresponde a la suma del CaO del requemado, la cal y el crudo. La figura 65 muestra la composición del CaO total de cada día para un año entero. El gráfico apila áreas que corresponden a los porcentajes de cada una de las fracciones. Este permite ver tendencias, al notar un aumento o disminución de las áreas. El CaO total está representado como la suma de todas las áreas. El valor esperado de CaO total es de 90% o superior. El valor de CaO activo estará en función de las especificaciones de los clientes, en este ejemplo el valor mínimo esperado es de 85%.



**Figura 65. Ejemplo de los porcentajes del CaO total en cada uno de sus fases, para los análisis de las descargas de los hornos de un año completo.**

El grado de calcinación va a depender de varios factores: tamaño granulométrico de la materia prima o de la heterogeneidad física, cantidad de calor absorbido por cada partícula para lograr la disociación, las impurezas, el tipo de horno utilizado, entre otros. Luego, la imposibilidad de obtener una alimentación químicamente homogénea, monotamaño y forma única influirá en la reacción química para lograr la disociación en un proceso industrial.

Por otro lado, la tecnología permite una calcinación adecuada cuando la relación entre el tamaño mayor y el menor es 1:3. En el horno, el calor generalmente no es constante, por lo que la disociación del CaO y el CO<sub>2</sub> es diferente, para las partículas grandes y las pequeñas. Si a ello, le agregamos que las calizas vienen con impurezas asociadas, la reacción química industrial es la siguiente:



Donde el CaO, disponible (sólido) o total, está conformado por el CaO útil + CaO requemado + CaO crudo. El IC(s) corresponde a las impurezas concentradas.

El CaO útil, corresponde al CaO libre generado durante la calcinación y cuyo pH natural es 12,6. Generalmente se encuentra entre la capa superficial de la partícula, que corresponde al material requemado por sobreexposición al calor y el núcleo de ésta, que es donde queda el material crudo, sin calcinar.

El CaO requemado se encuentra en la superficie de la partícula, es el CaO que se ha combinado, por exceso de calor, durante la calcinación, con la sílice, la alúmina o el hierro contenido en las calizas y cuyo pH natural es entre 12,6 a 12,8 o más. Generalmente corresponde a la parte exterior de las partículas

grandes y a la totalidad de las partículas pequeñas. Según literatura de la química del cemento, se refiere a la formación de silicatos y aluminatos cálcicos (Álvarez 2008).

Las impurezas de la cal aumentan porcentualmente respecto a la materia prima de la piedra caliza, aunque en peso sigue siendo igual. Este efecto de concentración se obtiene por la pérdida de  $\text{CO}_2$  en el proceso de calcinación (Fig.66). La única impureza que tiene un comportamiento diferente, es la dolomita, carbonato que también se descompone, generando  $\text{CO}_2$ , favoreciendo la concentración de los elementos restantes.

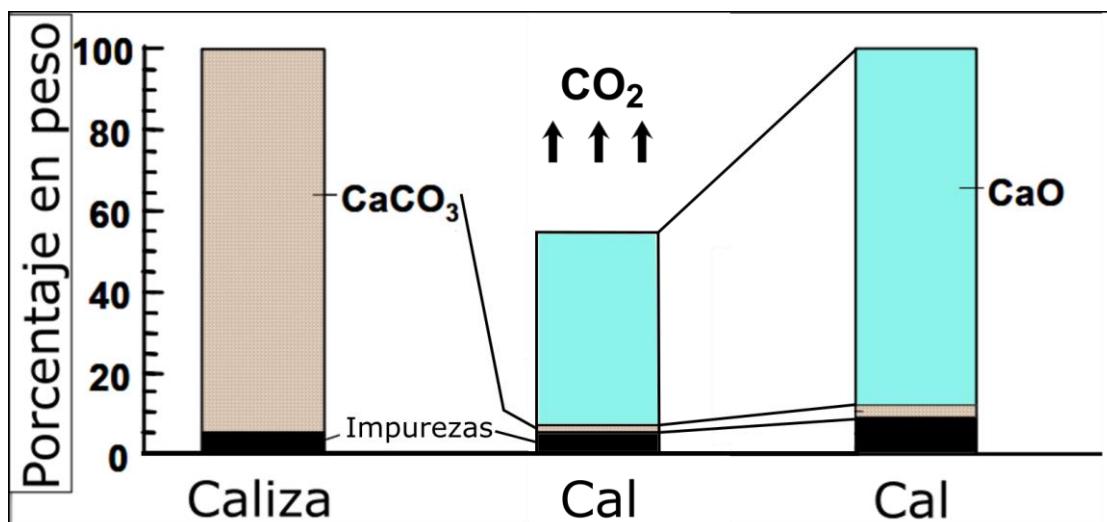


Figura 66. Comparación entre la composición composicional de la caliza y la cal formada luego del proceso de calcinación. El primer gráfico de cal corresponde a las concentraciones sin variación, el segundo se recalcula al 100% los compuestos sólidos (Modificado de Honghi, 2007).

Es muy importante entender la química del proceso, ya que da información de utilidad para entender el comportamiento de las calizas. Las reacciones químicas del proceso, son sencillas y permiten ver una correlación de los datos de roca y cal. Estas relaciones dan indicios para entender variaciones de calidad.

#### 9.1.4 Otros ensayos

Las características físicas de las calizas, son fundamentales en el proceso, ya que éstas van a condicionar la morfología final del material triturado y su comportamiento frente a la calcinación.

Las observaciones pueden hacerse desde antes de las voladuras en los frentes, describiendo el espesor de los estratos, la presencia de estructuras como laminación, las alteraciones, las zonas de disolución, y el fracturamiento hidrotermal o tectónico. Esto permite definir zonas de debilidad que van a controlar la morfología inicial de los fragmentos.

La malla de perforación, la cantidad y el tipo de explosivo debe ser el primer factor para ajustar la morfología de los fragmentos. Se puede hacer un análisis granulométrico por voladura, donde por fotografías con escalas, se puede comparar el tamaño de los fragmentos y su distribución.

La planta de trituración es la etapa del proceso donde se dará el tamaño final a la granulometría utilizada. Esta etapa estará condicionada, a la cantidad de hornos disponibles, al material a comerciar y a

los requerimientos de los clientes. Es común trabajar con 2 o 3 granulometrías principales aptas para calcinar, las cuales se van acumulando en *stockpiles*.

Las plantas poseen dos etapas de trituración. La primera etapa consiste en equipos de trituración en 2 ejes. Por ejemplo, una trituradora de mandíbulas, permite fragmentar todo el material, limitando el diámetro máximo que se incorporará al proceso. En este triturador solo se fragmentará un porcentaje del material, correspondiente a aquellos trozos de mayor tamaño que la abertura inferior de la trituradora y el resto del material conserva su estructura y forma adquirida en la voladura. En la siguiente etapa, se utilizará una trituradora secundaria, que permitirá dar el tamaño final, y lograr la granulometría máxima permitida.

La forma ideal planteada para los fragmentos es esférica, ya que está permitirá una buena porosidad y permeabilidad dentro de los hornos, favoreciendo la calcinación del material. Para el control de este índice, se recomienda hacer un análisis de lajosidad, aplicando la clasificación morfométrica de Zingg (1935) como se exemplifica en la figura 67. Esta clasificación permite estimar de manera porcentual la cantidad de material permitiendo hacer ajustes de la configuración en la planta de trituración con el fin de llegar a los valores ideales.

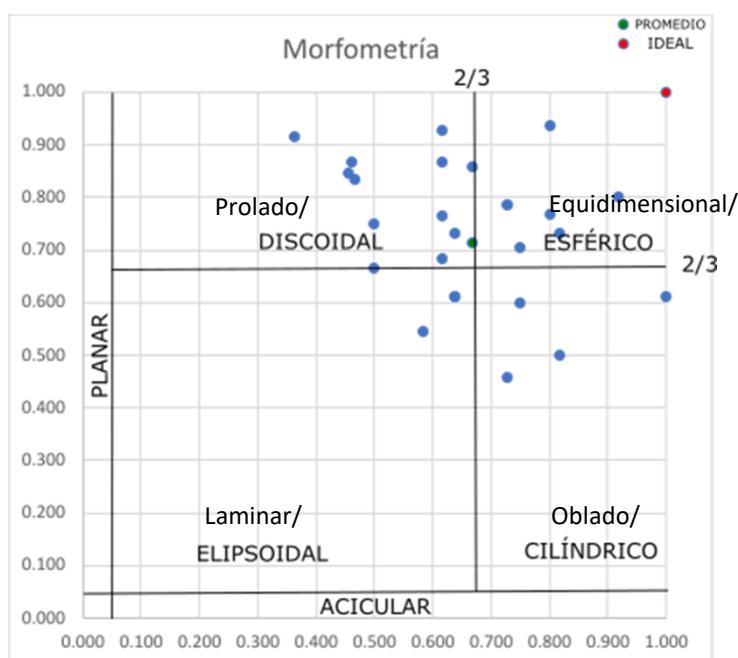


Figura 67. Morfometría del material triturado en la Planta La Laja según la clasificación de Zingg (1935).

La figura 68 muestra un bloque de 80 mm acumulado en los conos triturados, con sus respectivos ejes. Sin embargo, a pesar del circuito de trituración que va sufriendo la roca, no es el único factor, que determinará el tamaño final.

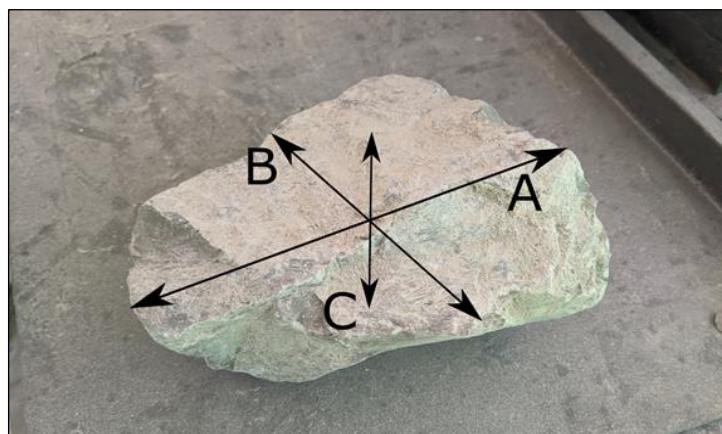


Figura 68. Ejes considerados en los bloques de 80mm acumulados en los conos triturados de grueso.

El material va circulando por diferentes etapas, que incluyen cintas, caídas, alimentadores, zarandas, entre otros, que genera un desgaste mecánico de la roca. Algunos ejemplos claros son las caídas desde la cinta a los *stockpiles*, produciéndose una fragmentación del material, en mayor o menor medida, según la altura de caída.

Existe un ensayo conocido como *Shatter test* o Prueba de fragmentación para medir la capacidad de la caliza o cal para resistir la manipulación brusca y la tensión durante todo el circuito del proceso. Se especifica mediante un número conocido como *Shatter index* o índice de fragmentación. Los procedimientos y equipos son variados en función del material a ensayar sea caliza o cal. En el caso de la cal se puede introducir una muestra con dimensiones conocidas (un cubo de 3x3x3 cm aproximadamente), en un tubo cerrado de 72 cm de largo. Este tubo colocado con su eje mayor de forma vertical, va a hacer rotaciones a partir de un eje horizontal, simulando la caída de la muestra en cada rotación. Después de 100 rotaciones completas, el contenido es tamizado para medir el porcentaje de fino menor a 5mm y el número de fragmentos mayores a 5mm. Los valores deseados para este ensayo son menos de 25 fragmentos mayores a 5mm y menos de 35% de fino menor a 5mm. El *Shatter index* se obtiene como la relación entre el peso retenido en el tamiz y el peso total, en porcentaje. Es menos frecuente realizar este ensayo para muestras de caliza. Sin embargo, los resultados obtenidos a partir de la cal, están directamente vinculado a las características geológicas de la caliza. Por esto es recomendable hacer el ensayo a muestras de caliza calcinadas en laboratorio de manera controlada.

Según la clasificación de Zingg (1935) la textura, va a influenciar en la facilidad o no de la calcinación del material, siendo las texturas finas las que tienden a generar requemados, y las texturas gruesas a generar crudo. Lo ideal es mantener constante la textura de las rocas. Este control se hará desde cantera, con la definición de los cuerpos operativos en función de la textura desde una visión petrográfica.

Asociado a la generación de finos se realiza un ensayo de calcinación conocido como decrepitación, donde se calcina un cubo de caliza, en condiciones controladas, y se observa la fragmentación, generada por fracturas, arcillas, calcita. El aumento de temperatura de forma controlada, hacen que aumenten de volumen los granos de calcita, y se deshidraten, generando pequeñas explosiones, que fragmentan el material, generando un polvo, menor a 1mm. Este material fino, reduce la porosidad de la totalidad del material que se encuentra en el horno.

Durante todo el proceso se recomienda tener un control granulométrico, con muestreo de cada cinta, en el proceso de trituración y calcinación. Al detectar variaciones se podrán tomar medidas de corrección de manera rápida.

