



Ecología Industrial

ACV y MFA

Presentado por Diana Ita, Ph.D.

Referencia principal: Allenby, B. 2012

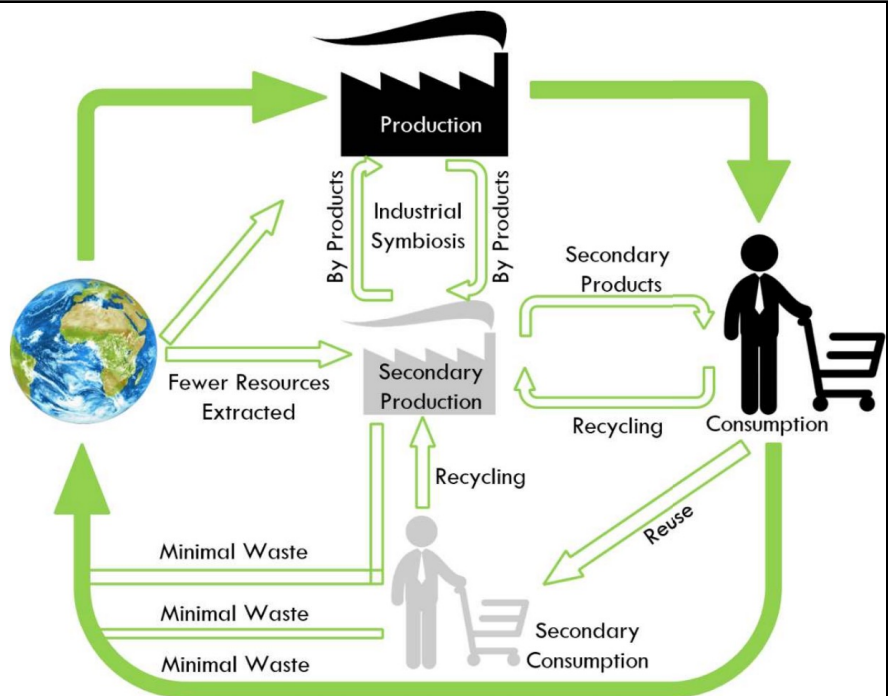
Preparado por: Ramzy Kahhat y Diana Ita

Facultad de Ciencias e Ingeniería

La Ecología Industrial

Nueva área de estudio
en respuesta al **mayor
compromiso social**
frente a los problemas
ambientales.

Busca **integrar
disciplinas** diferentes.



Ingeniería Sostenible

La Ecología Industrial

Medio por el cual la humanidad puede **acercarse y mantener** deliberada y racionalmente la **sostenibilidad**, dada la continua **evolución económica, cultural y tecnológica**.

El concepto requiere que un **sistema industrial no se considere aislado de los sistemas que lo rodean**, sino en conjunto con ellos.

Es una visión de sistemas en la que se busca **optimizar el ciclo total de los materiales** (...). Los factores por optimizar incluyen recursos, energía y capital.

T. Graedel and B. R. Allenby, 2010

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



La Ecología Industrial

Tiene como objetivo una **coexistencia sostenible de la tecnosfera y el ambiente**. La **analogía entre sistemas y procesos naturales y técnicos** es un concepto central.

Los procesos en la naturaleza, donde los **ciclos se cierran y los desechos de un proceso se utilizan en otro**, son modelos de procesos socio-tecnológicos.

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.

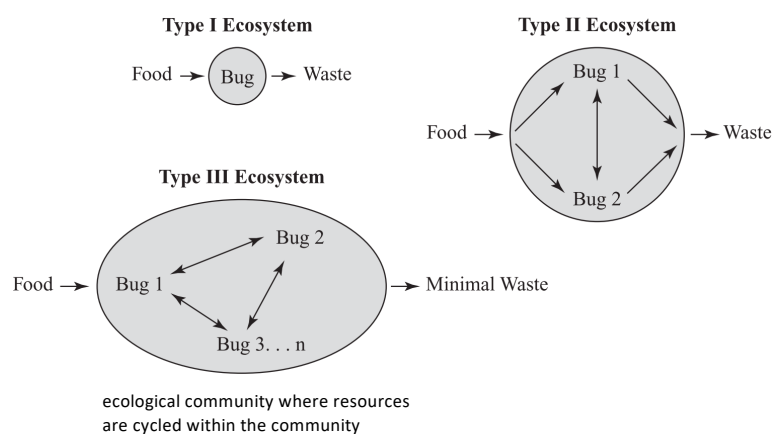


Metabolismo industrial

Ayres (1989) elaboró la **analogía biosfera-tecnosfera** como una imagen útil para desarrollar en su descripción del metabolismo industrial:

- En la **biosfera**, la evolución ha dado como resultado un **uso eficiente de materiales y energía** en sistemas para construir y descomponer materiales funcionales en un estado estacionario.
- En la **tecnosfera**, se **explotan los recursos y se producen corrientes de desechos** inutilizables al suelo, el agua y el aire.
- Al **aprender de la biosfera**, la sociedad puede diseñar y gestionar sus procesos socio-tecnológicos de una manera más sostenible, lo que acelerará la evolución tecnológica hacia un estado de uso de materiales con más eficiencia y con menos productos secundarios inutilizables.

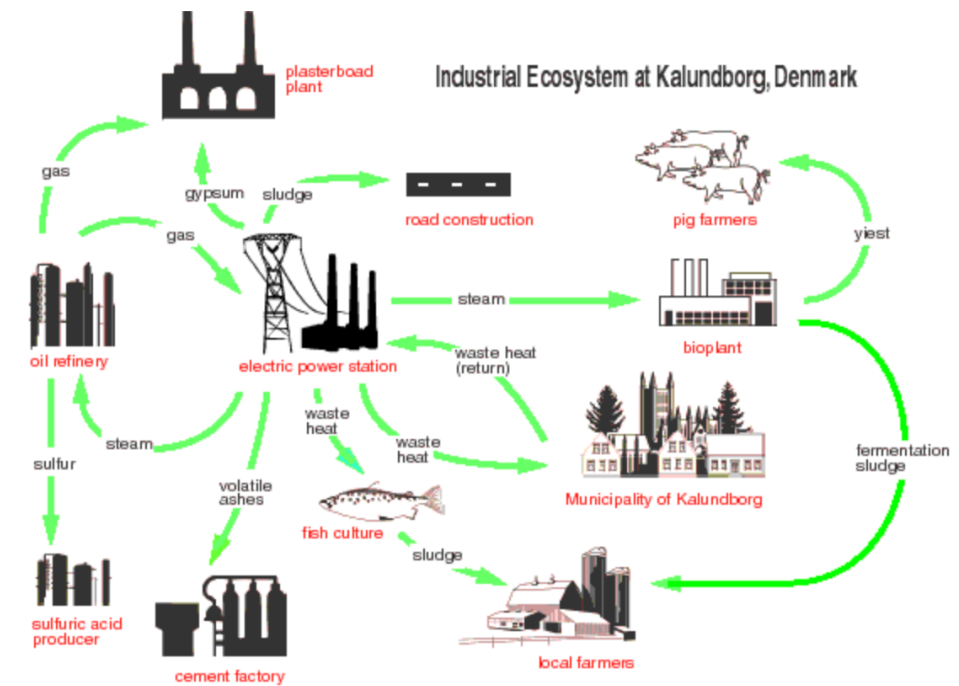
Modelo conceptual



Si se diseña un sistema industrial o económico **para imitar elementos de un sistema ecológico**, puede obtener una mayor función con una **menor inversión marginal de material y energía**.

Cada salto da como resultado la capacidad de soportar una biomasa mayor, en igualdad de condiciones.

Kalundborg Example



Ingeniería Sostenib

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.

Pensamiento de ciclo de vida

“Life Cycle Thinking implica que cada uno tiene **responsabilidad y un rol** que jugar a través de **toda la cadena** de ciclo de vida de un producto, de la **cuna** a la **tumba**, tomando en cuenta todos los **efectos externos relevantes**.

Desde la **extracción** de la materia prima, **refinería**, **manufactura**, **uso** o consumo hasta su re uso, **reciclaje** o **disposición**, los individuos deben conocer los **impactos que sus productos** tienen en el medioambiente y tratar de **reducirlos** lo más posible.

