

**CATEGORIZACIÓN DE MINERALES CRÍTICOS EN COLOMBIA PARA SU
USO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

KAREN CECILIA VILLAZÓN LOBO

Trabajo de grado presentado como requisito de grado para optar al título de Geóloga

Director: DIANA CRISTINA ORTEGA PÉREZ, PhD

MEDELLIN

UNIVERSIDAD EAFIT

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

2022

Agradecimientos

Para mi Mamá y Papá, gracias por apoyarme en este viaje que empecé llena de miedos, pero siempre me motivaron a hacer lo mejor. Para Naylis que también ha sido de los mayores apoyos desde que está en mi vida.

A la Profesora Diana Ortega por ser mi guía en el camino maravilloso de la geología, hacer que me enamorara del mundo de las energía renovables y brindarme su apoyo en los momentos que lo he necesitado. A mi familia y amigos, que confiaron en mí y en mis capacidades para lograr completar este paso, solo queda decirles, muchas gracias.

Tabla de contenido

1. Introducción	7
2. Generalidades	8
3. Marco conceptual	10
4. Metodología	13
5. Resultados	15
6. Discusión.....	27
7. Conclusiones y recomendaciones	28
Lista de referencias	30
Anexos	36

Lista de tablas

Tabla 1. Regiones del país con mayor potencial aprovechable para la generación de energía eléctrica	9
Tabla 2. Requerimientos de calidad del insumo de la industria vs. la disponibilidad potencial hallada en el país con base en lecturas previas de documentos de la ANM, SGC y el MME.....	22
Tabla 3. Vacíos de información más comunes encontrados en los mapas consultados de la UPME y el SGC.....	27

Lista de figuras

Figura 1. Promedio anual mundial de capacidad de energías renovables (MW) adicionada en el escenario de Desarrollo Sostenible y el escenario de Carbono Neutralidad a 2050.....	12
Figura 2. Esquema básico de funcionamiento del sistema fotovoltaico.....	13
Figura 3. Participación en el mercado solar por países (top 10) alrededor del mundo en el año 2020.....	15
Figura 4. Top 10 de países de América Latina en el Índice de transición energética realizado por el Foro Económico Mundial 2020.....	16
Figura 5. Diagrama con las diferentes partes del sistema fotovoltaico.....	17
Figura 6. Árbol tecnológico con los principales paneles solares y minerales asociados a estos.....	18
Figura 7. Radar tecnológico de insumos minerales que se necesitan para construir un panel solar de silicio.....	19
Figura 8. Diagrama de pastel representativo con resultado de las matrices para priorización de insumos minerales.....	21
Figura 9. Mapa de Unidades Estratigráficas con contenido potencial de silicio, plata y fósforo para su uso en paneles solares fotovoltaicos	25
Figura 10. Mapa de títulos mineros por departamento, asociados a minerales, con concentraciones requeridas por la industria solar fotovoltaica	26

Lista de anexos

Anexo 1. Proyecto SIG con archivos vectoriales para delimitación de zonas minerales de interés para paneles solares fotovoltaicos36

Anexo 2. Matrices en Excel para la ponderación y priorización de minerales críticos.....36

Anexo 3. Mapa de zonas protegidas de Colombia interceptado con las zonas minerales de interés para paneles solares fotovoltaicos.....36

Anexo 4. Mapa de títulos mineros por departamento, asociados a minerales, con concentraciones requeridas por la industria solar fotovoltaica.....36

Anexo 5. Mapa de Unidades Estratigráficas con contenido potencial de silicio, plata y fósforo para su uso en paneles solares fotovoltaicos.....36

Resumen

Las energías renovables son, sin duda, una tendencia en el mundo, impulsadas por el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles, estas tendrán un gran desarrollo sobre todo en los países que dependen en gran medida de ellos (Zhang et al., 2011).

Una de estas fuentes renovables es la energía solar fotovoltaica, con un modo de funcionamiento limpio y renovable del sistema eléctrico, que puede satisfacer la demanda de energía industrial necesaria en los territorios. Para la construcción de estos paneles solares fotovoltaicos y su sistema, se necesitan elementos como el silicio, plata, boro, carbón (como roca), aluminio, cobre, fósforo, litio, entre otros (Sampaio & González, 2017), los cuales podemos obtener de distintos tipos de minerales que se encuentran en Colombia.

Con la diversificación de la canasta minera se permitirá contar con un número más amplio de minerales (Ministerio de Minas y Energía, 2021), incluidos los que sirven para construcción de los paneles solares fotovoltaicos. Para la nación será muy importante tener cada vez más claro cuáles son los minerales que podrán ser de mucha utilidad en los años venideros debido al creciente auge que siguen teniendo las energías renovables, en especial, la fotovoltaica.

El propósito de este trabajo es contribuir con el conocimiento acerca de los insumos minerales necesarios en la industria solar fotovoltaica, categorizando los minerales críticos en Colombia, a partir de la diversificación de la canasta mineral del Ministerio de Minas y Energía, para su uso en energía solar fotovoltaica, con la verificación del estado del arte de la industria en el país, luego categorizando los principales minerales para paneles solares fotovoltaicos y, por último, con la identificación de áreas de ocurrencia potencial de los minerales categorizados.

Palabras clave: minerales críticos, energía fotovoltaica, diversificación canasta mineral, Colombia.

Abstract

Renewable energies are a trend in the world, driven by climate change and the depletion of fossil fuels, these will have a great development especially in countries that depend heavily on them (Zhang et al., 2011).

One of these renewable sources is photovoltaic solar energy, with a clean and renewable mode of operation of the electricity system, which can satisfy the demand for industrial energy needed in the territories. For the construction of these photovoltaic solar panels and their system, elements such as silicon, silver, boron, coal (as rock), aluminum, copper, phosphorus, and lithium, among others are needed (Sampaio & González, 2017), which we can obtain from diverse types of minerals found in Colombia.

With the diversification of the mining basket, it will be possible to have a wider number of minerals (Ministerio de Minas y Energía, 2021), including those used for the construction of photovoltaic solar panels. For the nation it will be important to be increasingly clear about the minerals that may be very useful in the coming years due to the growing boom that renewable energies continue to have, especially photovoltaics.

The purpose of this work is to contribute with the knowledge about the mineral inputs necessary in the photovoltaic solar industry, categorizing the critical minerals in Colombia, from the diversification of the mineral basket of the Ministerio de Minas y Energía, for use in photovoltaic solar energy with the verification of the state of the art of the industry in the country, then categorizing the main minerals for photovoltaic solar panels and, finally, with the identification of areas of potential occurrence of the categorized minerals.

Key words: critical minerals, photovoltaic energy, mineral basket diversification, Colombia.

1. Introducción

Impulsadas por el climático y el agotamiento de los combustibles fósiles, las energías renovables, tendrán un gran desarrollo sobre todo en los países que dependen en gran medida de estos combustibles (Zhang et al., 2011). Según Guo & Guo (2015) una de estas fuentes renovables es la energía solar fotovoltaica, que tiene un modo de funcionamiento limpio y renovable, que puede además satisfacer la demanda de energía industrial necesaria en los territorios.

Países como China han implementado políticas nacionales con incentivos para promover el desarrollo de esta industria que también busca reducir las emisiones de la nación (Jo et al., 2013; Chen & Su, 2014; Guo & Guo, 2015); Pakistán e India constituyen también una región en desarrollo que necesita satisfacer la demanda de recursos energéticos de la creciente economía (Ahmed et al., 2016); Europa, Estados Unidos y Brasil tienen perspectiva de rápido crecimiento siendo el mercado más disputado en cuanto a energías renovables (Sampaio & González, 2017).

En Colombia, debido a su posición geográfica, se cuenta con una exposición a la luz solar, de hasta 12 horas diarias los 365 días del año, que, sumado a la tecnología fotovoltaica implementada en el mundo, hacen del país uno de los que tiene mayor capacidad de energía de producción fotovoltaica (Velasco, 2019).

Para la construcción de estos paneles solares fotovoltaicos y su sistema se necesitan elementos como el silicio, plata, boro, carbón (como roca), aluminio, cobre, fósforo, litio, entre otros (Sampaio & González, 2017), los cuales podemos obtener de distintos tipos de minerales que se encuentran en Colombia.

Minerales como la plata nativa, roca fosfórica, las arenas silíceas, cobre, entre otros, han sido llamados estratégicos para el desarrollo de la economía del país que servirán además para la reactivación económica de las comunidades (Agencia Nacional de Minería, 2015). Así mismo, “la diversificación de la canasta minera permitirá contar con un número más amplio de minerales” (Ministerio de Minas y Energía, 2021), incluidos los que sirven para construcción de los paneles solares fotovoltaicos.

Para la nación será muy importante tener cada vez más claro cuáles son los minerales que podrán ser de utilidad en los años venideros, puesto que, a partir de proyectos presentados en

los cursos de Depósitos Minerales y las líneas del Semillero de Geología Económica, se ha logrado identificar una brecha relacionada con la investigación de minerales con usos determinados para tecnologías de energías renovables. Además de comprender la situación mundial *versus* la de nuestro país, y que con el creciente auge que presentan las energías renovables, en especial la fotovoltaica, se pueda establecer el propósito de esta investigación. Los estudios y leyes deben ir en línea para la consecución de estas tendencias que, igualmente, mejorarían la calidad de vida de muchos colombianos que, hasta el momento, no cuentan con este recurso tan importante y, del mismo modo, un aporte al PIB que se le haría al país debido a los grandes proyectos extractivos que se realizarían (Hernández et al., 2011).

