



Reúso de aguas residuales para riego: introducción y etapas claves de un proyecto de reúso

Eng. M.Sc. Isaac Arturo Ramos Fuentes
Especialista en irrigación y manejo integral del agua.

25 de febrero del 2020

Introducción

La « Reutilización/Reúso de aguas residuales tratadas/depuradas/regeneradas » consiste en:

Recuperar las **aguas residuales** (domesticas, industriales, agrícolas, etc.), **depurarlas** a través de diversos procesos (físicos, químicos, biológicos, etc.) que permitan **mejorar o adaptar la calidad** de esta agua con la finalidad de darle un nuevo uso (**agrícola**, urbano, industrial, potable) de manera **planeada, controlada y segura** ... **Y no únicamente recuperar aguas residuales NO tratadas para reutilizarlas (Caso mayoritario de México)...**

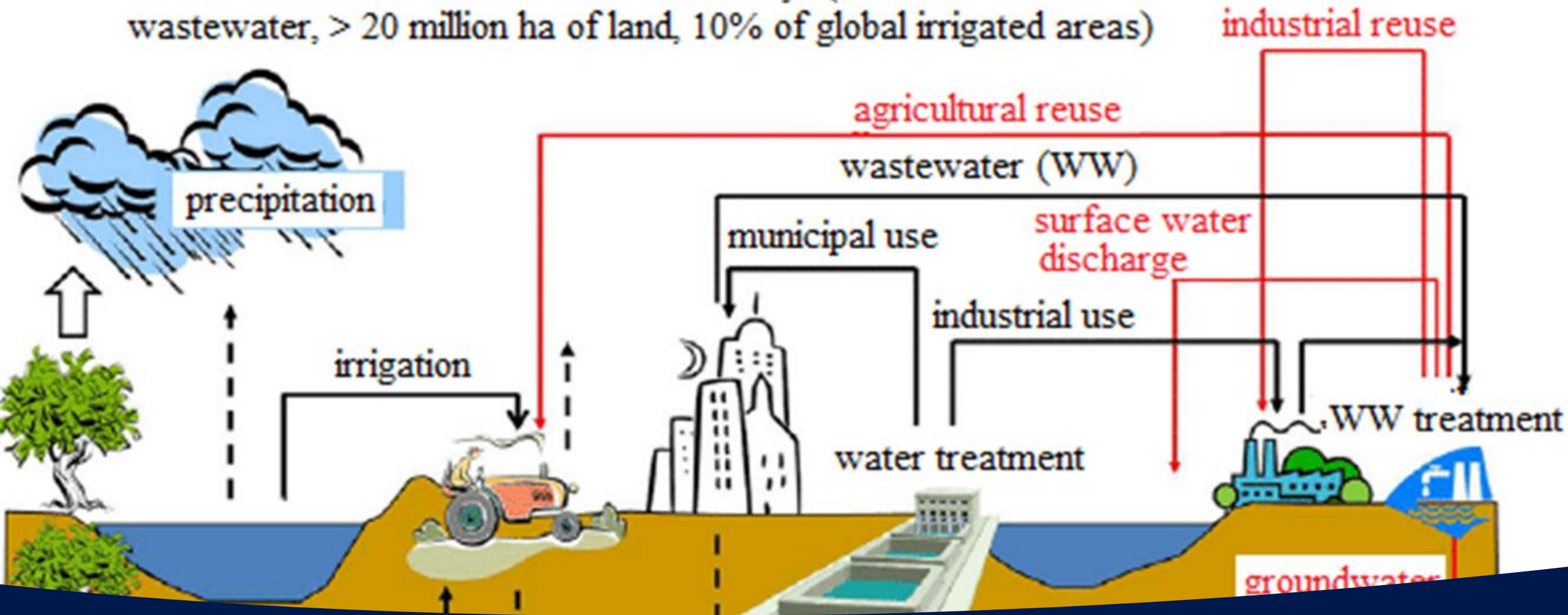


Aguas residuales tratadas según la NOM003 SEMARNAT 1997:

Fuente: <https://www.traxco.es/>

Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público.

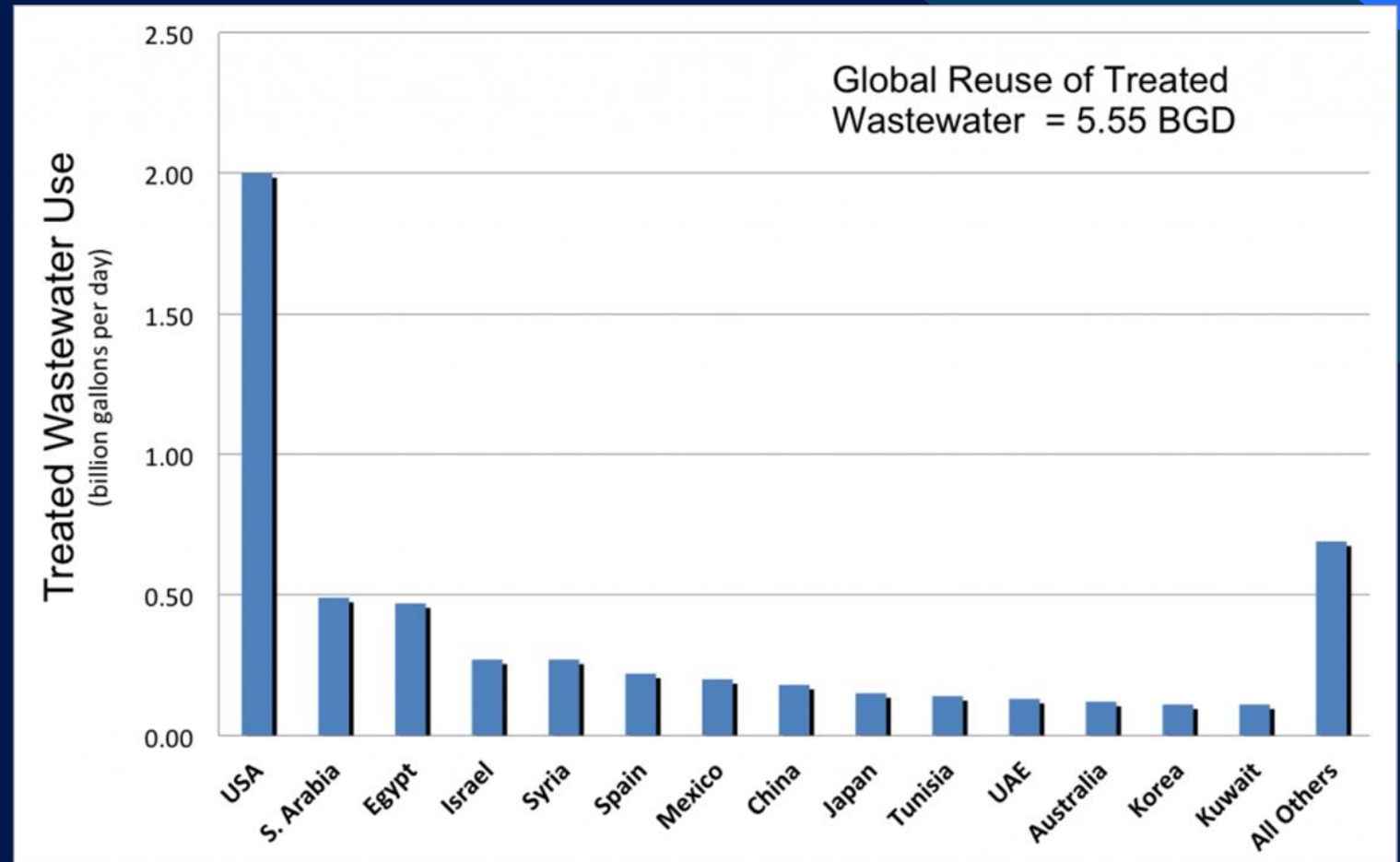
Wastewater reuse in the world: 7.1 km³ / yr (0.18% of treated wastewater, > 20 million ha of land, 10% of global irrigated areas)