Los impactos de todas las etapas del ciclo de vida se deben considerar al momento de **tomar decisiones** sobre los **patrones de producción y consumo**, **políticas y estrategias de gestión**

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)

Cuna a la tumba o “Cradle to grave”

Regresando a los ciclos de vida naturales, en un producto, del nacimiento a la muerte se llama "cradle to grave "

Donde “cradle” representa el nacimiento del producto y “grave” el final: cuando terminamos con el producto, frecuentemente el relleno sanitario

Enfoque de Ciclo de Vida

- **Tener conciencia de que nuestras preferencias no están aisladas**, sino que forman parte de un sistema más amplio.
- **Tomar decisiones pensando en el largo plazo** y considerar todas las cuestiones ambientales y sociales.
- **Mejorar sistemas completos en lugar de partes de los sistemas** al evitar decisiones que solucionan un problema ambiental pero causan otro.
- **Preferencias informadas**, que no son necesariamente 'correctas' o 'incorrectas'.

La esencia de la metodología de ACV

- Analiza **todo el sistema**. Integra todos los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida.
- Determina **todas las entradas y salidas** de todos los procesos del sistema.
- Relaciona **impactos con problemas** ambientales.
- Busca el **origen** de los impactos.
- Interpreta el desempeño ambiental de la unidad analizada de manera **integral**.

La Familia del ACV – Las Huellas Ambientales

Huella de Carbono – ISO 14067

Huella Hídrica – ISO 14046

Eco-eficiencia – ISO 14045

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Cambio Climático

Material particulado

Agotamiento de ozono estratosférico

Smog fotoquímico

Toxicidad humana

Acidificación terrestre

Uso de suelo

Eco-toxicidad terrestre

Eco-toxicidad de agua dulce

Eco-toxicidad de agua marina

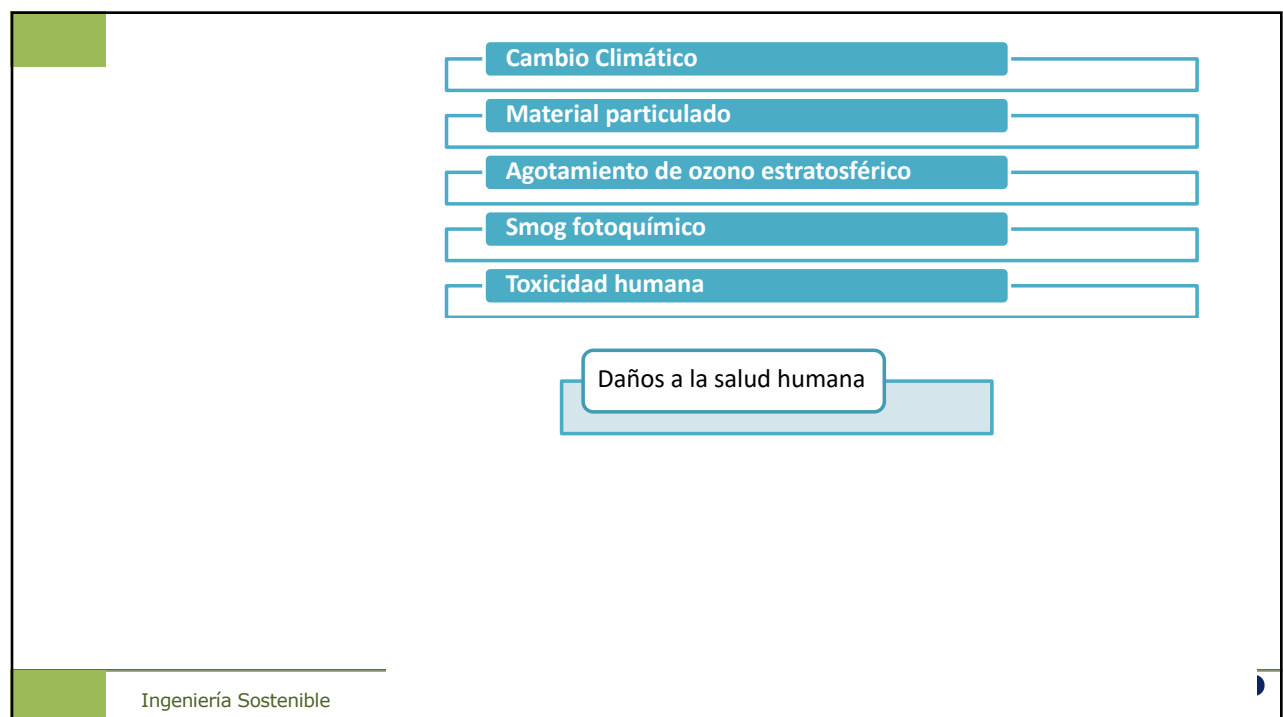
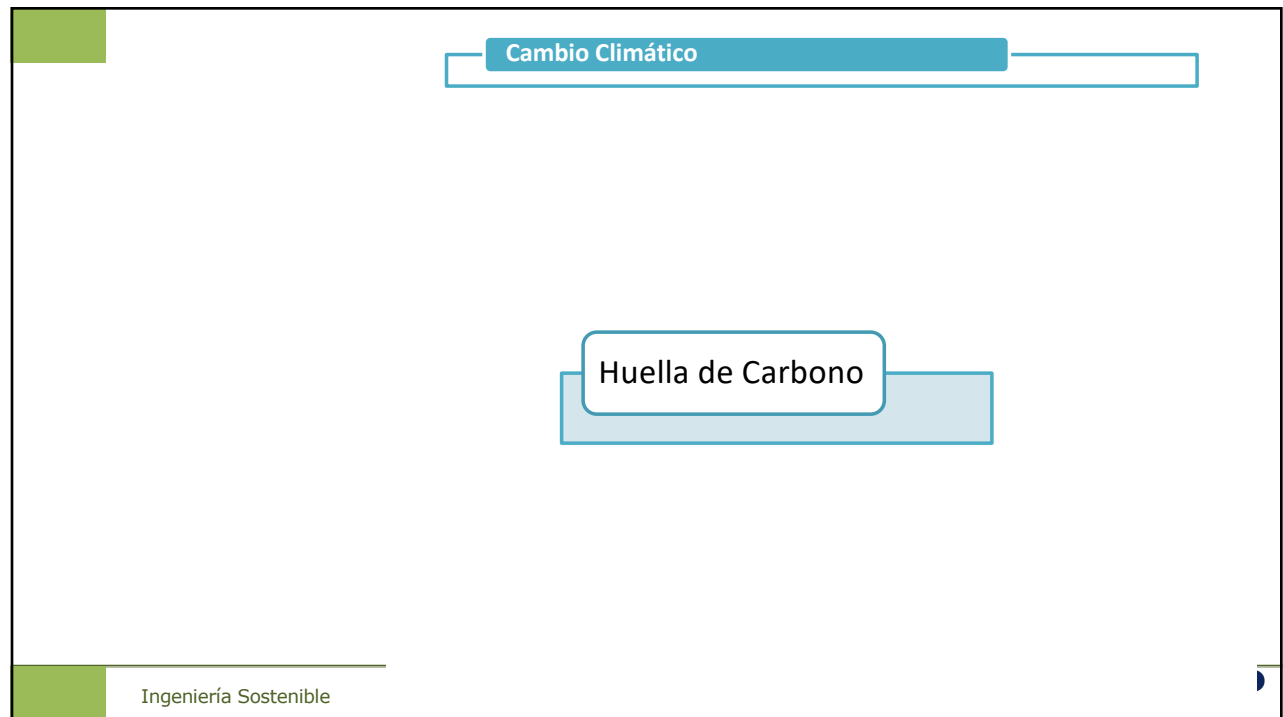
Eutrofización

Consumo de agua

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.





