



Propuesta para la gestión integral de residuos sólidos fotovoltaicos en el Ecuador

Proposal for the integral management of photovoltaic solid waste in Ecuador

Proposta de gestão integral de resíduos sólidos fotovoltaicos no Equador

Carlos Adrián Romero-Larrea ^I
carlos.romero@psg.ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4222-0242>

Manuel Álvarez-Vera ^{II}
malvarezv@ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2521-0042>

Correspondencia: carlos.romero@psg.ucacue.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

***Recibido:** 05 de julio de 2020 ***Aceptado:** 20 de agosto 2020 * **Publicado:** 07 de septiembre de 2020

- I. Ingeniero en Gestión Ambiental, Tecnólogo en Medio Ambiente, Jefatura de Posgrado-Maestría en Energías Renovables, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- II. Magíster en Protección y Remediación Ambiental, Doctoris Philosophiae en Ingeniería y Ciencias Ambientales, Especialista en Docencia Universitaria, Ingeniero Agrónomo, Jefatura de Posgrado, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Resumen

El presente trabajo investigativo se enfoca en el tratamiento y disposición final de residuos sólidos fotovoltaicos, puesto a que en el Ecuador el Ministerio del Ambiente y Agua no los incluye dentro de su catálogo de residuos considerados como peligrosos o especiales. Por este motivo se realiza una investigación bibliográfica en base a la temática propuesta con la finalidad de analizar y evaluar los resultados de proyectos similares implementados en varias partes del mundo. De los análisis estudiados los proyectos más relevantes se encuentran contemplados y ejecutados, de manera eficiente, en países de la Unión Europea, donde se emplean tratamientos similares entre sí en lo referente a los paneles fotovoltaicos que ya cumplieron con su tiempo de vida útil o que son desechados por daños o averías. Además, se determinan los principales compuestos con los que se elaboran los paneles fotovoltaicos y los posibles impactos ambientales que aflorarían al no tener una adecuada gestión de los residuos.

En base al análisis del párrafo anterior se plantea el tipo de tratamiento a emplear haciendo énfasis en los diferentes elementos y componentes que constituyen los paneles fotovoltaicos; y en base a la realidad social, económica y legal del país.

Palabras Claves: Solar panels; Pv; photovoltaic waste; recycling; toxicity cadmio; toxicity plomo; toxicity boro.

Abstract

This investigative work focuses on the treatment and final disposal of photovoltaic solid waste, since in Ecuador the Ministry of the Environment and Water does not include them in its catalog of waste considered hazardous or special. For this reason, a bibliographic research is carried out based on the proposed theme in order to analyze and evaluate the results of similar projects implemented in various parts of the world. From the analyzes studied, the most relevant projects are contemplated and executed, efficiently, in countries of the European Union, where similar treatments are used in relation to photovoltaic panels that have already reached their useful life or that They are discarded due to damage or breakdown. In addition, the main compounds with which the photovoltaic panels are made and the possible environmental impacts that would emerge due to not having adequate waste management are determined.

Based on the analysis of the previous paragraph, the type of treatment to be used is proposed, emphasizing the different elements and components that make up the photovoltaic panels; and based on the social, economic and legal reality of the country.

Keywords: Solar panels; Pv; photovoltaic waste; recycling; cadmium toxicity; lead toxicity; boron toxicity.

Resumo

Este trabalho de investigação centra-se no tratamento e disposição final de resíduos sólidos fotovoltaicos, uma vez que no Equador o Ministério do Meio Ambiente e Águas não os inclui em seu catálogo de resíduos considerados perigosos ou especiais. Por esse motivo, é realizada uma pesquisa bibliográfica com base no tema proposto com o objetivo de analisar e avaliar os resultados de projetos semelhantes implementados em várias partes do mundo. A partir das análises estudadas, os projetos mais relevantes são contemplados e executados, de forma eficiente, em países da União Europeia, onde são utilizados tratamentos semelhantes em relação a painéis fotovoltaicos que já atingiram a sua vida útil ou que eles são descartados devido a danos ou avarias. Além disso, são determinados os principais compostos com que são feitos os painéis fotovoltaicos e os possíveis impactos ambientais que surgiriam por não haver uma gestão adequada dos resíduos.

A partir da análise do parágrafo anterior, propõe-se o tipo de tratamento a ser utilizado, destacando-se os diferentes elementos e componentes que compõem os painéis fotovoltaicos; e com base na realidade social, econômica e jurídica do país.

Palavras-chave: Painéis solares; Pv; resíduos fotovoltaicos; reciclando; toxicidade do cádmio; toxicidade por chumbo; toxicidade do boro.

Introducción

En la cumbre de Kioto los países del mundo se comprometen a reducir las emisiones de CO₂ a la atmosfera fijados en un solo objetivo común como es frenar cambio climático generado por la quema de combustibles fósiles, para ello se presenta la oportunidad de aumentar la producción energética mediante el aprovechamiento de recursos naturales renovables que no generen afecciones ambientales al planeta, por esta razón se toma en cuenta a la energía emitida por el sol puesto que no produce residuos tóxicos ni gases de efecto invernadero. El Ecuador presenta un nivel de irradiación aproximada de 4,2 kW/h m²-día, siendo una de las principales razones para el aprovechamiento del recurso energético solar mediante la implementación de plantas de generación eléctrica fotovoltaica.

La implementación de proyectos para la generación de energía eléctrica a través del uso de recursos naturales renovables en el mundo ha generado una temática de interés en el Ecuador,

por ello en los últimos años se viene implementando un cambio de la matriz energética en el país donde se está optando por la producción de una energía limpia y amigable con el ambiente. En el Ecuador actualmente existen alrededor de 27 MW de energía eléctrica generada a partir del aprovechamiento energético solar, a partir del mes de enero del 2013 el CONELEC dio carta abierta para iniciar con la implementación de nuevos proyectos que generarían alrededor de 355 MW de potencia fotovoltaica, siendo un total 91 proyectos de los cuales 15 sería de una potencia mayor a 1 MW y 76 menores a 1 MW.

