

Nuevos conceptos ambientales para la ingeniería civil

Introducción. La inteligencia ecológica. El edificio como un ambiente construido. Aplicación del análisis de ciclo de vida.

Introducción

Ecosistemas naturales

Un *ecosistema* es una unidad de funcionamiento con fuerte dependencia recíproca entre plantas y animales que viven en un espacio determinado manteniendo relaciones entre sí y con el medio físico en el cual viven. No constituyen sistemas cerrados en tanto se interrelacionan con la atmósfera y con otros sistemas circundantes. Entre todos se producen complejas relaciones alimenticias, así como diversos ciclos de materia y flujos de energía.

Los *bosques* son un ejemplo de un ecosistema natural con un sinnúmero de relaciones. Aquí, los árboles y arbustos alivian el impacto de la lluvia y el viento sobre el suelo, dan sombra y albergue a la vegetación de baja altura, así como a los animales y a los seres humanos. Controlan la evaporación y regulan la filtración del agua. Al caer las hojas, los microorganismos se encargan de transformarlas y enriquecen el suelo. Las hojas y los frutos sirven de alimentos para los insectos y animales herbívoros, que a su vez son la base de la nutrición de los carnívoros. En las partes altas viven aves de gran tamaño. En las hojas y frutos y aún en la corteza viven insectos y otros. Los insectos ayudan a la polinización en los árboles más bajos. Semillas y frutos son diseminados por los animales. Las aves construyen sus nidos en los troncos huecos. También hay plantas parásitas que viven a expensas de otras plantas. En las capas inferiores habitan animales menores. Seres diminutos viven en el suelo.

En los *altiplanos* y *laderas* las variaciones de altitud, y consecuentemente de temperatura, dan lugar a diferentes pisos de vegetación y vida animal. Algunas especies viven en las zonas altas en verano y descienden en la época fría. A más de 3 msnm, en paramos y punas, crecen arbustos, pastos y matorrales secos con una vida animal de roedores, auquénidos, cóndores y otros.

Los *ríos* arrastran y modifican los sedimentos variando la composición de las aguas, incluyendo la pendiente y la temperatura. Todo ello determina la fauna y flora del mismo río a lo largo del trayecto. La acción humana influye en su composición a través de la contaminación en la alteración de la vida animal y de vegetales.

Los *mares* constituyen el más grande ecosistema natural. A diferencia del agua de ríos y lagos, la de los mares contiene sales, a las cuales están adaptados los vegetales y animales que ahí habitan. La temperatura varía en relación con la altitud, la profundidad y la presencia de corrientes. Los mares tienen un marcado efecto sobre el clima y en el ciclo hídrico.

Ecosistemas artificiales

Estos incorporan o son consecuencia de la actividad del hombre. A diferencia de los ecosistemas naturales que mantienen su propio equilibrio,

los artificiales -cuando lo logran- requieren de la intervención humana. Los más conocidos y antiguos corresponden a los centros agrícolas, ganaderos y forestales, basados en un reducido número de especies o en el monocultivo. Mientras que los ecosistemas naturales sólo cuentan con el sol como fuente de energía, los artificiales la aumentan con el trabajo animal, mecánico y humano. También emplean pesticidas, abonos, herramientas, maquinaria agrícola y aún semillas transformadas en la pretensión de incrementar los rendimientos, derivando en sistemas inestables que terminan siendo inviables. No es en todos los casos, pues hay sistemas agropecuarios que se esfuerzan en imitar a los naturales en unidades agroecológicas.

En general las diferencias entre ecosistemas naturales y artificiales, no solamente están referidas a las fuentes de energía. También los sistemas naturales están caracterizados por su propio sistema metabólico (la capacidad de intercambio entre materia y energía, en ambos sentidos, intrínseca de los seres vivos).

De todas maneras hay que resaltar los esfuerzos recientes que en campos distintos se hacen para tomar lecciones de la naturaleza, construyendo sistemas donde se interrelacionan sin desperdicios, energía renovable, materia y seres vivos aún en sistemas claramente artificiales como los industriales.

La inteligencia ecológica

Referencia

Daniel Goleman. *Inteligencia Ecológica*. Editorial Kairós S. A. Barcelona, España, 2009.

El autor utiliza el término *inteligencia ecológica* en sentido heurístico, para referirse a la *capacidad de percibir conexiones entre las actividades humanas y todas sus consecuencias en los sistemas naturales y sociales*.

