

Desarrollo de un indicador ambiental que representa la calidad de la disposición final que se realiza

Camblong, Jorge
López Medina, Franklin
Belmar Orellana, Carlos
Cardozo, Laura

Documento de trabajo

DT IDEI 1-2019

Documento presentado en

UNGS- IDEI

Publicaciones
IDEI

Documentos
de trabajo

IDEI
Instituto de Industria

Universidad Nacional
de General Sarmiento



Desarrollo de un indicador ambiental que representa la calidad de la disposición final que se realiza

17 de mayo de 2019

Camblong, Jorge; López Medina, Franklin; Belmar Orellana, Carlos; Cardozo, Laura

IDEI

Análisis, Diseño e Implementación de Sistemas Organizacionales Complejos

jcamblong@campus.ungs.edu.ar

fllopez@campus.ungs.edu.ar

cbelmar@campus.ungs.edu.ar

laucecardo@gmail.com

[Abstract: En el presente trabajo se presenta la formulación de un indicador ambiental que cumpla con dos objetivos puntuales: el primero consiste generar un indicador que permita evaluar la gestión vigente de las corrientes de salidas indeseables en un proceso industrial, y el segundo consiste en que dicho indicador permita determinar los puntos de mejora en esa gestión. Se desarrolla principalmente para industria metalmecánica. Esto se realiza partiendo de la hipótesis: Existe un indicador con la capacidad de evaluar numéricamente la gestión ambiental cuantificando únicamente los efectos presentes de la contaminación. En el desarrollo del trabajo se observará que partiendo de la generación de escalas para la disposición final de las salidas del proceso y los procesos de respuesta ante accidentes que generaron salidas no planificadas e indeseadas, se logra establecer una valoración cuantitativa. Asimismo, mediante el desarrollo de una ponderación de estas valoraciones se obtiene un valor sencillo que cuantifica la calidad de la gestión de los residuos, el compromiso de la institución y los puntos principales a mejorar. Como corolario se genera un método de evaluación que permite valorar de manera indirecta los riesgos ambientales asociados al uso de una tecnología. El indicador resultante del trabajo permite resaltar rápidamente cuales son los desechos que peor disposición final tiene, así como también evaluar que opciones existen a fin de mejorar dicha disposición.

[Palabras clave: Indicador ambiental, Disposición final, Residuos Industriales]

Introducción

En el marco de la investigación “Aplicación de modelos matemáticos para la mejora en el tratamiento, recolección y disposición de residuos industriales (30/4102)” y en colaboración con la tesis doctoral del Mg Jorge R. Camblong: “*Modelo de reducción de contaminación de industrias aplicado a metalmecánicas*”, surge la necesidad de demostrar cuantitativamente la relación entre la contaminación ambiental debida a los desechos de un proceso industrial y las materias primas asociadas a la tecnología de dicho proceso. Además, surgía la necesidad de que dicha relación permitiera evaluar rápidamente los puntos débiles de la gestión de residuos.

Apuntando al uso de un indicador que pueda sintetizar tanto la gestión de los residuos como el impacto actual que dicha gestión produce, se procedió a buscar en la bibliografía y los trabajos que tengan precedentes en la temática. De los indicadores evaluados, no se encontró ninguno que cumpliera con las premisas mencionadas. Dado que o se centran principalmente en el uso de los recursos, en impactos probables a futuro producto de una determinada actividad o a posibles accidentes futuros, en los efectos sobre un recurso en particular, entre otros; o por otra parte se incluyen dentro de indicadores sintéticos de sostenibilidad donde hay diversas maneras de ordenar las diversas situaciones, muchas de ellas en forma cualitativa (Alta, media y baja sostenibilidad, por ejemplo). Sin embargo, no permiten comparar en una escala numérica de manera sencilla entre los diferentes tipos de gestión de los desechos evaluables.

En base a este inconveniente y a los requerimientos propios de los estudios realizados, el equipo de trabajo se planteó dos objetivos puntuales:

- ✓ Generar un indicador que permita evaluar la gestión vigente de las corrientes de salida indeseables en un proceso industrial, y que
- ✓ El mismo indicador permita determinar los puntos de mejora en esa gestión.

1. Marco Conceptual

En los últimos años se ha visto un aumento en la preocupación de las industrias en la temática medioambiental. Tal es así, que se han desarrollado herramientas para evaluar y gestionar los factores medioambientales referentes a diferentes

industrias. Herramientas como la norma ISO 14001, permiten una evaluación “objetiva” de la gestión ambiental que efectúa una organización determinada.

Una de dichas herramientas existente y propuesta en dicha norma es el desarrollo de indicadores. Esto es debido a que los indicadores permiten presentar de manera cuantificable y exhaustiva el comportamiento medioambiental de la organización. De esta manera, mediante el uso de un indicador se pueden sintetizar extensos datos medioambientales en una limitada cantidad de información significativa. De esta manera, aseguran de forma rápida la evaluación de las principales mejoras y puntos débiles del proceso.

El desarrollo de un número y una variedad mayor de indicadores, generó la necesidad de clasificarlos a fin de poder distinguir fácilmente a que tiende uno o un grupo de indicadores. La siguiente Tabla 1 presenta en forma resumida una clasificación de indicadores medioambientales de una empresa:

Indicadores de comportamiento medioambiental	Indicadores de Materiales y Energía	Indicadores de Entrada
		Indicadores de Salida
	Indicadores de Infraestructura y Transporte	Indicadores de Infraestructura
		Indicadores de Transporte
Indicadores de Gestión medioambiental	Indicadores del Sistema	Implantación del Sistema
		Aspectos Legales , Denuncias y Actas de Infracción
		Costos medioambientales
	Indicadores del Área Funcional	Formación/ Personal
		Seguridad e Higiene
		Compras
		Comunicación Externa
	Indicadores de Situación	Indicadores de la Situación del Agua, el Suelo, el

medioambiental	Aire, la Flora y la Fauna
----------------	---------------------------

Tabla 1. Elaboración Propia en base a Guía de Indicadores Medioambientales para la Empresa. (IHOBE S.A. Ministerio Federal de Medio Ambiente de Alemania, 1999)

Por ejemplo, a nivel de Estudios de Impacto Ambiental, se han desarrollado diversos métodos para conseguir cuantificaciones del nivel de impacto ambiental, la de metodología desarrollada por Vicente Conesa - Fernández – Vítora en 2010 propone una Ecuación para el Cálculo de la Importancia (I) de un impacto ambiental:

$$I = \pm [3 \cdot i + 2 \cdot Ex + Mo + Pe + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Mc] \quad (\text{Ecuación 1})$$

(Conesa Fernandez 2010)

Siendo,

I = Importancia del impacto

± = Naturaleza del impacto

i = Intensidad o grado probable de destrucción

Ex = Extensión o área de influencia del impacto

Mo = Momento o tiempo entre la acción y la aparición del impacto

Pe = Persistencia o permanencia del efecto provocado por el impacto

Rv = Reversibilidad

Si = Sinergia o reforzamiento de dos o más efectos simples

Ac = Acumulación o efecto de incremento progresivo

Ef = Efecto (tipo directo o indirecto)