Introducción

Introducción

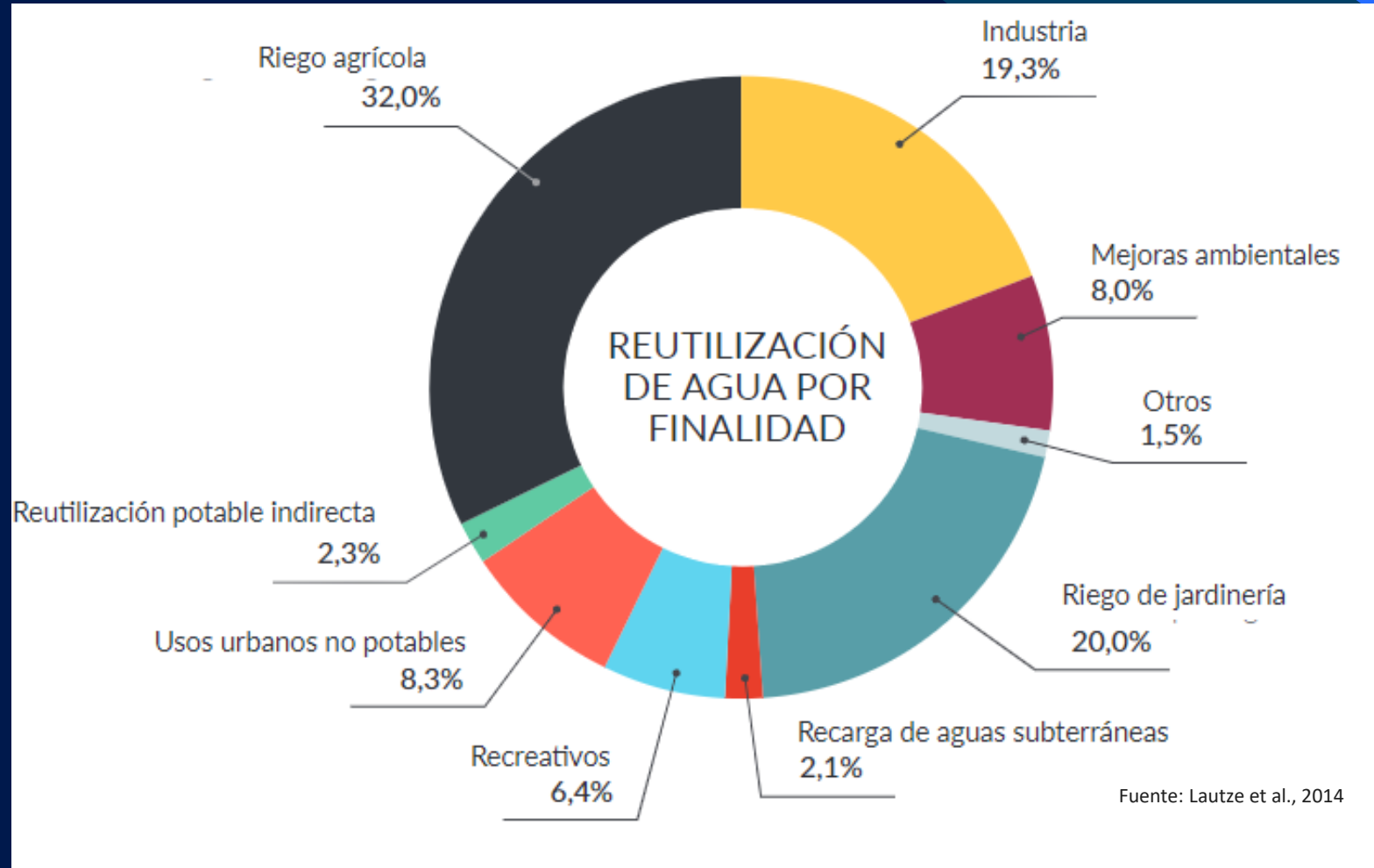
Reúso en el mundo (datos del 2008).
México es uno de los países con mayor reúso en volumen, pero no per cápita (donde los lideres son Qatar e Israel);



Introducción

Los usos de las aguas tratadas después de un tratamiento avanzado de depuración son variados alrededor del mundo. Desde las actividades urbanas que requieren una potabilización, hasta su uso en actividades agrícolas y recreativas. Sin embargo, el principal uso es el riego para producción agrícola.

En México también es el caso, pero no de manera controlada ni planeada en la mayoría de los casos.



Introducción

Ejemplo de tratamiento avanzado con fines de reúso

1. Recolección de las aguas
2. Pretratamiento
3. Tratamiento primario
4. Tratamiento secundario
5. Tratamiento terciario o avanzado
6. Reúso
7. Tratamiento de lodos
8. Tratamiento de olores
9. Vertido en el medio natural

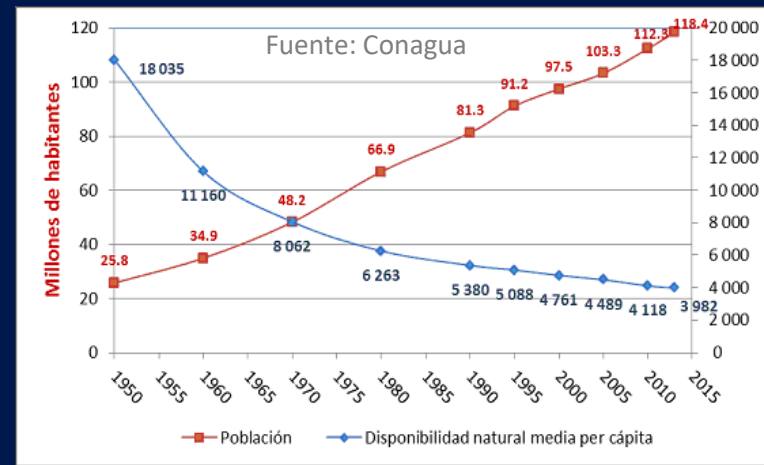
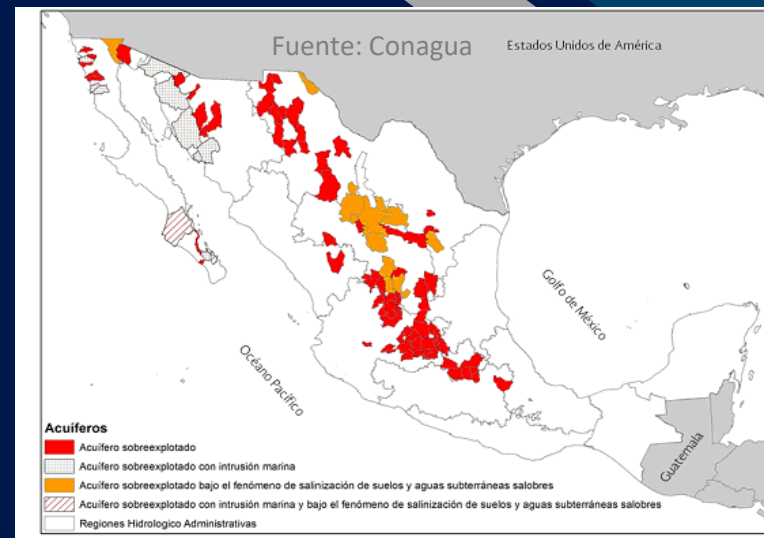


Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. Determinar la oferta y la demanda
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

1. Identificar el motor y los objetivos

- Escasez del recurso (conflicto entre diversos usos)
- Costo del agua o del tratamiento para su descarga (disminución de costos)
- Aumento de la demanda (seguridad hídrica)
- Cumplimiento de la normativa (preservación de cuerpos de agua)
- Adopción de nuevos modelos de economía circular (turismo, creación de empleos, responsabilidad social)



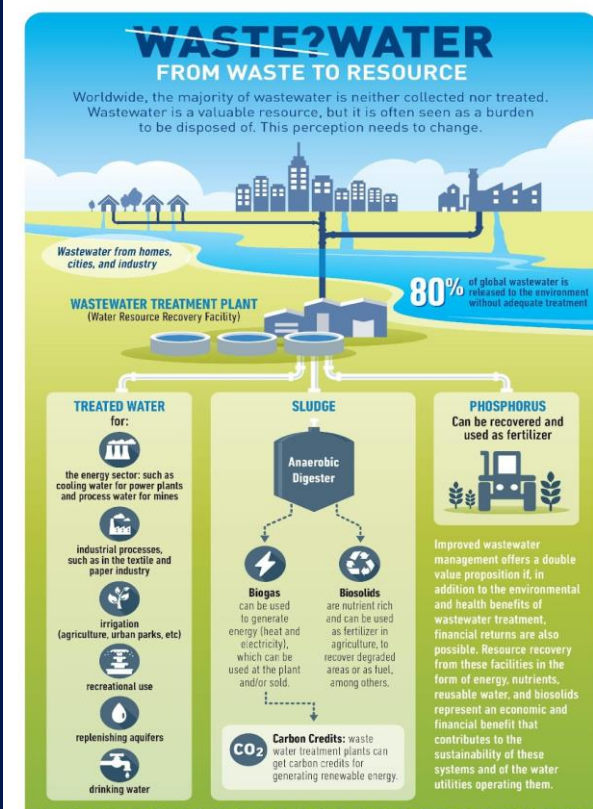
Productores tendrán que hacer rescate de agua para riego

