

LAS ZEOLITAS NATURALES DE BRASIL

INTRODUCCIÓN

CARLOS ADOLPHO MAGALHÃES BALTAR
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, Brasil

ADÃO BENVINDO DA LUZ
Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT)
Rio de Janeiro, Brasil

En Brasil no hay informes oficiales sobre producción de zeolitas naturales. Las ocurrencias no han sido aún lo suficientemente estudiadas como para ofrecer datos fehacientes sobre cuantificación de reservas y viabilidad económica para su aprovechamiento industrial.

Existen algunos estudios geológicos en diversas áreas que indican la existencia de yacimientos de zeolitas en la Cuenca de Parnaíba (*Formación Corda*), que se extiende desde el Estado de Maranhão hasta Tocantins, y en la Cuenca de Paraná (*Formación Adamantina*, en el Estado de São Paulo;

Formación Botucatu, en el Estado de Mato Grosso do Sul; y la *Formación Serra Geral*, en el Estado de Rio Grande do Sul).

No obstante, las características peculiares, sumado a la diversidad de aplicaciones industriales de las zeolitas, han animado desde hace algún tiempo a varios grupos de investigadores a considerar la posibilidad de aprovechamiento económico de los yacimientos brasileños, principalmente, en el ámbito agrícola, medioambiental, en el tratamiento de áreas contaminadas y en la remoción de metales pesados en los efluentes industriales.

PRINCIPALES ZONAS DE OCURRENCIA

El yacimiento brasileño que presenta mayor potencial para aprovechamiento comercial yace en las areniscas de la *Formación Corda*, de edad Mesozoico, aflorando en una banda continua a lo largo de toda la región central de la Cuenca del Rio Parnaíba, el cual se extiende por los estados de Maranhão (región nordeste) y Tocantins (región centro-oeste), ocupando una área con más de 1.000 kilómetros cuadrados y presentando, en determinados lugares, una potencia que sobrepasa los 30 metros (Rezende, N.G.A.M. *et al.* 2008).

En ese depósito sedimentario, cuyo hallazgo es atribuido a la CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, predominan los tipos estilbita y laumontita. Las zeolitas aparecen cementando areniscas depositadas en ambientes eólicos, fluviales y lacustres (Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997).

DESDE HACE TIEMPO VARIOS GRUPOS DE INVESTIGADORES CONSIDERAN LA POSIBILIDAD DE APROVECHAR LOS YACIMIENTOS BRASILEÑOS, PRINCIPALMENTE, EN EL ÁMBITO AGRÍCOLA, MEDIOAMBIENTAL, EN EL TRATAMIENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS Y EN LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN LOS EFLUENTES INDUSTRIALES.

GEOLOGÍA

La Cuenca de Parnaíba es una de las tres grandes estructuras sedimentarias de Brasil (las otras dos son la Cuenca de Amazonas y la Cuenca de Paraná), siendo una de las doce regiones hidrográficas de Brasil. La cuenca ocupa un área de aproximadamente 344.000 kilómetros cuadrados, en el noreste de Brasil (figura 17), que representa cerca de 1.400 kilómetros de extensión.

La Cuenca Sedimentaria de Parnaíba tiene estructura de tipo intracratónico (cuenca de plataforma); o sea, se ha formado en el interior de áreas más estables, en términos tectónicos. Contiene una columna de sedimentos con más de 3.500 metros de espesor (Rezende, N.G.A.M.y Angélica, R.S., 1997). La secuencia sedimentaria más joven es la *Formación Corda*, en la que predominan las areniscas.

Las zeolitas aparecen como fase intersticial, cementando a las areniscas depositadas en un ambiente desértico que se desarrolló sobre derrames basálticos mesozoicos. En base a estudios preliminares, Rezende, N.G.A.M.y Angélica, R.S., (1997) creen que el hecho de que las zeolitas aparezcan cementando a las areniscas, tanto en facies eólicas como fluviales y lacustres, sugiere el desencadenamiento de un proceso diagenético precoz que tuvo a las formaciones basálticas como fuente de aporte de sedimentos. De acuerdo con los autores, la lixiviación de las lavas recién depositadas favorecieron la generación de la salmuera mineralizante.