Pr = Periodicidad

Mc = Recuperabilidad o grado posible de reconstrucción por medios humanos

A partir de cada uno de los ítems estudiados se puede determinar el valor ponderado de cada uno de ellos. La Ecuación 1 se desarrolla mediante el modelo propuesto en la Tabla 2, cabe aclarar que la fórmula admite valores intermedios:

Signo		Intensidad	
Beneficioso	+	Baja	1
Perjudicial	-	Total	12

Extensión		Momento	
Puntual	1	Largo Plazo	1
Parcial	2	Medio Plazo	2
Extenso	4	Inmediato	4
Total	8	Crítico	8
Crítica	12		
Persistencia		Reversibilidad	
Fugaz	1	Corto Plazo	1
Temporal	2	Medio Plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
Sinergia		Acumulación	
Sin sinergismo	1	Simple	1
Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
Efecto		Periodicidad	
Indirecto	1	Irregular	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4
Recuperabilidad			
Recuperabilidad inmediata		1	
Recuperable		2	
Mitigable		4	
Irrecuperable		8	

Tabla 2. Criterios para el cálculo de la importancia de un impacto ambiental. Fuente: Metodología para el cálculo de las Matrices Ambientales (Hidroar S.A. s.f.)

El resultado obtenido al aplicar este modelo se analiza siguiendo lo indicado en la Tabla 3.

Valor / ponderado	Calificación
-------------------	--------------

Valor / ponderado	Calificación
$I < 2,5$	BAJO
$2,5 \leq I < 5$	MODERADO
$5 \leq I < 7,5$	SEVERO
$7,5 \leq I$	CRÍTICO

Tabla 3. Criterios para el análisis de la importancia de un impacto ambiental. Fuente: Metodología para el cálculo de las Matrices Ambientales (Hidroar S.A. s.f.)

Los indicadores aquí presentados y otros que se han desarrollado no permiten evaluar lo buscado, por lo que se desarrolló un indicador nuevo, que cumpla con las características enunciadas en los objetivos.

El diseño y la elaboración de un indicador busca seguir y monitorear fenómenos o procesos que necesitan de intervención, o que requieren de un programa de acción. Debido a esto, a los indicadores se les da una intencionalidad desde su origen, y requieren de un cuidadoso proceso de desarrollo en el que se calibran varios criterios como la disponibilidad y calidad de información, la relevancia del indicador, el aporte del indicador al Sistema de Indicadores, entre otros.

Así Banco Mundial desarrolló 6 preguntas de análisis clave para determinar si un indicador cumple con los criterios de calidad correspondientes. Las preguntas, se denominan “Análisis CREMA”, porque el indicador debe cumplir con las siguientes características Claro, Relevante, Económico, Medible y Adecuado. (Cardenas y otros 2014)

- Claro: Debe ser preciso e inequívoco, asociado a la pregunta: ¿Es el indicador suficientemente preciso para garantizar una medición objetiva?
- Relevante: Se busca que sea apropiado al tema en cuestión. ¿Es el indicador un reflejo lo más directo posible del objetivo?

- Económico: Se busca que se pueda determinar a un costo razonable. ¿Es el indicador capaz de emplear un medio práctico y asequible para la obtención de datos?
- Medible: Debe ser abierto a validación independiente. ¿Están las variables del indicador suficientemente definidas para asegurar que lo que se mide hoy es lo mismo que se va a medir en cualquier tiempo posterior, sin importar quien haga la medición?
- Adecuado: Debe ofrecer una base suficiente para estimar el desempeño. ¿Es el indicador suficientemente representativo del total de los resultados deseados y su comportamiento puede ser observado periódicamente?

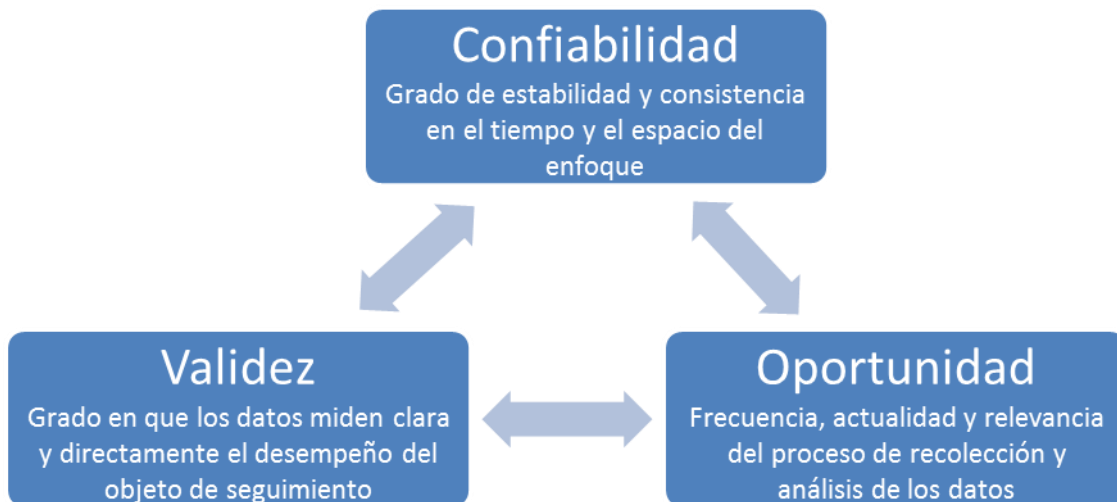


Figura 1. Marco metodológico para el análisis de calidad de información. Fuente: Elaboración propia en base a gráfica en Manual de Indicadores (Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquía. 2017)

A partir de la necesidad de seleccionar o realizar indicadores robustos que generen medidas numéricas específicas se define el marco metodológico para el análisis de calidad de información a través de los criterios de validez, confiabilidad y oportunidad.

Teniendo en cuenta estos criterios se puede poner a prueba cualquier indicador que se desee utilizar para determinar una magnitud.

A fin de clarificar el uso de las expresiones indicadores ambientales o medioambientales, e indicadores de sostenibilidad se presentan las limitaciones para su uso en ambos casos.

Los indicadores ambientales se ocupan de describir y mostrar los estados y las principales dinámicas ambientales, es decir el estatus y la tendencia por ejemplo de: la biota y biodiversidad, la cantidad y calidad de agua, la calidad del aire, la calidad del suelo, la carga contaminante y renovabilidad de la oferta energética, la disponibilidad y extracción de algunos recursos naturales (bosques, pesca, agricultura), la infraestructura, la producción de desechos sólidos, el uso de agrotóxicos, la contaminación sonora y visual, la frecuencia e intensidad de los desastres naturales, etc.

En cambio los indicadores de sostenibilidad pretenden visualizar las dinámicas económicas, sociales y ambientales, y cómo se relacionan entre ellas, tal y como se observa en la Figura 2.

