

TRABAJO DE ASCENSO

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES PARA TOMA DE DECISIONES EN FOSFATOS SEDIMENTARIOS, MEDIANTE CORRELACIÓN DE CONDICIONES GENÉTICAS Y TÉCNICAS DE BENEFICIO MINERAL

Trabajo de Ascenso presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar a la Categoría de Profesora Asistente
En el Escalafón Universitario por la
Ingeniera Aurora Betzabé Piña Díaz

Caracas, septiembre de 2013

TRABAJO DE ASCENSO

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES PARA TOMA DE DECISIONES EN FOSFATOS SEDIMENTARIOS, MEDIANTE CORRELACIÓN DE CONDICIONES GENÉTICAS Y TÉCNICAS DE BENEFICIO MINERAL

Trabajo de Ascenso presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar a la Categoría de Profesora Asistente
En el Escalafón Universitario por la
Ingeniera Aurora Betzabé Piña Díaz

Caracas, septiembre de 2013

Dedicatoria

A ti Santa Bárbara... Siempre confiando en tu ayuda y fuerza... ¡cada vez que pido tu ayuda nunca me falta! ¡GRACIAS MI SANTA!

A Cira y Verónica

A mis queridos amigos y queridas amigas: Karla, José Luis, Mariela, Bea, Anabela, Gioconda, Vanesa, Adriana, Lalines, Annie, Yamirel... (Por aquellos buenos momentos en sus compañías...)

A mi ahijada Carla (siempre me acuerdo de vos... ¡Dios te bendiga siempre!)

Agradecimientos

A la Universidad Central de Venezuela, por tener para mí siempre tantas oportunidades

A mi tutora académica Profesora Alba J. Castillo, por su paciencia y amistad

A la colega profesora y amiga Katherine Silva

A la amiga profesora Gladys Martínez por su ayuda “en las cuestiones metodológicas” (y en otras tertulias de la vida...)

Al Profesor José Méndez Baamonde, Facultad de Ciencias-UCV

A mis tesistas: Karla, Marianne, Javier, José Esteban, Juan Luis, Yexi, Yuribay, Berardo, Orianna, Johan, Manuel, José Gabriel y Yosmary... que siempre me enseñan muchas cosas (¡ustedes no se imaginan cuánto...!)

Las oportunidades que Dios nos brinda son procesos de aprendizaje invaluable...
¡GRACIAS DIOS!

RESUMEN

Palabras claves: fosfatos, fosforitas, producción de fertilizantes, beneficio mineral, toma de decisiones mineras, ecología industrial.

Este trabajo explora las relaciones entre las condiciones geológicas de formación de fosfatos sedimentarios, los métodos de beneficio mineral que se emplean en su enriquecimiento para la producción de fertilizantes y la toma de decisiones en minería. Consta de cuatro (4) capítulos que van desde los aspectos sobre el origen de los fosfatos con énfasis en los sedimentarios, los atributos geoquímicos característicos de estos yacimientos, los métodos de beneficio mineral aplicados y el reconocimiento de criterios con variables para la toma de decisiones en minería.

Entre las principales relaciones están: la granulometría (grado y calidad de la liberación), composición del cemento (liberación), elementos químicos presentes (limitaciones en el uso del producto final), entre otras. Algunos aspectos importantes son: las acumulaciones de residuos (fosfoyeso), composición de los materiales y construcción de las escombreras, relaves (residuos del beneficio), condiciones de recuperación y cierre de mina.

La principal conclusión es para que un proyecto minero pueda tener éxito debe identificar las variables que aportan riesgo e incertidumbre, entre ellas las vinculadas con la geología y procesos mineros, de forma especial para este trabajo de investigación, el beneficio mineral. Entre las recomendaciones se tienen: continuar con más estudios en fosfatos sedimentarios y otras para el establecimiento de relaciones entre la geología (génesis), así como para establecer metodologías de beneficio mineral no sólo para fosfatos, sino en otros rubros minerales.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| Dedicatoria..... | iii |
| Agradecimientos..... | iv |
| RESUMEN..... | v |
| INTRODUCCIÓN..... | xii |
| FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | xiv |
| Planteamiento del problema..... | xiv |
| Formulación del problema..... | xiv |
| Objetivos..... | xv |
| Objetivo general..... | xv |
| Objetivos específicos..... | xv |
| Limitaciones..... | xv |
| Marco metodológico..... | xvi |
| Diseño de la investigación..... | xvi |
| Nivel de la investigación/Tipo de investigación..... | xvi |
| Diseño de la investigación..... | xvi |
| Población y muestra..... | xvi |
| Población..... | xvi |
| Muestra..... | xvi |
| Técnicas e instrumentos para la recolección de datos..... | xvii |
| Procesamiento de los datos..... | xvii |
| Metodología empleada..... | xvii |
| CAPÍTULO I..... | 19 |
| TEORÍAS SOBRE EL ORIGEN Y FORMACIÓN DE FOSFATOS SEDIMENTARIOS..... | 19 |
| Orígenes de los fosfatos..... | 20 |
| 1. Antecedentes de la investigación..... | 20 |
| 1.1. Fosforitas (Méndez, 2006)..... | 21 |
| 1.2. Formación de depósitos de fosfatos (Cook, 1984)..... | 23 |
| 1.2.1. Depósitos ígneos..... | 24 |
| 1.2.2. Depósitos de guano..... | 24 |
| 1.2.3. Depósitos sedimentarios..... | 27 |
| 1.3. Discusión de estas teorías en la formación de fosfatos..... | 33 |
| 1.4. Fosfatos sedimentarios (Boggs, 1995)..... | 36 |
| 1.4.1. Ocurrencia y distribución..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 1.4.2. Composición de los fosfatos | 37 |
| 1.4.3. Petrografía de fosfatos..... | 38 |
| 1.5. Tipos principales de depósitos de fosfatos..... | 39 |
| 1.6. Depósitos de fosforitas | 41 |
| 1.7. Mineralogía y geoquímica de los fosfatos | 43 |
| 1.7.1. Estudios acerca del origen de las fosforitas..... | 43 |
| 1.8. Ciclicidad en los episodios de formación de fosforitas..... | 46 |
| 1.9. Revisión sobre las hipótesis de depositación de fosfatos (Sheldon, 1980) | 50 |
| 1.10. Periodicidad de las fosforitas marinas | 52 |
| 1.11. Hipótesis de circulación oceánica y sedimentación de fosforitas | 53 |
| 1.12. Relación entre la fosfogénesis y la glaciación..... | 54 |
| 1.12.1. Provincias fosfogénicas ecuatoriales..... | 54 |
| 1.13. Relación entre las corrientes ascendentes del viento global y las corrientes ascendentes ecuatoriales | 55 |
| 1.13.1. Otros tipos de circulación vertical | 56 |
| 1.14. Resumen..... | 57 |
| 1.14.1. Hipótesis..... | 57 |
| CAPÍTULO II..... | 59 |
| PAPEL DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS EN LA FORMACIÓN DE FOSFATOS SEDIMENTARIOS..... | 59 |
| 2.1. Ciclo geoquímico marino del fósforo | 60 |
| 2.1.1. El fosfato oceánico disuelto y la solubilidad del F-carbonato-apatito | 61 |
| 2.1.2. La función de las corrientes ascendentes (<i>upwelling</i>) | 62 |
| 2.1.3. La inhibición de Mg-precipitación de apatito primario versus reemplazamiento..... | 64 |
| 2.1.4. Condiciones de pH y Eh..... | 65 |
| 2.1.5. La evidencia de elementos traza en apatito..... | 65 |
| 2.2. Ciclo biogeoquímico del fósforo (Sheldon, 1980)..... | 66 |
| 2.3. Mineralogía y geoquímica de fosfatos (Yaacov, 1984) | 68 |
| 2.3.1. Francolita | 69 |
| 2.3.2. Otros minerales | 70 |
| 2.3.3. Materia orgánica | 71 |
| 2.3.4. Elementos mayoritarios..... | 72 |
| 2.3.5. Elementos traza..... | 72 |
| 2.3.6. Isótopos estables..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| 2.4. Geoquímica marina en el origen de los fosfatos (Hensen et al., 2006) | 75 |
| 2.4.1. Adición y redistribución del fósforo en sedimentos marinos: formas de vinculación de las especies de P | 75 |
| 2.4.2. Formación autigénica de fosforitas | 77 |
| 2.5. Comportamiento de los elementos traza y ocurrencia en fosforitas | 78 |
| 2.5.1. Comportamiento de elementos traza en formaciones de fosfatos sedimentarios (Prévôt y Lucas, 1980) | 78 |
| 2.5.2. Elementos estudiados | 78 |
| 2.5.3. Discusión de los autores (Prévôt y Lucas, 1980) | 81 |
| 2.5.4. Importancia del conocimiento de la geoquímica de los elementos trazas (Altschuler, 1980) | 83 |
| 2.6. Enriquecimiento de elementos en fosforitas marinas | 83 |
| 2.6.1. Comportamiento de elementos coherentes: Zn y Cd; tierras raras | 84 |
| 2.7. Fijación de apatitos | 85 |
| 2.7.1. Fijación de otras fases | 86 |
| 2.7.2. Oro, bismuto y torio | 86 |
| 2.8. Impacto del ambiente de formación | 87 |
| 2.8.1. La pérdida de los elementos traza o normal en las fosforitas | 87 |
| 2.8.2. Relaciones geoquímicas características en fosforitas marinas | 88 |
| 2.8.3. Valores medios y distribución de elementos | 90 |
| CAPÍTULO III | 91 |
| MÉTODOS DE BENEFICIO MINERAL USADOS EN FOSFATOS SEDIMENTARIOS, DESECHOS GENERADOS E IMPLICACIONES AMBIENTALES | 91 |
| 3.1. Fosforitas israelíes (Axelrod, Metzger y Rohrlich, 1980) | 92 |
| 3.1.1. El ambiente sedimentario y su influencia en el mercado de las fosforitas | 94 |
| 3.2. Beneficio de Roca fosfática de Fosfatos (USDE, s/f) | 95 |
| 3.2.1. Planta de beneficio | 95 |
| 3.2.2. Consideraciones acerca del proceso húmedo | 96 |
| 3.3. Fósforo y fosfatos (Gruber, 2007) | 98 |
| 3.3.1. Beneficio mineral | 98 |
| 3.3.2. Procesamiento químico de la roca fosfática | 102 |
| 3.4. Residuos de minas de roca fosfática | 102 |
| 3.4.1. Consideraciones de las fosforitas para la gestión de residuos | 102 |
| 3.4.2. Mineralogía y geoquímica | 104 |
| 3.4.3. Minería, procesamiento y residuos hidrometalúrgicos | 105 |

| | |
|---|-----|
| 3.4.4. Influencia de mineralogía y geoquímica del fosfoyeso como residuo de la producción de fosfatos para fertilizantes | 109 |
| 3.4.5. Radioquímica de los residuos del proceso de beneficio de fosfatos..... | 110 |
| CAPÍTULO IV | 111 |
| CORRELACIÓN DE LAS CONDICIONES GENÉTICAS EN FOSFATOS SEDIMENTARIOS Y LAS TÉCNICAS PARA EL BENEFICIO MINERAL, E IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES PARA LA TOMA DE DECISIONES | 111 |
| 4.1. En cuanto a la genética de los fosfatos/roca fosfática sedimentaria | 112 |
| 4.2. En cuanto a la geoquímica de los fosfatos..... | 113 |
| 4.3. Técnicas de beneficio empleados en fosfatos sedimentarios, residuos generados e implicaciones..... | 115 |
| Relaciones entre la génesis de fosfatos y el beneficio mineral..... | 122 |
| 4.4. Construcción de relaciones geológicas-geoquímicas y de beneficio mineral, en fosfatos marinos sedimentarios | 122 |
| 4.5. Datos disponibles sobre ejemplo de fosfatos sedimentarios, en Venezuela | 125 |
| 4.6. Manejo de las variables. Herramientas para la toma de decisiones | 129 |
| 4.7. Investigaciones sobre efectos de la acumulación de metales en suelos por uso de fertilizantes | 138 |
| 4.8 Herramientas de ecología industrial y ciclo biogeoquímico del fósforo | 140 |
| 4.9 Reflexión final..... | 143 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 146 |
| REFERENCIAS CONSULTADAS | 152 |
| ANEXOS | 157 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|-------|
| Figura I: Diagrama sobre estructuración del trabajo de investigación en identificación de variables en el beneficio mineral para la toma de decisiones, para el caso de fosfatos sedimentarios | xviii |
| Figura 2.1.1 Secuencia de eventos en la formación de apatitos sedimentarios marinos | 64 |
| Tabla 2.3.1 Algunas posibles sustituciones en la estructura del apatito | 69 |
| Figura 3.2.1 Diagrama de flujo en minería de rocas fosfáticas | 98 |
| Figura 3.3.1 Diagrama de flujo de beneficio de una roca fosfática poco consolidada.... | 100 |
| Figura 3.3.2 Diagrama de flujo para el beneficio de una roca fosfática sedimentaria consolidada | 101 |
| Figura 3.4.1 Esquema de flujo simplificado sobre la minería de fosfatos y la planta de ácido fosfórico..... | 106 |
| Figura 4.3.1 Resumen para toma de decisiones en roca fosfática con respecto a su contenido de magnesio | 116 |
| Figura 4.3.2 Síntesis sobre la eficiencia de métodos en la elaboración de ácido fosfórico | 117 |
| Figura 4.3.3 Operaciones unitarias en el procesamiento mineral | 118 |
| Figura 4.3.4 Métodos de separación empleados | 118 |
| Figura 4.3.5 Procesos de beneficio mineral para roca fosfática poco consolidada..... | 119 |
| Figura 4.3.6 Procesos de beneficio mineral para roca fosfática consolidada..... | 119 |
| Tabla 4.4.1 Resumen de los aspectos relacionados entre las condiciones geológicas-geoquímicas y el beneficio mineral..... | 124 |
| Tabla 4.4.2 Relaciones encontradas que afectan procesos mineros y de beneficio mineral | 124 |
| Tabla 4.5.1 Composición química de elementos mayoritarios y minoritarios en las muestras tomadas de las capas A, B y C..... | 126 |
| Tabla 4.5.2 Composición química de elementos traza en las muestras tomadas de las capas A, B y C..... | 126 |
| Tabla 4.5.3 Grado de liberación (%) para el mineral de fosfato (apatito) presente en la muestra..... | 127 |
| Tabla 4.5.4 Composición química de la muestra de fosfato analizada | 128 |
| Figura 4.6.1 Diagrama de Espina de Pescado aplicada a las operaciones de beneficio del mineral fosfático | 130 |
| Figura 4.6.2 Sección del esquema de Ciclo de Vida, destacando operación de beneficio mineral..... | 131 |
| Tabla 4.6.1 Egreso por proceso y componente afectado | 132 |
| Tabla 4.6.2 Proceso y forma de afectación en los diferentes componentes socio-naturales | 132 |
| Figura 4.6.3 Localización de variables en el Espacio Riesgo que permita determinar a grosso modo variables controlables y observables | 133 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.6.3 Elementos, consecuencias y aspectos a tener en cuenta para establecer medidas de control | 137 |
| Tabla 4.7.1 Valores de S_i en suelos..... | 138 |
| Tabla 4.7.2 P_i y su relación con grado de contaminación | 138 |
| Tabla 4.7.3 Mención de autores por Cheraghi et al. (2011) sobre trabajos de contaminación de suelos por el uso de fertilizantes..... | 140 |
| Figura 4.8.1 Ilustración sobre el ciclo del fósforo..... | 141 |
| Figura 4.8.2 Diferentes visiones sobre los fosfatos que implican su génesis y uno de sus usos finales..... | 141 |
| Figura 4.8.3 Ciclos natural e industrial relacionados por el enfoque de ecología industrial..... | 143 |

INTRODUCCIÓN

Esta investigación sobre la correlación entre las condiciones de génesis y los métodos de beneficio mineral, es una necesidad para la toma de decisiones en minería. Para esta ocasión se ha hecho especial énfasis en los yacimientos de fosfatos sedimentarios, dada la creciente necesidad del uso de fertilizantes para la producción de alimentos en Venezuela (Plan de la Patria 2013-2019, objetivo 1.4). Esta investigación es exploratoria y que tendrá como base la información disponible sobre génesis y teorías de formación de fosfatos, así como los métodos de beneficio utilizados con énfasis en aquellos de origen sedimentario.

En la primera parte, compuesta de dos (2) capítulos: I y II, se desarrolla sobre el origen de los fosfatos incluidos los sedimentarios y del papel de la geoquímica en la formación de estas rocas. La idea de esta sección es proporcionar al lector información de cómo se conforman los fosfatos y como es su geoquímica característica.

La segunda parte (Capítulo III) sobre los métodos de beneficio de fosfatos sedimentarios, explora un poco acerca de cuáles son las técnicas de enriquecimiento y los procesos involucrados para la elaboración del ácido fosfórico, ingrediente principal para la manufactura de fertilizantes.

El Capítulo IV sobre la correlación e identificación de variables, que influyen en la toma de decisiones en las operaciones unitarias de beneficio mineral. Los resultados se basan en los aspectos que pueden aportar “coincidencias” en la información de importancia para la gestión en la producción de fertilizantes.

El empleo de herramientas de análisis como: cuadros de información, gráficas de Análisis de Ciclo de Vida, Diagrama Espina de Pescado y otras de la Ecología Industrial, permite la visualización e identificación del riesgo y la toma de decisiones en beneficio de fosfatos, en especial para fabricación de fertilizantes. Se indaga sobre distintos puntos de vista que ayudan a la determinación e

identificación de variables que aportan riesgo e incertidumbre a proyectos mineros en yacimientos de fosfatos sedimentarios.

Para ello, es posible apoyarse para fines ilustrativos en algunos datos disponibles de un ejemplo venezolano, pues estas variables serán diferentes de unos casos a otros, debido a que cada yacimiento es único (individuos) y tienen sus propias características a resolver. Se incorpora un poco de información sobre investigaciones en diferentes partes del mundo, sobre el uso de fertilizantes de fosfatos sedimentarios y casos de contaminación, con metales pesados y otros elementos, así como posibles afectaciones al ambiente y a los seres humanos.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Planteamiento del problema

En minería, se hace importante disminuir la incidencia de las variables que puedan aportar riesgo e incertidumbre al proyecto. Entre estas un grupo de esas variables son las llamadas internas y son las que tienen que ver con el yacimiento propiamente dicho, así como aquellas que están relacionadas con el método de explotación, en el cual se incluye el método de beneficio mineral. Desde hace algún tiempo, se viene haciendo énfasis en la importancia del conocimiento geológico del yacimiento y la eficiencia en la planificación de la explotación, y aunque pareciera que el beneficio de minerales está íntimamente relacionado con la producción, hay una gran tendencia a separar las operaciones unitarias en mina de aquellas en planta.

Un mejor conocimiento geológico tiene importantes implicaciones en las etapas de seleccionar y planificar la producción en planta, pues permiten disminuir las brechas en las probabilidades de las incertidumbres y riesgos, en la que encontramos que la variable beneficio mineral es directa (o dependiente) de la variable geología (variable independiente). Esta es una de las razones para desarrollar estudios que admiten correlacionar estas variables y encontrando que tiene una pertinencia importante en la minería, con la cual se asegura la viabilidad en la satisfacción de necesidades sociales y obtener ganancias en la venta de productos finales que proceden de planta. La segunda razón, es debida a la demanda nacional de fosfatos para fertilizantes, en pro del desarrollo de la agricultura y del fortalecimiento de la meta de soberanía agroalimentaria, que permitan el adelanto adecuado y satisfactorio de la minería y el aprovechamiento idóneo de los recursos minerales de fosfatos que tenemos en el país.

Formulación del problema

¿Cuál es la correlación existente entre las condiciones de génesis de fosfatos sedimentarios y los criterios para seleccionar el método de beneficio mineral,

que permitan hacerlo de manera óptima y coadyuve en la toma de decisiones en minería?

Objetivos

Objetivo general

Identificar variables mineras para la toma de decisiones sobre fosfatos sedimentarios, mediante correlación de condiciones genéticas y técnicas de beneficio mineral.

Objetivos específicos

- Explorar sobre los estudios y teorías concernientes a las condiciones genéticas y geoquímica presente en fosfatos sedimentarios.
- Indagar sobre los estudios recientes acerca de los métodos empleados en proyectos o actividades mineras para el beneficio mineral en fosfatos sedimentarios.
- Establecer la correlación entre los criterios sobre las condiciones genéticas de los fosfatos sedimentarios y los métodos de beneficio mineral.
- Determinar las variables que mediante la correlación anterior y el empleo de herramientas de análisis, coadyuven en la toma de decisiones en minería de fosfatos sedimentarios.

Limitaciones

Entre las principales limitaciones para el logro de los objetivos propuestos para esta investigación, se tienen los siguientes:

1. Disponibilidad de la información acerca de las teorías de formación, geoquímica que intervienen en la depositación de fosfatos sedimentarios, así como aquellos concernientes a los procesos aplicados para el beneficio de minerales en estas rocas.
2. Que la información encontrada (punto 1) esté actualizada y que se pueda considerar vigente.

3. Que exista la cantidad de información apta para establecer suficientes relaciones entre la génesis y el beneficio del mineral fosfático sedimentario.

Marco metodológico

Diseño de la investigación

Para la realización de este trabajo se requiere establecer el tipo y diseño de investigación de la que se trata.

Nivel de la investigación/Tipo de investigación

El tipo de investigación es exploratorio, pues aunque existen estudios acerca del origen de los fosfatos sedimentarios, así como, de métodos para su beneficio mineral, los trabajos que relacionan lo primero con lo segundo son muy pocos y, ninguno referido específicamente a casos de rocas fosfáticas venezolanas.

En el tipo de investigación exploratoria, lo que se pretende es encontrar cómo es la situación de las variables de estudio, incluyendo la presencia o ausencia de «algo», la ocurrencia de «fenómenos», entre otros.

Diseño de la investigación

Este trabajo se corresponde a una investigación de tipo no experimental, con diseño longitudinal descriptivo correlacional, donde se hacen revisiones de algunas de las teorías existentes sobre la formación de fosfatos y sus condiciones geoquímicas, así como algunos trabajos donde se explican los métodos empleados en el beneficio mineral para estos casos de yacimientos estudiados.

Población y muestra

Población

La población está compuesta por aquellos estudios geológico, geoquímicos y sobre beneficio mineral referidos a fosfatos sedimentarios del mundo.

Muestra

La muestra está constituida por aquellos estudios geológicos, geoquímicos y de beneficio mineral referidos a fosfatos sedimentarios, que se encuentran disponibles por diversos medios de información, bibliográfica, hemerográficas e

informática-virtual. No se incluyen en este trabajo los trabajos o estudios que por diversas razones no se encuentren disponibles para ser incluidos durante el desarrollo de esta investigación.

Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Todas las fuentes que se usaron en esta investigación son secundarias, esto debido a que son otros autores los que han hecho las pruebas correspondientes y que han considerado necesarias para darle validez a sus argumentos. Dado que este trabajo es exploratorio, la técnica que se emplea para la recolección de los datos es un análisis de documentos (artículos o *papers*) disponibles en diversos medios de información, incluyendo la internet.

Procesamiento de los datos

En el procesamiento de los datos, en este estudio, se sistematizan los datos geológicos y geoquímicos recopilados y se establecen relaciones entre uno o más aspectos con miras a la obtención de criterios para la toma de decisiones en minería. Una de las limitaciones en el procesamiento de los datos es que no se tienen suficientes criterios para identificar variables que pueden resultar determinantes, o tener influencia, en estas correlaciones entre variables independientes y dependientes, insumos y procesos.

Metodología empleada

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se han dispuesto de los siguientes pasos, que se muestran a continuación en la siguiente figura I.

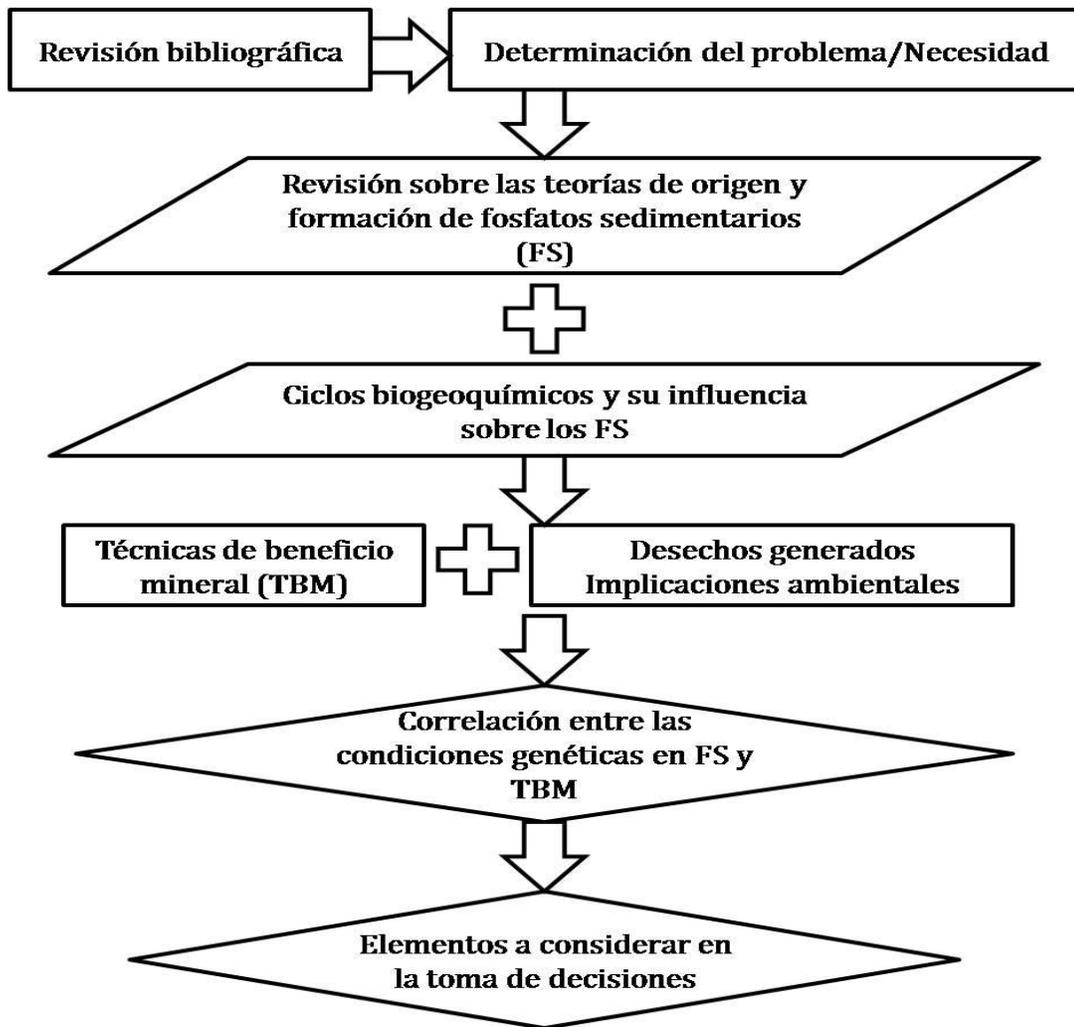


Figura I: Diagrama sobre estructuración del trabajo de investigación en identificación de variables en el beneficio mineral para la toma de decisiones, para el caso de fosfatos sedimentarios. Elaboración propia.

CAPÍTULO I

TEORÍAS SOBRE EL ORIGEN Y FORMACIÓN DE FOSFATOS SEDIMENTARIOS

En esta sección se exponen las diversas teorías y estudios para la comprensión acerca de los orígenes de fosfatos sedimentarios.

Orígenes de los fosfatos

1. Antecedentes de la investigación

1. Kolodny, Y. (2003) ***Phosphorites***. En “*Encyclopedia of Earth Sciences Series*”. Springer Link. El capítulo de las fosforitas se refiere a un estado del conocimiento, que realiza el profesor Kolodny, el cual incluye origen, geoquímica, paleoclimas y economía de rocas fosfáticas.
2. Axelrod, Metzger y Rohrlich (1980) ***The petrography of Israeli Phosphorites as related to their beneficiation***. En “*Marine Phosphorites*”. SEPM. EEUU. Los resultados de esta investigación están basados en el rol que juega el beneficio de minerales en el éxito del desarrollo económico de las fosforitas del depósito de Negev en Israel.
3. Soudry y Yaacov (2001) ***Diagenetic trends of fluorine concentration in Negev phosphorites, Israel: implications for carbonate fluorapatite composition during phosphogenesis***. En *Sedimentology (the Journal of the International Association of Sedimentologists)*. Volumen 48, Número 4, agosto 2001. Este estudio es complemento de otros en estos yacimientos israelíes y lo que busca es encontrar más evidencias científicas medibles acerca de la información que dan los elementos presentes y sus relaciones con la génesis del mismo.
4. Altschuler, Z. (1980) ***The Geochemistry of trace elements in marine phosphorites. Part I: Characteristics abundances and enrichment***. En “*Marine Phosphorites*”. SEPM. EEUU. En este trabajo se establecen algunos parámetros de evaluación complementaria para fosfatos marinos que obedecen a dictámenes económicos y científicos.
5. Bentor, Y. (1980) ***Phosphorites-The unsolved problems***. En “*Marine Phosphorites*”. SEPM. EEUU. En este estudio se hace una revisión de las

investigaciones en fosforitas, con énfasis en los principales descubrimientos hechos en el siglo XX.

1.1. Fosforitas (Méndez, 2006)

Para este autor, las fosforitas marinas se encuentran controladas por las corrientes surgentes o ascendentes (*upwelling*) y la escasa sedimentación en la zona de la plataforma. Las corrientes del tipo *upwelling* provienen de las profundidades de la cuenca, son frías y ricas en nutrientes, entre los cuales se encuentra el fósforo, incidiendo en una alta productividad orgánica y desarrollo masivo de fitoplancton. De esta forma se originan sedimentos ricos en materia orgánica y agua deficiente en oxígeno en el fondo marino. En forma ocasional hay mortandad de peces por el “envenenamiento” del agua derivada de la expansión del fitoplancton. Esto contribuye al aumento de la materia orgánica y la deficiencia de oxígeno.

Es posible que algo de fosforita se pueda formar por precipitación directa del fósforo en forma coloidal. Otros estudios indican que hay fosforitas formadas por reemplazamiento. La materia orgánica en el sedimento libera fosfato que puede precipitar en peloides, coprolitos y reemplazar los fragmentos esqueléticos de carbonato, sílice y fango sedimentario en la superficie marina. El fitoplancton es clave al transportar el fósforo de las corrientes ascendentes, absorbido entre los nutrientes, hasta la materia orgánica en el piso oceánico.

Con frecuencia se designa como fosforitas a los sedimentos ricos en fósforo formados en las plataformas y taludes continentales (Ver también Cook, 1984 y Boggs, 1995), considerándose como fosfatos primarios. Los fosfatos secundarios se forman por el reemplazamiento parcial del sedimento original por fosfatos, lo cual generalmente ocurre en carbonatos. Durante el Cretácico Tardío, se formaron grandes secuencias sedimentarias de calizas bituminosas que originaron lo que se conocen como depósitos de “roca madre”, generadoras de

hidrocarburos. En Venezuela, estos depósitos se conocen como las formaciones La Luna y Querecual.

Durante gran parte del tiempo de su formación, las corrientes ascendentes contribuyeron a crear las condiciones anóxicas requeridas para la preservación de la materia orgánica. Hacia el tope de la Formación La Luna, Méndez (2006) considera que las corrientes ascendentes fueron constantes y dieron origen a la acumulación de sedimentos ricos en fosfatos, conocidos actualmente como el Miembro Tres Esquinas. Las fosforitas de este miembro tienen fósiles de foraminíferos planctónicos, fragmentos de huesos, bivalvos, briozoarios, equinodermos y, probablemente, algas y esferulitas (ooides).

En el Mioceno, en gran parte del mundo, las corrientes ascendentes fueron las responsables del origen de las formaciones de fosfatos de ese momento. En las calizas y arenas calcáreas del estado Falcón, como en las formaciones Riecito y Capadare, depositadas durante el Mioceno, los carbonatos de los intervalos superiores fueron reemplazados por fosfatos, en un proceso de fosfatización secundaria (como el referido por Cook y Shergold, 1980; citado por Cook, 1984). Se estima que el fósforo provino de los depósitos originados por los excrementos de las aves en ambientes de bancos e islas de plataformas situadas en la costa. Este reemplazamiento ocurre en la matriz calcárea y en fósiles de algas coralinas, foraminíferos bentónicos, equinodermos, pelecípodos, briozoarios, entre otros. La evidencia no es clara acerca de la presencia de corrientes ascendentes, aun cuando no se descarta que pudiera ser producto de un proceso mixto.

Para el uranio, la proporción de este elemento es mayor en los fosfatos primarios, lo cual permite distinguir los fosfatos primarios de los secundarios. Actualmente, en las plataformas de la isla de Margarita y del estado Falcón, en Venezuela, existen corrientes ascendentes, relativamente moderadas que están enriqueciendo en fósforo los sedimentos de ambas locaciones. De la misma

forma, las costas del Perú presentan uno de los mejores ejemplos del Holoceno (actualidad) en enriquecimiento de los sedimentos por fósforo debido a las corrientes ascendentes o *upwelling* (como lo refiere Bentor, 1980).

1.2. Formación de depósitos de fosfatos (Cook, 1984)

El fósforo está presente en más rocas en menores cantidades en el rango de las trazas en una cuantía promedio de P_2O_5 en 0,04% en areniscas hasta 0,4% en rocas ígneas intermedias (McKelvey, 1973). El límite bajo para designar las rocas fosfáticas depende de la naturaleza de las rocas y de la tecnología disponible, donde rocas con contenidos de fosfato por debajo de 4% de P_2O_5 puede constituirse en roca fosfática (roca fosfática de fósforo), en algunas circunstancias. Las rocas fosfáticas ocurren en depósitos de rangos en tamaño desde unas pocas a muchos billones de toneladas. El fosfato es casi invariable en la forma del apatito—generalmente fluorapatito $Ca_5(PO_4)_3F$, o fluorapatito carbonato que Altschuler (1973) representada con la fórmula aproximada: $Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(CO_3)_x(F,OH)_{2+x}$. Menos común es la ocurrencia de minerales como: *crandallita* ($CaAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$), *vivianita* ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$), *brushita* ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) y *whitlockita* ($Ca_3(PO_4)_2$).

En algunos casos los fosfatos son re-movilizados con el tiempo, el cual es re-precipitado hasta formar un depósito de fosfatos secundarios (*phoscrete*). En otras circunstancias, el alto grado de la depositación resulta de la disolución de más componentes solubles, especialmente carbonatos, permitiendo la formación de un fosfato residual.

El trabajo de Cook (1984) examina el espacio y dónde se encuentra posiblemente la distribución temporal de los tres (3) tipos de fosfatos (ígneo, guano y sedimentario). Los depósitos sedimentarios han sido examinados en gran detalle, no solo debido a que éstos corresponden a las mayores ocurrencias mundiales de producción de roca (minera) y las mayores reservas mundiales de roca fosfática.

1.2.1. Depósitos ígneos

Los depósitos fosfáticos están geográficamente ubicados justamente extendidos en el rango de edad entre el Precámbrico y el Terciario. Esto está asociado con las rocas plutónicas alcalinas intrusivas, generalmente nefelíticas sienitas, o carbonatitas, o complejos ultrabásicos-alcalinos, ocurridos principalmente en cuerpos bastante llenos y complejos anillados. Muchas de estas asociaciones de depósitos fosfáticos son pequeñas y no son comerciables/económicamente recuperables. Sin embargo, algunos de estos depósitos son minados y proveen cerca del 16% del total de la roca fosfática mundial (Howard, 1979). Por su parte Notholt (1979) estimó que la producción mundial aproximada de roca fosfática de origen ígneo (para esa época) era de unas 6.000 toneladas, a un promedio de 4% de P_2O_5 , o más.

Otro factor adicional en la formación de muchas rocas fosfáticas ígneas es que temporal y especialmente la disolución de carbonato de calcio, viene acompañada en algunos casos por la disolución y re-precipitación del apatito (formación de *karst*).

1.2.2. Depósitos de guano

Depósitos de cuevas

Un pequeño número de depósitos de fosfatos, con reservas de rocas fosfáticas, son ocurrencias en cavernas y pueden tener desde unas pocas miles toneladas, o menos. Estos son principalmente formados por la acumulación de excrementos de murciélagos. Mucho menos común, son los fosfatos derivados por excrementos de aves, o acumulaciones remanentes (restos) de pequeños vertebrados.

Estos depósitos se pueden encontrar en ciertas áreas: primero, es evidente que la mayoría de éstos ocurren en latitudes relativamente bajas y, sobre todo, en aquéllas que no sean mayores a los 50°; el segundo factor es la aridez; esto es importante no solo porque éste puede ser un factor significativo en el flujo de aguas subterráneas, que puede llegar a ser insuficiente en zonas áridas para la

producción a largo plazo de cavernas pero, también porque en muchos de estos lugares, la población de insectos y la cubierta vegetal es insuficiente para soportar una gran población de murciélagos. El otro factor temporal, es que esta especie animal no aparece sino después del Terciario temprano. La consecuencia es que, los mejores depósitos en este tipo de cavernas aparecen posteriores al Terciario.

Guano insular

Los depósitos insulares de fosfatos son formados directa o indirectamente por la acumulación de heces fecales de aves. Las reservas de guano insular constituyen una porción insignificante (hablando numéricamente con respecto a las otras ocurrencias minerales) de las reservas de roca fosfática mundial y muchas ya han sido extraídas (en el pasado). Sin embargo, debido a que son relativamente fáciles de minar y de poseer gran tenor; estos aportaban para el año 1984 cerca del 2% de producción mundial de roca fosfática. Hutchinson (1950) describe dos (2) tipos (de depósitos insulares): los depósitos de pequeñas y grandes islas.

Los depósitos de pequeñas islas (aquellas que se encuentran a pocos metros del nivel del mar) son resultado de la disolución del nitrógeno de guano fresco que forma delgadas acumulaciones usualmente en capas cementadas y costras, sobre los bajos cercanos a las islas de coral (Warin, 1968). Esto puede causar alguna fosfatización del material coralino. Muchos de estos depósitos son bastante jóvenes, entre 3 000 y 5 000 años (antes del presente). Los depósitos de los océanos Pacífico, Índico y el mar Caribe aunque pequeños, ya fueron trabajados, debido a que se reconoció la facilidad de su explotación y el alto grado de su roca fosfática en más del 40% de P_2O_5 .

Los yacimientos de las grandes islas ([llamados así a aquellos que se] encuentran a 50 m o más sobre el nivel del mar), son mucho más extensos y mucho menos comunes. Estas son más viejas que las anteriores pequeñas islas como en unos 800.000 años (Veeh, 1979). Ejemplos de éstas son: Nauru en el océano Pacífico y

la isla de Pascua en el océano Índico. Estos depósitos se forman en parte por la fosfatización secundaria de la roca madre, donde ésta está generalmente compuesta de material coralino y se producen los minerales de fosfato de calcio de forma de apatito o más raramente *whitloquita*. Para estas ocurrencias minerales se ha establecido que el origen claro es residual. La solución fosfática se cree es derivada de las acumulaciones de guano, como las que cubren las islas. La carencia de grandes colonias de nidos de aves en la actualidad, la ausencia de guano moderno y la falta de remanentes fósiles de aves en estos depósitos, es utilizada como evidencia para justificar la causa del origen de estas acumulaciones como marina, en vez de biológica, en este caso aviar, como pasa por ejemplo en la isla de Pascua. Hay argumentos como el de Bourrouilh (1980) que han cuestionado la validez de las consideraciones de la hipótesis del guano para el Depósito de Nauruan; esto debido a que estos depósitos insulares probablemente se formó de manera indirecta, o menos común de manera directa, como resultado de la acumulación de excrementos de aves.