2. Generalidades

Teniendo en cuenta lo discutido en la introducción, Colombia, al ser un país privilegiado en cuanto a radiación solar, con una exposición de luz solar de hasta 12 horas diarias, 365 días del año, que, sumados a la tecnología fotovoltaica implementada en el mundo, hacen que el país sea uno de los territorios con mayor capacidad de energía de producción fotovoltaica (Velasco, 2019). De los mayores **problemas** de la nación es la determinación de los minerales que serían de aprovechamiento, la disponibilidad, calidad y correlación de estos con las tecnologías a usar para la construcción de los paneles solares con materias primas nacionales o entrar fuertemente al mercado de exportación de minerales importantes en la industria solar.

El país, también busca poder cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en este caso, abordando especialmente el séptimo objetivo, Energía asequible y no contaminante, que comprende, entre otros, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, al igual que aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

No obstante, la falta de directrices de Colombia en cuanto a la relación entre minerales y funcionalidades, hacen que la presente iniciativa tenga **justificación**, pues, a pesar de tener determinados los minerales para diversificar la canasta por el Ministerio de Minas y Energía (MME), no hay una guía específica en el país donde se encuentre todos los minerales necesarios para implementar la energía solar fotovoltaica, siendo actores directos en

exportación de la materia prima de estos o para uso del mercado nacional y satisfacer las necesidades de electricidad.

Se parte de la **hipótesis**, de que Colombia cuenta con condiciones naturales favorables referente a la cantidad del recurso solar y disponibilidad de materias primas para la elaboración de paneles solares, así mismo, que existe un potencial nicho de mercado para la explotación de otros minerales requeridos que no se desarrollan por el momento en el país.

En la Tabla 1, se presentan las regiones del país consideradas con el mayor potencial de energía solar aprovechable para la generación de energía eléctrica. Dado que en estas regiones la incidencia de la luz solar es significativa, es aún más sencillo sacar provecho y recibir dicha energía en los sistemas de paneles fotovoltaicos requeridos, siendo así, una electricidad con grandes perspectivas en el país.

Tabla 1. Regiones del país con mayor potencial aprovechable para la generación de energía eléctrica.

Fuente: (Rodríguez, H., Bogotá, 2008).

Región del país	Radiación Solar (kWh/m ² /año)
Guajira	2 000 - 2 100
Costa Atlántica	1 730 - 2 000
Orinoquía-Amazonía	1 550 - 1 900
Región Andina	1 550 - 1 750
Costa Pacífico	1 450 - 1 550

De la misma manera, los suelos colombianos cuentan con una variedad de recursos minerales, resultado de procesos endógenos y exógenos, de carácter geológico, geoquímico, geofísico y metalogénico, que, junto con el cambio climático durante millones de años, moldearon la fisiografía y los yacimientos minerales que encontramos en Colombia (Prieto et al., 2019a). Se presenta en el sentido ‘Este-Oeste’ una marcada tendencia metalogénica que es propicia para la formación de yacimientos y/o depósitos minerales (Agencia Nacional De Minería, 2015) que son de mayor interés mundial.

Como **Objetivo general** se plantea el categorizar los minerales críticos en Colombia a partir de la diversificación de la canasta mineral del MME para su uso en energía solar fotovoltaica,

seguidamente, se plantean como **Objetivos específicos:** (1) Generar el Estado del Arte para la relación de minerales críticos vs tecnologías de ESF a nivel mundial (incluye Colombia). (2) Categorizar los minerales críticos a nivel país para su uso en la energía solar fotovoltaica. (3) Identificar áreas de ocurrencia geológica en el país de minerales críticos para paneles solares fotovoltaicos.

3. Marco conceptual

Las fuentes energéticas pueden dividirse en tres principales: Combustibles fósiles, recursos nucleares y energías renovables (Demirbas, 2000 como se citó en Hussain et al., 2017). Las energías renovables, tecnologías sostenibles y libres de contaminantes, son algunas de las soluciones que se han encontrado para contrarrestar los efectos del calentamiento global (Hussain et al., 2017).

Las energías renovables se pueden usar para la producción de energía una y otra vez, dentro de estas están: energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía marina, energía de biomasa, biocombustibles y muchas más (Rathore & Panwar, 2007). Estas tienen la capacidad de generar energía libre de contaminantes al aire y gases de efecto invernadero al emitir poca cantidad o nada de estos gases (Panwar et al., 2011). No obstante, las empresas mineras deben integrar actividades sostenibles, para satisfacer las necesidades presentes sin que se comprometan las futuras, en las prácticas mineras (Bartels, 2014). Además del desarrollo de políticas mineras y procedimientos, que permitan gestionar los impactos ambientales negativos que puede generar la extracción de minerales (Famiyeh et al., 2021). Esta industria de las energías renovables se ha tornado en un campo líder en este momento, debido a la necesidad constante de las personas de tener servicios básicos como lo es la electricidad y, que, a su vez, sea renovable, puesto que la mayoría de los recursos energéticos usados en el momento provienen de fuentes no renovables.

El país en estos momentos se encuentra en la búsqueda de lograr diversificar su portafolio minero para atraer la inversión y que

“La diversificación de la canasta minera permitirá contar con un número más amplio de minerales. Trabajamos sobre dos premisas básicas:

1. La ampliación del conocimiento geológico.

2. Las oportunidades globales de cara a la puesta en marcha de nuevas tecnologías y la apuesta por fuentes renovables de energía.

De acuerdo con el Banco Mundial, el desarrollo de fuentes alternativas para la producción energética y la mitigación y adaptación al cambio climático irá de la mano de una mayor demanda por minerales. El cobre, el níquel o el litio se verán impactados debido a su utilidad en la construcción de infraestructura para energías renovables, como las turbinas eólicas” (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Este tipo de iniciativas, para el país son donde, se tiene la oportunidad de entrar a industrias, como la energética renovable (UPME et al., 2019), específicamente energía solar fotovoltaica, con lo que se requiere en cuanto a materias primas para las diferentes tecnologías usadas en paneles solares.

Materiales como la plata para tintas conductoras, que por sus características fotosensibles les permite a las celdas fotovoltaicas transformar la luz en electricidad; las arenas silíceas que son el principal componente de las obleas solares que componen el panel y el material más usado para su construcción ya que hace de carga positiva y negativa; el litio que es usado para la fabricación de las baterías debido al potencial electroquímico de este; el cobre que se utiliza para los cables que entregan la corriente alterna; el aluminio para los soportes del panel dada su resistencia a la corrosión; fósforo y boro que sirven para el dopaje del silicio para que la energía pueda fluir a través de la oblea de silicio (Sampaio & González, 2017) .

Con los materiales anteriormente mencionados, la industria energética busca poder hacer frente a los requerimientos del mundo en los distintos escenarios venideros (Figura 1), donde se estima que el 90 % del aumento en la demanda de las próximas dos décadas deberá ser cubierta por alternativas como los paneles solares o las turbinas de eólicas. Con esta proyección se confirma que la transición energética mundial es una realidad (Hook & Sanderson, 2021).

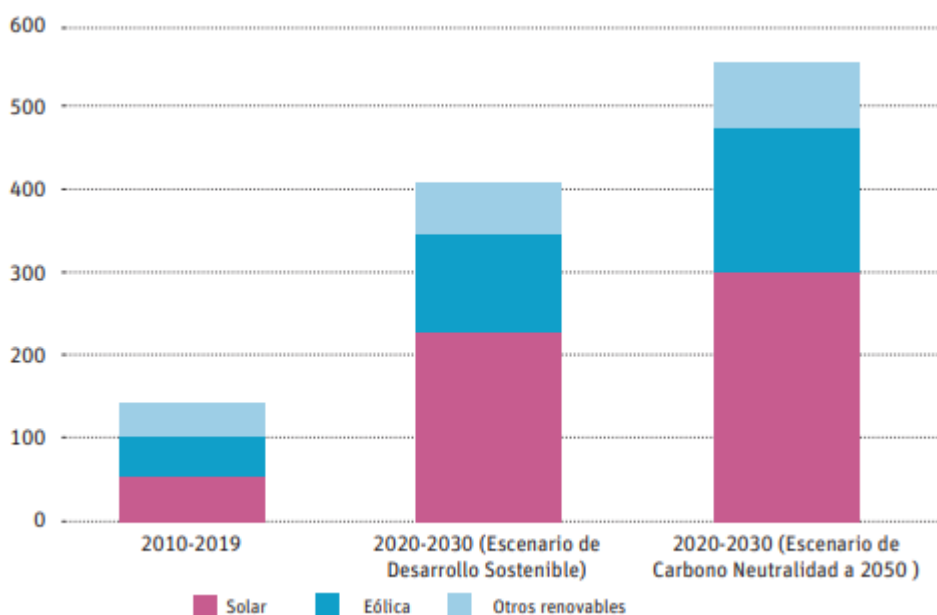


Figura 1. Promedio anual mundial de capacidad de energías renovables (MW) adicionada en el escenario de Desarrollo Sostenible y el escenario de Carbono Neutralidad a 2050.

