

La importancia del vanadio, y Venezuela como posible productor ¹

Por Simón E. Rodríguez ²

I N T R O D U C C I O N

Actualmente el vanadio está jugando uno de los principales papeles en la tecnología moderna, especialmente en el campo de la industria siderúrgica. Las fuentes primarias de este preciado metal, relativamente son pequeñas, aún cuando el vanadio es uno de los más abundantes elementos de la corteza terrestre. Tan sólo los Estados Unidos, la República de Sur Africa y quizás Finlandia, cuentan con buenas reservas de este mineral. En cuanto a los países comunistas, se cree que la Unión Soviética cuenta con buenas reservas de vanadio, especialmente en la zona de los Urales, pero se desconocen sus caracteres y su potencialidad. Venezuela no cuenta con yacimientos primarios, o por lo menos no se han descubiertos hasta la fecha depósitos de importancia, ni asociados con las providencias metalogénicas de plomo y zinc (Sucre y Mérida), ni con las provincias fosfato-radioactivas (Táchira y Falcón). Pero no se descarta la posibilidad de ocurrencias de vanadio en la Guayana venezolana, especialmente en aquellas zonas donde los

¹ Manuscrito recibido en Julio de 1967.

² Geólogo de la Dir. de Geología del M.M.H. Actualmente haciendo estudios de post-grado en Queen's University, Kingston, Canadá.

fenómenos hidrotermales han sido activos, y en esencial en las zonas de enriquecimiento de plomo y zinc. Pero, y aquí es donde descansa la importancia de nuestro país, el alto porcentaje de vanadio en algunos petróleos venezolanos, han hecho de Venezuela, en forma indirecta un importantísimo productor de este metal, tanto durante la segunda guerra mundial como en la actualidad. Por ejemplo, Canadá, en un futuro cercano, producirá más de 2.000 toneladas largas de concentrado de vanadio, por año, a partir de petróleos venezolanos, lo cual es muy alto, si tomamos en cuenta que la producción mundial de vanadio para 1966 fue de sólo 8.700 toneladas largas de concentrado de vanadio. Estas cifras dan una clara idea de la importancia del petróleo venezolano en la producción de este preciado metal.

EL VANADIO

Este metal fue descubierto en Méjico, en el año de 1801, por M. del Río, profesor de mineralogía de la Escuela de Minas de Ciudad de Méjico. Del Río notó que cierto mineral que acompañaba algunas menas de plomo del Estado de Hidalgo, se transformaba en sales rojas cuando se le suministraba calor. El llamó a ese mineral "erythronio". Posteriormente en 1930 Sefström encontró un mineral desconocido asociado con ciertas menas de hierro de Taberg, Suecia, él nombró a este mineral Vanadio, por Vanadis, una de las deidades de la región escandinava. Este metal fue mostrado ser idéntico al encontrado por Del Río en 1801, y Wöhler probó que el mineral mejicano era un vanadato de plomo, posiblemente Vanadinita.

Los minerales de Vanadio.—Los principales minerales de vanadio, y que por lo general constituyen menas de este metal, son, por orden de abundancia: patronita, roscoelita, carnotita y vanadinita. Patronita es un sulfuro de vanadio. Al principio este nombre fue usado para designar una mezcla de sustancias ricas en vanadio, y que formaban varias capas junto con yacimientos de asfalto, cerca del Cerro de Pasco, Perú. Posteriores análisis demostraron que el principal mineral tenía como

fórmula VS_4 , y fue nombrado patronita, por su descubridor, Antenor Rizo-Patron. De manera que casi todos los yacimientos de patronita en el mundo actual están asociadas, o bien con sustancias carbonosas, o bien con depósitos de asfalto.

Roscoelita es un silicato de vanadio, muy parecido a la mica muscovita en sus propiedades físicas. En realidad la fórmula es muy parecida, y el vanadio está sustituyendo al aluminio. Carnotita es un uro-vanadato de potasio, y el cual es minado principalmente por su contenido de uranio, pero es una gran mena de vanadio, especialmente en el centro de los Estados Unidos, donde este metal es obtenido como sub-producto. Vanadinita es un cloro-vanadato de plomo, y constituye buena mena de vanadio en algunos países, tales como Méjico y Sur-Africa.

Otros minerales, que han sido o están siendo explotados como menas de vanadio son: Yuyamunita, un uro-vanadato de calcio, a veces asociado con carnotita, como sucede en las zonas del Colorado, Estados Unidos. Descloizita, un vanadato de plomo y zinc; cuprodescloizita y dechenita, ambos vanadatos hidratados de plomo y zinc; mottramita, chileíta, y psittacinita, vanadatos de plomo y cobre. Como se puede notar fácilmente el vanadio tiene una gran tendencia a formar sales con los metales básicos, especialmente con plomo y cobre. De aquí, que sea un metal bastante común en los yacimientos secundarios de plomo-zinc-cobre.

Además de esa serie compleja de sales, el vanadio a veces forma asociaciones con otros metales, como sucede con la pucherita, vanadato hidratado de bismuto; hewettita, pascoíta, fernandinita, todos vanadatos hidratados complejos de calcio. Y posiblemente originados a partir de minerales primario de vanadio, como la patronita.