Figura 17. Localización de la Cuenca de Parnaíba, en la región noreste de Brasil.

LAS ZEOLITAS APARECEN COMO FASE INTERSTICIAL, CEMENTANDO A LAS ARENISCAS DEPOSITADAS EN UN AMBIENTE DESÉRTICO QUE SE DESARROLLÓ SOBRE DERRAMES BASÁLTICOS MESOZOICOS.



LOCALIZACIÓN

Como ya se ha comentado, los yacimientos de zeolita de la Cuenca de Parnaíba están extendidos por los estados del Maranhão y Tocantins.

La región tiene gran actividad agrícola, y está cortada por el río Tocantins. Posee una importante red de carreteras y vías férreas que comunican con el Norte y con el Sur. Muchas de estas carreteras, por ejemplo la que cubre el eje Norte-Sur, se conectan también con el sistema ferroviario de Carajás.

LA CUENCA DE PARNAÍBA ES UNA DE LAS TRES GRANDES ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS DE BRASIL (LAS OTRAS DOS SON LA CUENCA DE AMAZONAS Y LA CUENCA DE PARANÁ), SIENDO UNA DE LAS DOCE REGIONES HIDROGRÁFICAS DE BRASIL.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA

Las zeolitas de la *Formación Corda* son predominantemente de la variedad estilbita, y aparecen intercaladas con arcillas de la variedad esmectitas que cementan a las areniscas. Estas areniscas se presentan como rocas de baja dureza y color pardo-rojizo, con granos de morfologías y tamaños variados (Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997).

Los diferentes estudios realizados sobre varias muestras de la *Formación Corda*, como petrografía de sección delgada, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, llevados a cabo por Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S. (1997), identificaron la presencia de estilbita ($\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_{13}\text{O}_{36}\cdot 14\text{H}_2\text{O}$) y laumontita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), hasta en un 40%.

El análisis por difracción de rayos X estableció la presencia de cuarzo, esmectitas y pequeñas cantidades de calcita y feldespato potásico. Estos datos coinciden con los resultados obtenidos por Monte, M.B.M. *et al.* (2009) y Bernardi, A.C.C. *et al.* (2010 a).

Los análisis químicos realizados en varias muestras indicaron que en la estilbita el calcio es el principal catión de compensación; mientras que los iones sodio y potasio aparecen con menores leyes (Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997). Duarte, A.C.P. *et al.* (2002) determinaron una relación Si/Al: 3,37 para una muestra tomada en la Cuenca de Parnaíba. La tabla 3 presenta las leyes medias obtenidas en las muestras analizadas.

Tabla 3. Composición química de las areniscas zeolitizadas de la Formación Corda. Fuente: Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997.

TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ARENISCAS ZEOLITIZADAS DE LA FORMACIÓN CORDA

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.F.
72,3	8,71	3,1	0,32	3,4	3,2	0,48	0,07	0,21	1,1	6,79

Monte, M.B.M. *et al.* (2011) llevaron a cabo ensayos de concentración de las areniscas en mesa vibratoria, obteniendo un concentrado de estilbita cercano al 68,8%; generando así un aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), desde 1,69 meq/g a 2,55 meq/g.

Puente, B. (2006) y Costafreda, J.L. *et al.* (2011) hicieron ensayos físicos en una de estas muestras en estado natural, para comprobar su viabilidad como componente de los morteros. Los principales resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de ensayos físicos llevados a cabo en la Escuela de Minas y Energía de Madrid, con una muestra de arenisca zeolitizada de la Cuenca de Parnaíba (Puente, B., 2006); (Costafreda, J.L. *et al.* 2011).

Los resultados de la tabla 4 muestran una zeolita de alta densidad (la densidad de la estilbita suelen variar entre 2,2 y 2,5 g/cm³), coeficiente de absorción de agua bastante elevado (esto indica la necesidad de una mayor cantidad de agua para obtener una buena consistencia del mortero) y un porcentaje de agua por debajo de la media empleada en morteros con zeolitas. Los resultados negativos se explican por el bajo contenido de estilbita (40%) en la muestra natural.