El adecuado manejo de los residuos fotovoltaicos, toma trascendental importancia en un futuro cercano, toda vez que su vida útil oscila entre 20 y 25 años dependiendo de la tecnología utilizada en los mismos. La composición de los paneles fotovoltaicos incluyen sustancias que contienen iones libres como el silicio dopado con fósforo y boro, que al degradarse podrían llegar a convertirse en residuos peligrosos, debido a que los lixiviados que estos provocarían afecciones al suelo, agua, aire flora y fauna.

La normativa ambiental ecuatoriana, específicamente el Acuerdo Ministerial 142 emitido por el Ministerio del Ambiente y Agua en los “LISTADOS NACIONALES DE SUSTANCIAS QUIMICAS PELIGROSAS, DESECHOS PELIGROSOS Y ESPECIALES” no considera a los componentes de los paneles fotovoltaicos como peligrosos.

La Agencia Internacional de Energía Renovable, ha indicado que el flujo de residuos de paneles solares irá en aumento durante los próximos años a medida que los módulos fotovoltaicos lleguen al final de su vida útil.

En principio, estos residuos están compuestos fundamentalmente por vidrio, y la cifra podría ascender a 78 millones de toneladas a nivel mundial en el año 2050, por otro lado, si se reciclan y se reutilizan la totalidad de los residuos generados, incorporándolos de nuevo a la cadena de producción, el valor del material recuperado alcanzaría, de forma aproximada, un beneficio financiero de \$15`000.000.000.

La posible acumulación e inadecuada gestión de los elementos fotovoltaicos, presume prever la emisión de estrategias de manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos generados, analizando el estado actual del contexto normativo ecuatoriano en materia de la gestión integral de los elementos que componen los paneles solares en beneficio del ambiente.

Es por ello que se pretende establecer un plan para la gestión integral de los residuos sólidos de paneles solares fotovoltaicos utilizados para la generación eléctrica en el Ecuador, mediante una revisión sistemática de experiencias internacionales utilizadas para minimizar el impacto

ambiental generado, proponiendo estrategias de manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos fotovoltaicos.

Se analizará el estado actual del contexto ecuatoriano en materia de aprovechamiento y disposición final de los elementos que componen los paneles solares evaluando técnicamente las oportunidades para la correcta gestión integral de los mismos, en beneficio del ambiente.

Generación de energía eléctrica en el Ecuador

La generación de la energía eléctrica en el Ecuador se aprovecha a partir de fuentes renovables y no renovables.

El aprovechamiento energético desde fuentes renovables se compone principalmente por centrales hidroeléctricas, fotovoltaicas, eólicas y termoeléctricas que consumen biomasa y biogás; mientras que la generación de tipo no renovable utiliza combustibles fósiles, estas centrales térmicas se clasifican en: turbogás, turbovapor y motores de combustión interna (MCI).

Según los datos estadísticos de la Agencia de Regulación y Control de la Electricidad (ARCONEL), la generación eléctrica en el Ecuador se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 1: Generación Eléctrica en el Ecuador por tipo fuente.

FUENTE	CENTRAL	TIPO DE UNIDAD	POTENCIA NOMINAL (MW)	POTENCIA EFECTIVA (MW)	%
Renovable	Hidráulica	Hidráulica	5044,40	5036,43	62,58
	Biomasa	Turbovapor	144,30	1366,40	1,69
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	27,63	26,74	0,33
	Eólica	Eólica	21,15	21,15	0,26
	Biogás	MCI	7,26	6,50	0,08
TOTAL RENOVABLE			5266,74	5227,22	64,95
No Renovable		MCI	2011,44	1613,60	20,05
	Térmica	Turbogás	921,85	775,55	9,64
		Turbovapor	461,87	431,74	5,36
TOTAL NO RENOVABLE			3395,15	2820,89	35,05
TOTAL GENERAL			8661,90	8048,11	100,00

Según los datos que se detallan en la tabla 1, el 64,95% de energía eléctrica en el Ecuador, proviene de fuentes renovables, mientras que 35,05% es generado en plantas energéticas no renovables.

Generación de energía eléctrica en el Ecuador a través de centrales fotovoltaicas

Considerando la generación eléctrica fotovoltaica, hasta el año 2018 en el Ecuador se registró una generación total de 27,63MW de potencia nominal y 26,74MW de potencia efectiva.

Las plantas generadoras de energía eléctrica a partir del recurso fotovoltaico, se encuentran ubicados en diferentes sectores del país, generando un total de 38,08 GWh, aportando con el 0,13% del total de generación eléctrica nacional para su consumo.

A continuación en la tabla 2, se detallan las ubicaciones por provincias de las diferentes centrales fotovoltaicas distribuidas en el Ecuador, además de su potencia nominal y potencia efectiva.

Tabla 2: Localización de las Centrales fotovoltaicas en el Ecuador.

Empresa	Tipo Inversión	Central	Potencia Nominal MW	Potencia Efectiva MW	Provincia
E.E. Ambato	Pública	Panel fotovoltaico	0,2	0,2	PASTAZA
E.E. Centro Sur	Pública	Panel Fotovoltaico	0,3726	0,3726	MORONA SANTIAGO
E.E. Galápagos	Pública	Floreana Perla Solar	0,021	0,021	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	Santa Cruz Solar Aislados	0,01	0,01	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	Isabela Solar Aislados	0,0075	0,0075	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	Floreana Solar Aislados	0,0055	0,0055	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	San Cristóbal Solar Eólica	0,0125	0,0125	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	Santa Cruz Solar Puerto Ayora	1,52058	1,52058	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	Baltra Solar	0,06678	0,06678	GALAPAGOS
E.E. Galápagos	Pública	Isabela Solar	0,95256	0,95256	GALAPAGOS
Altgenotec	Privada	Altgenotec	0,9936	0,9936	GUAYAS
Brineforcorp	Privada	Brineforcorp	0,999	0,999	MANABI
Electrisol	Privada	Electrisol	0,999	0,998	PICHINCHA
Enersol	Privada	Enersol	0,5	0,487	MANABI
Ep fotovoltaica	Privada	Pastocalle	0,99981	0,99792	COTOPAXI
Ep fotovoltaica	Privada	Mulaló	0,99981	0,99792	COTOPAXI
Genrenotec	Privada	Genrenotec	0,9936	0,9936	GUAYAS
Gonzanergy	Privada	Gonzanergy	0,999	0,999	LOJA
Gransolar	Privada	Tren Salinas	1	0,999	IMBABURA
Gransolar	Privada	Salinas	2	2	IMBABURA