Ocurrencias del vanadio.—Por largo tiempo se pensó que el vanadio era uno de los metales raros encontrados en la corteza terrestre, pero recientemente se ha comprobado que este metal es muy común en muchas rocas, y aún en las cenizas vegetales, carbones y sustancias petrolíferas. Y ahora, plenamente se sabe que el vanadio es uno de los más abundantes constituyentes en la corteza terrestre, aunque esto, por supues-

to, no significa que sea abundante desde el punto de vista económico. F. W. Clarke ("The data of Geochemistry", Bull. 695, U.S. Geol. Survey, 1920), en su cálculo del promedio de los diferentes elementos en la corteza terrestre, y a través de más de 100 diferentes tipos de rocas ígneas, el promedio para el vanadio fue de 0.026% de trióxido de vanadio (V₂O₃). El elemento parece ser menos común en las rocas sedimentarias, pero aún así excede en cantidad a otros metales, tales como el plomo y el cobre, los cuales son nombrados, por lo general, como comunes. Por supuesto, que los cálculos referidos a cuerpos de mena de vanadio, no han sido tomados en cuenta, pero como tales cuerpos están en extrema minoría en relación con la masa de rocas como un todo, se pueden desestimar.

Las ocurrencias citadas arriba, sirven para mostrar la gran distribución del vanadio en la corteza terrestre, pero para los recursos comerciales del metal, nosotros debemos contar con depósitos más especializados y concentrados. Así entonces, los depósitos de vanadio caen dentro de cinco grandes divisiones:

a) **Segregaciones de magmas básicos.** El vanadio es encontrado en algunas regiones en asociación con ilmenitas y magnetitas titaníferas, tales como en Taberg, Suecia, y en los Adirondacks. También en cromitas, y con rutilo, en asociaciones ígneas básicas ricas en apatito.

b) **En venas de origen hidrotermal.** (Generalmente asociado con intrusiones ígneas ácidas). En estos depósitos el vanadio está asociado, bien con uranio, como sucede en Bohemia (Checoeslovaquia), o con telururos de oro, como en las venas auríferas de Boulder, Colorado, Estados Unidos, y en Kalgoorlie, Australia. Menas de un origen intermediario a las dos anteriores, parecen ser los depósitos de vanadinita asociados con plomo-zinc, de San Luis, Argentina; los depósitos de roscoelita en las areniscas de Placerville, Newmire y Colorado en los Estados Unidos; la mottranita de Cheshire, Inglaterra, la carnotita de Radium Hill, los depósitos de vanadio asociados con cobre nativo en el Lago Superior, y algunos yacimientos de Mte. Painter en el sur de Australia. Todos estos depósitos, aunque parecen ser de diferentes tipos, en realidad se presume que fue-

ron producto de soluciones mineralizadoras de muy alta temperatura, por lo que pueden estar perfectamente asociados, como hidrotermales.

c) **Vanadio (presumiblemente en forma de sulfuro) asociado con hidrocarburos, y sustancias carbonosas.** En esta clase pueden incluirse los depósitos de patronita de Minasragra, Perú, las también llamadas venas de carbón (asfaltitas), igualmente en el Perú, y las asfaltitas de Oklahoma, Estados Unidos, y en muchas partes del mundo occidental, especialmente, Trinidad y Venezuela.

El vanadio es encontrado en estos depósitos probablemente en forma de patronita (VS₄), o algún otro sulfuro complejo, y el cual probablemente fue introducido en solución en los hidrocarburos pesados o en las asfaltitas, y en algunos casos, como sucede en Minasragra, Perú, haber sido separado después que la introducción del mineral tomó lugar. En realidad el sulfuro de vanadio, por procesos de laboratorios, se conoce que es altamente soluble en ciertos hidrocarburos pesados, de manera, que esta teoría es perfectamente aceptable.

d) **Los niveles superiores de oxidación de yacimientos de plomo y cobre.** En estos depósitos los minerales de vanadio encontrados, pertenecen todos a la clase vanadatos (vanadinita, descloizita, chileíta, etc.) y son encontrados por lo regular, como minerales oxidados de cobre, plomo y zinc, tales como anglesita, cerucita, smithsonita, crisocola, azurita, malaquita, etc. Es de notar que algunos minerales complejos de plomo, tales como piro-morfita (cloro-fosfato de plomo), wulfenita (tugstato complejo de plomo, mimetesita (cloro-molibdato de plomo), crocoíta (cromato de plomo), generalmente están presentes en este tipo de depósitos. Y esto es una clara indicación del complejo proceso de mineralización de la zona, lo que puede indicar a su vez depósitos comerciales de molibdeno o vanadio.

Estos depósitos son muy comunes en diversas partes del mundo, pero desafortunadamente son los menos comerciales para metales estratégicos como vanadio. Son conocidos en Leadhills, Escocia; Rodesia del Norte; España; el sur-oeste de los Estados Unidos; Méjico y el Turkeistán ruso.

Los minerales de vanadio, casi siempre, están confinados a la zona de oxidación y son usualmente más ricos por encima del nivel de la mesa de agua. Solamente pequeñas cantidades pueden ser encontrados por debajo de esa zona.

e) **Depósitos asociados con rocas sedimentarias.** Los minerales de estos depósitos son casi enteramente componentes oxidados, y están asociados por lo general con minerales de hierro, aluminio, cobre, plomo, zinc y material carbonáceo. A veces el vanadio se encuentra en cantidades altas en rocas fosfáticas, como sucede en USA y el Canadá.

En esta división cae la carnotita de Colorado y Utah (Estados Unidos) encontrada principalmente en areniscas y limolitas; las bauxitas francesas, originadas a partir de calizas ricas en aluminio, y poseyendo un alto índice de vanadio; las menas ferríferas de Lorraine (Francia) y Luxemburgo; las lutitas, arcillas carbonosas y limolitas de New South Wales, Inglaterra; las lutitas carbonosas de San Luis, Argentina. Y entre los centros fosfáticos ricos en vanadio, las fosforitas de Florida, Estados Unidos, y la gran formación Fosforia del oeste de los Estados Unidos y el Canadá.