El tamaño de la muestra para cualquier tipo de análisis de los mencionados tiene que ser proporcional al diámetro máximo de los materiales a muestrear. El muestreo tiene que ser lo más representativo posible, teniendo en cuenta que los mayores errores se darán en aquellas cintas que transporten el material de mayor tamaño, ya que éstas requieren muestras de mayor volumen y peso. En la figura 69 se observan los errores más comunes para el tipo de muestras: la curva AB corresponde al error para extracción de muestra, siendo mayor en granulometrías mayores, en el otro lado las curva CD corresponde al error por preparación de muestra siendo mayor en granulometrías menores, por último, el error del instrumento es indistinto a la granulometría del material.

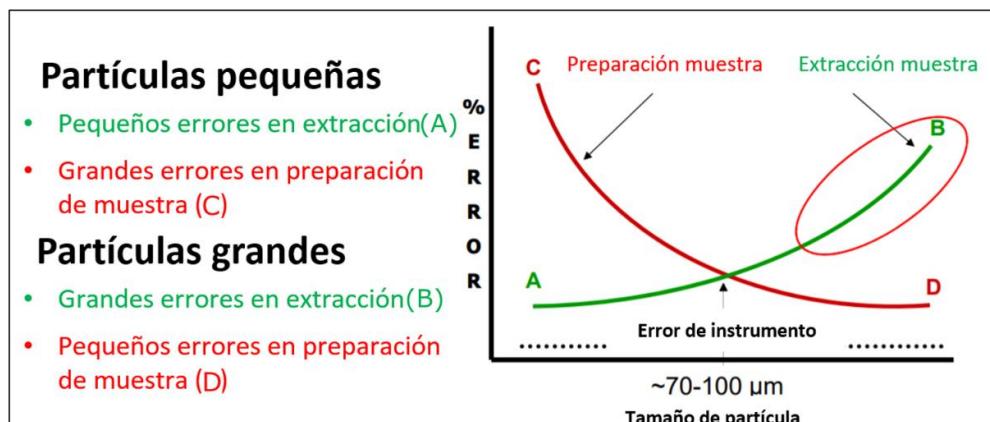


Figura 69. Esquema donde se observa los principales errores en mediciones según el tamaño de partícula (Tomado de <https://www.horiba.com/>).

## 9.2. Mezclas operativas en cantera

Como se mencionó anteriormente, para este tipo de depósitos, se logra la mayor calidad de piedra desde cantera. El geólogo debe indicar la forma de incorporar los materiales, considerando las especificaciones y las variaciones de calidad que puedan requerirse.

La mejor manera de aprovechar los frentes en explotación, es realizar mezclas, por lo que es necesario tener el control de cada voladura, esto significa, conocer la química y el volumen. A partir de ecuaciones lineales se puede calcular el porcentaje de cada frente considerando las restricciones químicas. Para ellos es muy útil tener unidades operativas, donde se clasifique los cuerpos según su calidad química. Estas prácticas ayudan a mejorar la relación estéril mineral y, además, permiten tener un control más exacto de la calidad que se entrega desde cantera.

Este trabajo se realiza en manera conjunta con el equipo de mina, ya que además de la geología, otros factores afectan las mezclas como la distancia de los puntos de carga al alimentador de trituración, la habilidad de los operarios en los equipos de carguío, la condición de los frentes volados y caminos, entre otros. Estos factores pueden estar controlados y medidos de manera de tener predicciones muy acertadas del material que ingresa, permitiendo hacer correcciones e identificando variaciones con suficiente tiempo.

La cantidad de frentes mezclados, dependerá de los equipos disponibles. Hay que tener en cuenta que la mezcla se logra en la trituración, por lo que los camiones deben descargar de forma intercalada. De esta forma los conos formados para cada granulometría tendrán una calidad promedio. Estas mezclas, pueden controlarse con distinta frecuencia, siendo lo ideal en forma diaria.



## CAPÍTULO 10: ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

### 10.1 Aspectos ambientales

La escala de producción actual comprende desde explotaciones artesanales hasta el llevado a cabo por grandes empresas, registrándose picos en determinados años de elevada producción y otros de marcadas caídas. Es una actividad que impacta en el aire por los elevados niveles de partículas de polvo y combustibles sólidos dispersos por el viento, nubes de polvo y gases emitidos por los hornos donde la población está expuesta a respirarlos (Sánchez 2012). La figura 70 resalta los puntos de contaminación para el proceso de producción de cal.

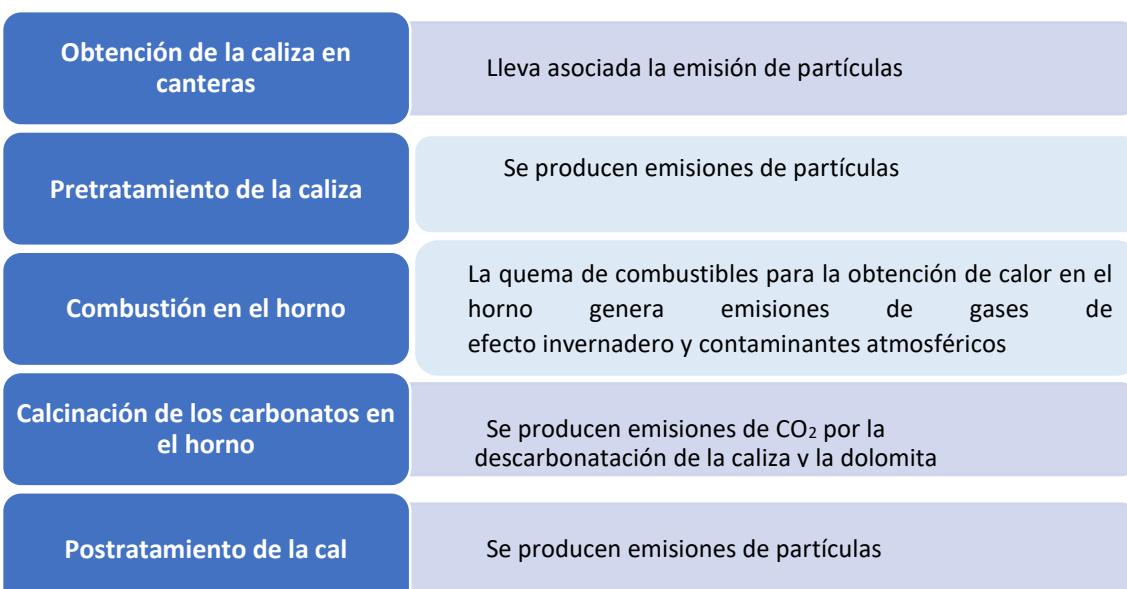


Figura 70. Los puntos de contaminación para el proceso de producción de cal en cada proceso.

Existen diferentes nomenclaturas, que abarca a todas las actividades con generación de contaminantes. Entre las más reconocidas están la Nomenclatura del acrónimo inglés de *Selected Nomenclature for Air Pollution*, que fue desarrollada en el proyecto EMEP/EEA (Guía Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos). Esta nomenclatura se ajustó a las categorías de las fuentes de actividades emisoras de IPCC/OCDE (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).

La figura 71 muestra un diagrama con las fuertes emisiones en la fabricación de cal.

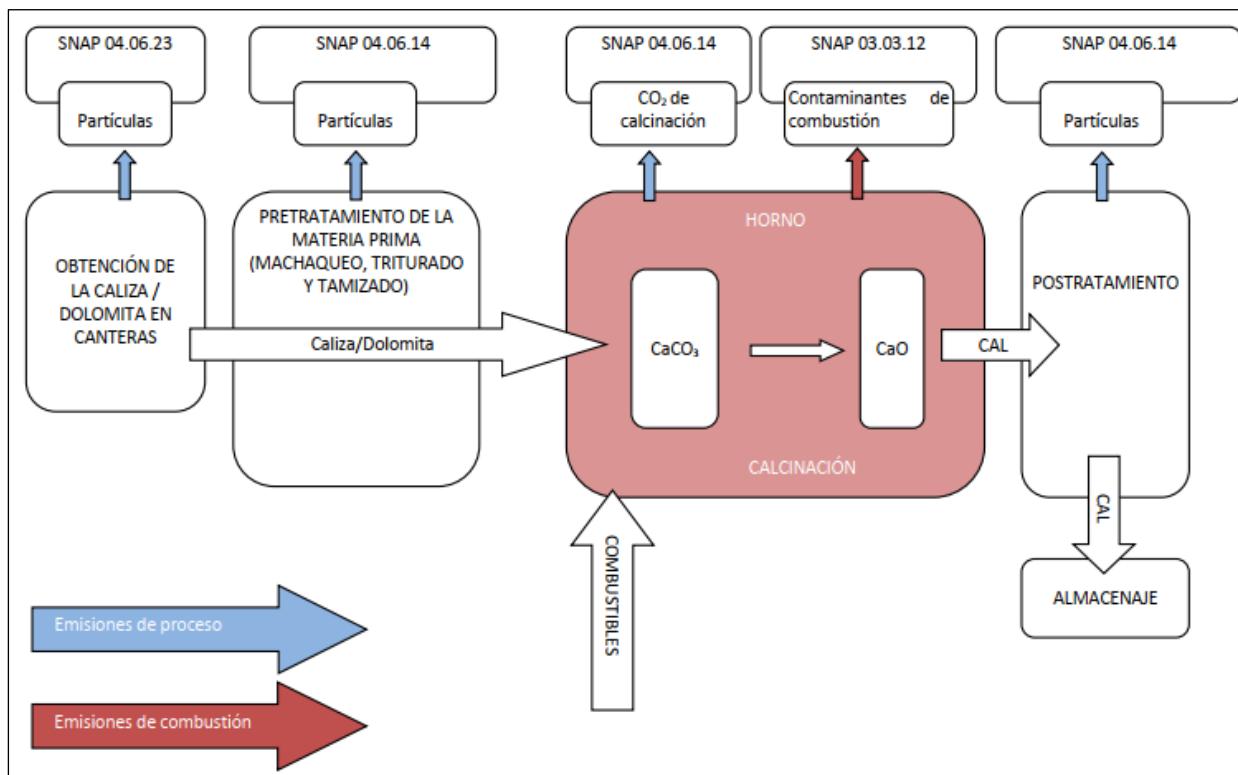


Figura 71. Diagrama con las fuentes de emisión en la fabricación de cal. Tomado de Informe de fabricación de cal (emisiones de proceso) en <https://www.miteco.gob.es/>.

La actividad está incluida dentro de diferentes nomenclaturas para actividades con generación de contaminantes y gases de efecto invernadero (Cuadro 7).

Cuadro 7: Nomenclaturas para la actividad de fabricación de cal como generador de contaminantes y gases de efecto invernadero

FABRICACIÓN DE CAL (EMISIONES DE PROCESO)	04.06.14	Actividad SNAP	Selected Nomenclature for Air Pollution
	2A2	Actividad CRF	Common Reporting Format
	2A2	Actividad NFR	Nomenclature for Reporting

Las emisiones de una planta de obtención de cal se pueden estimar mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Emisiones de CO}_2(\text{kt}) = (Mc * FEI) / 1000$$

Donde  $Mc$  = Masa de cal producida (t) y  $FEI$  = Factor de emisión隐含 (t CO<sub>2</sub>/t cal)

DATOS DE LA PLANTA A (ejemplo) Producción de cal: 150.000 t

$$\text{Emisiones de CO}_2(\text{kt}) = (150.000 * 0,717) / 1000$$

$$\text{Emisiones de CO}_2(\text{kt}) = 107,55 \text{ kt CO}_2$$

## 10.2. Seguridad e higiene

Durante la producción de cal, existen diferentes aspectos de seguridad e higiene que afectan en mayor o menor medida según el tamaño de las empresas relacionados a las actividades de cantera y a actividades propias de los procesos.

- ⊕ **En cantera las malas prácticas generan condiciones inseguras.**

Una situación frecuente es en algunas regiones donde hacen las voladuras por destace, en yacimientos bien estratificados. Al realizar destaces, siguiendo estos planos, se producen zonas de peligro cuando la estratificación es subvertical, generando frentes de gran altura mayores a 10 metros y posibilidad de derrumbes. El principal peligro es el derrumbe de material sobre equipos o personal que se encuentre en niveles inferiores. Esto se puede ver incrementado por condiciones de lluvias o asociados a los terremotos que hay en la región. Por esto, y las problemáticas que se generan para realizar voladuras y carguños, lo correcto es no tener este tipo de frentes. Por lo tanto, se espera la corrección de los frentes a partir del cambio de metodología, generando bancos y siguiendo un plan de estabilización de taludes. Si no se puede hacer la corrección, es necesario inhabilitar los accesos a la zona por peligro de derrumbe.

Las actividades para estabilidad de taludes, son prácticas que en general aplican las empresas grandes. Desde la primera etapa (perforación) se realizan actividades tendientes a garantizar la estabilidad. La calidad de los macizos rocoso no requiere intensos saneos post voladuras. Se debe realizar limpieza de bermas, para aumentar la capacidad de retención de caída de rocas.