Los depósitos insulares son más comunes en climas cálidos áridos o áreas semi-áridas con grandes poblaciones de aves, tanto en el presente como en el pasado reciente.

La cronología de los depósitos de guano insulares es pobremente conocida en la actualidad. Esto se debe a dos (2) factores menores que son determinantes en causar la periodicidad en la formación de las acumulaciones-variaciones en la fertilidad de los océanos circundantes y los cambios en el nivel del mar. Las costas afuera de Perú y Chile, por ejemplo, producen perturbaciones en la fertilidad marina. Uno de los más importantes cambios en el desarrollo de un flujo costero cálido al sur son las corrientes conocidas como El Niño. Este fenómeno produce un espectacular incremento en las temperaturas del agua y está asociado no solo a una masiva mortalidad de fauna marina, sino a un aumento del alimento disponible para las aves.

1.2.3. Depósitos sedimentarios

Los depósitos fosfáticos sedimentarios (fosforitas) son por mucho los más importantes recursos mundiales de roca fosfática. Estos contribuyen (para el año 1984) con cerca del 82% de la producción total de fosfatos y 95% o más de las reservas mundiales de fosfatos (Howard, 1979). Las reservas de fosforitas son probablemente más de 200 mil millones de toneladas (1984) de roca fosfática, lo que era equivalente a cerca de 30×10^9 toneladas de P_2O_5 . Los mayores productores mundiales en depósitos sedimentarios de fosfato son Marruecos y Estados Unidos. Sin embargo, las fosforitas se encuentran en todos los continentes y en edades están en el rango del Precámbrico al Presente, aunque los depósitos más comunes son de edad Fanerozoica.

En su mayoría, las fosforitas son ocurrencias de capas que van en el rango de espesores de pocos centímetros a decenas de metros y están compuestos de granos (generalmente el término empleado es *pellets*) de carbonato fluorapatito cripto-cristalino, o colofano. Muchos de los granos son bien redondeados, con diámetros superiores a 1 mm. [Algunos granos] fueron originalmente cuando fueron fosfatizados. Los granos oolíticos están presentes en muchos depósitos y pueden representar unos precipitados primarios pero pueden constituirse en una pequeña proporción (cerca del 3%) de los componentes fosfáticos totales en muchos depósitos. Otras formas de colofano incluyen nódulos, algunos de los cuales pueden tener tamaños superiores a las decenas de centímetros de diámetro y las fosforitas lutíticas (algunas formas de microsforitas, lutitas de colofano y fosfolutitas) cuando está compuesta de granos muy finos cuya constitución principal es colofano (de Keyser y Cook, 1972; Ilyin y Ratnikova, 1981). El contenido fósil de fuentes marinas y otras evidencias comprueban su origen. Las fosforitas estromatolíticas, donde las algas laminares están compuestas de colofano, son bien conocidas. Este tipo de fosforita es especialmente común en el Precámbrico (Bushinski, 1969; Banerjee, 1971),

aunque existen también ocurrencias de este tipo en el Fanerozoico (Southgate, 1980; Krajewski, 1981).

Por muchos años, la teoría más popular para explicar la formación de las fosforitas fue la llamada Teoría de las Corrientes Ascendentes de Kazakov (1938). En esencia, la teoría invoca a las frías profundidades de aguas marinas ricas en fósforo, como el origen del P en las fosforitas. Las aguas marinas profundas ascienden a la superficial zona fótica y en la teoría original se cree que el apatito es directamente precipitado de la columna de agua ascendente y éste se va acumulando en granos de fosfato sobre la plataforma. En investigaciones de Murray y Renard (1891) estos autores notaron que las fosforitas que se conocen se producen al oeste de los continentes costa afuera, percatándose que son precisamente las áreas donde actúan las fuertes corrientes ascendentes oceánicas en la actualidad, como en el caso de la República de Namibia.

El descubrimiento de Kolodny (1969), de más fosforitas costa afuera, representa vestigios elevados, con algunas dudas, donde el modelo de las corrientes ascendentes parece explicar lo sucedido de manera apropiada. Subsecuentemente, el descubrimiento indudable en fosforitas modernas costa afuera al suroeste de África (Baturin et al., 1972) y de Perú (Burnett y Veeh, 1977; Burnett, 1977) proveyó de nuevos apoyos para reforzar la importancia de la teoría de las corrientes ascendentes, aunque no necesariamente para el mecanismo original propuesto por Kazakov, que incluye la precipitación inorgánica del apatito. Sin embargo, las fosforitas también ocurren costa afuera en otras zonas que incluyen África, Norte América y Australia.

Las fosforitas modernas han contado con muchos estudios y se han encontrado en ambientes de plataformas abiertas, donde el agua puede llegar a tener profundidades de entre 100 y 500 m. Muchos de éstos, son depósitos de fosforitas nodulares incrustadas en lecho duro. Como consecuencia, aparte del origen de las antiguas fosforitas nodulares asociadas con superficies de

disconformidades, estas no constituyen una analogía directa de depósitos fosfáticos sedimentarios antiguos, cuando son predominantemente rocas fosforitas granulares (*grainstones*) o más raramente, lutitas fosforíticas. Birch (1980) propuso que en la plataforma externa el proceso primario para la formación de fosforitas es el reemplazamiento de carbonato cálcico por fosfato cálcico. Él ha sugerido que dentro de los estuarios y lagunas (de barrera) en adyacencia de las costas las fosforitas-*packstones* fueron formadas por precipitación diagenética temprana de apatito y la laminación de los fosfatos *mudstone* por precipitación en la columna de agua.

En primer lugar, como resultado de los estudios en antiguas fosforitas, Cook (1976a) propuso una secuencia de sus estados para producir las fosforitas *grainstones*:

- a) Flujo de nutrientes en aguas enriquecidas, generalmente por corrientes ascendentes, dentro de la zona marina poco profunda con una columna de agua máxima de hasta 500 m, pero con una considerable poca y más lenta tasa de depositación de sedimentos terrígenos, y en un clima árido-cálido.
- b) Desarrollo de una biota prolífica.
- c) Formación de sedimentos de fondo anóxicos ricos en orgánicos, los cuales han perdido C, N y H producto de la muerte de organismos, que ocurren antes o inmediatamente después del soterramiento.
- d) El agua intersticial rica en fósforo debajo de la interfase agua/sedimentos por disolución (*leaching*) del fosfato de organismos remanentes y como una consecuencia del bajo pH, así como una alta alcalinidad en los sedimentos.
- e) Parches localizados de apatito desarrollados por la fosfatización de los sedimentos en la presencia de poros rellenos con agua rica en fosfatos o, en algunos instantes, por precipitación del apatito de las aguas contenidas en los poros. En la fosfatización diagenética, se puede remover de los sedimentos lodosos, silíceos o calcáreos. Los *pellets* fecales fosfatizados son muy comunes en este tipo de depósitos.

f) El retrabajo de sedimentos ocurren como respuesta a los cambios en los patrones de las corrientes o de los cambios relativos en el nivel del mar. Los gruesos parches de sedimentos fosfatizados remanentes quedan como revistiendo los depósitos y la fina matriz resalta fuera, dando como resultado un extensivo sobre gradado de sedimentos fosfáticos dentro de una gran cantidad de fosforitas.

Puede haber otros ambientes con alta productividad generada por otras formas diferentes a los sistemas de corrientes oceánicas ascendentes, como son las que se dan en los estuarios y que no pueden ser ignorados.

Es el caso de las fosforitas estromatolíticas que se han formado por una cantidad de posibles mecanismos diferentes que pueden ir desde la precipitación bioquímica directa y/o la fijación del fosfato por cianobacterias, con poco o ningún re-trabajo mecánico.

Utilizando la Cuenca de Georgina (Australia) como ejemplo, Cook y Shergold (1980) desarrollaron empíricamente una serie de prerequisites para los depósitos de fosfatos que incluían: una edad entre 650 y 540 m.a.; una baja paleo-latitud; una ancha playa (o línea costera) baja y curva que flanquea buena parte de la línea costera; condiciones de alta productividad en la región en general; alta sedimentación marina en la línea costera con una mínima entrada de sedimentos terrígenos; una muy bien definida transgresión marina; y una adecuada trampa, bien sea en una bahía, estuario o de un complejo banco-carbonático. Esto es evidencia simple de que para que, se depositen las fosforitas sedimentarias es necesaria la conjunción de una larga lista de factores, muchos de ellos relativos. Se hace necesario además, tener en cuenta varias escala de factores que abarquen desde una escala geográfica o un intervalo de tiempo potencialmente favorable de un sistema fosfogénico a gran escala, con el detalle geográfico de una cuenca o evento corto particular y relativo que puede producir, como en la actualidad, depósitos de fosforitas.

Cook y McElhinny (1979) han considerado que la tectónica de placas ha jugado un importante papel donde pueden o no formarse las fosforitas. Estos autores notaron que la fosfogénesis no está directamente relacionada con las fases de vulcanismo, orogénesis o evaporitas, pero todas ellas están asociadas a las placas tectónicas, así como a los procesos de convergencia y separación de las mismas. El vulcanismo y la orogénesis están involucrados con la fase inicial del *rifting* (ruptura); las evaporitas en el estado de formación del valle del *rift* y las fosforitas son formadas una vez que éste está completamente roto y ha permitido la entrada del mar. Sin embargo, los autores también han propuesto que la química oceánica tiene gran significancia en la formación de fosforitas. La distribución de hierro en los mares precámbricos especialmente alrededor de 2.200 m.a. tuvo repercusiones importantes en la disposición del P en la hidrósfera durante esa época. Ambos están relacionados con las corrientes ascendentes, debido a que éstas contribuyen tanto en la formación del mineral de hierro como en las fosforitas. Estos investigadores han dicho además que los períodos glaciares pueden haber sido importantes debido a la intensificación de las corrientes ascendentes durante estas épocas y tal vez también debido al comienzo de las glaciaciones, pudo haberse iniciado un retroceso en el océano. Sheldon (1980) desarrolló un poco más este modelo, usando asimismo la hipótesis propuesta por Fischer y Arthur (1977) para explicar una secular variación en las características de sedimentos pelágicos. En esencia, la hipótesis de Sheldon (1980) está basada en:

- 1) El océano profundo ha contribuido en una geoquímica mayor por el hundimiento de reservorios para el fósforo, desde hace 2.200 m.a. hasta la actualidad.
- 2) El contenido de fósforo en acumulaciones hundidas, que suben durante algunos periodos de baja mezcla vertical y declinan durante periodos de rápida mezcla vertical.

- 3) El ciclo de circulación vertical en el océano está correlacionada con los ciclos de estadios de altos y bajos niveles del mar.
- 4) La ascendente mezcla vertical en los niveles más superficiales ocurren en principio por las corrientes ascendentes ecuatoriales y las corrientes ascendentes provocadas por el cinturón de viento mundial.

De acuerdo a estas premisas, Sheldon (1980) consideró que:

- 1) Los episodios de fosfogénesis ocurren a los inicios de episodios de mezclas verticales, después de una estabilidad oceánica, durante el cual el contenido de fósforo se ha hundido y acumulado en la zona profunda del mar, hasta formar altos niveles.
- 2) Los mayores episodios de fosfogénesis del Cretáceo al temprano Terciario, son debidos a los fósforos que han sido sacados del mar profundo y hundido principalmente por las corrientes ascendentes ecuatoriales, al tiempo de altos niveles y mares cálidos.
- 3) La mayoría de los episodios de fosfogénesis del Cámbrico, Ordovícico, Pérmico y Mioceno son llevados por la remoción del fósforo del piso oceánico acumulado y hundido, en principio, por las corrientes ascendentes producidas por el cinturón de viento mundial, al tiempo en que se produce la transición (relacionado con episodios glaciares) debido a los altos niveles del mar, océanos cálidos a bajos niveles y océanos fríos.

Estas hipótesis generales aparecieron para explicar la distribución de los depósitos de fosfatos en el tiempo. Otros autores, como Arthur y Jenkyns (1981) cambiaron algunos aspectos de esta teoría. Ellos también consideraron que la génesis de las fosforitas establece una correlación como una vía general cuando el nivel del mar está elevado, el clima cálido, además de ser influenciado por la tectónica de placas y la migración de los continentes. Sin embargo, esta correlación entre la génesis de las fosforitas con la transgresión ha resultado en la formación de plataformas ricas en nutrientes cuando hay transgresión marina.

La consideración acerca de la importancia de los cambios en el nivel del mar para la fosfogénesis está dirigida a la asociación entre el ascenso y caídas de los niveles marinos con las glaciaciones. Dada la rapidez de éstos, pueden de hecho ser especialmente importantes para la formación de depósitos de fosfatos de manera particular, si aparece lo que se conoce, en muchos depósitos de acumulaciones detritales, de granos de fosfatos. Aunque este punto está fuera del trabajo de Cook y McElhinny (1979), donde la mayoría de los periodos de fosfogénesis aparecen en el Mesozoico y Cenozoico temprano, no están totalmente relacionados con episodios glaciares. Pitman (1978) ha notado que hay un número de otros caminos en los cuales las relativas subidas o bajadas del nivel del mar pueden ocurrir. Estos incluyen, las inundaciones de cuencas en pequeños océanos, desecación, cambios en la tasa de subsidencia de los mares desviados a las afueras de la plataforma y los cambios en el volumen de los sistemas de *ridge* mid-oceánicos.

Por tanto, mientras las placas tectónicas solo tienen relación indirecta entre los cambios en el nivel del mar y las glaciaciones (la migración de los continentes a locaciones en altas latitudes), algunos de los otros mecanismos propuestos por Pitman, sin duda, están más directamente asociadas con los procesos de las placas tectónicas como el inicio del *rifting*, el desarrollo de *ridge* mid-oceánicos o un cambio en la tasa de difusión en el piso oceánico. Esto produce relativamente poco cambio en el nivel del mar y es poco probable que sea responsable de otras tendencias, como por ejemplo, cambios a escalas de 10^7 años o más. Por tanto, mientras algunos eventos pueden ser importantes en el desarrollo de una ancha cima en fosfogénesis, como muestran muchas experiencias alrededor del límite Precámbrico-Cámbrico, esto no parece tener un significado real para una relativa corta vida como la cima del Mioceno.

1.3. Discusión de estas teorías en la formación de fosfatos

Parece que para la formación (de los fosfatos) está clara la preferencia hacia ciertas zonas y tiempos geológicos particulares. Algunas de las características

más importantes, son responsables directos de la influencia en la distribución de los depósitos de fosfatos, los cuales pueden ser resumidos de la siguiente manera:

Características espaciales

- Latitud (10^6 - 10^7 km²), restringidas a bajas latitudes (0°-40°).
- Zona climática (10^6 - 10^7 km²), zona árida cálida (asociadas con corrientes ascendentes).
- Localización geográfica (10^6 - 10^7 km²), oceánicos (montañas marinas); plataformas continentales; mares epicontinentales; bahías costeras (10^1 - 10^5 km²)
- Localización estructural (10^2 - 10^3 x 10^1 - 10^3 km²), asociado con fases tempranas de apertura (océanos Este-Oeste) o fases oceánicas tardías (océanos Norte-Sur); (algunas) transformaciones pueden afectar la configuración costera y que pueden producir montañas marinas (*seamounts*), basamentos con gran importancia; bahías costeras.

Características temporales

- Periodos grandes de expansión del suelo oceánico (10^7 - 10^8 años), pueden resultar en una nueva vía marina de fosfogénesis; aumentando el P que entra al sistema a través de más fumarolas, pero está balanceado por la absorción de fósforo por los basaltos del suelo oceánico.
- Episodios orogénicos (10^7 - 10^8 años), aumenta la entrada de fosfatos durante los períodos orogénicos seguidos, pero sin evidencia.
- Episodios volcánicos (10^6 - 10^8 años), incrementa la entrada de P desde las fumarolas activas o de muerte inducida por masas de cenizas, tiene que ver pero no es una evidencia real; la fase mayor del volcanismo oceánico puede producir un cambio significativo del nivel del mar.
- Calentamiento global/Enfriamiento (10^4 - 10^8 años), identificación de las corrientes ascendentes durante los períodos fríos producidos por el incremento de la fosfogénesis; transgresiones marinas mayores durante las

fases de calentamiento tiene importantes relaciones con la génesis de fosfatos.

- Cambios en la circulación oceánica (10^4 - 10^7 años), los fosfatos son formados más fácilmente durante los períodos de mayores circulaciones; la mayor parte del fósforo se hunde en el océano durante los períodos de circulación menor.
- Cambios en el nivel del mar (10^4 - 10^6 años), importantes procesos de retrabajo, especialmente durante ascenso del nivel del mar produciendo depositación.
- Periodos cortos de perturbación (10^1 - 10^2 años), incrementa la cantidad de depositación de la relación fosfato-sedimentos ricos en materia orgánica, durante los eventos tipo El Niño.

Es claro, que hay un gran número de factores que operan en varios rangos de escalas cuando juntos son determinantes de alguna manera que los depósitos de fosfatos están formándose en un determinado tiempo y espacio. La importancia de considerar múltiples factores, y estas relevancias en la formulación de un depósito de fosfatos, está mejor representado en acumulaciones sedimentarias. Aunque no puedan ser medidas y no obstante sea posible solo para la formación de un pequeño depósito sedimentario fosfático con un área de alrededor de 10^2 km², se pueden incluir algunas otras consideraciones espaciales: una localización a bajas latitudes ($\sim 10^7$ km²), clima árido ($\sim 10^6$ km²), corrientes ascendentes ($\sim 10^6$ km²), mares poco profundos ($\sim 10^5$ km²), zonas costeras ($\sim 10^4$ km²), características estructurales o de basamento ($\sim 10^3$ km²) y lagunas costeras (*lagoons*) ($\sim 10^4$ km²). También hay que incluir las consideraciones temporales que incluyen: la configuración apropiada de las placas tectónicas (10^7 - 10^8 años), las condiciones apropiadas del clima global (10^7 - 10^8 años), mejoramiento en la circulación oceánica (10^4 - 10^7 años), así como cambios en periodos cortos de nivel del mar (10^4 - 10^6 años).

Los patrones que son evidentes en la distribución espacial y temporal de los depósitos, es un punto para delimitar un número de ingredientes claves, cuando no solo produce uno de tipo fosfático sino también en la ocurrencia de aquellos considerados esporádicos o periódicos. Estos incluyen: las zonas tensionales y los episodios volcánicos, en el caso de los depósitos ígneos; los climas húmedos y cálidos para las cavernas de guano; condiciones marinas fértiles del guano insular; localizaciones de bajas latitudes, alta productividad orgánica, incremento en las tasas de circulación oceánica, altos contenidos de fósforo en los océanos y mayores transgresiones marinas. La periodicidad en pequeña escala de decenas de miles de años pueden ser identificados en depósitos de guano. Los patrones a escalas de 10^7 - 10^8 años, son reconocibles en depósitos sedimentarios con repeticiones en el rango de la fosfogénesis de entre 50-150 m.a.

Como conclusión se tiene que, está claro que estos patrones sensibles de la distribución espacial y temporal en depósitos de fosfatos, pero, se requieren más trabajos para entender la mecánica que opera en el origen de las ocurrencias fosfáticas en el mundo.

1.4. Fosfatos sedimentarios (Boggs, 1995)

Las fosforitas son depósitos sedimentarios que contienen más del 15-20% de P_2O_5 . Estos son fosfatos enriquecidos en muchos más tipos de rocas sedimentarias. El contenido de fósforo en lutitas contiene un promedio de 0,11-0,17% de P_2O_5 , en areniscas es de 0,08-0,16% P_2O_5 y en calizas de 0,03-0,7% P_2O_5 (McKelvey, 1973).

El volumen total de fosforitas sedimentarias en el registro geológico es pequeño, sin embargo, las fosforitas sedimentarias son de interés económico. Estos, según el autor, contribuyen a cerca del 82% de la producción mundial de roca fosfática. Las fosforitas modernas ocurren como nódulos en algunas partes del piso oceánico. El origen de las fosforitas es tan enigmático como el origen de las rocas

sedimentarias ricas en hierro, es en muchos aspectos con respecto a la génesis que es poco entendido. No se entiende cuál es la causa de la acumulación de fosfatos en volúmenes mayores en épocas del pasado geológico comparadas con las acumulaciones en los océanos modernos.

1.4.1. Ocurrencia y distribución

Cook y McElhinney (1979) mostraron que más depósitos de fosfatos antiguos se acumularon en latitudes entre 0-40°. No se comprende bien por qué la depositación de fosforitas se ven favorecidas en latitudes bajas, sin embargo, se piensa que las corrientes ascendentes (*upwelling*) juegan un papel importante en el origen de estos depósitos.

Los depósitos nodulares de fosfatos y de sedimentos fosfatados se presentan en el piso oceánico, a una profundidad de 400m en las proximidades de las líneas de costas. En los depósitos antiguos de fosforitas, las capas ricas en fosfatos típicamente se acumulan interbandeadas con rocas carbonáticas, lutitas o *chert*. Una característica particular de las acumulaciones de fosforitas es una triple asociación de fosfatos, *chert* y sedimentos que contienen abundante materia orgánica (carbón).

1.4.2. Composición de los fosfatos

Los fosfatos sedimentarios están compuestos de minerales de fosfato, todos son variedades de apatitos. Las variedades principales son flourapatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$], clorapatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$] e hidroxiapatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$], en donde más del 10% de los iones de carbonato pueden ser sustituidos por iones fosfatos, como se muestra en la fórmula general $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6\text{F}_{2-3}$. Existen muchas otras posibilidades de sustitución de cationes y aniones de la estructura del flourapatito. Estos carbonatos hidroxil flourapatito son comúnmente llamadas francolita.

Las fosforitas comúnmente contienen algunos cuarzos detritales y *chert* autigénico. La calcita y dolomita pueden ocurrir en fosforitas y la dolomita puede

ser particularmente abundante. La glauconita, illita, montmorilonita y zeolita, especialmente la clinoptilonita, pueden estar presentes en algunos depósitos. La materia orgánica es un constituyente característico de muchas fosforitas (Nathan, 1984).

La composición química dominante de las fosforitas es P, Si y Ca. Algunos otros elementos se hallan en menor cantidad: Al, Fe, Mg, Na, K, S, F y Cl. Otras veces es posible encontrar fosfatos enriquecidos en: Ag, Cd, Mo, Se, Sr, U, Y, Zn y elementos clasificados como tierras raras (REE por sus siglas en inglés).

1.4.3. Petrografía de fosfatos

Estos pueden contener ooides, peloides, fósiles (bioclastos) y clastos. Estos granos son, por supuesto, apatito con calcita. Muchas fosforitas tienen texturas granulares distintivas y son compuestas de finas texturas micrítica de colofano. Cook (1976) refiere que la principal fosforita es la fosfolutita. Los granos de fosfato como peloides contienen inclusiones de materia orgánica, minerales de arcilla, granos tamaño limo detrítales y pirita. La abundancia de materia orgánica contribuye a las fosforitas, a su color característico, el cual suele ser siempre de marrón a negro.

Los fosfatos peloidales o peletales son particularmente comunes. Muchos peloides son estructuras esencialmente, que contienen un núcleo de otros materiales diferentes a éstos. Algunos peloides pueden ser de origen fecal (éstos son los peloides fecales). Otros pueden contener varias muestras fósiles como foraminíferos o radiolarios, buenos cuarzos, minerales de arcilla y la materia orgánica, por supuesto. Los fosfatos peloidales reúnen ooides que contienen núcleos y unas muy bien desarrolladas capas concéntricas. Estos son más comunes en las fosforitas que en los peloides, pero pueden hacer que sean mayores los granos fosfatizados en algunos depósitos. Soudrey y Southgate (1989) reportaron fosfatos peloidales en la cuenca Georgina en Australia, el cual se ha interpretado como remanente de una colonia de seres unicelulares y

microbios que formaban parte de una comunidad mayor de microbios en un ambiente vadoso. Los fósiles fosfatizados o fragmentos de conchas fosfatados pueden (en algunos casos) formar parte de algunos depósitos de fosforitas. Los fósiles pueden incluir remanentes de invertebrados y vertebrados. Los litoclastos consisten en fragmentos re-trabajados de fosforitas preexistentes como ocurren en algunos depósitos.

Muchos granos son de tamaño arena. Estos grandes granos son comúnmente referidos a nódulos y pueden llegar en tamaño desde los 2mm a algunas centenas de centímetros. Los nódulos en calizas, pueden ser esféricos, lenticulares o aplanados, paralelos o bandeados.

Slansky (1986) propone el uso de un sistema de clasificación basado en la clasificación de Folk para carbonatos. Este usa nombres como biofosfarenita, el cual es una fosforita compuesta de fósiles fosfatizados tamaño arena e intrafosfarudita, es una fosforita compuesta de clastos fosfatizados tamaño grava.

1.5. Tipos principales de depósitos de fosfatos

Cook (1976) menciona el uso de tres (3) clasificaciones, basadas esencialmente en la analogía de las características de los depósitos de fosforitas, en tres (3) áreas bien estudiadas de los Estados Unidos:

1. Geosinclinal o tipo Costa Oeste (p.e. los campos de fosfatos del oeste de los Estados Unidos).
2. Plataforma o tipo Costa Este (p.e. depósitos de Carolina del Norte), y
3. Ambientales o tipo residual (p.e. los depósitos de roca marrón de *Tennessee*).

Las fosforitas residuales resultan de una concentración de fosfatos por condiciones climáticas y ambientales, químicas o mecánicas y no son fosfatos sedimentarios primarios.

Una segunda aproximación la constituye una clasificación de los depósitos de las fosforitas, la cual es dividida en grupos basados en sus características de bandeamientos y en los tres (3) tipos principales de materiales de fosfatos que se encuentran en estos depósitos. Los cinco (5) principales grupos pueden ser identificados:

1. Fosforitas bandeadas, forman distintivas capas y espesores variables, comúnmente interbandeadas e intercaladas con lutitas (*mudrocks*) carbonáticas, cherts y rocas carbonáticas. Las fosforitas ocurren como peloides o *pellets*, oolitas, pisolitas, braquiópodos fosfáticos y otros fragmentos esqueléticos y cementos. Los fosfatos bandeados se creen se forman en áreas de plataforma asociadas a zonas de corrientes ascendentes en los océanos.
2. Fosforitas bioclásticas, son de un tipo especial de fosforita compuesta mayoritariamente de fragmentos esqueléticos de vertebrados como huesos de pescado, dientes de tiburones, escamas de peces, coprolitos, entre otros. Estos depósitos están compuestos de remanentes de invertebrados fósiles como conchas fosfatizadas de braquiópodos. Estas capas orgánicas de materiales generalmente fueron enriquecidas en P_2O_5 durante la diagénesis y son cementadas por minerales de fosfatos.
3. Fosforitas nodulares, son irregulares de color marrón a negro de formas esféricas, en el rango de tamaño variable de unos pocos centímetros a unos metros o más. La estructura interna de los nódulos de fosfato, con rangos bastante homogéneos en capas o bandas concéntricas. Los granos de fosfatos, peloides, dientes de tiburones y otros fósiles son aquellos espacios donde pueden darse los nódulos. Los nódulos son formados hoy en día en zonas de corrientes ascendentes en los océanos y se presume que los fosfatos nodulares en el pasado geológico, tuvieron su origen de forma similar, sin embargo, hay otros fosfatos que en la antigüedad se formaron diagenéticamente.

4. Fosforitas en capas de piedras tamaño guijarros, están compuestas de nódulos fosfáticos, fragmentos de calizas fosfatadas o de fósiles fosfatados que son concentrados mecánicamente por re-trabajo de otros depósitos de fosfatos formados anteriormente.
5. Depósitos de guano, están compuestos de los excrementos de aves y murciélagos, que al acumularse forman un residuo insoluble de fosfato de calcio.

1.6. Depósitos de fosforitas

Procesos químicos y bioquímicos

El promedio de la concentración de fosfatos en los océanos es de 70ppb (partes por billón) (Gulbrandsen y Robertson, 1973), comparado con el 20ppb promedio del agua de los ríos. La concentración de fósforo en el agua de mar varía en el rango de pocos ppb en la superficie, a valores de 50-100ppb en las profundidades que varían entre 200-400m.

El fosfato es removido de los océanos de varias maneras. Parte del fósforo es precipitado en su mayoría con minerales de carbonato de calcio, en el proceso de depositación de calizas, sin embargo, el promedio de fosfato en calizas es de 0,04% de P_2O_5 . El fósforo es removido también del agua de mar para formar las pieles de organismos marinos, los cuales al morir retornan ese fósforo al mar, convirtiéndose en sedimentos y acumulándose en el fondo marino. Otra forma de remoción del fósforo del agua de mar es por incorporación de los sedimentos metalíferos, como resultado de la absorción de minerales metálicos en los hidróxidos de hierro. Finalmente, el fósforo es removido del agua de mar en forma de depósitos de apatito marino.

Un reemplazamiento en el origen sugiere que, muchos depósitos de fosfatos se forman de esta manera. La preservación en éstos de texturas clásticas y de estructuras sedimentarias primarias, como estratificación cruzada y laminación, es indicativo de que estos son sedimentos de depósitos primarios. Estudios de la

distribución de fosforitas antiguas muestran que éstas ocurren en latitudes bajas en cinturones a lo largo de un lado de la cuenca donde las aguas profundas son llevadas hacia arriba con corrientes descendentes al continente. Muchos depósitos de nódulos de fosfatos en los océanos modernos ocurren en las áreas de corrientes descendentes.

La utilización biológica del fósforo para la constitución de organismos de piel suave, provee una respuesta al problema del origen de las concentraciones de fosfatos en los sedimentos. Estos organismos incluyen remanentes de fitoplancton y zooplancton, coprolitos (heces fecales) y los huesos y escamas de peces.

Existen estudios de la química de aguas intersticiales en sedimentos, donde en los océanos modernos se están formando nódulos de fosfatos y, en otras áreas de piso oceánico donde los sedimentos ricos en materia orgánica son acumulados en condiciones reductoras, estos últimos donde las concentraciones se encuentran en el rango de 1 400ppb a 7 500ppb (Bentor, 1980; Froelich et al., 1988). Los fosfatos en sus comienzos precipitan sobre la superficie de los organismos silíceos, granos de carbonatos, partículas de materia orgánica, escamas y huesos de peces, granos minerales siliciclásticos y partículas de fosfatos más antiguos (Baturin, 1982). Los nódulos de fosfatos se forman de sedimentos por reacciones diagenéticas entre sedimentos ricos en materia orgánica y el enriquecimiento en fosfato de las aguas intersticiales. Los radios del Mg^{2+} y el Ca^{2+} son pequeños, lo que propicia la inhibición a la formación de apatito y reemplazamiento hierro-magnesio en los minerales de arcilla en sedimentos marinos anóxicos (Drever, 1971).

Froelich et al. (1988) reportaron que el fluorapatito carbonático es precipitado de los poros de agua de unos pocos centímetros, de lodos ricos en materia orgánica carbonosa del margen continental del Perú. Ellos han sugerido que, el mecanismo de recirculación del fosfato se debe a la disolución de desechos de

peces o por la presencia de materia microbiana en la superficie de los sedimentos. Las concentraciones de Mg en los poros de agua son cercanas a las mismas del agua de mar. Por una razón poco conocida, el agotamiento de Mg no es un prerrequisito para la precipitación de carbonato fluorapatito en estos sedimentos. En los márgenes continentales del Perú, los minerales fosfáticos precipitan sólo en zonas de poca profundidad. La concentración en zonas poco profundas de apenas pocos centímetros, de iones carbonatos en exceso y una reactividad del hierro disminuida y sulfato, favorece la formación de dolomita, la cual al mismo tiempo impide la precipitación de minerales fosfáticos (Glenn y Arthur, 1988).

Procesos físicos

Kolodny (1980) sugirió que existen dos (2) procesos para el origen de los depósitos de fosforitas antiguas. En primer lugar, la formación de apatito diagenético se reduce en la cuenca por movilización del fósforo en el agua intersticial, de la misma manera que se ha aplicado para explicar la formación de fosforitas modernas. El estado final consiste en un re-trabajo y enriquecimiento de los nódulos formados diagenéticamente por procesos de concentración mecánica. Este estado se caracteriza por condiciones de oxidación y una concentración presumiblemente en un ambiente de alta energía, durante pequeños cambios en el nivel del mar. En este estado final, durante la formación diagenética original de los sedimentos de fosforitas, son re-trabajados mecánicamente en la zona y en condiciones ambientales de plataforma, los cuales dejan texturas y estructuras sedimentarias primarias en muchas fosforitas antiguas. Un ejemplo de estos son los grandes depósitos de fosforitas en Egipto (Glenn y Arthur, 1990).

1.7. Mineralogía y geoquímica de los fosfatos

1.7.1. Estudios acerca del origen de las fosforitas

Bentor (1980) expone que las investigaciones de fosforitas se han estado basando en comparaciones de los ambientes modernos de formación de fosfatos

con los ambientes originarios de fosforitas antiguas. Algunos de los descubrimientos más interesantes, aparte de los nódulos de fosfatos en los suelos marinos actuales, son el reconocimiento de especies minerales de flúor (F)-carbonato-apatito y la formación de la teoría de las corrientes ascendentes (*upwelling*) de Kasakov, la cual fue propuesta en el año 1937.

Este autor explica que, el interés de los estudios de fosforitas y sus orígenes comenzó de los años 1930, debido al rápido crecimiento en el uso de fosfatos de forma industrial (para agricultura e industrias de alimentos). Ya para el año 1978 se había producido mundialmente cerca de 125 millones de toneladas anuales, de los cuales la distribución de producción era la siguiente: Estados Unidos 40%, la Unión Soviética 19,8% y Marruecos 15,8%. Actualmente, los principales productores en el mundo de fosfato son los siguientes países: Estados Unidos 18,5%, China 30%, Marruecos y África del Norte 16,8% y Medio Oriente.

Las mayores conclusiones generadas, con todos los estudios realizados (hasta 1978), fueron los siguientes:

1. Es solo uno y altamente variables, siendo estos minerales comúnmente encontrados en todos los fosfatos y fosforitas, estos son F-carbonato-apatito. Por lo general, de 3-6% de mineral de PO_4^{3-} es reemplazado por CO_3^{2-} . Otra característica del F-carbonato-apatito es que, éste tiene un gran contenido de F el cual excede estequiométricamente el 10%. El exceso de F es reemplazado por el O fuera de los canales en la estructura del apatito.
2. Otra característica común de la mayoría de las ocurrencias de fosforitas es la triple asociación: fosfato-*chert* o porcelanita-materia orgánica (oxidada de un proceso posterior). En los depósitos más jóvenes del Cretácico la *chert*-porcelanita está derivada diagenéticamente de diatomeas y de radiolarios oodes (*oozes*). Los elementos que están implicados en esta trinidad son: P-S-Si.

3. La presencia de materia orgánica y frecuentemente pirita, indican un ambiente reductor. Esto se ve mayoritariamente en aquellas fosforitas formadas en las zonas de depositación lenta (*slow*), tales como las rocas de la Formación Fosforia (Estados Unidos) la cual tiene una rata de depositación de aproximadamente 1cm/1000 años.
4. Se sabe desde el principio que las fosforitas se encuentran asociadas a ciertos elementos traza. Uno de los más interesantes (y polémicos) es el U, el cual está presente en las fosforitas en concentraciones de 50-150ppm. El artículo de Kasakov, tuvo el propósito de explicar el origen de las fosforitas. La idea básica de este autor fue hacer la conexión entre los sedimentos fosfáticos y las corrientes oceánicas descendentes, argumentando que el agua del fondo asciende a la superficie, con cierta temperatura y consecuentemente disminuyendo la presión, el CO₂ escapa y el pH se incrementa. Debido a que la solubilidad del apatito se conoce que decrece con el incremento de la temperatura y el pH, Kasakov concluyó que en la parte superior, ocurre una sobresaturación respecto al apatito, lo cual se traduce en una obtención y cristalización del mineral. De acuerdo con esta visión, las fosforitas son precipitados puramente inorgánicos. Sin embargo, el particular mecanismo propuesto puede ser nuevamente revisado, pues su idea central de que la corriente ascendente (*upwelling*) es el factor más importante en la génesis de las fosforitas sigue siendo la más resaltante.

El reconocimiento de áreas oceánicas donde se están formando fosforitas en el presente, las cuales son muchísimo más pequeñas que las formadas en la antigüedad, nos permite la posibilidad de estudiar las condiciones de su génesis por observación directa, pudiendo extrapolarlas a las condiciones de depositación de fósiles, ahora en superficie. Las dos (2) áreas que se han estudiado más son la costa de Namibia y la cuenca continental de Chile-Perú, las cuales son áreas donde en el Reciente se ha observado la depositación de

fosforitas, apartando una zona parcialmente fosfatizada en el Golfo de Tehuantepec (Goldberg y Parker, 1960, op.cit. Bentor, 1980).

1.8. Ciclicidad en los episodios de formación de fosforitas

Muchas fosforitas exhiben partes de laminaciones rítmicas y cíclicas en muchas escalas, tanto en secciones finas como en afloramientos en campo. Muchos de los problemas básicos de la génesis de las fosforitas están directamente relacionados con estas estructuras:

1. Laminación a pequeña escala y ciclicidad. Los depósitos más antiguos de fosforitas exhiben laminaciones pronunciadas, en una escala de tiempo de unos cuantos a unos cientos de años, con finas laminaciones de fosforitas alternando con otras de capas, lutitas (*mudstone*), carbonatos o *chert*. Éstas se dan por alteraciones en los cambios locales. La perfecta preservación de las láminas de estos sedimentos ricos en orgánicos es información adicional de que la depositación de las fosforitas fue en un ambiente anóxico.
2. Ciclicidad a media escala. Muchas ocurrencias de fosforitas están asociadas con unidades de *chert*. Es una típica secuencia de capas de fosforitas, usualmente asociada con capas de carbonatos, alternadamente repetidas con capas de *chert*. Las fosforitas, así como las capas de *chert*, pueden ser de unos cuantos a decenas de metros de espesor y muy probablemente representan el tiempo de expansión de la depositación desde unos 100 000 a varios millones de años.

La asociación *chert*-fosforita no es por sí misma sorprendente, dado que los sedimentos son esencialmente biogénicamente formados en zonas de alta productividad. Los ciclos no pueden ser explicados por segregación luego de la depositación. Si estos fueron resultados de depositaciones simultáneas de fosfatos y de sedimentos siliciclásticos, la formación de unas fosforitas silíceas o de unas fosforitas que contienen unos nódulos de *chert*, o una alteración de capas delgadas de fosforitas y laminación de *chert*, pueden esperarse.

Bentor (1980) cita a Baturin (1971) quien distinguió cuatro (4) estados en la evolución diagenética de las fosforitas, desde la fosfatización de oolitas de diatomeas hasta los nódulos de fosforitas endurecidas. Durante esta evolución el contenido de P_2O_5 se incrementa a razón de 5,10% a 32,74%, mientras que el contenido de SiO_2 decrece desde 49,18% a 0,15%. La eliminación de la sílice amorfa de los sedimentos no es sorpresa, pues ha sido calculado (Heath, 1974, op cit Baturin, 1980) en tan sólo 2% el sílice opalino formado en el océano el cual es incorporado a las rocas sedimentarias. La preservación de la sílice en los sedimentos es, además de otros factores, una función de la tasa de depositación.

Bajo ciertas circunstancias favorables, los oolitos de sílice pueden ser depositados y luego ser transformados en porcelanita o *chert*.

3. Episodios de largos períodos o ¿es el presente la clave para interpretar el pasado? Primero hay que diferenciar entre las texturas de las fosforitas del pasado y de la actualidad. La formación ocurre generalmente en forma de cuerpos rocosos duros irregulares (“nódulos”) de diámetros variables de centímetros a decímetros, generalmente con una fina capa concéntrica o una masa estructural suave. La vasta mayoría consiste en *pellets*, pequeñas estructuras esféricas, cuerpos elípticos o irregulares de apatito, generalmente de diámetros menores a 1mm, algunos calcáreos, arcillosos, arenas o de matriz de grano fino de fosfatos. Los *pellets* abundantes pueden tener apariencia de arenas. Los granos de fosfatos tamaño arena, son generalmente raros en las fosforitas recientes.