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

El ministro de Minas y Energía, Diego Mesa, en el 2021 anunció que con el apoyo del MME, la Agencia Nacional de Minería (ANM) y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), se declararon estratégicos o críticos el oro, el platino, el cobre, el fosfato, el potasio, el magnesio, el carbón (metalúrgico y térmico), el uranio, el hierro y el coltán (niobio y tantalio) (López, 2021). Con esto el país espera hacer frente a los retos que se presentan las nuevas tecnologías renovables, como la solar fotovoltaica.

Los sistemas fotovoltaicos, entonces, consisten en células solares, dispuestas en paneles solares, que transforman directamente la energía solar en eléctrica (Espejo, 2004). Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía del sol para generar electricidad debido a un efecto llamado “efecto fotovoltaico”, que aprovecha la energía solar (fotones), generando cargas positivas y negativas en dos semiconductores próximos de distintos tipos, lo que genera un campo eléctrico que producirá corriente eléctrica (Iberdrola S.A, 2021).

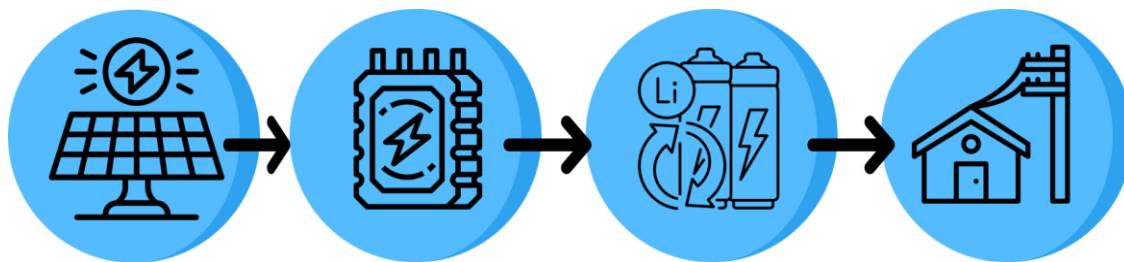


Figura 2. Esquema básico de funcionamiento del sistema fotovoltaico. Elaboración propia. Fuente: (Sampaio & González, 2017).

Se expone el esquema básico acerca de cómo funciona el sistema fotovoltaico (Figura 2), primero tenemos el panel que convierte la energía solar en corriente continua, esta pasa por el inversor para transformarla a corriente alterna, luego parte de esta corriente queda almacenada en baterías para esto, finalmente la corriente pasa al hogar o empresa a través de los cables dispuestos para ello (Sampaio & González, 2017).

4. Metodología

A partir de los objetivos se plantean los siguientes estados metodológicos:

4.1 Estado del arte para la relación de minerales críticos vs tecnologías de energías renovables

Esta etapa se basó en la recopilación de bibliografía acerca de los minerales usados en estas energías, y las tecnologías necesarias para esta, en bases de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), Science Direct, la ANM y el MME, también se recopiló información de proyectos previos realizados; para proceder a la organización y clasificación haciendo uso de Mendeley como base de datos para administrar la información. Una vez organizada la información, se procedió investigar las políticas definidas por el MME acerca del curso de las energías renovables en el país, incluyendo minerales críticos en el caso específico de la energía solar fotovoltaica como la de mayor interés para el presente proyecto.

Asimismo, se aplicaron metodologías de Vigilancia Tecnológica, con margen de búsqueda de los últimos 15 años, para la recopilación de la información de tecnologías que se usan con las materias primas asociadas, lo que llevó finalmente a la construcción del árbol y/o radar tecnológico donde se logra simplificar por mineral y/o elemento definido, además de la relación de estos con la funcionalidad en las distintas tecnologías usadas en esta industria.

4.2 Categorización a nivel país para el desarrollo de las tecnologías con los minerales críticos

Se hizo necesaria la creación de matrices a partir de los minerales y sus depósitos, o yacimientos, donde se relacionan estos dos ámbitos y, que sean guía en el enfoque de esfuerzos que realiza la nación. Para ello, se usaron criterios geológicos (precursores litológicos, génesis, asociaciones mineralógicas y el tipo de depósito en Colombia), mineros (cantidad de títulos mineros por mineral, departamentos con títulos mineros y si el mineral es estratégico para la MME, ANM, UPME) y tecnológicos (pureza del mineral en los depósitos colombianos vs. la pureza requerida por la industria), ya con esto, se realizó una priorización a partir de un análisis ponderado donde se pueda identificar cuales minerales tienen mayor potencial de aprovechamiento en el país.

Para ponderar los resultados de la matriz se le otorgaron valores entre 1 como la menor puntuación, 3 siendo punto medio y 5 máxima puntuación. Al realizar las puntuaciones se revisaron las columnas de precursores comparándolos con la disponibilidad de estos en el país, si la génesis tiene relación con la encontrada en Colombia, el tipo de depósito que está disponible en Colombia, un versus entre la pureza del mineral que se tiene en los depósitos colombianos y la necesaria por la industria, la cantidad de títulos mineros, los departamentos donde se encuentran los títulos y si los insumos eran de alguna manera estratégicos o críticos por parte de la ANM, MME y la UPME.

4.3 Identificación de ocurrencia geológica de minerales

Para esta etapa se hizo búsqueda de la cartográfica base (p.e. Mapas del SGC, bases de datos de la ANM), informes técnicos, yacimientos o depósitos en los catálogos del SGC y la ANM, con el fin de identificar las zonas de interés para la energía solar fotovoltaica de forma cartográfica (Anexo 1).

Con ayuda de las herramientas de ArcGIS PRO se seleccionan las zonas, a ellos se les relaciona con un criterio de calidad necesaria para el uso de estos en la energía solar fotovoltaica. Se espera, poder así, obtener como resultado mapas a nivel país (Escala 1:500.000), teniendo en cuenta los departamentos con potencial minero y zonas donde se puedan hallar los principales depósitos o yacimientos de minerales estratégicos o críticos a

nivel nacional, asimismo, un mapa con las zonas que tengan conflicto con los polígonos definidos de áreas protegidas de Parques Nacionales.

5. Resultados

5.1 El estado del arte para la relación de minerales críticos vs tecnologías de energías renovables

El mercado fotovoltaico tuvo una tasa de crecimiento del 41% entre los años 2000 y 2015. China y Taiwán son dos de los países que han aumentado su industria con altas tasas de crecimiento, además a finales del 2015 tenían una cuota de mercado de alrededor de 71% de las ventas (Sampaio & González, 2017). Países europeos como Alemania, Dinamarca, y España incentivan a los consumidores a generar su propia energía renovable (Sampaio & González, 2017).

En el 2020, China lideró el mercado solar con una participación del 48.2 %, seguido de países como Estados Unidos, Vietnam, Japón, Australia, entre otros (Figura 3).

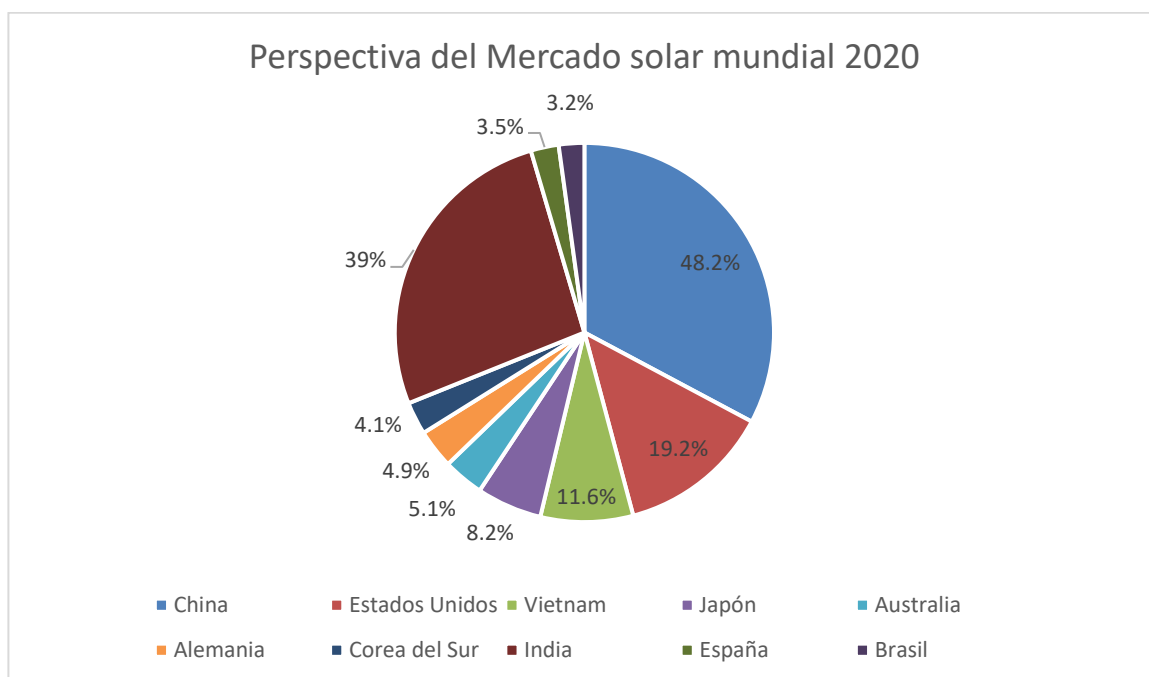


Figura 3. Participación en el mercado solar por países (top 10) alrededor del mundo en el año 2020. Fuente: SolarPower Europe, 2021.