El precorte tiene por finalidad generar una línea de debilidad por detrás de la voladura de producción buscando la formación de una pared de banco más estable sin caída de rocas y generar el límite de penetración del equipo de carguío (Fig.72). Consiste en perforar una línea de barrenos con espaciamiento reducido, entre 1 - 1.2 metros y en ángulo, que determinará la forma del talud a nivel de banco. Estos barrenos llevarán una carga lineal muy liviana y detonara de forma simultánea para facilitar el efecto de corte entre ellos.

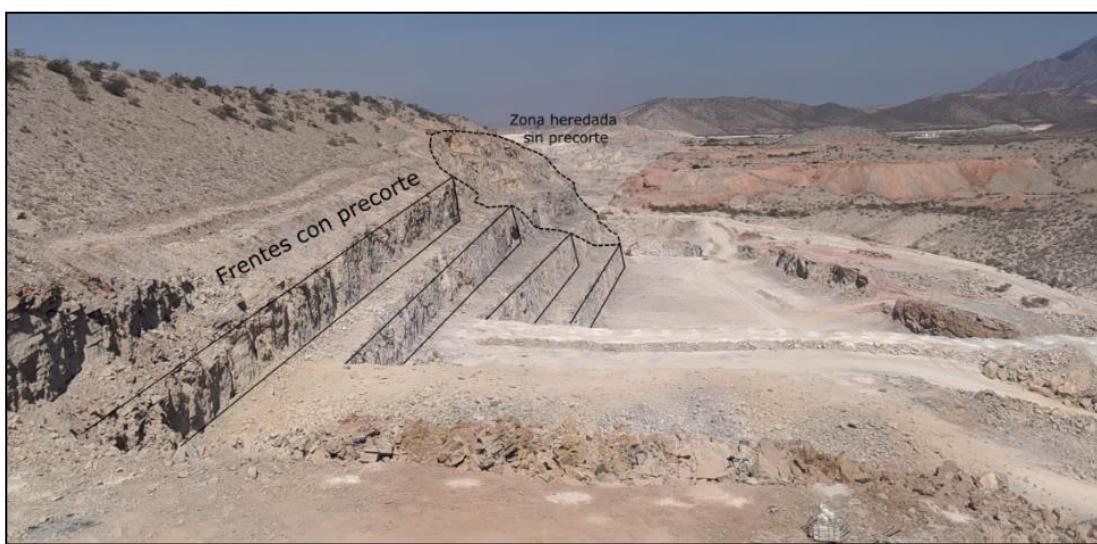


Figura 72. Frentes con precorte en cantera de caliza en la zona de La Laja, San Juan.

⊕ **En el proceso de trituración, calcinación y posteriores**, los aspectos de seguridad están vinculadas a las condiciones propias de los diferentes equipos. Por lo que es necesario una correcta gestión de seguridad a partir de *Análisis de trabajo seguro (ATS)* y confiabilidad de equipos.

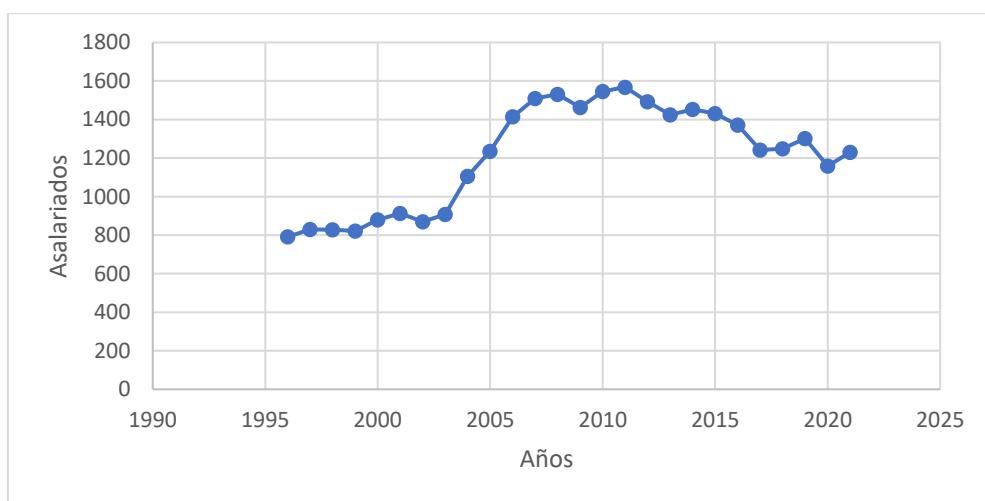
La tarea del geólogo es mejorar estas condiciones, en cantera haciendo un correcto control de la operación de mina, y en el proceso ayudando a mantener las calidades. Por ejemplo, incorporar caliza con porcentajes altos de materia orgánica, puede generar mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que perturbe los sensores de los equipos, y aumente la cantidad de gases nocivos para la salud. De igual manera ocurre con la generación de material particulado, donde un aumento de SiO<sub>2</sub> en roca, puede aumentar la generación de estas partículas en el proceso, exponiendo al personal a condiciones de silicosis. La minería se desarrolla principalmente a cielo abierto, sin embargo, pensar en minería subterránea a futuro para estos recursos se empieza a considerar una ventaja al no liberar gases o material particulado de manera directa a la atmósfera.

## CAPÍTULO 11: LICENCIA SOCIAL Y LA RELACIÓN CON LAS COMUNIDADES

La cercanía y dimensiones de las canteras y plantas a los centros urbanos, hace que la licencia social sea un tema sumamente importante, ya que tiene un impacto visual y ambiental muy directo. Esta es una de las causas por las cuales las compañías deben expandir y modernizar sus operaciones. Cuando el área con mineral se encuentra en áreas urbanas o zonas con prohibiciones por legislación se habla de “Esterilización de recursos”. Es esta la razón por la que hay que hacer una explotación óptima y sustentable de los recursos.

Algunas de las preocupaciones públicas respecto a este tipo de minería son el polvillo, el ruido, las vibraciones por voladuras y el intenso tráfico asociado a las operaciones de cantera. También este tipo de rocas tiene asociado acuíferos que se generan por disolución, esto genera preocupación por la posibilidad de contaminación del agua por parte de las operaciones en cantera (Bliss *et al.* 2008).

La mano de obra es otro impacto de esta industria en la región de San Juan (Fig. 73). Un antecedente ilustrativo de la importancia regional de la industria calera sanjuanina es el aportado por el Distrito Los Berros - Divisadero (Dpto. Sarmiento), región donde aún en los momentos de máxima paralización del país en el período 1999 - 2001 existió plena ocupación y, en determinados meses, donde hubo mayor demanda de mano de obra que la disponible. Así se generó el problema inédito de la falta de capacidad del núcleo urbano para absorber los nuevos grupos familiares que buscaban radicarse en el lugar.



**Figura 73. Gráfico evolución de la población asalariada en la provincia de San Juan, vinculada a la explotación de yacimientos de calizas y producción de cal (Tomado del boletín trimestral de empleo registrado por provincia en [www.trabajo.gob.ar](http://www.trabajo.gob.ar)).**

## CAPÍTULO 12: ASPECTOS ECONÓMICOS

### 12.1. Introducción

Las rocas carbonáticas se encuentran entre las sustancias minerales con mayor cantidad y diversidad de usos, siendo utilizadas tanto de forma natural, como los carbonatos, o como los óxidos de calcio y magnesio obtenidos a partir de calcinación. Su utilización volumétricamente más importante es la fabricación de cales (construcción e industriales) y de cemento. Es el componente básico de otras industrias como se observa en la figura 74 y el Cuadro 8 ( Usos y Aplicaciones de la Cal - Caleras San Juan).

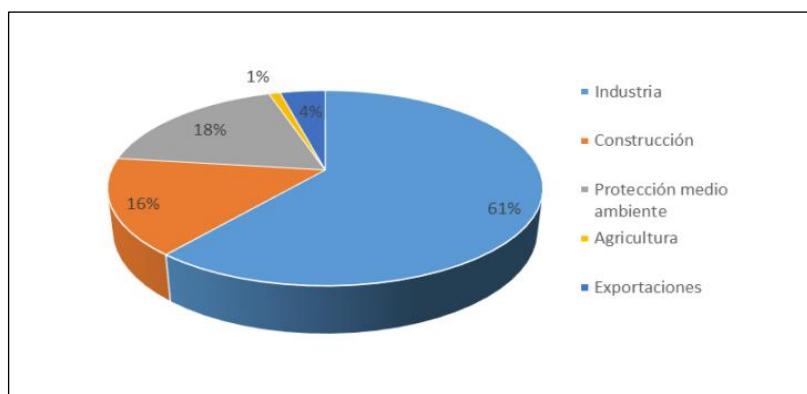


Figura 74. Usos de la cal a nivel mundial. Fuente: Asoc. Nacional de Fabricante de cal y derivados de España.

Cuadro 8. Las distintas industrias y sus usos.

CONSTRUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"><li>Aglomerante, para todo tipo de revoques, mamposterías y contra piso</li></ul>
SIDERURGIA	<ul style="list-style-type: none"><li>Escorificante en el proceso de fabricación del hierro y el acero.</li><li>En los procesos de desulfuración para aceros de alta calidad.</li><li>Para incrementar la vida útil del revestimiento refractario.</li><li>En tratamientos de efluentes.</li></ul>
MINERÍA	<ul style="list-style-type: none"><li>Como depresor y basificante en la flotación de minerales de Cu, Zn, Pb y Ni.</li><li>Regulador de pH en la extracción del Au y Ag en lixiviaciones con cianuro.</li><li>Tratamientos de efluentes.</li><li>Litio: para precipitar el Mg</li></ul>
QUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"><li>Fábrica Carbonato Calcio Precipitado (CCP).</li><li>Fabricación de conservantes de alimentos.</li><li>Procesos de control del pH.</li><li>En la obtención de calcio para varios usos.</li><li>Producción de carburo de calcio.</li><li>Fabricación de álcalis de sodio.</li><li>Tratamientos de efluentes.</li></ul>
PETRÓLEO	<ul style="list-style-type: none"><li>Fabricación de grasas lubricantes con base de cal.</li></ul>
POTABILIZACIÓN DE AGUA	<ul style="list-style-type: none"><li>Regulación de alcalinidad.</li></ul>
AGRICULTURA	<ul style="list-style-type: none"><li>Como regulador de pH y aporte de nutrientes básicos, Ca y Mg</li></ul>
PINTURA	<ul style="list-style-type: none"><li>Como carga en pinturas de agua.</li></ul>
REFRACTARIOS	<ul style="list-style-type: none"><li>En la fabricación de ladrillos de magnesita.</li></ul>

Nuevas metodologías de control mineral en la explotación de yacimientos de calizas y su impacto desde la extracción hasta el producto final. Aplicación a la producción de cal en la provincia de San Juan.

Es un producto mineral no metalífero de demanda creciente debido a su bajo precio y que no posee sustitutos. En los países industrializados, el consumo per cápita es de aproximadamente 80kg/año (Peluc y Gonzalez Aubone 2018).

Las especificaciones de uso varían ampliamente según el destino (Cuadro 9).

**Cuadro 9. Usos según especificaciones técnicas del material. Tomado de Gozalvez *et al.* (2004).**

USO	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
Siderurgia, industria del vidrio, fabricación de cales industriales de alta pureza (industria química, siderúrgica, papelera y azucarera)	Las especificaciones son elevados porcentaje de CaCO <sub>3</sub> con bajo contenido de Mg y silicatos (en siderurgia muy bajo S y P)
Cemento	Ausencia de dolomita. La presencia de óxidos de Fe y Al es necesaria y pueden provenir de impureza naturales o por agregados de otras rocas
Usos específicos en la industria metalúrgica, del vidrio y en materiales refractarios	Altos contenidos en magnesio
Granulados, carga, rellenos, agricultura	Propiedades físico- mecánicas (color, tenacidad, resistencia a la compresión y flexión)
Molienda y micronizado (utilización en papel, pinturas, plásticos)	Alto grado de blancura, pureza química, otros

## 12.2. Mercado mundial

### 12.2.1. Producción

#### ❖ Europa

Alemania es el primer productor (32% de Europa). Siendo la actual mina más importante Flandersbach en Wuelfrath. En la región mediterránea principalmente España Italia y Francia representan el 33 % de la producción total de cal en la Unión Europea.

#### ❖ Asia

China es el principal productor de calizas a escala mundial. Las provincias productoras se encuentran en el este y centro del país: Jilin, Zhejiang, Anhui, Jiangxi, Shaanxi, Gansu, Qinghai y Ningxia. Esta última posee calizas de alta calidad, con usos para la industria del cemento, metalurgia y química (<http://spanish.china.org.cn>).

Rusia también resulta uno de los grandes productores de caliza. Siendo la mina más importante Mazulsky en Goryachegorsk massif, Siberia oriental.

India es el tercero productor de calizas a nivel mundial. Su destino principal es para la industria del cemento por la calidad de sus calizas. Rajasthan es el principal estado productor representando (21%) de la producción total de caliza

En Irán afloran secuencias de rocas carbonáticas de gran espesor y diversas edades. Se destacan la Caliza Badamu, de edad taoriana a bajociana y la caliza Bisotun. La caliza Orbitolina del Cretácico medio, se extiende a lo largo de todo el territorio iraní. La caliza Chehel Kaman, del Paleoceno tardío, afloran al noroeste de Irán. Hay otras megasecuencias de importancia distribuidas por el país ([www.gsi.ir](http://www.gsi.ir)).

