

EVALUACIÓN DE VIABILIDAD DEL REÚSO DE AGUA PARA FINES INDUSTRIALES A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

CONTRIBUCIÓN METODOLÓGICA
PARA AMÉRICA DEL SUR



LA INDUSTRIA CREA.
LA INDUSTRIA ES MÁS.

CNI Confederación
Nacional de
la Industria

EVALUACIÓN DE VIABILIDAD DEL REÚSO DE AGUA PARA FINES INDUSTRIALES A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

CONTRIBUCIÓN METODOLÓGICA
PARA AMÉRICA DEL SUR

Acceda a la publicación
mediante el siguiente
código QR



CONFEDERACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA – CNI

Antonio Ricardo Alvarez Alban
Presidente

Dirección de Gobernanza Interna y Externa

Danusa Amorim
Directora

Dirección de Desarrollo Industrial

Jefferson de Oliveira Gomes
Director

Mario Sergio Telles

Director Adjunto

Dirección de Relaciones Institucionales

Roberto de Oliveira Muniz
Director

Dirección Jurídica

Alexandre Vitorino Silva
Director

Dirección Corporativa

Cid Carvalho Vianna
Director

Dirección de Comunicación

André Nascimento Curvello
Director

EVALUACIÓN DE VIABILIDAD DEL REÚSO DE AGUA PARA FINES INDUSTRIALES A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES

CONTRIBUCIÓN METODOLÓGICA
PARA AMÉRICA DEL SUR



**LA INDUSTRIA CREA.
LA INDUSTRIA ES MÁS.**

CNI *Confederación
Nacional de
la Industria*

© 2026. CNI – Confederação Nacional da Indústria.

Cualquier parte de esta obra podrá ser reproducida, siempre y cuando se cite la fuente.

CNI

Superintendencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad

Dados Internacionais da Catalogação na Publicação (CIP)

C748e

Confederação Nacional da Indústria.

Evaluación de viabilidad del reúso de agua para fines industriales a partir de aguas residuales : contribución metodológica para América del Sur / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2026.

99 p. : il.

ISBN 978-85-7957-557-0

1. Reúso de agua 2. Seguridad hídrica 3. Sostenibilidad 4. Industria I. Título.

CDU: 628.1

Elaborado por Alberto Nemoto Yamaguti - Bibliotecário - CRB-1/2396

CNI

Confederação Nacional da Indústria

Sede

Sector Bancario Norte

Cuadra 1 – Bloque C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 – Brasília – DF