Daños al ecosistema

Acidificación terrestre

Uso de suelo

Eco-toxicidad terrestre

Eco-toxicidad de agua dulce

Eco-toxicidad de agua marina

Eutrofización



Huella hídrica

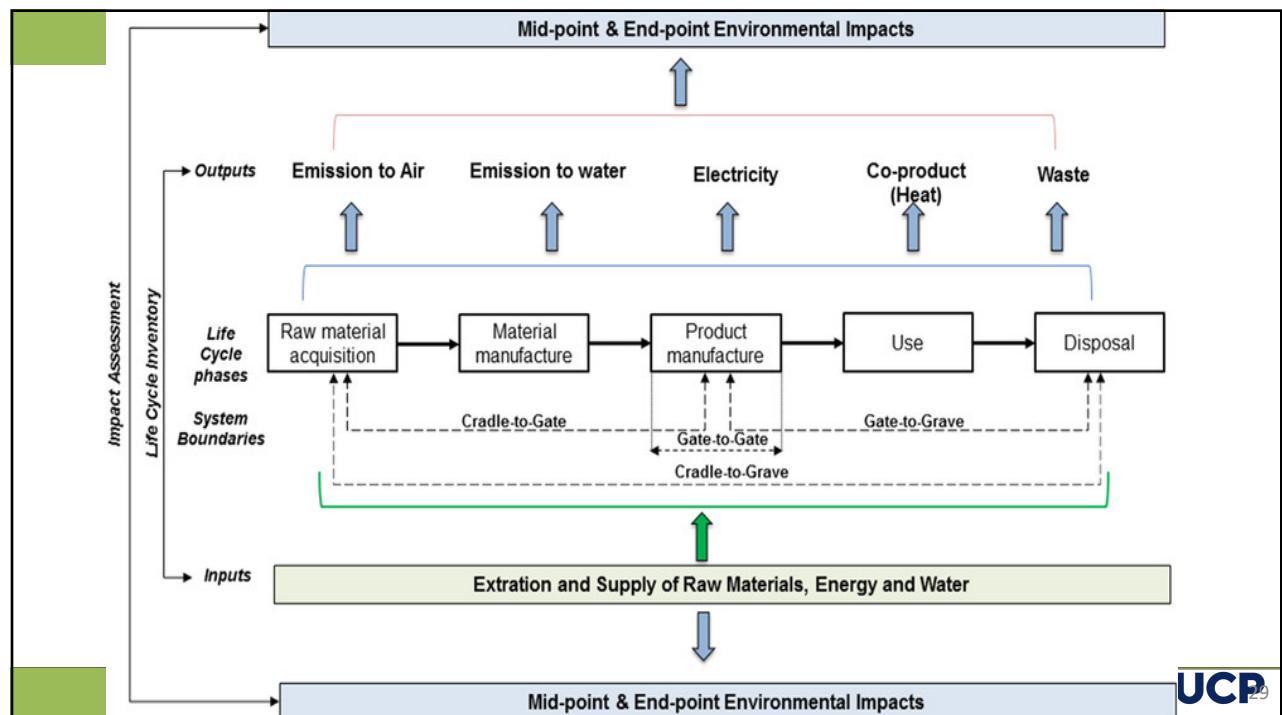
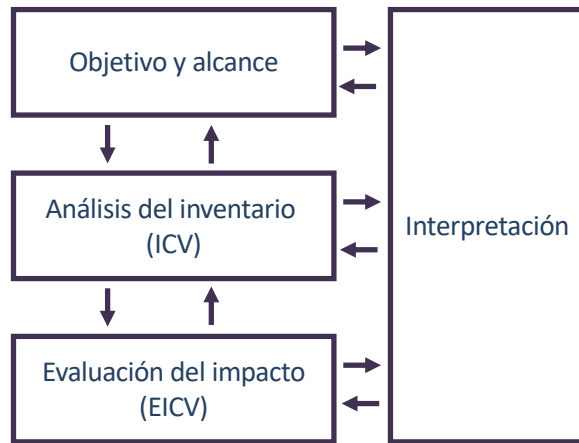
Eco-toxicidad de agua dulce

Eco-toxicidad de agua marina

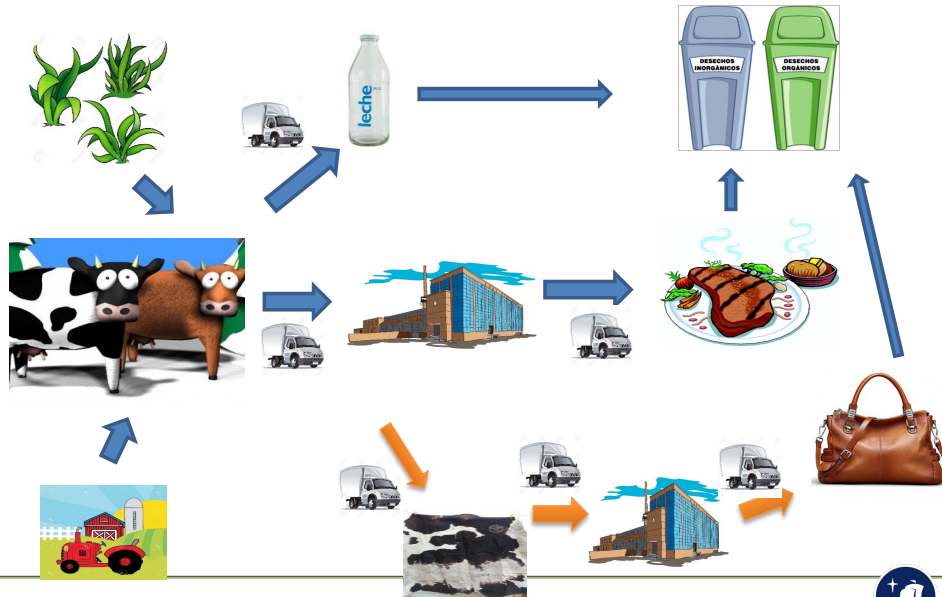
Eutrofización

Consumo de agua

Metodología del ACV: Fases



Definición de límites del sistema



Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Inventario de Ciclo de Vida

El análisis del inventario del ciclo de vida cuantifica los **consumos de materia prima y energía** junto con todos los **residuos, efluentes y emisiones a la atmósfera** (las cargas medioambientales), derivados de todos los procesos que están dentro de los límites del sistema.

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Evaluación de impactos

- Propósito: “**traducir**” los diferentes impactos (emisiones, materias primas, energía) calculados en la fase del inventario, en un(os) eco-indicador(es) integral(es).
- Por este fin es necesario **calcular el efecto** que tienen estos impactos sobre los problemas ambientales.

Interpretación de resultados

- El paso de interpretación **compila toda la información obtenida** en los pasos anteriores del ACV para formar un juicio final.
- El resultado del ACV solamente **ofrece un apoyo a la decisión**, y es por lo tanto, **parte del proceso de toma de decisiones**, adicionalmente podría ser necesario utilizar otra herramienta ambiental.

Interpretación de resultados

- La interpretación debe ser **consistente con las metas y el alcance** propuesto y con los resultados obtenidos.
- La validez de los datos usados debe ser verificada, lo cual incluye al menos el conocimiento sobre la **exactitud y la calidad** de la base de datos.
- Los hallazgos en la fase de interpretación deben reflejar el resultado de cualquier análisis de **sensibilidad e incertidumbre** que este implementado.

Material Flow Analysis

Análisis de Flujo de Materiales

Material Flow Analysis

Evaluación sistemática de los flujos y “stocks” de materiales dentro de un sistema definido en el espacio y tiempo

Entender
nuestro
metabolismo!

Brunner y Rechberger

Material Flow Analysis

- Es la **cuantificación y evaluación** de **materiales** (cemento, aguas residuales...) y/o **sustancias** (nitrógeno, fósforo, carbón ...), **flujos** de masa y **procesos**, en un **sistema** (ciudad, país, etc.) durante un **período** definido.
- Los flujos se expresan en **kg/año** o en **kg/cápita/año**. Pero el sistema no estará balanceado

Material Flow Analysis

- El método permite **identificar problemas y cuantificar el impacto** de posibles medidas en la recuperación de recursos y la contaminación ambiental.
- Se puede usar para comparar diferentes **opciones de tecnología** con respecto a sus impactos ambientales y financieros para apoyar la toma de decisiones.

Ley de conservación de la materia

- 1789, Lavoisier descubre que la masa no puede ser creada o destruida en reacciones químicas.
 - Masa de cualquier elemento al inicio de la reacción será igual a la masa de ese elemento al final de la reacción.
 - Si tenemos en cuenta todos los reactivos y productos en una reacción química, la masa total será la misma en cualquier punto en el tiempo en cualquier sistema cerrado.

Está basado en la ley de conservación de la materia



$$\text{Input} = \text{Output} + \text{stock increases} - \text{stock decreases}$$

Usos:

- Manejo ambiental
- Manejo de recursos
- Manejo de residuos
- Manejo de aguas

¿Por qué MFA?