❖ América del Norte

En Canadá se encuentra distribuida la producción de calizas en el este del país, en las provincias de Nueva Brunswick, Quebec, Ontario y Manitoba. También es importante la producción en la región centro oeste.

En Estados Unidos la zona productiva está en el noreste y en el este del país. En Missouri, los depósitos de calizas son de edad ordovícica, devónica y carbonífera, tienen alto contenido en  $\text{CaCO}_3$  y gran espesor. En centro de Kentucky, corresponden a calizas ordovícicas, y constituyen importantes reservas que se explotan en forma subterránea. Las otras reservas de interés se encuentran en la región de Texas y sur del estado de Nevada (Preston Macgrain 2001). A principios del siglo XX, más del 80% de la cal consumida en Estados Unidos se destinaba a usos de construcción, pero actualmente más del 90% se consume para usos químicos e industriales. (U.S.G S. Mineral Commodity Sumaries 2022).

México tiene importantes reservas de calizas distribuidas a lo largo del territorio. La región norte (Coahuila, San Luis Potosí y Nuevo León), representa aproximadamente el 24% de la producción nacional. Seguido por la región sureste (Quintana Roo, Tabasco y Oaxaca) con el 20% de la misma. ([www.economia.gob.mx](http://www.economia.gob.mx)).

❖ América del Sur

Brasil es el principal productor de la región manteniendo una producción de 8.100.000 t/anuales. (U.S.G S. Mineral Commodity Sumaries 2022). Los estados principales productores son: Paraná donde se concentra 24.0% de la producción nacional, seguida por Mato Grosso (19,2%), Minas Gerais (14,0%), Goiás (11,0%), São Paulo (10,6%) y Rio Grande do Sul (8,9%). Las reservas de caliza son abundantes para abastecer el mercado interno, a pesar de los altos niveles de consumo en la industria del cemento, cal y correctivos de suelos. La mayor parte corresponde a rocas de edad proterozoica media a superior con bajo grado de metamorfismo. Las demás formaciones son de edades Paleozoicas inferior, Terciario y Cuaternario.

Chile cuenta con 29 depósitos de calizas, de los cuales 21 están en explotación. Los depósitos de caliza se encuentran distribuidos en las regiones I – XIII, el 53% de estos se destinan a la producción de cal y los restantes a la manufactura de cemento. En la Cordillera de la Costa, en la Región III afloran las calizas de mayor interés, pertenecientes al Grupo Chañarcito de edad jurásico-cretácea.

Uruguay posee importantes yacimientos de calizas sedimentarias y metamórficas en Lavalleja, Paysandú y Maldonado. Con principal destino en la industria cementera. La principal unidad que se explota es Formación Calabozo, de edad precámbrica, constituida por calizas grises masivas con leyes superiores al 93% (Poire et al. 2005).

Con respecto a la República Argentina ya se han descripto en el Capítulo 5.

La figura 75 muestra la creciente producción de cal a nivel mundial, con un salto importante en el año 2000.

Es difícil la recopilación a nivel mundial, ya que existen diferentes categorizaciones como mineral no metalífero o como rocas de aplicación. Como referencia en 2022, los mayores productores de cal han sido China, Estados Unidos, India, Rusia y Brasil (Cuadro 10).



**Figura 75. Evolución de la producción mundial de cal. Tomado de U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2021).**

**Cuadro 10. Producción Mundial de cal 2019-2021 en miles de t. Tomado de U.S.G S. Mineral Commodity Sumaries (2022).**

País	2019	2020	2021
China	310000	300000	310000
Estados Unidos	16900	16000	17000
India	16000	16000	15000
Rusia	11000	11000	11000
Brasil	8100	8100	8100
Japón	7320	7300	7000
Alemania	7100	7100	7100
Rep. de Corea	5200	5100	5200
Turquía	4600	4600	4700
Irán	3450	3300	3600
Italia	3500	3500	3500
Francia	2600	2600	2600
Ucrania	2250	2200	2300
Australia	2000	2000	2000
Canadá	1710	1700	2000
España	1800	1800	1800
Polonia	1700	1680	1700
Bélgica	1560	1500	1500
Malasia	1600	1480	1500
Reino Unido	1500	1500	1500
Rumania	1960	1280	1500
Bulgaria	1460	1500	1400
Eslovenia	1190	1100	1200
Sudáfrica	1300	1300	1200

### 12.2.2. Exportaciones

En 2020 los principales exportadores de la piedra caliza utilizada en la fabricación de cal o cemento fueron Emiratos Árabes Unidos, Vietnam, Japón, Omán y Malasia (Fig.76).

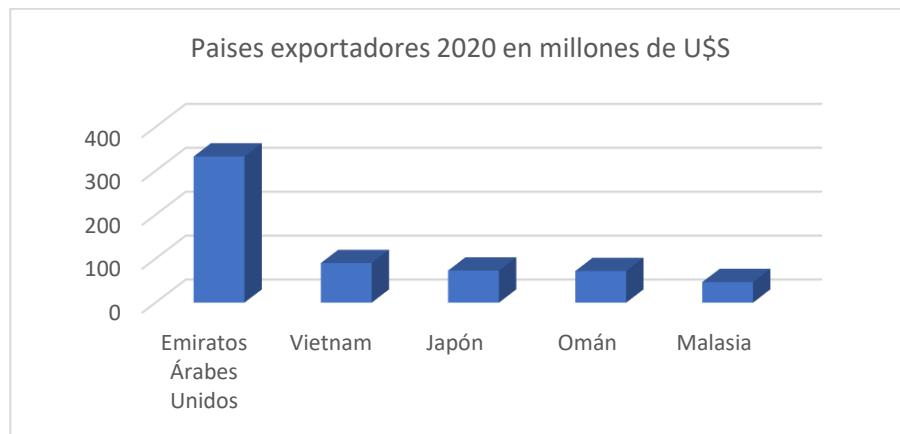


Figura 76. Países exportadores 2020. Modificado de La piedra caliza; piedra caliza utilizada en la fabricación de cal o cemento | OEC - *The Observatory of Economic Complexity*.

### 12.2.3. Importaciones

En 2020 los principales importadores de piedra caliza; piedra caliza utilizada en la fabricación de cal o cemento fueron India, Corea del Sur, Bangladesh, China y Kuwait (Fig.77).

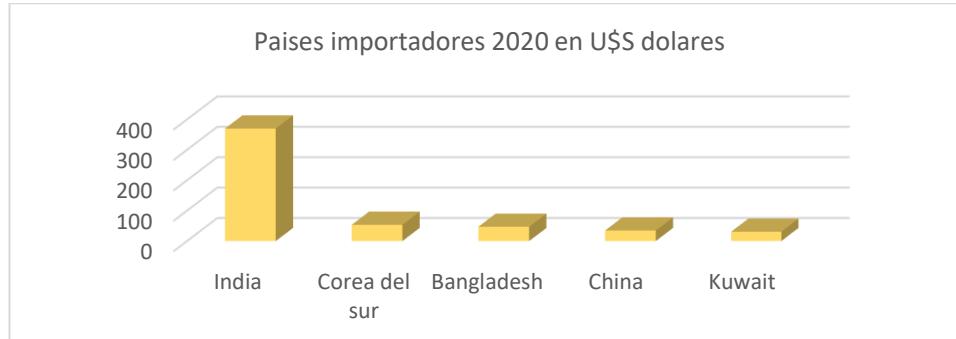


Figura 77. Países importadores 2020. Modificado de La piedra caliza; piedra caliza utilizada en la fabricación de cal o cemento | OEC - *The Observatory of Economic Complexity*.

## 12.3 Potencial minero de calizas en la República Argentina

La figura 78 muestra la producción de calizas en República Argentina para el período 2009-2019 por provincias.

Con respecto a la producción de cal, las provincias que lideran en la República Argentina son las provincias de San Juan, Buenos Aires y Córdoba que presentan comportamientos diferentes respecto de la cantidad de recursos extraídos y la calidad de los mismos.

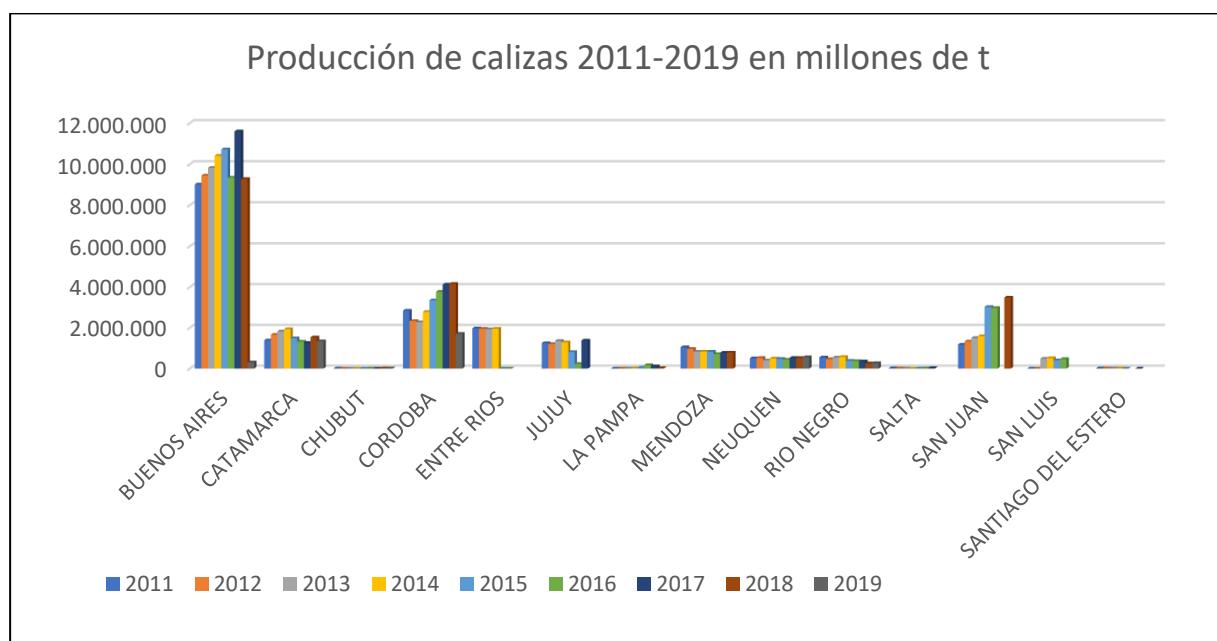


Figura 78. Producción en Argentina para el periodo 2009-2019 (Tomado de [https://informacionminera.produccion.gob.ar/sifim\\_produccion.html](https://informacionminera.produccion.gob.ar/sifim_produccion.html)).

## 12.4. La industria de la cal en provincia de San Juan

### 12.4.1. Introducción

En la provincia de San Juan, en particular, cuenta con una gran variedad de recursos minerales. La distribución de los recursos mineros se divide en 3 regiones: Occidental, Central y Oriental.

La zona central concentra importantes yacimientos de minerales industriales y rocas de aplicación. Las calizas y dolomías representan los recursos más abundantes de la provincia, donde su explotación constituye la principal actividad extractiva no metalífera (Fig.79).



Figura 79. Minerales industriales y rocas de aplicación de la provincia de San Juan. Tomado de Ministerio de Minería San Juan <http://serviciosmineria.sanjuan.gob.ar/recursos/recursos.php>.

La evolución de producción de calizas en provincia de San Juan, muestra una tendencia alcista, hasta 2018. No se cuenta con los datos para el 2017 y 2019. Es predecible esperar una merma para el 2020 relacionado con la pandemia COVID 19. La producción de calizas en la provincia de San Juan para el periodo 2010-2020 se observa en la figura 80.



Figura 80. Producción de calizas en la provincia de San Juan en el periodo de 2010-2020 (Tomado de [https://informacionminera.produccion.gob.ar/sifim\\_produccion.html](https://informacionminera.produccion.gob.ar/sifim_produccion.html))

Actualmente, la industria de la cal y los derivados de la piedra caliza, están demostrando la urgencia de promover su expansión sostenida, pues esta actividad en cierto modo constituye la base de las demás. En ese sentido, si bien las reservas de materiales calcáreos para la elaboración de cemento abundan en el territorio nacional, no ocurre lo mismo con las de aquellos materiales destinados a la producción de cales, situación que convierte a las canteras de la Precordillera sanjuanina en “privilegiadas”, teniendo en cuenta las altas concentraciones de carbonato de calcio presentes en los materiales de la formaciones geológicas principalmente Formación la Silla, variables entre el 90 y el 99% (Raviolo 2006).

Una de las áreas con mayor desarrollo calero se corresponde con el sector oriental y austral de Precordillera de las provincias de La Rioja, San Juan y Mendoza, caracterizado por calizas cambro-ordovícicas de alta ley mineral, por lo cual manifiesta allí gran desarrollo calero.