Segundo, estos son diferentes a los minerales de paragénesis. Las fosforitas del Reciente y Mioceno, en el suelo oceánico, generalmente muestran capas o intercalaciones con óxidos de Mg y están relacionadas con glauconita. Antiguas fosforitas formadas en áreas de lenta depositación representan secciones condensadas; mientras que las áreas de formación de fosforitas recientes son distinguidas por una alta tasa de sedimentación.

Las fosforitas modernas son formadas en las plataformas continentales, o sobre los taludes continentales, y aquellas como en Namibia bajo estables condiciones tectónicas; las fosforitas antiguas muestran que fueron formadas en gran variedad de ambientes, incluyendo la depositación en mares epicontinentales, algunas veces, a grandes distancias de la costa y fueron frecuentemente sin-tectónicas.

Estas son muchas evidencias de que existen dos (2) fosforitas formadas bajo distintos mecanismos. La laminación fina es una característica de muchas fosforitas antiguas, cuya formación parece que se produjo en el piso oceánico. A esta conclusión se llega, porque frecuentemente ocurre en fosforitas antiguas que las capas en la parte superior están formadas por exclusivamente apatitos oolíticos, los cuales se consideran son formados en la interfase agua-sedimento.

Por último, ésta es la mayor diferencia en el tamaño de los depósitos. El contenido del depósito de Fosforia (EUA) es de cerca de 7×10^{17} g P. Bajo las condiciones presentes, más del contenido anual que ingresa a los océanos de P debe ser precipitado continuamente por un período de 10m.a., en un área de 0,17% del piso oceánico actual, para formar un depósito de este tamaño.

Estas diferencias no pueden aplicarse a todos los depósitos antiguos de fosforitas. Algunos de los depósitos del Cámbrico tienen texturas similares a los depósitos recientes, por lo que se piensa fueron formados en condiciones parecidas. Ciertamente, estos criterios pueden aplicarse a muchos yacimientos de fosfatos antiguos.

Dos (2) condiciones son evidentes:

1. Todos son períodos en el pasado geológico favorables en la formación de fosforitas. Obviamente, el tiempo empleado en el pasado para la depositación es sumamente vasto comparado con el actual.

2. Los mecanismos para la precipitación del apatito en el presente, pueden haber estado operativos periódicamente en el pasado, pero mecanismos adicionales, que no están actualmente, pudieron ser de gran importancia.

Estas conclusiones están soportadas por los largos períodos episódicos de formación de fosforitas, en el orden de períodos geológicos enteros, que pueden ir desde muchas decenas de millones de años, tal y como lo podemos ver en los registros geológicos.

La profundidad de compensación del carbonato en el crítico cinturón ecuatorial del Pacífico está ahora ubicado a una profundidad de 1km desde hace 40-50m.a.; en el presente los carbonatos son acumulados a una profundidad de 4,5km sobre el área de latitud 12° pero, los carbonatos no sedimentarios fueron formados antes de 40-50m.a. Esta restricción de la sedimentación de carbonatos en la profundidad del mar es en parte compensada por los mares epicontinentales. Debido a que en el presente, hay muchos más fosfatos en los océanos, la disminución de precipitación de carbonatos en el océano ha hecho que exista más P disponible para precipitar apatito.

Los fosfatos tempranos, formados en el Reciente, son asociados generalmente con sedimentos ricos en materia orgánica. Durante el Cretácico, una Era con una extensa formación de fosfatos, las condiciones euxínicas ocurrieron no sólo en las partes profundas de los océanos. Debido a que el oxígeno disminuyó, afectó una gran porción de la columna de agua, posiblemente disminuyendo la vida, reduciendo las condiciones, las cuales existieron en el océano durante otros períodos a larga escala en la depositación de fosforitas, como pasó en el Cámbrico y el Pérmico. La circulación global fue probablemente mucho más rápida durante el pasado geológico, debido a las grandes diferencias entre el hielo de las zonas de altas altitudes de los océanos y las aguas cálidas de las regiones ecuatoriales. La profundidad del agua del océano alrededor del ecuador

es el mayor reservorio de fósforo de los océanos. El apatito posiblemente se deposita en la interfase agua-sedimento.

El Cretácico es siempre un buen ejemplo. Durante este período el agua del fondo marino estuvo siempre a una temperatura de 15°C (reportado por Bowen, 1966 op. cit. Bentor, 1980). Bajo estas condiciones, la circulación de aguas profundas es más controlada, no tanto por la temperatura, pero sí por las diferencias de salinidad (Berger, 1970 op cit. Bentor, 1980). Para el Paleógeno, esto es evidencia del comienzo de una apertura oceánica.

Según lo que se ha presentado, acerca del tema de las fosforitas, en los años '80 del siglo XX, no se había llegado a un consenso en cuanto a su génesis. La depositación de fosforitas en el pasado tuvo muchos más elementos que los mecanismos que se encuentran operativos hoy día. El estudio de mecanismos alternativos, se vislumbra como tema de gran importancia para la investigación en la actualidad.

1.9. Revisión sobre las hipótesis de depositación de fosfatos (Sheldon, 1980)

Una hipótesis general de la periodicidad de la depositación de los fosfatos marinos causados por las variaciones de la circulación oceánica profunda se resume en los siguientes postulados:

- (1) Episodios de fosfogénesis, ocurridas en el comienzo de mezcla vertical oceánica seguidos de eventos de estabilidad, durante los cuales el contenido de fósforo en el océano profundo puede construir acumulaciones de mayores niveles, a medida que va hacia arriba;
- (2) Los mayores episodios fosfogenéticos del Cretáceo y Terciario temprano llegaron tomando de aquél P depositado en las profundes del mar el cual fue primero hundido por las corrientes ascendentes ecuatoriales, con alto nivel en el tiempo (del mar) y en océanos más cálidos, y
- (3) Los mayores eventos fosfogenéticos del Cámbrico, Ordovícico y Pérmico, además del Mioceno, llegaron del P también formado a profundidad por un

fenómeno de trayectoria denominado “cinturón de viento corrientes ascendentes” del tiempo de transición de un nivel alto, océanos cálidos de bajo nivel a océanos fríos; la transición es debida a los episodios glaciares. Estos procesos generales de fosfogénesis comienzan después de la evolución del ambiente que existió hace 2.200 Ma, con un océano ácido y una atmósfera libre de oxígeno, a uno con un océano alcalino y una atmósfera rica en oxígeno.

Las hipótesis sobre el origen de las fosforitas marinas que se han planteado desde inicios del siglo XX, pueden ser agrupadas en tres (3) categorías generales: (1) Eventos especiales, con una catastrófica destrucción de la vida (Murray y Renard, 1891) o adición volcánica de flúor al mar (Mansfield, 1940).

(2) La interacción directa de los procesos terrestres y marinos, debido a la introducción de fosfatos al mar por los ríos (Pevear, 1966; Bushinski, 1964) y un flujo marino en el fondo de salmuera de la línea de costa de lagunas saladas a los declives continentales (Hite, 1976), y

(3) Procesos de corrientes ascendentes marinas (Kazakov, 1937; McKelvey y otros, 1953) favorecieron la depositación del apatito entre la interfase agua-sedimentos, o diagenéticamente con los sedimentos del agua intersticial (Baturin, 1971).

Todas estas hipótesis son todavía seriamente oponibles, y ninguna ha sido aceptada como la teoría general de la sedimentación de fosfatos en ambientes marinos.

Los estudios geológicos marinos de mares profundos en fosforitas en los subcontinentes norteamericano, suramericano y africano no muestran procesos simples de génesis que puedan fácilmente ser aplicados a depósitos más antiguos, introduciendo nuevas dificultades (Burnett y Sheldon, 1979). La diagénesis de los sedimentos (modernos), no son muy parecidos a los depósitos de fosforitas antiguas que están fundamentadas en ambientes comparables paleogeográficos y que se sostiene con evidencia petrográfica (equivoca para

cualquier investigación) o comienzo de depositación en la interfase agua-sedimento. A pesar de este problema, un número de investigadores expertos están dispuestos a aceptar una importante relación entre las corrientes ascendentes oceánicas y la sedimentación de fosforitas marinas. Muchas fosforitas muestran evidencias de orígenes completamente diferentes, como estuarios, lagunas de barrera, lagos, ciénagas, cuevas o cavernas y ambientes insulares, depositados por otros procesos, como un enriquecimiento residual por temporadas, ambientes fluviales, y diagenéticamente incluyen reemplazamiento en el suelo marino, así como otros depósitos de fósforos en otras circunstancias como ríos, excrementos de aves y murciélagos o acumulaciones de huesos. El documento publicado por Sheldon (1980) recoge las evidencias que apoyan las teorías que tratan de explicar el proceso de formación de las fosforitas marinas.

1.10. Periodicidad de las fosforitas marinas

Diversos estudios han sugerido que las fosforitas fueron depositadas episódicamente durante el Proterozoico y “Eons” Fanerozoico (Strakhov, 1969; Cook y McElhinny, 1979). En un resumen (de 1980), Cook y McElhinny (1979), reúnen la evidencia que muestra los mayores episodios de fosfogénesis ocurridas durante el Mioceno, Cretácico tardío al Eoceno, Jurásico, Pérmico, Ordovícico, Cámbrico, Proterozoico tardío (Z) a los 620 Ma, Proterozoico tardío (Z) a los 700-800 Ma, Proterozoico medio (Y) y Proterozoico temprano (X). Estos incluyen Oligoceno, Triásico y Silúrico.

Cook y McElhinny (1979) presentaron datos adicionales que muestran episodios de mineral de hierro y depositación de evaporitas, así como actividad de glaciares y orogénica. Ellos concluyeron que, existe una correlación entre los depósitos de mineral de hierro y la depositación de fosforitas, pero que no es una relación consistente entre la depositación de fosfatos y de otros eventos. Algunas excepciones son observables durante las eras Mesozoica y Terciaria

tempranas, en las cuales también hay una buena correlación entre los episodios de depositación de fosforitas y glaciación.

Fisher y Arthur (1977) han postulado una hipótesis que explicaría la periodicidad de muchos eventos en el registro geológico en el ámbito pelágico de los últimos 100 Ma. Estos tuvieron evidencias a lo largo de episodios de clima cálido, altos niveles del mar, alteraciones estables oceánicas con cortos episodios de frío, bajo nivel, rápida circulación oceánica. Estos autores han supuesto que los expandidos océanos extensos con capas mínimas de oxígeno durante los episodios de calor, bajo nivel del mar. La hipótesis se basa en que eran más cálidas cuando el nivel del mar es alto, incrementan el tiempo de residencia de las aguas profundas, el cual resulta ventajoso para el aumento en los contenidos fosfáticos y posiblemente aventajando la saturación del apatito. Las corrientes ascendentes durante estas eras, por momentos disminuyeron, debido a que las aguas enriquecidas de fósforo son llevadas a las aguas poco profundas en los sitios de depositación. Esta idea es corroborada por algunos de los estudios de Burnett (1977), quien analiza los episodios de los depósitos de fosforitas cuaternarias, con los sedimentos de la plataforma de Perú y sugiere una correlación entre las ocurrencias de alto nivel del mar y la depositación de fosfatos.

En otras palabras, es posible apreciar que estas teorías entrarían en conflicto (Fisher y Arthur, 1977 y Cook y McElhinny, 1979) dado que, la segunda muestra una relación parcial entre fosfogénesis y las glaciaciones.

1.11. Hipótesis de circulación oceánica y sedimentación de fosforitas

Después del inicio de la vida, la concentración del fósforo se comenzó a construir en los niveles profundos en climas cálidos, altos niveles del mar, océanos estables de valores de temperatura en la superficie cercana, presión, pH y grandes concentraciones de materia orgánica, excediendo la circulación oceánica que trae esta agua enriquecida de fosfatos cerca de la superficie. Esta

circulación primaria puede darse de dos (2) formas: (1) Las épocas de altos niveles del mar por corrientes ascendentes ecuatoriales combinadas con las corrientes globales, y (2) En esta época de transición entre los altos niveles, mares cálidos y bajo nivel, mares fríos al comienzo del cambio serpenteante del cinturón de las corrientes ascendentes.

Dos (2) procesos ocurren más o menos simultáneamente: (1) La profundidad, agua fría se ha despresurizado y calentado, por tanto, el pH asciende; y (2) El agua rica en nutrientes, enteramente sobre la zona fótica, causa una alta actividad biológica cuando se devuelve, causando la formación al fondo de aguas ricas en materia orgánica disuelta y siempre más enriquecida en fósforo total debido a la concentración (influencia) orgánica (Gulbrandsen, 1969).

1.12. Relación entre la fosfogénesis y la glaciación

La hipótesis sugiere una relación entre los episodios relativos del cinturón de viento global, la fosfogénesis y los eventos glaciares, los cuales son caracterizados por la circulación rápida, bajo nivel y océanos fríos. Esta teoría se ha discutido menos, puesto que la depositación de las fosforitas en períodos con alto nivel del mar, océanos cálidos al tiempo de un equitativo clima mundial y sin glaciación polar, son los primeros indicios de corrientes ascendentes ecuatoriales y no aquellas que se sucedan en la línea del cinturón de viento global.

1.12.1. Provincias fosfogénicas ecuatoriales

La circulación oceánica y sus giros, se ven influenciados por los vientos mundiales. Los vientos del oeste tienen una fuerte divergencia en las corrientes ascendentes en el cinturón de viento global sobre el lado este de los océanos. Aunque estos mecanismos pueden contar para la formación de fosforitas desarrollada en los cinturones de viento global, estos no cuentan para aquellas formadas en otras provincias fosfogénicas, las más importantes son: la provincia fosfogénica del Norte de África, el Medio Oriente y el norte de Sur América.

Cuando las fosforitas fueron depositadas, estas provincias se encontraban en las paleolatitudes entre 8-15°N. La fuerza “*corolis*” está totalmente débil hasta tanto bajan las latitudes y el viento global que llega al oeste, paralelo a la costa, hace improbable de manera significativa las corrientes ascendentes causadas por la circulación giratoria y la fuerza sola de la “*corolis*”.

Las fosforitas insulares deben tener su origen en los desechos orgánicos provenientes de las poblaciones animales ecuatoriales de plancton-peces-aves y trasladadas por las corrientes ascendentes (Hutchinson, 1950) y las fosforitas marinas deben tener su origen en los desechos orgánicos de las poblaciones de plancton localizadas por las corrientes ascendentes. Una relación entre estas dos (2) provincias fosfogénicas no existe en las regiones de corrientes ascendentes influenciadas por los cinturones de viento globales, donde el depósito de guano sobre las costas de las islas forma una de los sedimentos fosfóricos hundidos y las fosforitas del piso oceánico forman otras. Una relación similar puede verse en áreas de corrientes ascendentes ecuatoriales durante los episodios de fosfogénesis después que evolucionaron las aves marinas.

Se requieren más trabajos para probar las edades de estas fosforitas, ayudados por el contenido de fósiles de las mismas. El uso del procedimiento de Lancelot y Larson, descrito en Larson y otros (1975), determinó la posición original de estos depósitos antiguos, los cuales indican que fueron formados cerca del ecuador. Esto puede tomarse como evidencia de las corrientes ascendentes ecuatoriales.

1.13. Relación entre las corrientes ascendentes del viento global y las corrientes ascendentes ecuatoriales

Estos dos (2) eventos parecen haber ocurrido simultáneamente a lo largo de la historia geológica y están activos en la actualidad. Evidencias de estas corrientes ascendentes a la vez, durante un periodo de fosfogénesis primaria ecuatorial, es la depositación de las fosforitas del Cretácico de México.

Tal vez, la distribución preferencial de los grandes depósitos económicos de fosforitas en bajas latitudes, aunada a las zonas de las corrientes ascendentes de los vientos globales (Cook y McElhinny, 1979) fue debido a la mezcla de los ricos fosfatos ecuatoriales traídos por las aguas en las corrientes ascendentes con aquellas provenientes del sistema de circulación de los vientos globales. El depósito de El Secura en Perú ocurre probablemente a partir de este fenómeno.

1.13.1. Otros tipos de circulación vertical

Otros tipos de circulación vertical, adicionales a las corrientes ascendentes ecuatoriales y del cinturón de vientos global, probablemente ocurridos durante las épocas de las fosfogénesis, causaron la depositación de las fosforitas. El mejor ejemplo de un sistema de circulación vertical adicional, operando a lo largo con las corrientes ascendentes ecuatoriales y del cinturón de viento global, durante la época de la fosfogénesis, viene desde la era Miocena.

Otras depositaciones de fosforitas, durante la era Miocena, aparecen debido a diferentes formas de circulación vertical, entre estos, otro tipo de mezcla vertical combinada quizás con una dinámica de corrientes ascendentes (como las fosforitas del sur de los Estados Unidos). Las fosforitas Miocenas del este del *Chatham Rice* de Nueva Zelanda (Cullen, 1979) posiblemente desarrollada por uno de los tantos sistemas de circulación. En el mar profundo el fósforo se hunde; el sistema de circulación puede causar que la depositación de P sea variada.

Parece, sin embargo, que el sistema de circulación más efectivo en la medida en que la fosfogénesis está relacionada con las corrientes ascendentes ecuatoriales durante episodios de océanos cálidos con altos niveles y de corrientes ascendentes de los cinturones de viento global han sido los eventos transicionales de alto nivel del mar, los océanos cálidos de bajo nivel y océanos fríos (sección 1.9).

La efectividad de las corrientes ascendentes de cualquiera de los tipos de éstas depende de la interacción entre la riqueza de los mares profundos de fósforo y la intensidad de las mismas corrientes; la efectividad no está determinada por la fuerza de las corrientes ascendentes solas.

1.14. Resumen

Una hipótesis general para la depositación de las fosforitas marinas está resumida por las siguientes premisas:

- (1) El océano profundo está constituido como un gran reservorio geoquímico hundido de fosfatos desde hace 2.200 millones de años hasta el Presente.
- (2) El contenido de fósforo de esta acumulación hundida durante períodos de lentas mezclas verticales y declinación durante períodos de rápida mezcla vertical.
- (3) Los ciclos de circulación vertical en los océanos correlacionadas con ciclos de altos y bajos niveles del mar.
- (4) La mezcla vertical hacia arriba, con los niveles poco profundos, ocurren en principio por las corrientes ascendentes ecuatoriales y aquellas de los cinturones de vientos globales.

1.14.1. Hipótesis

- (1) Los episodios de fosfogénesis ocurren al comienzo de las ocurrencias de la mezcla vertical después de los eventos de estabilidad, durante los cuales los contenidos de fósforo en el océano profundo se hunden y acumulan en altos niveles.
- (2) Los mayores episodios de fosfogénesis del Cretácico y del temprano Terciario fueron del fósforo retirado del que se hunde en el mar profundo, primeramente por las corrientes ascendentes ecuatoriales y el tiempo de los niveles altos y mares cálidos.
- (3) Los mayores episodios de fosfogénesis de los períodos Cámbrico, Ordovícico, Pérmico y de la época Miocena son debido al fósforo retirado del océano

profundo, preponderantemente por las corrientes ascendentes por el cinturón de viento global, al tiempo de transición del nivel alto, océanos cálidos de bajo nivel, océanos fríos; la transformación es relativa a los episodios glaciares.

Este proceso general de la fosfogénesis comenzó después de la transición del ambiente que existía hace 2.200 millones de años, con un océano ácido y una atmósfera libre de oxígeno, a uno de un océano alcalino y una atmósfera rica en oxígeno. Una relativa hipótesis independiente dice que durante el período de transición, un tipo único de fosfogénesis marino resultó de la depositación de fosforitas estromatolíticas.

CAPÍTULO II

PAPEL DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS EN LA FORMACIÓN DE FOSFATOS SEDIMENTARIOS

En este capítulo se presenta una revisión del papel que desempeña la geoquímica y los ciclos biogeoquímicos (Anexo D) en la formación de fosfatos sedimentarios.

2.1. Ciclo geoquímico marino del fósforo

Para comprender el proceso de depositación de las fosforitas se requiere entender el ciclo geoquímico marino del fósforo. Como entrada se sabe que el P descargado por los ríos al mar está estimado en $1,7 \times 10^{12}$ g/año; otras estimaciones varían de $0,4-2,0 \times 10^{12}$ g/año. Lo añadido por la atmósfera es de $1,4 \times 10^{12}$ g/año. De este contenido se estima que $0,05 \times 10^{12}$ g/año de P es de origen humano. Hay que considerar además el fósforo en el aire, que es sin embargo insoluble en el agua de mar; la entrada de P soluble, proveniente de la atmósfera, al océano es estimada en solo $0,22 \times 10^{12}$ g/año de P. A la vez, la contribución del océano está cerca del $0,33 \times 10^{12}$ g/año. El P en la atmósfera causa una pérdida de fósforo en los océanos de un aproximado $0,11 \times 10^{12}$ g/año, el cual es cerca del 10% del que entra por los ríos anualmente. Otra posible fuente es la actividad hidrotermal submarina, de cuya cantidad no se tiene información y, que se supone pequeña.

El contenido de P en los carbonatos marinos es de solo 400ppm pero, cerca del 30% del P es removido por agua de mar. La materia orgánica es siempre más importante y su proporción puede llegar a 40%. Los huesos de peces pueden preservarse en los sedimentos, pues sólo el 2% del total se conserva. Otros aspectos importantes que afectan la precipitación de los fosfatos (Berner, 1973. Op. cit. Bentor, 1980) son: sedimentos metalíferos, dado que muchos P absorben los hidróxidos de hierro, abundantes áreas volcánicas de centrales mid-oceánicas. En estas condiciones, la precipitación del apatito es más difícil de estimar en vista del restringido número de muestras de fosforitas formadas recientemente con respecto al pasado. El cálculo de la diferencia entre el P que entra al sistema oceánico y las condiciones referidas anteriormente, han demostrado que la precipitación del apatito es mucho menos de 10%.

La imagen que emerge es muy imprecisa y se hace más compleja debido a los largos ciclos internos del P en el océano. Un flujo cerca de 600 veces un río es la que existe entre la biota marina y el agua de la superficie de los océanos, reduciendo el tiempo de residencia del P en la biota marina de cerca 50 días (cerca de 50 años para la biota continental). El tiempo de residencia del P en la superficie del océano es de tan sólo 2,6 años, mientras que en el fondo oceánico es de 50.000-100.000 años. Morse (1979) citado por Bentor (1980) ha estado llamando la atención del extraño reflujos de P en los sedimentos en la columna de agua, mayormente en las zonas de costa y de taludes, el cual puede ser 10 veces más que el total introducido por los ríos al mar.

Lo único claro resultante de esta confusa dinámica es el hecho de que la precipitación del apatito no controla el nivel de fosfato disuelto en los océanos actuales.

2.1.1. El fosfato oceánico disuelto y la solubilidad del F-carbonato-apatito

El fósforo es un raro elemento traza en el agua de mar, que se encuentra en el orden de los 70ppm de P. En la zona de regeneración de la materia orgánica, la concentración del fósforo disuelto puede tener los valores de entre 50-100ppb a unas profundidades entre 200-400m. Las diferencias regionales en el contenido de P en el agua de mar profundo son conspicuas: 60-100ppb en los océanos Pacíficos e Índico, sólo 35-85ppb en el Atlántico; en océanos semicerrados cuyas cuencas tienen frecuentemente bajo contenido de P; en aguas como las del Mar Rojo contienen 15ppb de P y en el Mediterráneo éste puede llegar a tan sólo 6ppb.

Es evidente que no podemos responder a la pregunta de si el agua de mar, saturada o no, está relacionada con F-Carbonato-Apatito. Esto es, sin embargo, que alguna evidencia demuestre que el agua de mar está tal vez sobresaturada: esqueletos fosfáticos (por ejemplo, huesos de peces) en el fondo marino son por lo general corroídos. Por otra parte, el F-Carbonato-Apatito puede ser

precipitado (pobre en Mg) de agua de mar en el laboratorio, pero sólo las concentraciones considerables de P están presentes de modo natural en el agua de mar.

La situación, se hace drásticamente diferente por el agua de mar intersticial, particularmente por sedimentos ricos en materia orgánica. Luego éste es regenerado, liberando el fosfato y siendo sustituido por sulfatos. Adicionalmente, los gránulos de P son añadidos al agua intersticial por la reducción de fosfatos formando oxi-hidróxidos de hierro. Brooks, et al. (1968) y Sholkowitz (1973), citados por Bentor (1980), reportan 7.500ppb P en agua intersticial en sedimentos anóxicos en la cuenca del Borde Costero de California. También en el artículo de Bentor (1980) cita a Burnett (1977) quien estimó un valor de 1.400ppb P, a una profundidad de 15cm en sedimentos similares de la Costa Peruana y, Baturin (1972) reporta valores mayores de 2.500ppb P en aguas intersticiales en los sedimentos fosfáticos de la Costa de Namibia. Bray *et al.* (1973), igualmente ha reportado valores de 6.200ppb P en el agua intersticial en la reducción de sedimentos, que es el hábitat ideal para la formación de fosforitas en los océanos del Presente.

2.1.2. La función de las corrientes ascendentes (*upwelling*)

Como se explicó en el Capítulo I, cuando Kasakov introdujo la idea de las corrientes ascendentes en la investigación de fosfatos, él propuso un mecanismo inorgánico dominante para la precipitación del apatito. Esta visión particular puede ser ahora abandonada, por un gran número de razones:

1. La tasa de difusión del CO₂, decrece con la presión; es mucho menor que la velocidad de las corrientes ascendentes.
2. Súper-saturación de los fosfatos, el cual ocurre en o cerca a la zona prótica (*protic zone*), donde los organismos desempeñan un importante papel.
3. El agua de mar profundo no es “rica en fósforo” y es más probablemente considerada insaturada. Esta es, de hecho, la explicación de que en muchas

áreas de corrientes ascendentes en océanos modernos no tienen formación de fosforitas.

4. Martens y Harris (1979) citados por Bentor (1980) demostraron en experimentos de laboratorio que la precipitación del apatito es críticamente dependiente de la relación Mg^{+2}/Ca^{2+} , en solución acuosa.

El concepto de la precipitación inorgánica del apatito en las columnas de agua en áreas de corrientes ascendentes no se observa, por lo que se considera, que es tal vez equivocado pensar que ocurre en los océanos modernos.

Dos (2) puntos débiles son: primero, que las corrientes ascendentes no pueden suplir “aguas ricas en fosfatos”, esto debido a la actividad biológica; segundo, las corrientes ascendentes no implican que el agua ascienda de grandes profundidades. Por ejemplo, las corrientes ascendentes de Namibia sólo ocurren a 200m del fondo, de hecho el agua en zona de regeneración de la materia orgánica es frecuentemente más rica en P que el agua de mar profunda.

Si las zonas potenciales de formación de fosforitas son confirmadas a las zonas de corrientes ascendentes, esto implica una fuerte restricción geográfica, las cuales son representadas tan sólo por el 1% de las áreas oceánicas (Ryther, 1963 op. cit. Bentor, 1980).

Algunas otras zonas, como los estuarios, pueden ser formadores de fosfatos, de los cuales son suplidos por el agua de los ríos. Ejemplo, los fosfatos en el este de los Estados Unidos, también en *Giresse* para los fosfatos del Congo. El promedio de formación de gránulos de P disueltos en agua de río es sólo 20ppb P. Para algunos estuarios, las concentraciones pueden variar de 30-120ppb P. El factor decisivo para la formación de fosforitas no es la concentración de P, más bien al nivel de productividad y condiciones que conduzcan a la preservación de la materia orgánica en los sedimentos.

La secuencia de eventos como se muestra en la figura 2.1.1:



Figura 2.1.1: Secuencia de eventos en la formación de apatitos sedimentarios marinos. Elaboración propia con información de Bendor (1980)

Representa parte de la respuesta a una pregunta que se encontraba (1980) en debate. La materia orgánica contenida (en base seca) en 1% de P representa alrededor de un enriquecimiento de un factor de 140 000.

2.1.3. La inhibición de Mg-precipitación de apatito primario versus reemplazamiento

Si la inhibición de Mg se presenta como necesaria para la cristalización del apatito directamente del agua de mar, entonces no es necesario plantear el caso del agua intersticial. Estos frecuentemente pueden cambiar a Mg^{2+} por la formación diagenética de los minerales de Mg, por ejemplo, en arcillas (paligorskita, sepiolita, glauconita, esmectita). En un ambiente reductor, los ferro-oxi-hidróxidos en partículas de arcillas son reducidos a pirita, haciendo que sean extraídos del sistema los Mg^{2+} (iones disponibles) por ejemplo, montmorilonita. El Mg^{2+} puede eventualmente perderse por la absorción superficial bien sea por calcita (Ca-Mg-sobrecrecimiento) o en el ópalo biogénico o por dolomitización. Es muy significativa en esta conexión que la paligorskita y, más raramente la sepiolita, estén asociadas con muchos fosfatos.

Se piensa que el precursor amorfo del apatito existe en la naturaleza y en lugares de formación actual del apatito fuera de la Costa de Namibia, Perú y Chile, lugares donde puede verse la producción de estos.

La inhibición de Mg muestra lo tupido de la resolución de la principal interrogante en la investigación de fosfatos: depositación primaria de apatito versus reemplazamiento, dado que existe una amplia evidencia de estos procesos (fosfatización) operando en la naturaleza, como aquella en

foraminíferos y otras conchas, son algunas de ellos. La formación primaria y sustitución del apatito ocurre siempre en la naturaleza y algunas veces en ciertos depósitos. La fosfatización de foraminíferos y de conchas de moluscos es bastante común, en muchos de los fosfatos antiguos.

2.1.4. Condiciones de pH y Eh

El rol del pH y del Eh en la formación de fosforitas es conocido solo en mediciones costa afuera. En áreas de depositación de apatito en el Reciente, los valores de pH en el agua intersticial son menor es que 7,5 comprobados por reiteradas mediciones en Namibia: 7,2-7,4 y 7,4 en Perú. Las condiciones favorables para la precipitación del apatito son generalmente las mismas que para el CaCO_3 . La estabilidad del apatito decrece con el decrecimiento del pH, el cual debe ser cercano a $\text{pH}=7$ pero, los carbonatos particularmente inestables pueden llegar a tener 7,5. Un pH menor que 7,5 puede incrementar la relación crítica de $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ para la cristalización del apatito, aunque no está referida la proporción.

Bentor (1980) hace referencia a que Baturin *et al.* (1970) midieron un Eh de -210mV en los sedimentos de fosforitas de Costa Afuera de Namibia y Burnett *et al.* (1980) encontraron valores más bajos a 0,2ml/l de O_2 disuelto en aguas del fondo de las Costas en Perú y Chile.

2.1.5. La evidencia de elementos traza en apatito

Sobre este punto, Bentor (1980) menciona a Tooms *et al.* (1969) quienes explican que los elementos traza son función de dos (2) factores: una química cristalina única, la capacidad del apatito de aceptar iones externos y una geoquímica única, además de la disponibilidad de estos elementos en el ambiente de formación del apatito:

1. Ce: los bajos valores de Ce en apatitos de fosforitas refleja la influencia de agua de mar profunda. Las mediciones anómalas de Ce, de hecho, es la relación entre el flujo de agua de río que entra al mar, que no está

equilibrada con el agua de mar profunda, y aquella que va ascendiendo en el ambiente de formación del apatito.

2. Eu (apatito magnético): el Eu^{2+} muestra preferencia hacia la plagioclasa cálcica. Los apatitos sedimentarios, por el contrario, muestran valores erráticos de Eu. El Eu en el agua de mar es trivalente y no muestra anomalías. Estas variaciones en los apatitos marinos no habían podido ser medidos con certeza para la fecha de publicación del artículo de Bentor (1980).
3. U: en el agua de mar, el U disuelto está presente en estado hexavalente, de forma de complejos uranil-carbonáticos. En algunos sedimentos marinos reducidos, el elemento precipita en la forma de U^{4+} . En apatitos marinos, la ocurrencia de U usualmente se encuentra en estado de oxidación, en bastante extrañas proporciones variables. La presencia de U^{4+} en muchos apatitos puede explicarse solo por su formación en extrañas condiciones reductoras. A pesar de la incorporación del apatito, el U^{4+} puede decaer oxidándose a U^{6+} (por decaimiento radiactivo) y climático. En general, pero con una tasa irregular, la relación $\text{U}^{6+}/\text{U}^{4+}$ decrece con edad y rango de clima, como mostró Altschuler (1974) citado por Bentor (1980).
4. Otros metales pesados: los apatitos frecuentemente tienen concentraciones de iones de metales pesados como: Ag, Cd, Zn, Pb, Mo, Y, Sr, Se así como algunos lantánidos. Muchos de estos elementos son enriquecidos por la naturaleza orgánica, enfatizando de nuevo en la estrecha relación de estos con las fosforitas.

2.2. Ciclo biogeoquímico del fósforo (Sheldon, 1980)

El fósforo es temporalmente expuesto en las rocas sobre la superficie y algunas pueden entrar activamente a los ciclos biológicos. Éste es transportado eventualmente a los océanos donde es llevado por las aguas profundas por el hundimiento de organismos, que construyen las acumulaciones de fósforo en las aguas marinas profundas. Otras fuentes de P que se hunden en el ámbito marino son los huesos de peces apatíticos, los sedimentos metalíferos, la materia

carbonácea, los sedimentos carbonáticos biogénicos, los nódulos de manganeso y el guano.

La remoción del fósforo del océano está permanentemente involucrado con el ciclo tectónico; datos preliminares indican que 15×10^{12} gramos de P están siendo retornados en el presente a los océanos, por flujos provenientes de sedimentos del piso oceánico; solo $0,41-1,9 \times 10^{12}$ gramos de fósforo por año son adicionados a los mares provenientes de los ríos (Burnett y Sheldon, 1979).

Sorprendentemente, los sedimentos fosfáticos en el continente son, en gran parte, de edad Miocena según datos radiométricos y/o paleontológicos. El océano actualmente está sobresaturado con respecto al apatito (Atlas, 1976), debido a la baja concentración de fósforo y la formación de un complejo iónico de fosfato de magnesio que efectivamente reduce la concentración del ión PO_4^{-3} . Más evidencia ha mostrado que el fósforo no puede ser removido de manera significativa, de los océanos modernos, por precipitación química de las fosforitas en el suelo marino y en áreas de corrientes ascendentes, aunque siempre menos cantidad de fósforo es depositada como parte integral de los huesos de peces y una parte es adsorbida de la materia carbonácea, sedimentos carbonáticos, sedimentos metalíferos y nódulos de manganeso.

Una gran diferencia en el pasado puede observarse en la era azoica Precámbrica, cuando la concentración baja de oxígeno con una atmósfera alta en CO_2 , pudo haber causado una alta concentración y disolución de este compuesto en los océanos mayor que en el presente y tender a reducir el pH. Si el océano fuera ácido, el apatito podría volverse inestable; la concentración máxima posible del ión PO_4^{-3} , en un océano ácido, puede ser controlado por las mas insolubles de las especies minerales ácidas del fósforo. Este argumento asume que la concentración total de fosfatos de un océano es generalmente controlado por la fase del mineral de P en el océano, en aquellas áreas producto de máxima

solubilidad de los iones apropiados, no asumidos en algunos trabajos -que tratan de explicar la formación de fosforitas marinas-.

Después que aparece la vida (en La Tierra), el pH del océano Precámbrico aumenta debido a la remoción del CO₂ de la atmósfera y océanos por la actividad biológica y un punto más que debe ser investigado donde el agua estuvo alcalina y el producto de la solubilidad del océano con respecto al apatito fue excedida, posiblemente primero en algunas áreas particularmente favorables. La precipitación temprana de fosforitas en los océanos Precámbricos puede ser el origen de esta evolución de la química oceánica. Durante el Proterozoico, los estromatolitos apatíticos-fosforíticos de China e India pueden ser las primeras precipitaciones inducidas por procesos de algas (Banarjel, 1978).

El carácter químico del océano tardío en el Proterozoico y en el “Eons” Fanerozoico también aparece en las diferencias con los océanos actuales. Las fosforitas también aparecen en las evidencias estratigráficas y petrográficas al ser depositadas en la interfase agua-sedimento. La evidencia de estas rocas muestra por sí mismas que las más antiguas fueron formadas directamente sobre el suelo marino.

Los argumentos que se encuentran a la cabeza sugieren que:

(1) la composición fosfórica del océano ha variado durante el tiempo geológico y
(2) estas fueron eras de grandes concentraciones de fósforo y significativos fosfatos primarios sedimentarios en el piso marino y otras eras, incluyendo el Presente, de baja concentración de fósforo y de sedimentación de fosfatos poco significativa.

2.3. Mineralogía y geoquímica de fosfatos (Yaacov, 1984)

Las fosforitas son definidas como rocas sedimentarias con un contenido mayor al rango de 18-20% de P₂O₅. Muchos fosfatos son de origen marino y de estos, la francolita (fluorapatito carbonático) es el principal mineral formador de los mismos.

Los fluorapatitos son el prototipo de la familia de los apatitos y su fórmula genérica es la siguiente: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$. Las sustituciones son siempre posibles con algunos aniones y cationes en la estructura de estos minerales. La siguiente Tabla 2.3.1 muestra algunas de éstas:

Tabla 2.3.1: Algunas posibles sustituciones en la estructura del apatito. Tomado de Yaacov (1984)

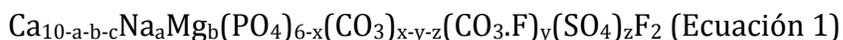
| Ión Constituyente | Ión Sustituyente |
|--------------------|--|
| Ca^{2+} | Na^+ , K^+ , Ag^+ Sr^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ba^{2+} Sc^{3+} , Y^{3+} , R.E. ³⁺ (R.E.: tierras raras-siglas en inglés), Bi^{3+} V^{4+} |
| PO_4^{3-} | CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , CrO_4^{2-} AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} , CO_3F^{3-} , $\text{CO}_3\text{OH}^{3-}$ SiO_4^{4-} |
| F^{-} | OH^{-} , Cl^{-} , Br^{-} O^{2-} |

2.3.1. Francolita

A pesar de la abundancia de la francolita y su importancia económica, su composición y propiedades todavía no se conocen con certeza (sus propiedades). Esto se debe a dos (2) razones:

- 1) La francolita ocurre en cristales minúsculos (cristalitos), que tienen dimensiones de solo decenas a cientos de Angstrom (Å) de longitud. Se conoce además que la composición de los cristales no es homogénea. Esto trae como resultado que cualquier medición analítica es solo una medida de muchas composiciones.
- 2) La 'ventana abierta' del apatito permite un gran número de sustituciones (*diadochic*). Este incremento en la complejidad de la composición en la francolita es la causa principal de la heterogeneidad de los cristalitos.

La fórmula general (ecuación 1) para la francolita puede ser identificada (la cual fue descrita por Yaacov, 1984) de la siguiente manera:



Donde,

$$x=y+a+2c \text{ (c es el número de vacantes de Ca). (Ecuación 2)}$$

2.3.2. Otros minerales

Otros minerales de fosfato. A pesar de que existen 300 especies distintas de minerales de fosfato que se conocen (Moore, 1980), prácticamente el único mineral de fosfato que ocurre en las fosforitas marinas es la francolita. Una aproximación termodinámica para determinar el ambiente de formación de los fosfatos de calcio y aluminio ocurre en las fosforitas erosionadas. El autor cita a Altschuler (1973) como el que determinara y resumiera por lo menos para los años ochenta del siglo pasado, la mineralogía y geoquímica de depósitos de fosforitas erosionadas.

Otros minerales no fosfáticos. El cuarzo es el mineral omnipresente en rocas sedimentarias y las fosfáticas casi siempre contienen cuarzo. Las asociaciones de *cherts*, carbonatos y capas negras con las fosforitas es bien conocida (McKelvey, 1967; Cook, 1976). Los carbonatos, calcitas y dolomitas están bien asociadas con fosforitas de todas las edades (citadas por el autor en el texto de Emigh, 1967; Bushinsky, 1969; Prévôt et al., 1979b).