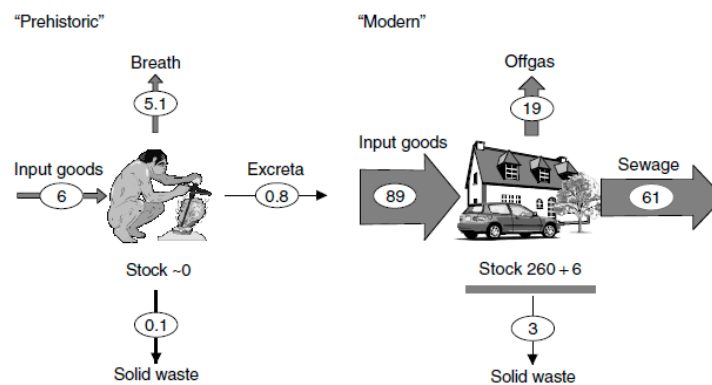
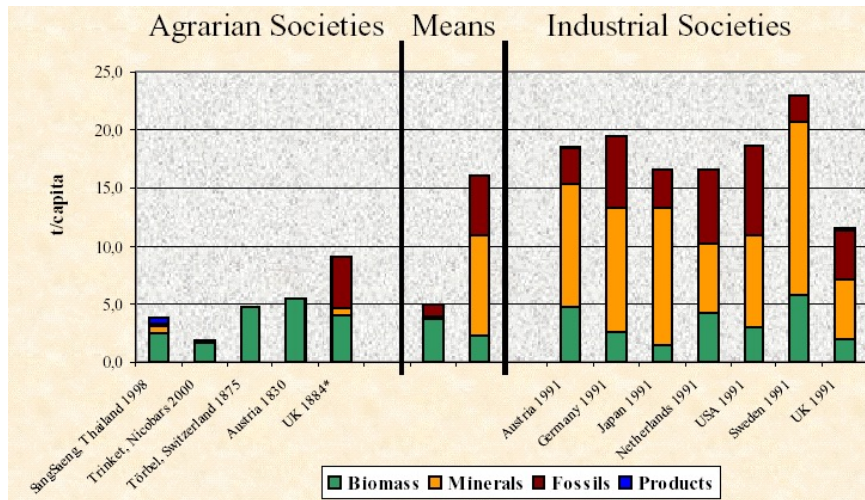


Figure 1 Material turnover of prehistoric and modern Man, in tons per capita per year. Included are all materials used in private households to satisfy the needs for food, shelter, hygiene, transportation, communication, etc., (for details, see Baccini and Brunner, 1991)

¿Por qué MFA?



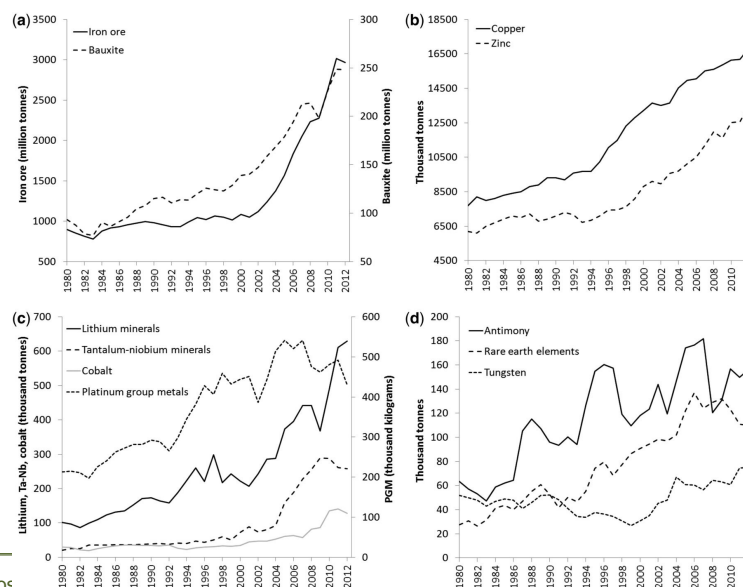
Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



¿Por qué MFA?

P. A. J. Lusty and A. G. Gunn 2014



Ingeniería So



¿Por qué MFA?

Consumo aparente de cemento
(1931-2014)
Cao et al 2017

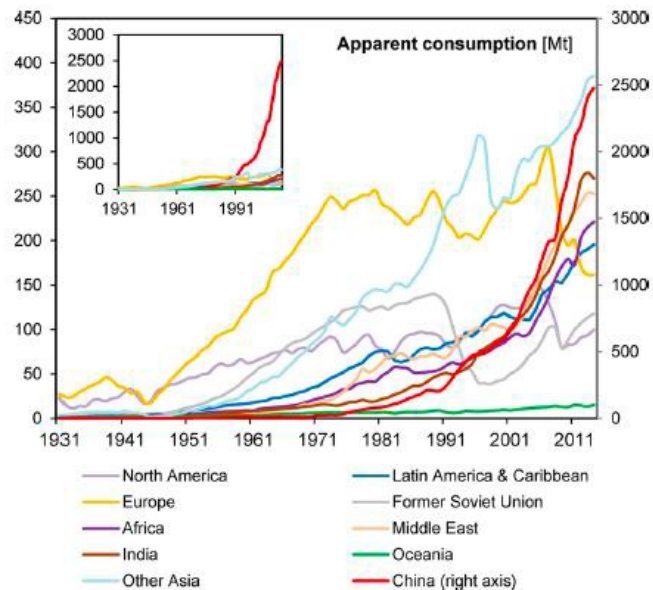


Figure 2. Apparent cement consumptions in the 10 world regions (1931–2014). Values for China are displayed on the right axis, all other countries and regions on the left axis.

¿Por qué MFA?

- Nos da la **dimensión física** de una economía (se mide en kg y no en \$)
- Nos permite entender la **relación entre el desarrollo social y económico** y los materiales
- Nos permite **determinar estrategias**: reducir, reusar, reciclar?

Vocabulario MFA

- **Sustancias:** Consiste en partes idénticas, un elemento químico (Cu) o un compuesto químico en estado puro (NH₃)
- **Bienes (goods):** una o varias sustancias que tienen valor comercial (positivo o negativo): combustible, residuos sólidos
- **Material:** sustancia + bien
- **Recursos:** materiales, energía, residuos



Ejemplo: sustancia o bien

- Cd
- PVC
- Iron
- Copper
- PVC
- Copper ore
- Steel
- Paper

Vocabulario MFA

- **Procesos:** implica **transformación, transporte, almacenaje** (incluye procesos naturales como transporte de nutrientes, p. ej.).

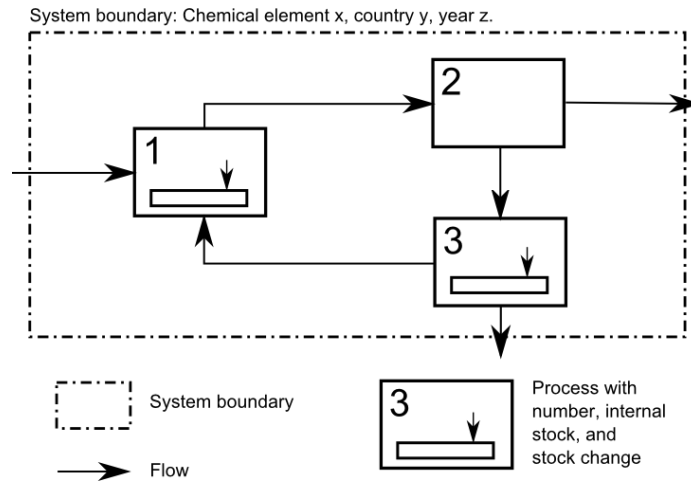
Ejemplo: metabolismo humano, segregación de residuos. Son CAJAS NEGRAS

- **Stocks:** **reservas de material** (masa) dentro del sistema. Aumentan (acumulan), se mantienen o decrecen (consumo). Unidad: masa (kg)
- **Flujos:** pueden fluir a través de la frontera del sistema (importaciones, exportaciones) o entre procesos (entradas, salidas). Unidad: masa/tiempo