TABLA 4. RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICOS

PROPIEDAD FÍSICA	RESULTADO
Densidad (g/cm ³)	2,52
Coeficiente de absorción de agua (%)	1,69
Contenido en agua (%)	1,58
Consistencia (mm)	176,5

PERSPECTIVAS DE APROVECHAMIENTO

En la actualidad varios grupos de investigación se están dedicando al estudio de las propiedades tecnológicas de estas zeolitas, a fin de establecer la posibilidad de su aprovechamiento industrial. Las investigaciones están concentradas, principalmente, en usos agrícolas y en temas ambientales relacionados con el tratamiento de efluentes industriales y la descontaminación de áreas afectadas.

Las características estructurales de las zeolitas posibilitan su uso como acondicionadores de suelos, ya que almacenan en su estructura interna elementos útiles para la nutrición de los vegetales, después de ser liberadas lentamente, en la medida en que se demande su presencia (Luz, A.B., 1994).

En la actualidad, ya se cuenta con resultados positivos en el sector agrícola, fundamentalmente en la producción de lechugas (Bernardi, A.C.C. *et al.* 2005), tomate (Haim, P. *et al.* 2004; Bernardi, A.C.C. *et al.* 2004-a; Bernardi, A.C.C. *et al.* 2007) y arroz (Bernardi, A.C.C. *et al.* 2010-a; Bernardi, A.C.C. *et al.* 2010-b). Algunas de estas investigaciones fueron llevadas a cabo en el marco del Programa de Cooperación entre EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) y CETEM (Centro de Tecnología Mineral) del Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

En los cultivos fomentados con tecnología de zeopónicos, las plantas crecen en un sustrato artificial a base de zeolitas y rocas fosfatadas, formando un sistema de liberación controlado de nutrientes importantes para el desarrollo de las plantas. En esos estudios, las zeolitas fueron concentradas previamente en el CETEM, mediante mesas vibratorias o espirales, y posteriormente enriquecidas con nitrógeno, fósforo y potasio.

El uso de la zeolita enriquecida con apatito (fuente de fósforo) aumentó la producción de lechuga en torno al 40%, y mejoró su calidad visual (Bernardi, A.C.C. *et al.* 2004-b y Bernardi, A.C.C. *et al.* 2005). Bernardi, A.C.C. *et al.* (2007) obtuvieron un crecimiento en la producción de tomates cultivados en sustratos de estilbita enriquecida con N, P y K entre el 11 y el 17%. Se constató que ese sistema de cultivo proporciona una liberación lenta con mejor aprovechamiento de los nutrientes. La aplicación de zeolita con urea redujo la pérdida de nitrógeno por volatilización en un 8% (Monte, M.B.M. *et al.* 2009; Bernardi, A.C.C. *et al.* 2010a y Bernardi, A.C.C. *et al.* 2010b) y aumentó en un 10% la retención del agua en el suelo (Bernardi, A.C.C. *et al.* 2013).

LOS YACIMIENTOS DE ZEOLITA DE LA CUENCA DE PARNAÍBA ESTÁN EXTENDIDOS POR LOS ESTADOS DEL MARANHÃO Y TOCANTINS.

Los resultados obtenidos en estos estudios preliminares, sugieren la posibilidad de utilización industrial de la zeolita de la Cuenca de Parnaíba como insumo agrícola. Actualmente, la región donde yacen las zeolitas naturales de Brasil mantiene una intensa actividad agroindustrial, lo que puede facilitar su aprovechamiento.

Otra posibilidad sería su uso en el tratamiento de áreas contaminadas por metales pesados. Cuanto mayor es el grado de sustitución del Si^{4+} por Al^{3+} más grande es la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la zeolita (Zamzow, M.J. *et al.* 1990); y cuanto más pequeña es la energía de solvatación del catión, mayor será su capacidad para penetrar a través de los poros de la zeolita (Shinzato, M.C., 2007).