La abundancia de dolomitas en fosforitas es por el hecho que los iones de Mg inhiben la precipitación de apatito (Bachra et al. 1965; Martens y Harris, 1970). Se pueden ofrecer dos (2) explicaciones para esto (y solo una puede ser correcta) para esta paradoja:

- (a) la dolomitización ocurre en la diagénesis tardía, mucho después de la precipitación del apatito (o formación);
- (b) los minerales comienzan en algunas paragénesis geológicas y pueden formarse químicamente y en tiempos diferentes.

La glauconita es también asociada a las rocas fosfáticas y es bien conocida (Collet, 1908); sin embargo, es menos común en rocas fosfáticas de bajo grado (*low-grade*) que en las fosforitas ricas y, en muchos casos, no ocurren en todos

los casos. La razón puede ser que la glauconización y la fosfatización suceden en las proximidades (pero en diferentes) estados de evolución de las cuencas sedimentarias (Odin y Letolle, 1980). Burnett (1980) describió los sedimentos de la costa afuera peruana y chilena, donde ocurre una secuencia general: *mudstone* colofano–fosforita peletal–fosforita peletal glauconizada. Esta secuencia parece ser representativa de una evolución en las condiciones favorables para la formación del apatito (bien desarrollado, oxígeno mínimo, alta producción primaria, entre otras) a aquellos menos favorables (alto contenido de oxígeno disuelto–productividad primaria baja). La illita (aparte de la glauconita) puede formarse en un número de fosforitas casi siempre en cantidades menores en la fracción arcillosa total. La montmorillonita es el mineral de arcilla predominante en muchos depósitos de fosforitas.

2.3.3. Materia orgánica

La materia orgánica es el constituyente característico de las fosforitas (Gulbrandsen, 1966; Bentor, 1980). El estudio de la materia orgánica en las fosforitas comenzó a ser frecuente por el interés presente de éstas como roca madre del petróleo (Powell et al. 1975; Maughan, 1980; Belayouni y Trichet, 1980; Bein et al. 1980; Sandstrom, 1980). Existe una íntima relación entre los factores generadores de depósitos de fosforitas y la generación de cuerpos de hidrocarburos y es mayor cuando hay coincidencia en el área trófica óptima y de productividad biológica (Maughan, 1980). Esto no es contradictorio, la relación usual inversa entre el carbono orgánico y el contenido de P_2O_5 (Belayouni y Trichet, 1980) está fundamentada en la información recopilada en muchos depósitos. Esto es causado porque el fósforo está disponible solo después de la destrucción de la materia orgánica, un proceso que también está activo en la actualidad (Romankevich y Baturin, 1972).

En general, la materia orgánica en las fosforitas aparece fundamentalmente como resultado de la degradación microbiana anóxica del plancton marino. Los valores de azufre son relativamente muy altos. En muchos casos, desde que las

fosforitas son depositadas en las cuencas poco profundas y no sean soterradas en profundidad, los depósitos no tienen que estar sometidos a diagénesis extensivas y en las fosforitas cámbricas siempre la materia orgánica es totalmente inmadura.

Esta propiedad de la materia orgánica puede estar relacionada con la posición estructural de las áreas favorables de depositación de la fosforita y lo bien conocido del hecho que las fosforitas son series condensadas, como se ha explicado los párrafos anteriores.

2.3.4. Elementos mayoritarios

Los elementos mayoritarios no varían de manera significativa o importante en las fosforitas; esto es debida en parte a la definición de éstas. Las diferencias, cuando están fundamentadas, son principalmente debidas a las concentraciones de los minerales llamados accesorios (ganga).

2.3.5. Elementos traza

Los elementos traza, se consideran están originados por el enriquecimiento de algunos de estos en las fosforitas (Karuskopf, 1955; Tooms et al. 1969). Igual que en la sección anterior, los datos de varios yacimientos muestran que ciertos elementos están enriquecidos en las fosforitas y que este grupo es esencialmente el mismo, sin importar como estos se hayan desplazado hasta el sitio de formación de estas rocas, siendo fundamentada y la base para la comparación la abundancia de estos elementos en la corteza (Tooms et al. 1969) o el promedio en las capas (Altschuler, 1980). Este grupo está compuesto de menores cantidades de Ag, Cd, Mo, Se, Sr, U, Y, Zn y tierras raras (excluyendo el Ce). Esta agrupación parece característica de las fosforitas y es probablemente indicativo de su génesis.

Algunos postulados han sido hechos a partir de la presencia de elementos traza en las fosforitas:

(1) un paralelismo entre elementos acumulados en el agua de mar y en las fosforitas (Tooms et al 1969). De manera similar, siempre es más notable cuando solo consideramos el Y y el grupo de las tierras raras (REE), el grupo entero es enriquecido, el Y es relativamente enriquecido con respecto al conjunto y el Ce decrece (Altschuler, 1980).

(2) en general no está clara la relación entre el mayor incremento de elementos y P, siempre dentro de algunas fosforitas (Prévôt et al 1979a).

(3) un paralelismo entre los elementos traza enriquecidos en las fosforitas y cómo se concentra la materia orgánica (Prévôt y Lucas, 1979a).

(4) A pesar de la similitud en las concentraciones de los elementos traza en las fosforitas, estos son bastantes análogos entre yacimientos diferentes.

Como conclusión, se tiene que un grupo característico de elementos traza está enriquecido en las fosforitas; la asociación biogénica con la materia orgánica, es parte de las propiedades cristal químicas de la francolita. Algunos depósitos presentan patrones diferentes, probablemente debido a las características de su historia geológica. Un camino para la tipificación de las fosforitas fue propuesto por Altschuler (1980), mediante el uso de relaciones geoquímicas para elementos coherentes como Zn/Cd, Th/U o Y/REE.

2.3.6. Isótopos estables

Se han hecho muchos estudios de isótopos estables en fosforitas. Kolodny y Kaplan (1970) analizaron isótopos de carbono y oxígeno dentro de la francolita CO_3^{2-} y en la coexistencia con la calcita. Esto se fundamenta en que tanto el C y O en la francolita está enriquecida en la respectiva luz de isótopos relativos que en la calcita. Una conclusión importante de tres (3) distintos trabajos concuerda en que el decaimiento de ^{18}O es causado por el también decaimiento de ^{13}C . Esto puede ser efecto de las aguas subterráneas de origen terrestre. La estructura carbonatada en la francolita ha estado siendo propuesta para la datación de ^{14}C (Haynes, 1968).

El anión de fosfato en la francolita también contiene oxígeno y éste según Urey et al. (1951), quienes fueron los primeros en estudiar los isotopos de oxígeno en la composición del fosfato, establecieron que es posible determinar un 'termómetro', cuando es combinado con un 'termómetro' de oxígeno isotópico Ca-carbonato, el cual es independiente de la composición isotópica del agua del océano.

Tudge (1960) desarrolló una técnica confiable para el análisis de $\delta^{18}\text{O}$ en PO_4^{3-} . Esta técnica fue empleada por Longinelli (1965, 1966) y sus colegas investigadores (Longinelli y Sondi, 1965; Longinelli y Nuti, 1968, 1973a,b; Longinelli et al. 1976) de manera satisfactoria para analizar los fosfatos en carbonatos, fosforitas, apatito biogénico, materia orgánica proveniente de animales marinos y la disolución del fosfato oceánico. El más importante resultado de este estudio es la disponibilidad de un banco de datos de relaciones de la temperatura $-\delta^{18}\text{O}$: $t^\circ(\text{C})=111,4-4,3*(\delta_p-\delta_w+0,5)$ donde $\delta_p=\delta^{18}\text{O}$ de agua, sobre la escala llamada *SMOW*¹. La diferencia en los valores de δ de carbonato y fosfato en equilibrio con el agua de mar es constante e independiente de la temperatura del agua.

Longinelli (1974) también fue el primero en analizar $\delta^{18}\text{O}$ en huesos y dientes de restos de organismos de mares cálidos. Esto se acerca al hecho del establecimiento de un termómetro continental para obtener el $\delta^{18}\text{O}$ ambiental del agua del $\delta^{18}\text{O}$ con T constante, de animales de sangre caliente y la temperatura ambiental, coetánea (contemporáneo) con los huesos de los peces analizados.

La composición isotópica de oxígeno de los apatitos fosfáticos puede ser equilibrada en el agua durante toda la vida del organismo y ser perfectamente

¹ SMOW: *Standard mean ocean water*. Escala estándar internacional.

preservada después de que estos mueren. Kolodny y Luz (1984²) mostraban que el apatito formado en esqueletos de organismos, independientemente si son de agua dulce o salada, obedece a la relación de temperatura hallada por Longinelli (1974). Esto puede ser acentuado de manera temporal dado que menos partes de los carbonatos estructurales son cambiados *post-mortem* (Hassan y Ortnet, 1977): los resultados obtenidos por Kolodny y Luz et al. (Referido en comunicación personal con Yaacov, 1984) indican que el intercambio *post-mortem* del apatito PO₄ biogénico y el oxígeno con estos ambientes es de hecho mínima.

Los estudios de isótopos de azufre (S) en fosforitas fueron hechos por Bliskovskii et al. (1978), así como Nathan y Nielsen (1980). Estos autores determinaron el $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato estructural en francolitas de fosforitas de diferentes edades y comparadas con la existencia de yeso en algunas de las muestras. Los resultados soportan la teoría que muchas fosforitas son formadas en una temperatura de diagénesis en ambientes reductores, durante la acción de las bacterias reductoras de sulfatos.

2.4. Geoquímica marina en el origen de los fosfatos (Hensen et al., 2006)

2.4.1. Adición y redistribución del fósforo en sedimentos marinos: formas de vinculación de las especies de P

El enriquecimiento de las partículas de fósforo en los sedimentos marinos se lleva a cabo en varias proporciones de las distintas fracciones inorgánicas y orgánicas. Los estudios recientes como el de Faul y otros (2005), citados por estos autores, han investigado que la distribución del fósforo en la decantación de las partículas en el océano depende de la extensión y del régimen oceánico. El flujo de P en sedimentos es típicamente dominado por los componentes radioactivos de P, incluidos el orgánico (~40%), autigénico (~25%) y el inestable más las fases donde está asociado con oxihidróxidos de hierro (~21%).

² El material de Kolodny y Luz se encontraba en preparación en el momento de la edición del libro "Phosphate Minerals" en 1984. Dado que es una referencia del texto del artículo de Yaacov (1984) *Chapter 8*, se presume (sin argumentos que lo refuten) que la publicación de dicho material fue luego de 1984, siendo la razón de esa colocación de duda en el año.

Con solo cerca del 13% la fracción detrital no reactiva parece ser menos importante.

La mayor especie de fósforo disuelto en ambientes marinos es HPO_4^{2-} . Los fosfatos son generalmente liberados por los poros de agua durante la degradación microbiana de la materia orgánica concomitante (actuando conjuntamente) en la reducción del óxido férrico. El fosfato no puede ser usado como un adaptador de electrones bajo ciertas condiciones ambientales. Los procesos que consumen fosfatos son:

- (1) El consumo biológico para la formación de nueva biomasa,
- (2) La absorción en la superficie de las partículas sueltas o co-precipita con la formación *in-situ* de minerales y
- (3) La formación de fluorapatito carbonático autigénico (CFA-*Carbonate fluorapatite authigenic*).

Ruttenberg (1992) desarrolló un procedimiento selectivo que identifica el P de cinco (5) reservorios en la cuenca de depositación y su reactividad química. El esquema analítico establecido se conoce como el método SEDEX. En las fases sólidas se pudieron identificar cuantitativamente los reservorios de P más importantes en sedimentos marinos:

- (1) intercambio o pérdida de P sorbido;
- (2) el fosforo limita los óxidos férricos y los oxihidróxidos férricos;
- (3) los huesos de peces;
- (4) CFA+hidroxiapatito biogénico+ CaCO_3 con P limitado;
- (5) el apatito detrital de origen ígneo y metamórfico y
- (6) el P orgánico.

Por estudios de reservorios de P en sedimentos marinos, Ruttenberg (1993) calculó que el flujo total enterrado de P reactivo/biodisponible está en el rango de $8-18,5 \times 10^{10}$ mol/año, dando como resultado en un recálculo del promedio del tiempo de residencia del fosfato: 16-38 000 años.

2.4.2. Formación autigénica de fosforitas

No hay una definición consistente para el uso del término fosforitas. Hay quienes limitan el término al contenido de P del 6% en peso (van Cappellen y Berner, 1988) a un umbral de 18% en peso de P_2O_5 , representativo por los minerales de fosfato autigénico y biogénico (Jarvis et al. 1994).

Aunque existen numerosas investigaciones, todavía no está totalmente claro el proceso de la fosfogénesis (=la formación autigénica de carbonatos fluorapatito-CFA) dada su gran complejidad y no está completamente entendido. Sin embargo, un estudio bastante reciente (Schulz y Schulz, 2005) muestra que en el ciclo metabólico de grandes bacterias sulfurosas pueden jugar un rol importante de estos procesos. La disolución subsecuente de los procesos de re-precipitación se piensa es la responsable de la transferencia a más estables configuraciones de las complejas carbonato-fluoridas, variedades de francolitas, cuando son más comunes en sedimentos ricos en fosfatos y rocas (McClellan, 1980; Kolodny y Luz, 1992).

Debido a que CFA se forman a expensas del P orgánico, áreas de alta productividad o en sedimentos menos ricos en orgánicos favorecen la fosfogénesis. Por eso es que en los sitios donde hoy en día ayuda a la formación de fosforitas estén alrededor de los márgenes continentales, donde la materia orgánica detrital es suficiente para la intensa actividad microbiana y las condiciones subóxicas a anóxicas limitan los sedimentos de superficie. Este es el caso particular de las regiones con intensas corrientes ascendentes en la costa y, por debajo, una zona permanente de oxígeno mínimo.

Obviamente, la gran bacteria sulfurosa (denominada GBS) juega un papel importante en el ciclo del fósforo en el océano (Nathan, 1993). En especial, la GBS es la “gran sospechosa” (indicador biológico) de ser parte en la formación de las fosforitas. Éstas ocurren en algunas áreas donde hay formación reciente y

activa de fosforitas, además de encontrarse evidencia de su presencia fósil en depósitos de fosforitas (Williams y Reimers, 1983).

La *Thiomargarita*, es la GBS presente en la costa de Namibia, donde se observa formación reciente de fosfatos en sedimentos anóxicos con una sobresaturación de los poros de agua con fosfatos y una precipitación rápida de hidroxiapatito. Los experimentos de laboratorio muestran que la liberación de fosfatos por las células de la *Thiomargarita* pueden ser inducidas por la adición de fosfato al medio (Schulz y Schulz, 2005). Esto es un posible indicador de que el proceso de acumulación bacteriana del fosfato y la liberación en ambientes marinos eutróficos son similares a los observados en áreas con aguas servidas.

2.5. Comportamiento de los elementos traza y ocurrencia en fosforitas

2.5.1. Comportamiento de elementos traza en formaciones de fosfatos sedimentarios (Prévôt y Lucas, 1980)

Los ambientes de formación de las fosforitas, de alguna manera, permanecen desconocidos, tanto los que tenemos en el Presente (y otros más jóvenes) así como las que se presentaron durante el Cretácico; tienen bastantes elementos comunes en la composición de los apatitos (como el carbonato fluorapatito) entre unos y otros. La composición de los elementos mayoritarios de estas rocas suministra algunas pistas del modo en que se originaron.

Una de las limitantes del trabajo de Prévôt y Lucas (1980), es que los autores se han concentrado en los elementos traza que consideraron más frecuentes en las fosforitas, con la excepción de U y las tierras raras (Swaine, 1962; Tooms et al. 1969). Después del estudio de determinación mineralógica por análisis de rayos X, las muestras fueron analizadas químicamente por las lecturas del método espectrométrico (quantómetro).

2.5.2. Elementos estudiados

Estroncio (Sr): El Sr está concentrado de modo importante en fosforitas. Sea cual sea la composición de éstas, el Sr siempre tiene correlaciones positivas con P_2O_3 ,

raramente con calcita (CaCO_3) y nunca con alúmina (Al_2O_3). Lo que no cabe duda es que estos elementos están relacionados perfectamente con el apatito. El Sr y el P_2O_5 , sin embargo, no son proporcionales de manera estricta. Las muestras grandes de P_2O_5 , no están necesariamente enriquecidas en Sr.

La relación entre los dos (2) elementos (Sr y P) es bien cerrada, se cree que las hipótesis que planteen acerca de la formación del apatito, por transformación de carbonato de calcio de origen biológico, se respaldan por el hecho de que es bien conocido que las concentraciones de fósforo en las partes blandas de los microorganismos y en los huesos de los organismos más grandes, donde el estroncio en conchas puede estar por el orden del 1% (Kulp et al. 1952).

Para simplificar la extrema complejidad resultante de la movilidad del carbonato de calcio, indicando que puede ser deducida a partir de diagramas hechos, que están basados en los siguientes planteamientos:

- El fósforo epigeniza en carbonatos, preferentemente aragonito;
- La fosfatización preserva el estroncio del reemplazamiento en carbonatos (aragonito o calcita);
- La calcitización del aragonito procede de la pérdida del estroncio;
- Los apatitos son formados por diagénesis temprana conjuntamente con un lodo carbonático los cuáles son en su mayor parte pruebas aragoníticas;
- Los aragonitos inestables tienden a la calcitización;
- La fosfatización y calcitización del aragonito compete a cada uno (cada proceso en particular).

Bario (Ba): El bario parece comportarse similar al Sr en las fosforitas y en la asociación de carbonatos, pero es sistemáticamente más abundante durante la formación y está correlacionado con el apatito o con las arcillas, pero nunca con los carbonatos. El bario se cree está relacionado con la presencia de plancton de

donde se conocen las concentraciones de estroncio que estos tienen (Martin y Knauer, 1973).

Vanadio (V): La estrecha relación entre fosfatos y vanadatos es bien conocida. La presencia de V en fosfatos y carbonatos es bastante diferente. Este elemento es enriquecido en la formación, donde puede ser fácilmente sustituido por el fósforo. El contenido de la serie de V varía de un sitio a otro—de entre 40 y 350ppm—los valores expresan valores dispersos de una muestra a otra en una misma zanja o núcleo, variando de 30 a 1.000ppm.

Los elementos, V, Ni, Cr, Zn y algunas veces Cu y sus asociaciones, están relacionados típicamente con la materia orgánica (Krauskopf, 1955; Gulbrandsen, 1966; Cook, 1972).

Níquel (Ni): Se encuentra en poca abundancia en las fosforitas y es parecido en comportamiento al V. sin embargo, las concentraciones pueden incrementarse cuando las fosforitas contienen glauconitas u óxidos de hierro (Debrabant y Paquet, 1975; Lucas et al. 1978).

Cromo (Cr): El enriquecimiento de Cr está en el orden de los 200 a 300ppm. En el caso de la Formación Fosforia, se encuentra por encima de los 1.000ppm. Se estima que el Cr está presente de forma primaria en el apatito (o es aportado por éste), donde es fijado luego en o con las arcillas, donde está presente.

Cinc (Zn): El Zn es más aleatorio que los elementos anteriormente mencionados. Algunas veces puede ser más abundante en fosforitas y en otras en carbonatos, correlacionadas luego con apatito y otras arcillas, donde no muestra una tendencia dominante con otros del grupo de V, Ni, Cr y Zn.

Uranio (U): El uranio y las tierras raras son considerados elementos trazas. Para las tierras raras se recomiendan la literatura presentada por Slansky (1977) para uranio y por Altschuler (1967, 1973) para uranio y tierras raras.

Elementos minoritarios: Algunos elementos minoritarios ocurren en 0,X%. K y Ti son fuertemente asociados con las arcillas; el Na está distribuido entre las arcillas y el apatito, pero está claramente dominado de manera local en el apatito. El Mn, aunque está disponible en bajas cantidades, está relativamente enriquecido en los contenidos de agua de mar en ambos, es decir, tanto en fosforitas como en carbonatos. Esta relación con los fosfatos es bien conocida, por ejemplo, en los nódulos oceánicos polimetálicos. El contenido de S es altamente variable.

2.5.3. Discusión de los autores (Prévôt y Lucas, 1980)

La cantidad de un elemento en una roca y esta partición (distribución), entre los diferentes minerales en estas rocas, están afectados por numerosos factores pero, dependen en primera instancia de la disponibilidad de estos elementos en el ambiente genético y sobre las posibilidades ofrecidas por estos para “encontrar” el acomodo más conveniente en estas moléculas.

Algunos otros autores como McArthur (1978), creen que el ambiente de formación no tiene influencia, como ejemplo las fosforitas de ambientes marinos, se asumen con una composición constante. Otros, parecen no estar de acuerdo con este razonamiento, Broecker (1974) mostró que el agua de mar tiene una concentración de componentes mayoritarios relativamente constante, pero no así la concentración de los elementos trazas. Se cree que en la formación de las fosforitas, dentro de las partículas de sedimentos quedan aguas intersticiales que, después en un micro-ambiente, pueden llegar a ser “altas” y por procesos diagenéticos incorporarse a las fosforitas (Lucas et al. 1978).

La paragénesis es localizada; estos depósitos de fosforitas son glauconita o con sulfatos, otros son solo calcitas o dolomitas, o ambas. Estas paragénesis reflejan diferencias en los ambientes genéticos, dependiendo de donde provengan las reservas de los continentes y de los océanos. Estas reservas cambian de lugar y en el tiempo. Se considera que, con certeza el ambiente genético de la fosforita,

puede producir acompañamientos de minerales variados, aunque siempre son los mismos minerales apatíticos (F-carbonato-apatito).

Se conoce la asociación de los elementos V, Ni, Cr, ZN, U con la materia orgánica, conjuntamente con abundantes signos de actividad biológica de macro y, si bien, de microorganismos. Fauconnier, 1977 y Doubinger, 1979 indican que estos organismos, especialmente el plancton, juegan un papel muy importante en la génesis de las fosforitas. Se estima que estos elementos tienen una primera vía de llegada que es biológica y, una segunda, que es bioquímica.

Hay unas preconcepciones de más elementos trazas característicos de las fosforitas, explican cuáles son estos rangos de concentración en las fosforitas que tengan alguna correspondencia con el rango de concentración encontrado en el agua de mar. Si el apatito se forma directamente de la precipitación química del agua de mar, esto muestra la relación existente entre estos dos rangos de concentración. Esta relación está lejos de ser una verdadera relación entre fosforitas y la materia orgánica. La tasa de concentración por organismos obviamente depende de la concentración en el agua de mar pero, los micronutrientes se considera que están disponibles en suficiente cantidad en el medio, los cuales no son limitantes para su reproducción. Los contenidos de elementos en el plancton son difíciles de determinar, debido a la variedad de especies, además de variar con la edad y con las temperaturas (Martin y Knauer, 1973).

Las especies de organismos vivientes cambian rápidamente y no concentran elementos con la misma intensidad. La naturaleza de la materia orgánica transportada está descompuesta, fundamentada en las fosforitas, presentando una estructura lo suficientemente “acomodada” para fijar y preservar estos elementos. La fijación puede ocurrir por simple adsorción de minerales, principalmente arcillas y apatitos pero, es más fuerte con la entrada de elementos en la estructura cristalina. Esta compleja estructura del apatito, como

permite muchos emparejamientos de sustituciones, fácilmente acepta varios elementos, la preferencia por el Sr es uno de ellos. Las arcillas son algunos de los sitios del apatito donde son más o menos sustituibles.

2.5.4. Importancia del conocimiento de la geoquímica de los elementos trazas (Altschuler, 1980)

La necesidad de una evaluación complementaria de los contenidos de elementos traza en fosfatos marinos, obedece a dictámenes económicos y científicos. La determinación sobre la producción a partir del ácido fosfórico, de uranio y tierras raras, además de la aplicación de los estudios geoquímicos con los elementos de las tierras raras a los problemas de génesis y exploración de yacimientos, son algunos de los aspectos donde económicamente son útiles los estudios geoquímicos.

El enriquecimiento de algunas fosforitas marinas en ciertos elementos trazas se conocen desde las primeras determinaciones de tierras raras aplicadas a los fosfatos de Nassau, por Cossa, realizados en 1878. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos ya había comenzado a guardar muestras de los depósitos conocidos para el siglo XIX, donde ya se sabía del contenido de algunos elementos individuales como arsénico, molibdeno, selenio y tierras raras. Un análisis crítico de estos estudios geoquímicos de elementos trazas fueron publicados por Krauskopf en 1955 y Swaine en 1962, el cual abarcó para la época, virtualmente, todos los elementos determinables posibles. A partir de esto, muchos fueron los científicos geólogos que han contribuido con los estudios y datos sobre fosforitas. Los más importantes fueron hechos por Gulbrandsen (1966) el cual contribuyó con una gran cantidad de datos del mayor depósito regional (estadounidense), la Formación Fosforia.

2.6. Enriquecimiento de elementos en fosforitas marinas

La forma en que se encuentra enriquecido un grupo particular de rocas puede estar motivada por contaminación ambiental, por recubrimiento del producto o

la forma en que se buscan los indicadores geoquímicos del ambiente depositacional o el modo de origen.

La abundancia de elementos del promedio de las fosforitas es comparada con los promedios de las arcillas.

Esta norma influyó en la evaluación del enriquecimiento de elementos en las fosforitas está fuertemente ilustrada en los ejemplos de arsénico y boro, el cual muestra un enriquecimiento en contraste con la abundancia continental. Conociendo la abundancia continental del boro y arsénico, podemos ver también su influencia en el enriquecimiento en las fosforitas.

El enriquecimiento de elementos en las fosforitas, se listan en el orden del grado de incremento, son Cd (60x), U (30x), Ag (30x), Y (10x), Se (8x), Yb (5x), Mo (4x), La (4x); Sr, Pb y Zn (cerca de 2x). Excepto el Ce, todos los otros lantanos disminuyen en este grupo. Los elementos que decaen son Li (13x), Ti (7x), Hg (7x), B (6x), Ga (5x), Co (3x) y, Sn y Zr (cerca de 2x). Aquellos con abundancia normal son: As, Ba, Be, Ce, Cr, Cu, Mn, Ni, Sc y V. Tooms et al. (1969) agrupa los elementos en enriquecidos: As, Cr y Sn, y los empobrecidos: Ba, Cu, Mn y Ni.

2.6.1. Comportamiento de elementos coherentes: Zn y Cd; tierras raras

El ordenamiento del grado de enriquecimiento proviene más de adiciones internas dentro de la selectividad espacial de las fosforitas y de ciertos elementos que normalmente son miembros de grupos pares coherentes. El cinc y el cadmio pueden estar enriquecidos en las fosforitas y formados en pares. El cadmio virtualmente no es formado de manera independiente en rocas comunes, y en una larga lista de rocas la abundancia del cinc excede a la del cadmio por un factor de varios cientos ($Zn/Cd=X00$). El radio de Zn/Cd es generalmente cercano a 10. El fortalecimiento cristal-químico, es debido a que el radio del Cd y del Co es casi idéntico, donde el ión del Zn es cerca del 20% más pequeño. En el apatito, si hay que sustituir Zn o Cd, el Cd es el que preferiblemente es fijado. El apatito es sustituido por esfalerita (p.e. Formación Fosforia).

El fraccionamiento ocurrido en las tierras raras es similar a los valores de enriquecimiento derivado de la comparación de la abundancia de las arcillas. El promedio reportado está entre 200 y 300ppm, mientras otras pueden llegar a 700ppm.

El enriquecimiento para cada uno de los elementos que componen las tierras raras en las fosforitas, asumiendo coherentemente con el grupo, se estima que esta acumulación de elementos es de la siguiente manera: La (4x) y Yb³ (5x) por análisis semicuantitativos. La aparente acumulación de Y revela una preferencia mayor con respecto a los lantanos. Las dos (2) características más resaltantes de la diferenciación de las tierras raras en el agua de mar, la deficiencia de cerio y el exceso de itrio, son reflejadas en las clases de apatito marino. El grado como depósitos individuales muestran estas características puede ser modificado por las contribuciones de aguas continentales en las cuencas de depositación. Está igualmente claro que, los aportes de desechos terrestres (continentales) son bien conocidos como los otros componentes autigénicos de los apatitos (notablemente los óxidos de Mn, glauconita, carbonatos), las cuales pueden enmascararse en análisis de rocas fosforitas (como fue presentado en secciones anteriores).

2.7. Fijación de apatitos

Del enriquecimiento de elementos en fosforitas: Cd, U, Y y lantanos, Sr, Pb y Zn, son conocidos, o pueden ser deducidos en el terreno cristalo-químico, lo que sustituye el calcio en el apatito. Estos elementos generalmente son mucho más concentrados en apatitos marinos purificados que en fosforitas “impuras”. La sustitución de elementos tri y cuadrivalentes son bien tolerados en el apatito con la posibilidad y frecuencia de una sustitución a una compensación natural: Na⁺¹ por Ca⁺² y SiO₄⁻⁴ por PO₄⁻³. La pareja de sustituciones Ce⁺³ por Ca⁺² compensada por Na⁺¹, por Ca⁺² y por SiO₄⁻⁴ a PO₄⁻³ son bien establecidos a mayores niveles de concentración en los apatitos del grupo de la briolita (ambos Ce y Y sustituyen

³ Yb: Iterbio. Elemento 70 Tabla Periódica

en los apatitos). Los niveles de sodio y de silicatos sedimentarios marinos son más que suficientes para suplir la compensación de valencia requeridos por las especies de tierras raras (REE^{+3}) y U^{+4} .

2.7.1. Fijación de otras fases

El contenido de los elementos enriquecidos remanentes en fosforitas: Ag, Se y Mo, pueden ser atribuidos a los elementos orgánicos complejos o absorción, pasando por As, Ni, V, Zn y Cr (Krauskopf, 1956) y Cu, Cd y Sb (Gulbrandsen, 1966).

Muchos de los elementos de este grupo calcófilo ocurren en sulfuros o coprecipitados de piritas en sedimentos ricos en compuestos orgánicos (Fleischer, 1956). Es igualmente clara la asociación con la materia orgánica, que simplemente refleja la dependencia de la generación de H_2S y, como consecuencia, sulfatos metálicos sobre la reducción del régimen inducido por un exceso de acumulación de materia orgánica sobre el oxígeno disponible.

El vanadio está frecuentemente enriquecido en fosforitas delgadas, lutitas ricas en materia orgánica, asociadas a las fosforitas enriquecidas, pero el V está disminuido notablemente en las fosforitas enriquecidas y en carbonato-fluorapatitos marinos. Tanto V como Cr pueden ser concentrados en óxidos de hierro y arcillas, en altas concentraciones. Krauskopf (1956) postuló que la fijación del Cr es reducido a hidróxidos $\text{Cr}(\text{OH})_3$, en fosforitas ricas en materia orgánica. Como Gilbrandsen (1966) había notado, muchos elementos en fosforitas pueden tener más de una forma de ocurrencia.

2.7.2. Oro, bismuto y torio

Se conoce muy poco acerca de los elementos Au, Bi y Th en los fosfatos. El enriquecimiento de Bi puede ser por sustitución en el apatito, debido a que el ión del Bi^{+3} (I.R.=0,93 Å) está cerca del ión de Ca^{+2} (I.R.=0,99 Å) en tamaño, además que el Bi puede sustituirse en el apatito hidrotermal (Clark, 1965) y el bismuto en los apatitos-silicatados se presenta en minerales sulfatados y sales de azufre.

2.8. Impacto del ambiente de formación

Está claro que la granularidad que caracteriza muchas de las fosforitas sufre alteraciones por el drenaje y los efectos de las aguas subterráneas. En muchas aparentemente inalteradas fosforitas, son lixiviados de la materia orgánica y pirita, manteniendo pérdidas de calor, así como oxidaciones de elementos de Fe^{+2} a Fe^{+3} y de U^{+4} a U^{+6} , empezando una lixiviación o pérdida secundaria de uranio.

2.8.1. La pérdida de los elementos traza o normal en las fosforitas

Los elementos que se encuentran agotados en las fosforitas (B, Co, Ga, Hg, Li, Sn, Ti y Zr) pueden ser clasificados en dos (2) categorías. Algunos son ocurrencias minerales relativamente estables e insolubles: Ga en arcillas, Zr en circones, Ti en ilmenita y rutilo, además de ser enriquecidos en lutitas altamente detritales que, en cambio, en las grandes fosforitas quimiogénicas. Otros elementos poseen radio iónico como el Li y Co, o configuración similar como el BO_3 , cuando no pueden acomodarse en la estructura del apatito. El agotamiento del Hg y Sn no está bien entendido; cada uno de estos elementos sustituyen en el apatito por la presencia aparente, más rápidamente explicable de complejos orgánicos, éstas están conocidas por su notable concentración en la materia orgánica.

Ba, Ni, Se y V, son llamados 'normales' y otros elementos de aquellos iones o aniones, que son muy pequeños, o muy grandes, para incorporarse en apatitos marinos. Tanto el Ba y el V en los apatitos y, su forma de sintetizarlo, es bastante conocido. Sin embargo, el Ba^{+2} y $(VO_4)^{-3}$ son mucho más grandes que el Ca^{+2} y el PO_4^{-3} , los cuales entran más fácilmente en las estructuras del clorapatito. Esta pequeña correlación de bario con el estroncio en fosforitas no es una extrañeza, dado que el estroncio se acomoda mejor en apatitos marinos y el bario queda fuera.

Tooms, Summerhages y Cronan (1969) establecieron una correspondencia general entre la abundancia relativa de los elementos en el agua de mar y en fosforitas:

- Los elementos Li, Sn y B, están enriquecidos en el agua de mar porque se agotan en las fosforitas.
- El Cr, Pb, Sc, Y y todos los lantanos, están relativamente agotados en el agua de mar, estando enriquecidos además, en las fosforitas (exceptuando el Ce).
- Además, el Ba, Cu, Mn, Ni y V se encuentran empobrecidos en el agua de mar (Tooms et al., 1969) y tienen una abundancia normal en fosforitas.

2.8.2. Relaciones geoquímicas características en fosforitas marinas

Muchas de estas relaciones están basadas en pares o grupos de elementos que normalmente son coherentes para buena parte de los ciclos biogeoquímicos. En la instancia de las relaciones Zn/Cd, la distribución es impartida por la capacidad de sustitución iónica en el apatito. En el caso de tierras raras y la relación de Th/U, la distinción esta impartida en el agua de mar y mantenida por la capacidad de emparejar sustituciones.

La relación Th/U es particularmente interesante. En las rocas ígneas félsicas e intermedias esta relación oscila generalmente entre 3-4. La mayor proporción de uranio y torio ígneo son lixiviados en ácidos y son fundamentales a la mayor absorción intersticial en las superficies de los granos y fracturas (Brown y Silver, 1956; Larsen y Gottfried, 1961). Además, la mayor parte del torio y uranio es lixiviable (Phair y Larsen, 1957). El uranio y torio no lixiviable se encuentra mayormente en los minerales accesorios como el circón, apatito y titanita, los cuales son ricos en uranio de manera importante.

Debido a la gran lixivabilidad del torio con el uranio en las rocas primarias, la relación Th/U del agua de mar muestra un cambio profundo y ha sido ampliamente reportado en el rango de 0,002 a 0,0001 (Baranov y Kristianova, 1959). Esto es atribuido a la buena disposición del uranio al ser oxidado al catión

complejo hexavalente $(\text{UO}_2)^{+2}$ y transportado de una fase soluble, probablemente de un complejo uranio-carbonático. Por otra parte, el solitario ion tetravalente Th^{4+} es rápidamente coprecipitado con los minerales oxidados, como los óxidos de hierro y manganeso, concentrado en fases secundarias y productos ambientales.

El promedio de arcillas detrítales y areniscas de la relación Th/U, en las rocas ígneas, se encuentra en el rango de 2,5 a 4,0 (op cit., datos reportados por Vinogradov y Ronov, 1956; Turekian y Wedepohl, 1961); algunas bauxitas (op cit. Adams y Richadson, 1960), arcillas rojas marinas profundas (El Wakeel y Raley, 1961) y ambientales, arcillas rojas y amarillas (Adams y Weaver, 1958) tienen grandes relaciones.

Las calizas que no son ricas en detritos y tienen bajo contenido de uranio (2,2 ppm) y torio (1,7 ppm) que las arcillas (*shales*) y están empobrecidas en torio, con una relación de Th/U en el rango de 0,5-1,0 (Baranov, Ronov y Kunashova, 1956; Adams y Weaven, 1958; Turekian y Wedepohl, 1961). Las calizas de los atolones mid-oceánicos, las cuales son virtualmente libres de detritos, pueden considerarse que tienen muy bajas relaciones Th/U (0,06-0,002) como reporta Sackett y Potratz (1963). El uranio trivalente domina en fosfatos marinos (en el apatito) (Altschuler, Clarke y Young, 1958). Esta sustitución en la disponibilidad de las especies de Th^{+4} y U^{+4} en fosfatos marinos se presume es auspiciada, debido a que estos iones son virtualmente del mismo tamaño al radio del ion Ca^{+2} . Sin embargo, el uranio es 70 veces más abundante en fosforitas que en las calizas, donde el torio es tan solo cinco (5) veces.

El enriquecimiento general del U y Th en fosforitas, comparadas con otros tipos de calcio precipitados de origen marino como las calizas, es debido a la adaptabilidad de la pareja en la estructura del apatito y los reemplazamientos compensados, posiblemente de SiO_4^{-4} por PO_4^{-3} , siendo algunas de las características que permiten el incremento de tierras raras en apatitos de origen

marino e ígneo. La más limitada, en estos relativos enriquecimientos, es el del torio en apatitos marinos, creando un inusual bajo y distintivo Th/U en el orden de los 0,05-0,07, el cual puede ser atribuido a la inmovilidad (*paucity*) general del torio en el agua de mar. Una explicación general bastante dominante es que la relación muy baja de Th/U de atolones de calizas midocénicas, hace que sean únicas las condiciones de estas calizas en este aspecto.

2.8.3. Valores medios y distribución de elementos

Las distribuciones no-seriales y bi-modales que caracterizan muchos de los elementos, reflejan muy bien las contribuciones en las fosforitas formadas en dos (2) de los ambientes mayores y distintivos como son las plataformas o arrecifes estables y aquellas de los geosinclinales. La principal causa es que pueden tener dos o más orígenes, o modos de fijación, para algunos elementos como As, Cd, Cu, Mo y V, éstas pueden ser características distintivas del ambiente, causadas por la materia orgánica, detritos finos y sulfatos metálicos acumulados, de forma más evidente en ambientes de geosinclinales que en las plataformas abiertas o plataformas de sedimentos.

CAPÍTULO III

MÉTODOS DE BENEFICIO MINERAL USADOS EN FOSFATOS SEDIMENTARIOS, DESECHOS GENERADOS E IMPLICACIONES AMBIENTALES

Para completar la correlación, es necesario explorar los distintos tipos de técnicas que se emplean para realizar el beneficio de minerales que mejor se ajustan a los fosfatos sedimentarios, como se verá en este capítulo. Se toman ejemplos de explotaciones mineras en el mundo que tienen en común los yacimientos de origen sedimentario. Además de aquellos modelos encontrados para los procesos de beneficio mineral, se presenta un poco la información relativa a los desechos generados de estas actividades.

3.1. Fosforitas israelíes (Axelrod, Metzger y Rohrlich, 1980)

Se comienza con el ejemplo de las fosforitas israelíes porque se considera aquél más completo y disponible, en cuanto a su relación entre las condiciones genéticas y las actividades de beneficio mineral.

Las fosforitas de origen marino de edad Campaniense estaban en explotación (Israel) para el momento de la publicación del artículo en Especial N°29 de la SEPM⁴, y están compuestas de granos de apatito (ovulitas y/o partes esqueléticas) soportada por una matriz de lodo calcáreo. El promedio en el contenido de minerales de este yacimiento es: 35,5% P₂O₅; 3,6% CO₂ y 4% F.