Lojaenergy	Privada	Lojaenergy	0,999	0,70096	LOJA
Renova Loja	Privada	Renova Loja	0,999	0,70096	LOJA
Sabiangosolar	Privada	Sabiango Solar	0,999	0,725	LOJA
San Pedro	Privada	San Pedro	0,999	0,999	LOJA
Sanersol	Privada	Sanersol	0,999	0,999	EL ORO
Sansau	Privada	Sansau	0,995	0,995	GUAYAS
Saracaysol	Privada	Saracaysol	0,999	0,999	EL ORO
Solchacras	Privada	Solchacras	0,999	0,999	EL ORO
Solhuaqui	Privada	Solhuaqui	0,999	0,999	EL ORO
Solsantonio	Privada	Solsantonio	0,999	0,999	EL ORO
Solsantr. os	Privada	Solsantros	0,999	0,999	EL ORO
Surenergy	Privada	Surenergy	0,999	0,999	LOJA
Valsolar	Privada	Paragachi	0,998	0,995	IMBABURA

Importaciones de paneles fotovoltaicos al Ecuador

Es importante considerar el dato total de importaciones de paneles fotovoltaicos realizados por el Ecuador dentro de los últimos 5 años, con el objeto de determinar la posible cantidad de paneles fotovoltaicos que existen en el país.

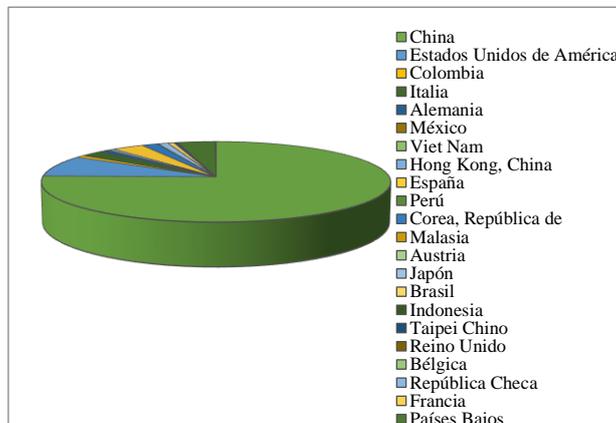
En la tabla 3 se detalla las importaciones realizadas desde el año 2014 hasta el 2018.

Tabla 3: Importaciones de PV por Países, periodo 2014-2018.

País	Año				
	2014	2015	2016	2017	2018
CHINA	9.182	10.470	4.299	4.383	2.608
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	1.029	2.357	456	490	362
COLOMBIA	107	65	177	135	153
ITALIA	294	357	138	45	81
ALEMANIA	101	134	92	59	60
MÉXICO	28	20	30	395	55
VIETNAM	0	0	3	10	51
HONG KONG	82	44	52	59	48
ESPAÑA	408	64	111	34	41
PERÚ	0	0	0	0	14
KOREA	202	146	36	28	11
MALASIA	9	2	9	3	7
AUSTRIA	1	0	0	0	6
JAPÓN	129	14	39	17	6
BRASIL	79	2	3	20	5
INDONESIA	1	1	0	0	4
TAIPÉI	36	8	8	4	4
REINO UNIDO	5	3	1	2	3
BÉLGICA	1	60	6	0	2
REPÚBLICA CHECA	2	0	0	0	2
FRANCIA	3	26	1	92	2

PAÍSES BAJOS	470	53	3	1	2
PORTUGAL	0	1	0	1	2
SINGAPUR	14	0	0	0	2
TOTAL	12183	13827	5464	5778	3531

Figura 1: Importaciones de Paneles Fotovoltaicos al Ecuador, por país.



Según los datos y resultados expuestos en la Tabla 3 y Figura 1, el mayor exportador de Paneles Fotovoltaico al Ecuador es China, seguido de Estados Unidos, Colombia e Italia

El Servicio Nacional de Aduanas del Ecuador (SENAE), durante al año 2019, registra que se importa un estimado de 789529 paneles fotovoltaicos, mismos que en su mayoría provienen desde China, Hong Kong, Colombia, y Estados Unidos, dichos datos se reflejan en la tabla 4.

Tabla 4: Importación de PV por país en el año 2019

PAÍS ORIGEN	CANTIDAD FÍSICA	PESO (kg)	\$ COSTO
BE-BELGICA	92	124,2	669,49
BR-BRASIL	814	5808,07	43571,24
CA-CANADA	360	12180	34052,77
CN-CHINA	715955	526671,98	3274370,11
CO-COLOMBIA	20456	10446,55	53756,59
DE-ALEMANIA	1902	6198,12	42451,73
ES-ESPAÑA	1413	40561,36	317435,52
FR-FRANCIA	241	10,43	633,84
HK-HONG KONG	42922	6817,94	149342
HU-HUNGRIA	2	0,95	137,3
IL-ISRAEL	5	10,558	477,48
IN-INDIA	20	511,97	25807,91
IT-ITALIA	1211	1672,86	65197,64
KR-COREA	36	24,232	393,97
MX-MEXICO	456	9011,77	44234,19
MY-MALAYSIA	1000	0,329	186,55
RO-RUMANIA	15	1,33	4327,15
TR-TURQUIA	30	10,98	95,35
TW-TAIWAN	100	0,029	16,94

US-ESTADOS UNIDOS	2349	16431,44	120405,74
VN-VIETNAM	90	1665	11178,91
ZA-SUDAFRICA	60	40,94	865,79
TOTAL	789529	638201,038	4189608,21

Con dicha información y considerando las cantidades de importaciones de paneles fotovoltaicos realizados hacia el Ecuador, indistintamente del tipo de panel, se presume que en el país existe un total de 830312 unidades.