Los Usos del Vanadio.—Por algún tiempo después de su descubrimiento, el vanadio permaneció como una curiosidad química, pero el anuncio de los tempranos años del siglo XVI de su uso en ciertos campos del teñido causó una búsqueda del metal, y así pequeñas cantidades fueron producidas de los depósitos de Bohemia, y de las fundiciones de acero de Le Creusot, en Francia. Antes de su importancia en la industria siderúrgica, el vanadio fue usado esencialmente en la preparación de anilinas, como catalizador, como transformador de la celulosa vegetal a oxi-celulosa, en la cerámica, como elemento esencial en la fotografía, y en el campo de la medicina. Aún hoy muchos de esos usos siguen siendo comunes para el vanadio, pero lo que le dio importancia en la tecnología moderna, fue en el campo de la metalurgia.

Su principal uso en ese campo está bajo la forma de ferrovanadio, el cual está sirviendo a la industria desde principios del siglo XX. El vanadio es un poderoso des-oxidante y descar-

bonizador, y tiene susceptibilidades magnéticas sin importancia. Este metal imparte consistencia y tenacidad a las herramientas de acero sin perder sus otras propiedades. En muchos aceros es posible sustituir al vanadio por el molibdeno, pero esto hace perder tenacidad al producto terminado.

En realidad muy poco vanadio emerge como metal puro, sino como componente, generalmente óxidos, tales como, V₂O₅. Esto se debe a que es sumamente difícil prepararlo, y manejarlo en su estado nativo. Pero a pesar de todo eso, algunas toneladas de metal puro son producidas en los Estados Unidos, principalmente, debido a su increíble resistencia a las altas temperaturas. Más aún, recientemente mucha investigación se está llevando a efecto en el campo de las aleaciones de vanadio puro con columbio, hafnio y titanio. Por supuesto que mucho de este campo es aún experimental, pero en el año 1966 largas cantidades de aleaciones vanadio-titanio fueron producidas bajo requerimiento militar en los Estados Unidos, esencialmente para proyectos balísticos y espaciales.

En los aceros de vanadio la cantidad de este metal es muy pequeña, usualmente alrededor de 0,25%. Y el comportamiento del metal en la aleación puede ser descrita como sigue:

a) El vanadio remueve los nitratos y óxidos presentes, dejando al acero más tenaz, y en mejores condiciones para recibir posteriores tratamientos metalúrgicos.

b) Una porción de vanadio constituye soluciones sólidas en la aleación, especialmente formando ferritas de vanadio, y se ha comprobado metalúrgicamente que este componente es mucho más resistente al desgaste, que la ferrita común.

c) Aparentemente durante los procesos metalúrgicos en los cuales interviene el vanadio, se forman carburos de este metal, y esto es muy importante, ya que ayuda al fortalecimiento del acero producido.

La siguiente tabla muestra algunos análisis de varias aleaciones de vanadio:

	Ferro-Vanadio			Aluminio- Vanadio	Cobre- Vanadio
	A.	B.	C.		
Vanadio	46.20	30.90	37.50	15.00	8.40
Hierro	50.30	66.25	59.40	1.00	1.10
Aluminio	1.27	0.16	0.80	76.37	22.30
Manganeso	Trazas	0.06	0.50	—	—
Silicio	1.03	0.34	1.00	3.76	0.70
Carbono	0.03	1.58	0.15	0.61	0.10
Azufre	0.05	0.03	0.15	—	—
Fósforo	0.02	0.07	0.25	—	—
Arsénico	0.18	0.36	0.25	—	—
Cobre	0.05	0.09	—	—	66.15
Níquel	0.81	—	—	—	—

Los Principales depósitos de vanadio del mundo.

Como se dijo al principio, el vanadio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, pero esto no significa, que sea abundante desde el punto de vista económico. Al contrario, actualmente el mundo no comunista cuenta con muy pocos yacimientos primarios del metal, y aun la Unión Soviética, no posee muchos depósitos de vanadio.

A principios de siglo la producción de vanadio fue muy pequeña, y vino primordialmente de pequeños yacimientos de la zona de Bohemia, y de ciertas partes de Francia. Posteriormente España y Méjico contribuyeron con cierta cantidad de metal. Pero no fue hasta 1904 con el descubrimiento de los depósitos peruanos de Minasraga, cuando la producción de vanadio constituyó gran importancia. Estos depósitos se encontraban en grandes venas de asfaltita, usualmente llamadas "venas de carbón del Perú". Estaban asociadas con rocas calcáreas, formando mantos a lo largo de los planos de estratificación. El contenido de vanadio (en forma de patronita) era increíblemente alto, a veces hasta 20%, y el average se mantuvo cercano al 8% de contenido de vanadio. Uno de los más grandes depósitos estaba situado en la zona de Quisque, Departamento de Ju-

nín. Por un gran tiempo se creyó que era simple carbón, pero en 1905 estudios realizados sobre la roca, demostraron contener una alta cantidad de vanadio. Desde que comenzó la minería a principios del siglo XX, estos depósitos contribuyeron con más del 80% de la producción mundial de vanadio. Los depósitos peruanos se mantuvieron en producción desde 1909 hasta 1922, cuando quedaron completamente exhaustos. La última producción fue de casi 1.000 tons. largas de concentrado de vanadio. Se calcula que entre los años 1912 y 1920 aproximadamente 27 millones de libras de ferro-vanadio fueron producidas a partir de la patronita peruana.

Después de 1922 los depósitos peruanos perdieron la supremacía del vanadio, y fueron los Estados Unidos, especialmente con los grandes depósitos de carnotita de Colorado, los que mantuvieron el liderazgo en la producción del metal. Para 1930, los Estados Unidos produjeron más de 3.000 ton. brutas de ferro-vanadio, conteniendo un promedio de casi 35% de vanadio.

Muy pocos países, aparte de los antes nombrados, produjeron importantes cantidades de vanadio, antes de la segunda guerra mundial. Argentina, Méjico y España, contribuyeron con pocas cantidades. Durante el conflicto bélico, entre 1938 y 1946, Venezuela, contribuyó indirectamente con gruesas cantidades de concentrado de vanadio, sobrepasando las 1.000 ton. largas de metal por año. Y desde entonces se ha mantenido como uno de los grandes productores de vanadio, en forma, por supuesto, indirecta.