Este mineral es considerado del tipo friable, en el cual los granos de importancia económica hay que separarlos mediante molienda, pero existe el inconveniente de que la matriz calcárea produzca muchos finos. Esto hace que el producto final que se obtiene sea 95% apatito, siendo considerada incompleta la liberación debido en parte a la correlación del mineral con la matriz. Si el cemento es duro, el problema se incrementa. El principal problema yace en la mezcla intrínseca y la fuerte cohesión entre el micro-cuarzo y el apatito. Es posible decir de todo esto que, la naturaleza de la matriz es uno de los factores que controla la eficiencia de la liberación, esto aunado a que la textura de la fosforita no es siempre homogénea y que existen variaciones notables en éstas. Esto puede causar que, en algunos casos, parte de los granos sean fácilmente liberados y en

⁴ SEPM: *Society for Sedimentary Geology*

otros casos no ocurra. Para el caso de estudio referido, las fosforitas son bastante silíceas en una matriz densa, grano fino y, más o menos, homogéneo.

En el proceso de concentración de fosfatos, la relación entre las sendas distribuciones de tamaños de grano del apatito y la calcita considerada ganga, la friabilidad natural de la roca fosfática así como la desintegración relativa de los componentes, puede hacer que el beneficio, basado en tamaños pueda ser factible (op. cit. Altschuler, 1957). En este caso, para obtener un concentrado de 32% P_2O_5 y reducir al mínimo, se utiliza un proceso donde el flujo laminar se basa en lavado y tamaño del fosfato (op. cit. Hainman y Pregerson, 1976).

El estudio de distribución de tamaño de grano de algunas muestras en este caso y, su porcentaje de liberación, permite considerar lo siguiente:

1. Contenido de granos de apatito (en %): El rango encontrado está entre 10-200 mallas y cerca del 15% es pasante de la malla 200. Por tanto, la máxima posibilidad de recuperación en el proceso es de 75%.
2. El establecimiento de la recuperación con el grado de liberación, la cual no es completa cuando el fragmento de apatito viene acompañado de una fracción de matriz o cuarzo.
3. Estimación de la calidad de la liberación; la buena liberación se logra cuando el tamaño está en el orden de la malla 55.
4. Relación entre el proceso de reducción de tamaño y la producción de finos; esto influye también en la cantidad de apatito cuyo tamaño es pasante de la malla 200.
5. Contenido de fosfatos en el concentrado (en %). Se requiere para este caso que fuese comprendido en un rango igual o mayor a 90%. El resto consiste en partículas de calcita adheridas al apatito, granos de calcita y arena de distintos tamaños (foraminíferos, calcita espática y agregados de micrita) con algunos de yeso.

6. Esfuerzo necesario para realizar la reducción de tamaño, sobre todo si el material con el cual se trabaja tiene contenido de cuarzo, sobre el cual refieren los autores requiere entre 2 500 y 3 000 psi⁵ para garantizar la rotura de los granos.

Todas estas consideraciones son importantes a la hora de aprovechar al máximo el proceso de concentración, así como incrementar la recuperación del fósforo.

3.1.1. El ambiente sedimentario y su influencia en el mercado de las fosforitas

Muchas de las características de las fosforitas mencionadas con anterioridad son pertinentes a la hora de considerar producir un concentrado vendible, tomando en cuenta el ambiente sedimentario donde se formaron.

Según Bentor (1953) mencionado por los autores⁶: Axelrod y otros (1980), las fosforitas fueron depositadas en grandes cuencas semi-cerradas. El espesor de las capas de fosforitas, su dilución con carbonatos o gangas silíceas, así como el contenido de materia orgánica (el cual es un importante factor en la producción de ácido fosfórico), está relacionado con la posición de esta capa dentro de la cuenca.

La distribución del tamaño de grano está influenciada por la acción de la corriente y la energía en el ambiente de formación cuyo carácter principal es de tipo físico-químico (en caso de depositación química). Se supone generalmente, que las ovulitas son precipitadas de forma química (op. cit. Tooms et al., 1969) o diagenéticamente formada de *pellets* (op. cit. Price y Calvert, 1977), pero otros autores por ejemplo citados por autores, como Reeves y Saadi (1971) creen que su formación se debe a granos esqueléticos re-trabajados y redondeados.

⁵ psi (siglas en inglés): libras por pulgada cuadrada

⁶ Cuando se mencionan los autores en el aparte 3.1 se refiere a Axelrod, Metzger y Rohrlach, 1980

Por otra parte, referente a la solubilidad de las fosforitas y con ello la posibilidad de su aplicación directa, puede estar relacionada con el tipo de grano de apatito (esqueletal u ovulítico) y por supuesto del ambiente sedimentario.

3.2. Beneficio de Roca fosfática de Fosfatos (USDE⁷, s/f)

El fósforo, es el material base de muchos fertilizantes, detergentes, alimentos y bebidas, así como en el tratamiento y recubrimiento de metales.

3.2.1. Planta de beneficio

Las principales actividades que se llevan a cabo en una planta de beneficio de roca fosfática son:

1. Pruebas: en la planta de lavado, los productos son guijarros de fosfatos y los finos del proceso de flotación. La muestra de guijarros puede determinar la concentración de óxido de magnesio (MgO). Si esta concentración es menor del 1%, se considera que el producto no requiere pasar por el proceso de beneficio mineral. Por otra parte, si la concentración de óxido de magnesio excede el 1%, la roca fosfática debe pasar por un sistema basado en el método de medios densos, para remover el contenido de MgO.
2. Flotación: en la planta de flotación, se hace pasar al mineral a través de dispositivos hidráulicos, mediante pantallas separadoras, en tres (3) tamaños. Distintas formas o métodos de flotación se usan para cada uno de los tamaños que se decidan según el procedimiento. El producto de la flotación se mezcla con la gravilla y es vendido tanto a las plantas que procesan ácido fosfórico como a otros consumidores.
3. Lavado: este proceso genera partículas de gran tamaño y finos, los cuales deben gestionarse en las instalaciones mineras al final del mismo, los desechos pueden ser dispuestos en escombreras, los cuales pueden ser utilizados para la recuperación de espacios intervenidos y, en el diseño y construcción de estanques para arcillas.

⁷ USDE (siglas en inglés): Departamento de Energía de los Estados Unidos

Dependiendo del producto final, el método de producción cambia. Las materias primas se preparan para el almacenamiento, previa selección, trituración y cribado. El mineral es triturado de manera tal que tenga un tamaño uniforme, que luego sea enviado a un proceso denominado “fabricación de briquetas⁸”, similares en forma y tamaño a las de carbón. Estos productos son llevados a unos calcinadores donde se busca eliminar la materia orgánica, el agua y el endurecimiento. Las briquetas calcinadas se denominan nódulos. Los calcinadores trabajan mediante sistemas electrotérmicos.

Para la producción de ácido fosfórico, el cual es la forma del fósforo mayormente utilizada. El 95% de la elaboración del ácido fosfórico es utilizada para la fabricación de fertilizantes y alimentos para animales, tan solo una pequeña parte es utilizada en procesos de la industria química. Para la obtención de este producto hay dos metodologías: (1) húmedo y (2) de horno. El proceso en húmedo de ácido es a partir de minerales de fósforo, se caracteriza por alto rendimiento, bajo costo y baja pureza, su uso es principalmente en la realización de fertilizantes. Por el segundo método, éste consiste en un ácido térmico resultante del fósforo elemental, el cual es mucho más costoso pero cuyo producto es más puro que aquel obtenido por la vía húmeda. Por esta razón es elaborado en menor cantidad, el cual es materia prima de bebidas carbonatadas y productos farmacéuticos.

3.2.2. Consideraciones acerca del proceso húmedo

El proceso de obtención de ácido fosfórico, por el método húmedo, consiste en digestión, filtración y concentración. Todo comienza cuando la roca fosfórica se disuelve en ácido sulfúrico, esto es, para digerir químicamente el fosfato de calcio. La suspensión que se obtiene de esta operación se filtra para separar el ácido fosfórico y recuperar los sólidos que se lavan y almacenan en pilas de fosfoyeso. El ácido se obtiene por evaporación, esto es, con la finalidad de obtener la calidad comercial de pureza en 54%.

⁸ Briqueta (Rae en línea consulta 07/2013): 1. f. Conglomerado de carbón u otra materia en forma de ladrillo.

Algunos fosfatos están combinados con elementos que se pueden considerar impurezas, tales como: hierro, aluminio, calcio y magnesio. De todas las anteriores, el más problemático es el magnesio. En la fabricación de ácido fosfórico, el alto contenido de magnesio aumenta la cantidad necesaria de ácido sulfúrico, afectando los resultados con bajo rendimiento en la producción. La consecuencia es que, la cantidad de magnesio es contraproducente al tiempo de establecer con exactitud la cuantía de mineral que se obtendrá. Se han propuesto numerosas técnicas para remover el magnesio en el proceso de beneficio, sin embargo no hay una solución satisfactoria a este problema.

En la figura 3.2.1, se muestran las entradas y salidas de los procesos involucrados en la minería y beneficio del mineral fosfático, en especial en los Estados Unidos.

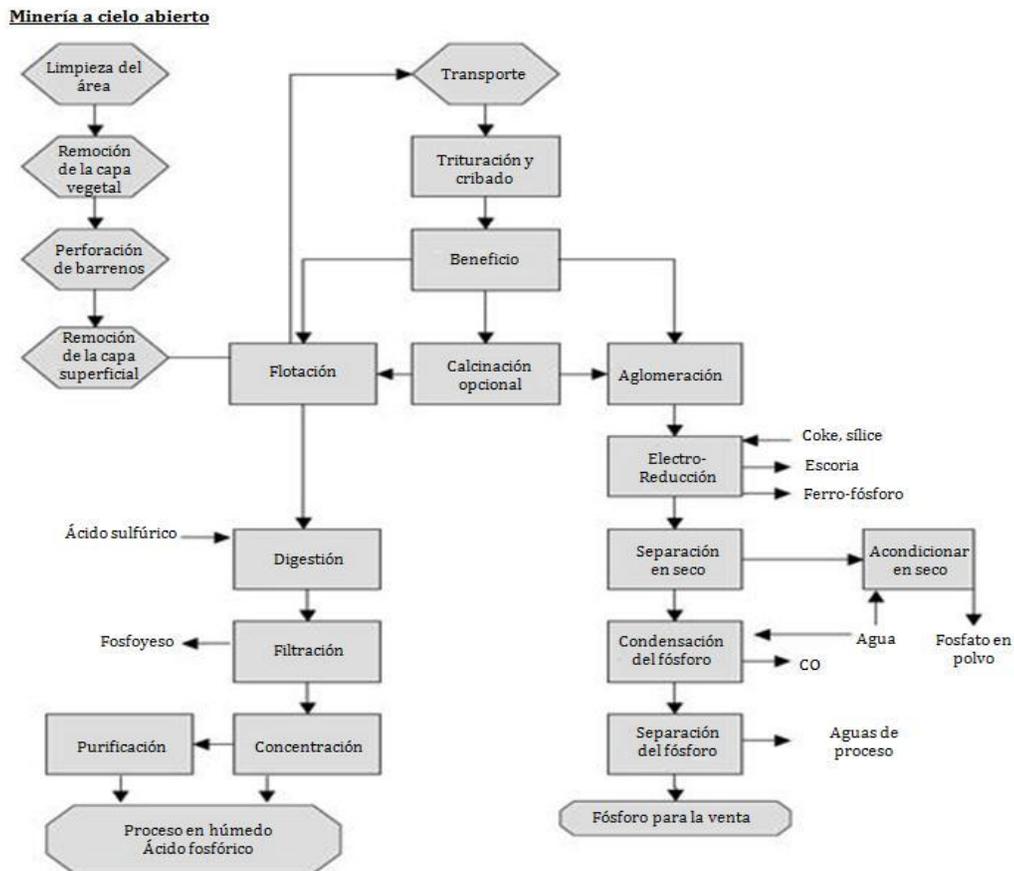


Figura 3.2.1: Diagrama de flujo en minería de rocas fosfáticas. Tomado de: USDE (consulta en línea 2012)

3.3. Fósforo y fosfatos (Gruber, 2007)

3.3.1. Beneficio mineral

Beneficio, también conocido como procesamiento de mineral, puede implicar una variedad de operaciones, tales como: la reducción o fragmentación y separación por tamaños, separación de minerales, deshidratación y concentración térmicos. Casi todos los minerales de fosfato requieren beneficio comercial para satisfacer especificaciones relativas en tamaños de partículas, contenido de humedad o análisis químicos.

El primer paso del proceso de beneficio es la reducción de tamaños, lo cual se logra con trituración y molienda o por desagregación con agua y lavado (esto va

a depender de la dureza y consolidación de la roca y agregados minerales). El objetivo de la reducción de tamaño es la de liberar el mineral que pueda ser liberado. La separación por tamaños o cribado es el paso siguiente a la trituración. Este proceso sirve para separar la ganga dura o blanda, bien sea por tamizado o clasificación, húmeda o seca. Los cloruros solubles se descartan mediante lavado con agua dulce, seguido por deshidratación.

Debido a que los minerales que componen la ganga pueden tener los mismos tamaños que las partículas de mineral de interés, los métodos de beneficio mineral, tales como: separación por medios densos, separación magnética, flotación con espuma, entre otras, pueden ser requeridas (dependiendo de las características de la roca fosfática).

La separación por medios densos es un proceso adecuado cuando la liberación se produce retenida en malla 16 o mayor y el mineral de fosfato tiene una densidad significativamente mayor que el de la ganga (dolomita, cuarzo, o calcita). La separación magnética se emplea en aquellos minerales altamente magnéticos como la magnetita.

Por otra parte, la flotación con espuma es la forma más ampliamente utilizada para la recuperación de mineral que está en tamaño pasante malla -20. Hay variaciones del método para separar fosfato de: barita, calcita, dolomita, feldespatos, nefelina, flogopita y cuarzo. En el mundo, hay plantas de flotación para roca fosfática de fosfatos en: Brasil, Canadá, China, Finlandia, Jordania, México, Rusia, Senegal, Sudáfrica y Estados Unidos. La dolomita obtenida de la flotación de fosfatos se ha convertido en un subproducto de interés.

La eliminación por métodos electrostáticos del cuarzo, en el apatito, es técnicamente factible, aunque es considerado impráctico y costoso.

Un esquema del circuito de beneficio mineral para la roca fosfática poco consolidada de fosfato de Florida central, Estados Unidos, se puede ver en la figura 3.3.1.

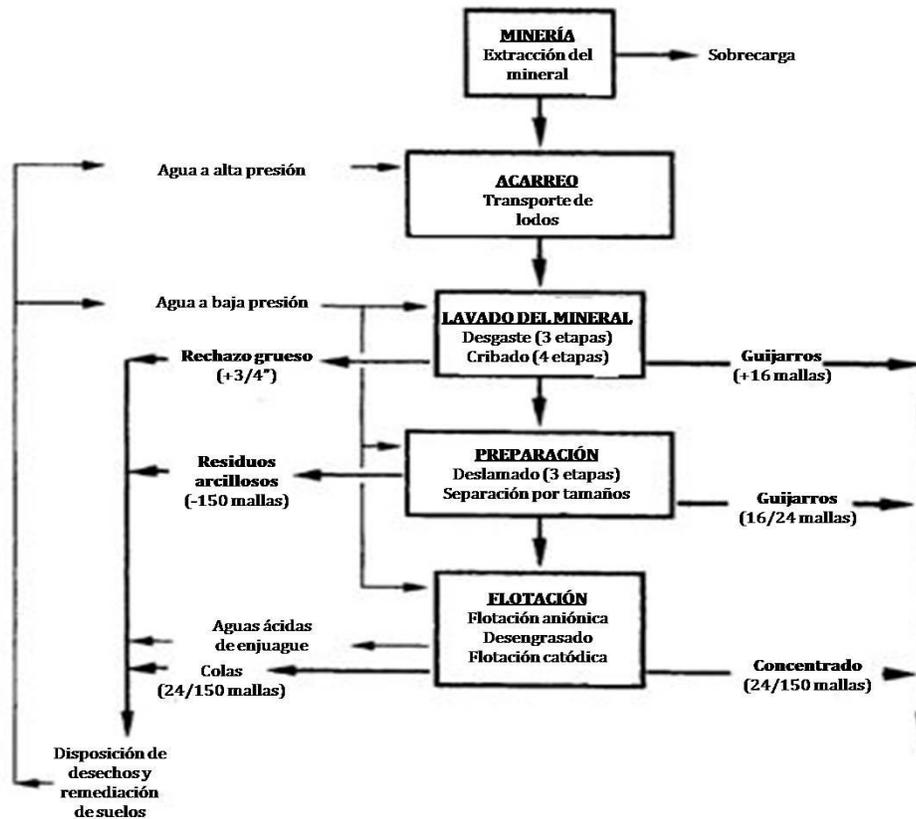


Figura 3.3.1: Diagrama de flujo de beneficio de una roca fosfática poco consolidada. Tomado de Gruber, (2007), pág. 1091.

La liberación de las partículas del mineral fosfático se produce durante el transporte del material (de la mina a planta) y en el lavado. La primera fase consiste en la recuperación de un producto de bajo costo, llamado gravilla, mediante un proceso de cribado que va hasta la malla 16. En segundo lugar, un producto de bajo grado (intermedio de la gravilla), se recupera por flotación cuya entrada es del tamaño aproximado malla 24. Las arcillas se retiran de la alimentación de flotación por tres (3) o más etapas de deslamado con hidrociclones. Finalmente, el concentrado de mayor grado, más costoso, se

obtiene por un proceso de flotación que consta de dos (2) etapas. Un concentrado de fosfatos se recupera por un proceso de flotación directa con reactivos aniónicos; el desaceitado se hace con ácido sulfúrico y el enjuague con agua. Los productos obtenidos de la roca fosfática han sido entonces: piedras tamaño guijarro, guijarros intermedios y concentrado de flotación, este último enviado a las plantas químicas para la producción de ácido fosfórico.

Para las rocas fosfáticas poco consolidadas, los pasos previos para el beneficio pueden cambiar de manera sustancial, con respecto a aquellas consideradas como consolidadas. Un ejemplo del esquema de trabajo de una roca fosfática sedimentaria consolidada se puede ver en la figura 3.3.2.

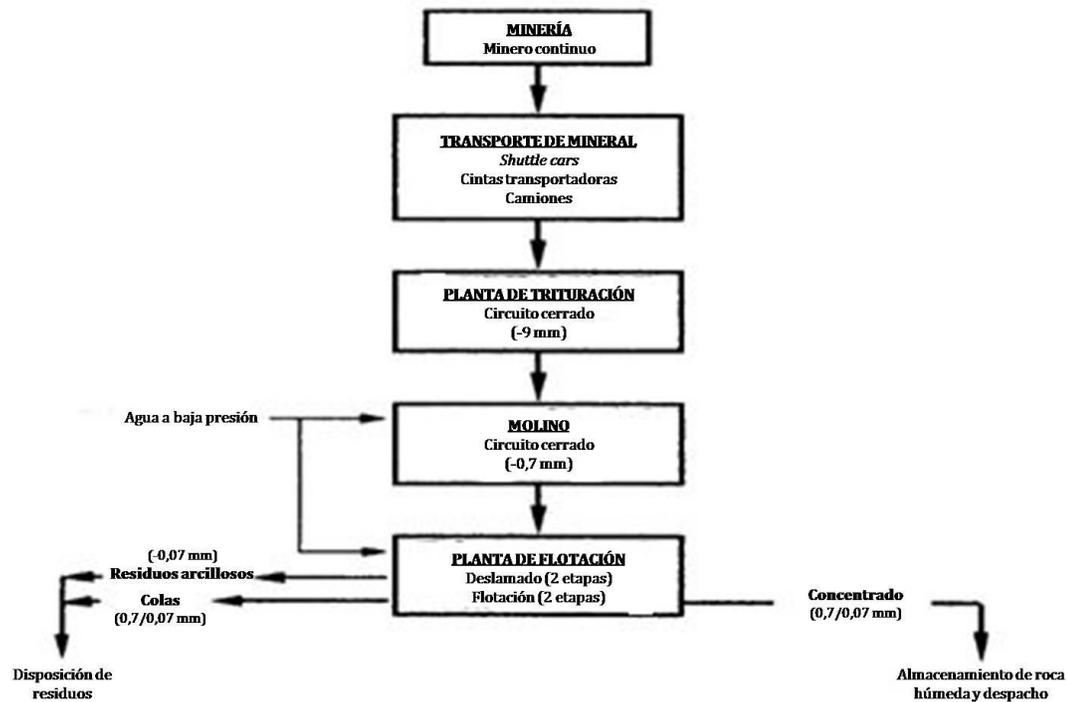


Figura 3.3.2: Diagrama de flujo para el beneficio de una roca fosfática sedimentaria consolidada, ubicada en San Juan de la Costa, México. Tomado de Gruber, (2007), pág. 1092

La liberación del mineral se logra mediante una trituración primaria, con salida de 9mm, seguida de una molienda que puede llegar a 0,7mm en la salida. Después de moler, la roca debe ser deslamada y lavada, se procede a un segundo

proceso de deslamado para retirar las arcillas y los minerales carbonatados, que será la alimentación para la flotación. Este paso está condicionado con reactivos aniónicos y se garantiza de alguna manera, que el producto obtenido sea más limpio debido al uso directo de agua de mar. El concentrado es lavado con agua dulce, para eliminar las sales del agua de mar, antes de ser llevada a la siguiente fase en la planta química.

3.3.2. Procesamiento químico de la roca fosfática

La roca fosfática se convierte en un producto químico utilizable de dos (2) maneras. En el primer método (seco), la roca es cargada en un horno eléctrico con sílice y coque, que produce fósforo elemental. El fósforo se convierte luego en ácido fosfórico y otros compuestos. La segunda forma (en húmedo), consiste en hacer reaccionar a la roca con ácido sulfúrico, donde en un medio de ácido fosfórico y cristales de sulfato de calcio, se obtiene ácido fosfórico impuro diluido, el cual se separa para ser utilizado en la fabricación de fertilizantes.

El proceso húmedo se divide, a su vez, en dos (2) subprocesos basados en el tipo de cristales de sulfato de calcio producido. El proceso dominante da como resultado el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pero, existen otros elementos que influyen y pueden causar la formación de hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), compuesto que ha tenido importancia en las últimas décadas (referidas a las del siglo XX).

3.4. Residuos de minas de roca fosfática

Lottermoser (2007) explica que, dependiendo del origen de la roca fosfática, los residuos que se obtienen del proceso de beneficio pueden variar. Sin embargo, para el logro de los objetivos de este trabajo, solo se consideran aquellos concernientes a los fosfatos sedimentarios, sin importar si se trata de una roca fosfática consolidada o no, como se explicó en la sección 3.3.

3.4.1. Consideraciones de las fosforitas para la gestión de residuos

El mineral más importante en las fosforitas marinas o depósitos de fosfatos sedimentarios es carbonato-fluorapatito. Esta forma de apatito se conoce como francolita, la cual aparece en forma de nódulos o gránulos de hasta varios

milímetros de diámetro, que pueden contener impurezas u ocurrencias de inclusiones físicas como: cuarzo, arcillas, oxihidróxidos de hierro, materia orgánica y carbonatos, se incluyen aquellas que constituyen sustituciones cristalográficas dentro del mineral que contiene el fosfato.

Los iones que pueden sustituir elementos como: calcio, fósforo y flúor dentro de la francolita son diversos y principalmente incluyen: sodio, magnesio, estroncio, carbonato y sulfato, así como algunos elementos traza como U, Th, Tierras Raras, Y, Cd, Zn (op. cit. Jarvis et al. 1994; Rutherford et al. 1994). Por otra parte el enriquecimiento en elementos traza, metales pesados y metaloides como: Ag, As, Cd, Cu, Mo, Ni, Sb, Se, V, Zn, puede ser debido a la adsorción o incorporación de estos elementos en sustancias orgánicas o sulfuros.

Debido a esto, la presencia de niveles elevados de: radionúclidos, arsénico, cadmio, selenio y talio, en yacimientos de fosfato de guano y sedimentarios, pueden considerados limitantes para sus usos. Es preciso tener mucho cuidado con la fabricación de fertilizantes producto de estas rocas fosfáticas que puedan tener estos elementos con altos contenidos (op.cit. Lottermoser and Schomberg 1993; Jarvis et al. 1994), en especial el cadmio; éste último puede acumularse en suelos y plantas por causa del uso repetido y constante del fertilizante que lo contiene, trayendo como consecuencia que este elemento entre en la cadena alimentaria. Las fosforitas ricas en cadmio se consideran inadecuadas para la producción de fertilizantes; en algunos países ya existen regulaciones que la restringen.

A esto hay que agregar que, muchos fosfatos contienen cantidades de uranio, las cuales aunque sean mínimas, pueden ser la causa de agregar con los fertilizantes a los suelos y tierras agrícolas, así como también por erosión, el transporte de iones de uranio a los ríos, aguas subterráneas y hasta el mar. Se han estudiado ejemplos en los humedales del Everglades en EUA y el mar Mediterráneo, donde

se ha encontrado uranio debido al uso de fertilizantes fosfatados en tierra firme (Ragnarsdottir y Charlet ,2000).

3.4.2. Mineralogía y geoquímica

Es importante considerar que para todos los depósitos sedimentarios el mineral común es el apatito, mientras que la mineralogía de la ganga va a depender de las condiciones propias del depósito. Entre estos se encuentran los sulfuros, óxidos, hidróxidos, sulfatos y carbonatos. La variación de la mineralogía de la ganga hace que la geoquímica de los elementos mayoritarios y traza, en un depósito de fosfatos, sea variable. En particular, este tipo de yacimientos tienden a poseer contenidos que pueden ser elevados de uranio, torio, tierras raras, itrio, metales pesados y metaloides (Jarvis et al. 1994).

Algunos depósitos de fosfatos tienen niveles de radón y radioactividad elevada (Rutherford et al. 1994). Esta actividad puede ser originada por la degradación del uranio y torio en abundancia, formándose los isótopos hijas U_{238} , U_{235} y Th_{232} por esta desintegración. Estos niveles en depósitos sedimentarios son variables y pueden ser considerablemente mayores que otro tipo de depósitos. Debido a esto, es necesario considerar que el beneficio de fosfatos, no solo es para este compuesto, sino que también concentra reactividad específica ($Ci^9 kg^{-1}$) que estuvo contenida en la roca fosfática. La mayoría de los nucleídos radiactivos se acumulan en la organización cristalina del apatito (génesis) o se absorben en la superficie de las arcillas y de los compuestos orgánicos (op. cit. Burnett et al. 1995). Por otra parte, los radionucleídos como el Ra_{226} tienen radios iónicos que no son acordes con el tamaño y la carga del catión que pudiera cederle espacio, como el calcio en la estructura del apatito. Como consecuencia, se puede encontrar el Ra_{226} presente pero, separada de las fases fosfáticas bario estroncio (op.cit. Rutherford et al., 1994).

⁹ Ci: *Curie*, unidad de radiactividad. Equivalencia: $1Ci=3.7*10^{10}$ Bq. Bq: *Becquerel* (1Bq=1 desintegración/segundo). Más información consultar: <http://webmineral.com/help/Radioactivity.shtml>

3.4.3. Minería, procesamiento y residuos hidrometalúrgicos

Debido a la naturaleza de génesis del depósito, se requiere la remoción de capa vegetal, generación de desechos y construcción de escombreras para la producción mineral. La roca extraída del centro de producción minera es procesada con agua, para eliminar los minerales de ganga y concentrar los minerales de fosfato, materia prima para la elaboración de ácido fosfórico. El procesamiento genera un concentrado de mineral de fosfato y algunos materiales innecesarios de la roca de grano fino y otras partículas minerales. Estos residuos son descartados en fosas de decantación o se hacen vertidos a ríos y océanos.

La producción de ácido fosfórico, como ya se ha dicho, se hace disolviendo los minerales de fosfatos en ácido sulfúrico. El subproducto no deseado de este proceso es el “fosfoyeso”. Dado que las plantas de beneficio y tratamiento del material para los fines descritos antes, se construyen cercana a las minas, los desechos derivados se acumulan en la propia mina de fosfato o en las cercanías. Los residuos de la extracción minera, beneficio y de la extracción metalúrgica (figura 3.4.1) fueron agrupadas en cuatro (4) categorías principales según UNEP¹⁰/IFA¹¹, (2001).

¹⁰ UNEP: *United Nations Environment Programme*. www.uneptie.org

¹¹ IFA: *International Fertilizer Industry Association*. www.fertilizer.org

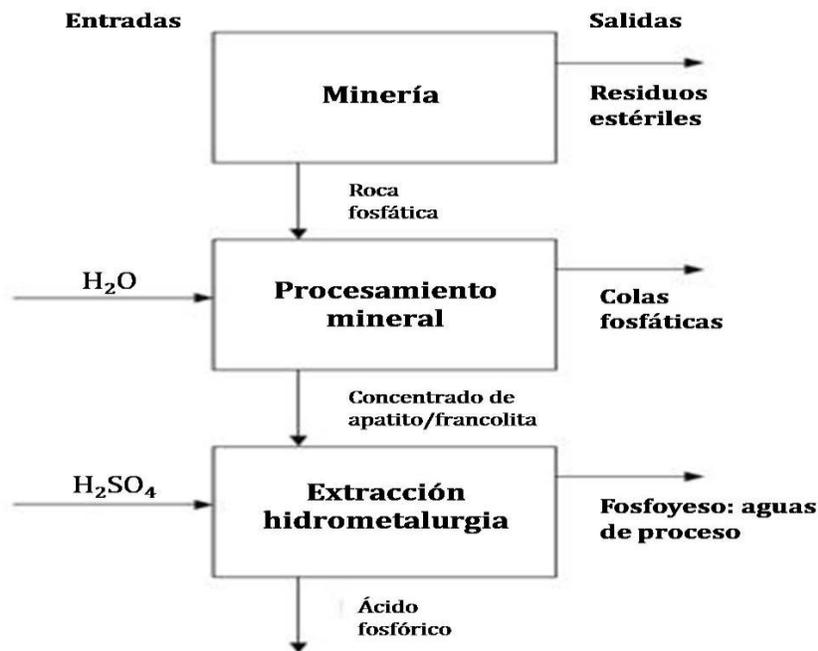


Figura 3.4.1: Esquema de flujo simplificado sobre la minería de fosfatos y la planta de ácido fosfórico. En este se pueden visualizar las entradas y salidas del proceso. Tomado de Lottermoser (2007), pág. 250.

1. Escombros (estéril): en la extracción se puede producir mineral que puede ser utilizado de manera directa como fertilizante y otro que debe ser procesado para obtener el ácido fosfórico (como en el caso de fosfatos sedimentarios). La actividad minera, inevitablemente, genera rocas que son consideradas como estéril (escombros o mineral no conforme), que puede ser el material que cubre la capa de interés o aquel material fosfático que no puede ser procesado por su bajo contenido del mineral de utilidad. En consecuencia, los residuos pueden contener cantidades sub-económicas o no de apatito, con bajas cantidades de fosfatos, por lo tanto de radiactividad baja debido a su relación con el radón.

En cuanto al contenido de sulfuros, estos son muy variables y específicos en cada depósito. Las rocas sulfurosas requieren ser caracterizadas apropiadamente de modo de garantizar su predicción, monitoreo y control.

Las rocas minadas que se consideran estéril, son dispuestas en áreas cercanas a la mina (escombreras). La principal preocupación de estas construcciones lo constituye la estabilidad de los terraplenes pues, estas rocas pueden sufrir altas tasas de erosión que pueden afectar el pie de los taludes. Aparte de las inquietudes que puedan surgir con respecto a la estabilidad, también la adecuada caracterización de las rocas permitirá realizar monitoreo de tasas de erosión, de los residuos no sulfurados, el tratamiento de efluentes y lixiviados, entre otros, donde pueden existir cantidades significativas de metales y metaloides como: Ag, As, Cd, Cu, Mo, Ni, Sb, Se, V y Zn, además de lixiviados con concentraciones de metales y metaloides (op. cit. Vance 2000).

En la mayoría de los casos, los residuos rocosos son benignos, no representan una amenaza ambiental y contienen concentraciones naturalmente elevadas de nutrientes, por lo que la restauración de los ambientes intervenidos en materiales no sulfurados es más fácil de lograr. En el mundo existen experiencias de exitosas recuperaciones de escombreras mediante la aplicación de metodologías de revegetación (reforestación) e incluso paisajística.

2. Relaves fosfatados: el procesamiento de minerales en general implica el uso de varias técnicas de tratamiento para hacer al mineral aprovechable. El beneficio tiene las siguientes finalidades: (a) eliminar las rocas pequeñas y aquellas partículas de tamaño arcilla y lodos, (b) eliminar el grano grueso de algunas fracciones y de aquellos tamaños arena de cuarzo y (c) concentrar el apatito.
 - La roca rica en materia orgánica debe ser calentada previamente de modo de reducirla a niveles que se consideren aceptables.
 - Los minerales de la ganga lo constituyen la calcita, dolomita, cuarzo, arcillas, óxidos de hierro y fosfatos de hierro y aluminio.

- Los residuos están en el rango de tamaño que van desde las arenas a las arcillas y se denominan “relaves” fosfatados.
- La arena puede utilizarse en la recuperación de los espacios intervenidos.
- Las partículas de arcillas se pueden almacenar en tanques artificiales hechos para tal fin.

La producción de lodos se considera insignificante con la cantidad de residuos que se producen en las otras áreas productivas, tienen comportamiento pobre para la sedimentación y requiere de largas cantidades de tiempo para sedimentar (algunas veces con ayuda de floculantes). En estos estanques, por lo tanto, pueden contener productos químicos utilizados como reactivos en el proceso de flotación, entre los que pueden encontrarse: *soda ash*, *diesel*, ácidos grasos, hidróxido de amonio, silicato de sodio, ácido sulfúrico y amina.

3. “Fosfoyeso”: la forma que genera este residuo es el tratamiento llamado húmedo. De esto se obtiene, no solo el ácido fosfórico, sino aguas de proceso y de residuos de fosfoyeso. En el proceso de fabricación del ácido fosfórico, se producen entre 3 y 6t de fosfoyeso por cada tonelada de ácido fosfórico obtenido, por tanto puede considerarse como un residuo sustancial de la industria.
4. Aguas de proceso: éstas se eliminan, por lo general, con el fosfoyeso. Los vertederos donde se disponen suelen tener pH muy bajo ($\text{pH} \leq 1$). Además, estas aguas de proceso tienen altas concentraciones de: fluoruro, sulfato, fosfato, amoníaco, radionúclidos, metales pesados y metaloides. Estas aguas requieren aislamiento y vigilancia dentro de los estanques dispuestos para éstas. Es posible que estas aguas requieran tratamiento con cal antes de ser dispuestas de alguna manera, pudiendo incluir la descarga a cuerpos naturales de agua. Algunos autores recomiendan que los lodos que quedan después del tratamiento con cal para neutralizar, requieren ser aislados en la pila general de fosfoyeso (op. cit. Ericson et al. 1997).

3.4.4. Influencia de mineralogía y geoquímica del fosfoyeso como residuo de la producción de fosfatos para fertilizantes

El fosfoyeso consiste predominantemente en cristales de sulfato de calcio, aunque también contiene otras fases sólidas menores. Estas últimas incluyen productos de la reacción del proceso en húmedo: alcalí, fluorosilicatos, fluoruros, roca fosfática que no ha reaccionado y partículas de minerales que componen la ganga: cuarzo, fosfatos, materia orgánica y feldespatos (op. cit. Luther et al. 1993; Rutherford et al. 1995; Arocena et al. 1995a). Además de cristales de sulfato de calcio, contienen inclusiones líquidas y aguas de proceso atrapadas en los intersticios de las partículas minerales. Estos poros pueden estar enriquecidos en ácido fosfórico, ácido sulfúrico, flúor, nitratos, metales pesados, metaloides y radionúclidos (op.cit. Luther et al. 1993). El término “fosfoyeso” es por tanto, un término colectivo para una mezcla de residuos que comprenden los componentes mayoritarios y minoritarios de los líquidos de residuos.

Los principales componentes del fosfoyeso son el calcio y el sulfato. La composición química del fosfoyeso puede variar dependiendo de: (a) la naturaleza de la roca de fosfato utilizado en la fabricación de ácido fosfórico, (b) el tipo de proceso en húmedo utilizado, (c) la eficiencia de la operación en planta y (d) cualquier contaminante que pueda ser introducido en el fosfoyeso durante la manufactura (op. cit. Rutherford et al. 1994).

La ubicación de los elementos traza, metales y metaloides en el fosfoyeso es variable. Por ejemplo, se ha sugerido que: (a) que el estroncio y el cadmio pueden sustituir al calcio en la estructura cristalina del sulfato de calcio, (b) el uranio puede ser adsorbido sobre la superficie cristalina del sulfato de calcio, (c) el selenio puede ser adsorbido por los oxihidróxidos de hierro y (d) la plata puede formar halogenuros minerales discretos (op. cit. Rutherford et al. 1994; Arocena et al. 1995a). La fracción más fina de fosfoyeso (<20 μm) tiende a concentrar en mayor cuantía que aquellas fracciones más gruesas elementos como: flúor, metales pesados, metaloides y radionúclidos.

3.4.5. Radioquímica de los residuos del proceso de beneficio de fosfatos

Durante el proceso de fabricación del ácido fosfórico en húmedo, los radionúclidos dentro de la roca fosfática se liberan en solución. Los radionúclidos se dividen en el ácido fosfórico o el fosfoyeso, según su solubilidad (op. cit. Rutherford et al. 1994).

El uranio, torio y radionúclidos, Pb_{210} , se concentran en el ácido fosfórico, mientras que la mayoría de Ra_{226} y Po_{210} lo hace en el fosfoyeso. El Ra_{226} del U_{238} , tiene una carga de +4 y radio iónico de 0,152 nm, lo cual hace que sea improbable la sustitución del calcio en el sulfato de calcio. Una fracción de Ra_{226} se asocia con partículas extremadamente finas, insolubles en agua. Estas fases insolubles pueden ser de: bario, sulfato de estroncio, fluoruros, fosfatos de aluminio y otros (op.cit. Jarvis et al. 1994; Rutherford et al. 1994; Burnett et al. 1995). El restante, de Ra_{226} , es probablemente adsorbido por la materia orgánica, asociado con coloides y presente en los sólidos solubles en agua (op. cit. Burnett et al. 1995). Por tanto, los radionúclidos en el fosfoyeso están contenidos en las redes cristalinas de los sólidos y en los sitios de adsorción. Además, en las pilas de acumulación del fosfoyeso están contenidos ácidos, que incluyen el fosfórico. Estos fluidos se han observado con muy altas concentraciones de uranio y Pb_{210} , así como concentraciones moderadas de Ra_{226} (op. cit. Burnett and Elzerman 2001).

CAPÍTULO IV

CORRELACIÓN DE LAS CONDICIONES GENÉTICAS EN FOSFATOS SEDIMENTARIOS Y LAS TÉCNICAS PARA EL BENEFICIO MINERAL, E IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES PARA LA TOMA DE DECISIONES

En esta sección, se presenta una recopilación de relaciones entre las condiciones de formación de fosfatos sedimentarios y esquemas empleados en los métodos de beneficio mineral, en minas del mundo, para la producción de ácido fosfórico (con énfasis en la elaboración fertilizantes).