La zeolita de la Cuenca de Parnaíba fue estudiada para establecer su uso en la remoción de Cu^{2+} y Pb^{2+} (Duarte, A.C.P. *et al.* 2002). Los autores también estudiaron la influencia del proceso de activación de la zeolita natural. Los resultados establecieron que la estilbita presenta una excelente capacidad para la remoción en aquellos casos donde las concentraciones diluidas de ambos metales son considerables. Por otro lado, llegaron a la conclusión de que frente a concentraciones elevadas, era necesaria la activación con NaOH , pues la remoción del Cu^{2+} aumenta del 21% al 96%; mientras que la del Pb^{2+} se incrementa del 68% al 97%.

La posibilidad de uso de las areniscas zeolitizadas como material puzolánico fue estudiada en la Escuela de Minas y Energía de la Universidad Politécnica de Madrid, y en la Universidade Federal do Pará (Brasil).

Costafreda, J. L. (2008) y Costafreda, J. L. *et al.* (2009) usaron un método para determinar la reactividad puzolánica, basado en la determinación de la conductividad eléctrica, monitorizando así la variación de la concentración de iones Ca^{2+} con respecto al tiempo, en una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en contacto con zeolita. Los autores compararon la estilbita de la Cuenca de Parnaíba con tres zeolitas procedentes de diferentes países (España, Cuba y Ecuador). Los resultados aportados por la muestra brasileña indicaron bajos índices de reactividad puzolánica.

Por su parte, un grupo de investigación de la Universidade Federal do Pará estudió la posibilidad de utilización de la zeolita de Maranhão como material puzolánico en la fabricación de cemento pòrtland. Tras la eliminación de la fracción gruesa (tamaño más grande que $74\ \mu\text{m}$), los autores observaron que el material aceleraba la hidratación del cemento y aumentaba la cantidad de calor generado. Sin embargo, la actividad puzolánica de la arenisca natural no alcanzó el valor mínimo exigido por las normas (Picanço, M.S. *et al.* 2011-a). Como continuación de la investigación (Picanço, M.S. *et al.* 2011-b), se activó zeolita mediante calcinación a 500°C , logrando así la reactividad puzolánica deseada.

APLICACIONES DE LAS ZEOLITAS DE BRASIL

Al menos una empresa en Brasil utiliza zeolita natural (clinoptilolita) importada, para el uso en la producción de su línea industrial. La producción de la empresa consiste en:

- Aditivos naturales en la alimentación animal para reducir el olor de las excretas de perros y gatos.
- Productos a base de clinoptilolita para la retención de partículas como alternativa a los filtros de arena.
- Productos con zeolita natural modificada en el tratamiento de efluentes industriales para la remoción de metales pesados.
- Como medio filtrante para el tratamiento del agua de las piscinas, mediante la remoción de partículas finas y amonio.
- Productos destinados a la remoción de iones de hierro y manganeso del agua.
- Zeolitas naturales modificadas para la sustitución del tripolifosfato de sodio, compuesto presente en detergentes en polvo, con la finalidad de reducir la concentración de fosfatos en efluentes domésticos y la disminución de la eutrofización en el cuerpo receptor.

LAS ZEOLITAS DE LA FORMACIÓN CORDA SON PREDOMINANTEMENTE DEL TIPO ESTILBITA, Y APARECEN INTERCALADAS CON ARCILLAS DE TIPO ESMECTITAS QUE CEMENTAN A LAS ARENISCAS.

OTRAS OCURENCIAS

Se conocen otros dos depósitos de zeolitas en la Cuenca de río Paraná; uno en la *Formación Adamantina*, en el Estado de São Paulo, y otro en la *Formación Botucatu*, en el Estado de Mato Grosso do Sul.

La Cuenca de Paraná es de tipo sedimentaria, y está ubicada en la porción centro-este de Sudamérica. El área de ocurrencia abarca, principalmente, el centro-sur de Brasil, desde el Estado de Mato Grosso hasta el Estado de Rio Grande do Sul. Además de Brasil, la cuenca se extiende hacia el noreste de Argentina, el este de Paraguay y el norte de Uruguay. Es un área de aproximadamente 1,5 millones de kilómetros cuadrados, en forma oval, y presenta el eje más grande en dirección prácticamente Norte-Sur.

EN LA ESTILBITA,
EL CALCIO ES EL
PRINCIPAL CATION
DE COMPENSACIÓN,
MIENTRAS QUE LOS
IONES SODIO Y POTASIO
APARECEN CON
MENORES LEYES.