Actualmente, muy pocos países poseen depósitos importantes de vanadio. Sólo los Estados Unidos, la República de Sur Africa, la zona del Sur-Oeste de Africa, la República de Finlandia y la Unión Soviética, poseen reservas importantes de vanadio. Los otros depósitos europeos, especialmente los franceses, alemanes y españoles están agotados. En cuanto a Australia, es cierto que posee numerosos depósitos de vanadio, especialmente asociados con plomo y zinc, pero son demasiado pequeños, y en realidad, de baja importancia.

Los depósitos estadounidenses se concentran en la zona de la gran planicie del Colorado (Colorado Plateau), que comprende varios estados del oeste americano, pero esencialmente el gran estado de Colorado. Estos depósitos están constituidos por grandes estratos enriquecidos de areniscas, de joven edad. Notablemente poco afectadas por trastornos estructurales, y la mineralización varía, en espesor, de pocos metros hasta casi cien metros. Los minerales principales son vanadatos complejos de uranio y vanadio, esencialmente, carnotita (uro-vanadato de potasio) de típico color amarillo y yuyamunita (uro-vanadato de calcio) de color verde-amarillento. Ambos minerales se explotan por su contenido de uranio, pero grandes cantidades de vanadio, son recuperadas como sub-producto. Las reservas aproximadas de mineral, en toda la zona del Colorado, sobrepasa los 10 millones de tons. métricas.

Actualmente mucho se está hablando de la posibilidad, por parte de los Estados Unidos, de producir vanadio, de las grandes formaciones fosfáticas del nor-oeste americano, especialmente de la gruesa formación de Fosforia. El porcentaje de vanadio en estos fosfatos es relativamente alto, y las inmensas reservas de roca pueden fácilmente constituir futuras menas de vanadio. Para 1966 los primeros pasos para la recuperación de vanadio del ferro-fosfato, obtenido a partir de las fosforitas del Estado de Idaho, fueron realizados. Y mucha investigación se está realizando en este interesante y complejo campo.

Fuera de los Estados Unidos y el mundo comunista, los más importantes depósitos de vanadio, descansan en la República de Sur Africa, y el sur-oeste africano. Allí se han cubicado grandes reservas de vanadio, relacionados con magnetitas titaníferas, y actualmente esos depósitos están sufriendo grandes planes de desarrollo, los cuales harán de Sur-Africa uno de los líderes en la producción mundial de concentrado de vanadio. Un importante depósito de vanadatos de plomo fue descubierto durante 1966 en el sur-oeste de Africa. La mena tiene más de 18% de V, y la producción se incrementará notablemente durante 1967, en vista de la gran necesidad de concentrado de vanadio de los centros industriales de Alemania Occidental. (Alemania Occidental es uno de los principales productores de ferro-vanadio de Europa).

En Europa el único centro productor de vanadio está en Otanmäki, Finlandia. Estos depósitos están asociados con una gran área de mineralización típicamente hidrotermal. Más del 70% del vanadio producido se exporta a la Unión Soviética.

La U.R.S.S. posee grandes depósitos de vanadio, concentrados en el área de los Urales. Pero hasta ahora se desconocen sus características y su potencialidad. Aparentemente el mercado interno soviético está sobresaturado de concentrado de vanadio, ya que las últimas fuentes de información sobre el comercio mundial de minerales (Mining, annual review, 1966), muestra a la Unión Soviética como gran exportadora de concentrado de vanadio, a Checoslovaquia, y varios países de la Europa Occidental.

El Canadá es uno de los principales productores de concentrado de vanadio. Pero esta producción viene totalmente de petróleos venezolanos, por lo que se debe tomar como materia prima al hidrocarburo, del cual se extrae el metal.

El Vanadio en Venezuela

Hasta ahora no se han descubierto en nuestro país depósitos primarios de vanadio. Aún cuando en varias rocas ultrabásicas de la zona guayanesa el contenido de vanadio, es bastante halagador. De toda forma es importante señalar los depósitos minerales en los cuales podría encontrarse vanadio, o por lo menos con los cuales está íntimamente ligado en otras parte del mundo.

Depósitos no asociados con hidrocarburos

a) **Relacionados con magmas básicos.**—Venezuela cuenta con una gran “faja” de rocas ígneas ultrabásicas, que van desde la Isla de Margarita hasta el Estado Cojedes, atravesando los Estados Aragua, Miranda y Carabobo. Varios depósitos minerales han sido encontrados asociados con estas rocas: la magnesita

de Margarita, el níquel de Aragua-Miranda y el amianto de Cojedes. Pero hasta ahora ningún depósito de magnetita o ilmenita ha sido localizado.

En cuanto a depósitos de cromita, con los cuales el vanadio se puede encontrar asociado, hasta ahora el único yacimiento venezolano se encuentra en la zona de Santa Ana, Estado Falcón. Pero el contenido de vanadio es casi nulo, y por otro lado el depósito es sumamente pequeño. (Las reservas no pasan de 10 mil ton. de mineral.) De manera que no tiene ninguna importancia económica.