En estos días se abrirá el registro a los productores para el programa que subsidia energía eléctrica

Fuente: <https://www.debate.com.mx/>



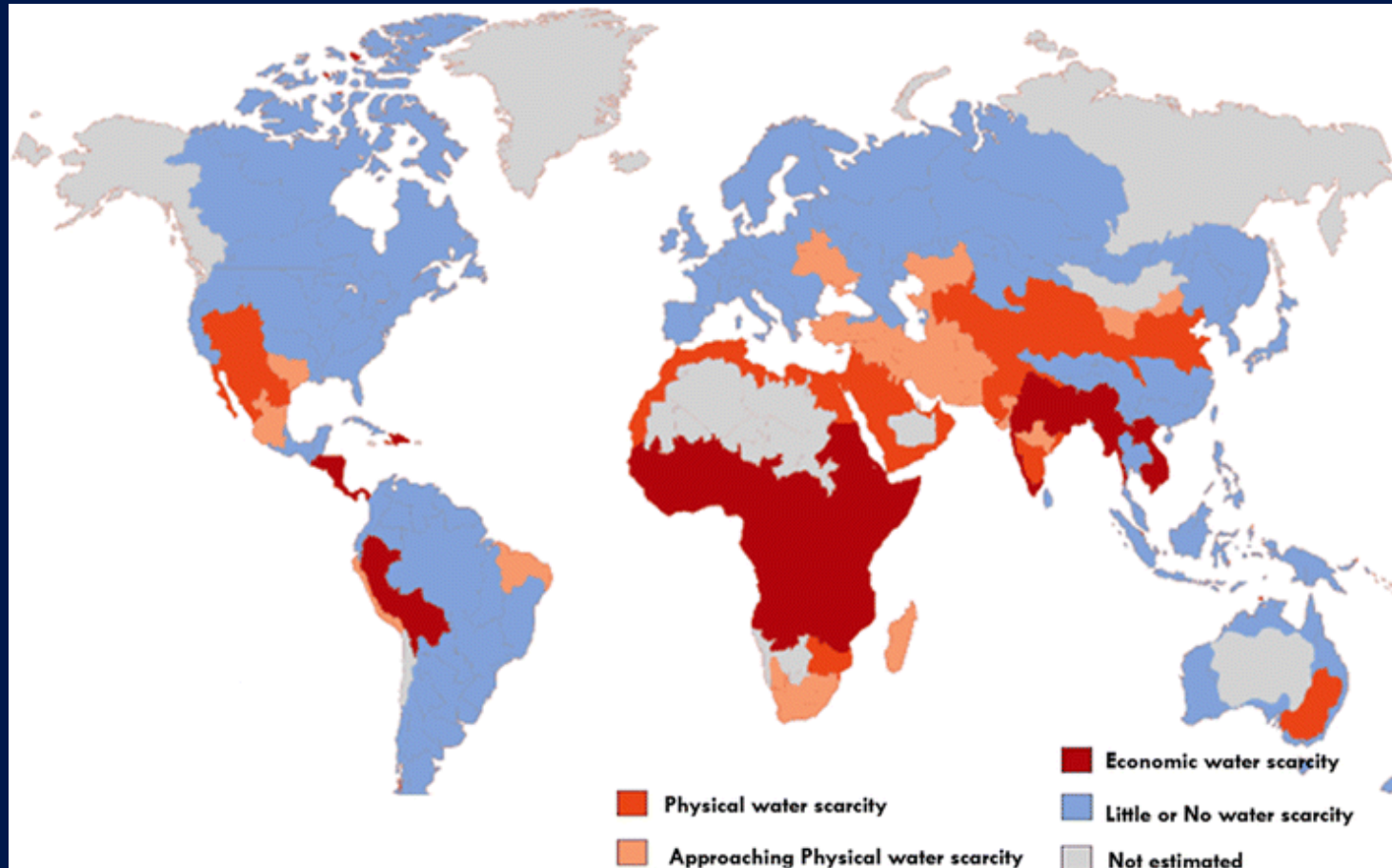
El rescate y bombeo de agua para riego aumentará los costos de producción por el gasto de energía eléctrica, monto que se subsidia si se registran antes las gotas.



Fuente: World Bank Group

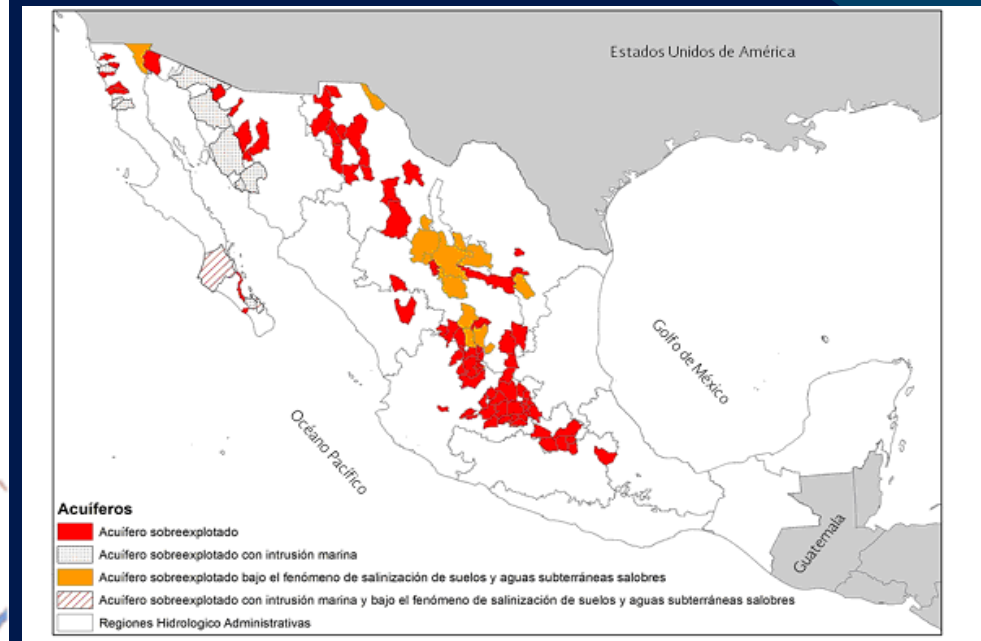
These resources can generate additional revenue streams for the operator, paying part or all of the operation costs, thereby contributing to the sustainability of the water system.

1. Identificar el motor y los objetivos



Fuente: FEW Resources. Org.

El problema de escasez de agua en México: El principal motor?