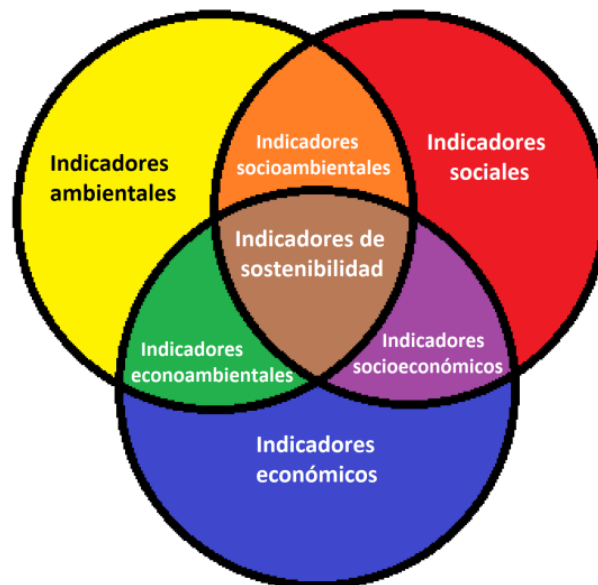


Figura 2. Relación entre los indicadores de diferente enfoque. Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, a los fines de este trabajo se desea conseguir un indicador ambiental para su posterior uso en forma individual o que sirva de base para un indicador de sostenibilidad.

La complejidad de conseguir un indicador ambiental que permita identificar el nivel de impacto ambiental que está realizando un proceso productivo en particular, es que sea objetivo. Esto se debe a que existe una dificultad en cuantificar mediante un valor comparable cuál salida no deseada (residuos sólidos, emisiones, efluentes) produce mayor impacto. Este problema surge debido a que por ejemplo, un proceso en particular puede producir 100 g de mercurio dándole una disposición final adecuada, pero a la vez produce 1000 kg de plástico reciclable que es dispuesto en los vertederos municipales mezclado con otros residuos asimilables a urbanos. En ese caso, el mercurio está produciendo menor impacto ambiental que el plástico en condiciones normales de producción y disposición, y sin embargo por su peligrosidad el mercurio es el punto sobre el cual se haría énfasis normalmente en la gestión.

2. Desarrollo

Bajo la premisa de elaborar un indicador que primeramente cumpla con los objetivos fijados y además que pueda responder las preguntas elaboradas por el Banco Mundial para comprobar la calidad de un indicador, se siguieron los siguientes pasos:

- ✓ Primero, se decidió denominar al indicador como Impacto ambiental generado por la sustancia x. Para posteriormente hacer las operaciones necesarias que permitan sintetizar a una determinada cantidad de estos indicadores en el indicador Impacto producido por una industria, materia prima u operación unitaria.
- ✓ Segundo, se trabajó sobre el principio de Pareto, considerando que el 80% del impacto lo va a realizar el 20% de los desechos. Este criterio fue el que se utilizó a la hora de seleccionar los valores sobre los que se realiza las ponderaciones en la síntesis de los indicadores intermedios y finales.
- ✓ Tercero, se desglosó cada uno de las salidas no deseadas de acuerdo a la tabla 4, generándose así un indicador para algunos niveles un indicador tal y como se detalla en la tabla, considerando como A, a la sustancia en estudio:

Nivel	Nivel Secundario	Subnivel 1	Subnivel 2
-------	------------------	------------	------------

Principal			
Salidas no deseadas (I_A)	Residuos sólidos ($I_{residuos}^A$)	Peligrosos ($I_{peligrosos}^A$)	En condiciones normales de operación
			Accidente
		Industriales ($I_{industriales}^A$)	
		Asimilables a Urbanos ($I_{urbanos}^A$)	
	Efluentes ($I_{efluentes}^A$)	En condiciones normales de operación	
		Accidente	
	Emisiones ($I_{emisiones}^A$)	En condiciones normales de operación	
		Accidente	

Tabla 4. División de las salidas no deseadas junto con el indicador generado a partir de ella

Fuente: Producción Propia

- ✓ Cuarto, de manera similar a la grilla de evaluación presentada en Indicators of Sustainable Development of Health Care Waste Treatment Industry (Maamari y otros. 2017), se generaron grillas con escalas de disposición final como de la remediación de desechos indeseables, en base a criterios propios de los autores. Catalogando disposiciones finales propias de cada salida indeseada, así como remediaciones ante accidentes en una escala numérica del 1 al 10, siendo 1 una disposición final deseada y 10 la falta de ella. En dicha grilla se tienen en cuenta los principales tipos de disposición final así como de remediación, quedando para trabajos futuros analizar en detalle cada una de ellas, así como también mejorar el sistema de asignación de valores.

- ✓ Quinto, se inició el desglose correspondiente del indicador, obteniéndose las siguientes ecuaciones que sintetiza los indicadores de los niveles principales:

$$I_A = f_1 \cdot I_{emisiones}^A + f_2 \cdot I_{efluentes}^A + f_3 \cdot I_{residuos}^A \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$I_{residuos}^A = g_1 \cdot I_{peligrosos}^A + g_2 \cdot I_{industriales}^A + g_3 \cdot I_{urbanos}^A \quad (\text{Ecuación 3})$$

- ✓ Sexto, a fin de simplificar los tiempos que se debía emplear para el análisis de cada uno de los indicadores, se limitan las salidas no deseadas a dos por nivel y subnivel, luego de haber listado todas. De esta manera si hay tres o más salidas no deseadas clasificadas como emisiones en condiciones normales de operación, se terminan seleccionando sólo dos, de igual forma con cada una de las otras subdivisiones de las salidas no deseadas. La forma en que se seleccionan tiene que ver con las de mayor valoración en la grilla propia de cada salida no deseada. De esta manera siempre quedan visibilizadas las de peor gestión, cumpliéndose en parte con el segundo objetivo.
- ✓ Séptimo, una vez definido el criterio anterior, se construyeron las ecuaciones para determinar cada uno de los indicadores base, de acuerdo a la ecuación 4 y la ecuación 5:

$$I_{SNDx}^A = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo,

I_{SNDx}^A el impacto producido por la salida no deseada x, este se reemplaza por residuos sólidos peligrosos, efluentes o emisiones

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final de la salida no deseada tipo x de mayor valor en condiciones normales de operación

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final de la salida no deseada tipo x de segundo mayor valor en condiciones normales de operación.

$$s_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{producto de un accidente} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{producto de un accidente} \end{cases}$$

M_1 = índice de remediación del accidente que produjo salidas no deseadas tipo x con el mayor valor.

$$s_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{producto de un accidente} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de salidas no deseadas tipo x} \\ & \text{producto de un accidente} \end{cases}$$

M_2 = índice de remediación del accidente que produjo salidas no deseadas tipo x con el segundo mayor valor.

$$n = \begin{cases} 2 & \text{si hubo accidentes con generación de salidas no deseadas tipo x} \\ 1 & \text{si no hubo accidentes con generación de salidas no deseadas tipo x} \end{cases}$$

$$I_{SNDy}^A = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo,

I_{SNDy}^A el impacto producido por la salida no deseada y, este se reemplaza por residuos sólidos industriales o asimilables a urbanos

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de salidas no deseadas tipo y} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de salidas no deseadas tipo y} \\ & \text{condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final de la salida no deseada tipo y de mayor valor en condiciones normales de operación

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de salidas no deseadas tipo y} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de salidas no deseadas tipo y} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final de la salida no deseada tipo y de segundo mayor valor en condiciones normales de operación.