Los centros de producción principales se encuentran en la localidad de Jáchal (Cantera el Refugio) 155km al norte de la capital de la provincia, departamento de Albardón (localidades de Villicum y La Laja) a 45km también al norte, departamento de Rivadavia (Canteras Loma Negra y EM Andina) a unos 15km al oeste y departamento de Sarmiento (Los Berros y Cieneguita) 90 km al sur. Los asentamientos relacionados con la actividad son Los Berros y Cieneguita, Divisadero y Pedernal son sitios donde muchos de sus habitantes son trabajadores caleros; mientras que Cañada Honda y Retamito están hacia el este en correspondencia con las estaciones ferroviarias que realizan el traslado a granel del calcáreo.

El mercado de la cal abarca dos grandes rubros: cal para construcción y cal para uso industrial.

Se pueden citar las cales destinadas a plantas de procesos de minerales, como serían los requerimientos de los yacimientos de: Pelambres (Chile), Pachón, Azules, Casposo, Gualcamayo y Veladero (San Juan, Argentina) y las cales industriales demandadas por las refinerías de azúcar, curtidores, empleadas como materias primas en el tratamiento de aguas (potabilización y purificación de efluentes), en

la elaboración de determinados productos químicos a base de cal o para uso químico en diferentes procesos, con demanda específica tanto de cales cárnicas como dolomíticas (Herrmann y Menoyo 2000).

Los volúmenes de cales que podrían llegar a ser requeridos en relación con la futura demanda de los emprendimientos mencionados del orden de las diez mil toneladas mensuales- dejan al descubierto una realidad insoslayable que, sumada a la reactivación de la industria de la construcción en el país, obligará a incrementar exponencialmente la elaboración de cales en los diferentes distritos de la provincia de San Juan. Esto último conduce a potenciar la relevancia que asumen las llamadas “áreas vírgenes”, donde se registra la disponibilidad de significativas reservas de caliza cuya composición química resulta apropiada para la elaboración de cales, en el rango de calidades demandadas por el mercado nacional e internacional (Sánchez 2012).

El incremento de la demanda de cales, tanto del mercado nacional como internacional, crea interesantes expectativas para el distrito calero de Los Berros. Enormes volúmenes físicos de excelentes calizas cárnicas y dolomíticas, sumadas a una ubicación estratégica y a una infraestructura que garantiza la totalidad de los servicios, generó interés entre los empresarios que impulsaron nuevas e interesantes inversiones, particularmente en hornos de alta tecnología.

#### 12.4.1.1. La importancia del transporte ferroviario

Actualmente se utilizan algunos servicios ferroviarios para Buenos Aires donde se transporta material a siderurgia principalmente. También a Mendoza a partir de donde, en camiones la carga es transportada hasta Chile por el Paso de los Libertadores. Este paso exhibe como problema recurrente las intensas nevadas, que inhabilitan el paso al menos durante 50 días en el año, circunstancia que conlleva las pérdidas de grandes sumas de dinero. La reapertura del Ferrocarril Trasandino Central (FCTC), podría aliviar el tránsito de miles de camiones por las carreteras y la posibilidad de transportar tonelajes importantes a distancias. Además de producir menos contaminación, no congestionar el tránsito y reducción de tasa de accidentes (Sánchez 2012). Otro motivo por el cual el transporte ferroviario puede favorecer el transporte son los períodos con problemas de despacho en camiones por paros, y protestas, teniendo los accesos provinciales o nacionales cortados grandes

#### 12.4.1.2. Incidencia de los aluviones sobre la producción calera

Las precipitaciones registradas durante los primeros meses de cada año se traducen en consecuencias negativas para el Departamento de Sarmiento. Se registra precipitaciones de caída durante una noche de hasta 84,5mm, que corresponden a más del 50% de los valores medios anuales en el año 2013. Estas precipitaciones torrenciales, produjeron severos daños en la infraestructura vial y ferroviaria de la zona.

Este comportamiento atípico de los niveles de precipitación y su naturaleza episódica vienen provocando graves afectaciones a todo el distrito. Por un lado, las autoridades municipales deben construir defensas apropiadas para poder reencausar las aguas de escurrimiento y avanzar hacia la recuperación del sistema a de riego en la zona (Sánchez 2012). Estos fenómenos se siguen viendo aún en la actualidad, con evidencia geomorfológica en los principales cursos de agua (Terrazas modernas, zonas de inundación, acumulación de flujos detríticos entre otros).

A estas condiciones climáticas se suman el estado de sectores de las rutas y caminos de acceso utilizados en el Distrito. El intenso tránsito de camiones genera deformaciones en el asfalto (grietas, baches), los cuales se amplifican con el agua y condiciones de inundación.

#### 12.4.1.3. Incidencia del suministro de energía

Los modernos medios de calcinación, en su mayoría de doble cuba y en condiciones de recuperar un producto con alto valor agregado, como es el caso concreto del "carbonato de calcio precipitado", estaban destinados a operar utilizando como combustible gas natural el cual garantizaba la producción de cales de alta reactividad exigidas por la industria química y, en buena medida, en los procesos de recuperación de metales (particularmente cobre y metales nobles). Con ese objetivo fue desarrollado un desvío desde el gasoducto que vinculaba la provincia de Mendoza con San Juan.

Por la crisis energética en el período 2006/2007, muchas empresas tras practicar fuertes inversiones en la construcción de hornos de alta tecnología alimentados con gas) debieron reconvertir sus instalaciones frente a las restricciones en la disponibilidad de este combustible. El "coque residual de petróleo" proveniente de la destilería de Luján de Cuyo comenzó a ser entregado por cupos a las empresas bien organizadas.

Las limitaciones a inicios del 2010 en el suministro de gas provocaron el cierre de una decena de hornos de cuba simple en la zona y el hecho de disponer de un cupo de combustible sólido, favoreciendo una actividad "marginal": con la utilización de hornos artesanales (Sánchez 2012).

Estos hornos funcionan a partir de la piedra caliza, que proviene de canteras de terceros, la cual se reduce al tamaño apropiado en forma manual. Tanto el material como el combustible (cedido por las empresas que disponen de cupo), se incorporan desde la parte superior del horno. Dichas empresas adquieren la cal producida procediendo a su comercialización por los canales convencionales. Por lo general, esta actividad artesanal se practica al margen de las disposiciones vigentes sobre polvorines, uso y manejo de explosivos; obviando normativas elementales desde el punto de vista de la seguridad del personal (elementos de seguridad, A.R.T., etcétera). Cabe consignar, por otra parte, que las tareas de transporte se realizan en vehículos obsoletos sin encarpado de modo que contaminan el ambiente, polvo de cal, coque y fracciones menudas de piedra caliza.

No disponer de gas como combustible durante un período del año, expuso a las empresas a problemas para generar cales industriales de gran calidad, que en su mayor parte se exportan a Chile.

Estas restricciones y problemáticas continúan en la actualidad, combinando el uso de gas como combustible, principalmente en verano y luego en invierno, debido al aumento de consumo de ese combustible en general por la población, se hace un cambio a *pet coque*, para compensar estas deficiencias. Esta adaptación dual de combustible permitió los últimos años avanzar con la construcción de nuevos hornos de alta tecnología Maerz.

Sin embargo, aún las cañerías de gas no disponen de la sección necesaria para asegurar distribución en tiempo y forma a los establecimientos existentes a la fecha.

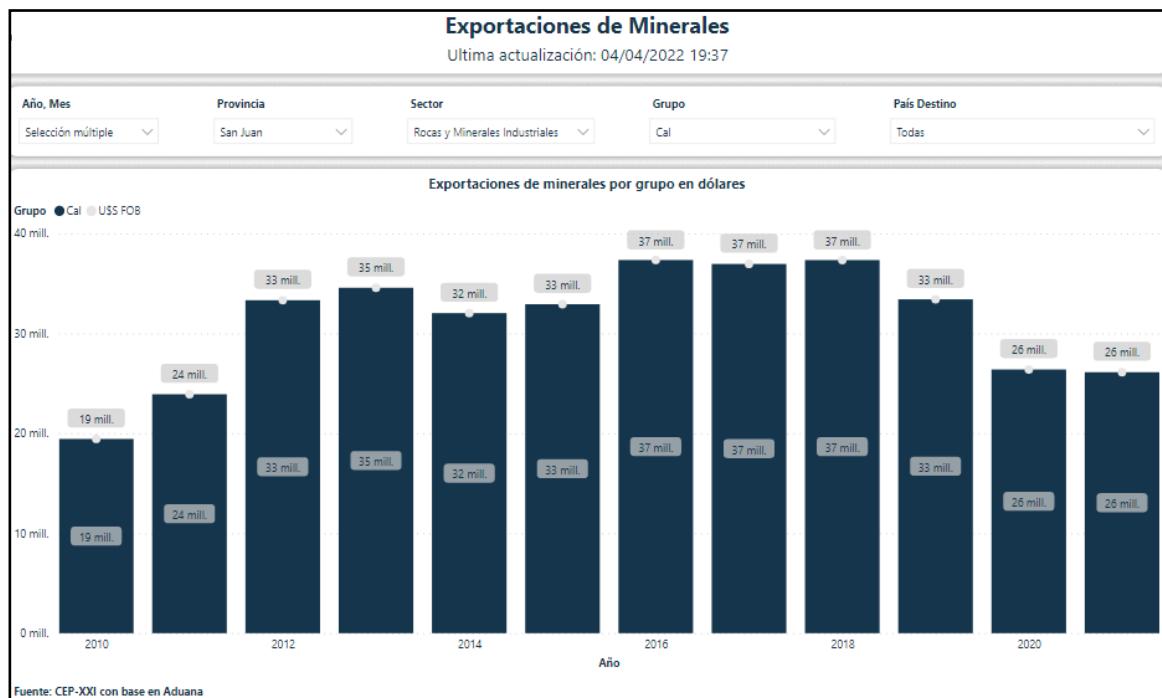
## 12.4. 2. Mercado

En 2020 el sector calero en la provincia de San Juan, cerró con una producción estimada de 1,2 millones de toneladas y se estimó que el año 2021 produjo 300.000 toneladas más, es decir, alcanzó los 1,5 millones de toneladas.

Actualmente las expectativas que genera la puesta en marcha de nuevos proyectos metalíferos nacionales, la sostenida demanda de cales para la industria siderúrgica y los requerimientos cada vez mayores de la minería del litio en Chile y Argentina, alientan un mejor escenario para la industria argentina de la cal. Si bien la exportación a países vecinos ha mostrado una importante incidencia (aproximadamente el 30%), la ocurrencia de minería metalífera en el país, prevé una mayor demanda y establece las principales pautas económicas de esta actividad primaria.

Por esto las caleras que lideran el mercado se están preparando para tal aumento de la demanda local sumado a las exportaciones. Es en consecuencia lógico prever que con la demanda que se plantea si se supera el grave problema de la provisión de combustibles, el valor de la producción calera tradicional industria sanjuanina. El valor de la exportación de cales en la provincia de San Juan es un dato que adquiere relevancia 26.120.000 U\$S FOB frente a la exportación de vinos en 19.537.000 U\$S FOB para el 2021 (Tomado del informe anual de exportaciones 2021 en argentina.gob.ar).

Las estadísticas de exportaciones muestran un comportamiento creciente entre 2015 y 2018, con un ligero descenso en 2019 y una marcada caída en el 2020 y en el 2021 relacionado con la pandemia COVID 19 como se observa en la figura 81 (Microsoft Power BI – Exportaciones mineras del Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina).



**Figura 81: Exportaciones de cal periodo 2010-2021 en precios FOB. Tomado de Microsoft Power BI – Exportaciones mineras del Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina**

El 95% de las exportaciones de cal sanjuanina son exportadas por año por 3 empresas, principalmente a Chile, mientras que el resto va a Uruguay como se observa en la figura 82 ( Microsoft Power BI – Exportaciones mineras del Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina).



Figura 82: Exportaciones de cales. Se observa que Chile es claramente el principal importador y en menor escala Uruguay. Modificado de Microsoft Power BI – Exportaciones mineras del Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina.

#### 12.4.3. Empresas

Según Peluc y Gonzalez Aubone (2018) hay más de 20 empresas caleras en actividad que generan empleo a 1400-2000 trabajadores en forma directa y unos 5000 en forma indirecta. Un grupo de estas empresas actúan como líderes, dos de las cuales son extranjeras y producen el 53% de la cal sanjuanina.

Las caleras que se destacan:

- ❖ **Grupo Calidra:** capitales mexicanos, la cuarta productora de cal a nivel mundial y la primera en América Latina, adquirió en 2016 la empresa argentina Cefas y en 2019 la empresa de capitales belgas Sibelco. La producción de su planta en Sarmiento alcanza las 15.000 t/mes. Mientras que las plantas de Albardón y Sarmiento tienen capacidad de producción cercana a 60.000 ton/mes.
- ❖ **Caleras San Juan:** capitales argentinos, ubicada en Sarmiento, su capacidad de producción supera las 14.000 t/mes.
- ❖ **Compañía Minera del Pacífico:** capitales chilenos, ubicada en Jáchal, capacidad de producción de 6.000 t/mes.

Los procesos de producción sufren cambios a medida que avanza la globalización. Marcando un nuevo paradigma tecnoproductivo. Algunos de los aspectos principales son:

- ✓ Preponderancia de la tecnología de punta
- ✓ Reorganización interna del sistema de trabajo de las empresas
- ✓ Planteo de nuevas estrategias competitivas.