4.1. En cuanto a la genética de los fosfatos/roca fosfática sedimentaria

En referencia a los orígenes y formación de los fosfatos sedimentarios:

- Control de las corrientes ascendentes (modelo *upwelling*).
- Las corrientes ascendentes están relacionadas con los ciclos de cambios en el nivel del mar.
- Aunque la teoría de las corrientes ascendentes y la depositación de las fosforitas marinas está bastante aceptada, algunas otras fosforitas (sedimentarias) fueron formadas por otros procesos sedimentarios o no, por lo que no puede ser considerada la única causa para su formación.
- La mayor época de formación de estos yacimientos fue durante el Mioceno En el Holoceno (actualidad) hay formación de fosfatos sedimentarios en África y Perú.
- La tectónica de placas ha sido determinante en la formación de zonas que permiten la depositación de las fosforitas.
- Los depósitos fosfáticos sedimentarios en el pasado se formaron en latitudes entre 0°-40°.
- La poca sedimentación clástica en la cuenca de depositación es una de las características de los fosfatos.
- Los sedimentos (fosfáticos) se depositan en zonas anóxicas que permiten la preservación de la materia orgánica.
- La química oceánica tiene gran significancia en la formación de las fosforitas. La composición química dominante de las fosforitas es la constituida por: P, Si y Ca.

- Una característica particular de la acumulación de fosforitas en una triple asociación de fosfatos, *cherts* y sedimentos que contienen abundante materia orgánica (carbón).
- El uranio permite diferenciar los depósitos primarios de los secundarios.
- Hay fosfatos que pueden estar enriquecidos en: Ag, Cd, Mo, Se, Sr, U, Y, Zn y tierras raras¹².
- Los elementos que se encuentran en menor cantidad (minoritarios) son: Al, Fe, Mg, Na, K, S, F y Cl.
- La mayor parte de los granos son tamaño arena (entre 2mm y algunas centenas de cm).

4.2. En cuanto a la geoquímica de los fosfatos

En la siguiente parte se resumen algunos aspectos a considerar dentro de la geoquímica de formación de las fosforitas:

- El factor decisivo en la formación de fosforitas, no es la concentración de P (que aunque está en ppm pueden llegar al orden de las unidades de mil), sino del nivel de productividad y condiciones que conduzcan a la preservación de la materia orgánica en los sedimentos.
- Los elementos traza están presentes en el apatito por dos razones: (1) química cristalina que permite aceptar iones externos y (2) geoquímica única dada la disponibilidad de estos elementos en el ambiente de formación.
- La dolomita en fosforitas es por el hecho que los iones de Mg inhiben la precipitación de apatito (en el ambiente de formación).
- El enriquecimiento en elementos Ag, Cd, Mo, Se, Sr, U, Y, Zn y tierras raras (con excepción del Ce) parece característica de las fosforitas y es probablemente indicativo de su génesis.
- Tipificación de las fosforitas con las relaciones geoquímicas entre elementos coherentes como: Zn/Cd, Th/U o Y/REE.

¹² Tierras Raras (Siglas en inglés REE)

- Condiciones anóxicas. La bacteria *Thiomargarita* puede estar contribuyendo a la formación reciente de fosfatos en sedimentos anóxicos.
- El enriquecimiento en algunos elementos para fosforitas marinas se debe o está motivada a contaminación ambiental, recubrimiento del producto o como indicadores geoquímicos del ambiente depositacional u origen.
- El enriquecimiento de Cd, U, Y y lantanos, Sr, Pb y Zn, son conocidos y sustituyen al calcio en el apatito.
- Los granos en muchas fosforitas pueden sufrir alteraciones gracias al drenaje y efectos de las aguas subterráneas (al quedar expuestas). Los lixiviados en estas fosforitas se tratan de materia orgánica y pirita; oxidaciones de elementos como Fe^{+2} a Fe^{+3} y de U^{+4} a U^{+6} , de este último lo obtenemos como pérdida secundaria de uranio.
- Relaciones geoquímica características:
 - Zn/Cd distribución impartida por la capacidad de sustitución iónica en el apatito.
 - En el caso REE y la relación Th/U impartida en el agua de mar y mantenida por la capacidad de emparejar sustituciones.
- El uranio es 70 veces más abundante en fosforitas que en calizas. El torio es solo cinco veces más abundante. Esto se debe a la sustitución por disponibilidad de las especies de Th^{+4} y U^{+4} en fosfatos marinos y es auspiciada a que los iones son virtualmente del mismo tamaño del radio del ión Ca^{+2} .
- La fijación o modos de fijación de elementos como As, Cd, Cu, Mo y V son características que se consideran distintivas del ambiente de formación, debidas a la presencia de materia orgánica, detritos finos y sulfatos metálicos acumulados.

4.3. Técnicas de beneficio empleados en fosfatos sedimentarios, residuos generados e implicaciones

Aspectos importantes e interesantes esbozados en las metodologías de beneficio mineral en fosfatos sedimentarios, los desechos generados por los procesos industriales involucrados y sus implicaciones más resaltantes:

- En el caso de las fosforitas israelíes de origen marino y de edad Campaniense.
 - Los granos de importancia económica se separan mediante molienda.
 - En el procesamiento mineral hay que considerar la dureza del cemento. Este es uno de los factores que controla la eficiencia de la liberación, dado que la roca fosfática no es siempre homogénea (Es necesario calcular el % de liberación del proceso).
- En el estudio de estas roca fosfática y su distribución de tamaño de grano con % de liberación, permite suponer lo siguiente y deben considerarse a la hora de aprovechar al máximo el proceso de concentración, así como incrementar la recuperación de P:
 - Porcentaje (%) de granos de apatito.
 - Establecimiento de la recuperación con el grado de liberación.
 - Estimación de la calidad de la liberación.
 - Establecimiento de la relación entre el proceso de reducción de tamaños y la producción de finos.
 - Contenido de fosfatos (en %) en el concentrado, como eficiencia del proceso de concentración.
 - Esfuerzo (energía) requerida para realizar la reducción de tamaño.
- Hay que considerar que aspectos para estos depósitos como: depositación en cuencas semi-cerradas, espesor de las capas de fosforitas, dilución con carbonatos o gangas silíceas, materia orgánica (importante factor éste a la hora de producir ácido fosfórico), posición de la capa en la cuenca, distribución granulométrica (influenciada por las corrientes y la energía en el ambiente de formación), solubilidad de las fosforitas (relacionada con el tipo de grano de apatito) y el ambiente sedimentario, con claves a la hora de

tomar decisiones sobre la forma en que se hará el trabajo de beneficio mineral.

- Para el caso del beneficio mineral de roca fosfática norteamericana, reconocemos los siguientes procesos:
 - Análisis: para determinar el contenido de óxidos de magnesio (figura 4.3.1.).

| % Mg | |
|---|---|
| > 1,8 el producto no debe pasar a las otras fases del beneficio | <1,0 debe ser pasado por otros procesos que permitan remoción del MgO |

Figura 4.3.1: Resumen para toma de decisiones en roca fosfática con respecto a su contenido de magnesio. Elaboración propia.

- Flotación: el producto final se vende a las plantas que procesan ácido fosfórico, así como otros consumidores.
- Lavado: este se hace durante y después de la flotación. Produce finos que son dispuestos en escombreras.
- Dependiendo del producto final, la metodología de beneficio puede cambiar.
 - La materia prima se prepara previa selección, trituración y cribado.
 - El material es llevado a unos calcinadores para eliminar la materia orgánica, el agua y endurecerlas.
- Para la elaboración del ácido fosfórico hay dos (2) metodologías: (i) húmedo y (ii) de horno (figura 4.3.2).

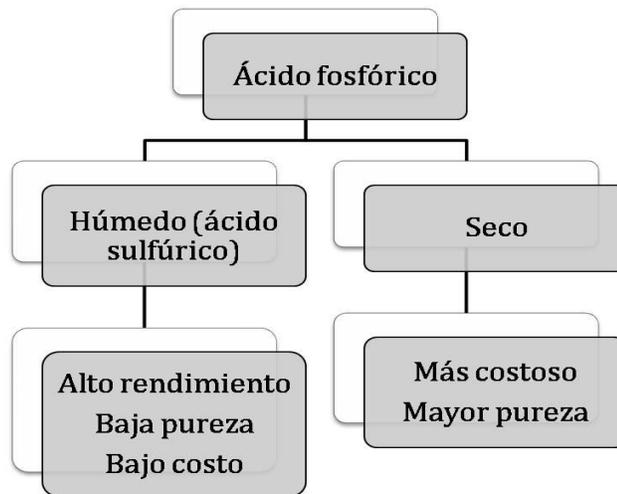


Figura 4.3.2: Síntesis sobre la eficiencia de métodos en la elaboración de ácido fosfórico. Elaboración propia.

- El empleo de alguno de los dos métodos va a depender del uso final que tenga el producto.
- Los fosfatos pueden contener elementos considerados impurezas como: hierro, aluminio, calcio y magnesio. De todas las anteriores, el más problemático es el Mg.
 Esto es porque a la hora de establecer con exactitud la cuantía del producto de mineral que se obtendrá, el magnesio puede causar errores. Se debe remover en el proceso de beneficio lo más posible, puesto que todavía no puede considerarse que haya una solución satisfactoria a este problema (limitación tecnológica).
- Para otras roca fosfática sedimentarias la forma de procesamiento puede variar:
 - El procesamiento mineral puede implicar una variedad de operaciones como (figura 4.3.3):



Figura 4.3.3: Operaciones unitarias en el procesamiento mineral. Elaboración propia.

- La reducción de tamaños se logra por trituración y molienda o por disgregación con agua y lavado (esto va a depender de la dureza y consolidación de la roca y agregados minerales).
 - La separación por tamaños o cribado permite separar la ganga dura o blanda, bien sea por tamizado o clasificación húmeda o seca.
 - Los cloruros solubles se sacan por lavado con agua dulce, seguido por deshidratación.
- Dado que los minerales que componen la ganga pueden tener tamaños similares a las partículas de mineral de interés, se usan métodos de separación por (figura 4.3.4):

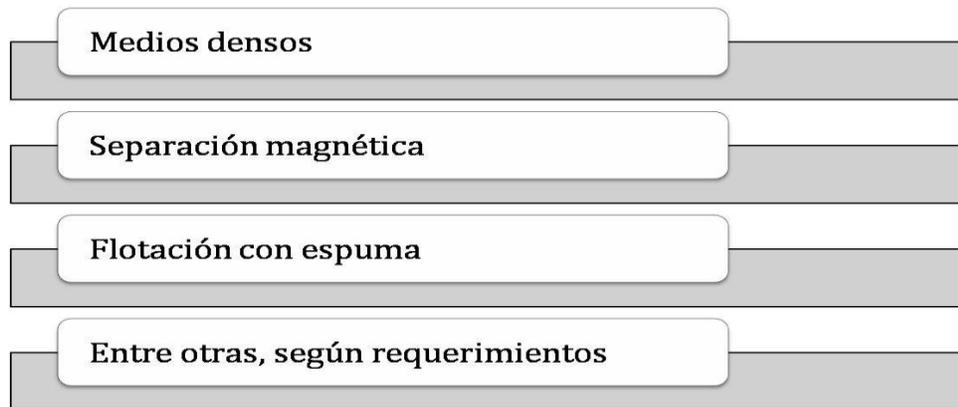


Figura 4.3.4: Métodos de separación empleados. Elaboración propia.

- En el caso de una roca fosfática poco consolidada ubicada en Florida Central, EUA¹³ (figura 4.3.5):

¹³ EUA: Estados Unidos de América

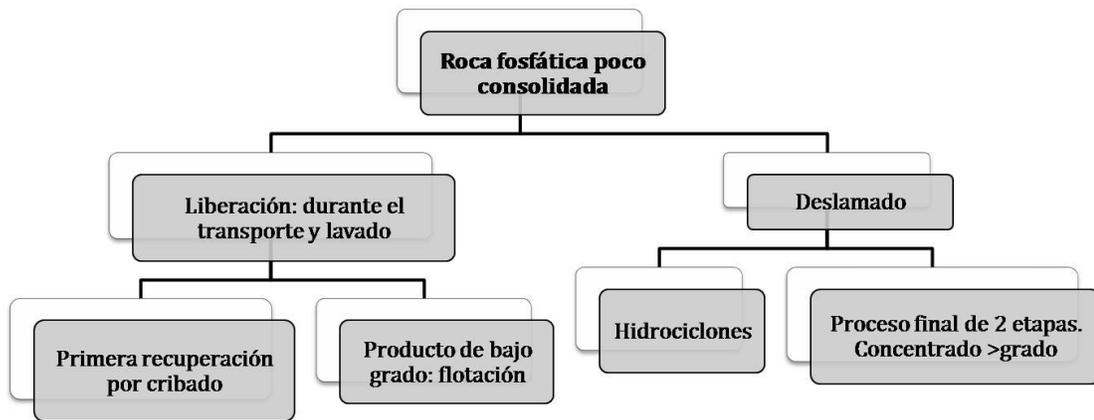


Figura 4.3.5: Procesos de beneficio mineral para roca fosfática poco consolidada. Elaboración propia.

- En el caso de roca fosfática consolidada el esquema de trabajo (figura 4.3.6) puede cambiar:

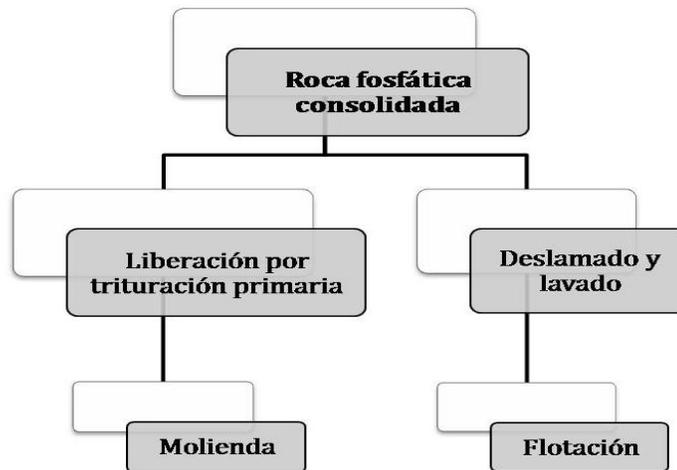


Figura 4.3.6: Procesos de beneficio mineral para roca fosfática consolidada. Elaboración propia.

Para esta roca fosfática en particular proveniente de la mina de San Juan de la Costa, México, el paso de la flotación está condicionado con reactivos aniónicos y garantizado porque el producto obtenido será más limpio gracias al uso directo de agua de mar. Por último, se lava con agua dulce para remover las sales del agua de mar.

- Entre los residuos obtenidos del beneficio de la roca fosfática de fosfato:

- Debido a la presencia de niveles altos de radionúclidos, arsénico, cadmio, selenio y torio en yacimientos sedimentarios, puede considerarse limitante para sus usos. El cuidado que debe tenerse es con los altos contenidos de elementos, en especial el Cd, el cual puede acumularse en suelos y plantas por el uso frecuente de fertilizantes que los contienen, lo que puede traer como consecuencia que entre en la cadena alimentaria.
 - El uranio es otro elemento que puede causar problemas, pues aunque se encuentra en concentraciones mínimas en fosfatos, estos pueden ser agregados con los fertilizantes a los suelos, tierras agrícolas y por erosión, terminar en ríos, aguas subterráneas y hasta el mar.
- Algunos depósitos tienen niveles de radón y radiactividad elevada. Estos niveles son variables de un yacimiento a otro.
 - La mayoría de los nucleídos radiactivos se acumulan en la estructura cristalina del apatito (génesis) o se absorben en la superficie de las arcillas y de los compuestos orgánicos.
- Residuos mineros y de procesamiento, con atención al proceso minero “viable”:
 - Requieren remoción de la capa vegetal.
 - La minería genera desechos del estéril (construcción de escombreras).
 - Drenajes y tratamiento de efluentes: El procesamiento con agua para eliminar minerales de la ganga en la roca fosfática, deja en el líquido particulado fino en suspensión y otras partículas minerales (se descartan en lagunas de sedimentación apropiadas).
 - Gestión de residuos semi-sólidos: subproducto de la producción de ácido fosfórico es el fosfoyeso.
 - La principal preocupación en la construcción de escombreras es la garantía de su estabilidad. Se requiere además: monitoreo de las tasas

de erosión (por el particulado en suspensión aérea e hídrica), residuos no sulfurados, tratamiento de efluentes y lixiviados, donde pueden existir cantidades significativas de metales y metaloides como Ag, As, Cd, Cu, Mo, Ni, Sb, Se, V y Zn.

- Se requieren adoptar metodologías de revegetación aprovechando los nutrientes disponibles en estos materiales depositados en las escombreras.
 - Las arcillas de los “relaves” fosfáticos, productos del beneficio pueden ser aprovechados en la recuperación de los espacios intervenidos.
 - Hay que considerar que estas arcillas pueden contener reactivos usados en el proceso de flotación como *soda ash*, ácidos grasos (aceites), hidróxido de amonio, silicato de sodio, ácido sulfúrico y amina.
- Hay que destacar que el fosfoyeso se produce como desecho del proceso en húmedo (con ácido sulfúrico). En el proceso se producen entre 3 y 6t de fosfoyeso por cada tonelada de ácido fosfórico obtenido.
 - Las aguas de proceso también son un desecho generado del proceso en húmedo.
 - Tienen pH muy bajo ($\text{pH} \leq 1$)
 - Tienen altas concentraciones de fluoruros, sulfatos, fosfatos, amoníaco, radionúclidos, metales pesados y metaloides.
 - Algunos autores recomiendan que los lodos posteriores a los procesos en húmedo se traten con cal para neutralizar el pH y requieren ser aislados de la acumulación de fosfoyeso.
 - El término colectivo de fosfoyeso es una mezcla de residuos de componentes mayoritarios y minoritarios de los líquidos de desecho.
 - Estos cristales pueden estar enriquecidos en ácido fosfórico, ácido sulfúrico, flúor, nitratos, metales pesados, metaloides y radionúclidos.
 - La composición química del fosfoyeso puede variar con:

- La naturaleza de la fosa fosfática.
- El proceso en húmedo utilizado.
- Eficiencia de las operaciones de planta.
- Contaminantes introducidos durante la manufactura.
- Los principales componentes del fosfoyeso es el calcio y el sulfato.
- Durante el proceso de fabricación del ácido fosfórico en húmedo, se liberan en solución los radionúclidos. Según su solubilidad se dividen en el ácido fosfórico y en el fosfoyeso.
 - El U, To y radionúclidos Pb_{210} están en el fosfoyeso.
 - Una fracción de Ra_{226} se asocia a partículas insolubles en agua como: bario, sulfato de estroncio, fluoruros, fosfatos de aluminio, entre otros.
 - El restante de Ra_{226} puede ser absorbido por la materia orgánica, asociados a coloides y presentes en los sólidos solubles en agua.
 - En pilas de fosfoyeso se encuentran contenidos de ácidos, que incluyen el fosfórico. Los fluidos provenientes de estas pilas se han observado muy altas concentraciones de uranio y Pb_{210} , así como concentraciones moderadas de Ra_{226} .

Relaciones entre la génesis de fosfatos y el beneficio mineral

Para la construcción de las relaciones entre las variables geológicas-geoquímicas y aquellas de beneficio mineral en fosfatos sedimentarios, se agrupan de modo de facilitar su visualización, con el uso de herramientas.

4.4. Construcción de relaciones geológicas-geoquímicas y de beneficio mineral, en fosfatos marinos sedimentarios

El siguiente cuadro (Tabla 4.4.1) resume algunos de los aspectos a tener en cuenta sobre el ambiente de formación, las condiciones geoquímicas del yacimiento y las operaciones de minería-beneficio mineral.

Tabla 4.4.1: Resumen de los aspectos relacionados entre las condiciones geológicas-geoquímicas y el beneficio mineral.

| Geológicos | Geoquímicos | Beneficio mineral y minería |
|--|--|---|
| -Poca sedimentación clástica es una característica de los fosfatos. | -Las condiciones de poca sedimentación clástica determina la sedimentación química. | -El ambiente sedimentario es importante a la hora de tomar una decisión acerca del método. |
| -Los sedimentos fosfáticos se depositan en zonas anóxicas que permiten la preservación de la materia orgánica. | -La bacteria <i>Thiomargarita</i> puede (o pudo) estar contribuyendo a la formación de las fosforitas en ambientes anóxicos. -Concentraciones de elementos como el U están relacionados con la presencia de materia orgánica. | -Limitaciones en el producto final con respecto a su uso. -Los radionúclidos Ra ₂₂₆ pueden ser absorbidos por la materia orgánica, asociada a coloides (lamas) y en sólidos hidrosolubles en agua. Considerar en escombreras y relaves. |
| -La química oceánica tiene gran significancia en la formación de fosforitas. | -El enriquecimiento en algunos elementos se debe a contaminación ambiental, recubrimiento del producto o como indicadores geoquímicos de ambiente de depositación. | -Presencia de metales pesados, metaloides y radionúclidos. |
| -Características particulares: triple asociación fosfatos, <i>cherts</i> y sedimentos con abundante materia orgánica. -La composición química dominante es P, Si, Ca. -Elementos minoritarios: Al, Fe, Mg, Na, K, S, F y Cl. -Elementos trazas: Ag, Cd, Mo, Se, Sr, U, Y, Zn y REE. | -Los elementos traza se encuentran en el apatito por: (1) química cristalina y aceptación de iones externos y (2) geoquímica única dada la disponibilidad de estos elementos en el ambiente de depositación -El enriquecimiento en: Ag, Cd, Mo, Se, Sr, U, Y, Zn y Tierras Raras (excepto Ce) es probablemente indicativo de su génesis. -El enriquecimiento de Cd, U, Y y lantanos, Sr, Pb y Zn son conocidos y sustituyen al Ca en el apatito. -Los modos de fijación de elementos como As, Cd, Cu, Mo y V son debidas a la presencia de materia orgánica, detritos finos y sulfatos metálicos sueltos. | -La materia orgánica debe ser llevado a calcinadores para eliminarla. -Remoción de Mg antes de la producción de ácido sulfúrico, pues puede causar errores (requerir más H ₂ SO ₄ y reducir el producto buscado). Concentración debe ser >1%. -Cuidar las concentraciones de algunos elementos como Cd, U que pueden acumularse en seres vivos y entrar en la cadena alimentaria. -Altas concentraciones de radionúclidos, Ar, Cd, Se y To pueden limitar sus usos. -Tratamiento de efluentes y lixiviados donde puedan existir metales y metaloides como Ag, As, Cd, Cu, Mo, Ni, Sb, Se, V y Zn. |
| -La mayor parte de los granos de fosforitas son tamaño arena (entre 2mm y algunas centenas de cm). | -Al quedar expuestas, los granos de las fosforitas pueden sufrir alteraciones debido al drenaje y aguas subterráneas. | -Distribución del tamaño de grano (influenciada por las corrientes y energía del ambiente de formación). -Dilución con carbonatos o gangas silíceas (asociación P-Si-Ca). Afecta calidad de liberación del mineral. -Esfuerzo necesario para la reducción de tamaño y grado de liberación. |

En función del cuadro anterior y solamente haciendo un mayor énfasis en los procesos mineros y de beneficio propiamente, se presenta el cuadro (Tabla 4.4.2) con las relaciones encontradas correspondientes:

Tabla 4.4.2: Relaciones encontradas que afectan procesos mineros y de beneficio mineral

| Roca fosfática | Proceso implicado | Salidas y desechos |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> -Dureza, consolidación, distribución de los granos minerales presentes. -Minerales presentes en la ganga. | <ul style="list-style-type: none"> -Reducción de tamaño/molienda. -Grado y calidad de la liberación (mineral/ganga). -Energía necesaria para la reducción de tamaño. -Producción de ácido fosfórico. -Separación de la ganga por medios densos, separación magnética, flotación con espuma, entre otras. | <ul style="list-style-type: none"> -Producción de aguas de lavado en separación/cribado en húmedo. El mineral es posible que requiera retirar las lamas, arcillas y minerales carbonatados. -Los cloruros solubles se sacan con agua, por lo que estos quedan disueltos en estos fluidos. -El procedimiento de eliminar ganga con agua deja en el líquido sólidos finos en suspensión. -Las aguas de proceso pueden tener pH muy bajo ($\text{pH} \leq 1$). -Desechos que contienen reactivos de los procesos de beneficio mineral. |
| <ul style="list-style-type: none"> -Composición química. -Elementos mayoritarios, minoritarios y trazas. -Presencia de elementos radiactivos. -Presencia de materia orgánica. | <ul style="list-style-type: none"> -Beneficio mineral. -Producción de ácido fosfórico. Solubilidad de las fosforitas. -Separación por otros métodos de minerales ganga, según requerimientos. | <ul style="list-style-type: none"> -De los elementos impureza el más problemático es el Mg, la concentración en la roca fosfática debe ser $< 1\%$. -Desechos con particulado fino, contenido de metales, pH bajo, reactivos de flotación, sales disueltas no solubles, minerales carbonatados, formación de fosfoyeso. -La construcción de escombreras implica considerar: tasas de erosión, residuos no sulfurados, tratamiento de efluentes y lixiviados, metales y metaloides disueltos. -Las arcillas en los "relaves" mineros pueden contener reactivos de los procesos de flotación: aceites, ácido sulfúrico, aminas, entre otros. -El pH bajo de las aguas de proceso tienen altas concentraciones de fluoruros, sulfatos, fosfatos, amoníaco, radionúclidos, metales pesados y metaloides. -Variación de composición del fosfoyeso dependiendo de la roca fosfática. -Está compuesto (fosfoyeso) por cristales que pueden estar enriquecidos en ácidos sulfúrico y fosfórico, flúor, nitratos, metales pesados, metaloides y radionúclidos, -Los radionúclidos están presentes tanto en el ácido fosfórico y en el fosfoyeso, según su solubilidad. -En pilas de fosfoyeso, como están contenidos ácidos, en los fluidos provenientes de estas pilas, hay estudios donde se observaron muy altas concentraciones de uranio y Pb_{210}, así como moderadas de Ra_{226}. |

Vistas las relaciones entre las condiciones geológico-geoquímicas con el beneficio mineral (Tabla 4.4.1), en el cuadro (Tabla 4.4.2) se mostraron las salidas y consecuencias de las distintas actividades de producción, en este caso de fertilizantes a partir de fosfatos sedimentarios de origen marino. Luego, es válido hacerse algunos cuestionamientos sobre cómo será aplicado este conocimiento interdisciplinario en la toma de decisiones mineras. Para ello se sugiere utilizar algunos datos disponibles de un yacimiento de fosfato venezolano, ubicado al occidente del país (Formación Navay).

4.5. Datos disponibles sobre ejemplo de fosfatos sedimentarios, en Venezuela

(1) Outotec (2009). En este informe trata sobre la selección de muestras y desarrollo de procesos para esta roca fosfática. El siguiente es un extracto no textual de algunas partes de esta información:

Este yacimiento es bastante extenso, con perfil típico dividido en tres (3) capas de arriba abajo, identificadas como Capa A, Capa B y Capa C. La capa de interés económico es la B. Las reservas se estiman en cerca de 50 MMTM de roca fosfática aprovechable (referidos a 2009). Las muestras fueron tomadas de manera aleatoria y tienen limitación de no ser necesariamente representativas de la totalidad del yacimiento. Sin embargo, es posible decir que esta información orienta sobre los aspectos a considerar en la toma de decisiones en las operaciones unitarias del beneficio mineral. Uno de ellos es la composición promedio de elementos químicos en parte de las muestras tomadas (Tablas 4.5.1 y 4.5.2).

Tabla 4.5.1: Composición química de elementos mayoritarios y minoritarios en las muestras tomadas de las capas A, B y C. Tomado de Outotec (2009)

| Compuesto (%) | Capa A (20m) | Capa B (25m) | Capa C (28m) |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| SiO ₂ | 55,6 | 45,6 | 47,3 |
| TiO ₂ | 0,101 | 0,087 | 0,099 |
| Al ₂ O ₃ | 1,56 | 1,82 | 1,33 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,021 | 0,024 | 0,017 |
| V ₂ O ₃ | 0,0062 | 0,0065 | 0,0056 |
| FeO | 0,51 | 0,46 | 0,38 |

| | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
| MnO | <0,001 | 0,021 | <0,001 |
| MgO | 0,11 | 0,13 | 0,13 |
| CaO | 22,6 | 28,8 | 27,9 |
| Rb ₂ O | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| SrO | 0,038 | 0,045 | 0,050 |
| BaO | 0,017 | 0,015 | 0,015 |
| Na ₂ O | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| K ₂ O | 0,300 | 0,142 | 0,220 |
| ZrO ₂ | 0,027 | 0,012 | 0,014 |
| P ₂ O ₅ | 17,8 | 21,3 | 21,3 |

Tabla 4.5.2: Composición química de elementos traza en las muestras tomadas de las capas A, B y C. Tomado de Outotec (2009)

| Elemento (%) | Capa A (20m) | Capa B (25m) | Capa C (28m) |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cu | 0,001 | 0,001 | <0,001 |
| Ni | 0,003 | 0,003 | 0,004 |
| Co | 0,010 | 0,012 | 0,013 |
| Zn | 0,015 | 0,016 | 0,020 |
| Pb | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| Ag | 0,003 | 0,002 | 0,003 |
| S | 0,132 | 0,127 | 0,145 |
| As | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| Sb | 0,012 | 0,012 | 0,012 |
| Bi | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Te | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Y | 0,0068 | 0,0046 | 0,0062 |
| Nb | 0,0011 | 0,0006 | 0,0012 |
| Mo | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Sn | 0,004 | 0,003 | 0,004 |
| W | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Ga | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| Cl | 0,003 | 0,003 | 0,004 |
| Th | 0,0027 | 0,0021 | 0,0016 |
| U | 0,0006 | 0,0006 | 0,0019 |
| Cs | 0,003 | 0,003 | <0,001 |
| La | 0,007 | 0,006 | 0,008 |
| Ce | 0,008 | 0,004 | 0,008 |
| Ta | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| C | 0,349 | 0,386 | 0,484 |

Los componentes minerales son: fluorapatito, cuarzo, illita y calcita. Los constituyentes menores: fosfato aluminico (berlinita), hematita, ilmenita y zirconia. Las pruebas de trituración de las muestras (-1mm de tamaño de partícula) demostraron que aquellas que liberan mayoritariamente son cuarzo y apatito, el cuarzo teniendo menor tamaño que el apatito. La forma del apatito es

redondeada y a veces asociada a otros minerales. Los minerales de hierro encontrados fueron la hematita, illita e ilmenita.

(2) Fundación Instituto de Ingeniería (FII) (2009). Este informe contiene información sobre ensayos y análisis mineralógicos de muestras de mineral de la Formación Navay, con fines del beneficio mineral. En este estudio se reportó que el mineral de fosfato (fluorapatito) se libera (75% de liberación) a la malla -30/+80. En la roca fosfática trabajada se observaron oolitos y pisolitos de mineral fosfatado en una matriz de calcita y cuarzo fino, con minerales cuarzo y calcita libres.

Con una molienda, 100% pasante de la malla 80 se garantiza 95%, o más, de mineral liberado. Debido al comportamiento similar del P_2O_5 y del SiO_2 , indica que con una trituración 100% pasante malla 30 y posterior clasificación es posible obtener un concentrado de P_2O_5 de hasta 27% pero, con contenidos de aproximadamente 28% de SiO_2 (ver Tabla 4.5.3).

Tabla 4.5.3: Grado de liberación (%) para el mineral de fosfato (apatito) presente en la muestra. Tomado de informe FII (2009)

| Malla % liberación | Malla +1/2"/+6 | Malla +10 | Malla +30 | Malla -30/+80 | Malla -80/+200 | Malla -200/+325 |
|--------------------|----------------|-----------|-----------|---------------|----------------|-----------------|
| Mineral fosfático | 0 | 0 | 20 | 75 | 95 | 100 |

También fueron realizados análisis de composición química de estas muestras. Se presentan en la Tabla 4.5.4.

Tabla 4.5.4: Composición química de la muestra de fosfato analizada. Tomado de informe FII (2009)

| Especies (%) | Roca Fosfática |
|-----------------|------------------|
| P_2O_5 | $15,69 \pm 0,02$ |
| CaO | $24,8 \pm 0,3$ |
| SiO_2 | $46,8 \pm 0,3$ |
| F ⁻ | $1,76 \pm 0,03$ |
| Fe_2O_3 | $0,62 \pm 0,01$ |
| K_2O | $0,35 \pm 0,01$ |
| Na_2O | $0,10 \pm 0,01$ |
| MgO | $0,18 \pm 0,01$ |
| $CO_3^{=}$ | $6,6 \pm 0,2$ |
| Cr_2O_3 | <0,02 |
| Pérdida al rojo | $5,73 \pm 0,01$ |

Por análisis de microscopía electrónica de barrido, se obtiene que el silicio está asociado a la matriz (carbonática y fosfática) y como cemento de las partículas fosfáticas. También hay presencia de otros minerales (y elementos) en la matriz como sulfuros de hierro, zinc y cadmio, además de minerales de sulfato como calcio (yeso) en el mineral fosfático y en la matriz, circonio, titanio y rutilo. Igualmente, se identifica la presencia de antimonio, estaño, níquel, cromo, cobalto, cobre, tungsteno y yodo tanto en el mineral fosfático como en la matriz. Este análisis también identificó sulfuros de hierro (pirita), de zinc (esfalerita), de cadmio (*greenoquita*) y circón asociado a la matriz o cemento silíceo y arcilloso de la muestra.

Los minerales más abundantes de esta muestra en orden decreciente son: cuarzo, fluorapatito, calcita, minerales de arcilla, yeso y hematita.

(3) *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN)*, 2008. En este informe trata sobre algunas pruebas exploratorias de flotación directa para el apatito.

Pruebas exploratorias de flotación directa para el apatito. En los últimos años, para la flotación de fosfatos, se han venido utilizando aceites vegetales como agentes colectores para recuperar el apatito.

Para estas pruebas se usa una celda de flotación modelo *Denver*, Sub A, Modelo D-2 con raspado mecánico para el retiro del material flotado y un depósito con un volumen útil de tres (3) litros. El procedimiento consiste en tratar una pulpa, con una concentración de sólidos del 40%, durante cinco (5) minutos, con el agente depresor de almidón de maíz, con el pH ajustado a través de la adición de hidróxido de sodio. A continuación, se adiciona el agente colector durante tres (3) minutos, obteniéndose un concentrado de apatito y una fracción no flotada que contiene principalmente los minerales de la ganga.

El aceite vegetal utilizado como agente colector, en el sistema de flotación para estas pruebas, fue el aceite de soya (flotación aniónica). Estos se caracterizan por su gran poder para colectar, bajo costo y su amplia disponibilidad a nivel industrial.

En el proceso de flotación, el valor de pH es una variable de suma importancia porque altera las características de la pulpa, tanto como la concentración de las especies minerales, grado de dispersión y absorción de los agentes colectores y/o depresores, sobre la superficie de las partículas minerales. En las pruebas de flotación fue ajustado el pH con hidróxido de sodio, variándolo de 7 a 9. Se observa que a mayor pH, mayor porcentaje de recuperación de P_2O_5 , pero también mayor del SiO_2 .

Para sacar los minerales silicatados, se emplea la flotación inversa (reversa). En la prueba para esta fase se utiliza el sistema de agente depresor *Flotigam*¹⁴ 75, un almidón de maíz y un colector de minerales silicatados *Flotigam*® EDA.

4.6. Manejo de las variables. Herramientas para la toma de decisiones

En el trabajo de Investigación Aplicada, dentro de los estudios de la Maestría en Ciencias Geológicas, UCV, realizada por Piña (2010), se exploraron algunas herramientas de análisis para facilitar la búsqueda e identificación de indicadores de sustentabilidad, que para el caso respectivo, fue la recopilación de las variables que afectan a los proyectos mineros (ver Anexo A). De este trabajo, se pudo observar que las herramientas que más aportaron a esa investigación fueron los diagramas: Espina de Pescado, aplicados al proceso de beneficio mineral, gráfico Espacio-Riesgo, Ciclo de Vida del Producto y Esquemas de Afectación. En primer lugar, se hace una breve recopilación de algunos de los resultados obtenidos de estos instrumentos y luego algunos aspectos a considerar, aguas abajo de la propia actividad de beneficio mineral.

¹⁴ *Flotigam* son una serie de productos para el beneficio mineral de la empresa *Clariant*.
Más información consultar: <http://www.mining-technology.com/contractors/chemicals/clariant> y
<http://www.oms.clariant.com/en-us/mining/Pages/default.aspx>

El primer esquema presentado es el de Espina de Pescado que demuestra algunos de los aspectos identificados (ver figura 4.6.1)

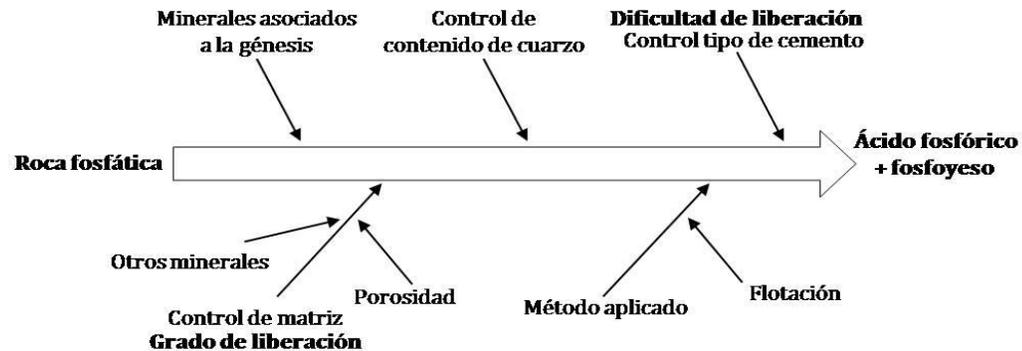


Figura 4.6.1: Diagrama de Espina de Pescado aplicada a las operaciones de beneficio del mineral fosfático. Modificado de Piña (2010), Figura 9.

En esta figura, se destaca la atención prestada en las entradas que afectan el beneficio mineral y en los productos o salidas; entre éstas, se mencionan los siguientes:

1. Cuarzo en la roca fosfática: uso (fertilizantes o elaboración de productos para la industria de alimentos para animales y consumo humano).
2. Contenido de uranio: relación con materia orgánica en la génesis del yacimiento (construcción de escombrera y manejo de desechos del beneficio de la roca fosfática).
3. Solubilidad del estéril y la roca fosfática: presencia de aguas subterráneas.
4. Composición de la matriz, relacionado con el grado de liberación (beneficio).
5. Composición del cemento, relacionado con mayor dificultad de liberación (beneficio).
6. Fosfato: no es soluble en agua, por eso la necesidad de beneficiarlo.
7. Desechos del método de beneficio: contenido de cuarzo.

En el aspecto 2, se puede agregar que además de la presencia de uranio, se requiere estar enormemente pendiente de los contenidos de otros elementos químicos como: plomo, cadmio, cromo, arsénico y selenio, entre otros. Como ya

se dijo antes, los contenidos dependerán de la génesis de la roca fosfática. Por ejemplo, para los datos citados en la tabla 4.5.2, se reportan que están dentro de los rangos aceptables. Lo que debe ser considerado de cuidado, al momento de la aplicación de la metodología de beneficio, también es susceptible de concentrarse en el fosfoyeso y en las aguas de proceso, como se mencionó en el Capítulo III, dado que no se encontraron datos de los componentes después de tratamiento mineral.

En el diagrama de Ciclo de Vida (CDV) del producto, para la actividad de beneficio, se cita en la Figura 4.6.2, algunas de las entradas (a la izquierda) y salidas (en la zona derecha) que es posible encontrar (sin ser exhaustivas). La figura en detalle se encuentra en el Anexo B.