Colombia espera poder generar alrededor del 12 % de su electricidad a partir de las fuentes renovables eólica y solar (Ministerio de Minas y Energía, 2020). Además, en cuanto a América latina, el país ocupa el segundo puesto (25 a nivel mundial) en el Índice de transición energética 2020 (Figura 4), incluso por delante de países como Chile y Brasil (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Esto significa que la nación se encuentra con buenos indicadores de crecimiento, desarrollo económico, sostenibilidad ambiental y nivel de preparación para la transición a energías renovables (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

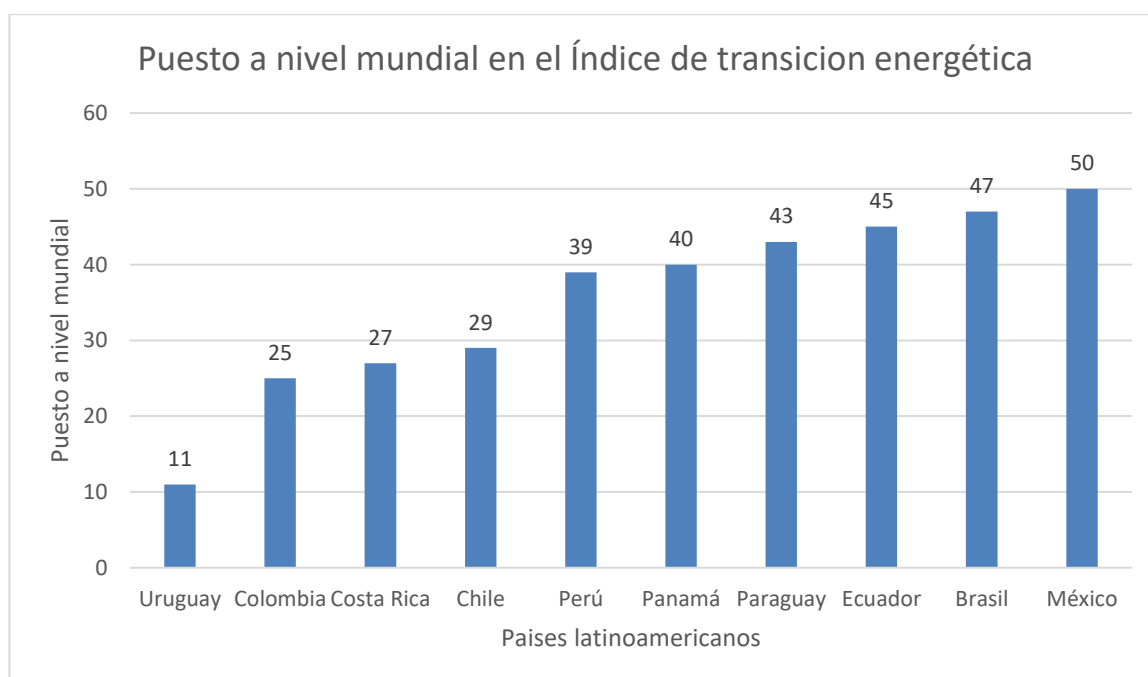


Figura 4. Top 10 de países de América Latina en el Índice de transición energética realizado por el Foro Económico Mundial 2020. Elaboración propia.
Fuente: Foro Económico Mundial, 2020.

Es entonces, a partir de allí el interés que suscita el mercado fotovoltaico para que nuestro país pueda seguir avanzando en cuanto a desarrollo y generación de energía a partir de fuentes renovables.

Los sistemas solares fotovoltaicos están compuestos por distintas partes, estas a su vez están conformados por diferentes elementos, que pueden variar de acuerdo con el tipo de panel que se construye.

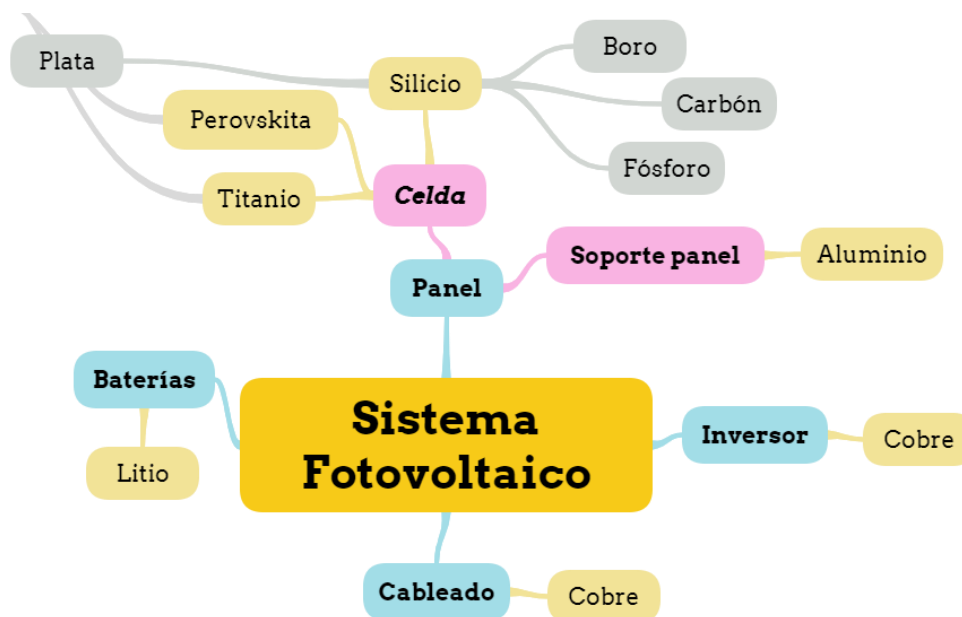


Figura 5. Diagrama con las diferentes partes del sistema fotovoltaico. Elaboración propia.
Fuente: (Sampaio & González, 2017).

Podemos encontrar las cuatro partes más importantes del sistema fotovoltaico (Figura 5), con las baterías, inversor, cableado y panel, que a su vez se divide en celda y soporte, con los principales minerales asociados a estos (Sampaio & González, 2017).

La parte más grande y que emplea mayores elementos es el panel solar, el cual se divide en celda y soporte de panel, para efectos prácticos del trabajo se usarán el conjunto del panel solar, además que es en esta donde se produce la generación de electricidad, lo cual la hace sumamente importante para el funcionamiento del sistema (Sampaio & González, 2017).

Existen distintos tipos de paneles solares, esto depende del mineral con el que se construyan, se muestran los principales tipos de paneles solares (Figura 6) que se pueden encontrar y los insumos minerales asociados.

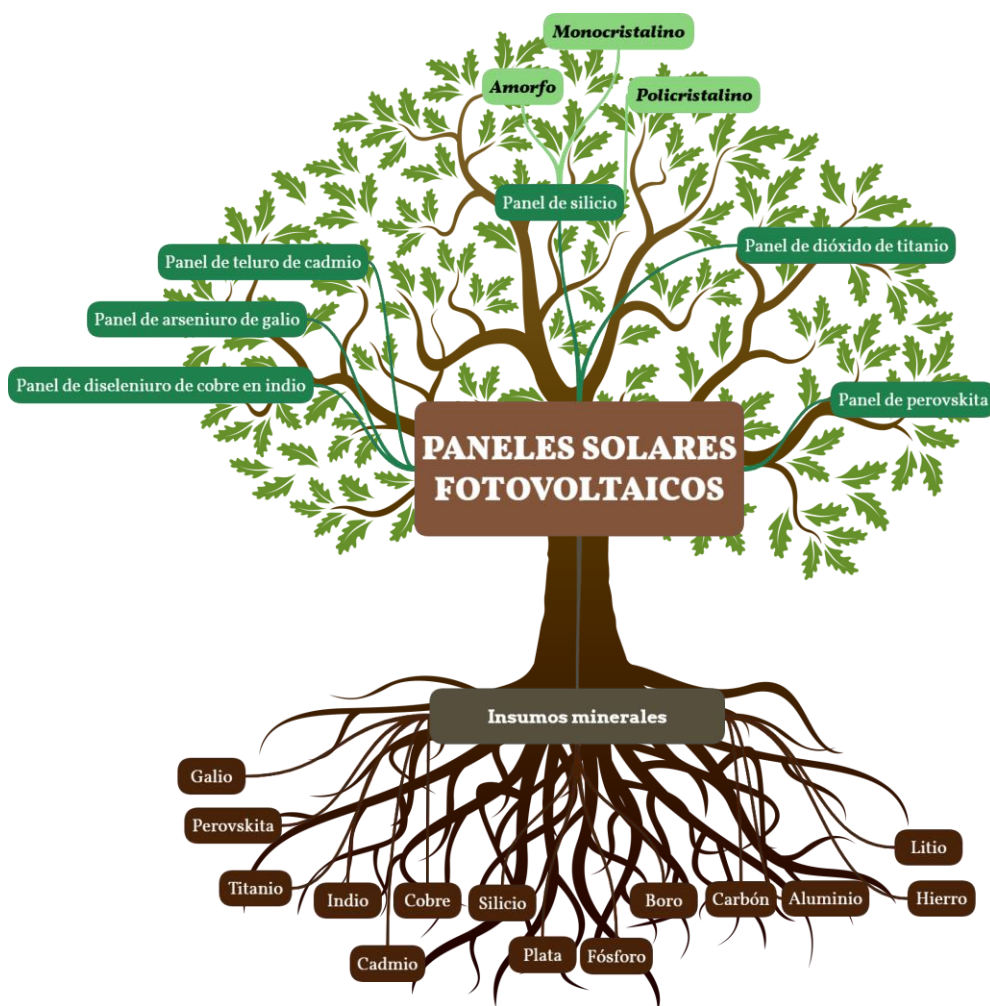


Figura 6. Árbol tecnológico con los principales paneles solares y minerales asociados a estos.
Elaboración propia.