Fuente: Conagua

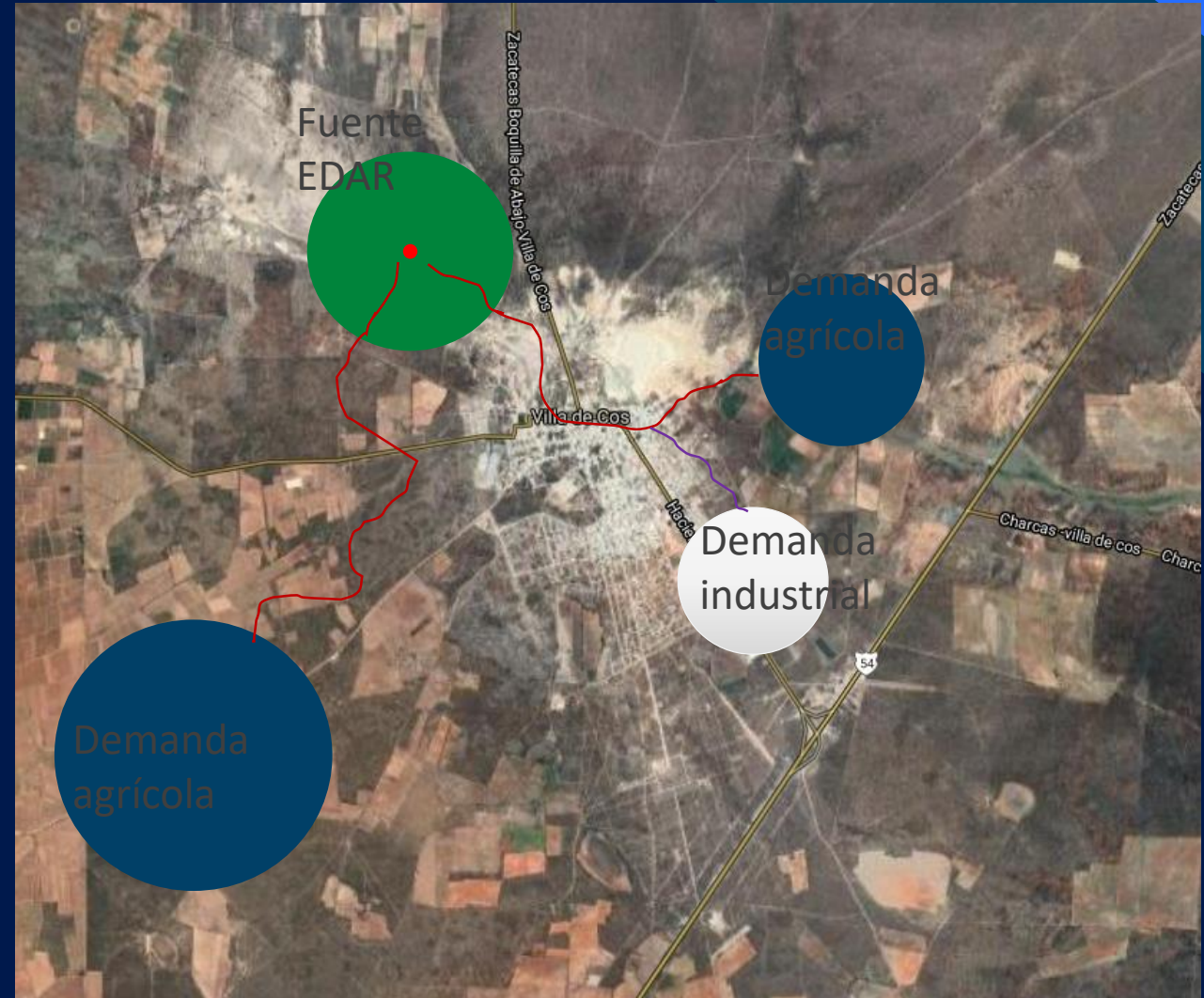
Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. **Determinar la oferta y la demanda**
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

2. Determinar y cuantificar la oferta y la demanda

Antes de realizar estudios mas detallados, es importante hacer un estudio de factibilidad, para determinar:

- Fuente de aguas residuales (infraestructura existente, volúmenes, calidad)
- Red de distribución (existe o tendría que crearse?)
- Los usos (necesidad de almacenamiento? Que calidad requieren?... En el caso del riego, qué cultivos? Qué técnica de riego se usa?)
- A qué costo? → comparación preliminar de escenarios



Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. Determinar la oferta y la demanda
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor



En México: NOM-001-SEMARNAT-1996 → PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Principales puntos de la Norma:

Tres tipos de cuerpos receptores: **A (uso en riego agrícola)**, B (uso publico urbano), y C (protección de vida acuática).

Suelo: riego de áreas verdes / infiltración y otros riegos

Límites permisibles para:

- Contaminantes básicos: T, GyA, MF, **SS**, SST, **DBO** (**DQO**), NT, FT. **pH**, **color**, **toxicidad aguda**.
- Metales pesados y cianuros: As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn y cianuros.
- Patógenos: **coliformes fecales**, huevos de helminto., **E. Coli**, **Enterococos fec.**

Rango de población : a partir de 2501 habitantes

Frecuencia de análisis de descargas municipales: mensual (>50k HA), trimestral (20 – 50k HA), semestral (2,5 – 20k HA).

Además, en México existent documentos con recomendaciones basadas en lo establecido por la EPA y las directrices de la OMS y de la FAO

3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor



TABLA 2

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A

(1) Instantáneo
 (2) Muestra Simple Promedio Ponderado
 (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Limites permisibles para contaminantes básicos

- 8 parámetros de contaminantes básicos (integración de Sólidos Suspendedos t sustitución de la DQO por la DBO en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017).
- La calidad requerida para el riego agrícola es menor que para el reúso en usos públicos urbanos o de protección de la vida acuática.

3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor



TABLA 3

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
(miligramos por litro)	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Limites permisibles para metales pesados y cianuros

- 8 metales pesados + cianuro (sin evolución prevista en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017)
- La calidad requerida para el riego agrícola es menor que para el reúso en usos públicos urbanos o de protección de la vida acuática.

En Europa... una reglamentación **más estricta** (y **más segura**)



Tableau I : Niveaux de qualité sanitaire des eaux usées traitées.

Paramètres	Niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées			
	A	B	C	D
Matières en suspension (mg/L)	< 15	Conforme à la réglementation des rejets d'eaux usées traitées pour l'exutoire de la station hors période d'irrigation		
Demande chimique en oxygène (mg/L)	< 60			
Entérocoques fécaux (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Phages ARN F-spécifiques (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100mL)	≤ 250	≤ 10 000	≤ 100 000	-

Tableau II : Fréquences de surveillance des eaux usées traitées.

Usage requérant a minima (1) une eau de qualité sanitaire	Fréquence d'analyses	Valeur limite à respecter en <i>Escherichia coli</i> (UFC/100ml)
A	1 par semaine	≤ 250
B	1 tous les 15 jours	≤ 10 000
C et D	1 par mois	≤ 100 000

Fuente: ANSES, rapport d'expertise collective. 2012.

CATEGORÍA DE CALIDAD DE LAS AGUAS REGENERADAS	OBJETIVO INDICATIVO DE TECNOLOGÍA	REQUISITOS DE CALIDAD				OTROS
		<i>E. COLI</i> (UFC/100 ML)	BOD ₅ (MG/L)	TSS (MG/L)	TURBIDEZ (NTU)	
A	Tratamiento secundario, filtración y desinfección	= 10 o inferior al límite de detección	= 10	= 10	= 5	<i>Legionella</i> spp.: <1 000 ufc/l cuando exista riesgo de aerosolización en invernaderos Nematodos intestinales (huevos de helmintos): = 1 huevo/l para el riego de pastos o forraje
B	Tratamiento secundario y desinfección	= 100	Con arreglo a la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento aguas residuales urbanas	Con arreglo a la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento aguas residuales urbanas	-	
C	Tratamiento secundario y desinfección	= 1.000	(anexo i, cuadro 1)	(anexo i, cuadro 1)	-	
D	Tratamiento secundario y desinfección	= 10.000	(anexo i, cuadro 1)	(anexo i, cuadro 1)	-	

Frecuencia mínima de los controles						
Categoría de calidad de las aguas regeneradas	<i>E. Coli</i>	BOD ₅	TSS	Turbidez	<i>Legionella</i> spp. (si procede)	Nematodos intestinales (si procede)
A	Una vez a la semana	Una vez a la semana	Una vez a la semana	Continuo	Una vez a la semana	Dos veces al mes o con la frecuencia que determine el operador de la instalación de regeneración en función del número de huevos en las aguas residuales que entran en la instalación de regeneración
B	Una vez a la semana	Con arreglo a la Directiva 91/271/CEE (anexo I, sección D)	Con arreglo a la Directiva 91/271/CEE (anexo I, sección D)	-		
C	Dos veces al mes			-		
D	Dos veces al mes			-		