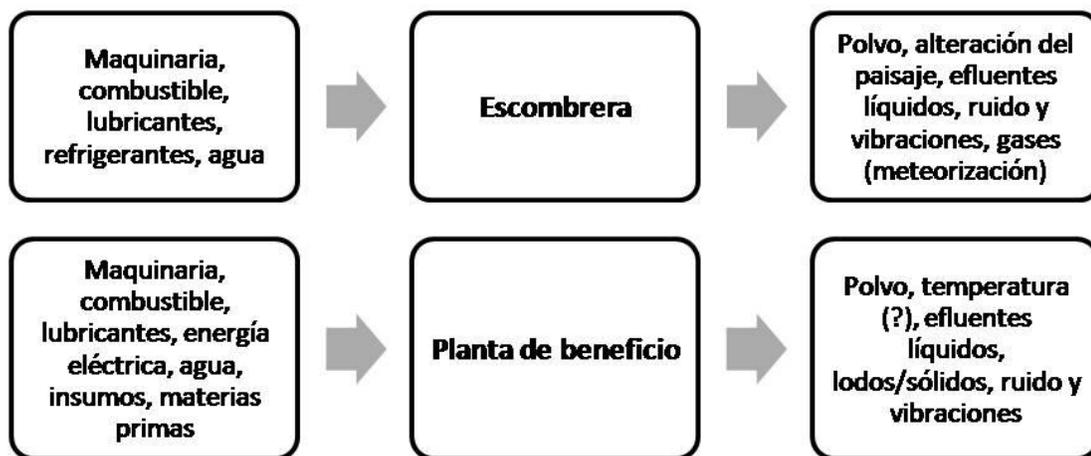


Figura 4.6.2: Sección del esquema de Ciclo de Vida, destacando operación de beneficio mineral. Modificada de Figura 1, Piña (2010)

Para apoyar entonces, el esquema de CDV se agrupó los egresos por procesos y el componente físico-social-biológico afectado. Con la clasificación de los egresos se logra sistematizar por componente afectado, construyendo un par de cuadros dónde vemos que parte del proceso afecta qué componente y otro dónde identificando los materiales utilizados, percibimos cuál es la forma de impacto sobre el medio. Se cita una parte del cuadro resumido en los procesos de construcción de escombreras y beneficio mineral (Tabla 4.6.1).

Tabla 4.6.1: Egreso por proceso y componente afectado. Cuadro 2, modificado de Piña (2010)

| Proceso | Egresos (<i>output</i>) | Componente afectado |
|------------------------------------|---|--|
| Escombrera | Polvo Alteración del paisaje Efluentes líquidos/lixiviados Sólidos en suspensión hídrica Sales disueltas Ruido y vibraciones Gases (alteración química del estéril) | Atmósfera Abiótico-biológico-social Suelos-agua Biológico (no humano) |
| Planta de beneficio mineral | Temperatura (calor) Efluentes líquidos Sales disueltas e insolubles Lodo/sólidos Polvo Ruido Vibraciones Radionúclidos | |

La Tabla 4.6.2 presenta un resumen de los procesos en el ciclo de vida, productos y los medios o componentes afectados.

Tabla 4.6.2: Proceso y forma de afectación en los diferentes componentes socio-naturales. Cuadro 3, modificado de Piña (2010)

| Proceso en el ciclo de vida | Materiales utilizados | Medio sólido/suelo | Medio líquido/agua | Medio gaseoso/atmosférico | Medio social-biológico |
|------------------------------------|--|--|---|--|---|
| Escombrera | Maquinaria Combustible Lubricantes Refrigerantes Agua | Polvo Fosfoyeso Material con contenido de P ₂ O ₅ no recuperable | Efluentes líquidos Lixiviados Aguas de escorrentía | Gases-meteorización Polvo | Alteración del paisaje Ruido Vibraciones Metales pesados y radionúclidos |
| Planta de beneficio mineral | Maquinaria Combustible Lubricantes Energía eléctrica Agua Insumos Materias primas Ácidos Reactivos | Lodos Sólidos Polvo decantado Fosfoyeso | Efluentes líquidos de beneficio Aguas de proceso Sales disueltas Cambios de pH | Temperatura Polvo Humos-gases y olores | Ruido Vibraciones Percepción pública sobre: uranio, metales pesados y radionúclidos |

A manera de resumen, se construye con la información recolectada con miras a la gestión integral y sustentable de la explotación; se clasifican las variables en observables, no observables, controlables y no controlables. La herramienta

permite tomar decisiones de cuáles son las variables es posible medir y aplicar medidas mitigantes, considerando los procesos que se han venido estudiando.

En la Figura 4.6.3 se representa una localización en ese espacio-riesgo de algunas de las variables identificadas.

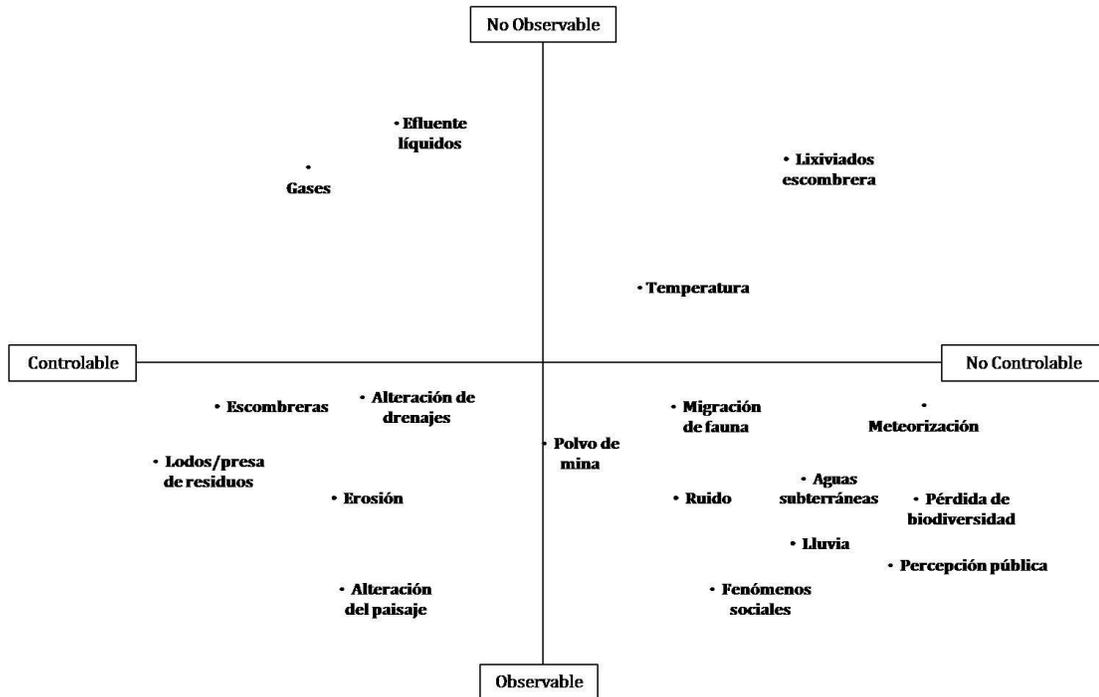


Figura 4.6.3: Localización de variables en el Espacio Riesgo que permita determinar a *grosso modo* variables controlables y observables. Figura 16 modificado de Piña (2010), referencia original Graedel y Allenby (1995).

Con la sistematización de la información y el reconocimiento de las variables, es posible concentrar las acciones de gestión en aquellas que son medibles, controlables y observables, no se pretende de alguna manera desconocer o descartar las demás variables, por el contrario es necesario complementar la información disponible, con aquella que se harán más evidentes a medida que se avanza en la extracción mineral, pues éstas garantizan la planificación de manera efectiva y progresiva, al desarrollo minero y el cierre de mina (Piña, 2010). De las variables más interesantes es la percepción pública acerca de la presencia de uranio contenido en la roca fosfática, además de considerar

aquellas como los metales pesados, metaloides y radionúclidos, los cuales son indicadores que deben ser considerados en el control del particulado atmosférico en mina, en los egresos de la planta de beneficio, así como, en el diseño y construcción de las escombreras y pilas de almacenamiento del fosfoyeso.

Dado que este tema de la concentración de elementos metálicos, metaloides y radionúclidos, (que incluyen el U) son todos de importancia sobre todo al establecer los usos del producto obtenido, pues estos pueden traer consecuencias sobre la salud humana, a corto y largo plazo, así como consecuencias en el medio físico, agua y/o suelos. En función de esto, en la Tabla 4.6.3 se presentan algunos de estos elementos “problemáticos” y algunos aspectos a tener en cuenta para su control.

Tabla 4.6.3: Elementos, consecuencias y aspectos a tener en cuenta para establecer medidas de control (Albert, 2005 y ATSDR¹⁵, 1999 op cit. Piña, 2010)

| Elemento presente | Consecuencia ambiental o sobre la salud humana | Cantidad dañina | Aspectos a tener en cuenta para las medidas de control |
|----------------------|---|---|--|
| Pb Plomo | <ul style="list-style-type: none"> -Una vez que el plomo ha llegado al suelo permanece ahí indefinidamente. Se considera uno de los depósitos principales de este contaminante. -Las lombrices de tierra tienden a acumular plomo y pueden ser la ruta por la cual entra a la cadena alimentaria. -Tanto las formas orgánicas (tetraetilo y tetrametilo de plomo) como las formas inorgánicas (sales y óxidos) afectan al ambiente y en especial los suelos. -Uno de los síntomas de la intoxicación con plomo es la anemia. Afecta el sistema nervioso central y periférico. Se concentra en los huesos. | <ul style="list-style-type: none"> -Concentración normal: 2 a 200 µg/g¹⁶ en suelos. -Concentración normal en agua: 0,001 a 0,01 µg/ml¹⁷. -Límite de OMS¹⁸: 0,1 µg/ml. | <ul style="list-style-type: none"> -Este metal es resistente a la acción de los ácidos como el sulfúrico. -En zonas de aguas blandas, con pH ligeramente ácido, puede llegar a disolverse el plomo en tuberías. -Determinar los niveles en roca fosfática y de ser superior al permitido, informar al trabajador sobre los peligros a los que se encuentran expuestos (LOPCYMAT¹⁹). -Efectuar reconocimientos y exámenes médicos periódicos para determinar las concentraciones de plomo en sangre y orina. -Control de efluentes que puedan contenerlo (Decreto 883). |
| Cd Cadmio | <ul style="list-style-type: none"> -Tiene una vida media larga y se acumula en seres vivos permanentemente. -Se le considera uno de los elementos más tóxicos. -El cadmio se deposita en suelos y agua, cercanos a la fuente de producción, donde es ingerida y entra en la cadena alimentaria. -El tiempo de vida media en organismos (especialmente en mamíferos) es indefinido y puede durar varios años. | <ul style="list-style-type: none"> -Concentración normal en agua potable >5 µg/l²⁰. Agua de mar entre 0,04 a 0,03 µg/l. -Concentración normal en suelos >1 mg/kg²¹. Rango de 0,01 a 0,5 mg/kg. | <ul style="list-style-type: none"> -Los metales agregados en suelos muchas veces vienen en los fertilizantes, abonos y agroquímicos. -En suelos ácidos el cadmio se intercambia fácilmente, haciéndolo disponible para los vegetales. -Los superfosfatos que se utilizan en agricultura pueden contaminar los suelos, |

¹⁵ ATSDR: Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (siglas en inglés)

¹⁶ Microgramo por gramo

¹⁷ Microgramo por mililitro

¹⁸ OMS: Organización Mundial de la Salud

¹⁹ LOPCYMAT: Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo

²⁰ Microgramo por litro

²¹ Miligramo por kilogramo

| | | | |
|------------------------|---|---|---|
| | <p>-Los efectos de la fito-toxicidad del cadmio dependen de la especie (vegetal); puede ir desde la clorosis (reducción de la clorofila), marchitez y necrosis. Altas concentraciones de cadmio inhiben la fotosíntesis y fijación del bióxido de carbono.</p> <p>-La fauna marina como: zooplancton, moluscos y mariscos, acumulan cadmio. Las concentraciones pequeñas afectan la reproducción de peces adultos.</p> <p>-El cadmio tiene fuerte afinidad por el hígado y los riñones.</p> | | <p>los cuales pueden llegar a contener hasta 100 mg de cadmio por kg de peso seco.</p> <p>-Algunos vegetales como arroz y trigo pueden asimilar cantidades considerables de cadmio a partir de suelos contaminados.</p> |
| Cr Cromo | <p>-El cromo en concentraciones naturales, se deposita en piel, pulmones, músculos y grasa de mamíferos superiores. En cantidades superiores a las naturales, se acumula en hígado, bazo, espina dorsal, cabello, uñas y placenta.</p> | <p>-En agua dulce la concentración normal es de 0,1 a 6 µg/l.</p> <p>-Agua de mar 0,2 a 50 µg/l.</p> <p>-Suelo de 5 a 1 500 mg/kg.</p> | <p>-El cromo se ha detectado en algunas zonas como contaminante de fertilizantes (superfosfato) en concentraciones de 119 µg/g (Langmyhr, 1977 op cit. Albert, 2005), introducido por los fertilizantes >3 000 ppm.</p> <p>-Se recomienda en varios estudios tratar los residuos de cromo antes de desecharlos al ambiente, para evitar daños mayores.</p> |
| As Arsénico | <p>-En el organismo humano, el As se concentra en los leucocitos y se acumula fundamentalmente en hígado, riñón, pulmón, cabello y vello, dientes, uñas y piel.</p> | <p>-El contenido de arsénico en la corteza terrestre es de 2ppm, en promedio.</p> | <p>-El arsénico presente en cultivos tiene otro origen diferente a los fertilizantes (superfosfatos).</p> <p>-Debido a esto hay que hacer estudios previos en el suelo para establecer los niveles de control previo al uso de los fertilizantes.</p> |
| Se Selenio | <p>-Al igual que el arsénico se acumula en el riñón y en el cabello.</p> <p>-La intoxicación aguda produce efectos nocivos sobre el sistema nervioso central.</p> | <p>-Concentración normal en agua de ríos 0,02 µg/g.</p> <p>-Concentración normal en agua de mar: 0,004 g/ton.</p> <p>-El contenido promedio en seres humanos es de 1416 mg.</p> | <p>-Los efectos tóxicos pueden aparecer cuando la ingestión excede la capacidad de eliminación, ya que se tiene en el organismo varios mecanismos de regulación del selenio.</p> <p>-En la industria se deben tomar precauciones en el manejo conveniente de este elemento y sus compuestos.</p> |

| | | | |
|-----------------------------------|--|--|--|
| <p>U Uranio</p> | <ul style="list-style-type: none"> -Las plantas pueden absorber uranio desde el suelo a través de las raíces, pero éste no pasa al resto de la planta. Por lo tanto, las hortalizas, por ejemplo patatas y rábanos, que se cultivan en suelo contaminado con uranio pueden contener más uranio que si crecieran en suelo con niveles de uranio normales. - La población general ingiere aproximadamente 1 a 2 µg (0,6 a 1,0 pCi) de uranio al día en los alimentos y aproximadamente 1,5 µg (0,8 pCi) por litro de agua que beben. - Algunas personas han manifestado señales de enfermedad de los riñones después de ingerir cantidades altas de uranio. -Existe la posibilidad de que cualquier material radioactivo, como el uranio, produzca cáncer. - No se conoce si la exposición al uranio afecta la reproducción en seres humanos. En algunos experimentos con animales, la exposición a dosis muy altas de uranio ha reducido el número de espermatozoides. | <ul style="list-style-type: none"> - El uranio se encuentra naturalmente en el suelo, la concentración típica es 3 µg (2 pCi²²) por gramo de tierra. | <ul style="list-style-type: none"> - El uranio natural es radioactivo pero, no representa peligro de radiación porque solamente emite pequeñas cantidades de radiación. - El uranio es una sustancia química que también es radioactiva. - Tanto el NIOSH como la OSHA recomiendan un límite de exposición de 0.05 mg/m³ (34 pCi/m³) para particulado de uranio en el aire del trabajo (NIOSH²³ Y OSHA²⁴ son normas internacionales sobre higiene y salud ocupacional). |
|-----------------------------------|--|--|--|

²² Pico Curie. Unidad de medición para radiactividad

²³ NIOSH: *National Institute of Occupational Safety and Health*

²⁴ OSHA: *Occupational Safety and Health Administration*

Todos estos aspectos son para considerar en una gestión y uso eficientes de fertilizantes provenientes de roca fosfática sedimentaria, en especial las marinas. El conocimiento de la génesis de estos yacimientos y todos los aspectos químicos y físicos involucrados, más las condiciones dadas en el beneficio mineral, son los insumos necesarios, con la legislación correspondiente en este caso la venezolana (Anexo C), se puedan tomar decisiones en minería de fosfatos.

4.7. Investigaciones sobre efectos de la acumulación de metales en suelos por uso de fertilizantes

Cheraghi et al (2011) proponen para investigar los efectos de los fertilizantes sobre el contenido de metales en suelos agrícolas, utilizando indicadores con algunos cultivos: pepinos, papas y remolacha azucarera, entre otros.

Para ello, los investigadores utilizaron un índice: $P_i = C_i/S_i$

Donde, P_i representa el índice de contaminante i en el suelo,

C_i es la contaminación del contaminante i en el suelo, y

S_i es el estándar esperado del elemento i (natural).

Para los suelos, esos valores de S_i están mostrados en la tabla 5.7.1:

Tabla 4.7.1: Valores de S_i en suelos (Cheraghi et al 2011)

| | |
|-----------|-----------|
| As | 15 mg/kg |
| Cd | 0,2 mg/kg |
| Cr | 90 mg/kg |
| Cu | 35 mg/kg |
| Pb | 35 mg/kg |
| Zn | 100 mg/kg |

Los valores de P_i varían dependiendo del grado de contaminación, tabla 4.7.2 (según *Environmental Quality Standard for Soils*, 1995 op cit. Cheraghi et al 2011):

Tabla 4.7.2: P_i y su relación con grado de contaminación, tomado de Cheraghi et al (2011)

| | |
|------------------|---|
| $P_i \leq 0,7$ | indica que el suelo no está contaminado con metales pesados |
| $1 < P_i \leq 2$ | indica baja contaminación |
| $2 < P_i \leq 3$ | indica mediana contaminación |
| $P_i > 3$ | indica una alta contaminación |

En este estudio, encontraron que los fertilizantes de fosfatos han introducido metales traza, considerados contaminantes en suelos de cultivo, como ya se dijo, dependiendo del cultivo pueden acumular unos u otros elementos (existen preferencias o tendencias en ciertas especies vegetales que sugieren una profundización de los estudios para establecer las relaciones correspondientes). Dado que la concentración de elementos traza, en especial metales varía de una roca fosfática a otra, la caracterización antes o después del tratamiento es necesaria (los autores lo mencionan como “el incremento dramático en el uso de fertilizantes”). En los cultivos estudiados encontraron en muestras de suelos para la remolacha azucarera: As, Cr, Cu, Mn, Ni y Pb; Cd, Pb, Cr, As y Cd en suelos para el cultivo de papas; y Fe y Zn en ambos suelos de cultivo (papas y remolachas). Las correlaciones entre algunos metales pesados indican que la contaminación es debida a la agricultura intensiva.

Debido a que los metales pesados pueden estar presentes, en forma natural o introducida en suelos por actividades antropogénicas, es necesario conocer las condiciones antes y después de la aplicación del método (experimental) y de la actividad. Las formas antropogénicas de introducir los metales pesados en el ambiente, incluyen la extracción y procesamiento de minerales, en especial de roca fosfática, procesamiento industrial, escombreras y relaves, así como la aplicación de fertilizantes de fosfatos a los suelos.

Los fertilizantes de fosfatos para suelos contienen metales pesados en especial el Cd. La persistente aplicación de estos puede causar acumulación de metales en el suelo. Los resultados de Cheraghi et al (2011) concuerdan con los citados en Biasioli et al (2006) sobre la presencia de Pb, Zn y Cu en suelos urbanos de cultivo en Turín, Italia que confirmaban su origen antropogénico. Esta conclusión se hace más evidente dado que ya se sabe o es común encontrar Cu, Zn, Pb y Cd en suelos agrícolas. También se citan en la Tabla 4.7.3 a los siguientes investigadores:

Tabla 4.7.3: Mención de autores por Cheraghi et al. (2011) sobre trabajos de contaminación de suelos por el uso de fertilizantes

| Autores | Lugar | Hallazgos reportados |
|--------------------------------------|------------------------------|--|
| (i) Ju et al. (2007) | Provincia de Shandong, China | Encontraron elevadas concentraciones de Cd en suelos por el uso de fertilizantes |
| (ii) Carnelo et al. (1997) | Argentina | Por la aplicación de fertilizantes fosfáticos inorgánicos convencionales (provenientes de fosfatos sedimentarios), contaminación en suelos con Cd, Cr, Cu, Zn, Ni y Pb |
| (iii) Nicholson et al. (2003) | Inglaterra y Gales | Indican la presencia de metales pesados por uso de fertilizantes en suelos agrícolas, particularmente Zn, Cu y Cd. |

Considerando todas estas observaciones y estudios, hay que prestar mayor atención a la posible acumulación de metales pesados en aquellos cultivos que pueden ser sensibles a concentrar ciertos elementos, que pueden poner en riesgo la salud humana y de ecosistemas naturales.

4.8 Herramientas de ecología industrial y ciclo biogeoquímico del fósforo

Para completar la correlación y la comprensión en la búsqueda del mejoramiento en la toma de decisiones, el análisis siguiente será con una herramienta relativamente emergente como la ecología industrial.

El uso de herramientas de análisis nos permite la identificación de los problemas y el mejoramiento/pronta acción de las decisiones industriales. La ecología industrial (Anexo E) propone mirar o determinar el “metabolismo industrial”, incluyendo el esquema del ciclo de vida del producto, en este caso la producción de fosfatos para fertilizantes.

Este instrumento permite separarse del sistema y hacer análisis que están desde el inicio hasta el uso final y disposición de residuos. La comprensión de los procesos naturales de formación y génesis permitirían, mediante el uso, empleo y adaptación de métodos de análisis dentro de la ecología industrial, en la toma de decisiones en el ámbito industrial-minero-social-ambiental.

Para comprender el metabolismo industrial, debemos comenzar por entender en qué consiste el ciclo natural del fósforo (Anexo D), como observamos en la figura 4.8.1.

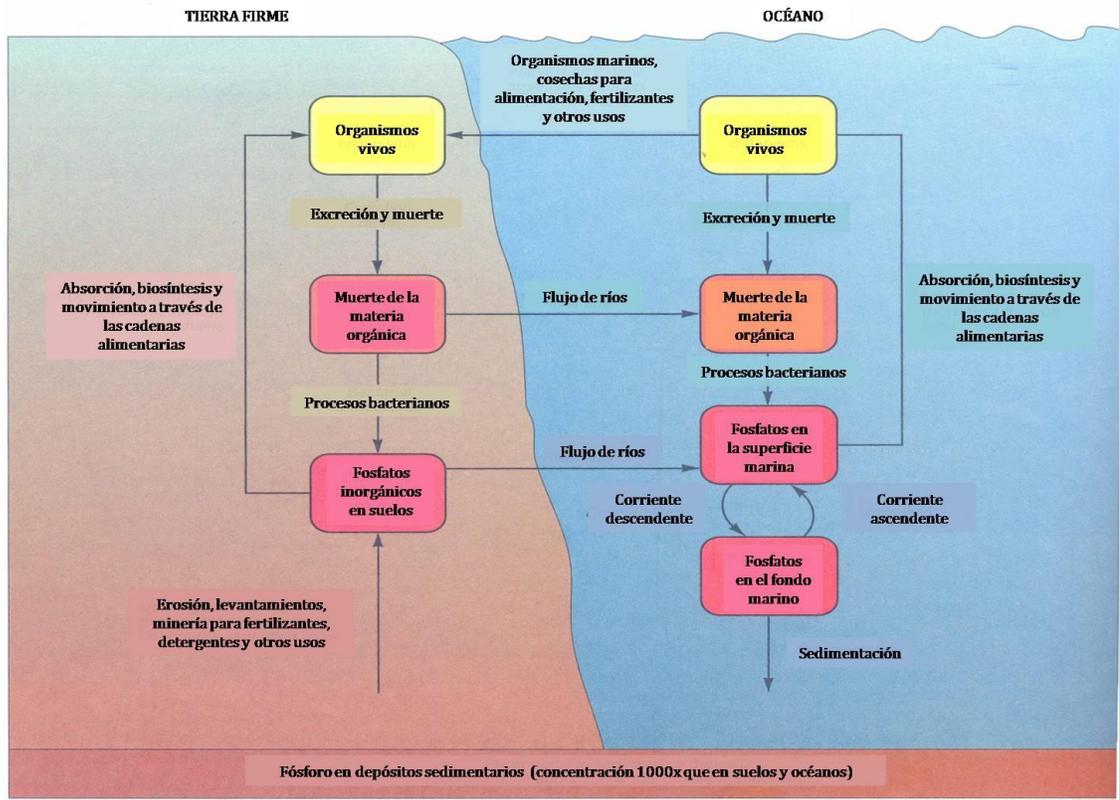


Figura 4.8.1: Ilustración sobre el ciclo del fósforo en un considerable corto período de tiempo, que incluye las cadenas alimentarias tanto en tierra como en el mar. Las actividades humanas como la minería de fosfatos y el uso de detergentes, son componentes importantes del ciclo actual del fósforo. Tomado de Cunningham y Woodworth (1992).

En función de esto, determinamos el ámbito en qué el conocimiento requerido se encuentra en proceso de toma de decisiones. Vemos la divergencia y a la vez relación de éstos aspectos en la figura 4.8.2.

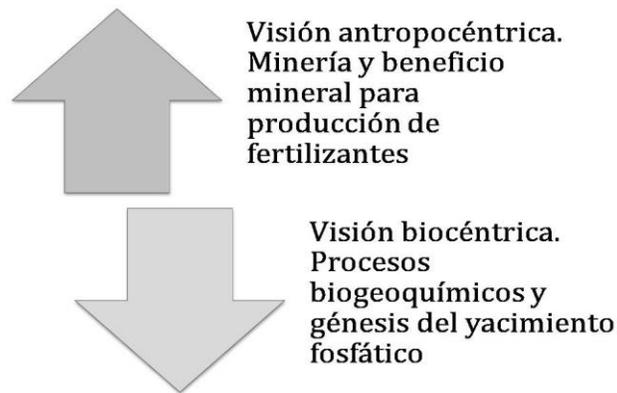


Figura 4.8.2: Diferentes visiones sobre los fosfatos que implican su génesis y uno de sus usos finales. Fuente: elaboración propia.

Se propone el siguiente esquema (figura 4.8.3) para establecer la relación entre el ciclo natural y el ciclo industrial para fosfatos sedimentarios, con miras a la producción de fertilizantes como ácido fosfórico. La principal contribución es la identificación en la gestión del producto (ácido fosfórico-fertilizantes) y la toma de decisiones, en especial la relacionada con la calidad del producto (influencia de la génesis) y la gestión de los residuos, así como su disposición final.

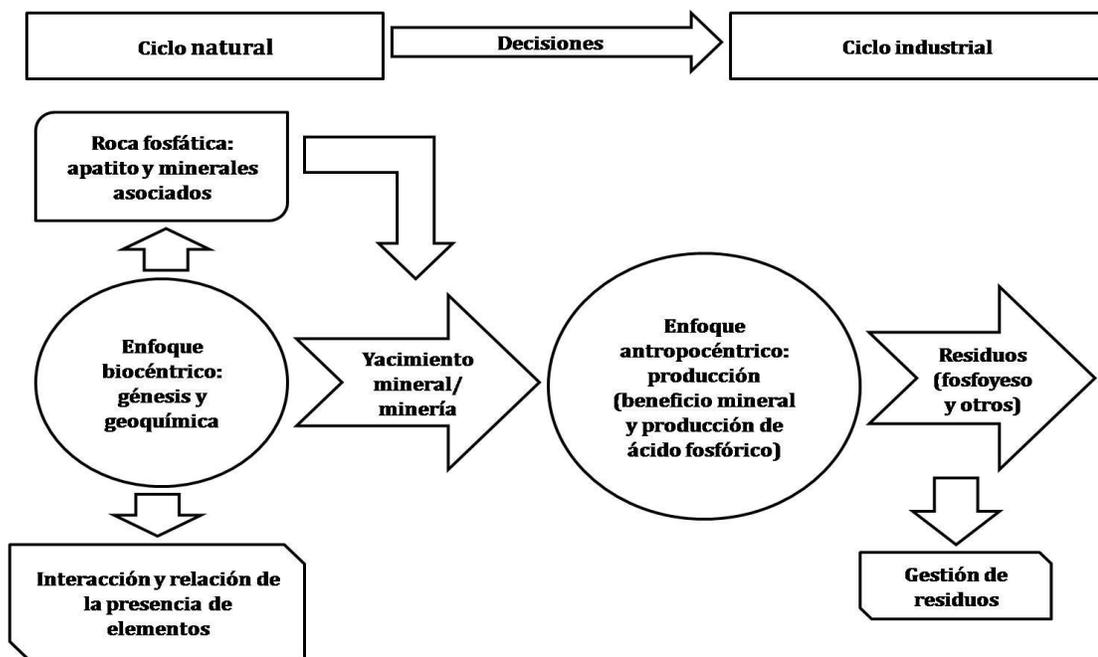


Figura 4.8.3: Ciclos natural e industrial relacionados por el enfoque de ecología industrial. Fuente: elaboración propia.

4.9 Reflexión final

Aunque los aspectos geológicos y minero-metalúrgicos se consideran importantes en el desarrollo y éxito de explotaciones mineras, son pocas las ocasiones en que ambas se puedan considerar interrelacionadas. Esto ha traído como consecuencia que aspectos que parecieran obvios aciertos en las metodologías de extracción, no den los resultados esperados. Es obvia la falta de “comunicación” entre disciplinas que pueden traducirse en esfuerzos innecesarios que conllevan al desembolso de inversiones no consideradas en un principio.

Se ha demostrado a lo largo de esta investigación, cómo el conocimiento solo de la geología pareciera no aportar elementos tangibles para la toma de decisiones, cuestión errada, considerando que aspectos genéticos, condiciones lugar de depositación y pueden dar como consecuencia distintas variaciones del producto final. En lenguaje “terrenal” minero es, conocer qué es lo que hace diferente una roca fosfática de otra y cómo este hecho que, pareciera en un principio irrelevante o poco importante, se puede convertir en trascendental y puede causar cambios en las decisiones y en la vida de quienes hacen uso de estos productos minerales, así como todo lo que se encuentra aguas abajo, incluyendo el ambiente y sus relaciones.

Esto es posible leerlo en los trabajos sobre las posibles acumulaciones de metales pesados en suelos agrícolas, cuestión que pareciera empeorar debido a las prácticas de agricultura intensiva a nivel mundial, la cual utiliza fertilizantes de fosfatos de diversos orígenes. El problema no reside en la mayor producción de alimentos debido “a una población creciente”, sino en el uso indiscriminado sin la medición debida de los efectos, aunado por el hecho de “no haber tiempo” a consecuencia del ritmo en que ocurre todo junto.

La principal conclusión de este trabajo es que, sí existen relaciones suficientes desde el conocimiento geológico para la toma de decisiones mineras. Es aconsejable que el profesional de minería pueda tener adecuados conocimientos geológicos que le permitan discernir de manera crítica y lo más objetivo posible aquellos que puedan ser claves de éxito o fracaso en el proyecto minero, en especial el caso de estudio sobre fosfatos. La principal relación encontrada en este estudio es la estrecha relación entre los elementos presentes en la roca fosfática y su génesis (la cual puede considerarse como compleja), y cómo éstos tienen influencia directa en el producto final, su preparación y beneficio, incluidos los residuos generados por su producción.

La identificación temprana de las variables internas o intrínsecas de riesgo, que causan incertidumbre, es una medida estratégica desde cualquier punto de vista. Sin embargo, la caracterización certera depende del mayor conocimiento geológico. El grado en el cual se encuentre este conocimiento, por tanto, determina y limita la etapa de planificación (estudio conceptual, prefactibilidad o factibilidad) en que nos encontramos. Pretender que con poco conocimiento geológico es posible hacer un estudio de factibilidad, es agregar incertidumbre innecesaria a la futura extracción minera. Hacer frente a variables identificadas, es seguramente más fácil que tratar de solucionar algo que pareció surgir de la “casualidad”. No es acertado dejar los procesos mineros al “azar”, por eso en este estudio se considera de importancia el conocimiento geológico como una de las tantas herramientas para la identificación de variables internas (ver Anexo A) que aportan riesgo e incertidumbre en proyectos mineros.

Como se vio en el desarrollo, las distintas variables identificadas a partir de la geología y luego del mismo proceso de beneficio mineral, permiten estimar el grado de incertidumbre y riesgo que representan. La toma de decisiones va a variar con esa calificación y la determinación de aquellas variables que son

controlables y las que no lo son. Lo más saludable es concentrarse en las que sí se pueden controlar de alguna manera y estar alerta con las que no lo permiten.

Dado que cada extracción mineral es diferente, es tarea casi “imposible” describir una metodología que sea aplicable a más de un caso, es una pretensión ambiciosa. Cada caso debe ser tratado de manera particular y con criterios serios si lo que se quiere es garantizar su éxito y supervivencia. Es necesario aclarar que el conocimiento geológico sobre el cual se ha estado explicando en estas líneas no es suficiente para tomar todas las decisiones necesarias para llevar a cabo una explotación minera, en donde la comprensión acerca del comportamiento del mercado, usos, legislación, formas de financiamiento, sinceramiento del tiempo de maduración del proyecto, presupuestos, requerimientos de personal, entre otros, son sin duda factores tan determinantes como los que se han tratado en este trabajo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La teoría de Kazakov (1938) sobre la influencia de las corrientes ascendentes en la formación de fosfatos sedimentarios marinos, es todavía aceptada y se ha comprobado en parte este mecanismo en zonas de estudio, en la actualidad en Perú y Namibia.
- La presencia de uranio es un indicador para distinguir depósitos primarios de los secundarios. La génesis puede ofrecer información e indicadores sobre las condiciones de depositación y también sobre el enriquecimiento de algunos elementos característicos, de uno u otro (como metales pesados, metaloides y radionúclidos). Esto puede ser un factor importante al tomar medidas, si hay enriquecimiento de elementos que pueden limitar el uso del producto o al almacenar los desechos/residuos y efectuar las respectivas recuperaciones ambientales.
- Dado que las fosforitas sedimentarias tienen sus propias características particulares donde la asociación fosfato-*cherts*-sedimentos orgánicos es distintiva de éstas, es necesario establecer el método de concentración mineral se deben conocer las proporciones de estos y algunos elementos asociados (que dependen de la química marina).
- Se ha demostrado en múltiples estudios, a lo largo del tiempo, que los granos en las fosforitas sedimentarias son en buena parte tamaño arena (apatito como oolitos y pisolitos). Esto puede tener influencia al momento de calcular la energía necesaria para garantizar la calidad de la liberación, lo cual repercute directamente en el éxito de la recuperación del mineral de interés; en este caso hay que considerar además la matriz.
- La metodología de procesamiento mineral puede variar debido a la consolidación de la roca fosfática. Esto tiene influencia en el producto final, antes de ser llevado a la etapa de concentración. El método de beneficio mineral depende del uso final del producto.
- Entre los elementos que pueden ser problemáticos: el magnesio puede causar errores en los cálculos de concentración, pues afecta la reacción (cuando se realiza con ácido sulfúrico). En el caso del cuarzo, es debido a que en algunos grados de la molienda el comportamiento de éste y el apatito son similares y pueden causar problemas durante la concentración, por lo cual puede resultar necesario proceder con una flotación inversa para poder extraer el cuarzo. El contenido de otros metales, metaloides y radionúclidos que dependen de la génesis de formación, pueden tener dos (2) influencias sobre el proceso de fosfatos.
- Con respecto a lo anterior esas influencias son:

- Primero es la limitación en el uso del producto final; los contenidos de Cd, Pb, Mo, V y otros son algunas de éstas, sobre todo en su empleo como fertilizantes en suelos y agricultura extensiva, así como su posible acumulación en ciertas especies vegetales.
- La segunda razón está en la disposición de los residuos y construcción de escombreras: dado que la presencia de metales pesados, metaloides y radionúclidos, en la roca fosfática sin interés comercial (poco contenido de fósforo) y en el fosfoyeso, pueden causar contaminación por lixiviados, sólidos en suspensión, polvos o gases, que pueden afectar al ambiente, ecosistemas y salud humana. Hay que agregar a este segundo aspecto, aquellos compuestos utilizados en la flotación que quedan en los lodos (relave) o ganga.
- El cuarzo (en forma de *chert*), que se encuentra en los fosfatos sedimentarios marinos, no está relacionado con la sedimentación clástica, pues ésta puede ser muy poca, sino que es debida a otros organismos, también presentes en la fauna marina con esqueletos silíceos.
- Para que un proyecto minero pueda tener éxito debe identificar las variables que aportan riesgo e incertidumbre, entre ellas las vinculadas con la geología y procesos mineros, entre ellos el beneficio mineral. Dado que muchas de las variables del proceso de beneficio dependen del conocimiento geológico, para el caso de los fosfatos sedimentarios son muy importantes.
- Debido a que los metales pesados pueden estar presentes, en forma natural o introducida en suelos por actividades antropogénicas, es necesario conocer las condiciones antes y después de la aplicación del método (experimental) y de la actividad. Las formas antropogénicas de introducir los metales pesados en el ambiente, incluyen la extracción y procesamiento de minerales, en especial de roca fosfática, procesamiento industrial, escombreras y relaves, así como la aplicación de fertilizantes de fosfatos a los suelos.
- Las herramientas complementarias de análisis y la toma de decisiones:
 - Espina de Pescado: considerar en el beneficio mineral lo siguiente: contenido de cuarzo, concentración y presencia de elementos entre los más destacados uranio y cesio, lixiviados y aguas de proceso, así como la calidad de la liberación.
 - Una de las ventajas de la aplicación del Diagrama del Ciclo de Vida para las operaciones unitarias en minería de fosfatos, es que podemos una vez identificada la cadena productiva, establecer las entradas o inputs y las salidas u outputs. Con esta información podemos reunir datos acerca de las afectaciones y los ámbitos, así como tomar

decisiones para su mitigación y control durante la vida de la mina, con miras al Cierre de Mina.

- Al tener todas las posibles variables que afecten a la operación unitaria, en este caso aquellas que involucran el beneficio mineral, se pueden clasificar en observables, no observables, controlables y no controlables; todo esto con miras a resumir la información recolectada con miras a la gestión integral y sustentable de la explotación. La misma permite tomar decisiones de cuáles son las variables a las que podemos medir y aplicar medidas mitigantes. Todas las constantes que se consideran son las relacionadas con el beneficio mineral de fosfatos marinos sedimentarios.
- Las variables identificadas tienen como fin permitir a los niveles gerenciales la toma de decisiones, así como las medidas necesarias en los escenarios visualizados.
- Es de gran importancia la elaboración del modelo geológico como insumo de los estudios de viabilidad del proyecto que siguen luego de las fases conceptuales y exploratorias. El modelo geológico será de gran importancia porque está implicado en la posibilidad de manejar otras variables relacionadas con la explotación minera.
- Las herramientas de la ecología industrial, permiten establecer de manera simplificada las áreas dentro del ciclo de vida de una industria las relaciones con sus insumos y salidas. En este caso de estudio, fue útil al incorporar al ciclo biogeoquímico del fósforo, el aporte que las actividades humanas hacen al ciclo natural. Es de gran importancia, dado que la herramienta facilita la toma de decisiones en dos ámbitos que son: garantizar la calidad del producto, mediante el cuidado del beneficio mineral y la gestión de los residuos de todos los procesos en especial el de producción del ácido fosfórico, para la fabricación de fertilizantes.