Ecología industrial

La define el autor como la disciplina que aspira a integrar los campos de la química, la física, la ingeniería y la ecología para cuantificar el impacto sobre la naturaleza de los productos. *Se busca un paralelismo entre los sistemas naturales y los sistemas industriales*.

Los productos extraídos de la tierra y que son sometidos por el hombre a diferentes fuentes de energía, transitan de empresa en empresa en términos de entradas y salidas *reguladas por una suerte de metabolismo*. De esta manera la industria puede ser considerada como una especie de ecosistema que altera a los demás sistemas ecológicos.

Análisis del ciclo vital

El *análisis del ciclo vital* (LCA, Life Cycle Analysis) es un método para desmenuzar sistemáticamente cualquier producto fabricado por el ser humano en sus elementos compositivos y en los procesos industriales subsidiarios que le dieron origen, y determinar su impacto sobre la naturaleza, desde el momento de su producción hasta el de su eliminación final. Se estudian materiales y energías requeridas y el tipo de polución y productos tóxicos generados en cada paso de su cadena vital.

Hay que saber rastrear los datos adecuados. La materia prima consumida, la cantidad de energía y de agua empleada, el efecto sobre el ozono generado por las reacciones foto químicas, la contribución al calentamiento global, la toxicidad sobre el agua y el aire, y la generación de residuos peligrosos, ingresan en estos análisis.

Su práctica conduce a examinar, sino a renunciar, a las ideas simplificadoras de *verde* o *no verde* por otro sistema de múltiples dimensiones diferentes. El análisis del ciclo vital nos dice sobre los daños provocados al medio ambiente por un producto, y desbaratan el *lavado verde* de la publicidad que crea la ilusión de que estamos comprando algo virtuoso. No hay producto *absolutamente* respetuoso del medio ambiente, tan sólo *relativamente* respetuoso.

La *cadena de valor*, si bien tiene en cuenta el *valor añadido* en cada uno de los pasos del camino, ignora el *valor sustraído* por sus impactos negativos. Pueden servir para rastrear los impactos negativos cuantificándolos en cada uno de los distintos eslabones para el análisis del ciclo vital.

La inteligencia ecológica

La inteligencia ecológica combina las habilidades cognitivas con la empatía hacia toda forma de vida, y se extiende a todos los sistemas naturales. Vivimos inmersos en sistemas ecológicos (nuestra actividad afecta la naturaleza, al igual que ella nos afecta a nosotros).

Los sistemas naturales operan a escalas muy diferentes. A nivel macroscópico existen ciclos bio-geoquímicos globales como el flujo del carbón, cuyos cambios se miden en años, en siglos y aún en eras geológicas.

Una nueva matemática

Se suele considerar principalmente la *huella de carbono*, como la cantidad de dióxido de carbono emitida a la atmósfera durante el ciclo vital. Sin embargo, las consecuencias adversas de un producto pueden medirse en tre ámbitos diferentes e interrelacionados.

- La *geosfera*, como el suelo, el aire, el agua, el clima.
- La *biosfera*, como nuestro cuerpo, el de otras especies, el de las plantas.
- La *sociosfera*, de índole humana (como las condiciones laborales).

◆ En la geosfera

El *carbono contenido*: cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera por cada kg de producto durante su ciclo vital (proceso de fabricación, transporte, uso y eliminación).

La *eutrofización*: nutrientes como el nitrógeno o el fósforo que llegan al agua a través de fertilizantes químicos (vertidos de aguas residuales y filtrados de abonos).

La *carga de recursos* de determinados productos (como suma de recursos no renovables consumidos) o impacto sobre los elementos que compartimos.

La *biodegradabilidad*, expresada en forma de tasa de nutrientes industriales.

◆ En la biosfera

La *capacidad de carga* de un entorno, como el máximo número de individuos que puede soportar sin daño.

El *impacto sobre el cáncer*, como la tasa de agentes supuestamente cancerígenos que lanza al medio ambiente un proceso o producto (incluyendo su persistencia, su potencia cancerígena y el lugar en la cadena de suministros).

Los *años perdidos por incapacidad* (DALY: Disability Adjusted Life Years) como los años de vida sana perdida por impacto de emisión de partículas

tóxicas, cancerígenas, riesgos laborales, etc. DALY es la unidad perdida de un año de vida sana.

La *pérdida de biodiversidad*, como el grado de extinción de especies provocado por un determinado proceso o sustancia (fracción potencialmente dañada) (emisión de una sustancia que afecta un ecosistema acelerando la reducción de la diversidad).