Composición y estructura de los paneles fotovoltaicos

El primer paso para determinar el tratamiento o manejo de los paneles fotovoltaicos, es determinar los componentes y la estructura de los mismos, con el fin de cerrar el círculo o la frase “ambientalmente amigable” en cuanto a la terminología “Energías Renovables”, entendiendo como estas que son aquellas que provienen de fuentes que generan constantemente energía, de forma que se renuevan continuamente y en frecuencia, y su utilización es ilimitada. El panel fotovoltaico, módulo solar o placa solar es un equipo formado por varias celdas que se encargan de convertir la energía solar en electricidad dependiendo de la energía lumínica para producir cargas positivas y negativas en dos semiconductores generando un campo eléctrico capaz de generar corriente.

Las células fotovoltaicas se encuentran encapsuladas en una estructura metálica y de vidrio, el mismo que sirve como protección contra los agentes ambientales externo y también favorece la captación de radiación y la evacuación del calor, con la finalidad de obtener un máximo rendimiento.

Por lo tanto se identifica que los principales componentes de los paneles fotovoltaicos son:

Silicio: De símbolo Si, es el segundo elemento químico con mayor presencia en la corteza terrestre, y se le utiliza desde hace cientos de años en la fabricación del vidrio empleando para ello los silicatos. Este elemento identificado con número atómico 14, es uno de los elementos químicos con mayor presencia en la corteza terrestre, sólo siendo superado por el oxígeno. Se lo puede encontrar de varias formas, tanto amorfas como de manera cristalizada, se lo obtiene a por medio del calentamiento del SiO₂ (dióxido de silicio).

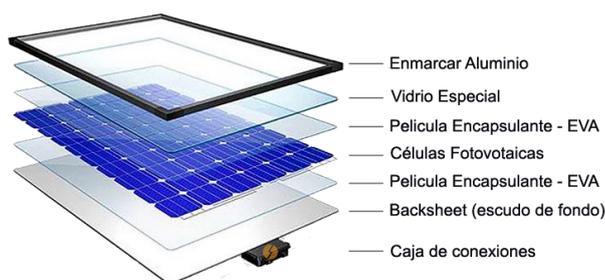
Fosforo De símbolo P y peso atómico 309738g, forma la base del grupo de elementos compuestos por fosfatos, mismos que son fundamentales en la transferencia de energía durante la etapa de metabolismo, fotosíntesis, función nerviosa y acción muscular.

Boro: Su símbolo es B, con número atómico 5 es un no metal y se considera como un metaloide, siendo el único elemento de su grupo de características no metálicas, es un semiconductor y cuenta con propiedades similares al carbono o al silicio, no se lo encuentra de forma libre en la naturaleza presentándose principalmente en forma de boratos en el mineral bórax, se distribuye tanto en la tierra como en el agua.

Cadmio: Su representación es Cd y número atómico 48, caracterizado por su maleabilidad y color blanco azulado, se lo encuentra comúnmente en la corteza terrestre combinado con el zinc generalmente en el suelo.

Plomo: Su simbología es Pb, y número atómico 82, es un metal pesado de color azulado, dúctil y se funde a bajas temperaturas, los usos principales del plomo está asociado con los la fabricación de elementos de blindaje, y en especial utilizado en la industria armamentística y química.

Figura 2: Estructura de los Paneles Fotovoltaicos



Toxicidad de los materiales que componen los paneles fotovoltaicos

Los diferentes compuestos y aleaciones químicas que forman parte de las estructuras de las células fotovoltaicas podrían llegar a convertirse en una problemática ambiental al final de su utilidad.

Componentes de los paneles fotovoltaicos como el boro son considerados tóxicos cuando sobrepasa los límites permisibles, generalmente los cultivos agrícolas son los que presentan mayores afecciones debido a la presencia de boro en el agua, los síntomas aparecen con afecciones a las hojas las cuales presentan manchas amarillas o secas en los bordes o ápices, además, cuando la afección va en aumento se presenta una secreción amarillenta desde el tronco de las plantas.

Además, el Cadmio reúne cuatro afecciones toxicológicas de mayor incidencia como son:

1. Graves afecciones para la salud humana y el ambiente.
2. Acumulación en organismos bióticos.

3. Permanencia en el ambiente.

4. Es volátil y alcanza grandes distancias gracias al viento y el agua

Si tomamos en cuenta la toxicidad del Cadmio, se dice que este es un xenobiótico (sustancia química que se encuentra dentro de un organismo que no se produce naturalmente), por lo tanto es un metal tóxico el cual tiende acumularse en los tejidos, los órganos que generalmente más afectados son el hígado, riñón y pulmones, los cuales presentan patologías como neumonitis química, disfunción renal con proteinuria y microproteinuria.

En el embarazo, el plomo aumenta el riesgo de alteraciones y afecciones neurológicas al feto o al recién nacido, además, se aumenta el de provocar partos prematuros, abortos espontáneos y muertes fetales.

La afección del sistema nervioso centra en niños de hasta 36 meses por el plomo desencadena en alteraciones neurológicas temporales o permanente, además de alterar el sistema renal, endocrino y sanguíneo, cabe recalcar que la ausencia de síntomas no excluye el envenenamiento por este material, pero puede conducir más tarde a problemas renales, hipertensión arterial y problemas de la reproducción.