La modernización en el sector calero cambia las tecnologías de los hornos, introduce nuevos agentes, modificando las formas de producción, la organización de las empresas y la distribución. La más importante fue la incorporación de hornos verticales de doble cuba de grandes capacidades y de alto grado de automatización, que permite una mezcla de combustibles (sólidos y gaseosos).

#### **12.4.4. Cadenas de valor y costos**

El análisis de la cadena de valor implica asignar un valor a cada una de estas actividades, así como un costo asociado, tratando de localizar fortalezas y debilidades que puedan significar una ventaja o desventaja competitiva comparando la cadena de valor de la propia empresa con las de los competidores. El eslabonamiento y agentes productivos en el complejo industrial calera, son secuenciales en base a las relaciones técnicas de producción con la finalidad de generar bienes y servicios.

Teniendo en cuenta el proceso de calcinación como proceso motriz, se evidencia integración vertical hacia atrás en el sentido de explotación y procesamiento de la piedra caliza/dolomita, e integración vertical hacia adelante al considerar plantas de procesamiento de cal viva, cal hidratada, carbonato de calcio precipitado y su comercialización (Peluc y Gonzalez Aubone 2018). Esto se puede observar en la figura 83, donde se marca la principal incidencia de los geólogos en el proceso. Este primer eslabón va a condicionar el rendimiento de los demás eslabones.

Al analizar los costos para cada eslabón siguiendo la clasificación en costos directos en indirectos, en el primer eslabón los costos directos tienen alta relevancia, y entre ellos la mano de obra directa (MOD) y los insumos (combustible, explosivos, detonadores y aceros de perforación). Estos son sobre los que se debe ejercer controles tales como: revisar las grillas de perforación, uso adecuado de cantidad y calidad de explosivos, optimizar las horas normales de trabajo de los operadores, hacer un buen mantenimiento preventivo de equipos, etc. En fletes poco se puede mejorar ya que se terciarizan y se pagan por tonelada transportada. El rubro “combustibles y lubricantes” se puede limitar con un mantenimiento preventivo apropiado de máquinas y equipos y evitar así pérdidas del mismo que aumentan los costos y perjudican el medio ambiente.

El segundo eslabón, debe dividirse en costos para la cal producida por gas y aquella producida por carbón (Fig.84). En ambos casos se considera una relación de 1,8 t de caliza para producir 1 t de cal.

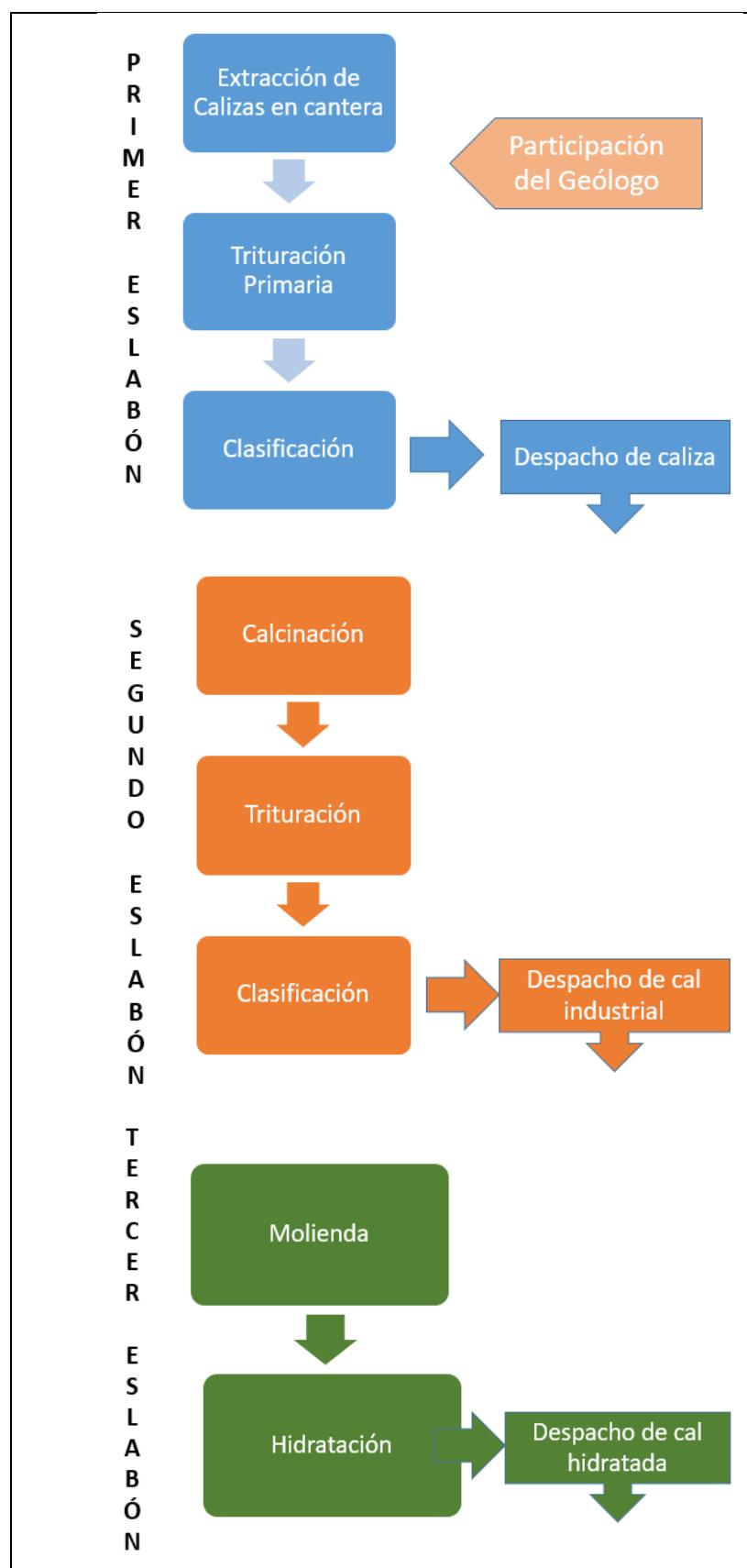
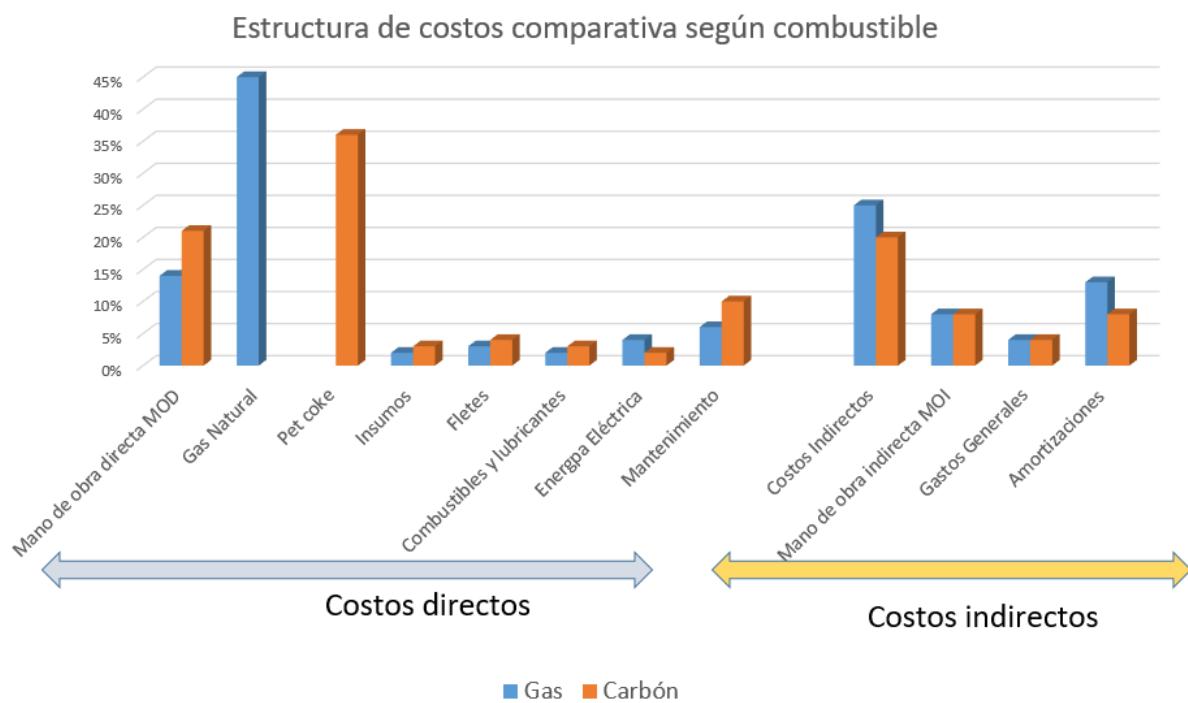
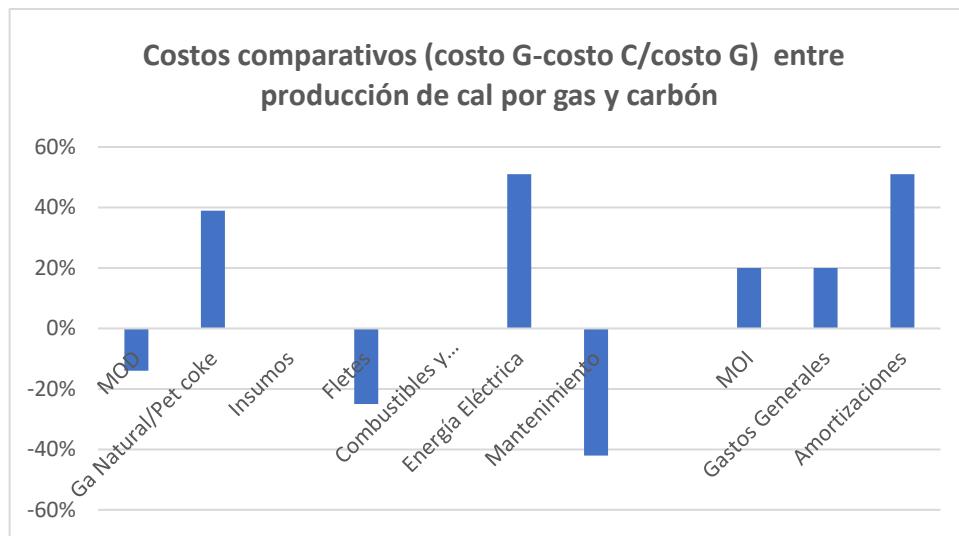


Figura 83. Etapas y cadenas de valor en la producción de cal. Modificado de Peluc y Gonzalez Aubone (2018).



**Figura 84. Comparación entre producción de cal por gas y carbón. Modificado de Peluc y González Aubone (2018).**

El valor monetario indica que 1 tonelada de cal cálcica a gas posee un costo de producción 24% mayor que 1 tonelada de cal cálcica a carbón, pero las calidades entre ambas son muy diferentes debido a las tecnologías que se usan en calcinación. La figura 85 muestra la relación a los costos con un análisis comparativo entre ambas producciones (diferencia de costos/t a valores monetarios expresados en diferencias porcentuales, tomando como valor base la producción a gas). La cal de gas es de mayor calidad, en términos de reactividad química y estabilidad.



**Figura 85. Costos comparativos (costo G-costo C/costo G) entre producción de cal por gas y carbón. Modificado de Peluc y González Aubone (2018).**

En el cuadro 11 se explica la causa en específico de cada variable que controla el costo entre la producción de cal por carbón y gas (Peluc y Gonzalez Aubone 2018).

**Cuadro 11. Causa de variación de los costos de diferentes factores para la producción de cal por carbón y gas (Modificado de Peluc y Gonzalez Aubone 2018).**

La mano de obra	Es menor en la cal de gas, porque los hornos producen a mayor escala que en los criollos.
El combustible de calcinación	El precio del carbón es sensiblemente más barato que el del gas.
Insumos	El costo de piedra es el mismo para ambos casos.
Fletes	El costo de piedra es el mismo para ambos casos.
Energía eléctrica	Sigue el mismo criterio que la mano de obra.
Mantenimiento	Se calculan sobre un porcentaje del costo total de producción de cada cal.
MOI y gastos general	La inversión de capital que corresponde a los hornos a gas es muy superior a la de los hornos criollos
Amortizaciones	La cal a gas utiliza equipamientos con mayor consumo eléctrico que los simples ventiladores que se usan en los hornos criollos.

Estos valores se ven ajustados al utilizar hornos Maerz, que ajusta los costos de la cal disminuyendo el costo de la mano de obra directa, combustible de calcinación (gas/pet coke), fletes, energía eléctrica, mantenimiento y aumentando el costo de amortizaciones. Además, la calidad de la cal mejorará en todas sus propiedades.

El problema que atraviesan los caleros es, por un lado, el abastecimiento y los precios de combustibles (gas y carbón) y por el otro el alto costo de transporte, que condiciona el circuito comercialización-distribución, con la rentabilidad que otorgan las exportaciones. Estas formas de competencia pueden ser llevadas a cabo únicamente por las empresas líderes.