La *toxicidad incorporada*, productos químicos problemáticos arrojados a la naturaleza durante el ciclo vital de un producto (como el caso de PVC que en el vertedero va exudando lentamente cloro en forma de gas). De la toxicidad que conduce a riesgos ocupacionales (como el de Parkinson que afecta a los soldados debido a la aspiración de gases de manganeso).

◆ **En la sociosfera**

Dimensionamiento social en el análisis del ciclo vital: *las condiciones laborales, el trabajo forzado, la explotación infantil, los salarios justos, los beneficios sanitarios y similares, el DALY*. El análisis del ciclo vital también reconoce los impactos positivos.

El edificio como un ambiente construido

Referencia

Niklaus Kohler (University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany) and Sebastian Moffatt (Sheltair Group Resource Consultant Inc, Vancouver, Canada). *Life-cycle analysis of the built environment*. UNEP (United Nations Environment Programme). Industry and Environment. April - September 2003.

El análisis de ciclo de vida puede generar información útil sobre los flujos de materia y energía. Sin embargo, es importante observar este análisis en el contexto del desarrollo sustentable, así como la característica peculiar de un edificio como un ambiente construido.

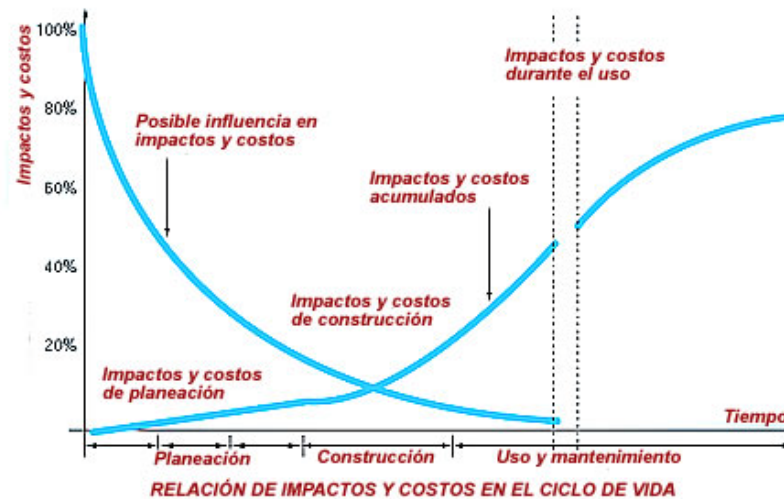
El análisis de ciclo de vida dentro del desarrollo sustentable



El uso del análisis de ciclo de vida en una edificación se ubica mejor en el marco de los *propósitos de los edificios sustentables* (ecológicos,

económicos, sociales, culturales). El diagrama es una relación simplificada habida cuenta de las particularidades de cada edificación y el contexto correspondiente. Igualmente se relaciona y complementa con otros indicadores relativos a los costos en el mismo ciclo de vida, los impactos sociales y culturales, o la calidad interior del aire (tema este al que se le reconoce gran importancia, especialmente en términos de salud).

El edificio como un ambiente



A juicio de los autores, la ecología industrial y el análisis de ciclo de vida, reconoce particularidades cuando se le pretende aplicar a una construcción.

- La complicación que se deriva del alto número de materiales y productos (en el artículo se estiman en 60 los materiales básicos y del orden de 2000 productos). El análisis demanda la evaluación del ciclo de cada uno de ellos.
- La identificación y evaluación de escenarios variables a lo largo de la vida útil del edificio.
- Las implicancias locales de la edificación en: microclima, acceso solar a edificios vecinos, seguridad vecinal, carga a la infraestructura urbana.
- Por definición, el edificio crea un ambiente interno con su propia lista de potenciales impactos.
- Las propias operaciones de construcción, operación, renovación y eliminación de la edificación.
- Las relaciones entre edificios y en conjunto.

Debido a ello, los autores enfatizan la necesidad de un proceso de diseño integrado, el cual puede prevenir impactos y disminuir costos en las etapas de construcción, uso y mantenimiento del edificio.

Aplicación del análisis de ciclo de vida

Referencia

Kristian Steele (Surrey County Council and University of Surrey, Guildford, England), Graham Cole (Surrey County Council), Gerard Parke (University of Surrey), Brian Clarke (University of Surrey) and John Harding (University of Surrey). *Application of Life Cycle Assessment Technique in the Investigation of brick arch highway bridges*. CINTEC. Proceedings of the

2002 Conference for the Engineering Doctorate in Environmental Technology.

El Concejo del Condado de Surrey administra más de 2 mil puentes en su red de carreteras. Históricamente la gestión sólo ha considerado restricciones económicas y técnicas. Recientemente, sin embargo, los cambios en la percepción de la sociedad incorporan el medio ambiente, y ahora en Surrey se examina la minimización del impacto ambiental en sus actividades.