- ✓ Octavo, se definen los valores para f_i y g_i de las ecuaciones 2 y 3 de la siguiente manera:
 - ✓ Se ordenan los valores del impacto calculados para los diferentes tipos de salidas no deseadas
 - ✓ Se le asigna el valor 0,6 al de mayor, 0,3 al de valor medio y 0,1 al de menor valor. En el caso que uno de los impactos tenga un valor de 0, se considerará un valor de 0,65 al de mayor impacto y 0,35 al de menor valor. En el caso que dos de los impactos sean nulos, se considera un valor de 1.
- ✓ Noveno, se genera un ejemplo supuesto a fin de probar su eficacia.

Dentro de los criterios que se asumen, se debe tener en cuenta que cada salida no deseada se analiza en base a la disposición final que se haga de la sustancia en estudio, por ejemplo: si estoy analizando cobre y tengo un efluente cuyo tratamiento se realiza para eliminar el contenido de cadmio, no puedo considerar que el efluente está tratado desde el punto de vista del cobre.

1. Resultados, Conclusiones y Propuestas para trabajos futuros

El indicador desarrollado cumple con el criterio CREMA del Banco Mundial debido a que es:

- preciso e inequívoco, por lo que es Claro
- apropiado a la temática, por lo que es Relevante
- fácilmente determinable, porque se obtiene a partir de información que la empresa posee, por lo que es Económico
- determinable independientemente del tiempo y de las personas que lo evalúen, por lo que es Medible
- observable periódicamente y representativo, por lo que es Adecuado.

Además, cumple con los dos objetivos propuestos al empezar el desarrollo del trabajo.

En primer lugar, permite evaluar la gestión vigente de las corrientes de salida indeseables en un proceso industrial. El indicador pondera la disposición final que se le realiza a las corrientes de desecho del proceso. Entonces, mediante un valor se puede visualizar la lejanía de una adecuada disposición final. Asimismo,

permite evaluar rápidamente la respuesta que se tuvo ante contingencias no previstas, que impactaron en el ambiente.

El segundo objetivo se cumple debido a que en forma rápida y objetiva se puede determinar cuáles son las corrientes de desecho que tienen la peor disposición final. Esto permite evaluar alternativas para optimizar dicha disposición final y generar políticas a largo plazo.

Dentro de ese camino, la evaluación en el tiempo de este indicador permitirá que se pueda observar de manera objetiva si ha mejorado la disposición final de las corrientes de desecho.

Otro de los aspectos positivos consiste en la posible utilización de este indicador como un indicador de benchmarking. Esto es debido a que al ser independiente de la escala de producción, industrias de distinta escala pueden compararse entre sí. Quedan como trabajos a futuro a fin de poder terminar de validarlo, evaluarlo en una cantidad apreciable de industrias metalmeccánicas, así como evaluarlo en el tiempo. Por otro lado se desean desarrollar estrategias que tiendan a objetivar la puntuación en las grillas comparativas generadas, así como ampliar las posibilidades de disposición final y remediación que ellas listan. Por último, evaluar el indicador en otras industrias a fin de evaluar su posible aplicación en otras industrias.

Bibliografía

Cardenas y otros, 2014, Guía para la aprobación de indicadores de programas sociales, Conval, Méjico

Conesa Fernandez Vicente, 2010, Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental, 4 Edición, Ediciones Paraninfo SA, Madrid - España

Hidroar S.A. "Metodología para el Cálculo de las Matrices Ambientales". s.f.

Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquía., 2017 "Manual de Indicadores"

Maamari, Olivia y otros, 2017, "Indicators of Sustainable Development for Health Care Waste Treatment Industry". Journal of Environmental Research, Engineering and Management. Vol 73 N°2 Págs 7-19

Martínez, Javier y otros, 2005, "Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos. Tomo I". Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe.

Ministerio Federal de Medio Ambiente de Alemania, 1999, "Guía de Indicadores Medioambientales para la Empresa". IHOBE S.A.

Quiroga Martínez, Rayén. 2009, "Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe". CEPAL.

<https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/indicadores> visitada el 02/04/2019

ANEXO A: Metodología de Cálculo y Ejemplo de Aplicación

2.1. Cálculo del Impacto de una sustancia A

El indicador *Impacto de una sustancia* es una ecuación polinómica que depende de los indicadores *Impacto* de las emisiones, los efluentes y los residuos del proceso, tal y como se indica en la ecuación A1;

$$I_A = f_1 \cdot I_{emisiones}^A + f_2 \cdot I_{efluentes}^A + f_3 \cdot I_{residuos}^A \quad (\text{Ecuación A1})$$

Siendo,

I_A =El impacto calculado para la sustancia A. Tiene un valor de 0 a 10

$I_{emisiones}^A$ = El impacto producido por la sustancia A en las emisiones. Tiene un valor de 0 a 10

$I_{efluentes}^A$ =El impacto producido por la sustancia A en los efluentes. Tiene un valor de 0 a 10

$I_{residuos}^A$ =El impacto producido por la sustancia A en los residuos sólidos. Tiene un valor de 0 a 10

f_i = Es la fracción del impacto producido asignado sobre el impacto total. Este se determina mediante el siguiente procedimiento:

1. Se ordenan los valores del impacto calculados para la sustancia en las emisiones, los efluentes y los residuos sólidos
2. Se le asigna el valor 0,6 al de mayor, 0,3 al de valor medio y 0,1 al de menor valor. En el caso que uno de los impactos tenga un valor de 0, se considerará un valor de 0,65 al de mayor impacto y 0,35 al de menor valor. En el caso que dos de los impactos sean nulos, se considera un valor de 1

2.2. Cálculo del Impacto de la sustancia A en los residuos sólidos

El impacto de residuos sólidos se calcula a partir de la Ecuación A2:

$$I_{residuos}^A = g_1 \cdot I_{peligrosos}^A + g_2 \cdot I_{industriales}^A + g_3 \cdot I_{urbanos}^A \quad (\text{Ecuación A2})$$

Siendo,

$I_{residuos}^A$ = El impacto producido por la sustancia A en los residuos sólidos. Tiene un valor de 0 a 10

$I_{peligrosos}^A$ = El impacto producido por la sustancia en los residuos peligrosos sólidos. Tiene un valor entre 0 y 100

$I_{industriales}^A$ = El impacto producido por los residuos sólidos industriales. Tiene un valor entre 0 y 10

$I_{urbanos}^A$ = El impacto producido por los residuos sólidos industriales asimilables a urbanos. Tiene un valor entre 0 y 10

g_i = Es la fracción del impacto producido asignado sobre el impacto de residuos.

Este se determina mediante el siguiente procedimiento:

1. Se ordenan los valores del impacto calculados para los diferentes tipos de residuos sólidos
2. Se le asigna el valor 0,6 al de mayor, 0,3 al de valor medio y 0,1 al de menor valor. En el caso que uno de los impactos tenga un valor de 0, se considerará un valor de 0,65 al de mayor impacto y 0,35 al de menor valor. En el caso que dos de los impactos sean nulos, se considera un valor de 1.

2.3. Cálculo del Impacto de la sustancia A en los residuos peligrosos sólidos

Para este caso, el procedimiento propuesto es el siguiente:

1. Se listan los residuos peligrosos en condiciones normales de operación que contienen la sustancia A y se le asigna un valor de D a cada uno.
2. Se ordenan de mayor a menor en función de D.
3. Se repite dicho procedimiento para los residuos peligrosos generados en ocasión de un accidente, que contienen la sustancia A, asignándoles un valor de M, y ordenándolos en función de ese valor.