<http://www.portaldaindustria.com.br/cni/>

Servicio de Atención al Cliente - SAC

Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992

sac@cni.com.br

LISTA DE ACRÓNIMOS

Sigla	Significado
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Proceso de Jerarquía Analítica)
ANA	Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (Brasil)
BHCC	Balance Hídrico Cualicuantitativo (originalmente BQQ “Balanço Hídrico Qualiquantativo”)
BI	<i>Business Intelligence</i> (Inteligencia de Negocios)
Capex	<i>Capital Expenditures</i> (Costos de Inversión)
CIRRA-USP	Centro Internacional de Referencia en Reúso de Agua de la Universidad de São Paulo (Brasil)
CNAE	Clasificación Nacional de Actividades Económicas (Brasil). (CIIU; Clasificación Industrial Internacional Uniforme, es el estándar en los países suramericanos)
C_{NP}	Coeficiente de demanda no potable
CNI	Confederación Nacional de Industria (Brasil)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FAS	Filtro Aireado Sumergido
FBP	Filtro Biológico Percolador
IAR	Índice de Aptitud de Reúso
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MBR	<i>Membrane Bioreactor</i> (Biorreactor de membranas)
MCIDADES	Ministerio de las Ciudades (Brasil)
MMAD	Modelo Multicriterio de Apoyo a la Decisión
OI	Ósmosis Inversa (originalmente OR “Osmose Reversa”)
Opex	<i>Operational Expenditures</i> (Costos Operativos)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (originalmente ETE “Estação de Tratamento de Esgotos”)
PTR	Planta de Tratamiento para Reúso (originalmente EPAR “Estação Produtora de Água de Reúso”)
Q_{afl}	Caudal afluente
Q_{PTAR}	Caudal de referencia de las plantas de tratamiento (originalmente Q_{ETE} “Vazão de referência das ETEs”)
Q_{NP}	Caudal no potable
Q_{con}	Caudal otorgado o concesionado (originalmente Q_{out} “Vazão outorgada”)
Q_{proy}	Caudal de proyecto o caudal de diseño (originalmente Q_{proj} “Vazão de projeto”)
RNPD	Reúso No Potable Directo
SINISA	Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento Básico (Brasil)
SNIRH	Sistema Nacional de Información sobre Recursos Hídricos (Brasil)
SST	Sólidos Suspendidos Totales
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (Reactor anaerobio de flujo ascendente)
USP	Universidad de São Paulo (Brasil)
VAB	Valor Agregado Bruto
VPN	Valor Presente Neto (originalmente VPL “Valor Presente Líquido”)
ΣQ_{con}	Sumatoria de los caudales otorgados o concesionados (originalmente ΣQ_{out} “Somatório das vazões outorgadas”)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resumen gráfico de los estudios de reúso industrial de la CNI	17
Figura 2 – Estados y regiones contemplados por los estudios y el reúso de la CNI.....	18
Figura 3 – Línea temporal de los principales cambios metodológicos realizados a lo largo del desarrollo de los estudios, de 2017 a 2025.....	19
Figura 4 – Índice de Riesgo Hídrico (Water Risk Index) para América del Sur	21
Figura 5 – Índice de tratamiento de aguas residuales por país.....	22
Figura 6 – Modalidades de reúso según tipo de uso (no potable y potable) y configuración (directa o indirecta).....	23
Figura 7 – Configuración esquemática de Reúso No Potable Directo (RNPD) para fines industriales.....	25
Figura 8 – Mapa con experiencias de reúso industrial en el mundo	33
Figura 9 – Ilustración de los procesos de tratamiento aplicados para la producción de agua de reúso no potable directo según diferentes experiencias mundiales	34
Figura 10 – Ubicación de experiencias de reúso industrial brasileñas.....	35
Figura 11 – Método PTAR-usuario: diagrama de flujo metodológico	38
Figura 12 – Ejemplo de aplicación del método PTAR-usuario para el caso de la PTAR Nova São Miguel, en São Miguel dos Campos	43
Figura 13 – Ejemplo o Referencia de los grupos de clasificación de las PTAR según su potencial de reúso ..	45
Figura 14 – IAR: diagrama de flujo metodológico	47
Figura 15 – Estructura del modelo del Índice de Aptitud de Reúso (IAR)	49
Figura 16 – Representación gráfica de las prioridades de los Criterios (Nivel 1) del modelo IAR	51
Figura 17 – Comparación entre capas vectoriales y ráster de balance hídrico por microcuenca hidrográfica..	53
Figura 18 – Diagrama de flujo para la determinación del Q_{PTAR} (caudal de referencia) de las PTAR.....	59
Figura 19 – Superposición de PTAR, concesiones y radio de 10 km alrededor de las PTAR – estado de Alagoas.....	63
Figura 20 – PTAR según potencial de reúso y grupo – estado de Alagoas	65
Figura 21 – Índice de Aptitud de Reúso (IAR). Valores normalizados de los criterios C1 a C4 – estado de Alagoas.....	68
Figura 22 – Clasificación de los valores de IAR y áreas resultantes – estado de Alagoas	69
Figura 23 – Resultados de IAR – Clasificación por grupo – estado de Alagoas	69
Figura 24 – Estudio de caso #1: PTAR Teotônio Vilela, en Teotônio Vilela, Alagoas	71
Figura 25 – Estudio de caso #2: Polo Industrial José Aprígio Vilela, en Marechal Deodoro, Alagoas	73
Figura 26 – Captura de pantalla de la plataforma de BI elaborada para los estados de Rio Grande do Sul y Alagoas	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Enlaces de acceso a los estudios de reúso de la CNI	18
Tabla 2 – Coeficiente de demanda no potable (C_{NP}) por divisiones (1 a 43) de la CNAE 2.0	26
Tabla 3 – Usos industriales comunes de agua de reúso y requisitos de calidad	27
Tabla 4 – Referencia de estándar de calidad para uso en sistemas de enfriamiento industrial	28
Tabla 5 – Referencia de estándar de calidad para uso en calderas según la presión de operación	29
Tabla 6 – Referencias de compilación de estándares de calidad de agua de reúso previstos en referencias nacionales	30
Tabla 7 – Compilación de experiencias de reúso industrial en el mundo	31
Tabla 8 – Clasificación de las PTAR según su potencial de reúso	44
Tabla 9 – Detalles sobre los criterios y subcriterios que componen el IAR	49
Tabla 10 – Matriz de importancia de los criterios – Nivel 1 – Criterios	50
Tabla 11 – Matriz de importancia de los criterios – Nivel 2 – Subcriterios	50
Tabla 12 – Clasificación de los valores de IAR	52
Tabla 13 – Bases de datos utilizadas en los estudios	55
Tabla 14 – Secciones y divisiones CNAE 2.0 contempladas en los estudios	57
Tabla 15 – Estructura CNAE para la División 10, Grupo 101	57
Tabla 16 – Agrupamiento de procesos de tratamiento de las PTAR	60
Tabla 17 – PTAR clasificadas según el grupo de potencial de reúso – estado de Alagoas	64
Tabla 18 – Clasificación de los valores de IAR y áreas resultantes – estado de Alagoas	68
Tabla 19 – Evaluación del IAR por Región de Planificación – estado de Alagoas	70
Tabla 20 – Estudio de Caso #1 – PTAR Teotônio Vilela. Estimaciones de CAPEX, OPEX y costos unitarios	72
Tabla 21 – Estudio de Caso #2 – Polo Industrial José Aprício Vilela. Estimaciones de CAPEX, OPEX y costos unitarios	74
Tabla 22 – Tipos de concesiones según el concedente	87
Tabla 23 – Intensidad de importancia en la comparación por pares	91
Tabla 24 – Matriz de importancia por pares – Nivel 1 – Criterios	92
Tabla 25 – Matriz de importancia por pares – Nivel 2 – Subcriterios	92
Tabla 26 – Pesos finales – Nivel 1 – Criterios	93
Tabla 27 – Pesos finales – Nivel 2 – Subcriterios	93
Tabla 28 – Normalización de los valores de los criterios – Nivel 1	93
Tabla 29 – Normalización de los valores de los subcriterios – Nivel 2	94
Tabla 30 – Síntesis de métodos, fuentes de datos y funciones para la estimación de costos – valores en BRL actualizados a enero de 2025 con base en índices financieros brasileños	98