Fuentes: Sampaio & González, 2017; Noguera et al., 2018;

Dentro de esos paneles solares enunciados (Figura 6), se escogen los paneles solares de silicio para la realización del trabajo, en sus tres variaciones puesto que la diferencia es el estado del silicio que requiere. Estos son los más usados en este momento por la industria solar, el silicio monocristalino puede alcanzar un máximo del 32 %, y en estudios de laboratorio alcanzar un tope del 29 %, pero actualmente el silicio utilizado en módulos comerciales no sobrepasa el rango de eficiencia de 14 a 16 %, mientras que el silicio policristalino no sobrepasa el rango de eficiencia de 13 a 15 % (Noguera et al., 2018).

El panel solar está compuesto de pequeñas celdas o células, generalmente una celda fotovoltaica está conformada por dos laminas delgadas de materiales semiconductores que se superponen, en este caso silicio (Espejo, 2004).

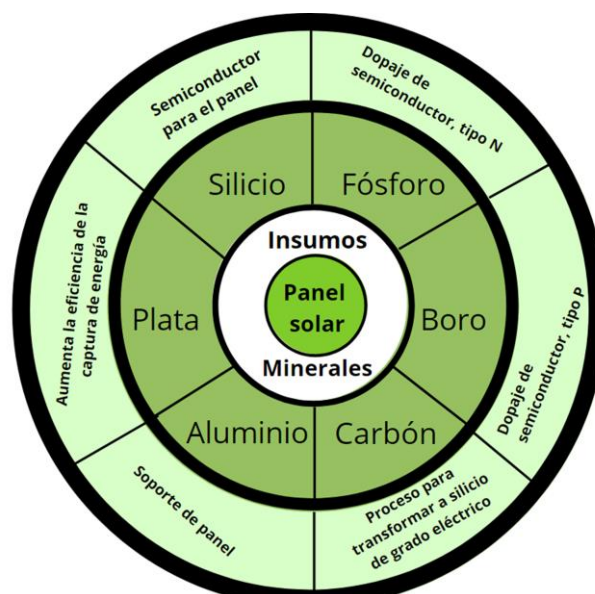


Figura 7. Radar tecnológico de insumos minerales que se necesitan para construir un panel solar de silicio. Elaboración propia.
Fuente: Noguera et al., 2018.

En el caso de los compuestos por silicio, para generar el silicio de grado solar se realizan procesos con carbón hasta llevarlo a grado solar, asimismo se necesita dopar este mineral con boro para tener un semiconductor tipo P y con fósforo para el tipo N, ya que cuando los fotones de la radiación solar inciden en una célula o célula, inciden en la primera capa (la capa superficial) y son absorbidos por los materiales semiconductores (silicio), dan lugar a un salto de electrones que provocan el movimiento hacia la superficie de la célula y cuando los electrones se liberan, se crean huecos o lagos de carga positiva en la capa. Así, se generan dos cargas, una positiva y otra negativa, lo que genera una corriente constante mientras la luz del sol incide sobre la célula (Noguera et al., 2018).

5.2 La categorización a nivel país para el desarrollo de las tecnologías con los minerales críticos

Dentro de las calidades que debe tener cada insumo mineral se define que las arenas silíceas deben tener 99.999 9 % de pureza del silicio (Si) (Xakalashé & Tangstad, 2012).

En la plata (Ag), se necesita el 99.9 % (Chen et al., 2011) en pureza de este mineral. Colombia es un país que la mayor parte de sus explotaciones de plata, están asociadas a la minería del oro, y la separación de estos requiere de complejos procesos que en país no se realizan, por lo cual se exporta como un agregado del oro en lingotes que separan en el exterior (UPME, 2018).

En el caso del fósforo, la calidad necesaria que debe tener el material para participar en el dopaje del silicio debe ser de alrededor de 98% de P_2O_5 (Zhou et al., 2021), pero la mayoría de los depósitos en Colombia tienen un grade entre 5 y 31% de P_2O_5 que es considerado importante en esta industria (UPME, 2017a) ya que a través de distintos procesos puede ser llevado a la concentración necesaria.

Para poder llevar a cabo un enlace entre los requerimientos de la industria y la disponibilidad que hay en Colombia de minerales, a partir de los cuales se pueda extraer la materia prima para la construcción de los paneles, se realizan una tabla y una matriz de valoración (ver Anexo 2), las cuales permiten sintetizar la información más relevante y priorizar los minerales para la posterior identificación de la zona de ocurrencia geológica potencial en el país.

Dentro de los aspectos más relevantes para construcción de esta tabla (Anexo 2), se tomaron en cuenta los insumos requeridos en el mercado fotovoltaico, características litológicas y propias de los depósitos (génesis y asociaciones mineralógicas), además de la parte minera con el número de títulos vigentes en el país y departamentos donde están ubicados, igualmente si esta materia prima está presente dentro de las prioridades de la UPME y el MME.

La mayor ponderación, usando los criterios descritos anteriormente, la obtuvo el insumo plata (30), fosforo y carbón presentan el mismo valor (28), seguido del silicio (26), aluminio y boro (16 y 10) respectivamente (Figura 8).

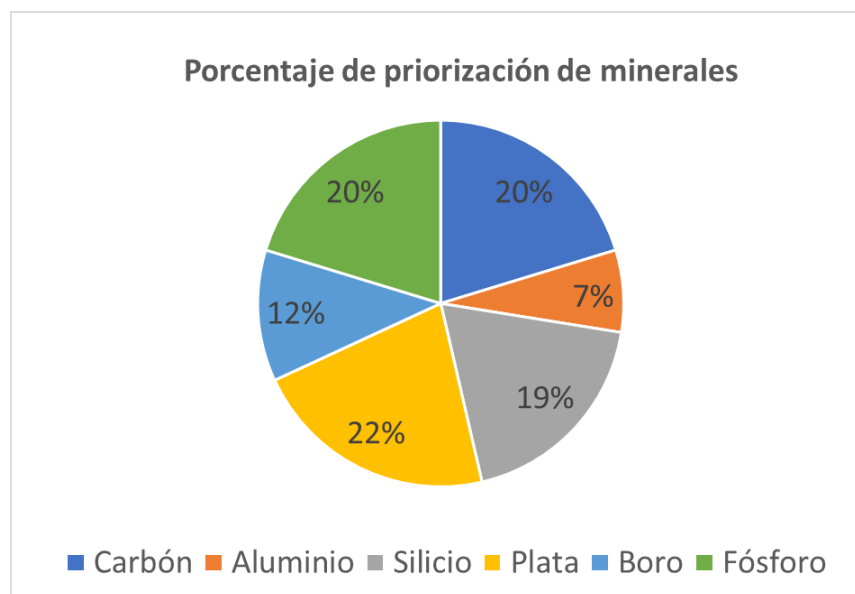


Figura 8. Diagrama de pastel representativo con resultado de las matrices para priorización de insumos minerales. Elaboración propia.

Con la verificación de estos minerales, a pesar de que el carbón es uno de los elementos más estudiados, se tienen reservas estimadas y probadas, y ser uno de los elementos de explotación más importante de nuestro país (Agencia Nacional de Minería, 2020), sin embargo, no se toma en cuenta debido a que no se agregaría un mayor valor a la investigación debido a que las zonas de este ya están identificadas. Los depósitos de boro en nuestro país no se han documentado hasta el momento y el aluminio no tiene por el momento títulos mineros vigentes en Colombia (UPME, 2017b), por lo cual tampoco se considera la información de estos para el trabajo.

Lo cual deja a la luz tres insumos principales: Plata, Fósforo y Silicio, con los cuales se realiza la posterior identificación de las zonas potenciales en la geografía colombiana que cumplan o se acerquen más a los requerimientos de la industria.

5.3 Identificación de ocurrencia geológica de minerales

Con el análisis de los diferentes insumos presentados en el objetivo número dos, y la obtención de los tres insumos principales dados los resultados de la matriz, se procede a delimitar la búsqueda geológica y minera, que permita la obtención de estos insumos en el país de manera más cercana a los requerimientos que tiene la industria en este momento.

Requerimientos en cada uno de los insumos:

Tabla 2. Requerimientos de calidad del insumo de la industria vs la disponibilidad potencial hallada en el país con base a lecturas previas de documentos de la ANM, SGC y el MME.