El impacto de residuos sólidos peligrosos se calcula a partir de la Ecuación A3:

$$I_{peligrosos}^A = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n} \quad (\text{Ecuación A3})$$

Siendo,

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente o flujo de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente o flujo de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final del residuo peligroso de mayor valor en condiciones normales de operación (ver Tabla A1)

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final del residuo peligroso de segundo mayor valor en condiciones normales de operación. (ver Tabla A1)

$$s_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos producto de un accidente} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos producto de un accidente} \end{cases}$$

M_1 = índice de remediación del accidente que produjo residuos sólidos peligrosos con el mayor valor. (ver Tabla A2)

$$s_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos producto de un accidente} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos} \\ & \text{peligrosos producto de un accidente} \end{cases}$$

M_2 = índice de remediación del accidente que produjo residuos sólidos peligrosos con el segundo mayor valor. (ver Tabla A2)

$$n = \begin{cases} 2 & \text{si hubo accidentes con generación de residuos sólidos peligrosos} \\ 1 & \text{si no hubo accidentes con generación de residuos sólidos peligrosos} \end{cases}$$

Valores de D_i

Siguiendo los criterios mencionados anteriormente

Valor de D_i	Asignado por:
0,5	Reuso total
1,0	Reuso parcial

Valor de D_i	Asignado por:
1,5	Reciclado total
2,0	Reciclado parcial
3,0	Tratamiento con modificación total de las propiedades peligrosas del residuo sin generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
3,5	Tratamiento con modificación total de las propiedades peligrosas del residuo con generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
4,0	Tratamiento con modificación parcial de las propiedades peligrosas del residuo sin generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
4,5	Tratamiento con modificación parcial de las propiedades peligrosas del residuo con generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
5,0	Almacenamiento en planta con segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
5,5	Almacenamiento en planta sin segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
6,0	Almacenamiento fuera de planta con segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
6,5	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos dentro de contenedores cerrados

Valor de D_i	Asignado por:
7,0	Almacenamiento en planta con segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
7,5	Almacenamiento en planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
8,0	Almacenamiento fuera de planta con segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
8,5	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
9,0	Disposición como residuo industrial
9,5	Disposición como residuo asimilable a urbano
10	Sin disposición final en planta ni en otro lugar

Tabla A1. Criterios para la selección del índice de disposición final de residuos peligrosos sólidos.

Fuente: Elaboración Propia

Valores de M_j

En caso de producirse un accidente que provoque un vuelco de residuos peligrosos, se considera la manera en que se gestionó la remediación y la capacidad de poder remediar el mismo:

Valor de M_j	Asignado por:
3,0	Recuperado inmediatamente sin efectos negativos sobre el ambiente
4,0	Recuperado inmediatamente con efectos bajos sobre el ambiente

Valor de M_j	Asignado por:
5,0	El proceso de recuperación es superior a 1 año y menor a 5 años, produciéndose impactos menores durante ese tiempo
6,0	Recuperado inmediatamente con efectos graves sobre el ambiente
6,5	El proceso de recuperación es superior a 5 años y es menor a 10 años produciéndose impactos menores durante ese tiempo
7,0	El proceso de recuperación es superior a 10 años y se producen impactos menores durante ese tiempo
7,5	El impacto producido es mitigable
8,0	El proceso de recuperación es superior a 1 año y menor a 5 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
8,5	El proceso de recuperación es superior a 5 años y menor a 10 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
9,0	El proceso de recuperación es superior a 10 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
9,5	El proceso de recuperación es superior a 25 años
10	No hay proceso de recuperación en la actualidad

Tabla A2. Criterios para la selección del índice de remediación de accidentes que involucren residuos peligrosos sólidos. Fuente: Elaboración Propia

2.4. Cálculo del Impacto de la sustancia A en los residuos sólidos industriales

Para este caso se listan los residuos sólidos industriales en condiciones normales de operación que contienen la sustancia A y se les asigna un valor de D a cada uno. Se ordenan de mayor a menor en función de D.

$$I_{industriales}^A = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 \quad (\text{Ecuación A4})$$

Siendo,

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos} \\ & \text{industriales en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos} \\ & \text{industriales en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final del residuo sólido industrial de mayor valor en condiciones normales de operación (ver Tabla A3)

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos} \\ & \text{industriales en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos} \\ & \text{industriales en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final del residuo sólido industrial de segundo mayor valor en condiciones normales de operación. (ver Tabla A3)

Valores de D_k

Valor de D_k	Asignado por:
0,5	Reuso total
1,0	Reuso parcial
1,5	Reciclado total
2,0	Reciclado parcial
3,0	Tratamiento del residuo sin generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
4,0	Tratamiento del residuo con generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
5,0	Almacenamiento en planta con segregación de residuos dentro de contenedores cerrados

Valor de D_k	Asignado por:
5,5	Almacenamiento en planta sin segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
6,0	Almacenamiento fuera de planta con segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
6,5	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
7,0	Almacenamiento en planta con segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
7,5	Almacenamiento en planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados Accidente con vuelco de residuos con remediación inmediata
8,0	Almacenamiento fuera de planta con segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
8,5	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados Accidente con vuelco de residuos con proceso de recuperación no inmediata
9,0	Accidente con efectos mitigables
9,5	Disposición como residuo asimilable a urbano
10	Sin disposición final en planta ni en otro lugar Accidente con efectos irremediables

Tabla A3. Criterios para la selección del índice de disposición final de residuos sólidos industriales.

Fuente: Elaboración Propia

2.5. Cálculo del Impacto de la sustancia A en los residuos sólidos asimilables a urbanos

Para calcular el Impacto de los residuos sólidos asimilables a urbanos, se listan los residuos sólidos asimilables a urbanos en condiciones normales de operación que contienen la sustancia A y se les asigna un valor de D a cada uno. Se ordenan de mayor a menor en función de D.

$$I_{urbanos}^A = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 \quad (\text{Ecuación A5})$$

Siendo,

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos asimilables} \\ & \text{a urbanos en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos asimilables} \\ & \text{a urbanos en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final del residuo sólido asimilable a urbano de mayor valor en condiciones normales de operación (ver tabla A4)

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de residuos sólidos asimilables} \\ & \text{a urbanos en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de residuos sólidos asimilables} \\ & \text{a urbanos en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final del residuo sólido asimilable a urbano de segundo mayor valor en condiciones normales de operación. (ver Tabla A4)

Valores de D_i

Valor de D_i	Asignado por:
0,5	Reuso total
1,0	Reuso parcial
1,5	Reciclado total
2,0	Reciclado parcial
3,0	Tratamiento del residuo sin generación de emisiones, efluentes

Valor de D_t	Asignado por:
	o nuevos residuos
4,0	Tratamiento del residuo con generación de emisiones, efluentes o nuevos residuos
5,0	Almacenamiento en planta con segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
5,5	Almacenamiento en planta sin segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
6,0	Almacenamiento fuera de planta con segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
6,5	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos dentro de contenedores cerrados
7,0	Almacenamiento en planta con segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
7,5	Almacenamiento en planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados Accidente con vuelco de residuos con remediación inmediata
8,0	Almacenamiento fuera de planta con segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
8,5	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados Accidente con vuelco de residuos con proceso de recuperación no inmediata
10	Sin disposición final en planta ni en otro lugar