Las esperanzas venezolana sobre enriquecimiento de vanadio en rocas básicas, descansan en nuestra inmensa Guayana, especialmente en la zona sur, donde grandes cuerpos de rocas intrusivas ultrabásicas están presentes. Análisis realizados sobre algunas diabasas, sumamente ricas en magnetita (yacimientos de contacto o segregaciones magmáticas) mostraron halagadores concentraciones de vanadio. De toda forma esta área, al sur del Río Cuyuní, está virgen en estudios geo-económicos detallados, de manera que serán las posteriores investigaciones las que darán la última palabra.

b) Depósitos hidrotermales, o asociados con rocas ígneas ácidas.—Venezuela no cuenta hasta el momento con yacimientos de vanadio de origen hidrotermal, ni asociados con rocas graníticas. Varias muestras de mineral radioactivos, sin duda de origen hidrotermal, descansan en la Dirección de Geología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Las muestras provienen, fundamentalmente, del Estado Mérida, pero la mineralización de vanadio es escasa, de manera que económicamente no tienen importancia. Por otro lado los sitios de mineralización no constituyen depósitos explotables, debido a su tamaño.

Durante exploraciones realizadas en el Estado Falcón, una gran área de mineralización fue encontrada en asociación con el complejo granítico de Pueblo Nuevo. Esta masa ígnea se encuentra intrusionando sedimentos juró-cretáceos, los cuales ha metamorfozido. Producto de esta acción es una extensa área de contacto, y posiblemente asociada también con fenómenos hidrotermales, en la cual mineralización de Fe (pirita), cobre (calco-

pirita), y grafito puro, ha tomado lugar. Al principio se creyó que el yacimiento o la zona de mineralización podría tener importancia en el campo de los minerales estratégicos del grupo del hierro (Molibdeno y vanadio), pero los análisis posteriores demostraron que el porcentaje de Mb es muy bajo, menos del 0.01%, e igual cosa pasó con el vanadio.

Otros cuerpos graníticos, tales como los encontrados en la Península de Paria, en la zona de la Sierra de Perijá y en algunas regiones andinas, no presentan mineralización de ninguna especie.

c) **Depósitos asociados con plomo y zinc.**—Actualmente Venezuela cuenta con dos provincias metalogénicas de plomo-zinc, una situada en el Estado Sucre, específicamente en la zona centro-occidental del Estado, y la otra en los Andes venezolanos, cubriendo esencialmente al Estado Mérida. Desafortunadamente hasta ahora no se ha encontrado mineralización de vanadio en esas áreas.

La mineralización de plomo en la zona merideña se concentra en la región de Bailadores, donde existen importantes venas de galena, asociadas, sin duda con fenómenos hidrotermales. La galena se encuentra en gruesas vetas de cuarzo, asociadas con rocas ácidas. Menor mineralización de zinc y cobre está presente.

Durante trabajos exploratorios realizados en la zona andina, el autor tuvo oportunidad de visitar y estudiar esos yacimientos. Varios minerales complejos de plomo fueron encontrados en la zona de oxidación, especialmente piromorfita, y quizás mimetesita. (Actualmente las muestras descansan en la Escuela de Geología y Minas, de la Universidad Central). Pero no se encontraron evidencias de vanadatos de plomo, tales como vanadinita o descloizita. Por lo que se presume que la mineralización de vanadio, estuvo ausente.

El yacimiento de plomo-zinc del Estado Sucre es mucho más extenso, cubre casi 75 km. cuadrados, concentrándose principalmente en las cercanías de Carúpano. Esta mineralización está asociada con rocas metamórficas de la Serie Caribe, y con rocas volcánicas jóvenes. Aparentemente es resultado de fenó-

menos hidrotermales. Los minerales esenciales son galena y blenda, con poca pirita y calcopirita. La zona de oxidación es rica en minerales de plomo, tales como cerusita y anglesita, y quizás en minerales secundarios de zinc. Pero nula en mineralización de vanadio, molibdeno y fósforo. Por lo que minerales tales como piromorfita, mimetesita y vanadinita están ausentes.

En cuanto a la gran providencia metalogénica de cobre-plomo-zinc del centro del país, y la cual cubre extensas zonas de los Estados Yaracuy (Región de Aroa), Aragua (La Providencia) y Guárico (Sta. Isabel), hasta ahora los estudios indican que la mineralización de vanadio está completamente ausente.

d) **Depósitos asociados con rocas sedimentarias.**—Ningún tipo de areniscos o limolitas con mineralización de vanadio ha sido encontrada en el país, y dado lo amplio del estudio realizado en Venezuela sobre rocas sedimentarias, aparentemente ese tipo de mineralización está ausente.

En cuanto a rocas fosfáticas, donde a veces la concentración de vanadio es sumamente alta, como en U.S.A., Venezuela cuenta con los dos tipos clásicos: (Mourad I. Yousef, 1965), los fosfatos de grano fino, oscuros, y por lo general asociados con rocas carbonosas, tal como los encontrados en la región de Lobatera, Estado Táchira, y los fosfatos de grano grueso, colores claros y asociados preferentemente con areniscas calcáreas, y clásticos gruesos, tal como las rocas fosfáticas de Riecito, Estado Falcón.

Los estudios realizados sobre ambos yacimientos, indican que la fosforita de Lobatera, es más rica en U y V que los fosfatos de Falcón. Y esto está perfectamente de acuerdo con la geoquímica de las rocas fosfáticas. Por ejemplo, aún cuando la península de Florida, en los Estados Unidos, es el principal productor de fosfato en el mundo, y sus reservas son grandes, la concentración de vanadio es muy baja, y por lo tanto es antieconómica su explotación. Y ese fosfato es del mismo tipo del fosfato falconiano; claro en colores y asociado con clásticos arenosos.

En cambio las rocas fosfáticas del oeste americano (Formación Fosforia), son ricas en vanadio (la concentración en porcentaje varía entre el 0,5 y el 1), y dado la magnitud de los depósitos, ya para 1968 empezará la producción de concentrado de vanadio, a partir de esas rocas. Y esos fosfatos son idénticos a los fosfatos de Lobatera, oscuros y asociados con rocas carbonosas.