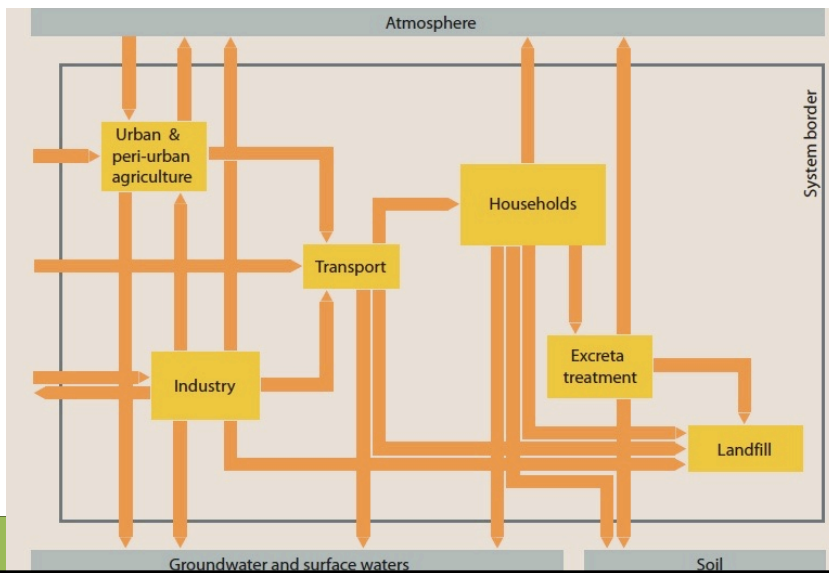
Vocabulario MFA

- **Sistema:** incluye flujos, stocks, procesos y sus interacciones
- **Frontera (límite) del sistema:** geográficas o virtuales (residencia, país, bosque). Se define en tiempo y espacio

Símbolos

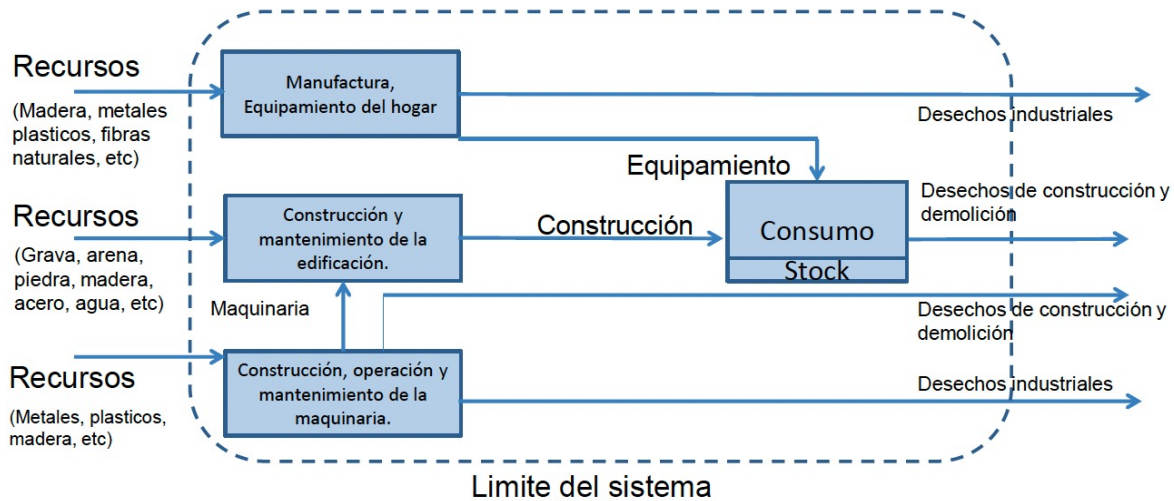


Cajas representan procesos, flechas representan flujos (materiales o sustancias) de masa en el sistema



Source: FORSTER et al. (2003)

Ejemplo: Procesos para desechos sólidos



Tipos de MFA

- **Economy-wide MFA (Bulk-MFA)**
 - Usado para brindar soporte a políticas gubernamentales
 - Brinda información sobre el metabolismo de las sociedades a diferentes escalas
 - Los flujos rastreados son materiales
- **Material FA (MFA)**
 - Se analizan productos a nivel nacional o global
- **Substance FA (SFA)**
 - Se analiza un (o un grupo) de sustancia (s) en un país, región o continente
 - Los flujos rastreados son elementos

Tipos de MFA

Flujo a rastrear	Escala	Termino en Inglés
Materiales	Nacional o global	Economy-wide MFA (EW-MFA)
	Regional	Societal metabolism
	Urbano	Urban metabolism
Elementos/productos	Nacional o global	MFA
	Regional/ Nivel de empresas (firm-level)	Substance flow analysis (SFA)

Economy-wide MFA (Bulk-MFA)

Un sistema de monitoreo para las **economías nacionales** que muestra las **cantidades** totales de **materiales** utilizados en la economía.

La contabilidad del flujo de materiales permite el monitoreo del **consumo total de recursos naturales** y los **flujos indirectos** asociados, así como el **cálculo de indicadores**.

The basic MFA model

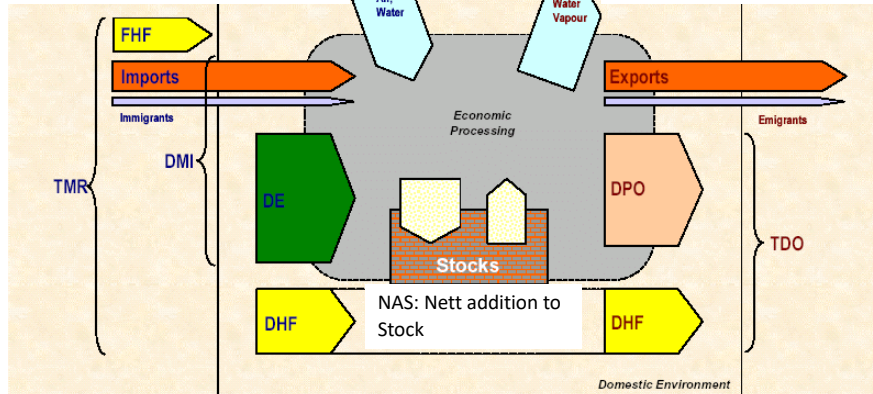
Hidden flows:

DHF, FHF: domestic/foreign HF

DPO: Domestic processed output

TDO: Total domestic output

DE: Domestic extraction



DMI: Direct material input

TMR: Total material requirement

Source: Matthews et al. 2000 (slightly modified)

Consumption:

DMC: Domestic material consumption

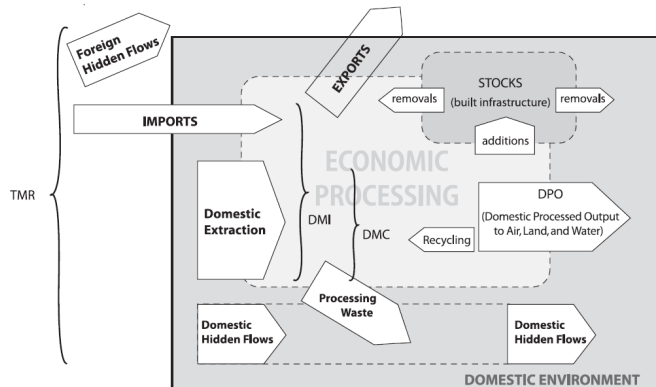
Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Entradas

- Agricultura
- Forestal
- Pesquería
- Minería
- Extracción de petróleo o gas
- Materiales primarios
- Oxígeno del aire
- Importaciones
 - Recursos naturales
 - Semi-manufacturados (p.e., hierro fundido)
 - Productos finales
- Flujos escondidos (nacional o internacional)
 - Estimados



Total Material Requirement TMR = Domestic Extraction + Imports + Domestic Hidden Flows + Foreign Hidden Flows

Direct Material Input DMI = Domestic Extraction + Imports + Recovered (Recycled) Material

Direct Material Consumption DMC = DMI - Exports

Domestic Processed Output DPO = DMC - Net Additions to Stock - Recycled Material

Source: WRI MFA Project (see <http://materials.wri.org>).