Valor de D_1	Asignado por:
	Accidente con efectos irremediables

Tabla A4. Criterios para la selección del índice de disposición final de residuos sólidos asimilables a urbanos. Fuente: Elaboración Propia

2.6. Cálculo del Impacto de la sustancia A en los efluentes

Para sustancias en efluentes, se listan los efluentes en condiciones normales de operación que contienen la sustancia A y se les asigna un valor de D a cada uno. Se ordenan de mayor a menor en función de D. Se repite dicho procedimiento para los efluentes generados en ocasión de un accidente que contienen la sustancia A, asignándoles un valor de M, y posteriormente ordenándolos en función de ese valor.

$$I_{\text{efluentes}}^A = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n} \quad (\text{Ecuación A6})$$

Siendo,

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de efluentes} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de efluentes} \\ & \text{condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final del efluente de mayor valor en condiciones normales de operación (ver Tabla A5)

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de efluentes} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de efluentes} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final del efluente de segundo mayor valor en condiciones normales de operación. (ver Tabla A5)

$$s_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de efluentes} \\ & \text{producto de un accidente} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de efluentes} \\ & \text{producto de un accidente} \end{cases}$$

M_1 = índice de remediación del accidente que produjo efluentes con el mayor valor.

(ver Tabla A6)

$$s_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de efluentes} \\ & \text{producto de un accidente} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de efluentes} \\ & \text{producto de un accidente} \end{cases}$$

M_2 = índice de remediación del accidente que produjo efluentes con el segundo mayor valor. (ver Tabla A6)

$$n = \begin{cases} 2 & \text{si hubo accidentes con generación de efluentes} \\ 1 & \text{si no hubo accidentes con generación de efluentes} \end{cases}$$

Valores de D_{ri}

Siguiendo los criterios mencionados anteriormente

Valor de D_{ri}	Asignado por:
1,0	En el efluente hay una concentración menor al 10% de lo tolerado después de un tratamiento
2,0	En el efluente hay una concentración menor al 10% de lo tolerado sin tratamiento
3,0	En el efluente hay una concentración entre el 10% y el 25 % de lo tolerado después de un tratamiento
4,0	En el efluente hay una concentración entre el 10% y el 25 % de lo tolerado sin tratamiento
5,0	En el efluente hay una concentración entre el 25% y el 50 % de lo tolerado después de un tratamiento
5,5	En el efluente hay una concentración entre el 25% y el 50 % de lo tolerado sin tratamiento

Valor de D_{75}	Asignado por:
6,0	En el efluente hay una concentración entre el 50% y el 75 % de lo tolerado después de un tratamiento
6,5	En el efluente hay una concentración entre el 50% y el 75 % de lo tolerado sin tratamiento
7,0	En el efluente hay una concentración entre el 75% y el 100% de lo tolerado después de un tratamiento
8,0	En el efluente hay una concentración entre el 75% y el 100 % de lo tolerado sin tratamiento
9,0	La concentración en el efluente es mayor a la tolerada pero menor a la concentración considerada mortal
10,0	La concentración en el efluente es igual o mayor a la concentración considerada mortal

Tabla A5. Criterios para la selección del índice de disposición final de efluentes. Fuente: Elaboración Propia

Valores de M_j

En caso de producirse un accidente que provoque un vuelco de se considera la manera en que se gestionó la remediación y la capacidad de poder remediar el mismo:

Valor de M_j	Asignado por:
3,0	Recuperado inmediatamente sin efectos negativos sobre el ambiente
4,0	Recuperado inmediatamente con efectos bajos sobre el ambiente

Valor de M_j	Asignado por:
5,0	El proceso de recuperación es superior a 1 año y menor a 5 años, produciéndose impactos menores durante ese tiempo
6,0	Recuperado inmediatamente con efectos graves sobre el ambiente
6,5	El proceso de recuperación es superior a 5 años y es menor a 10 años produciéndose impactos menores durante ese tiempo
7,0	El proceso de recuperación es superior a 10 años y se producen impactos menores durante ese tiempo
7,5	El impacto producido es mitigable
8,0	El proceso de recuperación es superior a 1 año y menor a 5 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
8,5	El proceso de recuperación es superior a 5 años y menor a 10 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
9,0	El proceso de recuperación es superior a 10 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
9,5	El proceso de recuperación es superior a 25 años
10	No hay proceso de recuperación en la actualidad

Tabla A6. Criterios para la selección del índice de la remediación de accidentes que involucren líquidos. Fuente: Elaboración Propia

2.7. Cálculo del Impacto de la sustancia A en las emisiones

Para el caso en el que las sustancias se encuentren en emisiones, se listan las emisiones en condiciones normales de operación que contienen la sustancia A y se les asigna un valor de D a cada uno. Se ordenan de mayor a menor en función

de D. Se repite dicho procedimiento para las emisiones, generados en ocasión de un accidente, que contienen la sustancia A, asignándoles un valor de M, y posteriormente ordenándolos en función de ese valor.

$$I_{emisiones}^A = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n} \quad (\text{Ecuación A7})$$

Siendo,

$$r_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de emisiones} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de emisiones} \\ & \text{condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_1 = índice de disposición final de la emisión de mayor valor en condiciones normales de operación (ver Tabla A7)

$$r_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de emisiones} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de emisiones} \\ & \text{en condiciones normales de operación} \end{cases}$$

D_2 = índice de disposición final de la emisión de segundo mayor valor en condiciones normales de operación. (ver Tabla A7)

$$s_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{si hay más de una corriente de emisiones} \\ & \text{producto de un accidente} \\ 1 & \text{si hay una sola corriente de emisiones} \\ & \text{producto de un accidente} \end{cases}$$

M_1 = índice de remediación del accidente que produjo emisiones con el mayor valor. (ver Tabla A8)

$$s_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{si hay más de una corriente de emisiones} \\ & \text{producto de un accidente} \\ 0 & \text{si hay una sola corriente de emisiones} \\ & \text{producto de un accidente} \end{cases}$$

M_2 = índice de remediación del accidente que produjo emisiones con el segundo mayor valor.(ver Tabla A8)

$$n = \begin{cases} 2 & \text{si hubo accidentes con generación de emisiones} \\ 1 & \text{si no hubo accidentes con generación de emisiones} \end{cases}$$

Valores de D_p

Siguiendo los criterios mencionados anteriormente

Valor de D_{pj}	Asignado por:
1,0	En la emisión hay una concentración menor al 10% de lo tolerado después de un tratamiento
2,0	En la emisión hay una concentración menor al 10% de lo tolerado sin tratamiento
3,0	En la emisión hay una concentración entre el 10% y el 25 % de lo tolerado después de un tratamiento
4,0	En la emisión hay una concentración entre el 10% y el 25 % de lo tolerado sin tratamiento
5,0	En la emisión hay una concentración entre el 25% y el 50 % de lo tolerado después de un tratamiento
5,5	En la emisión hay una concentración entre el 25% y el 50 % de lo tolerado sin tratamiento
6,0	En la emisión hay una concentración entre el 50% y el 75 % de lo tolerado después de un tratamiento
6,5	En la emisión hay una concentración entre el 50% y el 75 % de lo tolerado sin tratamiento
7,0	En la emisión hay una concentración entre el 75% y el 100% de lo tolerado después de un tratamiento
8,0	En la emisión hay una concentración entre el 75% y el 100 % de lo tolerado sin tratamiento
9,0	La concentración en la emisión es mayor a la tolerada pero menor a la concentración considerada mortal
10,0	La concentración en la emisión es igual o mayor a la