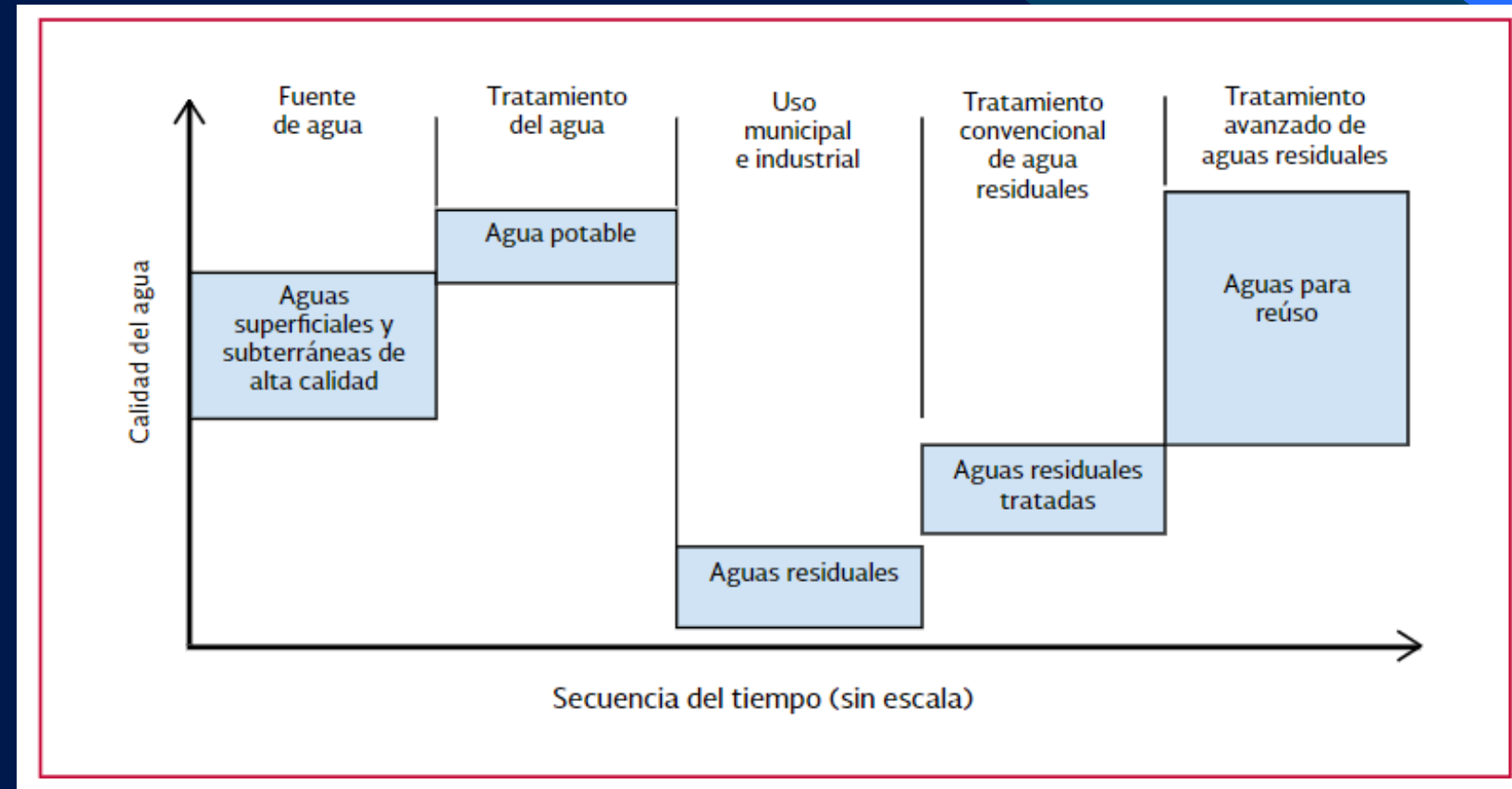
Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. Determinar la oferta y la demanda
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)

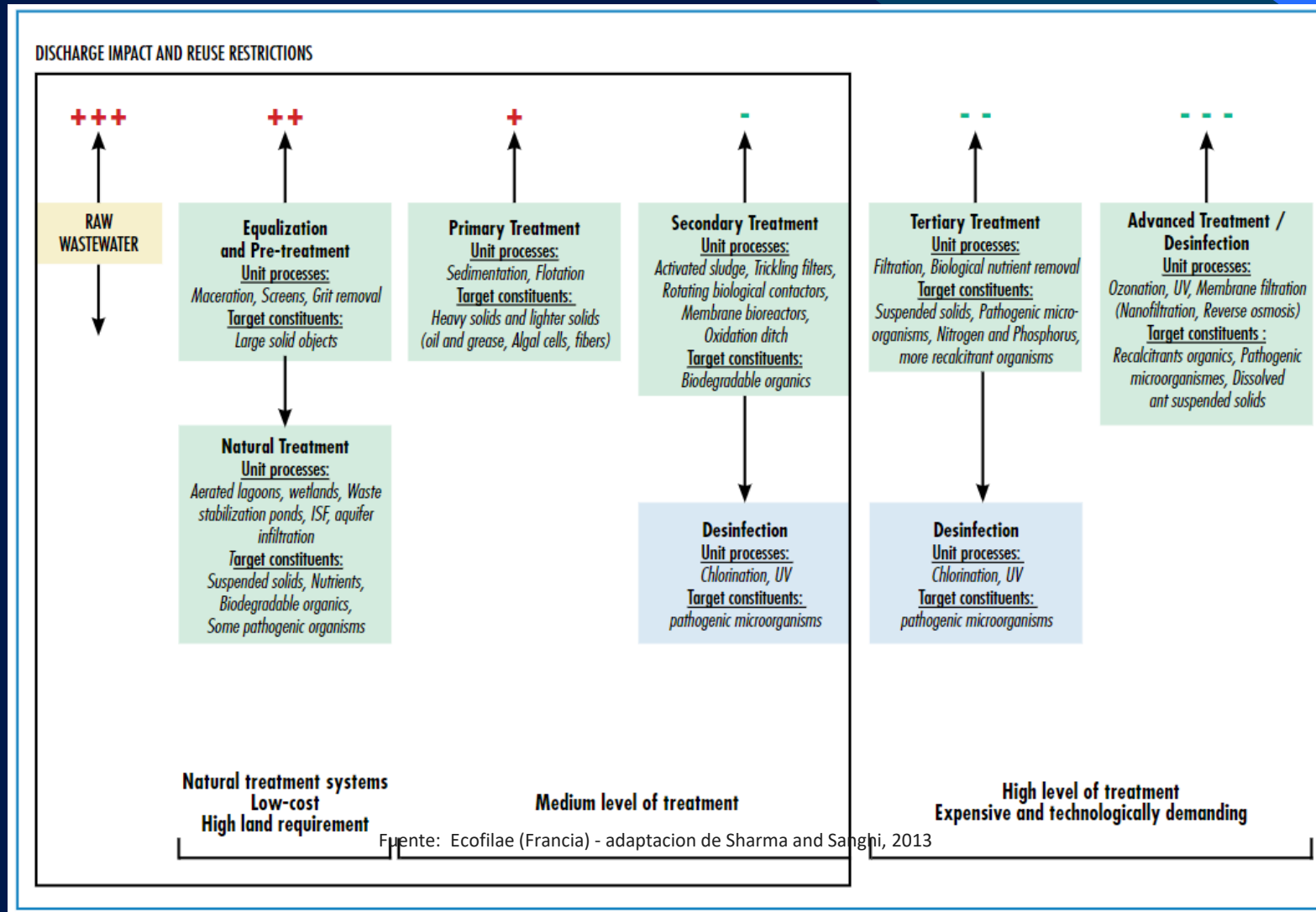
Se trata básicamente diseñar un tren de tratamiento para adaptar la calidad del agua al uso que se requiere.

Hay que tener en cuenta que se debe cumplir las exigencias mínimas de la ley pero también se deben considerar las recomendaciones específicas para el tipo de uso que se le dará al agua.



4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)

El nivel de tratamiento (bajo, medio o alto) además de ir de acuerdo con los requerimientos, debe ser diseñado en función de los medios económicos y de uso del suelo del sitio del proyecto.



4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)