Insumos	Pureza del insumo requerido en la industria	Pureza del insumo: Disponibilidad más cercana en Colombia
Plata	99.9 % (Ag) (Chen et al., 2011)	95 – 99 % (Ag) (Gallego, A. & Akasaka, M, 2007)
Fósforo	98% (P_2O_5) (Zhou et al., 2021)	5 – 31 % (P_2O_5) (Cathcart et al., 1967; ANM, 2015)
Silicio	99.999 9% (Si) (Xakalashé & Tangstad, 2012)	98 – 99 % (SiO_2) (UPME, 2017c)

En cuanto a la plata (Ag), la principal fuente de obtención de esta es de minería asociada al oro, siendo en el país un subproducto de esta minería.

Esta se encuentra distribuida en las regiones de Amazonía-Orinoquía; las Cordilleras Oriental, Central, Occidental, y los valles del Magdalena, Cauca y la Costa Pacífica (Prieto et al., 2019b).

Dentro de los yacimientos disponibles en el país se encuentra plata en Filones Epitermales, que se relacionan con vulcanismo subaéreo, con composición félsica-intermedia, texturas porfídicas y afaníticas, que se asocian a rocas hipoabisales y volcánicas de la Cordillera Occidental y Central (Prieto et al., 2019b). Tienen una mineralización complicada compuesta

por abundante pirita + galena + esfalerita ± calcopirita ± pirrotina ± arsenopirita ± estibina, sulfosales de arsénico, selenio y telurio, con tetrahedrita, covelina y scheellita ocasional (Prieto et al., 2019b). La plata en este tipo de yacimientos es más abundante que el oro (Prieto et al., 2019b).

Los Filones hidrotermales no diferenciados, se localizan en la Cordillera Central, en el Macizo de Santander y en la Sierra Nevada de Santa Marta, y presentan edades Triásico-Jurásico y Cretácico. Con mineralizaciones de pirita, galena, esfalerita ± calcopirita ± pirrotina ± estibina ± pirrotina ± arsenopirita ± tetrahedrita; raras veces proustita, scheelita y uraninita. La ganga común es cuarzo ± feldespato-K ± calcita. la plata se recupera principalmente del *electrum* y de la galena (Prieto et al., 2019b).

Por último, en las zonas argentíferas se extrae como el subproducto del oro, como en:

Remedios en el departamento de Antioquia; del sur del departamento de Bolívar; de las minas de Marmato en el departamento de Caldas; de la región central del departamento de Antioquia; del occidente de Antioquia; de la región Chocó-Antioquia; de las minas de Vetas y California en el departamento de Santander, y en los depósitos aluviales de los departamentos de Antioquia, Chocó y Nariño. Segovia, Remedios, Zaragoza, Marmato y sur de Bolívar son las más importantes fuentes actuales de producción de plata; Vetas-California y la región Chocó-Antioquia son fuentes potenciales promisorias importantes. (Prieto et al., 2019b)

El fósforo (P_2O_5) en Colombia se obtiene a partir de yacimientos de fosforitas que están localizadas a lo largo de la cordillera Oriental, en secuencias de origen marino de edades Cretácicas que forman parte de las formaciones La Luna y Ermitaño, y los Grupos Olini y Guadalupe (Cathcart et al., 1967; ANM, 2015). Estas contienen muy variable el porcentaje de P_2O_5 , entre 20 y 30%.

Las zonas potenciales que se encuentran de este siguen siendo a lo largo de la Cordillera Oriental, debido a las secuencias de origen marino que hay en toda esa zona (ANM, 2015).

Para el silicio (Si), la principal fuente de obtención a nivel mundial proviene de las arenas silíceas y en el caso de Colombia, la mayoría de las fuentes extractivas de este material se asocian a depósitos no consolidados y algunos a estratificados o por meteorización (Prieto et

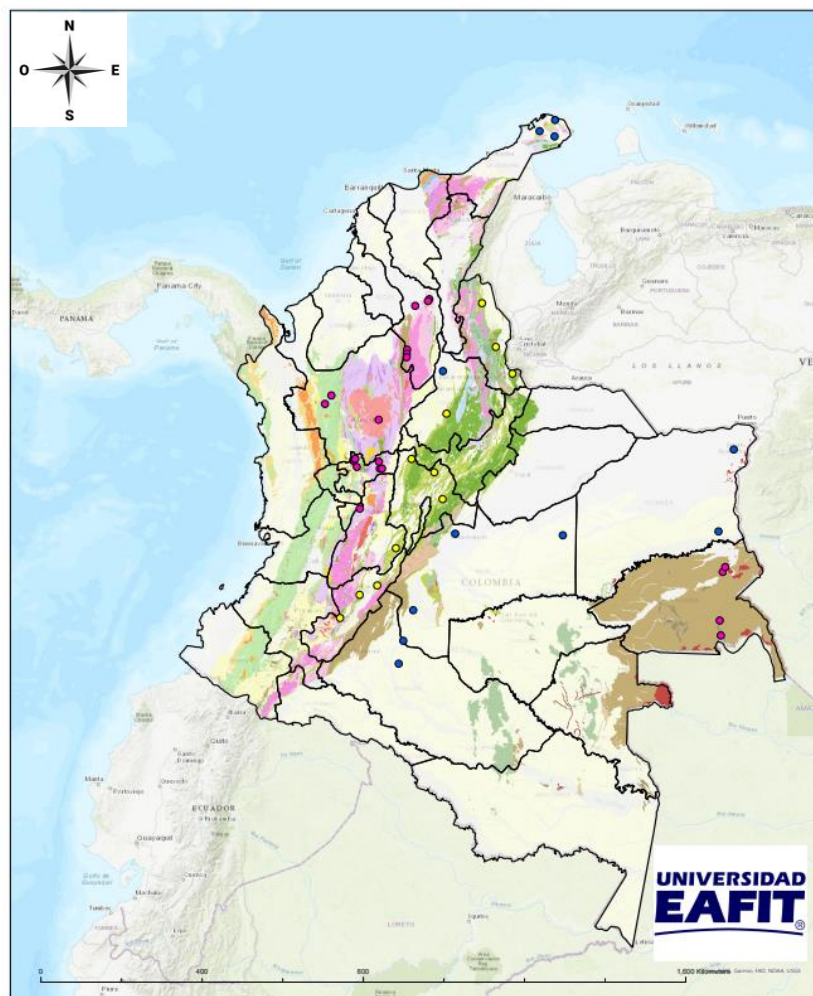
al., 2019a). Los sedimentos cuaternarios como terrazas, abanicos aluviales, conos de deyección, de playas, glaciales, derrubios o coluviones (Prieto et al., 2019a).

La sucesión de unidades estratigráficas que constituyen los depósitos de mayor interés económico para la obtención de arenas y gravas, están en formaciones de los períodos Cretácico, Terciario y Cuaternario en la Cordillera Oriental (Prieto et al., 2019a).

Para la Cordillera Occidental, se encuentra como grupo de interés a las sedimentitas del Neógeno, como las formaciones Guachinte (miembro La Cima), Ferreira (miembro Suarez), y Esmita (Prieto et al., 2019a), para la caracterización de estas arenas debido al contenido de silicio que pueden tener.

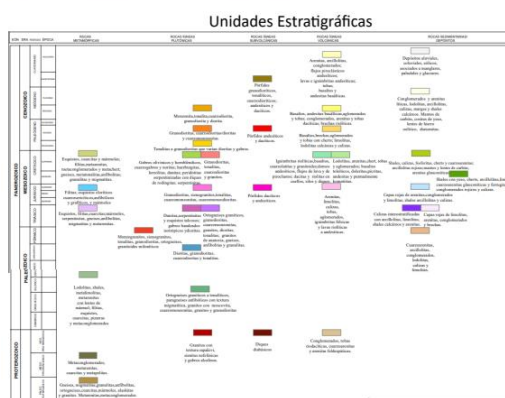
En cuanto a la Cordillera Central, la fracción que presenta interés es la compuesta por las sedimentitas de la Formación Amagá, con una edad Oligoceno tardío - Mioceno tardío (Sierra et al., 2003).

Las zonas mencionadas anteriormente se pueden encontrar en el mapa (Figura 9) donde están las zonas con mayor potencial de cada uno de estos insumos en el país, asimismo, se realiza un mapa preliminar de departamentos con potencial minero en Colombia, de insumos con mayor cercanía a las características que requiere la industria solar (Figura 10), tomando en cuenta prospecciones realizadas (p.e UPME, 2017a; UPME, 2017c; Prieto et al., 2019a; Prieto et al., 2019b; Sepúlveda et al., 2020) y el catastro minero de la nación, el cual se encuentra en la página de la ANM.



Escala
1 : 500,000

Unidades estratégicas que contienen los elementos
 •Silicio •Plata •Fósforo



Leyenda modificada de: (Sepúlveda et al., 2020)

Figura 9. Mapa de Unidades Estratégicas con contenido potencial de silicio, plata y fósforo para su uso en paneles solares fotovoltaicos. Elaboración propia.

Fuentes: UPME, 2017a; UPME, 2017c; Prieto et al., 2019a; Prieto et al., 2019b; Sepúlveda et al., 2020.