RECOMENDACIONES

- Continuar con más estudios en fosfatos sedimentarios y otras fosforitas para el establecimiento de relaciones entre la geología y las metodologías de beneficio mineral. Se recomienda que se utilicen algunas muestras de yacimientos fosfáticos sedimentarios venezolanos.
- Para reforzar o descartar los argumentos expuestos en esta investigación, se recomienda realizar otros estudios con muestras de otros yacimientos de fosfatos sedimentarios. Esto permite la toma de decisiones con mayores evidencias que puedan asegurar el éxito de la operación minera, desde su inicio hasta su comercialización en el mercado del producto final. Esta idea puede ser incorporada como medida de soberanía nacional al ser incluida en las actividades de exploración con miras a futuras minas.
- Considerar en la evaluación de proyectos mineros de yacimientos mineros de fosfatos sedimentarios, estudios exhaustivos de elementos para elaborar planes de seguimiento y control, no solo del producto sino de los residuos y de su almacenamiento. La elaboración de los propios mapas de riesgos particulares para cada caso de investigación, reviste importancia a la hora de tener elementos que garanticen el éxito y supervivencia de las explotaciones mineras con criterios ambientales.
- Realizar más investigación con respecto al empleo del material de los relaves del proceso minero que contiene fosfatos en las actividades de recuperación de áreas intervenidas y en los procedimientos de cierre de mina, para en especial yacimientos de fosfatos sedimentarios marinos.
- Hay que prestar mayor atención a la posible acumulación de metales pesados en aquellos cultivos que pueden ser sensibles a concentrar ciertos elementos, que pueden poner en riesgo la salud humana y de ecosistemas naturales.
- Se recomienda la consideración de estas variables en los estudios de viabilidad de proyectos mineros de fosfatos sedimentarios, con miras a incorporarlas a la planificación de cierre de mina desde el inicio y contemplar las partidas necesarias y suficientes para la ejecución de las medidas mitigantes y de investigación que correspondan.
- Se recomienda emplear las herramientas de la ecología industrial con un mayor número de muestras, dada la posibilidad de que con las unidades suficientes se pueda llegar a la ingeniería de detalle, en especial para el procesamiento mineral, cuidando la influencia del número de muestras considerada representativa y el tratamiento químico al que hace falta someterlas, para encontrar la información necesaria para una buena gestión.

- La continuación y replicación de esta línea de investigación en otros rubros minerales abre las puertas para la consideración de nuevos estudios como trabajos especiales de grado para pregrado y tesis de maestría para postgrado.
- Se recomienda incluir un estudio en el área geológica, que incluya aquellos relacionados con radionúclidos en fosfatos sedimentarios, como trazadores, que pueden aportar más información sobre la época y condiciones de formación de las fosforitas y su acumulación en las mismas (trazadores). Esta información es de gran importancia pues permite la toma de medidas y decisiones sobre la disposición de los residuos generados.

REFERENCIAS CONSULTADAS

AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES (ATSDR) (1999) **Resumen de Salud Pública, Uranio. CAS# 7440-61-1.** Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Disponible en línea. www.atsdr.cdc.gov/es.

ALTSCHULER, Z.S. (1980) **The Geochemistry of Trace Elements in Marine Phosphorites. Part I. Characteristic abundances and enrichment.** En *Marine Phosphorites – Geochemistry, occurrence, genesis*. Pp. 19-30.

ALTSCHULER, Z.S (1973) **The weathering of phosphates deposits-geochemical and environmental aspects.** In: Griffith EJ, Beeton A, Spencer JM, Mitchell DT (eds) *Environmental Phosphorus handbook*, Wiley, New York, p 33-96.

ARTHUR M.A. y H.C. JENKYN (1981) **Phosphorites and paleoceanography.** *Oceanol Acta, Proc 26th Int Geol Congr, Paris*, p 83-96.

AXELROD S., A. METZAR Y V. ROHRLICH (1980) **The petrography of Israeli Phosphorites as related to their beneficiation.** En *Marine Phosphorites– Geochemistry, occurrence, genesis*. Pp. 153-165.

BANERJEE, D.M. (1971) **Precambrian stromatolitic phosphorite of Udaipur.** *Rajasthan, India, Geol Soc Am Bull* 82:2319-2330.

BATURIN, G.N., KOCHENOV, A.V. Y PETELIN, V.P. (1970) **Phosphorite formation on the shelf of s.w. Africa: Lith. And Min. Res., v.3**, p. 266-276.

BATURIN G.N., MERKULOVA A.V. Y P.I. CHALOV (1972) **Radiometric evidence for recent formation of phosphatic nodules in marine shelf sediments.** *Marine Geol* 13:M37-M41.

BATURIN, G.N. (1982) **Phosphorites on the sea floor: Origin, composition and distribution.** *Developments in Sedimentology* 33, Elsevier, Amsterdam.

BENTOR, Y.K. Editor (1980) **Marine phosphorites: geochemistry, occurrence, genesis.** Society of Economic Paleontologists and Mineralogists SEPM. Special Publication No. 29. Oklahoma, EUA. 249 p.

BENTOR, Y.K. (1980) **Phosphorites-The Unsolved Problems.** En *Marine Phosphorites-Geochemistry, occurrence, genesis*. Pp. 3-18.

BIRCH, G.F. (1980) **A model of penecontemporaneous phosphatization by diagenetic and authigenic mechanisms from the western margin of Southern Africa.** *Soc Econom Paleontol Mineral, Tulsa, Spec Pub* 29:79-100.

BOGGS, S. (1995) **Principles of Sedimentology and Stratigraphy.** Chapter 8: Other Chemical/Biochemical and Carbonaceous Sedimentary Rocks. Pp. 266-275. Prentice Hall. Inc. 2da Edición.

BOURROUILH, F.G. (1980) **Phosphates, sols bauxitiques et karsts dolomitiques du Centre et SW Pacifique Comparisons sédimentologiques.** BRGM, p119-144.

BRAY, J.P., PRESBY, B.J. y TROUP, B.N. (1973) **Phosphate in interstitial water of anoxic sediments: oxidation effects during sampling.** Science, v. 18, p. 1362-1364.

BURNETT, W.C. y H.H. VEEH (1977) **Uranium-series disequilibrium studies on phosphorite nodules from the west coast of S America.** Geochim Cosmochim Acta 41:755-764.

BURNETT, W.C. (1977) **Geochemistry and origin of phosphorites deposits from off Peru and Chile.** Geol Soc Am Bull 88:813-823.

BURNETT, W.C. y P.N. FROELICH editors (1988) **The origin of marine phosphorites: The results of the R. V. Robert D. Conrad Cruise 23-06 to the Peru shelf:** Special Issue of Marine Geology, v.80.

BURNETT, W.C. y S.R. RIGGS editors (1990) **Phosphate deposits of the world.** Volumen 3: Neogene to Modern phosphorites. Cambridge University Press. 464 p.

BUSHINSKI, G.I. (1969) **Old phosphorites of Asia and their genesis.** Israel Progr Sci Transl, Jerusalem, p266.

CHERAGUI, M., B. LORESTANI y H. MERRIKHPOUR (2012) **Investigation of the Effects of Phosphate Fertilizer Application on the Heavy Metal Content in Agricultural Soils with Different Cultivation Patterns.** En Biological Trace Elements Research. Vol. 145, Number 1 (2012), pp. 87-92. Springer link, consulta en línea: <http://link.springer.com/>

CRAIG, G. y E. ROBERT (2003) **Phosphorites.** Encyclopedia of Earth Science. Sedimentology. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Consulta en línea http://rd.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4020-3609-5_156

COOK, P. (1976a) **Sedimentary phosphate deposits.** In: Wolf KH (ed) Handbook of stratabound and stratiform ore deposits. Elsevier, Amsterdam 7:505-535.

COOK, P. (1976b) **Georgina Basin phosphatic province, Queensland and Northern Territory-Regional geology.** In: Knight CL (ed) Economy geology of Australia and Papua New Guinea. Aust Inst Min Met Mon 5(4):245-250.

COOK, P. (1984) **Chapter 7: Spatial and Temporal Controls on the Formation of Phosphate Deposits-A Review.** En Phosphate Minerals. 242-274.

COOK P.J. y M.W. McELHINNY (1979) **A re-evaluation of the spatial and temporal distribution of sedimentary phosphate deposits in the light of plate tectonics.** Econ Geol 74:315-330.

COOK P.J. y J.H. SHERGOLD (1980) **Proterozoic-Cambrian phosphorites of Asia and Australia-a progress report.** In: Sheldon R.P., Burnett W.C. (eds) Fertilizer mineral potencial in Asia and the Pacific. Res Sys Inst, Honolulu, p 207-223.

CUNNINGHAM, W. y B. WOODWORTH (1992) **Environment Science.** Second edition. Wm. C. Brown Publishers. Estados Unidos.

DE AQUINO, A. (2008) **Testes exploratórios de flotação com una amostra fosfática da Navay**. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Brasil. Informe interno (Inédito).

DE KEYSER, F. y P.J. COOK (1972) **Geology of the Middle Cambrian phosphorites and associated sediments of northwestern Queensland**. Bur Min Res Aust Bull 138:79.

DMITREVSKII, B.A., M.A. SHAPKIN, N.N. TERUSHCHENKO y E.B. YAROSH (2008) **Toxicology Problems at Sulfuric Acid Technology of Processing Natural Phosphates at Producing Mineral Fertilizers and Salts for Technological Application**. En Russian Journal of Applied Chemistry. Vol 81, Number 3 (2008), pp. 565-568. Industrial Ecology. Disponible en línea: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1070427208030452?LI=true>

ENCICLOPEDIA OF EARTH SCIENCES SERIES (2003) **Phosphorite**. DOI: 10.1007/978-1-4020-3609-5. Pp. 775-780. Consulta en línea <http://link.springer.com/>

FILIPPELLI, G.M. (2003) **Phosphorus cycle**. En Enciclopedia of Earth Sciences Series. Springer link. DOI:10.1007/978-14020-3609-5. Pp. 780-783.

FISHER A.G. y M.A. ARTHUR (1977) **Secular variations in the pelagic realm**. Soc Econ Paleontol Mineral, Spec Pub 25:19-50.

FUNDACIÓN INSTITUTO DE INGENIERÍA (2009) **Análisis Mineralógico de Muestras de Mineral Fosfático de Navay**. Informe técnico (Inédito).

GOLDBERG E.D. y H.R. PARKER (1960) **Phosphatized wood from the Pacific sea floor**. G.S.A. Bull v.71, p.631-632.

GRAEDEL & ALLENBY (1995) **Industrial Ecology**. Prentice Hall and AT&T, New Jersey.

GRUBER, G. A. (2007) **Chapter 23: Phosphorus and Phosphates**. En Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology. Pp. 1086-1110.

HENSEN, C., M. ZABEL y H. N. SCHULZ (2006) **Chapter 6: Benthic Cycling of Oxygen, Nitrogen and Phosphorus**. En Marine Geochemistry. Pp. 270-240.

HORST, S. Y M. ZABEL editors (2006) Marine Geochemistry. 2da edición revisada. Springer. Alemania. Consulta en línea <http://link.springer.com/>

HOWARD, P.F. (1979) **Phosphates**. Econ Geol 74: 192-194.

HUTCHINSON, G.E. (1950) **The biogeochemistry of vertebrate excretion**. Am Mus Nat Hist Bull 96:554.

ITGE (1997) **Manual de evaluación técnico-económica de proyectos mineros de inversión**. España.

ILYIN, A.V. y G.I. RATNIKOVA (1981) **Primary, bedded, structureless phosphorites of the Khubsugul Basin, Mongolia**. J Sed Petrol 51(4):1215-1222.

- JONES, A.M. (1997) **Environmental Biology**. Chapter 3. Routledge. New York. Pp. 197.
- KENT, J.A. (2007) **Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology**. Volumen II. 11 edition Springer. Consulta en línea: <http://link.springer.com/>
- KOLODNY, Y. (1969) **Are marine phosphorites forming today?** Nature 224:1017-1019.
- KOLODNY, Y. (1980) **The origin of Phosphate deposits in lights of occurrences of Recent sea-floor phosphorites** (extended abstracts). In Marine Phosphorites. SEPM. No. 29
- KOLODNY, Y. (2003) **Phosphorites**. En: Enciclopedia of Paleoclimatology and ancient environments. Earth Science Series. Pp. 775-779. Springer link, consulta en línea <http://link.springer.com/>. DOI: 10.1007/978-14020-3609-5.
- KRAJEWSKI, K.P. (1981) **Phosphate microstromatolites in the High-Tritic Albian limestones in the Polish Tatra Mts**. Bull R'Acad Pol Sci 29(2):175.
- LÓPEZ JIMENO y ADUVIRE (2001) **Apuntes del Curso de Extensión de Conocimientos: Estudios de Viabilidad en Proyectos Mineros**. ETS Ingenieros de Minas de Madrid e Instituto Tecnológico FI-UCV.
- LOTTERMOSER, B. (2007) **Mine Waste Characterization, Treatment and Environment Impacts: Chapter 7 Wastes of Phosphate and Potash Ores**. 2da. Edición. Springer. Berlin. Pp. 245-264.
- MCKELVEY, V.E. (1973) **Abundance and distribution of phosphorus in the lithosphere**. In: Griffith EJ, Beeton A, Spencer JM, Mitchell DT (eds) Environmental Phosphorus handbook, Wiley, New York, p 13-32.
- MÉNDEZ BAAMONDE, J. (2006) **Petrología. Ambientes Sedimentarios**. Facultad de Ciencias, UCV. PDVSA INTEVEP. Venezuela. 363 p.
- MURRAY J. y A.F. RENARD (1891) **Scientific results**, HMS Challenger, Deep Sea Deposits, p 391-400.
- NATHAN, Y. (1984) **The Mineralogy and Geochemistry of Phosphorites**. In: Nriaguand J.O. and P.B. Moore (eds) Phosphate Mineral. Chapter 8. Springer-Velaz, Berlin. P 275-291.
- NEBEL B. J. y R. T. WRIGHT (1999) **Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible**. Sexta edición. Pearson-Prentice Hall. México. Pp. 698.
- NOTHOLT, A.J.G. (1979) **The economic geology and development in igneous phosphate deposits in Europe and the URSS**. Econ Geol 74 (2): 339-350.
- NOTHOLT, A.J. G., R.P. SHELDON y D.F. DAVIDSON eds (1989) **Phosphate deposits of the world**. Volumen 2: Phosphate rock resources. Cambridge University Press. 566 p.

NRIAGU, J.O. y P.B. MOORE editors (1984) **Phosphate minerals**. Springer Verlag. New York, 434 p.

PLAN DE LA PATRIA 2013-2019. Disponible en:
<http://www.oncti.gob.ve/images/pdf/programapatria.pdf>

PRÉVÔT L. y J. LUCAS (1980) **Behavior of some trace elements in phosphatic sedimentary formations**. En Marine Phosphorites – Geochemistry, occurrence, genesis. Pp.31-39.

PIÑA, A. (2010) **Identificación de Indicadores que permitan la gestión minera sustentable de los fosfatos de la Formación Navay, estado Táchira**. Asignatura Investigación Aplicada. Maestría en Ciencias Geológicas. Inédito.

PITMAN W.C. III (1978) **Relationship between eustacy and stratigraphic sequences of passive margins**. Geol Soc Am Bull 89:1389-1403.

RODRIGUEZ, S. E. (1989) **Phosphorite deposits of Venezuela**. En Phosphate deposits of the world, V.2: Phosphate rock resources. Pp.137-146.

SOTKA, P., R. GRAU Y T. KRAVTSOV (2009) **Remarks on sample selection and process development issues of the PEQUIVEN's Navay Phosphate Project in Venezuela**. OUTOTEC. Informe interno (Inédito).

SOUTHGATE, P.N. (1980) **Cambrian stromatolitic phosphorites from the Georgina Basin, Australia**. Nature 285:395-397.

SHELDON, R. (1980) **Episodicity of phosphate deposition and deep ocean circulation- A Hypothesis**. En Marine Phosphorites – Geochemistry, occurrence, génesis. Pp. 239-247.

U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY, USDE (s/f). **8: Phosphates**. En Energy and Environmental Profile of The U. S. Mining Industry. Consulta en línea 11/2012: <http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/mining/pdfs/phosphate.pdf>

VEEH, H.H. (1979) **Uranium-series ages of insular phosphorites**. In Burnett W.C., Sheldon R. P. (eds) Report on the marine phosphatic sediments workshop. Res Syst Inst, Honolulu, p16-17.

YAACOV, N. (1984) **Chapter 8: The Mineralogy and Geochemistry of Phosphorites**. En Phosphate Minerals. Pp.275-291.

WARIN, O.N. (1968) **Deposits of phosphate rock in Oceania**. Miner Res Develop Ser, UN, New York 32:124-132.

ZEGARRA, A. (s/f) **Ecología Industrial. Apuntes de estudio**. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Industrial. Inédito. Disponible en:
<http://es.scribd.com/doc/106389176/Apuntes-Ecologia-Industrial-Para-Convertir-a-PDF>

ANEXOS

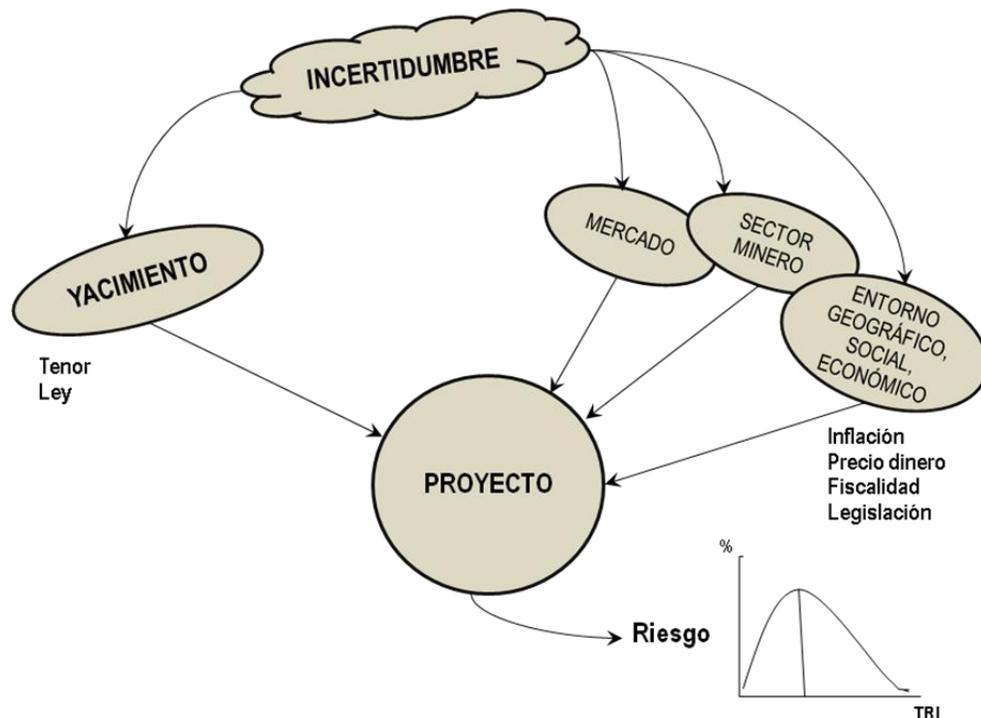
ANEXO A

Variables que aportan riesgo e incertidumbre en proyectos mineros (ITGE, 1997)

El primer paso en el análisis de riesgo de un proyecto minero de inversión consiste en identificar las fuentes de incertidumbre, que son aquellas que intervienen realmente como variables aleatorias. Atendiendo a su origen las variables que aportan riesgo e incertidumbre, se pueden subdividir en tres grupos:

1. Vinculadas al yacimiento.
2. Vinculadas a la operación minera.
3. Vinculadas al mercado y al contexto exterior.

Los dos primeros grupos pueden clasificarse como fuentes internas de incertidumbre y el tercero como una fuente externa. En la figura a continuación, tenemos un esquema simplificado de las cuales son las variables que aportan incertidumbre al desarrollo de proyectos mineros y en el que vemos su incidencia en el mismo.



Fuentes de incertidumbre de un proyecto minero. Tomado de ITGE (1997)

Variables vinculadas al yacimiento

Entre las variables ligadas al yacimiento que aportan incertidumbre se encuentran:

1. Los recursos totales y las reservas explotables.
2. Las leyes o calidades de los minerales a beneficiar.
3. Las características mineralógicas de la roca fosfática.
4. La disposición y variabilidad espacial de las masas mineralizadas.

5. Las propiedades geomecánicas e hidrogeológicas de los macizos rocosos, entre otros.

La cantidad de reservas explotables condiciona la vida de las minas y las capacidades de extracción. Las leyes de los minerales y sus características mineralúrgicas, son claves en la consecución de los ingresos previstos. Estos intervienen directamente en las fórmulas de valoración de los productos a comercializar. La morfología del yacimiento y las irregularidades de este influyen sobre el diseño e infraestructura, sistema de arranque, grado de aprovechamiento de los recursos, dilución, entre otro. Las características geomecánicas e hidrogeológicas influyen en el diseño geométrico de las minas, costos de explotación, drenaje, entre otros. El riesgo natural o de fuerza mayor, las podemos identificar en aquellas zonas de intensa actividad sísmica, de frecuentes inundaciones, avalanchas, volcanes, entre otros.

Variables vinculadas a la operación minera

Entre las variables relacionadas con la explotación minera se mencionan:

1. Fases de construcción y puesta en marcha: dependen de la fecha de comienzo de la producción. Constituyen una etapa crítica y un factor de riesgo muy importante, ya que marcan la fecha de comienzo de la producción y, por consiguiente, el momento en que se generan los ingresos previstos en el proyecto.
2. Plazos de maduración, los cuales son siempre superiores a los cinco (5) o diez (10) años, dichos plazos son mucho más dilatados que en otras industrias los cuales aumentan los riesgos por los cambios en las condiciones de mercado, tendencias de consumo, alternativas de sustitución, entre otras.
3. Operaciones mineras. Caracterizada por la rigidez la cual es incomparablemente mayor que en otras actividades industriales y es superior en minería subterránea que a cielo abierto.
4. Mano de obra. La necesidad y requerimientos de mano de obra especializada y disponible en sitios geográficamente aislados o lejanos, aunado a si esta se encuentra sometida a una mayor probabilidad de accidentes por las condiciones en que se llevan a cabo los trabajos.
5. Riesgo tecnológico, deriva del hecho de que no hay dos yacimientos iguales, cada operación precisa equipos y sistemas que tienen que tantearse y probarse, con la cual se inicia una cadena de actividades con un grado de acierto final difícil de predecir.

Variables vinculadas al mercado y al contexto exterior

Entre las variables que pueden hacer más vulnerable la estabilidad económica de un proyecto minero:

1. Cotización de las materias primas. Es sin duda la materia prima la que puede hacer más vulnerable, la estabilidad económica de un proyecto minero. La mayoría de las materias primas minerales presentan evoluciones de los precios extremadamente irregulares, con fuertes altibajos que repercuten negativamente en la marcha económica de cualquier empresa.
2. Financiamiento del proyecto. La industria minera se caracteriza por su elevada intensidad de capital, debido a las mayores dimensiones de los proyectos como consecuencia del agotamiento progresivo de los yacimientos ricos, pues se hace necesario ir a mayores ritmos de producción para aprovechar el efecto de economías de escala y disminuir los costos de explotación; al desarrollo de minas en

áreas inaccesibles o remotas que requieren la construcción de un gran número de obras de infraestructura; a la complejidad de las instalaciones mineras y mineralúrgicas para el beneficio de minerales cada vez más difíciles; al mayor grado de mecanización con vistas a reducir los costos de extracción, entre otros.

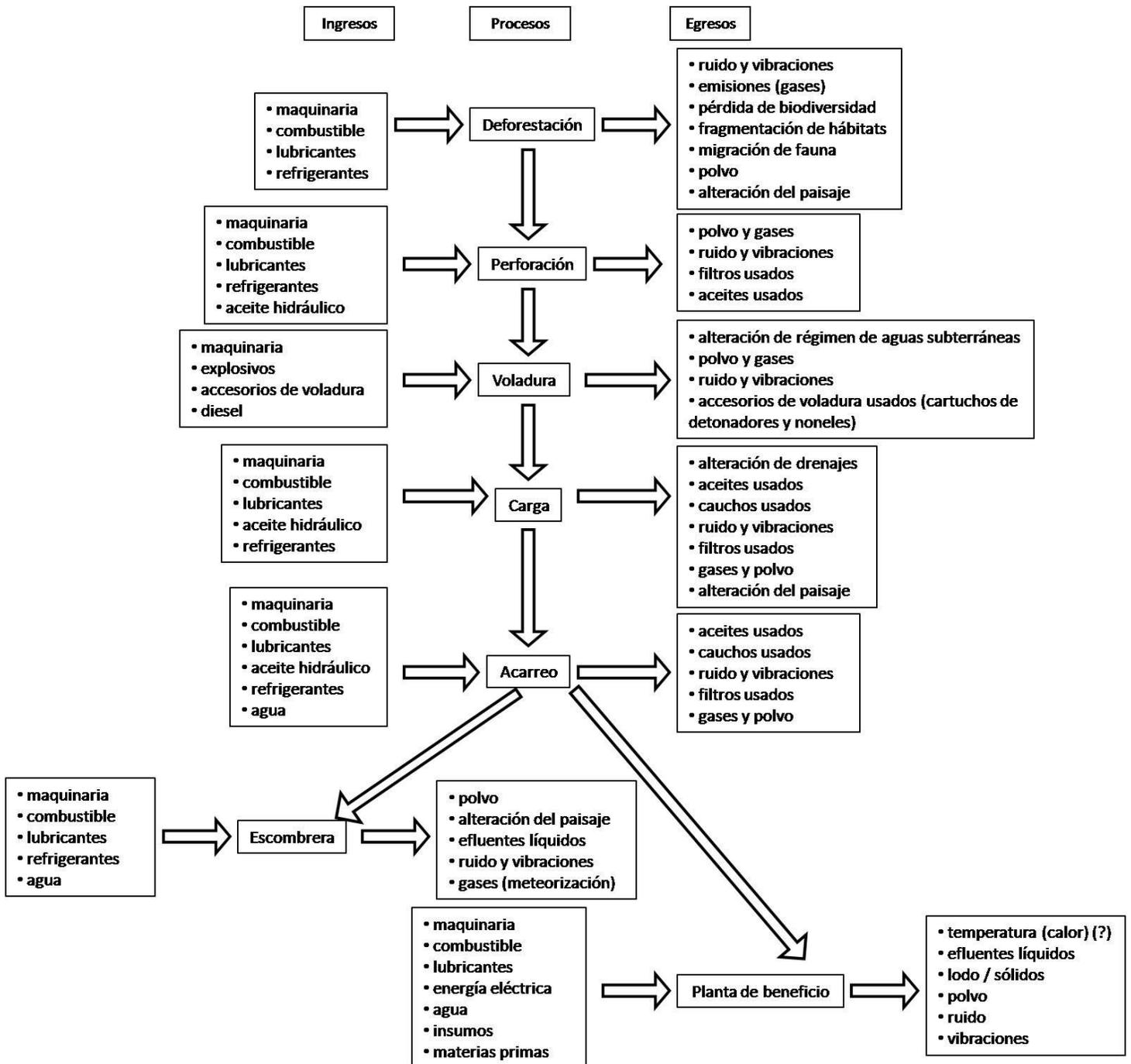
El hecho de tener que acudir a los mercados financieros exteriores para obtener los recursos económicos necesarios, superiores en algunos casos al 50% de la inversión total, introduce una componente de riesgo debido a las variaciones en la cotización del tipo de cambio.

También, es de destacar que en algunos proyectos intervienen divisas diferentes para la adquisición de equipos, venta de productos obtenidos, entre otros, y que por lo tanto es preciso contemplar las correspondientes partidas monetarias.

3. Régimen fiscal minero: corresponde a las clases de impuestos e incentivos. Constituye otro factor de riesgo, ya que se utiliza por algunos gobiernos para incentivar e influir en el comportamiento de las compañías mineras. Las clases de impuestos son muy variadas y su aplicación no siempre está sometida a un esquema rígido, sobre todo si se tiene en cuenta la posibilidad de algún cambio durante los períodos productivos y de actividad económica de las minas.
4. Inflación. Es importante considerar la inflación de un país (generalmente el país donde se realiza la explotación). Si hay participación de varios países, se estudian los efectos de los desequilibrios inflacionarios (sobre todo si se compran materiales y equipos en esos países). La inflación es un fenómeno al que la industria minera no ha escapado y que su incorporación al análisis de los proyectos puede llegar a dificultar la realización de los mismos.
5. Factores políticos. Pueden inducir efectos impredecibles sobre la industria minera y condicionar, por tanto, el desarrollo de nuevos proyectos o la marcha de los ya iniciados, especialmente cuando las inversiones se realizan fuera del país de la empresa promotora. Entre algunos de los factores políticos destacados podemos mencionar:
 - a. Estabilidad o régimen del partido en el poder.
 - b. Situación laboral y política salarial en el país.
 - c. Relaciones internacionales con otros países.
 - d. Limitaciones en la participación de capital extranjero.
 - e. Nacionalizaciones en sectores básicos.
 - f. Requerimientos en el uso de productos nacionales o locales.
 - g. Aplicación de medidas ambientales restrictivas.
 - h. Discriminaciones fiscales.
 - i. Restricciones en la aceptación de capital o beneficios.
 - j. Entre otros.

ANEXO B

Figura 11. Piña (2010)



ANEXO C

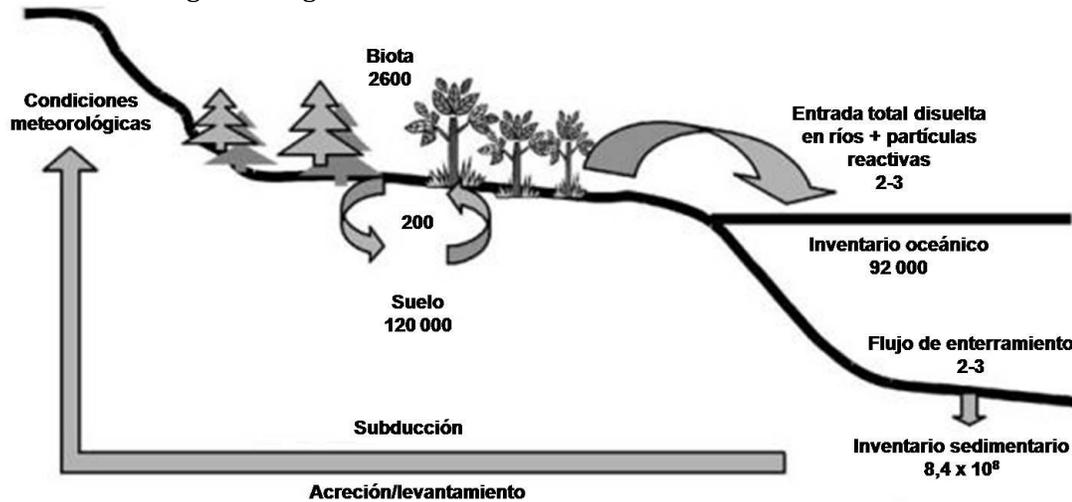
Legislación Venezolana Vigente

- i. **Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.** Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 36.860 del 30 de diciembre de 1999.
- ii. **Decreto con Rango y Fuerza de Ley de Minas** y su Reglamento. Decreto No. 295. 5 de septiembre de 1999.
- iii. **Ley Orgánica sobre Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo.** Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 38.236. 26 de julio de 2005.
- iv. **Ley Penal del Ambiente.** Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 39.913. 02 de mayo de 2012.
- v. **Ley Aprobatoria del Convenio de Diversidad Biológica.** Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4780 Extraordinario del 12 de septiembre de 1994.
- vi. **Ley de Diversidad Biológica.** Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 5468 Extraordinario del 24 de mayo de 2000.
- vii. **Ley No. 55 sobre Sustancias, materiales y desechos peligrosos.** Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 5554 Extraordinario del 13 de noviembre de 2001.
- viii. **Ley de Residuos y Desechos Sólidos.** Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No. 38068 de fecha 18 de noviembre de 2004.
- ix. **Decreto No. 2219 de fecha 23 de abril de 1992, por la cual se dictan las Normas para regular la afectación de los recursos naturales renovables asociada con la explotación y extracción de minerales.** Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4418 Extraordinario del 27 de abril de 1992.
- x. **Decreto No. 2226 de fecha 23 de abril de 1992, por el cual se dictan las Normas Ambientales para la Apertura de Picas y Construcción de Vías de Acceso.** Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4418 Extraordinario del 27 de abril de 1992.
- xi. **Decreto No. 638 de fecha 26 de abril de 1995, por el cual se dictan las Normas sobre Calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosférica.** Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4899 Extraordinario del 19 de mayo de 1995.
- xii. **Decreto No. 883 de fecha 11 de octubre de 1995, por el cual se dictan las Normas de Clasificación y Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos.** Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 5021 Extraordinario del 18 de diciembre de 1995.
- xiii. **Decreto No. 2673, por el cual se dictan las Normas sobre Emisiones de Fuentes Móviles.** Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 36532 del 04 de septiembre de 1998.

ANEXO D

Ciclo del fósforo

Filipelli (2003) expresa en su artículo que el fósforo (P) es un nutriente limitante en la productividad biológica, que tiene una especial importancia en los ecosistemas terrestres. Dado que la actividad humana ha incrementado la disponibilidad de P, sólo se pueden deducir cómo habrán sido los “balances de masa pre-antrópica” cómo se muestra en la siguiente figura.



El ciclo natural pre-antrópico del fósforo. Se muestran los reservorios en Tg ($Tg=10^{12}g$) y los flujos con flechas ($Tg P \text{ año}^{-1}$) en el balance de masa de P. Tomado de Filipelli (2003) Figura P60.

La erosión del suelo y el eventual transporte de las partículas al mar es la que se considera la principal fuente de P que se acumulan en los océanos. La forma de transferencia fluvial ocurre de dos maneras: particulado y disolución.

En el subsistema marino, el P también actúa como un nutriente limitante a la productividad biológica. Las concentraciones en la superficie son casi cero la mayor parte de los casos estudiados, ya que este elemento es absorbido por el fitoplancton como componente vital de su foto-sistema (formación del ATP y ADP) y sus células (paredes celulares compuestas por fosfolípidos). El P disuelto tiene el perfil de agotamiento en superficie y enriquecimiento profundo, y aumenta con la edad del agua en el fondo.

Jones (1997) explica que el ciclo del fósforo es mucho más rápido en organismos marinos que en aquellos terrestres. La transferencia de P terrestre al mar ocurre por transporte en drenajes que son continuos, mientras que la transferencia de medios acuáticos a sistemas terrestres es relativamente limitada, siendo la forma en que pasa por medio de acumulación de heces de aves marinas (guano) sobre el suelo expuesto. Sin embargo, en la actualidad las fuentes antropogénicas debidas a aguas servidas (cloacas y aguas industriales) y el uso indiscriminado de fertilizantes ha perturbado el ciclo natural de fósforo (eutrofización cultural), teniéndose como consecuencia cambios

significativos en la producción y contenido de especies en sistemas marinos particularmente afectados.

Nebel y Wright (1999) explican que el fósforo se encuentra en varios minerales de las rocas y los suelos en la forma del ion inorgánico fosfato (PO_4^{3-}). El fosfato se disuelve en el agua, pero no pasa al aire (no tiene fase gaseosa). Las plantas los absorben del suelo o de alguna solución acuosa y lo enlazan en compuestos orgánicos, recibiendo el nombre de fosfato orgánico.

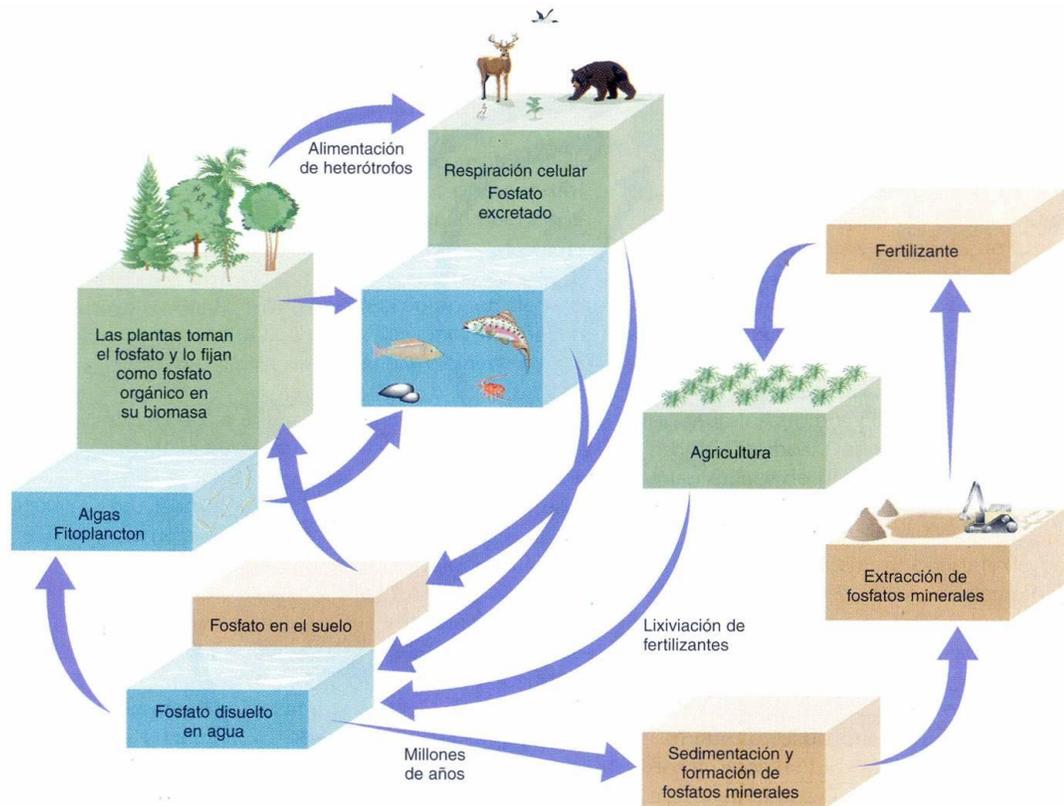


FIGURA 3-15
El ciclo del fósforo.

Ciclo del fósforo. Tomado de: Nebel y Wright (1999), figura 3-15.

ANEXO E

Ecología industrial²⁵

Zegarra (s/f) explica que el concepto de Ecología Industrial surge de la percepción de que la actividad humana está causando cambios inaceptables en los sistemas básicos de soporte ambiental.

Lule y Cervantes (2010) explican que existen diversas definiciones de Ecología Industrial dependiendo del área de estudio:

1. Es un producto de la evolución de los paradigmas sobre manejo ambiental y de la integración de nociones de sostenibilidad en los sistemas económicos y ambientales, en los cuales los procesos productivos son concebidos como parte integral del ecosistema (Considine, 1998).
2. Es un área de conocimiento que busca que los sistemas industriales tengan un comportamiento similar al de los ecosistemas naturales, transformando el modelo lineal de los sistemas productivos en un modelo cíclico, impulsando las interacciones entre economía, ambiente y sociedad e incrementando la eficiencia de los procesos industriales (Lule y Cervantes, 2010).
3. La ecología Industrial según Capuz es un paradigma para lograr el desarrollo sostenible, definiéndola como “una estructura económica y física y una actitud de los agentes implicados en la sociedad industrial tal que se consigue un equilibrio sostenido con la biósfera” (Capuz, 2003).
4. La ecología industrial es un nuevo enfoque del diseño industrial de productos y procesos, así como de la definición de estrategias de manufactura sostenible. Es un concepto en el que un sistema industrial no se ve en forma aislada de los sistemas que lo rodean, sino en concierto con ellos (Medellín, 1999).

Por tanto, la Ecología Industrial se basa en el análisis de sistemas, intentando que un sistema industrial (por ejemplo una fábrica que tiene ingresos y salidas de materiales) imite a un sistema natural (ecosistema natural) en el cual no existen residuos porque la naturaleza recicla todos sus desechos. Se puede decir que la Ecología Industrial se enfoca en las relaciones y flujos de los materiales hacia y desde el ecosistema medioambiental. Buscando optimizar el ciclo total de materiales: desde la materia prima virgen y el residuo no reutilizable, migrando hacia el material procesado, el componente, el producto y el residuo reciclable.

La ecología Industrial busca reducir el consumo de materia prima y energía (ingresos al sistema industrial) interrelacionándose con otras industrias, de tal forma que la biosfera sea capaz de reemplazarlos, y que las emisiones de residuos se reduzcan hasta unos valores tales que la biosfera pueda asimilarlos.

²⁵ Todas las referencias son de Zegarra (s/f)