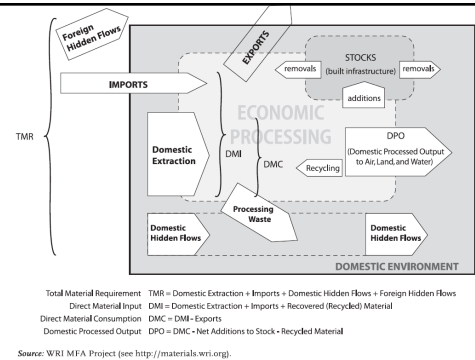
Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Salidas

- Emisiones al aire
- Residuos industriales y municipales depositados en rellenos sanitarios
- Cargas sólidas en aguas residuales
- Materiales dispersos en el ambiente como resultado del uso de productos
 - ✓ Uso disipativo p.ej., fertilizantes y estiércoles distribuidos en campos, sales usadas en carreteras)
 - ✓ Pérdidas disipativas (p.ej., caucho desgastado de las llantas de vehículos, partículas desgastadas por fricción de productos tales como frenos, solventes usados en pinturas)
- Exportaciones
- Flujos escondidos



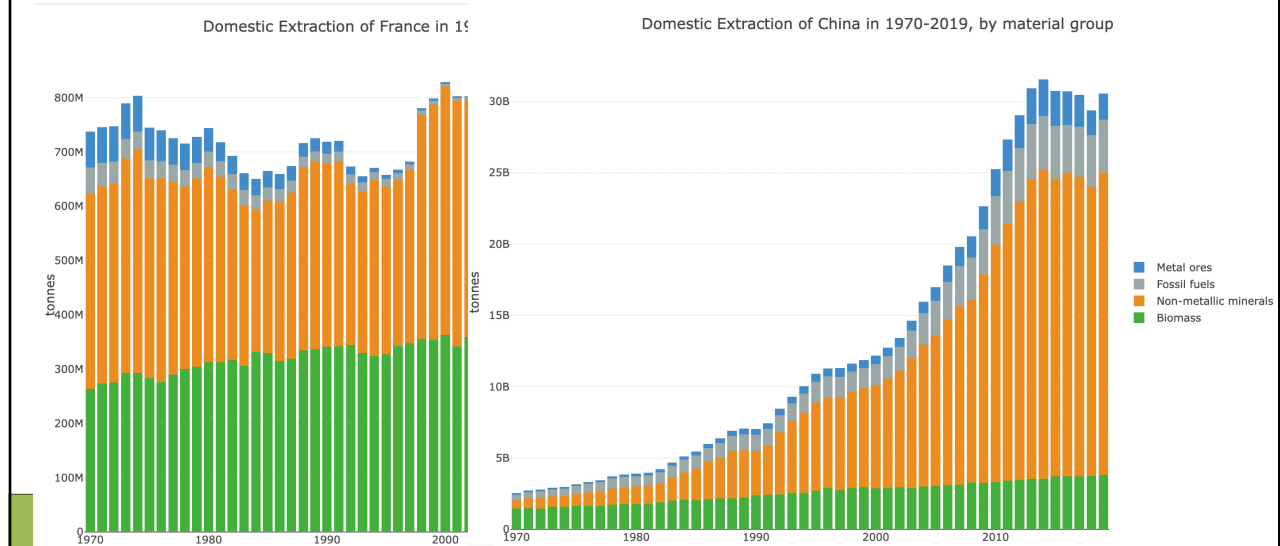
Indicadores Economy-wide MFA

- $DMI = \text{domestic extraction} + \text{import}$
- $DMC = DMI - \text{export}$
- $TMR = DMI + DHF + FHF$
- $DPO = \text{emissions} + \text{waste flows}$
- $TDO = DPO + DHF$

HF: Son materiales que se mobilizan o son producidos pero no son consumidos o vendidos como bienes finales. Son comunes durante las extracciones de materia prima, manufactura y yso.

DMI: Direct material input
 DMC: Domestic material consumption
 TMR: Total material requirement
 DPO: Domestic processed output
 TDO: Total domestic output

Comparación Francia vs China



Raupova, O., Kamahara, H., & Goto, N. (2014).

Ejemplos Economy-wide MFA

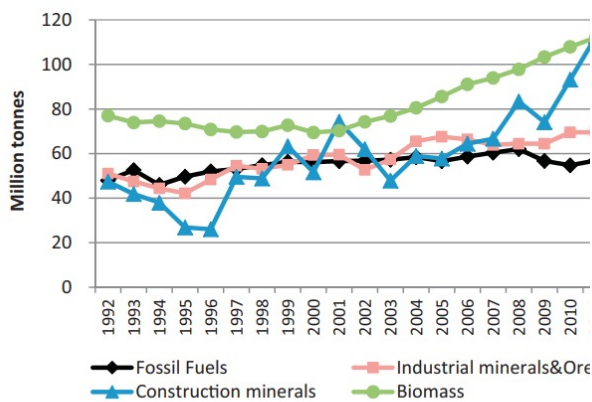


Fig. 7. Direct material input (DMI) components for Uzbekistan from 1992 to 2010, in million tons.

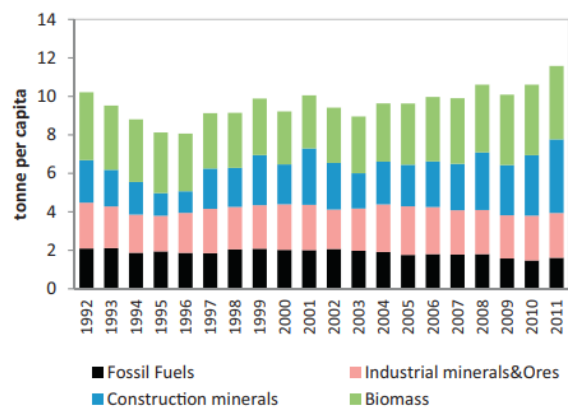
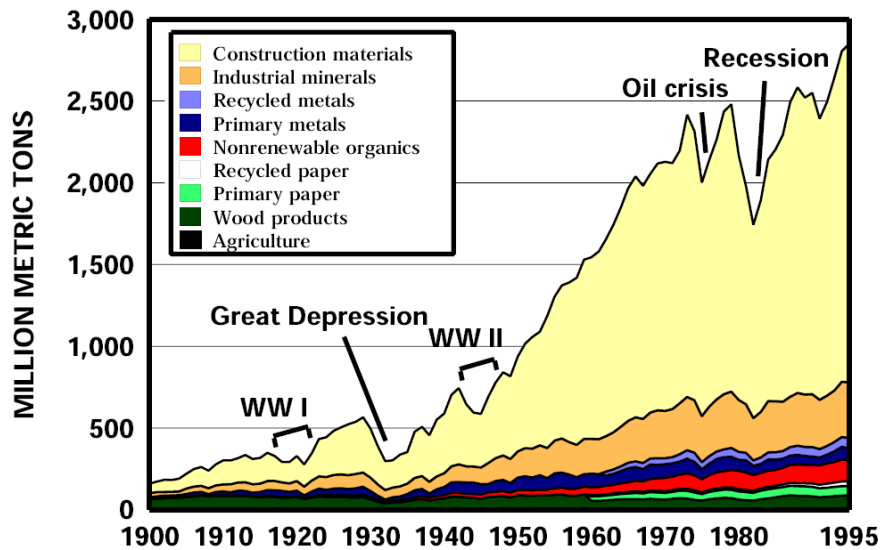
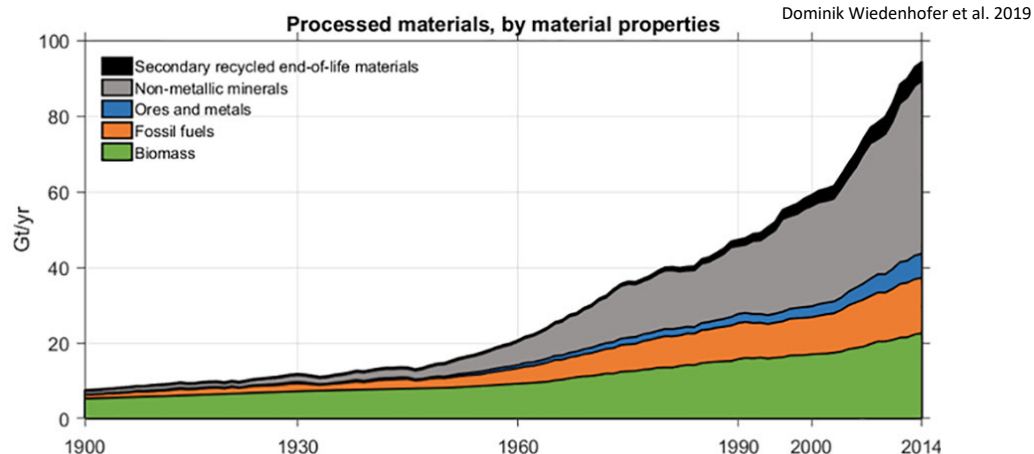


Fig. 10. Domestic material consumption (DMC) for Uzbekistan from 1992 to 2011, DMC = DMI - EXP, in ton per capita.