FORMACIÓN ADAMANTINA

La *Formación Adamantina* se extiende por los Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás y Mato Grosso do Sul, y está formada por areniscas de granos finos a muy finos, siltitas y arcillitas, dispuestos en capas macizas y estratificaciones cruzadas de pequeño y medio porte. La deposición de los sedimentos ocurrió en ambientes fluviales y lacustres, en un clima caliente y seco.

La ocurrencia de zeolitas en los sedimentos de la *Formación Adamantina* fue estudiada por primera vez en 1987, por Brandt Neto y colaboradores (Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997), que recolectaron muestras en el municipio de Macedônia, al noroeste del Estado de São Paulo.

Los resultados de los análisis mediante difracción de rayos X, sugieren un predominio de la variedad analcima ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que está en el cemento asociado a minerales arcillosos del grupo de las esmectitas (Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997). Los sedimentos yacen a unos 100 metros de profundidad. Las areniscas, así como las siltitas y arcillitas, presentan coloraciones que varían generalmente desde crema a rojiza, con cemento carbonatado.

El aprovechamiento económico de ese depósito es improbable, pues además de estar a una gran profundidad, el cuerpo mineralizado presenta bajo contenido en zeolitas.

FORMACIÓN BOTUCATU

La *Formación Botucatu* está constituida por areniscas cuarzosas de granulometría media a fina, con coloración rojiza, rosácea o amarillo clara. Pueden contener feldespato alterado cementado por sílice o por óxidos de hierro. Las areniscas yacen con estratificación angular de gran espesor (Sartori, P., 2009).

Farjallat, J.E.S. y Suguio, K. (1966) mencionaron la ocurrencia de zeolita del tipo heulandita, en el Estado de Mato Grosso do Sul, cerca de la Sierra de Maracujá. En ese depósito, que aparentemente no tiene posibilidad de aprovechamiento económico, las zeolitas están en el cemento silíceo existente en las areniscas de la *Formación Botucatu*. El lente de arenisca infrayace una capa de basalto compacto, y sobreyace una serie de basalto amigdaloidal (Rezende, N.G.A.M. y Angélica, R.S., 1997).

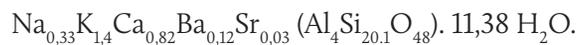
EN LA ACTUALIDAD
VARIOS GRUPOS DE
INVESTIGACIÓN SE ESTÁN
DEDICANDO AL ESTUDIO
DE LAS PROPIEDADES
TECNOLÓGICAS DE
ESTAS ZEOLITAS, A FIN
DE ESTABLECER LA
POSIBILIDAD DE SU
APROVECHAMIENTO
INDUSTRIAL.

FORMACIÓN SERRA GERAL

La *Formación Serra Geral* es una provincia magmática relacionada con derrames e intrusiones que recubren una área de 1,2 millones de km² en la Cuenca de Paraná, abarcando toda la región centro-sur de Brasil, y extendiéndose por las fronteras de Paraguay, Uruguay y Argentina.

Es conocida una ocurrencia de zeolita en los basaltos de Rio Grande do Sul, que yace en los primeros derrames de la *Formación Serra Geral*, y se asocia a las areniscas Botucatu-Serra Geral. El potencial de esa ocurrencia sigue siendo estudiado por el Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Shinzato, M.C. *et al.* (2008) identificaron mordenita, con una ley de 3,7%, cuya fórmula química fue estimada por los autores como:



La mordenita de la *Formación Serra Geral* presenta una superficie específica de 196 m²/g, y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de alrededor de 1,2 meq/g.

Por su parte, la escolecita ($\text{Na}_{0,26}\text{Ca}_{0,95}\text{Al}_{2,07}\text{Si}_{3,0}\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) aparece asociada a las porciones superiores de los derrames basálticos, siendo la segunda en abundancia en el sur de Brasil (Dal Bosco, S.M. *et al.* 2004). Esa zeolita natural presentó una elevada capacidad de adsorción de metales pesados (Mn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} y Cr^{3+}), contenidos en disoluciones sintéticas (Dal Bosco, S.M. *et al.* 2005).