Desafortunadamente la fosforita de Lobatera posee un porcentaje de vanadio por debajo de los límites comerciales, de manera que es antieconómica su explotación, por otro lado las reservas no son de una magnitud tal para que sean menas de concentrado de vanadio, como subproducto. Pero, de toda forma, ambos yacimientos, el tachirenses y el falconiano, están bajo explotación para su uso como fertilizantes, y Venezuela en un futuro cercano elevará su producción de 120 mil ton. anuales a 700 mil ton. por año de fertilizantes complejos.

El vanadio asociado con hidrocarburos en Venezuela

De todo lo anterior se deduce que Venezuela no posee actualmente yacimientos primarios de vanadio, y que las esperanzas venezolanas en ese sentido descansan en los grandes cuerpos básicos y ultrabásicos de nuestra Guayana, y en las grandes zonas asociadas con fenómenos intrusivos e hidrotermales, también de la zona guayanesa, especialmente el S-O del Estado Bolívar.

Pero donde descansa la gran importancia de nuestro país en la producción de concentrado de vanadio es en nuestros hidrocarburos. Muchos de los crudos pesados de Venezuela, especialmente los encontrados en la cuenca occidental son extremadamente ricos en vanadio, posiblemente uno de los más ricos del mundo, de aquí que en forma indirecta constituyan **menas** de ese metal.

¿Cómo se formó, o por qué se encuentra vanadio en esos crudos? Muchos geólogos están de acuerdo que para la formación de esos minerales de vanadio (esencialmente patronita,

S4V, la cual es muy soluble en petróleo), es necesario contar con las siguientes condiciones:

- a) Presencia de vanadio, en forma de óxidos, diseminado en la roca porosa.
- b) Impregnación con hidrocarburos.
- c) Un recurso de azufre o sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Muy pocos yacimientos de hidrocarburos llenan esas condiciones, tan sólo, algunos crudos de Oklahoma, los asfaltos del Perú, y los crudos pesados de Venezuela, cuentan con todas las condiciones requeridas para la formación de sulfuro de vanadio (patronita).

Actualmente concentrado de vanadio (V205) es producido a partir de crudos venezolanos en la refinería de Pointe-aux-Trembles, Montreal, en Canadá. Esta planta de procesamiento pertenece a la Canadian Petrofina Limited, la cual procesa casi únicamente crudo venezolano. La producción para 1965 fue de casi 500 libras de V205 por día, la cual se elevó a 1000 libras diarias para 1966.

El producto recuperado contiene 98% de V205, 1% de Fe₂O₃ y trazas de aluminio, sílice y sodio. La planta Pointe-aux-Trembles es la única de su tipo en el Canadá, y posiblemente en Norte América. Ultimamente se está pensando en usar las cenizas de las arenas bituminosas de Atabasca, como producto primario para la fabricación de V205, pero el bajo porcentaje, es uno de los principales problemas, y quizás esta producción de concentrado de vanadio no se pueda realizar.

El contenido de vanadio en los crudos venezolanos es alto, superior al normal, más de 200 partes por millón, de manera que perfectamente se puede considerar como mena del metal. Petrofina procesa cerca de 32 mil barriles diarios, lo cual se puede considerar como bajo, o sea, un equivalente diario de casi un millón de galones de petróleo crudo. Esta cantidad contiene cerca de 1.200 libras de vanadio puro, ó 2.000 libras de V205, bajo el cual el vanadio se recupera. La construcción de esta planta se decidió después que la Canadian Petrofina, y el

Departamento de Minas del Canadá, conjuntamente desarrollaron una nueva técnica mucho más barata y rápida, para la recuperación de vanadio a partir de crudos.

¿Puede Venezuela, o la Industria Petrolera venezolana ser un futuro productor de concentrado de vanadio? La respuesta es completamente afirmativa. Venezuela es actualmente uno de los líderes, no solamente en la producción de crudo, sino también en el campo de los productos refinados a partir de hidrocarburos. La producción de crudo venezolano para 1966, fue de **3.371.134** barriles diarios. Y la refinación, la cual se lleva a efecto en 15 refinerías (dos de las cuales son una de las mayores del mundo), completó más de 1 millón de barriles de productos refinados que van desde gasolina hasta lubricantes complejos. Esta cantidad representa más de 400 mil toneladas anuales de hidrocarburos refinados.

Para dar una idea del campo de los productos refinados a partir de hidrocarburos basta mirar la siguiente tabla:

Productos obtenidos a partir del gas	
natural	19.458 mill pies cúb.
Gasolina de todo tipo	47.693 ton. metr.
Kerosen	11.716 ton. metr.
Aceite "diesel"	48.316 ton. metr.
Gas "oil"	29.392 ton. metr.
Aceites de todo tipo	233.951 ton. metr.
Lubricantes	4.638 ton. metr.
Asfalto	5.443 ton. metr.
Lubricantes complejos, productos para limpieza, y usos hogareños, etc.	14.949 ton. metr.

De manera, pues, que las refinerías venezolanas, con los cambios necesarios, perfectamente pueden ser procesadoras de crudos petrolíferos ricos en vanadio, para la obtención de concentrado.

Y los planes, que tanto el campo oficial como el privado, tienen en preparación aumentarán considerablemente esa cantidad de productos refinados, sobre todo en el campo de los lubricantes, gasolinas complejas y líquidos para usos especiales.

Más aún, la industria petroquímica nacional, en un futuro cercano será una de las más completas de la América Latina, especialmente cuando el complejo del Tablazo, Estado Zulia, esté terminado. Para 1969 el Zulia producirá más de 50 mil tons. anuales de polietileno, usando gas natural que será suplido por pozos al sur de Maracaibo. Tres grandes plantas serán construidas para la obtención de urea, amoníaco y productos similares, cada una con una producción diaria de casi 2.000 tons. También en el Zulia, una planta, quizás una de las mayores del hemisferio occidental, procesará casi 300 mil tons. anuales de gas para la obtención de propano.