En este artículo se utiliza el análisis del ciclo de vida para evaluar el desempeño ambiental. Se investigan puentes en arco de ladrillo, y se acompañan conclusiones relativas a la construcción, mantenimiento y reforzamiento.

Introducción

El artículo revisa la *definición de la ingeniería civil* en el tiempo.

- En 1828 se le entendía como el *arte de dirigir los recursos de la naturaleza para uso y conveniencia del hombre*.
- En 1975, con la aparición del tema ambiental, la definición se expresa como *hacer el mejor uso de los escasos recursos cuidando el medio ambiente y el interés de la salud y seguridad pública*.
- El tema del desarrollo sostenible, introduce un nuevo cambio en la definición de la ingeniería civil. Es presentada como *la práctica de mejorar y mantener los ambientes naturales y construidos, para mejorar la calidad de vida para la presente y las nuevas generaciones*.

Puentes de carreteras

La administración de estos puentes, que suelen tener uso muy frecuente, está basada en aspectos de seguridad, económicos y técnicos. Con la nueva definición de la ingeniería civil, los procesos de decisión deben incluir la mejora y el mantenimiento del ambiente natural, lo cual obliga a estudiar la interacción del puente con dicho ambiente.

Para esta investigación se ha aplicado el *análisis de ciclo de vida*. Se emplea la técnica integral de *principio a fin (cradle to grave* en inglés). Se establecieron dos propósitos.

- Desarrollar una metodología para considerar el ambiente en la gestión de puentes.
- Proporcionar respuestas definitivas a preguntas específicas sobre el desempeño ambiental.

Los puentes en arco de albañilería de Surrey

La investigación está restringida a este tipo de puentes. Aproximadamente el 40% están en esta categoría, lo que hace 430 puentes. Estos pueden ser divididos en semicirculares, por segmentos, elípticos y semi-elípticos. Aunque la mayoría están entre los dos primeros, el análisis básico de ciclo de vida puede entenderse como común para todas las formas.

La metodología

Se han abordado tres áreas:

- La clasificación del puente.
- La categorización de las actividades de la gestión del puente.
- El desarrollo de los modelos de ciclo de vida del puente.

Ciclos de vida de los puentes en arco de ladrillo

El estudio trabajó sobre *diez estructuras reales* de puentes. Revisaron la documentación y la historia de gestión, incluyendo los registros. Consiguieron información sobre la frecuencia de actividades de mantenimiento y su tendencia para cada estructura. Los valores promedio permitieron asumir un *ciclo de vida idealizado* para un puente *típico* en arco de ladrillo. Se hizo una selección de actividades dejando de lado las actividades menores (que no suponen reemplazo de material). Sobre la base de que los puentes son diseñados para 120 años, se hizo el modelo para el pulido y refuerzo. Los resultados considerados son los siguientes.

Actividades de mantenimiento	Frecuencia (años)
Remoción de vegetación	5
Reemplazo/alineamiento de los elementos de protección en piedra	10
Mantenimiento del ladrillo (reparación/reemplazo)	15
Reparación/reemplazo de parapeto	15
Limpieza de la parte inversa	20
Reemplazo de aliviaderos y corta-agua	40
Primer pulido	120
Segundo pulido	200

Los autores reconocen que para cada puente en particular, las condiciones físicas, económicas, técnicas, simbólicas, históricas, comerciales, políticas, residenciales, de seguridad, recreacionales y sociales, influyen los diferentes ciclos de vida.

Inventario de datos de ciclos de vida

Aunque en el Reino Unido existen bases de datos de ciclos de vida para varios materiales y productos, los relativos a esta investigación tuvieron que ser encargados al Building Research Establishment. Es el caso de ladrillo, cemento, calcio hidratado o materiales de refuerzo. La investigación utilizó el SimaPro como software de procesamiento.

Representación del ciclo de vida

Con propósitos comparativos, el modelo de análisis de ciclo de vida fue enfocado en *tres casos reales*, los mismos que cuentan con características y capacidades similares.

Tal es el caso del puente Cascade, cuya estructura tiene 10.5 m de luz y 12.5 m de ancho. La construcción es de ladrillo con una losa peatonal de concreto en un lado. Una sola línea con un ancho de 9.5 m. Cubre un flujo pequeño aunque estacionalmente variado. La estructura tiene 175 años, según el estudio.

La imagen adjunta corresponde a este puente.