Valor de D_{p_i}	Asignado por:
	concentración considerada mortal

Tabla A7. Criterios para la selección del índice de disposición final de emisiones. Fuente:
Elaboración Propia

Valores de M_q

En caso de producirse un accidente que provoque una fuga se considera la manera en que se gestionó la remediación y la capacidad de poder remediar el mismo:

Valor de M_q	Asignado por:
3,0	Recuperado inmediatamente sin efectos negativos sobre el ambiente
4,0	Recuperado inmediatamente con efectos bajos sobre el ambiente
5,0	El proceso de recuperación es superior a 1 año y menor a 5 años, produciéndose impactos menores durante ese tiempo
6,0	Recuperado inmediatamente con efectos graves sobre el ambiente
6,5	El proceso de recuperación es superior a 5 años y es menor a 10 años produciéndose impactos menores durante ese tiempo
7,0	El proceso de recuperación es superior a 10 años y se producen impactos menores durante ese tiempo
7,5	El impacto producido es mitigable
8,0	El proceso de recuperación es superior a 1 año y menor a 5 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo

Valor de M_q	Asignado por:
8,5	El proceso de recuperación es superior a 5 años y menor a 10 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
9,0	El proceso de recuperación es superior a 10 años produciéndose impactos graves durante ese tiempo
9,5	El proceso de recuperación es superior a 25 años
10	No hay proceso de recuperación en la actualidad

Tabla A8. Criterios para la selección del índice de remediación de accidentes que involucren sustancias en estado gaseoso o vapor. Fuente: Elaboración Propia

Anexo B: Ejemplo de Aplicación

Se supone que en una fábrica, se utiliza cobre, cadmio y zinc en su proceso de fabricación. Al caracterizar los residuos, los efluentes y las emisiones se obtiene el siguiente resultado:

Salida del Proceso	Cobre	Cadmio	Cinc
Residuo sólido 1 (Peligroso)	0,01	0,005	0,25
Residuo sólido 2 (Industrial)	0,002	0,002	0,03
Residuo sólido 3 (Peligroso)	0,2	0,003	0,15
Efluente 1	0,5 µg/L	2,0 µg/L	No detectado
Efluente 2	No detectado	35 µg/L	No detectado
Residuo sólido 4 (Industrial)	0,50	0,015	0,20
Residuo sólido 5 (Urbano)	0,001	No detectado	0,010

Al consultar sobre los tratamientos realizados, se consigue la siguiente información:

Salida del Proceso	Tratamiento	Disposición final
Residuo sólido 1 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados
Residuo sólido 2 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Reuso

Salida del Proceso	Tratamiento	Disposición final
Residuo sólido 3 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Disposición como residuo industrial
Efluente 1	Sin tratar	Sin tratar
Efluente 2	Biorremediación con plantas acumuladoras de cadmio	Vertido en cauce
Residuo sólido 4 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Tratamiento del residuo con generación de emisiones y residuos(Incineración)
Residuo sólido 5 (Urbano)	Almacenamiento en recipiente de residuos	Recolección municipal y disposición en vertedero

Además, no se registraron accidentes que produjeran residuos sólidos, efluentes o emisiones con esas sustancias involucradas.

Determinación del Indicador para el cobre

1) Residuos sólidos peligrosos

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 1 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados	7,0
Residuo sólido 3 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Disposición como residuo industrial	9,0

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cu}} = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n}$$

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cu}} = \frac{0,8 \cdot 9,0 + 0,2 \cdot 7,0}{1}$$

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cu}} = 8,6$$

2) Residuos sólidos industriales

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 2 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Reuso total	0,5
Residuo sólido 4 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Tratamiento del residuo con generación de emisiones y residuos(Incineración)	4,0

$$I_{\text{industriales}}^{\text{Cu}} = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2$$

$$I_{\text{industriales}}^{\text{Cu}} = 0,8 \cdot 4,0 + 0,2 \cdot 0,5$$

$$I_{\text{industriales}}^{\text{Cu}} = 3,3$$

3) Residuos sólidos asimilables a urbanos

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 5 (Urbano)	Almacenamiento en recipiente de residuos sin segregación	Recolección municipal y disposición en vertedero	8,5

$$I_{\text{urbanos}}^{\text{Cu}} = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2$$

$$I_{\text{urbanos}}^{\text{Cu}} = 1 \cdot 8,5 + 0$$

$$I_{\text{urbanos}}^{\text{Cu}} = 8,5$$

4) Residuos sólidos

	Valor	G
$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cu}}$	8,6	0,6
$I_{\text{industriales}}^{\text{Cu}}$	3,3	0,1
$I_{\text{urbanos}}^{\text{Cu}}$	8,5	0,3

$$I_{\text{residuos}}^{\text{Cu}} = g_1 \cdot I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cu}} + g_2 \cdot I_{\text{industriales}}^{\text{Cu}} + g_3 \cdot I_{\text{urbanos}}^{\text{Cu}}$$

$$I_{\text{residuos}}^{\text{Cu}} = 0,6 \cdot 8,6 + 0,1 \cdot 3,3 + 0,3 \cdot 8,5$$

$$I_{residuos}^{Cu} = 0,6 \cdot 8,6 + 0,1 \cdot 3,3 + 0,3 \cdot 8,5$$

$$I_{residuos}^{Cu} = 8,04$$

5) Efluentes

Salida	Tratamiento	Disposición final	Concentración	Permitido	D
Efluente 1	Sin tratar	Sin tratar	0,5 µg/L	1000 µg/L	2,0
Efluente 2	Biorremediación con plantas acumuladoras de cadmio	Vertido en cauce	No detectado		0

$$I_{efluentes}^{Cu} = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n}$$

$$I_{efluentes}^{Cu} = \frac{1 \cdot 2,0 + 0}{1}$$

$$I_{efluentes}^{Cu} = 2,0$$

6) Emisiones

$$I_{emisiones}^{Cu} = 0$$

7) Impacto total del Cobre

	Valor	G
$I_{residuos}^{Cu}$	8,04	0,65
$I_{efluentes}^{Cu}$	2,0	0,35
$I_{emisiones}^{Cu}$	0	0

$$I_{Cu} = f_1 \cdot I_{emisiones}^{Cu} + f_2 \cdot I_{efluentes}^{Cu} + f_3 \cdot I_{residuos}^{Cu}$$

$$I_{Cu} = 0 \cdot 0 + 0,35 \cdot 2,0 + 0,65 \cdot 8,04$$

$$I_{Cu} = 5,93$$

8) Conclusiones

Se observa una adecuada disposición final de los efluentes con presencia de cobre, en la eliminación del cobre por el valor bajo (2,0), sin embargo en lo referente a residuos sólidos se debe trabajar mucho dado su alto valor (8,04). Basados en los valores de estos últimos se deben elaborar políticas urgentes sobre la gestión de los residuos sólidos peligrosos (8,6) y los residuos sólidos asimilables a urbanos (8,5).