Todo esto indica que Venezuela, en el campo de la industria petrolera y petroquímica, ya está alcanzando una mayoría de edad, y que planes más complejos, y especializados, tales como la obtención de concentrado de vanadio, o azufre natural, son perfectamente plausibles.

Por supuesto, que no todos los hidrocarburos venezolanos son ricos en vanadio. Pocos hidrocarburos del área oriental (Zona de la Gran Oficina, y campos de Monagas), así como los crudos de Guárico y Barinas, son ricos en vanadio. Aunque algunos petróleos sumamente pesados del área oriental han mostrado halagadores concentraciones del metal. Son entonces los crudos de la cuenca occidental (Maracaibo-Falcón) los que poseen las más altas concentraciones del metal. En estos hidrocarburos el vanadio representa entre 150 y 200 partes por millón, lo que es sumamente alto, si consideramos que cientos de millones de galones serán procesados diariamente.

El vanadio, en la forma de concentrado, es uno de los productos que fácilmente puede obtener mercado, especialmente debido a su uso en la industria metalúrgica, sobre todo si consideramos que esta industria es una de las que más auge está tomando en el mundo actual, aún en Latino América, y las áreas africanas.

Países como los Estados Unidos, que son uno de los principales productores de vanadio, tuvieron que hacer gruesas importaciones del producto, e igual cosa pasó con muchos países

de Europa Occidental, especialmente Francia y Alemania. El Japón es otro de los constantes importadores de concentrado de vanadio, especialmente para usos siderúrgicos.

En cuanto a la América Latina, esta es una de las áreas donde el crecimiento de la industria siderúrgica ha sido más espectacular. Brasil, Argentina y Méjico se mantuvieron a la cabeza, tanto en la producción de lingotes y acero en planchas, como en los aceros especiales (donde el vanadio, níquel y molibdeno juegan papel importante). Otros países, tales como Colombia y Venezuela, también contribuyeron con gruesas cantidades.

La siguiente tabla muestra la producción de acero, de todo tipo de los principales países de la América Latina. (Datos para 1964, Minerals Yearbook, Volume IV, Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior): Datos en ton. métricas.

Brasil	Lingotes	3.029.000
	Planchas	2.408.000
	Aleaciones	50.000
Méjico	Lingotes	2.326.000
	Aleaciones	48.000
Argentina	Lingotes y Otros tipos	1.335.000
Venezuela	Lingotes	440.000
	Semimanu- facturado	400.000
Colombia	Lingotes	220.000
Perú	Lingotes	75.000

El caso venezolano es posiblemente único.. Venezuela hace menos de una década no producía casi nada de acero, ni lingotes ni productos semi-terminados, y en menos de 4 años pasó a ser uno de los principales productores de acero de la América Latina.

Para tener una idea del ritmo de producción de acero en Venezuela, se presentan las siguientes cifras:

Miles de toneladas métricas

	1960	1961	1962	1963	1964
Acero en lingotes	47	75	225	364	440
Semimanufacturado	51	67	83	159	400

Para 1965 Venezuela produjo más de 500 mil tons. de acero en lingotes, y los planes, tanto privados como oficiales, elevarán esa cantidad posiblemente al millón de tons. antes de 1970. Las plantas siderúrgicas de Caracas, Valencia y Maracaibo, han aumentado considerablemente su producción, especialmente en el área metropolitana, donde más de 200 mil tons. de acero son producidas anualmente. Aún más, algunas plantas siderúrgicas del Estado Carabobo, muy pronto empezarán la producción de aleaciones de acero, y sin duda que el uso de metales como el manganeso, níquel o vanadio, será necesario.

Esto demuestra claramente que Venezuela muy pronto entrará en el campo de las aleaciones especiales, sobre todo después que algunos yacimientos de níquel (Loma de Hierro) entren en explotación, y nuevos yacimientos de manganeso sean cubcados (exceptuando los depósitos de manganeso de Matthews Bridge, en la zona Esequiba). De manera que la producción de concentrado de vanadio, es una meta que necesariamente llegará.

Más aún, con la incorporación de Venezuela (Activa desde Enero de 1967) a la Asociación Latinoamericana de Libre Comercio (ALALC), no hay dudas que nuestro país podría ser el suplidor más importante de concentrado de vanadio, para países como Brasil, Méjico o la Argentina, donde la demanda del metal, ha aumentado considerablemente, como lo demuestran las siguientes cifras:

Brasil (1963)	266 tons. de concentrado.
Méjico	221 tons. de concentrado.
Argentina	170 tons. de concentrado.

En cuanto al precio del vanadio, éste es uno de los metales bajo la forma de concentrado) donde el precio, se ha mantenido más estable, o ha sufrido algunos aumentos, especialmente debido a la escasez de algunos metales, tales como molibdeno y tungsteno.

La siguiente tabla muestra los precios de concentrado de vanadio y vanadio puro en los E.U.A. Los precios de cotización en el mercado de metales de Londres son casi los mismos.

Concentrado de Vanadio, mena por libra V205. Molido o bruto. FOB. Precio nominal 31c USA.

Vanadio, metal. Por libra. Pureza 90%. Mínimo lotes de 100 lbs. Precio nominal. 3.45 \$ USA.

Ferrovandio. Por libra. Vanadium Corp. Amer. Enviado \$ 2.88 USA.

Ferrovandio. Unión Carbide. F.O.B. Puerto indicado. \$ 2.62 USA.

Situación mundial del vanadio para 1966

La producción mundial de vanadio bajo la forma de V205 para 1966 fue de 8,700 tons., comparadas con 7.050 tons. para 1965, y 6.300 para 1964. El principal productor fueron los Estados Unidos con sus depósitos de carnotita de la planicie de Colorado. Durante 1966 se puso énfasis en la expansión de vanadio debido fundamentalmente a las necesidades del campo militar y balístico.