OTRAS OCURRENCIAS DE ZEOLITAS CITADAS EN PUBLICACIONES ESPECIALIZADAS

La variedad phillipsita $(K, Na, Ca)_{1-2}(Si, Al)_8O_{16} \cdot 6H_2O$ se halla en la *Formación Uberaba* (Cuenca de Río Paraná) en el Estado de Minas Gerais, donde la zeolita aparece como una alteración de material volcánico dendrítico, rellenando vacíos intergranulares de la roca (Ferreira Junior, P.D. y Gomes, N.S., 1999).

Los tipos phillipsita, harmotoma, wellsita y analcima fueron identificados por Gones, N.S. y Fernández, S.M. (1995) en la *Formación Macau*, de la Cuenca Potiguar, en el Estado de Rio Grande do Norte.

SE CONOCEN OTROS DOS DEPÓSITOS DE ZEOLITAS EN LA CUENCA DE RÍO PARANÁ; UNO EN LA FORMACIÓN ADAMANTINA, EN EL ESTADO DE SÃO PAULO, Y OTRO EN LA FORMACIÓN BOTUCATU, EN EL ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernardi, A.C.C.; Werneck, C.G.; Haim, P.G.; Rezende, N.G.A.M.; Amorim, H.S.; Barros, F.S.; Paiva, P.R.P.; Monte, M.B.M. (2004a). Avaliação Agronômica de Substratos contendo Zeólita Enriquecida com Nitrogênio, Fósforo e Potássio. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 57. EMBRAPA. Rio de Janeiro.
- Bernardi, A.C.C.; Werneck, C.G.; Haim, P.G.; Rezende, N.G.A.M.; Amorim, H.S.; Barros, F.S.; Paiva, P.R.P.; Monte, M.B.M. (2004b). Cultivo zeopônico de alface e tomate. In: *XVI Congresso Latino Americano e XII Congresso Colombiano, 2004, Colômbia*.
- Bernardi, A.C.C.; Bernardi, M. R. V.; Haim, P.G.; Werneck, C. G.; Monte, M. B. M. (2005). Produção, aparência e teores de nitrogênio, fósforo e potássio em alface cultivada em substrato com zeólita. *Horticultura Brasileira*, v. 23, n. 04, pp. 920-924.
- Bernardi, A.C.C.; Werneck, C.G.; Haim, P.G.; Botrel, N.; Oiano-Neto, J.; Monte, M.B.M.; Verruma-Bernardi, M.R. (2007). Produção e qualidade de frutos de tomateiro cultivado em substrato com zeólita. *Horticultura Brasileira*, v. 25, pp. 306-311.
- Bernardi, A.C.C.; Oliveira, P.P.A.; Monte, M.B.M.; Polidoro, J.C.; Barros, F.S. (2010a). Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. In: *World Congress of Soil Science, 19. Brisbane. Proceedings. Brisbane: IUSS*.
- Bernardi, A.C.C.; Monte, M.B.M.; Paiva, P.R.P.; Werneck, C. G.; Haim, P.G.; Barros, F.S. (2010b). Dry matter production and nutrient accumulation after successive crops of lettuce, tomato, rice, and andropogongrass in a substrate with zeólita. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 2, pp. 435-442.
- Bernardi, A.C.C.; Oliviera, P.P.A.; Monte, M.B.M. (2013). Brazilian sedimentar zeolite use in agriculture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 167, 16-21.
- Costafreda, J.L. (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería) España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 515 pp.
- Costafreda, J.L.; Rosell, M. y Calvo, B. (2009). Estudio del comportamiento puzolánico de algunas zeolitas de Iberoamérica empleando el método de la conductividad eléctrica. *VII Congreso Ibérico y X Congreso Nacional de Geoquímica. Soria, España*, 10 pp.
- Costafreda, J.L.; Calvo, B. y Parra, J.L. (2011). Contribución de la zeólita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones. *IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Quito*, 10 pp.
- Dal Bosco, S.M.; Jimenez, R.S.; Carvalho, W.A. (2004). Aplicação da zeólita natural escolecita na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção. *ECLÉTICA Químico*. 29 (1), 47-56.
- Dal Bosco, S.M.; Jimenez, R.S.; Carvalho, W.A. (2005). Removal of toxic metals from wastewater by Brazilian natural scolecite. *Journal of Colloid and interface Science*, 281, 424-431.
- Duarte, A.C.P.; Monte, M.B.M.; Luz, A.B.; Leal, G.P. (2002). Aplicação de zeólita natural como adsorvente de metais pesados presentes em efluentes industriais. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Anais. Volume 2, pp. 424-430, Recife.
- Farjallat, J.E.S.; Suguio, K. (1966). Observações sobre a zeolitização em basaltos e arenitos. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 15 (3): 51-58.
- Ferreira Jr., P.D. y Gomes, N.S. (1999). Petrografia e Diagênese da Formação Uberaba, Cretáceo Superior da Bacia do Paraná, na Região do Triângulo Mineiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (2): 163-172.