Posibles impactos ambientales generados al final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos

Según la European Commission DG ENV, los residuos de los paneles fotovoltaicos, podrían causar una serie de impactos ambientales negativos que afectarían al ambiente y a la salud humana, los mismos son detallados a continuación:

- a) Lixiviación de plomo
- b) Lixiviación de cadmio
- c) Pérdida de recursos convencionales, principalmente vidrio y aluminio.
- d) Pérdida de metales raros, especialmente plata, indio, galio y germanio.

Los lixiviados de plomo están principalmente relacionados con los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino, las causas para la generación de estos lixiviados es la exposición del residuo fotovoltaico al ácido nítrico, generando entre el 13% y 90% de la cantidad de plomo encontrado en un panel fotovoltaico, cabe indicar que en cada panel existe un promedio aproximado de 12,67 gramos de plomo están contenidos en un panel de c-Si promedio (que pesa alrededor de 22 kg), lo que representa un potencial de lixiviación de entre 1,64 y 11,4 gramos por panel. Su afección al cuerpo humano inicia una vez que se distribuye por la sangre acumulándose en los

huesos, además, dependiendo del nivel de exposición el plomo podría también afectar al sistema nervioso, la función renal, sistema inmune, sistemas reproductivos y sistema cardiovascular.

Por otra parte los ecosistemas demuestran su afección cuando se presentan efectos adversos a la naturaleza y la biodiversidad, disminuyendo del crecimiento y las tasas reproductivas en plantas y animales.

La lixiviación de cadmio, se generan particularmente de los paneles fotovoltaicos que contiene Teluro de Cadmio, la exposición a un pH menor como el ácido nítrico o la lluvia aumenta la lixiviación del cadmio entre un 29% y 40% de un total de 4,60 gramos de por panel. Respecto a las enfermedades asociadas con el envenenamiento de bajo nivel de cadmio pueden tener una latencia de hasta 10 años, convirtiéndose en un producto altamente carcinógeno [21].

La European Commission DG ENV manifiesta que el costo de la contaminación relacionada con las fugas de plomo y cadmio es de aproximadamente 1.174 €/gr de y 0.046 €/g respectivamente.

El vidrio y aluminio vendría a constituir la mayoría de los materiales existentes en los paneles fotovoltaicos, por tal razón la pérdida de recursos potencialmente reutilizables llegan a presentarse en todos los tipos de paneles fotovoltaicos, como ejemplo es necesario indicar que los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino son compuestos por total de 74,16% de vidrio y un 10,30% de aluminio, relacionando con términos de peso representaría 16,6 kg de vidrio y 2,3 kg de aluminio por otro lado lo paneles de segunda generación CIGS (cobre, indio, galio y selenio) contiene hasta 84% de vidrio y 12% de aluminio, lo que representa aproximadamente 8 a 9 kg de vidrio y 1,4 kg de aluminio por panel.

Normativa ecuatoriana

Una vez identificado los componentes de los paneles fotovoltaicos, establecemos relación con la normativa ambiental vigente en nuestro país, para ello se realiza un análisis con el artículo 153 de Acuerdo Ministerial 161, donde se indica que “Las sustancias químicas peligrosas sujetas a control, son aquellas que se encuentran en los listados nacionales de sustancias químicas peligrosas aprobados por la autoridad ambiental nacional”, además los residuos sólidos se clasifican en diferentes categorías según sus características; entre estas categorías se encuentran los residuos ordinarios, orgánicos, especiales, hospitalarios o similares, entre otros. Por otro lado y según el artículo 154 en su literal b) del Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación por Sustancias Químicas Peligrosas, Desechos Peligrosos y Especiales,

indica que los desechos peligrosos son aquellos que están determinados en los listados nacionales", salvo el caso no tengan ninguna de las siguientes características:

Corrosivas, Reactivas, Tóxicas Inflamables, Biológico-infecciosas y/o radioactiva. Mismas que puedan generar un riesgo para la salud humana y el ambiente.

El Ministerio del Ambiente y Agua, en el ámbito de sus competencias, establece una serie de normas y parámetros técnicos para la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, desechos peligrosos y/o especiales, desde la generación, hasta la disposición final, para mantener los estándares que permitan la preservación del ambiente, la gestión adecuada de la actividad, el control y sanción de ser del caso; razón por la cual esta cartera de estado es la rectora en controlar y verificar el cumplimiento de la gestión integral de los residuos.

Además, en el acuerdo ministerial 142, el Ministerio del Ambiente y Agua, considera expedir los listados nacionales sustancias químicas peligrosas desechos peligrosos y especiales, tomando en cuenta tres categorías:

- Sustancias químicas peligrosas
- Desechos peligrosos
- Desechos especiales

En la tabla 5, acorde a lo que determina la normativa nacional según los componentes de los paneles solares identificados y descritos anteriormente, se procede a verificar que lo que se considera son los "Equipos eléctricos y electrónicos en desuso que no han sido desensamblados, separados sus componentes o elementos constitutivos".

Tabla 5: Listado nacional de desechos especiales

Nombre	Código
Envases vacíos de agroquímicos con triple lavado	ES-01
Envases/contenedores vacíos de químicos tóxicos luego del tratamiento	ES-02
Plásticos de invernadero	ES-03
Neumáticos usados o partes de los mismos	ES-04
Fundas biflex, corbatines y protectores usados	ES-05
Equipos eléctricos y electrónicos en desuso que no han sido desensamblados, separados sus componentes o elementos constitutivos	ES-06

Aceites vegetales usados generados en procesos de fritura de alimentos	ES-07
Escorias de acería cuyos componentes tóxicos se encuentren bajo los valores establecidos en las normas técnicas correspondientes	ES-0

Propuesta técnica para la gestión de los residuos fotovoltaicos en Ecuador

Esta propuesta está basada según lo implementado exitosamente en otros países con una orientación a la realidad ecuatoriana, principalmente divididas entre propuestas desde la perspectiva de gestión ambiental, técnica, legal y económica.