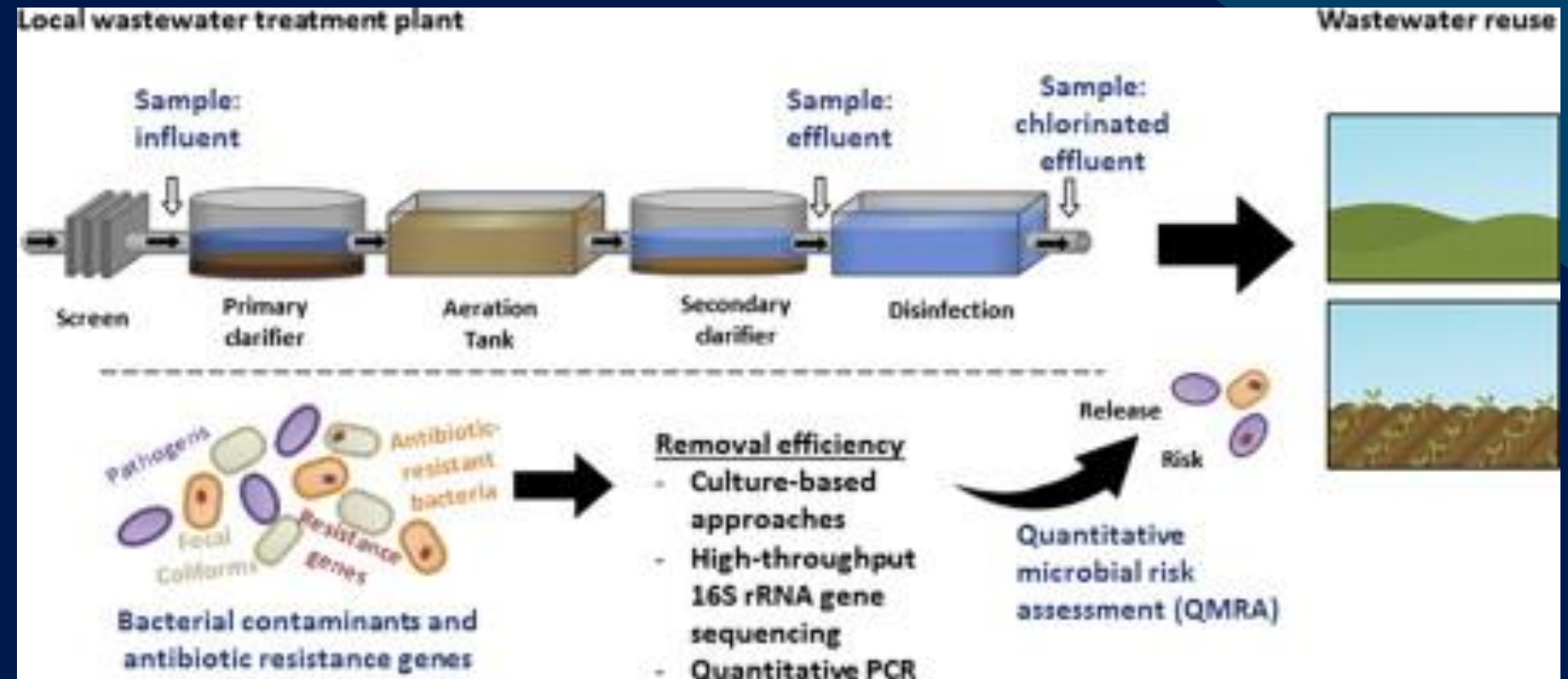


Existe una gran variedad de tratamientos que permiten depurar las aguas de contaminantes específicos.

Proceso	Sólidos suspendidos	Coloides	Materia orgánica	Materia orgánica disuelta	Nitrógeno y fósforo	Constituyentes traza	Sólidos disueltos totales	Bacterias	Protozoos y helmintos	Virus
Tratamiento secundario	X			X						
Secundario con remoción de nutrientes				X	X					
Filtración profunda	X							X	X	
Filtración superficial	X		X					X	X	
Microfiltración	X	X	X					X	X	
Ultrafiltración	X	X	X					X	X	X
Flotación de aire disuelto	X	X	X						X	X
Nanofiltración			X	X		X	X	X	X	X
Osmosis inversa				X	X	X	X	X	X	X
Electrodialisis		X					X			
Carbón activado				X		X				
Intercambio iónico					X	X	X			
Oxidación avanzada			X	X						
Desinfección			X					X	X	X

4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)

Finalmente, se diseña el tren de tratamiento mas adaptado para el proyecto.



Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. Determinar la oferta y la demanda
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

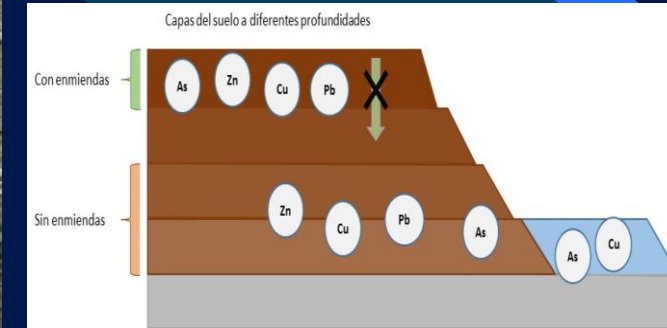
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades

Los riesgos en un proyecto de reúso pueden clasificarse en:

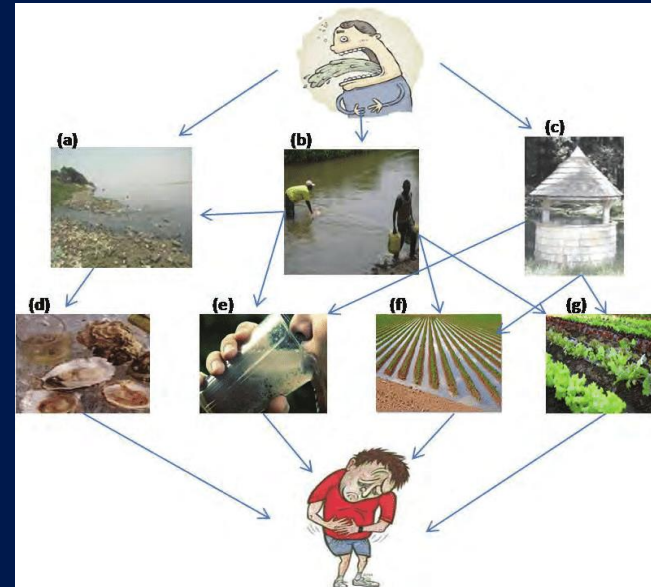
- **Agronómicos:** aumento de salinidad del suelo, toxicidad en el cultivo por metales pesados.
- **Ambientales:** lixiviación de contaminantes o de altas concentraciones de fosfato y nitrato.
- **Sanitarios:** exposición a las aguas residuales (agricultor), contaminación microbiológica o intoxicación por ingesta de alimentos (consumidor).
- **Económicos:** altos costos de mantenimiento y de control.



Fuente: hortalizas.com



Fuente: UAM



Fuente: Bosch et al., 200)



Fuente: H2M architects + engineers

5. Identificar los riesgos y las responsabilidades



Es difícil definir quién es el responsable ante un disfuncionamiento del sistema, sin embargo es una etapa clave para establecer el plan de acción en caso de que exista un problema.



Se han hecho esfuerzos para caracterizar y evaluar los diferentes riesgos antes mencionados (investigación, reportes de agencias responsables de la salud, casos de estudio).



Lo esencial es prevenir, mediante la definición de responsabilidades y el establecimiento de protocolos de seguridad.



Definición de roles : Ante estos riesgos... quién es el responsable de qué?



Instituciones de sanidad

Establecer medidas de seguridad para agricultores (uso de material como guantes, trajes), consumidores (lavado de alimentos crudos) y publico en general (fijar perímetros y señalización)



Organismo operador de la EDAR Realizar muestreos (en función de la reglamentación y de las recomendaciones adoptadas para el proyecto)



Agricultores, consumidores, publico Adoptar las medidas de seguridad

Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. Determinar la oferta y la demanda
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

6. Establecer mecanismos de cooperación



- Asesoría
- Planeación
- Estudios / análisis
- Logística
- Gestión (no siempre)
- Diseño / construcción
- Inversión



- Sensibilización
- Opinión
- Retroalimentación
- Aceptación (costos, cambio de paradigma)

- Regulación
- Control
- Promoción
- Formación
- Inversión

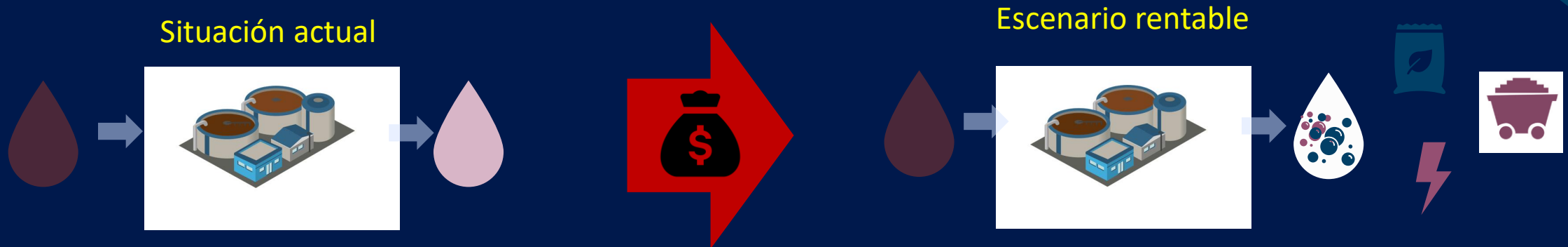
- Gestión
- Implementación
- Reporte
- Inversión (o pago)

Etapas claves para un proyecto de reúso

1. Identificar el motor del proyecto y los objetivos
2. Determinar la oferta y la demanda
3. Identificar los requerimientos que exige la reglamentación en vigor
4. Conciliar la oferta con la demanda (calidad)
5. Identificar los riesgos y las responsabilidades
6. Establecer mecanismos de cooperación
7. Elaborar un plan de financiación (y de rentabilidad)