RESUMEN

PRESENTACIÓN	11
RESUMEN EJECUTIVO	12
1 ANTECEDENTES	15
1.1 Alcance y objetivo de este documento	15
1.2 Contenido e histórico de los estudios.....	15
2 INTRODUCCIÓN.....	21
2.1 Escasez hídrica, saneamiento básico y la urgencia de fuentes alternativas de agua en América del Sur	21
2.2 Conceptualización del reúso	23
2.3 Especificidades del reúso industrial	25
2.3.1 Usos de agua susceptibles de suministro mediante agua de reúso no potable	25
2.3.2 Estándares de calidad del agua	27
2.3.3 Experiencias consolidadas y tecnologías para la producción de agua de reúso no potable.....	31
2.4 Detalles sobre algunas experiencias brasileñas de reúso industrial.....	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Oportunidades de reúso por PTAR-usuario	37
3.1.1 Articulación inicial y solicitud de datos	39
3.1.1.1 Realización de reuniones presenciales.....	39
3.1.1.2 Solicitud de bases de datos	39
3.1.2 Procesamiento y preparación de datos.....	40
3.1.2.1 Verificación de consistencia	40
3.1.2.2 Procesamiento de datos	40
3.1.3 Análisis en entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica)	41
3.1.3.1 Verificaciones en entorno SIG.....	41
3.1.3.2 Análisis geoespaciales	42
3.1.4 Tratamiento e interpretación de los resultados	44
3.2 Oportunidades de reúso mediante el Índice de Aptitud de Reúso (IAR)	46
3.2.1 Estructuración del modelo y levantamiento de datos.....	48
3.2.2 Cálculo del IAR en entorno SIG y creación de mapas	52
3.2.3 Interpretación de los resultados y directrices de planificación	53
3.3 Tópicos específicos sobre datos e interpretación de resultados.....	54
3.3.1 Fuentes de datos.....	54
3.3.2 Demandas industriales de agua.....	55
3.3.2.1 Uso de derechos de captación para la caracterización de las demandas industriales	55
3.3.2.2 Cálculo del caudal medio demandado	56
3.3.2.3 Asignación de actividad económica	57