## CAPÍTULO 13: CONCLUSIONES

Las rocas carbonáticas de Argentina con interés como minerales industriales están restringidas a las calizas y mármoles. Hay una distribución relativamente uniforme en todo el territorio, donde las regiones de mayor interés por su calidad y volumen son la Precordillera, las Sierras Subandinas y Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires. La explotación de estos yacimientos tiene ya varias decenas de años para usos industriales y en menor medida como roca de aplicación.

La producción actual del país permite abastecer con productos al mercado nacional y exportar. Teniendo la provincia de San Juan el potencial para seguir siendo uno de los principales productores de rocas carbonáticas y de mejores calidades químicas.

A lo largo de la historia minera de las canteras de la provincia de San Juan, los pequeños productores dependían de la experiencia del encargado para la explotación de los cuerpos, basados en su instinto aplicándolo “a prueba y error”. Solo algunas empresas solicitaban asistencia profesional de un geólogo, interno o externo para formular modelados locales de las canteras, ya que, sin los mismos en muchos casos, existían variaciones de calidad muy alta en sus producciones, con desviaciones a los requerimientos estándar muy marcados.

Se reconoce que la exploración *brownfield* para este tipo de yacimientos de caliza es una herramienta que permite a mediano y largo plazo mantener la calidad de los recursos, al ajustar el modelo geológico a la escala adecuada para entender las variaciones de la estructura general y la posición en la columna geológica regional de zonas de calidad superior.

La explotación de rocas carbonáticas como de otros minerales industriales se caracteriza por la disposición de presupuestos más restringidos que los disponibles en la explotación y tratamiento de otros yacimientos minerales. Los volúmenes que se manejan en este mercado determinan márgenes económicos acotados que impactan en la disponibilidad de recursos económicos. Estas limitaciones dificultan la incorporación de procesos de concentración y tratamiento más eficientes posteriores a la extracción del mineral. Por lo que, a diferencia de otras industrias mineras, se tiene que lograr la mejor selección y concentración de mineral desde el mismo frente de cantera donde el manejo de mezclas y conocimiento de las calidades de la roca es fundamental.

Este trabajo contribuye con el análisis y pertinencia de nuevas herramientas metodológicas prácticas a la industria de las rocas y minerales industriales vinculada con los depósitos de calizas e industria de la cal, basadas en el control mineral. Este enfoque permite tener un manejo más eficiente en la calidad de los recursos que impactan en un mayor rendimiento económico y mitigación ambiental de la cantera.

✓ La metodología de control mineral propuesta mejora el aprovechamiento del material que se produce en las operaciones a cielo abierto para este tipo de depósitos. Esto permite extender la vida útil de los proyectos mineros en todas las escalas, demostrando su impacto en las reservas de mineral.

✓ Se resalta la importancia del rol del geólogo en esta industria desde la actividad prospectiva tanto en la gran como en la pequeña minería. Se destaca el beneficio que conlleva la aplicación de conceptos básicos de geología (geología estructural, geoquímica, geotecnia, estratigrafía) para optimizar la eficiencia técnico-económica de la operación minera.

✓ Se describe como el control topográfico con GPS geodésico y la introducción de tecnologías de relevamiento geológico-estructural a partir de drones, puede dar un salto significativo al estudio más

detallado de estos depósitos. La aplicación de estas nuevas tecnologías contribuye con el mejor control de las voladuras y el transporte desde los frentes de arranque discriminando los minerales útiles como el estéril hasta las etapas de procesamientos.

✓ Se determina que el cambio de las antiguas metodologías de explotación de esta industria, puede contribuir de modo aún más sustentable y seguro en todos los aspectos de la producción. Se intentó demostrar los beneficios de una operación ordenada, donde desarrollar una explotación en banqueo para este tipo de industria, llega a ser más rentable que la actual explotación por “destace” que aún se observa en algunas operaciones.

✓ Se destaca que el vínculo entre el control mineral y los análisis químicos constituye una herramienta imprescindible para dar desde el mismo frente de arranque un significado geológico a los análisis químicos vinculados con los requerimientos del mercado de los productos provistos por este tipo de yacimientos. Se demuestra un impacto positivo del control mineral en las etapas de proceso que permite un seguimiento del material (calidad, granulometría y volumen). Por esta razón, resulta clave crear cuerpos técnicos operativos, donde se agrupe las rocas en función de calidades químicas y físicas.

✓ Se describe que el control mineral realizado por los geólogos uniforma la calidad de los productos al reducir desviaciones que afectan su valor comercial. Estos factores son claves, para optimizar el proceso de calcinación con resultados inmediatos y de corto plazo (Fig.86).

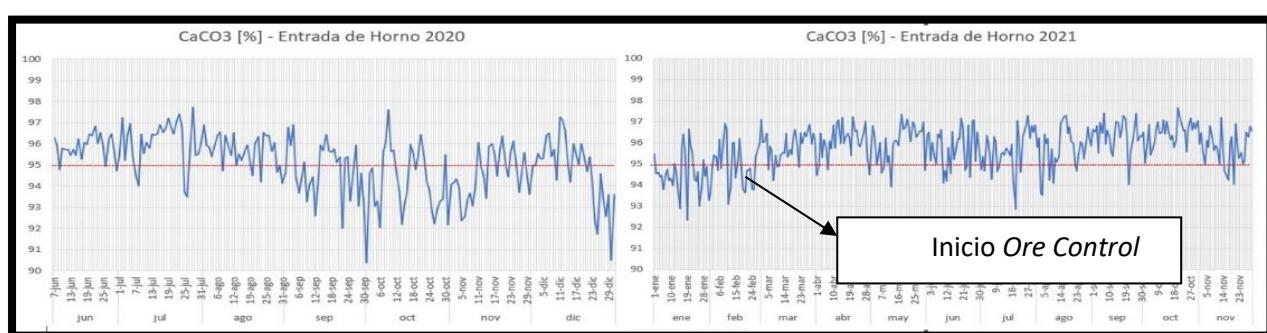


Figura 86. Variación de CaCO<sub>3</sub> promedio de entrada de hornos. Refleja la reducción de variabilidad química, al iniciar actividades de *Ore control* (Control mineral) en cantera.

✓ Una actualización del panorama productivo de la industria de la cal en la provincia de San Juan y en resto de país, indica una creciente demanda y permite considerar a la cal como material necesario e insustituible para los mercados en desarrollo que requieren este insumo como son principalmente las operaciones mineras metalíferas o la producción de litio en salmueras.

## CAPÍTULO 14: RECOMENDACIONES

El estudio de las rocas carbonáticas para su uso industrial genera un modelo y esquemas que no deben usarse en cualquier yacimiento y región, ya que hay variaciones locales de aspectos químicos y físicos. De modo que estas variables se tienen que entender a nivel local, incluso dentro de una misma región, porque se observan variaciones que impactan en las metodologías y los resultados de la producción, incluso en las mismas unidades geológicas hay variaciones, por ello, la litoestratigrafía es una excelente guía de prospección.

Por lo tanto, luego de la realización del presente estudio, se recomiendan las siguientes acciones y actividades:

- ✓ Sugerir a los pequeños productores de rocas carbonáticas la posibilidad de disponer de una asesoría profesional mensual o anual para apoyar la explotación de las canteras. Esto va a mejorar la optimización del recurso. La búsqueda de un vínculo entre los productores con las instituciones públicas con injerencia en esta industria (universidades, centros de investigación) generará una sinergia de actividades teórico-prácticas que contribuya con un incremento de la eficiencia y calidad de todas las actividades relacionadas.
- ✓ Incorporar geólogos al proceso, tanto en la etapa de exploración como producción para evaluar la variabilidad en cantera y asesorar en los procesos productivos. Además, para contribuir en la mejor comprensión de los aspectos morfotectónicos que resultan esenciales para prospectar el potencial de los sectores aun vírgenes de yacimientos y de nuevos depósitos.
- ✓ Actualizar el mapeo regional de las formaciones carbonáticas, remarcando las características geológicas de la Formación La Silla, ya que en alguno de sus miembros presentan las calidades con mayor potencial geoeconómico. Otorgar importancia a las estructuras deformativas mayores de las canteras que actúan como metalotectos, principalmente en los yacimientos complejos, estos van a permiten modelar los cuerpos con mayor precisión. Las fracturas y espacios dilatantes siempre marcan las zonas de menor calidad, al estar asociadas con rellenos de materiales arcillosos estériles, la presencia de alteraciones e impurezas, vetas de calcita, zonas kársticas y fenómenos de dolomitización/silicificación.
- ✓ Dar un mayor significado geológico a los datos químicos. Evitar este paso puede llevar a problemas de calidad. Por ejemplo, ya que la calcita mineral y la caliza son químicamente semejantes, sin embargo, van a tener respuesta diferente al momento de la calcinación. Prestar particular atención a la textura y estructura de las rocas porque estas variables físicas muchas veces se subestiman, y solo se evalúa la química de las rocas. Los cambios texturales como el tamaño de grano, pueden generar problemas de calcinación porque tienen diferentes superficies de reacción. Por otro lado, la anisotropía de las rocas va a afectar la morfología de los fragmentos obtenidos en la trituración, las litologías laminadas o de estratificación fina, generarán bloques lajosos que reducen la porosidad dentro de los hornos.

- ✓ Considerar que la decrepitación de las rocas al ser calcinadas está asociada a la presencia de calcita que se descompone en material fino que rellena los poros y reduce el flujo de aire para la calcinación. Este mismo fenómeno puede darse por la generación de finos por desgaste de la roca de manera mecánica al ser transportada por el proceso.
- ✓ Mejorar el aprovechamiento de los recursos en cantera con un buen control mineral y armado previo de porcentajes de mezclas de los diferentes frentes en explotación a nivel semanal. Evaluar la posibilidad de generar escombreras de diferente calidad, ya que materiales con calidades intermedias actuales pueden en el futuro ser incorporados a procesos donde se requieren menos exigencias composicionales como en la preparación de cales hidratadas, materiales triturados para agricultura/ganadería, enmiendas u otros usos industriales. Esto también puede hacerse para los *scrap* del proceso de trituración ya que los materiales más finos, pueden venderse generalmente para construcción, o triturado industrial y los gruesos pueden ser reincorporados a la línea del proceso habitual. Además, los *scrap* de cal pueden ser dosificados al proceso para ajustar la calidad final esperada.
- ✓ Identificar las deficiencias logísticas, de infraestructura y de abastecimiento dentro de cada Departamento en la provincia de San Juan donde se encuentre la empresa minera y plantear la posibilidad de mejoras en conjunto con otros productores contribuyendo con grandes beneficios que daría para la región.
- ✓ Implementar políticas adecuadas en relación a la planificación urbana y de infraestructura en el área de influencia del depósito. Solicitar y mediar una fuerte intervención de las autoridades para corregir desvíos históricos en materia de preservación del ambiente.
- ✓ Efectivizar una buena relación con la comunidad mediante la comunicación de las diferentes actividades que se realizan y favorecer la generación de puestos de trabajo para personal con formación técnica o laboral de la comarca. Continuar los vínculos actuales con las poblaciones.

## CAPÍTULO 15: AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecerle a la Dra. Liliana Castro por toda la dedicación, tiempo, acompañamiento y motivación durante la confección de este trabajo. De igual manera al Dr. Eduardo Rosello, por sus recomendaciones de mejora para la realización del informe.

También deseo hacer una mención especial a la empresa Calidra por permitirme desarrollarme en esta industria junto a sus equipos de trabajos. Y facilitarme información que en parte me ayudó a confeccionar este trabajo final.

En especial al Lic. en geología Ignacio Vicente por su acompañamiento en mi introducción a la explotación de yacimientos calizas y producción de cal, transmitiéndome sus conocimientos y experiencia. También a Fernando, Marcos, Eduardo y Diego por su compañerismo dentro del área.

A todos aquellos seres queridos que de una u otra forma estuvieron dándome su apoyo en los momentos que lo necesité.

A todos los profesores de la Carrera de Especialización en Geología Minera de la Universidad de Buenos Aires por su acompañamiento durante este posgrado.

Finalmente, a los jurados el Dr. Carlos Herrmann y la Lic. Dl. Ana María Celeda por su tiempo en la evaluación y sugerencias que enriquecieron el manuscrito.