Materiales Extraídos (Extracción en USA)



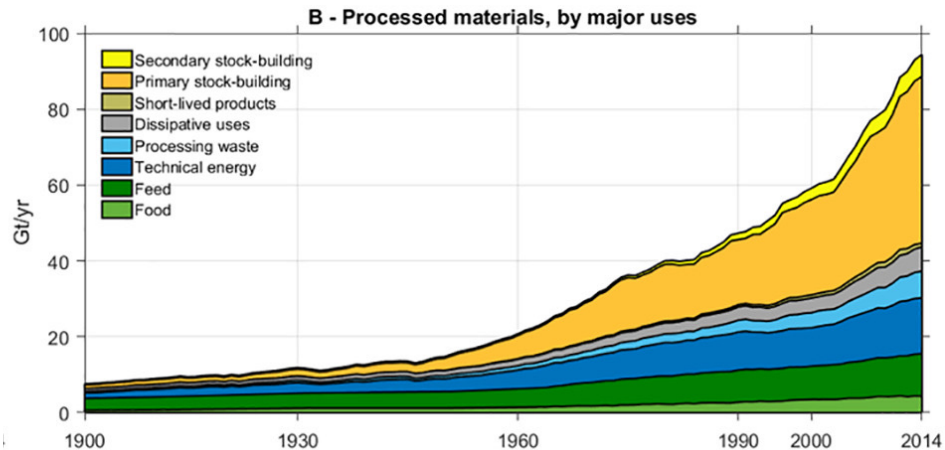
Global material stocks and flows, from 1900 to 2014. Annual flows of primary and secondary processed materials



Dominik Wiedenhofer et al. 2019

They enable a dynamic and comprehensive assessment of resource use, stocks and all wastes in the socio-economic metabolism

Global material stocks and flows, from 1900 to 2014. Processed materials by use

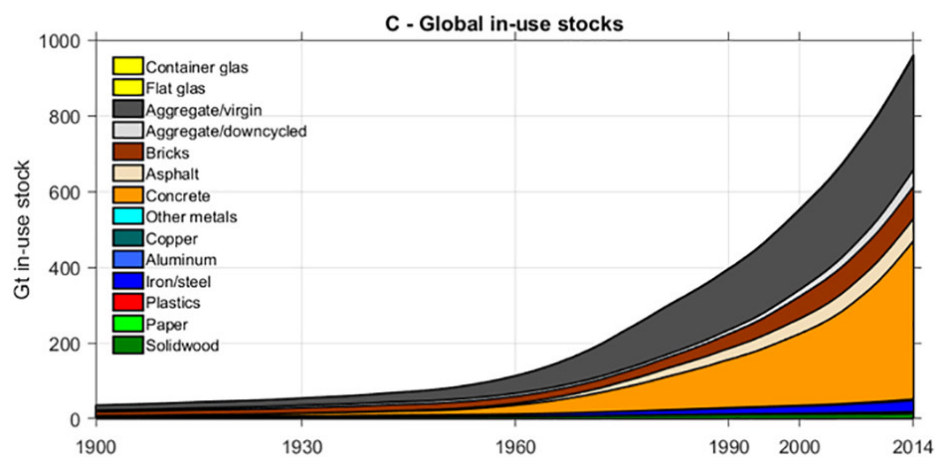


Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Global material stocks and flows, from 1900 to 2014. In-use stocks

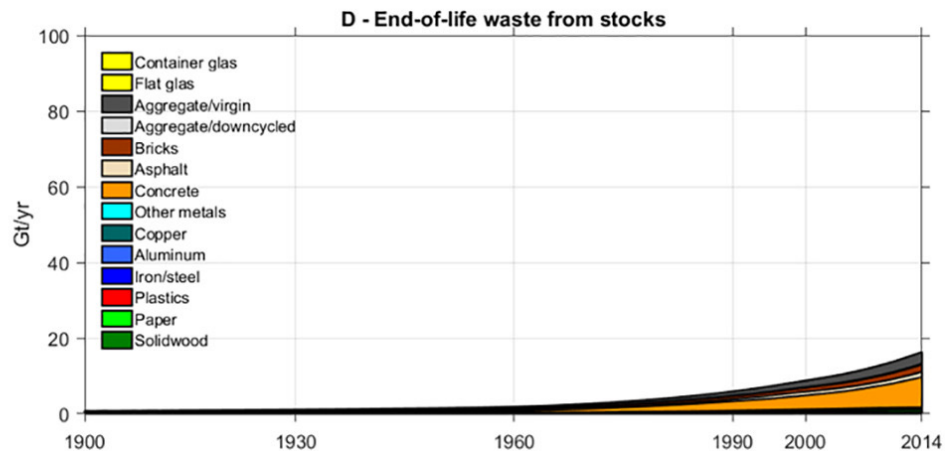


Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Global material stocks and flows, from 1900 to 2014. End-of-life waste from stocks



Economy-wide MFA (Bulk-MFA)

- **Patrones de uso de recursos:** ¿cuántos y qué **tipo** de materiales utilizamos?
¿Por qué y cómo **varían** las economías en sus patrones metabólicos?
- **Tendencias y productividad de los recursos:** ¿cómo se desarrolla el uso del material con el tiempo y en relación con el desarrollo económico? ¿Hay **desmaterialización**?
- **Globalización:** ¿cómo se **distribuye** la extracción de recursos, la producción industrial y el consumo final en todo el mundo? ¿Está **disminuyendo** el uso de recursos en los países industrializados debido a la **externalización**?
- **Economía circular:** ¿qué fracción de los aportes de recursos se **libera al medio ambiente** dentro de un año? ¿El reciclaje sustituye con éxito los insumos de recursos primarios?

SFA and MFA

¿Para qué se utiliza SFA / MFA?

Vincular flujos de problemas ambientales con flujos materiales en la sociedad

- Cuantificar y controlar los flujos
 - Obtener una visión completa de los flujos en una región específica
 - Encontrar y monitorear flujos de problemas
 - Descubrir dependencia entre flujos
- Evaluar efectos de políticas
 - Las políticas se traducen en cambios o relaciones en los flujos
 - Se pueden evaluar los efectos de los cambios en los flujos.
- Predecir futuros flujos
 - En función de los stocks y datos históricos

¿Qué preguntas debemos responder?

- ¿Cuál es el problema real?
- ¿Hay un correcto entendimiento del problema?
- ¿Cuál es el material o sustancia que se moviliza en el sistema?
- ¿Cuáles son los procesos y flujos relevantes
- ¿Puedes cuantificar estos flujos y procesos?
- ¿Cuál es la calidad de datos recolectados?

Pasos en SFA / MFA

1. **Identificación** de flujos relevantes
2. **Análisis del sistema** (selección de los materiales relevantes, procesos, sustancias (elementos) y límites del sistema).
3. **Cuantificación** de flujos máxicos de materia y/o sustancias.
4. **Identificación** de puntos débiles en el sistema.
5. **Desarrollo y evaluación** de escenarios y representación esquemática, **interpretación** de los resultados.

¿Cómo hacer MFA?

Ejemplo: MFA para nitrógeno a nivel de vivienda

Paso 1: Identificar los flujos relevantes

Bienes relevantes: entradas y salidas hacia y desde la vivienda:

- Comida, excreta, aguas negras, aguas grises, residuos orgánicos

Flujos relevantes

- Fósforo, nitrógeno, carbono, etc.

Procesos relevantes

- Actividades domésticas (consumo de comida, consumo de agua, digestión, preparación de alimentos) y sistema sanitario.