3.3.3 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)	58
3.3.3.1 Caudal de referencia de la PTAR (Q_{PTAR})	58
3.3.3.2 Agrupamiento de los procesos de tratamiento	59
4 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	63
4.1 Oportunidades de reúso mediante el modelo PTAR-usuario	63
4.1.1 Región Metropolitana de Maceió.....	65
4.1.2 Región de Tabuleiros do Sul	67
4.2 Oportunidades de reúso mediante el Índice de Aptitud de Reúso (IAR)	67
4.3 Estudios de caso	71
4.3.1 Estudio de caso #1 – PTAR Teotônio Vilela, Alagoas – PTAR Grupo B.....	71
4.3.2 Estudio de caso #2 – Polo Industrial José Aprígio Vilela – PTAR proyectada	72
4.4 Plataformas de <i>Business Intelligence</i> (BI) y disponibilidad proactiva de datos.....	75
5 CONSIDERACIONES FINALES, DESARROLLOS Y DESAFÍOS	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
GLOSARIO DE TERMINOLOGÍA BRASILEÑAS	87
ANEXO A – MODELO DEL ÍNDICE DE APTITUD DE REÚSO (IAR) – ASPECTOS METODOLÓGICOS COMPLEMENTARIOS	91
ANEXO B – FORMATOS DE SOLICITUD DE DATOS	95
ANEXO C – PARÁMETROS PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS	98

PRESENTACIÓN

El reúso de aguas residuales tratadas – medida ambientalmente adecuada para la gestión de los recursos hídricos – tiene el doble propósito de elevar la seguridad del sector industrial y apoyar la necesaria adaptación de los procesos productivos al cambio climático.

Desarrollado por la Confederación Nacional de la Industria (CNI), el estudio “Metodologías para el Reúso de Aguas Residuales Tratadas en América del Sur” tiene el objetivo de fomentar prácticas sostenibles y eficientes en la utilización del agua para fines industriales, con base en el reúso de aguas residuales domésticas tratadas.

Esta publicación consolida los principales resultados de una serie de estudios realizados entre 2017 y 2025 en nueve Estados brasileños y en la Región Metropolitana de São Paulo.

A partir de estos análisis, se construyeron dos enfoques metodológicos complementarios: el método PTAR-Usuario y el Índice de Aptitud al Reúso (IAR). Ambos ofrecen instrumentos analíticos y operativos para planificadores, empresas de saneamiento, gestores de recursos hídricos y representantes de la industria.

El método PTAR-Usuario, basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), identifica oportunidades de reúso no potable directo al analizar la oferta de aguas residuales tratadas y la demanda industrial en un radio de 10 km. Por su parte, el IAR, fundamentado en el modelo multicriterio “*Analytic Hierarchy Process*” (AHP), evalúa la aptitud territorial para el reúso considerando factores como la demanda industrial, el Valor Agregado Bruto (VAB), la generación de aguas residuales y el balance hídrico.

Las metodologías presentadas no solo orientan la implementación de proyectos específicos, sino que también apoyan la planificación territorial y la formulación de políticas públicas, contribuyendo a la seguridad hídrica, la innovación tecnológica y la competitividad de la industria.

El documento aborda la viabilidad técnica y económica del reúso industrial, destacando rutas tecnológicas, estimaciones de costos y la importancia de la calidad de los datos. Al tratar aspectos institucionales y regulatorios, también presenta recomendaciones para la replicación de los métodos en otros países de América del Sur.

La CNI espera que este material represente una contribución significativa para el avance de la gestión sostenible de los recursos hídricos, promoviendo la seguridad hídrica y la competitividad industrial.