Para crear una propuesta técnica de la disposición final de los paneles fotovoltaicos, es necesario considerar los compuestos de los mismos, los cuales constan de diferentes materiales y aleaciones para el aprovechamiento energético del sol.

Gestión de los residuos de paneles fotovoltaicos en el Ecuador

Esta propuesta viene en base a las alternativas implementadas en otros países y orientado a la realidad ecuatoriana, principalmente con propuestas establecidas desde una perspectiva ambiental sobre la gestión ambiental, técnica y legal de estos residuos.

El proceso de gestión integral de los residuos fotovoltaicos conlleva responsabilidades a diferentes actores que forman parte del ciclo de uso del panel fotovoltaico, iniciando desde su fabricación, distribución, venta, instalación, mantenimiento hasta el fin de su vida útil

Responsabilidad de los productores o fabricantes de paneles fotovoltaicos

Se los considera productores o fabricantes a todas aquellas personas natural o jurídica que fabriquen y/o vendan paneles solares fotovoltaicos registrados con su marca; vendan paneles solares elaborados por terceros y registrado bajo su propia marca, además de quien importe paneles solares.

El productor deberá asegurar la gestión integral de los paneles que sean desechados, los productores serían responsables de la recolección de estos residuos, así hayan sido generado por sus distribuidores o sus consumidores.

La finalidad de este sistema es facilitar a los productores o constructores de paneles solares fotovoltaicos el acatamiento de sus compromisos en cuanto a la disposición de sus residuos. Todo productor deberá generar la respectiva información correspondiente a la cantidad de paneles que distribuye al Mercado Ecuatoriano de manera anual.

La responsabilidad del seguimiento de la gestión de los paneles fotovoltaicos se encontrará bajo el control del MINISTERIO DE AMBIENTE Y LA AUTORIDAD AMBIENTAL DE APLICACIÓN RESPONSABLE.

Un productor se encuentra en la libertad de realizar la recolección de los paneles que fabrique para brindar un tratamiento y disposición final bajo su responsabilidad siempre y cuando sea para el aprovechamiento de los materiales.

Si el fabricante comercializa sus propios paneles o producidos por un tercero bajo su propia marca, deberá cumplir con las obligaciones establecidas para comercializadores de paneles.

Responsabilidad de los distribuidores o comercializadores de paneles fotovoltaicos

Un distribuidor o comercializador es una persona natural o jurídica que distribuya al por mayor o menor los paneles solares, además de que venda paneles solares fabricados por terceros o que suministre paneles solares directamente al mercado ecuatoriano desde el exterior.

En caso de que el distribuidor reciba los residuos en su punto de venta, deberá adecuar una zona para su acopio o almacenamiento, misma que deberá ser cerrada, cubierta, impermeabilizada y señalizada; una vez que la capacidad de almacenamiento se encuentre completa, el distribuidor deberá asegurar que los residuos sean tratados adecuadamente.

Los comercializadores podrán transportar los residuos que han recolectado de manera directamente, siempre que cumpla con los lineamientos de la normativa ambiental pertinente en cuanto al transporte de residuos, así también se podrá realizar una recolección de los residuos a domicilio para ser transportados hasta el centro de acopio designado.

El comercializador o distribuidor deberá llevar un registro sobre la cantidad de paneles recolectados, siendo deber del mismo ofrecer la respectiva información a sus consumidores respecto a la devolución y sus responsabilidades como usuarios de paneles solares al finalizar la vida útil del mismo o en caso de sufrir daños o averías.

Esta información deberá siempre permanecer disponible en boletas informativas que acompañen el producto y se encuentren al libre acceso del comercializador.

Responsabilidades de los consumidores o usuarios

Se consideran como consumidores o usuarios a las personas naturales o jurídicas que haga uso estos elementos con la finalidad de producir energía eléctrica ya sea de manera doméstica, comercial, industrial o con fines investigativos.

Los usuarios de los paneles solares serán quienes identifiquen finalización del funcionamiento del panel fotovoltaico o que estos se encuentren averiados, el consumidor será responsable de hacer la entrega al gestor autorizado para la gestión correspondiente.

El transporte de estos residuos será por cuenta propia o también podrán hacer uso del sistema de devolución al comercializador.

Los residuos fotovoltaicos deberán estar separados de otros tipos de residuos; se prohíbe el retiro de estos por camiones de recolección.

El usuario estará en la obligación de no comprometer los materiales aprovechables de estos residuos, es decir evitar tenerlos en contacto con sustancias peligrosas o corrosivas o dañarlos más de lo necesario, esto con el fin de aprovechar a lo máximo los materiales recuperados en su desmantelación.

Gestores ambientales

La energía fotovoltaica se encuentra ganando terreno dentro de la matriz energética ecuatoriana, por ello se puede presentar la posibilidad de establecer gestores ambientales para responder a las necesidades de gestión.

El Ministerio del Ambiente y Agua deberá contar con áreas establecidas para el acopio de estos desechos en las principales provincias, como Pichincha, Guayas, Azuay, Loja y Galápagos.

- Respecto a la recolección de los residuos, el gestor podrá proceder con lo siguiente:
- Receptar directamente de los usuarios.
- Realizar la recolección desde los puntos de venta o distribución
- Recolectar desde los centros de acopio.

El gestor también será el encargado de manejar y dirigir las plantas de tratamiento de estos residuos, es de su obligación garantizar el desmantelamiento y gestión integral de los paneles solares fotovoltaicos.