## CAPÍTULO 16: BIBLIOGRAFÍA

- Abruzzese, M., Waldbauer, J. y Chamberlain, C., 2005. Oxygen and hydrogen isotope ratios in freshwater chert as indicators of ancient climate and hydrologic regime. *Geochimica et Cosmochimica*, 69: 1377-1390.
- Álvarez, G. C., 2008. La cal ¡Es un reactivo químico! Chile. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Rama Los Andes (CIM Los Andes) y A.G.I Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- Angelelli, V., Schalamuk, I. y Fernández, R., 1980. Los yacimientos de minerales no metalíferos y rocas de aplicación de la región Centro-Cuyo. Ministerio de Economía, Subsecretaría de Minería. *Anales* 19.
- Arroqui Langer, A., 1998. Estudio genético y del potencial de magnesio de las dolomías de la Formación Zonda, en la Sierra de Villicum, San Juan. Tesis doctoral. Biblioteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. (Inédito).
- Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE): Usos y aplicaciones de la cal. Disponible en <https://www.ancade.es/>
- Baldis, B., Bordonaro, O., Beresi, E. y Uliarte, M., 1981. Zona de dispersión estromatolítica en la secuencia calcáreo-dolomítica del Paleozoico inferior de San Juan. *VIII Congreso Geológico Argentino* 2: 419-443.
- Baldo, E. G., Saavedra Alonso, J., Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., y Galindo, C., 1997. Síntesis geocronológica de la evolución paleozoica inferior del borde sur occidental de Gondwana en las Sierras Pampeanas, Argentina. *Acta Geológica Hispana*. 32 (1-2): 17-28.
- Beninato, M. A., 1999. Yacimientos de calizas de San Luis. *Recursos Minerales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales* 35: 297-302.
- Blasco, G., Caminos, R. L., Lapido, O., Lizuaín, A., Martínez, H., Nullo, F., Panza, J.L., Sacomani, L.M., Barber, E.L.G., Chipulina, M. A. y Martínez, L., 1994. San Fernando del Valle de Catamarca. *Hoja Geológica 2966-II. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Provincias de Catamarca, Santiago del Estero y Tucumán*. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Bliss, J., Hayes, T. y Orris, G., 2008. Limestone. A Crucial and Versatile Industrial Mineral Commodity. *U.S. Geological Survey*, p. 1-4.
- Bordonaro, L. O., 1980. El Cámbrico en la quebrada en Zonda, Provincia de San Juan. *Revista Asociación Geológica Argentina* 35: 20-40.
- Bordonaro, L. O., 2002. Los carbonatos Cámbricos y Ordovícicos de la Precordillera Argentina como Rocas de Aplicación Industrial. *Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales. Geología Regional*, 123-126.
- British Geological Survey: Rock Classification Scheme. Disponible en <https://www.bgs.ac.uk>
- Bruna, M., 1991. Recursos calcáreos del Departamento Zapala. Calizas y Piedra Laja. *Panorama Minero N° 160*: 34-38.
- Busteros, A., Giaosa, R., Lema, H. y Zubia, M., 1998. *Hoja geológica 4166-IV, Sierra Grande, Provincia de Río Negro. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Boletín 241. 85 p.* Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Bustillo, M. Á., 2010. Silicification of Continental carbonates. *Carbonates in Continental Settings: processes, facies and applications. Developments in Sedimentology Series*, 62: 153-174.c

- Cardó R., Díaz I., Boronaro O., y Cardinali A., 2020. Hoja Geológica 3169-34 Los Berros, Provincia de San Juan. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:100.000. Servicio Geológico Minero Argentino: 1-44, Buenos Aires.
- Carr, D., Rooney, L. y Freas, R. C., 1994. Limestone and dolomite. Industrial Minerals and Rocks 6th Edition, pp. 605-631.
- Castro, G., Cano, E. y Perucca, J. C., 2007. Industria de la cal en San Juan (Argentina). 21° ENTMMEIYII MSHMT- Ouro Preto-MG, p. 815-822.
- Centro de Información de Internet China. Disponible en <http://spanish.china.org.cn>
- Conicet Bahía Blanca: Distribución unidades carbonáticas en Precordillera. Disponible en <http://www.criba.edu.ar>
- Dalponte, M., Espejo, P. y Socorres, S., 2002. Carta de minerales industriales, rocas y gemas 3766-III, La Reforma, provincia de la Pampa. Serie Carta de minerales industriales, roca y gemas, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR.
- Dalponte, M., Espejo, P. y Yáñez, M., 2007. Carta de Minerales Industriales, Rocas y Gemas 4166-IV, Sierra Grade, Provincia de Río Negro. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. Boletín N° 371.
- Dunham, R. J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologist Memoir, (1): 108-121.
- Embry, A. F. y Klovan, J. E., 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island. Bulletin of Canadian Petroleum Geology 19: 730-781.
- Folk, R. L., 1959. Practical petrographic classification of limestones. Bulletin of American Association of Petroleum geologist, 43 (1): 1-38.
- Freas, R., 1994. Lime. Industrial Minerals and Rocks. (6): 589-603.
- González, O. E., Viruel, M. E., Mon, R., Tchilinguirian, P., Barber, E. L. G., 2000. Hoja Geológica 2766-II San Miguel de Tucumán. Secretaría de Energía y Minería, SEGEMAR, Boletín N°245: 1-124.
- Geological Survey & Mineral exploration of Iran, 2019, Disponible en <https://www.gsi.ir>
- Gozalvez, M., Herrmann, C., Zappettini, E. 2004. Minerales Industriales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Anales 39. Buenos Aires.
- Gutschick, K. A., 2000. Lime and limestone. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. (5):15 p.
- Herrmann, C. J., 2001. Caliza y dolomitas: producción y consumo en Argentina y países limítrofes y sus posibilidades de crecimiento. Consejo Federal de Inversiones.
- Herrmann, C. J. y Menoyo, E., 1999. Yacimiento de Calizas y dolomías de la Precordillera, San Juan y Mendoza. Recursos Minerales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales 35: 697-712.
- Herrmann, C. y Menoyo, E., 2000. Mercado de cales industriales en Argentina. Revista Asociación Argentina de Geólogos Economistas, 12: 35-39.
- Herrmann, C. y Gozalvez, M., 2005. Disponibilidad de Fertilizantes y enmiendas minerales para el agro. Serie Contribuciones Técnicas Recursos Minerales, Boletín N° 353, SEGEMAR.
- Honghi, T., 2007. Lime kiln chemistry and effects on kiln operations. TAPPI Kraft Recovery Course.
- Horiba Scientist: Dry Powder Laser Diffraction. Disponible en <https://www.horiba.com/>
- Iijima, A. Y. y Tada, R., 1981. Silica diagenesis of Neogene diatomaceous and volcanoclastic sediments in northern Japan. Sedimentology, 28: 185-200.

- Keller, M., 1999. Argentine Precordillera. Sedimentary and Plate Tectonic History of Laurentian Crustal Fragment in South America. Geological Society of America, Special Paper 341: 131.
- Keller, M., Cañas, F., Lehnert, O. y Vaccari, N., 1994. The Upper Cambrian and Lower Ordovician of the Precordillera (Western Argentina): Some stratigraphic reconsiderations. Newsletter Stratigraphy, 31(2): 115-132.
- Kendall, C. G., 2005. Classification of Carbonates. Encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process, p. 193-198.
- Klein, C. y Cornelius Jr, S., 2018. Manual de mineralogía. Reverté. (2): 1-396.
- Knauth, L., 1992. Origin and diagenesis of cherts: an isotopic perspective. Isotopic Signatures and Sedimentary Records. Lecture Notes in Earth Sciences, p. 123-152.
- Knauth, L. y Epstein, S., 1976. Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts. Geochimica et Cosmochimica. 40: 1095-1108.
- Laschet, C., 1984. On origin of Cherts. Facies, 10: 257-290.
- Lima, R. M. F. y Luvizzotto, G., 2007. Flotability of the minerals apatite, calcite and dolomite, using fatty acid in the presence of different depressants. 22° ENTMME / 7° MSHMT, p. 331-336.
- Lhoist Descripción General de los procesos de Fabricación: Lime production process, 2009. Disponible en <https://www.lhoist.com/es>
- McBride, E., Abdel-Wahab, A. y El-Younsy, A., 1995. Origin of spheroidal chert nodules, Drunka Formation (Lower Eocene), Egipt. Sedimentology, 46: 733-755.
- Mehmood, M., Yaseen, M., Khan, E. U. y Khan, M. J., 2018. Dolomite and dolomitization model - a short review. International Journal of Hydrology, p. 549-553.
- Melchor, R. y Casadio, S., 2000. Hoja geológica 3766-III, La Reforma, provincia de la Pampa. Instituto de Geología y Recursos Mineros, SEGEMAR, p. 1-70.
- Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina: Microsoft Power BI – Exportaciones mineras. Disponible en <https://datos.produccion.gob.ar/>
- Ministerio de Minería de San Juan: Minerales industriales y rocas de aplicación de la provincia de San Juan. Disponible en <http://serviciosmineria.sanjuan.gob.ar/recursos/recursos.php>
- Ministerio de Trabajo empleo y seguridad social: Boletín trimestral de empleo registrado por provincia, 2022. Disponible en <https://www.trabajo.gob.ar>
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico: Emisiones, 2018. Disponible en <https://www.miteco.gob.es/>
- Museo de Ciencias Naturales de Barcelona, Disponible en <https://blog.museuciencies.cat/>
- Ormeño, P. y Arroqui, A., 2003. Estudio Preliminar de los componentes Silíceos en la sucesión carbonática Cambro-Ordovícica de la Precordillera Oriental, San Juan. 10º Congreso Geológico Chileno.
- Peluc, M. H. y Gonzalez Abone, M. J., 2018. Análisis estratégico de costos de la industria calera en la provincia de San Juan - Argentina: Estudio de caso. Instituto Internacional de Costos, 1-29.
- Poiré, D. G., González, P. D., Canalicchio, J. M., y García Repetto, F., 2005. Estratigrafía del Grupo Mina Verdún, Proterozoico de Minas, Uruguay. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 12 (2): 125-143.
- Preston Macgrain, R., 2001. Contributions to the geology of Kentucky. Economic Geology USGS.
- Proyecto Minero Río Negro, 1999. Informe de minerales industriales y rocas ornamentales. Convenio SEGEMAR - Dirección de Minería de Río Negro, p. 1-65.
- Ramos, V. A., 1999. Evolución Tectónica de la Argentina. En: Geología Argentina. Rasgos estructurales del territorio argentino. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, p. 715-784.

- Raviolo, M., 2006. Estudio litofacial y geoquímico de las calizas ordovícicas como rocas de aplicación industrial en la Precordillera Oriental de San Juan, Universidad Nacional de San Juan: Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. (Inédito).
- Raviolo, M., Bordonaro, O. y Pratt, B., 2007. Revisión Estratigráfica y litofacial de la Formación La Silla (Ordovícico inferior) en la Precordillera Oriental de San Juan, Argentina. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 14: 117-128.
- Sánchez, S. B., 2012. La industria de la cal en el departamento Sarmiento, provincia de San Juan. IX Jornadas nacionales de geografía física Bahía Blanca, p. 1-10.
- Schalamuk, I., Fernández, R. y Etcheverry, R., 1983. Los yacimientos de minerales no metalíferos y rocas de aplicación de la región NOA. Ministerio de Economía, Subsecretaría de Minería, Anales 20: 1-196.
- Secretaría de economía del Gobierno de México. Disponible en <https://www.economia.gob.mx>
- SEGEMAR – UNSAM, 2008. Carbonato y Sulfato de Calcio. Seminario de Estudios sobre el Ciclo Minerales - Materiales. Publicación Técnica SEGEMAR - UNSAM 15, 72 p. Buenos Aires.
- Sistema de Información Abierta a la Comunidad sobre la Actividad Minera en Argentina (SIACAM), 2022. Disponible [https://informacionminera.produccion.gob.ar/sifim\\_produccion.html](https://informacionminera.produccion.gob.ar/sifim_produccion.html)
- Sharp, Z., DuraKiewiez, T., Migaszewski, Z. y Atudorei, V., 2002. Antiphase hydrogen and oxygen isotope periodicity in chert nodules. Geochimica et Cosmochimica, 66: 2865-2973.
- Sibley, D. F. 1982. The origin of common dolomite fabrics. J Sedim Petrol, 52: 1087-1100.
- Solsona, M. N. y Rogosz, M., 2018. Panorama de mercado de rocas y minerales industriales – CAL. Secretaría de Política Minera. Ministerio de Producción Presidencia de la Nación.
- Tapia Viedma, S. y Gorustovich, S., 2001. Estudio geológico y cubicación de las calizas negras (Formación Las Tienditas) del Coro, Salta. VII Congreso Argentino de Geología Económica.
- The Irish news: Science Magazine, 2018. Disponible en <https://www.irishnews.com/magazine/science/2018/01/19>
- The Observatory of Economic Complexity (OEC). La piedra caliza; piedra caliza utilizada en la fabricación de cal o cemento. Disponible en <https://oec.world/en/resources/data-availability>
- Tucker, M., 1991. Sedimentary Petrology. Second edition, Geoscience Texts.
- U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries, 2021. Disponible en [Mineral commodity summaries 2021 \(https://usgs.gov\)](https://usgs.gov/Mineral_commodity_summaries_2021)
- U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries, 2022. Disponible en [Mineral commodity summaries 2022 \(https://usgs.gov\)](https://usgs.gov/Mineral_commodity_summaries_2022)
- Videla, C. J. y Azocar, R. N., 1996. Tecnologías modernas de calcinación de finos de caliza. Actas de cuartas jornadas argentinas de tratamiento de minerales, p. 111-117.
- Zappettini, E. O., 1999. Caliza y dolomías de la Sierra de Ancasti, Catamarca. Recursos Minerales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, anales 35: 319-320.
- Zingg, T., 1935. Beitrage zur Schotteranalyse. Min. Petrog. Mitt. Schweiz. Alemania, 15: 39-140.