- Gomes, N.S.; Fernández, S.M. (1995). Contribuição à petrografia e diagênese dos hialoclastitos da Formação Macau, Bacia Potiguar, RN, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 9 (2): 223-236.
- Haim, P.; Bernardi, A.; Rezende, N.; Salim, H.; Barros, F.S.; Paiva, P.R.P.; Werneck, C.G.; Monte, M.B.M. (2004). Teores e Extração de N, P e K pelo tomate cultivado em substrato com zeólita. FERTIBIO 2004, Lages-SC. 5 pp.
- Luz, A.B. (1994). Zeólitas: Propriedades e Usos Industriais. CETEM/MCT. Série Tecnologia Mineral, nº 68, 35 pp. (1994).
- Monte, M.B.M.; Middea, A.; Paiva, P.R.P.; Bernardi, A.C.C.; Rezende, N.G.A.M.; Baptista Filho, M.; Silva, M.G.; Vargas, H.; Amorim, H.S.; Barros, F.S. (2009). Nutrient release by Brazilian sedimentary zeolite. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 81, pp. 1-13
- Picanço, M.S.; Angélica, R.S.; Barata, M.S. (2011-a). Avaliação preliminar do emprego de arenito zeolítico da região nordeste do Brasil como material pozolânico para cimento Portland. *Cerâmica*, 57, 467-473.
- Picanço, M.S.; Angélica, R.S.; Barata, M.S. (2011-b). Atividade pozolânica de arenito zeolítico da região Nordeste do Brasil. *Revista da Escola de Minas* - n. 65, v. 2, pp. 1-8.
- Puente, B. (2006). Caracterización y aplicaciones de la muestra de zeólita, procedente de la Formación Corda, Cuenca de Parnaíba. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid. 39 pp.
- Rezende, N.G.A.M.; Angélica, R.S. (1997). Geologia das Zeólitas Sedimentares no Brasil. In.: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E.T.; Coelho, C.E.S. (eds) Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília. DNPM/CPRM, v. 4-B, Capítulo 18. CPRM, 193-213.
- Rezende, N.G.A.M.; Monte, M.B.M.; Paiva, P.R.P. (2008). Zeólitas Naturais. In.: Rochas & Minerais Industriais. Luz, A.B. e LINS, F.A.F. (editores). CETEM/MCT, 2ª edição, pp. 889-915.
- Sartori, P. (2009). Geologia e Geomorfologia de Santa Maria. *Ciência e Ambiente*, v.38, pp.19-42.
- Shinzato, M.C.; Montanheiro, T.J.; Janasi, V.A.; Negri, F.A.; Yamamoto, J.K. E Andrade, S. (2008). Caracterização tecnológica das zeólitas naturais associadas às rochas eruptivas da Formação Serra Geral, na região de Piraju-Ourinhos (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3): 525-532.
- Shinzato, M.C. (2007). Remoção de metais pesados em solução por zeólitas naturais: Revisão Crítica. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, 27-28 (1/2), 65-78.
- Zamzow, M.J.; Eichbaum, B.R.; Sandgreen, K.R.; Shanks, D.E. (1990). Removal of heavy metals and other cations from wastewater using zeolites. *Separation Science and Technology*, 25: 1555-1569.