Se diseñará plantillas de información respecto a las probables afecciones ambientales que generarían estos residuos, considerando la siguiente información:

- Los efectos que se podrían generar sobre el ambiente las sustancias peligrosas que forman parte de los paneles.
- Normativa ambiental vigente
- Obligaciones y responsabilidades de los generadores, distribuidores y consumidores de paneles solares.
- Beneficios y ventajas que se podría presentar una adecuada gestión integral de los residuos tanto con generadores, distribuidores y comercializadores:
- Obligaciones y responsabilidades como distribuidores de paneles solares.
- Las obligaciones y responsabilidades de los consumidores de paneles fotovoltaicos.
- Los diferentes métodos de recolección disponible.

- El aprovechamiento de estos residuos mediante reciclaje.

Capacitaciones a gestores

Los gestores de los residuos fotovoltaicos serán capacitados con el objeto de indicar los componentes de los paneles solares fotovoltaicos que serían manipulados determinando los lineamientos para dicho tratamiento, los gestores estarán en la libertad de presentar diferentes propuestas para la gestión de estos residuos con la condición de que se contemplen los materiales recuperados e indicando cuál sería su probable uso.

Será necesario capacitarlos respecto las características de peligrosidad que se presentarían al manipular algunos componentes de los paneles fotovoltaicos, además de los riesgos que estos representan a la salud humana y el ambiente.

Gestión para paneles fotovoltaicos de silicio y telurio de cadmio

Una vez determinado el tipo de panel a tratar se plantea lo siguiente:

Recepción del panel fotovoltaico: El gestor procederá a la recepción de los paneles fotovoltaicos y documentará el mismo.

Inspección Visual: El gestor realizará una inspección visual de estado del panel, para ello documentará la condición de recepción del mismo.

Codificación: Se codificará el lote de paneles según su procedencia (doméstica, investigativa o industrial), basándose en los datos de quien realiza la entrega, pudiendo esta ser una persona natural o jurídica. En caso de que los paneles fotovoltaicos provengan desde una planta de generación pública o privada no deberá exceder de la cantidad de paneles autorizados para la actividad de generación eléctrica.

Inspección Técnica: Quien realice la entrega de los paneles fotovoltaicos, estará en la obligación de adjuntar las especificaciones técnicas del producto, con la finalidad de que el gestor ambiental identifique las características técnicas de construcción y ensamblado de estos.

Desmantelamiento 1: Extracción de baterías, conexiones eléctricas y electrónicas, elementos exteriores de los paneles, como la carcasa de protección y cableado, lo que posteriormente facilitará la reutilización y recuperación de componentes y materiales. En esta fase se considerará también los compuestos de las celdas solares según las especificaciones técnicas del producto que serían identificadas en la inspección técnica.

Pesaje: Una vez realizado el desmantelamiento 1 y 2, se procederá con el pesaje del panel para determinar los porcentajes aproximados de las cantidades de compuestos que estos mantienen en relación con las especificaciones técnicas del producto. Esto permitirá valorizar el costo

estimado del tratamiento del residuo e identificar las cantidades de los compuestos químicos para luego identificarlos y codificarlos según el listado nacional de sustancias químicas peligrosas y listados nacionales de desechos peligrosos.

Separación: Durante este proceso se separan las células de silicio o telurio de cadmio del resto de residuos que podrían ser reciclados. Para ello, los dispositivos extraídos y los materiales reutilizables se colocarán en contenedores específicos que serán enviados a los gestores autorizados quienes procederán con su tratamiento. Previa a su envío, se anotarán los siguientes datos:

Entradas = Σ entradas en el proceso.

- a) Código CRITB-CODIGO (Listado Nacional de Residuos Peligrosos)
- b) Cantidad en toneladas (t).

Salidas = Σ componentes extraídos o retirados + Σ fracciones valorizables + Σ fracciones no valorizables.

Esto facilitará que, posteriormente la reutilización y el reciclado de componentes y materiales se realicen de manera responsable con el ambiente.

Aprovechamiento de los materiales obtenidos en el proceso de desmontaje

Reciclaje de aluminio: Se retirará el marco de aluminio del panel, el cual se aprovecha en procesos de reciclaje.

Reciclaje de vidrio: Se desmontará la cubierta de vidrio del panel.

Reciclaje de plástico: Se remueve el plástico existente en el panel para ser aprovechado en reciclaje

Reciclaje de metales y cables: El circuito eléctrico y cableado deberá ser retirado de manera cuidadosa con el fin de lograr un completo aprovechamiento de estos elementos. De los cables se procederá a retirar el material aislante para el aprovechamiento y reutilización del cobre.

Valorización de los residuos fotovoltaicos

Una vez realizadas las operaciones de tratamiento y los procesos de separación de los componentes que conforman el módulo, gran parte de estos pueden ser reciclados, pues elementos tales como el vidrio, aluminio y otros semiconductores pueden ser reutilizados, a diferencia de otros materiales, que se considera recurso valorizable energéticamente.

Una gran parte de los residuos pueden ser aptos para su reciclaje y valorización, evitando así su eliminación directa. Por ejemplo, en el caso de los paneles, su componente principal, el vidrio, tiene la ventaja de ser un material que puede reciclarse en infinidad de ocasiones. En este

apartado abordaremos la valorización de los residuos desde tres puntos de vista diferentes: económica, material y energéticamente, siendo la primera y la segunda opción las más utilizadas. La recuperación de materiales presentes en los paneles fotovoltaicos, principalmente el vidrio y el aluminio, así como el resto de los metales (cadmio, telurio, plata, indio, galio, germanio, etc.) supondría un importante beneficio económico, que vendría determinado por: la cantidad de materiales recuperados, la tasa de reciclaje correspondiente, el precio de mercado del material y el nivel de pureza de este.

En los módulos fotovoltaicos, los materiales que presentan una tasa de recuperación más elevada son principalmente el vidrio y el aluminio, siendo esta del 95% y 100%, respectivamente. Para el resto de los metales, suele ser del 87% para el telurio, 89% el cobre, 40% la plata y 30% para el indio, galio y germanio, si bien este último está reservado a aplicaciones espaciales o sobre células a-Si, GaAs y de concentración (CPV), en forma de pequeños sustratos para mejorar su eficiencia. Aunque estos metales representan el 1% de la masa del panel, su recuperación tiene gran importancia, no sólo por su alto valor, sino por la escasez de recursos en algunos, como es el caso del telurio.