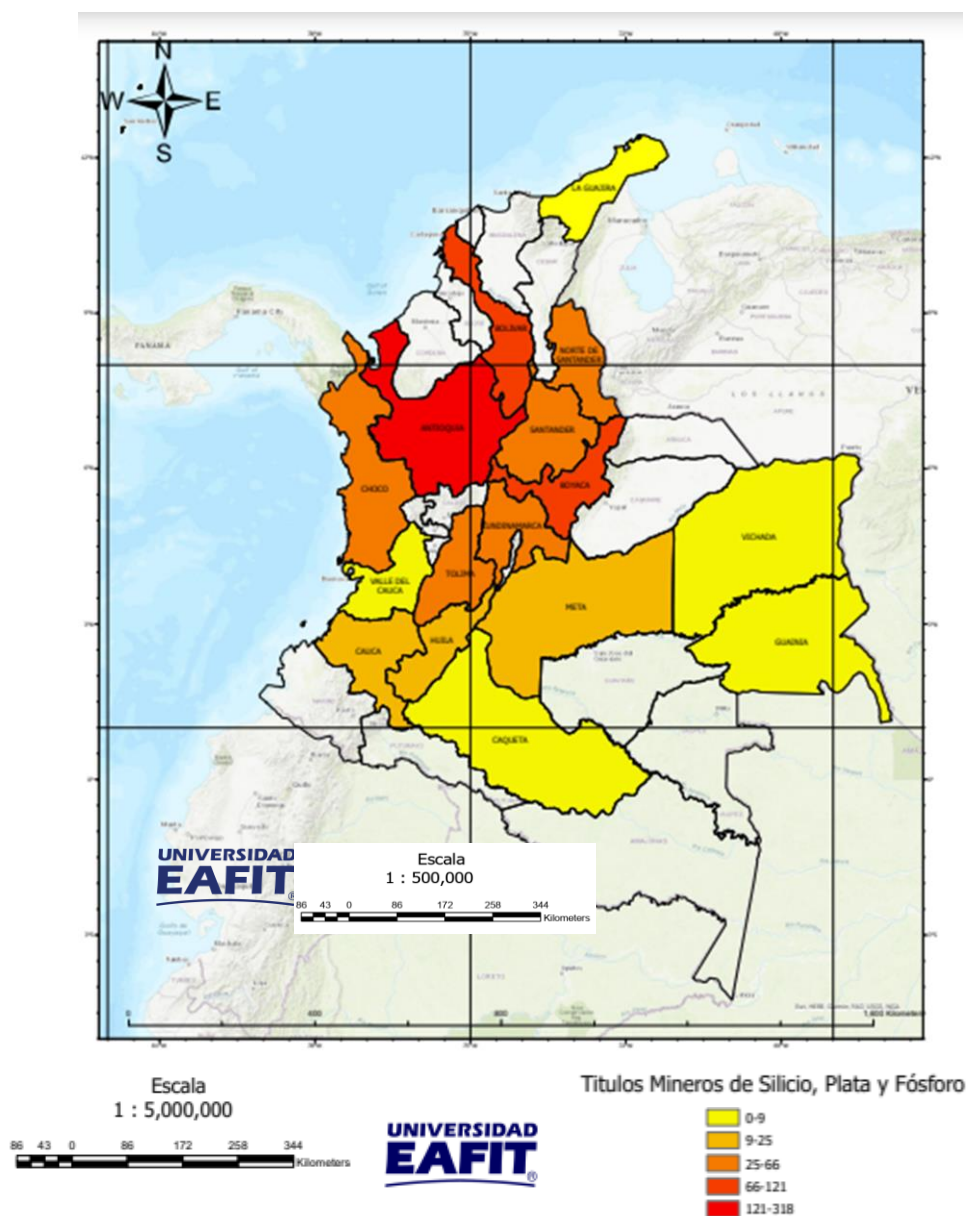


Figura 10. Mapa de títulos mineros por departamento, asociados a minerales, con concentraciones requeridas por la industria solar fotovoltaica. Elaboración propia
Fuentes: SGC, ANM.

6. Discusión

A la luz de los resultados obtenidos, como las perspectivas del país en cuanto a la generación de energía a partir de fuentes renovables, los insumos necesarios para la construcción de los paneles solares fotovoltaicos, se puede determinar que Colombia deberá fortalecer su sistema de extracción para llegar a ser de alguna manera competidor, a manera de exportador, de los insumos que se necesitan.

Se debe actualizar el mapeo geológico del país, puesto que dentro de los mapas consultados del SGC y la UPME, muchas veces había vacíos de información (Tabla 3). Además de tener caracterizaciones geoquímicas y mineralogía, deberían incluir tamaños de grano (en los casos que aplica), pureza del material que sale de la mina, entre otros, puesto que eso permite confirmar o descartar de manera certera algunas de las zonas que se consideran en este momento potenciales, para la extracción de cualquiera de los minerales que el país requiera para beneficio del mercado nacional o internacional.

Tabla 3. Vacíos de información más comunes encontrados en los mapas consultados de la UPME y el SGC. Elaboración propia.

# Mapas consultados	Vacíos de información	Referencias
6	Tamaños de grano (en los casos que aplica), pureza del material, falta de información de minerales hacia la parte sur del país.	UPME, 2017a; UPME, 2017c; Prieto et al., 2019a; Prieto et al., 2019b; Sepúlveda et al., 2020.

En cuanto a las calidades que requieren los distintos elementos (Tabla 2), el silicio al estar en un bajo porcentaje de pureza en algunas de las arenas del país (UPME, 2017c), se deben hacer muchos procesos para lograr obtener cada uno de los grados decimales requeridos (Xakalashé & Tangstad, 2012), lo cual incrementaría su costo además de cercar el radio de búsqueda de estos depósitos tan importantes.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que los resultados de las arenas silíceas están sesgados, debido a que parte del territorio nacional no cuenta con cartografía geológica de este (UPME,

2017c), como, por ejemplo, hacia las zonas más distantes de los llanos orientales y parte de la región del Amazonas.

El país está en un punto crítico (Figura 1 y Figura 3), puesto que se necesitan los recursos energéticos para satisfacer la demanda nacional (Ministerio de Minas y Energías, 2020), ser sostenibles con el medio ambiente a través de fuentes energéticas renovables (Ministerio de Minas y Energías, 2021).

Realizando una comparación entre Colombia y países, como China o Usa, donde tienen un alto porcentaje de participación en el mercado de la energía solar, 48.2 % y 19.2 % respectivamente (SolarPower Europe, 2021), aún faltan muchas más acciones por realizar para poder diversificar la canasta energética del nuestro, como el mejoramiento de procesos mineros para poder llevar a cabo las distintas transformaciones que requieren los minerales para llegar a ser competitivos en el mercado mundial (Figura 3) o regional (América).

Las discrepancias encontradas entre los minerales estratégicos o críticos [oro, platino, cobre, fosfatos, potasio, magnesio, el carbón (metalúrgico y térmico), uranio, hierro y coltán (niobio y tantalio) (López, 2021)], propuestos por el MME, la ANM y la UPME, pueden ser reconsiderados con los encontrados en este trabajo (silicio, plata, fósforo) si se confirman las potencialidades.

En términos de minerales para la industria fotovoltaica, de los departamentos, se deben tener en consideración las zonas protegidas de nuestro país (Anexo 3) y que los procesos mineros sean encaminados a la sostenibilidad debido a las intenciones de Colombia de cumplir con los ODS propuestos por la Organización De Las Naciones Unidas (Bartels, 2014; Ministerio de Minas y Energías, 2021).

7. Conclusiones y recomendaciones

Se encuentra que, de acuerdo con los criterios considerados en este estudio, el silicio, el fósforo y la plata, son los insumos con mayor potencial mineral en el país, para uso como materia prima nacional y/o exportación en la industria solar fotovoltaica.

Siendo el silicio, el fosforo y la plata los de mayor potencial, esto permite identificar las zonas de prioridad que puedan ser potenciales, en cuanto a la calidad que requiere a industria fotovoltaica, puesto que el país todavía se encuentra muy detrás en cuanto a información geológica específica para esta industria.

Los insumos priorizados en este trabajo no aparecen entre los que tienen el MME, la ANM y la UPME, lo cual puede deberse a que el país aún no tiene suficiente información geológica de las fuentes de donde se pueden obtener estos.

La agregación de valor se hace imperativa para poder llevar los insumos minerales a las especificaciones requeridas por la industria, debido a que el procesamiento de estos aún no se realiza en el país en la mayoría de los casos (UPME, 2017d).

En cuanto a las recomendaciones se propone realizar campañas de exploración y/o caracterización de procesos mineros actuales con generación de subproductos, que puedan contener concentraciones atractivas de estos minerales, en el caso de la plata, para determinar el potencial técnico actual para futuros proyectos de uso de estos minerales en la aplicación estudiada.

Compaginar esfuerzos públicos y privados para poder avanzar en cuanto al conocimiento geológico y factores económicos, que se requieren para introducir al país en esta industria que puede ser un dinamizador de la economía.

Reforzar la cadena de agregación de valor para cada uno de estos minerales, puesto que es son nichos de mercado muy importantes en este momento para la diversificación de la canasta minera y el aprovechamiento de estos en la construcción de tecnologías para energías renovables.