PUENTE CASCADE

En la siguiente tabla se resumen los resultados de la demanda de materiales en el ciclo de vida, en toneladas. El informe explica las diferentes hipótesis en torno a la composición de mezclas, energía, transporte, escasa mecanización.

Demanda de materiales en el ciclo de vida, ton

Materiales	Construcción	Operación			Reforzamiento	
		Bueno	Medio	Pobre	De montura	Anclaje
Ladrillo	475					
Mortero (renovación)	150	6.2	4.1	3.1		
Ladrillo/mortero (renovación del trabajo de ladrillo)		122	54	26		
Relleno (arena)	1790					
Varillas de acero					2.92	
Lechada						2.64
Concreto					620	
Acero						1.41
Poliéster						0.036

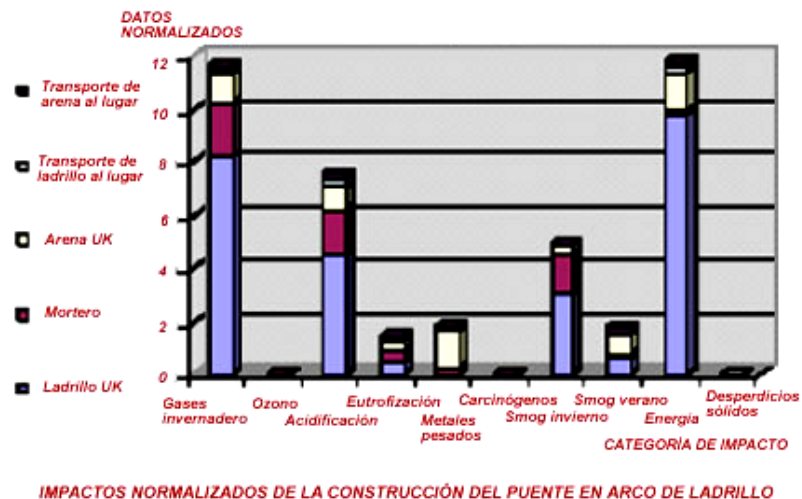
Valoración del impacto

Se han utilizado categorías de impacto, las mismas que están incorporadas en el software SimaPro.

- Eutrofización, kg PO4

- Producción de desperdicio sólido, kg
- Consumo de energía, MJ
- Gases invernadero, kg CO2
- Potencial reducción del ozono, kg CFC11
- Impacto en el *smog* de verano, kg C2H4
- Impacto en el *smog* de invierno, kg SPN
- Metales pesados, kg Pb
- Carcinógenos, kg B(a)P
- Acidificación, kg SO2

Con el auxilio del software, el informe proporciona los resultados para la *construcción*, la *operación* y el *reforzamiento*. Los resultados para la *construcción* se indican, normalizados, en la siguiente imagen.



- El ladrillo representa el mayor contribuyente en los impactos (habida cuenta de su cantidad y procesamiento). El impacto del transporte es pequeño, porque el modelo asume que los materiales son producidos localmente.
- Pese a que la demanda de arena es alta, su impacto es menor, seguramente porque se ha considerado que su provisión sólo es la excavación, limpieza y transporte, con poco consumo de energía por tonelada. La demanda de energía en razón de la arena es baja en comparación con la manufactura del ladrillo. Sin embargo, la arena tiene mayor impacto en los campos de metales pesados y cancerígenos.
- Para este tipo de puente, las cantidades de desperdicio sólido no son tan altas, en atención al supuesto de que el material granular puede ser consolidado en el arco como material de relleno.
- Los impactos derivados de la categoría de mortero son pequeños para todas las categorías (su mayor impacto proviene del cemento y el calcio).

El estudio proporciona los datos de impacto para el *mantenimiento*, reconociendo que no son altos, en razón de que las cantidades de material empleado. Ello también explica el largo periodo de duración de este tipo de puentes.

Cuando una estructura alcanza su obsolescencia y necesita reforzarse, se presentan varias opciones para darle continuidad al flujo de transporte. En la investigación se consideran dos tipos de *métodos de reforzamiento* de la estructura. El tradicional de *silla o montura* de concreto, y el sistema de anclaje. El primero usa gran cantidad de material y ocasiona la interrupción del tráfico, mientras que el segundo tiene una menor demanda de materiales aunque mayor consumo de energía en el lugar (y no requiere interrumpir el flujo vehicular).

El estudio compara las tres opciones: un nuevo puente, reforzamiento tipo montura, y reforzamiento por anclaje. La comparación, que incluye la interrupción vehicular, favorece a este último sistema.