Determinación del Indicador para el cadmio

1) Residuos sólidos peligrosos

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 1 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados	7,0
Residuo sólido 3 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Disposición como residuo industrial	9,0

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cd}} = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n}$$

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cd}} = \frac{0,8 \cdot 9,0 + 0,2 \cdot 7,0}{1}$$

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Cd}} = 8,6$$

2) Residuos sólidos industriales

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 2 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Reuso total	0,5
Residuo sólido 4 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Tratamiento del residuo con generación de emisiones y residuos(Incineración)	4,0

$$I_{industriales}^{Cd} = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2$$

$$I_{industriales}^{Cd} = 0,8 \cdot 4,0 + 0,2 \cdot 0,5$$

$$I_{industriales}^{Cd} = 3,3$$

3) Residuos sólidos asimilables a urbanos

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 5 (Urbano)	Almacenamiento en recipiente de residuos sin segregación	Recolección municipal y disposición en vertedero	0

$$I_{urbanos}^{Cd} = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2$$

$$I_{urbanos}^{Cd} = 0$$

4) Residuos sólidos

	Valor	g
$I_{peligrosos}^{Cd}$	8,6	0,65
$I_{industriales}^{Cd}$	3,3	0,35
$I_{urbanos}^{Cd}$	0	0

$$I_{residuos}^{Cd} = g_1 \cdot I_{peligrosos}^{Cd} + g_2 \cdot I_{industriales}^{Cd} + g_3 \cdot I_{urbanos}^{Cd}$$

$$I_{residuos}^{Cd} = 0,65 \cdot 8,6 + 0,35 \cdot 3,3$$

$$I_{residuos}^{Cd} = 6,745$$

5) Efluentes

Salida	Tratamiento	Disposición final	Concentración	Permitido	D
Efluente 1	Sin tratar	Sin tratar	2,0 µg/L	100 µg/L	2,0
Efluente 2	Biorremediación con plantas acumuladoras de cadmio	Vertido en cauce	35 µg/L	100 µg/L	5,0

$$I_{efluentes}^{Cd} = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n}$$

$$I_{efluentes}^{Cd} = \frac{0,8 \cdot 5,0 + 0,2 \cdot 2,0}{1}$$

$$I_{efluentes}^{Cd} = 4,4$$

6) Emisiones

$$I_{emisiones}^{Cd} = 0$$

7) Impacto Total del Cadmio

	Valor	g
$I_{residuos}^{Cd}$	6,745	0,65
$I_{efluentes}^{Cd}$	4,4	0,35
$I_{emisiones}^{Cd}$	0	0

$$I_{Cd} = f_1 \cdot I_{emisiones}^{Cd} + f_2 \cdot I_{efluentes}^{Cd} + f_3 \cdot I_{residuos}^{Cd}$$

$$I_{Cd} = 0 \cdot 0 + 0,35 \cdot 4,4 + 0,65 \cdot 6,745$$

$$I_{Cd} = 5,92$$

8) Conclusiones

Se observa una disposición final de los efluentes con presencia de cadmio, que puede ser mejorada (4,4). Además, en lo referente a residuos sólidos se debe trabajar dado su alto valor (6,745). Basados en los valores de estos últimos se deben elaborar políticas urgentes sobre la gestión de los residuos sólidos peligrosos (8,6).

Determinación del Indicador para el Zinc

1) Residuos sólidos peligrosos

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 1 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Almacenamiento fuera de planta sin segregación de residuos fuera de contenedores cerrados	7,0
Residuo sólido 3 (Peligroso)	Acumulación en planta hasta disposición final	Disposición como residuo industrial	9,0

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Zn}} = \frac{r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2 + s_1 \cdot M_1 + s_2 \cdot M_2}{n}$$

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Zn}} = \frac{0,8 \cdot 9,0 + 0,2 \cdot 7,0}{1}$$

$$I_{\text{peligrosos}}^{\text{Zn}} = 8,6$$

2) Residuos sólidos industriales

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 2 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Reuso total	0,5
Residuo sólido 4 (Industrial)	Acumulación en planta hasta disposición final	Tratamiento del residuo con generación de emisiones y residuos(Incineración)	4,0

$$I_{\text{industriales}}^{\text{Zn}} = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2$$

$$I_{industriales}^{Zn} = 0,8 \cdot 4,0 + 0,2 \cdot 0,5$$

$$I_{industriales}^{Zn} = 3,3$$

3) Residuos sólidos asimilables a urbanos

Salida	Tratamiento	Disposición final	D
Residuo sólido 5 (Urbano)	Almacenamiento en recipiente de residuos sin segregación	Recolección municipal y disposición en vertedero	8,5

$$I_{urbanos}^{Zn} = r_1 \cdot D_1 + r_2 \cdot D_2$$

$$I_{urbanos}^{Zn} = 1 \cdot 8,5 + 0$$

$$I_{urbanos}^{Zn} = 8,5$$

4) Residuos sólidos

	Valor	G
$I_{peligrosos}^{Zn}$	8,6	0,6
$I_{industriales}^{Zn}$	3,3	0,1
$I_{urbanos}^{Zn}$	8,5	0,3

$$I_{residuos}^{Zn} = g_1 \cdot I_{peligrosos}^{Zn} + g_2 \cdot I_{industriales}^{Zn} + g_3 \cdot I_{urbanos}^{Zn}$$

$$I_{residuos}^{Zn} = 0,6 \cdot 8,6 + 0,1 \cdot 3,3 + 0,3 \cdot 8,5$$

$$I_{residuos}^{Zn} = 8,04$$

5) Efluentes

Salida	Tratamiento	Disposición final	Concentración	Permitido	D
Efluente 1	Sin tratar	Sin tratar	No detectado		0
Efluente 2	Biorremediación con plantas acumuladoras de cadmio	Vertido en cauce	No detectado		0

$$I_{\text{efluentes}}^{\text{Zn}} = 0$$

6) Emisiones

$$I_{\text{emisiones}}^{\text{Zn}} = 0$$

7) Impacto Total del Cinc

	Valor	G
$I_{\text{residuos}}^{\text{Zn}}$	8,04	1
$I_{\text{efluentes}}^{\text{Zn}}$	0	0
$I_{\text{emisiones}}^{\text{Zn}}$	0	0

$$I_{\text{Zn}} = f_1 \cdot I_{\text{emisiones}}^{\text{Zn}} + f_2 \cdot I_{\text{efluentes}}^{\text{Zn}} + f_3 \cdot I_{\text{residuos}}^{\text{Zn}}$$

$$I_{\text{Zn}} = 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 8,04$$

$$I_{\text{Zn}} = 8,04$$

8) Conclusiones

La gestión de los residuos sólidos se debe ser mejorada (8,04). Basados en los valores de estos últimos se deben elaborar políticas urgentes sobre la gestión de los residuos sólidos peligrosos (8,6) y sobre la gestión de los residuos sólidos asimilables a urbanos.