7. Elaborar un plan de financiación (y evaluar rentabilidad)

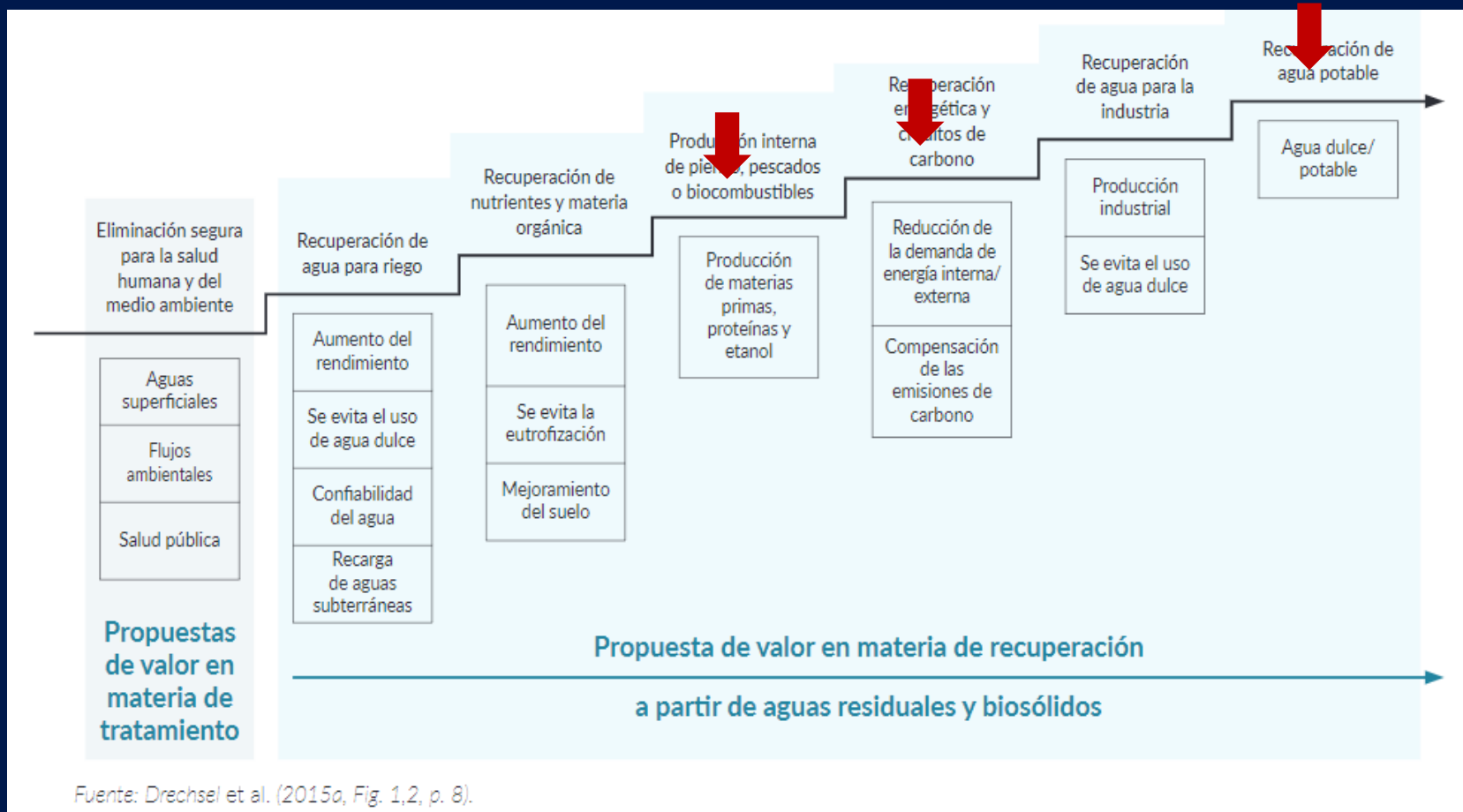
En esta etapa clave, es necesario explorar las diferentes propuestas de **creación de valor** existentes que permitan generar beneficio económico a partir del reúso y con ello asegurar que no se abandone el proyecto (cada vez subvenciones mas limitadas).



En general, a mayor nivel de tratamiento de agua (mejor calidad y recuperación de recursos), la creación de valor también será superior.

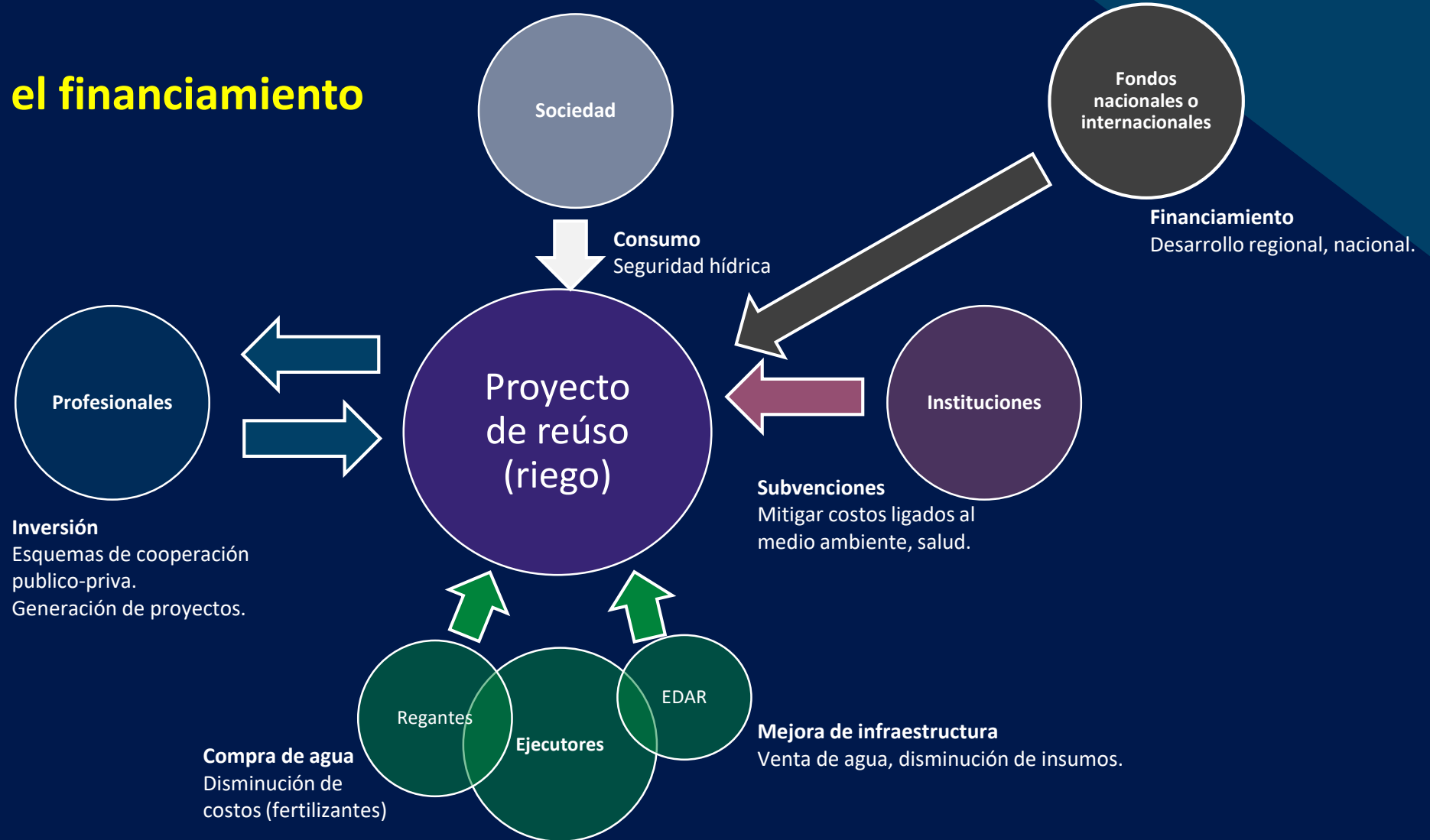
Existen otros factores externos: costo del agua

7. Elaborar un plan de financiación (y evaluar rentabilidad)



7. Elaborar un plan de financiación (y evaluar rentabilidad)

Participación en el financiamiento



7. Elaborar un plan de financiación (y evaluar rentabilidad)

- Normalmente, es difícil que los beneficios obtenidos por el uso de agua regenerada logren por si solos amortiguar los costos de inversión y de operación. Sin embargo, al tomar en cuenta los beneficios no monitorizados (ambientales, sociales), se puede lograr una rentabilidad global.
- Existen diversas metodologías para evaluar y comparar los escenarios de reúso para determinar su viabilidad. Actualmente en Europa se están adoptando con éxito las metodologías de ACB (análisis costo-beneficio) y de ACV (análisis de ciclo de vida).