En la tabla 6, según A. Paiano, en su publicación Photovoltaic waste assesment in Italy; Renewable and Sustainable Energy Reviews, determina los principales materiales recuperables de módulo fotovoltaico, los cuales suponen aproximadamente el 88% del panel.

Tabla 6: Porcentajes de recuperación de materiales

MATERIAL	RESIDUO (tn)	INDICE DE RECUPERACION %	RESIDUO RECUPERADO (tn)
Vidrio	6'430 255	95	6'108 742
Aluminio	617 658	100	617 658
Silicon	162 334	81	131 490
Telurio	877	87,5	767
Cobre	56 632	89	50 403
Plata	242	40	97
Indio	5 132	30	1 540
Galio	95	30	29
Germanio	4 942	30	1 483

En la tabla 7, se constata información obtenida desde el Ministerio del Ambiente y Agua, donde se consideran los precios de compra referenciales de varios tipos de residuos, los mismos que pueden variar de acuerdo a las condiciones del mercado y la calidad de material entregado al gestor.

Tabla 7: Costos referenciales de residuos reciclados

Tipo de material	Costo referencia ctv/kg
Cartón	\$ 0,11
Plástico limpio	\$ 0,17
Plástico mixto	\$ 0,10
Plástico blanco	\$ 0,18
Chatarra electrónica	\$ 0,09
Chatarra	\$ 0,14
Aluminio	\$ 0,53
Vidrio	\$ 0,08

Conclusiones

Se demuestra lo implementado en diferentes países del mundo respecto a la gestión de los residuos fotovoltaicos, tomando como base para establecer la gestión integral de los residuos en el Ecuador.

Se abre una oportunidad de generar una economía circular, siendo esta una estrategia que tiene como objeto reducir tanto la entrada de los materiales como la producción de los residuos, cerrando flujos económicos y ecológicos de los recursos, fotovoltaicos.

Aunque el costo beneficio del reciclaje depende también de otros aspectos como la recolección y clasificación para separar las células fotovoltaicas, el reciclaje de los componentes de los paneles fotovoltaicos permitiría aprovechar el metal, plástico y vidrio, donde también la industria se beneficiaría en la reducción de gastos por la adquisición de estas materias primas, determinando un costo aproximado de \$ 0,84 ctv/kg de residuo.

Con estos procesos el Ecuador estaría considerando el manejo integral de estos residuos, los cuales vendrán a convertirse en un probable problema ambiental a un largo plazo, tomando como relación los años de inicio e implementación de la generación fotovoltaica.

Referencias

1. G. F. Velasco and E. Cabrera, "Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura," 2009.
2. J. M. Vizhñay and J. Patricio, "La matriz energética ecuatoriana," Universidad Nacional de Loja, Loja, 2013.
3. S. P. A. Latina. "SOLAR FOTOVOLTAICA ECUADOR."
 - a. Ramírez Agudelo, "Análisis y propuestas para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia," Universidad EIA, 2018.
4. (2012). LISTADO NACIONAL DE SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS [Online] Available:

5. Ambientum. "¿Que sera de los paneles solares al terminar su vida util?"
6. J. M. de Juana Sardón, Energías renovables para el desarrollo. Editorial Paraninfo, 2003.
7. ARCONEL. "ESTADISTICA ANUAL Y MULTIANUAL DEL SECTRO ELÉCTRICO ECUATORIANO."
8. ARCONEL. (2018) Estadísticas en el Sector Ecuatoriano 2018. Available:
9. T. CENTER, "Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas
10. Datos comerciales mensuales, trimestrales y anuales. Valores de importación y exportación, volumenes, tasas de crecimiento, cuotas de mercado, etc.," (in ENGLISH), 2019. [Online]. Available:.
 - a. D. E. SENAE. "IMPORTACIONES."
11. D. Camargo Torres, "Celdas solares orgánicas-energía alternativa ecológica."
12. C. Escuela Moreno, "Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos," 2017.
13. C. R. Pérez and C. L. A. Mancilla, "El papel del silicio en los organismos y ecosistemas," *Conciencia tecnológica*, no. 43, pp. 42-46, 2012.
14. M. SANDOVAL, M. B. ANGARITA, and E. E. A. DE, "TALLER DE AGUA Y ELECTROLITOS."
15. B. Ravelo Polo, "Adsorcion de boro del agua," 2012.
16. J. A. Cortez Pérez, "Identificación de la concentración de cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg), en las aguas de pozo del Recinto Los Monos cantón Milagro, y su evaluación según la normativa ecuatoriana (NORMA INEN 1108: 2014)," Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas, 2015.
17. J. L. M. Vidal, "Estudio de la contaminación por boro de las aguas de los campos de Níjar y de Dalías y de las cuencas bajas de los ríos Adra y Andarax," *Boletín del Instituto de Estudios Almerienses. Ciencias*, no. 9, pp. 235-266, 1990.
 - a. Ramírez, "Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos," in *Anales de la Facultad de Medicina*, 2002, vol. 63, no. 1: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, pp. 51-64.
18. P. A. Poma, "Intoxicación por plomo en humanos," in *Anales de la Facultad de Medicina*, 2008, vol. 69, no. 2: UNMSM. Facultad de Medicina, pp. 120-126.
19. B. I. Srvice, "European Commission DG ENV. Study on Photovoltaic Panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive," ed, 2011.

20. Acuerdo Ministerial No. 161, 2012.
21. REGLAMENTO PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION POR DESECHOS PELIGROSOS 2012.
22. M. D. A. D. ECUADOR. "ACUERDO NO. 061 REFORMA DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA." [25] A. Paiano, "Photovoltaic waste assessment in Italy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 99-112, 2015.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).