El emplear datos de Áreas Protegidas en el país para la correcta delimitación de las zonas potenciales debe ser imperativo, puesto que la prioridad también debe ser la sostenibilidad y salvaguardar estas zonas, como por ejemplo en departamentos como Santander, Guainía, Vichada y Caquetá que se consideraron potenciales.

Lista de referencias

Agencia Nacional de Minería. (2015). Cartilla Web Explorando oportunidades. Recuperado de

https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/web_cartilla_explorando_oportunidades_2159x2794cm_espanol.pdf

Agencia Nacional de Minería. (2020). Cartilla Web Explorando oportunidades. Recuperado de

https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/cartilla_minera_2020.pdf

Aguilar, T., González, E., Bustamante, P., Estrada, H. & Rodríguez, J. (2021).

Exploración minera en Colombia, el primer paso hacia la transformación minera.

Ahmed, S., Mahmood, A., Hasan, A., Sidhu, G. A. S., & Butt, M. F. U. (2016). A comparative review of China, India and Pakistan renewable energy sectors and sharing opportunities. *Renewable and sustainable Energy reviews*, 57, 216-225.

ANM. (2015). Roca Fosfórica. Recuperado de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/roca_fosforica.pdf

Bartels, R. (2014). How can mining become more sustainable?. In *Future of Economic Progress World Economic Forum*.

Cathcart, J. B., Zambrano, F., & Mojica, P. E. (1967). Roca fosfática en Colombia, con una sección sobre fosfatos de Turmequé, Boyacá. *Boletín Geológico*, 15(1-3), 65-162.

Chen, Z., & Su, S. I. I. (2014). Photovoltaic supply chain coordination with strategic consumers in China. *Renewable Energy*, 68, 236-244.

- Chen, Z., Yang, G., Ren J., & Xu S. (2011). Silver conductive paste for front electrode of crystalline silicon solar cell and preparation method thereof. (Patente China. CN102354544B). Jiangsu sinocera Hongyuan Photoelectric Technology Co. Ltd. <https://patents.google.com/patent/CN102354544B/en?q=silver+conductive+paste&oq=silver+in+conductive+paste>
- Demirbas, A. (2000). Recent advances in biomass conversion technologies. *Energy Edu Sci Technol*, 6, 19-41.
- Espejo Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en España.
- Famiyeh, S., Opoku, R. A., Kwarteng, A., & Asante-Darko, D. (2021). Driving forces of sustainability in the mining industry: Evidence from a developing country. *Resources Policy*, 70, 101910.
- Gallego Hernandez, A. N. & Akasaka, M. (2007). Silver-bearing and associated minerals in El Zancudo deposit, Antioquia, Colombia. *Resource geology*, 57(4), 386-399.
- Guo, X. & Guo, X. (2015). China's photovoltaic power development under policy incentives: A system dynamics analysis. *Energy*, 93, 589-598.
- Hernández, J. A., Velasco, D. & Trujillo, C. L. (2011). Analysis of the effect of the implementation of photovoltaic systems like option of distributed generation in Colombia. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(5), 2290-2298.
- Hook, L. & Sanderson, H. (2021). How the race for renewable energy is reshaping global politics. *Financial Time Magazine*. <https://www.ft.com/content/a37d0ddf-8fb1-4b47-9fba-7ebde29fc510>

- Hussain, A., Arif, S. M., & Aslam, M. (2017). Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 12-28.
- Iberdrola S.A. (s. f.). ¿Qué es la energía solar fotovoltaica? <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>
- Jo, J. H., Loomis, D. G., & Aldeman, M. R. (2013). Optimum penetration of utility-scale grid-connected solar photovoltaic systems in Illinois. *Renewable energy*, 60, 20-26.
- López, A. (17 de enero 2021). Los 10 minerales estratégicos para la reactivación económica. Portafolio. <https://www.portafolio.co/economia/los-10-minerales-estrategicos-para-la-reactivacion-economica-548311>
- Ministerio de Minas y Energía (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/libro-transicion-energetica#:~:text=En%202021%2C%20llegaremos%20a%20cerca,renovables%20en%20la%20matriz%20el%C3%A9ctrica>.
- Noguera-Salas, O., Pinto-García, R. A., & Villarreal-Padilla, J. E. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. *Iteckne*, 15(1), 7-16.
- Pachón Mahecha, C. T. (2014). Minería sostenible, el reto.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1513-1524.

- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2022). Mapa – SINAP. Recuperado el 2 de Junio de 2022 de <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sistema-nacional-de-areas-protegidas-sinap/mapa-sinap/>
- Patil, T. G., & Asokan, A. (2016). A proficient solar panel efficiency measurement system: Using current measurements. In 2016 international conference on communication and electronics systems (ICCES) (pp. 1-6). IEEE.
- Prieto, G., Guatame, C., Cárdenas, S., Pulido, O., Becerra, J., Téllez, N., Vargas, S., Pérez, A., Lugo, R., Gilart, R., González, H., & Zambrano, F. (2019a). Recursos minerales de Colombia, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Prieto, G., Guatame, C., Cárdenas, S., Arias, A., López, J., Lugo, R., Bernal, L., Murillo, A., Montoya, D., Moreno, G., Ulloa, C. & González, H. (2019b). Recursos minerales de Colombia, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Rathore, N. S., & Panwar, N. L. (2007). Renewable energy sources for sustainable development. New India Publishing.
- Rodríguez, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Recuperado de <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.16924/revinge.28.11>
- Rodríguez-Urrego, D., & Rodríguez-Urrego, L. (2018). Photovoltaic energy in Colombia: Current Status, inventory, policies and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 160-170.
- Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601.
- Sepúlveda, J., Celada, C., Gómez, M., Prieto, D., Murillo, H., Rodríguez, A., Rache, A., Jiménez, C., Velásquez, L., Luengas, C., Torres, C., García, D., Prieto, G., Peña, G.

- & Balceró, G. (2020). Mapa metalogénico de Colombia. Dirección de Recursos Minerales. Servicio Geológico Colombiano. <https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/docupromocion/mapa-metalogenico-colombia-2020.pdf>
- Sierra, G. M., Silva, J. C., & Correa, L. G. (2003). Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (15), 9-22.
- SolarPower Europe. (2021). Global Market Outlook for Solar Power 2021-2025. Recuperado de <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2021>
- Valderrama, M., Ocampo, P., Gracia, H. & Rodríguez UL. (2018). La gestión para cadena de suministro de sistemas de energía solar fotovoltaica en Colombia y su situación actual. *AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15 (1), 112-130.
- Velasco Muñoz, Á. (2019). Evolución de la generación de energía solar fotovoltaica en Colombia (Doctoral dissertation, Universidad Santiago de Cali).
- UPME. (2017a). Productividad en la minería: ahora viene la parte difícil (Roca Fosfórica). Recuperado de http://www1.upme.gov.co/simco/CifrasSectoriales/Datos/mercadonal/MNAL_rocafosforica.pdf
- UPME. (2017b). Productividad en la minería: ahora viene la parte difícil (Bauxita). Recuperado de http://www1.upme.gov.co/simco/CifrasSectoriales/Datos/mercadonal/MNAL_bauxita.pdf

UPME. (2017c). Productividad en la minería: ahora viene la parte difícil (Arenas silíceas).

Recuperado de https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL_arenassilíceas.pdf

UPME. (2017d). Productividad en la minería: ahora viene la parte difícil (plata). Recuperado

de https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-nal/MNAL_plata.pdf

UPME. (2018). Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto,

mediano y largo plazo con vigencia al año 2035 (Oro). Recuperado de http://www1.upme.gov.co/simco/CifrasSectoriales/Datos/mercadointer/Producto3_Oro_FINAL_11DIC2018.pdf

UPME, Agencia Nacional de Minería, Servicio Geológico Colombiano, & Ministerio de

Minas y Energía. (2019). Minerales estratégicos. Metodología para actualizar y seleccionar los minerales estratégicos para Colombia.

Xakalashé, B. S., & Tangstad, M. (2012). Silicon processing: from quartz to crystalline

silicon solar cells. *Chem Technol*, (March), 6-9.

Zhang, Y., Song, J., & Hamori, S. (2011). Impact of subsidy policies on diffusion of

photovoltaic power generation. *Energy Policy*, 39(4), 1958-1964.

Zhou, B., Cui, C., Ma, S., Bai, J., & Wang, H. (2021). Investigation of the P-doped lead-free

glass frit based on the principle of low-temperature phosphorus diffusion for multicrystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111193.

Anexos

- 1) [Proyecto SIG con archivos vectoriales para delimitación de zonas minerales de interés para paneles solares fotovoltaicos](#)
- 2) [Matrices en Excel para la ponderación y priorización de minerales críticos](#)
- 3) [Mapa de zonas protegidas de Colombia interceptado con las zonas minerales de interés para paneles solares fotovoltaicos](#)
- 4) [Mapa de títulos mineros por departamento, asociados a minerales, con concentraciones requeridas por la industria solar fotovoltaica](#)
- 5) [Mapa de Unidades Estratigráficas con contenido potencial de silicio, plata y fósforo para su uso en paneles solares fotovoltaicos](#)