Ejemplo ACB: Reúso para riego de campo de Golf

- El escenario actual (sin proyecto de reúso) se compara económicamente a otro(s) escenario(s) para determinar cual es mas rentable. Se consideran costos y beneficios monetarios que no sean comunes entre los escenarios, para los involucrados.

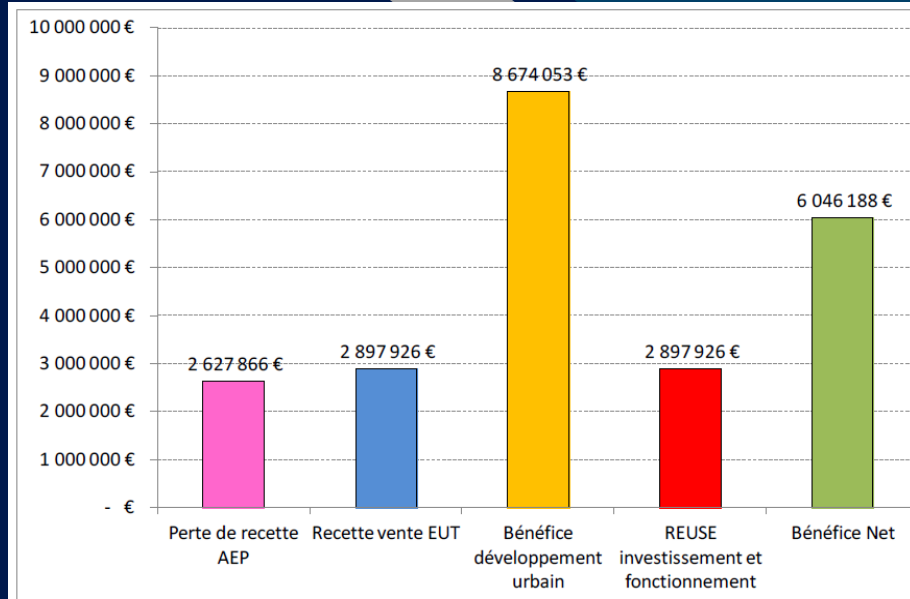


Figure 16: Structure du bénéfice net pour Sainte-Maxime

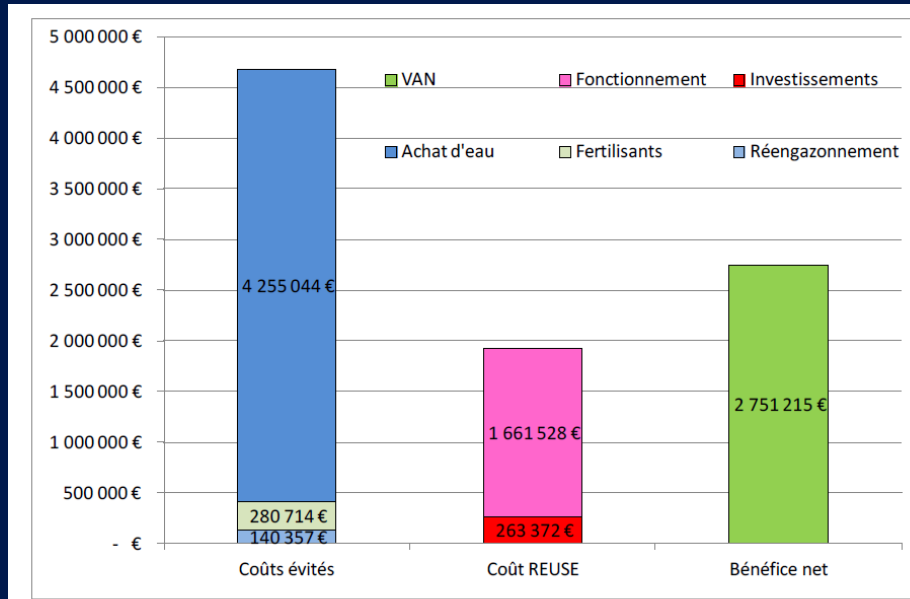
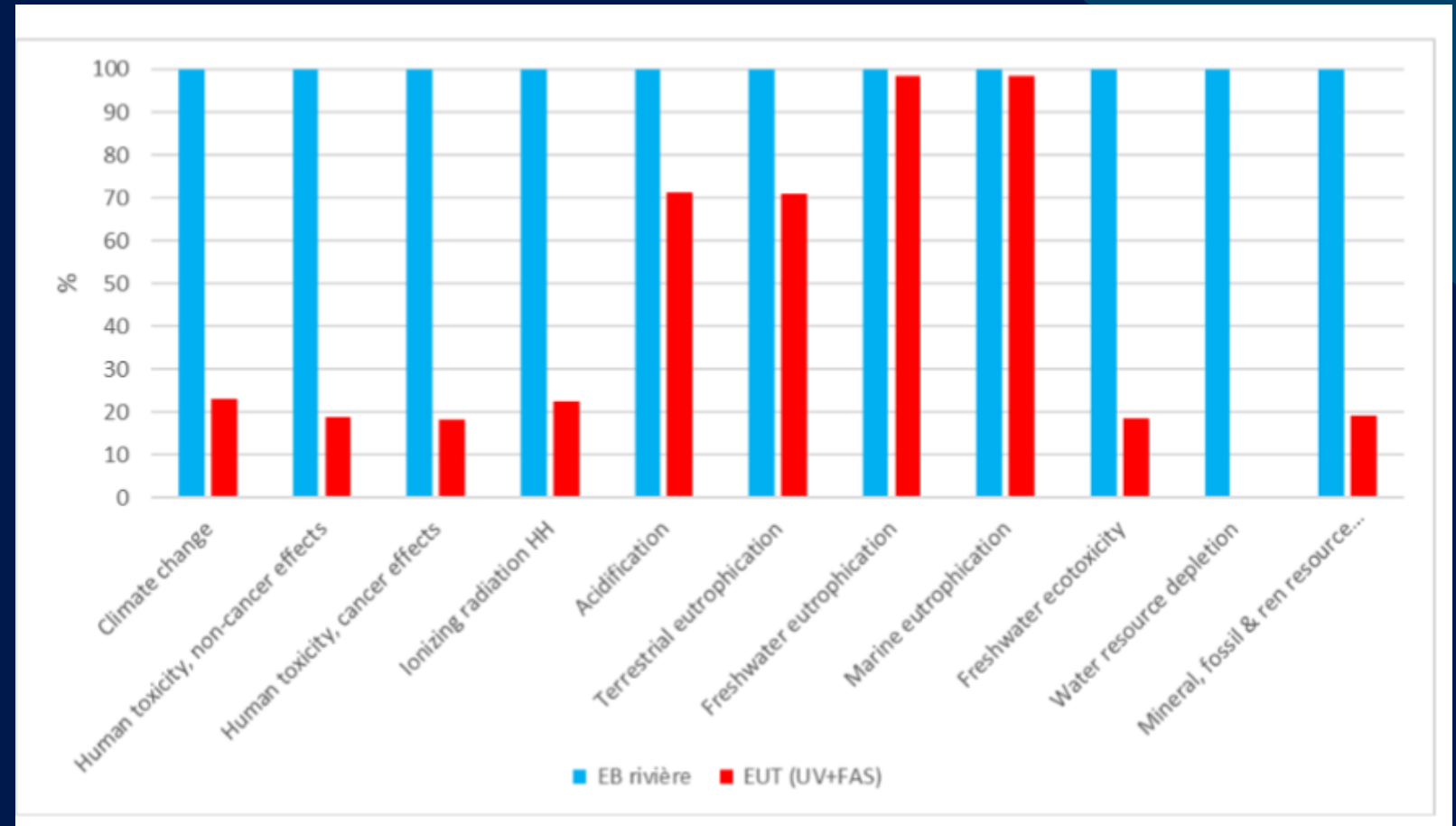


Figure 15: Structure du bénéfice net pour le Golf



Ejemplo de ACV para un proyecto de reuso

Resultados: comparación de escenarios Agua Bruta (Rio) vs Agua Tratada (UV+FAS)



Muchas gracias

Eng. M.Sc. Isaac Arturo Ramos Fuentes
Especialista en irrigación y manejo
integral del agua.

Para citar esta presentación:

Ramos Fuentes, I. A. 2020. **Reúso de aguas residuales para riego: introducción y etapas claves de un proyecto de reúso.** Serie de Seminarios Virtuales 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMEII). México. 33 pp.

Consulta el portal del COMEII y sus redes sociales:
www.comeii.com y www.riego.mx