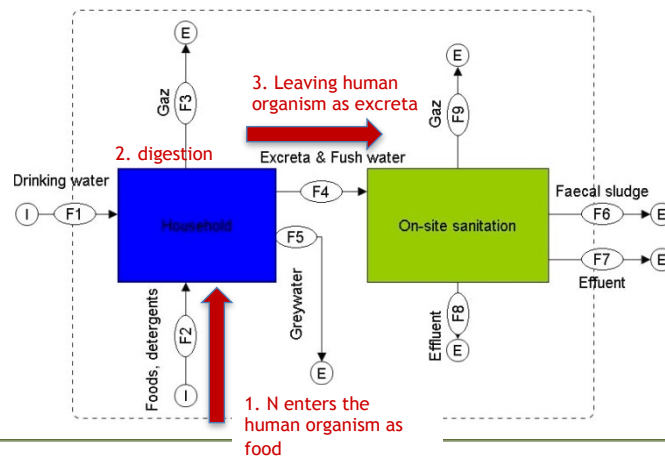
Límites del sistema

¿Cómo hacer MFA?

Example of system boundaries at the household-level.
"I" is import, "E" is export.
Source: YIOUGO (2010)

Ejemplo: MFA para nitrógeno a nivel de vivienda

Paso 2: Análisis del sistema: Bienes que contienen nitrógeno se transforman en dos procesos



¿Cómo hacer MFA?

Ejemplo: MFA para nitrógeno a nivel de vivienda

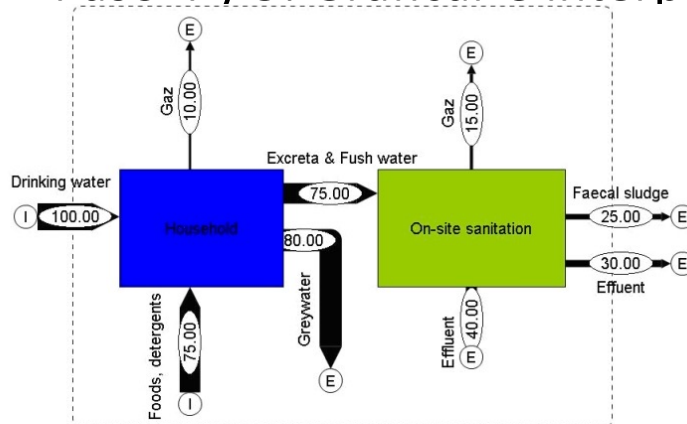
Paso 3: Cuantificar flujos de bienes y sustancias en el sistema

- **Bien** = Sustancia o mezcla de sustancias (ej. Comida, residuos sólidos)
- **Flujo N en excreta** = $\text{kg excreta/capita/day} \times \text{N [] en excreta}$
- **Fuente de datos:** literatura, estimaciones mediciones, cálculos

¿Cómo hacer MFA?

Ejemplo: MFA para nitrógeno a nivel de vivienda

Paso 4 y 5: Graficar e interpretar

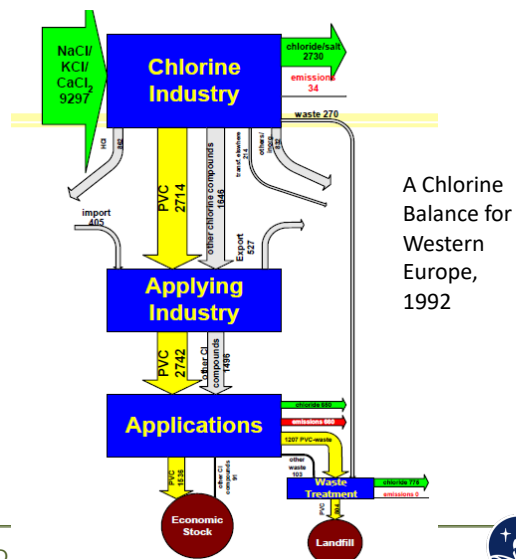


Tipos de modelado

- Contabilidad (bookkeeping)
 - Cuantificar y controlar flujos de sustancias
 - Identificar y cuantificar flujos problemáticos
- Modelado estático
 - Encontrar los orígenes de flujos problemáticos
 - Evaluar efectos de políticas
- Modelado dinámico
 - Predecir futuros flujos de sustancias
 - Predecir problemas futuros

Contabilidad (bookkeeping)

- Vista general de flujos y stocks en un año
- Los flujos son números fijos, no ecuaciones

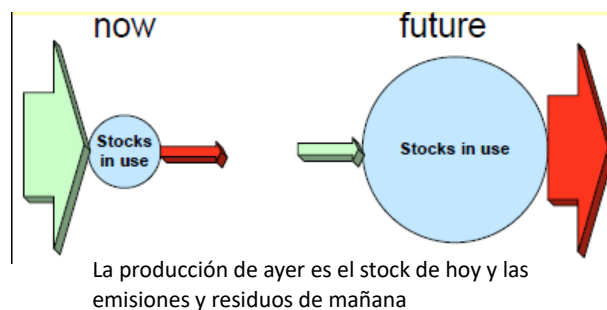


Modelado estático

- Los flujos dependen unos de otros (ecuaciones)
- Hay un estado estático: entradas = salidas
- Los resultados no son predicciones, pero proyecciones de lo que pasaría en un régimen constante
- Sirve para comparar medidas que se buscan implementar
- Ejemplos:
 - Metales pesados: examinar su acumulación en stocks de la sociedad puede servir como una advertencia temprana

Modelado dinámico

- Los stocks están en aumento: hay crecimiento poblacional, económico, duración de edificios y artefactos
- Con este modelado se puede advertir de manera temprana de emisiones y residuos que aumentarán en el futuro con un retraso

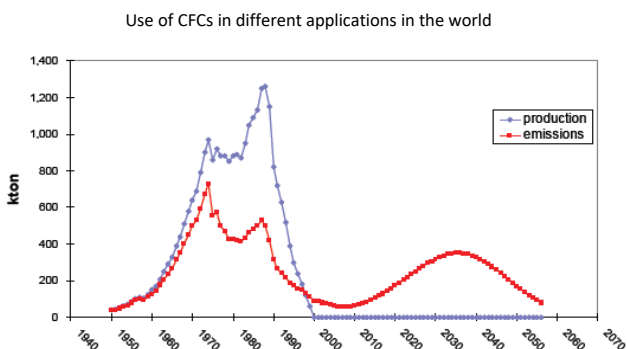
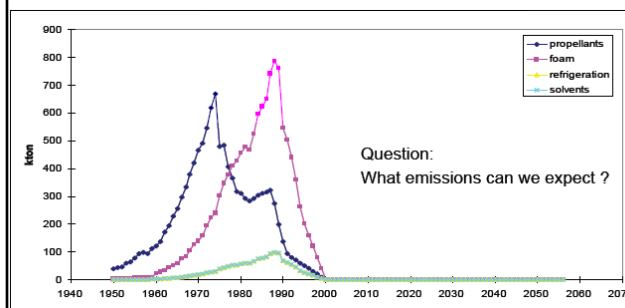


Modelado dinámico

- Los flujos son dependientes unos de otros y del tiempo
- Las ecuaciones pueden ser lineales o no
- Se hacen simulaciones
- Hay diferentes tipos de dinámicas:
 - Desarrollo socio económico (cambios tecnológicos, en población, GDP, mercado)
 - Características de sustancias y materiales (vida útil, emisiones en el uso, reuso y reciclaje)
- Modelado complejo: tiempo de vida no es exacto (ejemplo: celulares, no se disponen inmediatamente)

Modelo dinámico – Ejemplo CFCs

- Producción actual es casi 0 (Montreal protocol)
- Hubo diferentes aplicaciones con diferentes tiempos de vida:
 - Aerosol (<1a), refrigerante (10^a), agente en PUR (50a?)
- Eso significa: hay un stock en la sociedad



Ventajas y desventajas

Ventajas

- Brinda una perspectiva a nivel de sistema: **evita traslado de problemas**
- La **masa** es un indicador **simple**
- Herramienta de toma de **decisiones** para diferentes tecnologías
- Útil en **países en desarrollo**, especialmente para detectar problemas ambientales y las mejores soluciones

Desventajas

- Necesita **muchos datos** para ser implementada
- El **link** con los **problemas** ambientales es **bajo**
- Hay que tener en cuenta las **incertidumbres**

Aplicabilidad

- Evaluaciones de impacto ambiental
- Desarrollo de políticas ambientales para sustancias peligrosas
- Manejo de nutrientes en cuencas
- Gestión de residuos
- Evaluar la solidez ambiental de las opciones de saneamiento calculando y comparando la cantidad de nitrógeno o fósforo dentro de la ciudad para cada opción