En 1966 la Unión Carbide comenzó la producción de sus reabiertas minas en Rifle, Colorado, aumentando considerablemente la producción norteamericana. La misma compañía anunció planes para la construcción de grandes molinos cerca de Hot Springs, Arkansas, pero éstos no entrarán en funcionamiento sino hasta mediados de 1967.

Uno de los productores más grandes del mundo, la Vanadium Corporation of America, completó una nueva planta en Cambridge, Ohio, para producir oxythrycloruro de vanadio a partir de V205, este complejo es usado en la fabricación de cauchos sintéticos (etileno-propileno). La misma compañía adquirió también, durante 1966, varias propiedades de uranio-vanadio en Colorado, las cuales elevan considerablemente sus reservas. Estas propiedades empezarán su producción para 1970.

Fuera de los Estados Unidos, la producción del mundo no-comunista vino principalmente de la República de Sur Africa, y del Sur Africa Occidental. La presente producción, de más de 1.000 tons. por año viene a la Transval Vanadium Co., una compañía subsidiaria de la Anglo-Americana Co. de Sur Africa. Sin embargo, otra compañía anglo-americana, la Highveld D. C. Lim. está construyendo actualmente una planta de acero en Witbank, la cual usará vanadio proveniente de las magnetitas surafricanas, y para 1968 la producción comenzará con 6.250 tons. por año de concentrado de vanadio, cantidad que será elevada eventualmente a **13.400 tons. por año.**

Grandes trabajos mineros fueron reportados en la región de Mapoch, 70 kilómetros al oeste de Lydenburg, Transval. Para Octubre de 1967 esta zona suplirá mena de vanadio para el complejo de Highveld. La Unión Carbide adquirió durante 1967 los derechos sobre propiedades ricas en vanadio al norte de Pretoria, Sur Africa. Una pequeña compañía, La Federal Vanadium, había producido mena durante 1963 y 1964. Pero la producción fue abandonada a principios de 1965. La Unión Carbide piensa poner las propiedades en plena producción para mediados de 1966.

En el Sur Oeste Africano, un importante depósito de vanadatos de plomo, con una riqueza de 18% de V205, fue encontrado. Y la Africa Co. Lim. propietaria de esos terrenos produce actualmente 2.400 tons. anuales de V205, o sea, 1.200 tons. de vanadio puro.

Canadá produce actualmente más de 1.300 tons. anuales de pentóxido de vanadio a partir de crudos venezolanos, y esa

cantidad será aumentada considerablemente durante 1967. Casi todo el producto es exportado al este de los Estados Unidos.

Conclusiones

Después de analizar detenidamente todo lo anterior, podemos llegar a una serie de conclusiones, tales como:

a) No hay dudas de que el vanadio es uno de los elementos que está jugando un papel fundamental en la tecnología moderna, especialmente en el campo siderúrgico.

b) Venezuela no cuenta, hasta el momento, con yacimientos primarios de vanadio. Pero la alta concentración de este metal en algunos crudos venezolanos de la cuenca occidental, hace de Venezuela un líder potencial en la fabricación de concentrado de vanadio.

c) La Industria Petrolera nacional, en su fase de refinación, está, con los cambios requeridos, perfectamente capacitada para llevar a cabo la fabricación de concentrados de vanadio, a partir de esos crudos.

d) Aún cuando la industria siderúrgica nacional ha crecido en forma vertiginosa, todavía Venezuela no produce aleaciones complejas donde el vanadio intervenga como componente indispensable. Pero nuestra afiliación a la Asociación Latinoamericana de Libre Comercio hace de Venezuela el suplidor futuro de concentrado de vanadio para otros países latinoamericanos, tales como Brasil, Méjico y Argentina, donde las aleaciones complejas de acero, constituyen importante producción.

e) El precio de vanadio es uno de los más estables, tanto en los mercados estadounidenses, como ingleses, y aún más, ese precio tiende continuamente a subir.

f) No hay dudas, de que el Ministerio de Minas e Hidrocarburos, debe realizar una revisión sobre el estado de esos petróleos donde el vanadio se encuentra en altas cantidades, e indudablemente el precio de esos crudos en el mercado internacional, debe de ser revisado.

B I B L I O G R A F I A

- Baragwanath, J. G. 1921.—“The Vanadiferous asphaltites of Central Perú”. Eng. and Min. Jour. May. 7. pp. 778-81.
- Canadian Minerals Yearbook. 1965.—Publicación especial de “Mineral Resources Division. Department of Mines and Technical surveys”. Ottawa. Canadá.
- Dueñas, Enrique I. 1906.—“Recursos minerales de las provincias de Jauja, y Huancayo”. Bol 35 del cuerpo de Ing. de Minas del Perú.
- Gulbrandsen, R. A. 1960.—Minor elements in Phosphorites of the Phosphoria formation. Bull G.S.A. Abstract. Nov. 1960.
- Minerals Yearbook. 1964.—Volume IV Area Reports: International. Publicación especial de “Bureau of Mines. United States Department of the Interior. U.S.A.”
- Mining. Anual Review. 1966.—Publicación especial de “Mining Journal, Londres, Inglaterra”.
- Vanadium ores. por miembros del Imperial Institute, Londres, 1924 (Monogramas sobre recursos minerales con especial referencia al Imperio Británico).
- Venezuela Up-to-date. Fall 1966. Vol. XII, Nº 4. Publicación especial de la Embajada de la República de Venezuela, en Washington, U.S.A.
- Venezuela Up-to-date. Winter 1966-1967. Vol. XII. Nº 5.
- Youssef, Mourad I. 1965.—Genesis of bedded phosphates. Economic Geology, Vol. 60, 1965. pp. 590-600.
- World Mining. June 15. 1966. International edition.