¡Buena lectura!

Antonio Ricardo Alvarez Alban
Presidente de la CNI

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio **“Metodologías para el Reúso de Aguas Residuales Tratadas en América del Sur”** consolida las principales contribuciones de la Confederación Nacional de la Industria (CNI) en la promoción del reúso de agua para fines industriales a partir de aguas residuales domésticas tratadas. La publicación reúne metodologías, análisis y resultados técnicos que apoyan a gobiernos, empresas e instituciones en la ampliación del reúso no potable directo en la región.

El objetivo es identificar, priorizar y cuantificar oportunidades de reúso a partir de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) municipales, ofreciendo instrumentos analíticos y operativos para planificadores, empresas de saneamiento, gestores de recursos hídricos y representantes del sector empresarial y productivo.

Entre 2017 y 2025, la CNI coordinó diez estudios aplicados en nueve estados brasileños y en la Región Metropolitana de São Paulo. Estos trabajos dieron como resultado dos enfoques metodológicos complementarios: el método PTAR-Usuario y el Índice de Aptitud de Reúso (IAR).

El método PTAR-Usuario, desarrollado en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), evalúa la oferta de agua residual tratada y la demanda industrial cercana, clasificando las PTAR en cuatro grupos según su potencial de aprovechamiento. El IAR utiliza un modelo multicriterio de apoyo a la decisión (*Analytic Hierarchy Process* – AHP), integrando variables como la demanda industrial, el Valor Agregado Bruto (VAB), la generación de aguas residuales y el balance hídrico.

La integración de estas metodologías permite un diagnóstico rápido de áreas prioritarias y el direccionamiento de estudios detallados de ingeniería y viabilidad económica, optimizando la planificación de proyectos de reúso industrial.

Viabilidad técnica y económica

Los análisis conducidos por la CNI indican que las mayores oportunidades para el reúso industrial se concentran en áreas metropolitanas y polos industriales, donde existe una convergencia entre la oferta de aguas residuales tratadas, una demanda significativa de agua y condiciones de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico.

Los resultados muestran que, según la configuración tecnológica y la proximidad entre productor y consumidor, los costos unitarios de reúso pueden ser competitivos. Las rutas tecnológicas evaluadas incluyen combinaciones de tratamiento secundario avanzado con procesos de microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección, de acuerdo con

los requerimientos del uso, como los criterios de calidad que se requieran acorde al usuario receptor industrial.

La confiabilidad de los análisis depende estrechamente de la calidad y disponibilidad de los datos operativos. Por ello, la CNI desarrolló modelos estandarizados de plantillas y solicitudes de información, además de plataformas interactivas de *Business Intelligence* (BI), que permiten el acceso dinámico a datos sobre PTAR, concesiones y oportunidades de reúso.

Aspectos Institucionales y Replicación Regional

La difusión del reúso industrial requiere arreglos de gobernanza claros, normas de calidad del agua para usos industriales, agrícolas, entre otros e instrumentos de incentivo. En Brasil, las normas de los estados y la Resolución CNRH n° 54/2005 orientan el reúso no potable, y las experiencias internacionales muestran diversos caminos de monitoreo y control de calidad.

La experiencia brasileña permite recomendar prácticas para la replicación de las metodologías en otros países de América del Sur, incluyendo:

1. Diagnóstico de la disponibilidad y calidad de los datos;
2. Aplicación piloto del método PTAR-Usuario;
3. Adaptación del IAR a las realidades locales;
4. Establecimiento de acuerdos técnicos y cooperación interinstitucional;
5. Desarrollo de proyectos demostrativos para testar modelos de gobernanza y aceptación social.

Conclusión

Las metodologías desarrolladas por la CNI asocian el análisis técnico y territorial, ofreciendo una base sólida para identificar, priorizar y viabilizar proyectos de reúso industrial.

La adopción de estas prácticas depende de datos confiables, capacitación técnica, estandarización de procesos y cooperación entre la industria, los operadores y las autoridades públicas.

Con este trabajo, la CNI reafirma su compromiso con el uso eficiente del agua, la innovación tecnológica y la competitividad de la industria, contribuyendo a la seguridad hídrica y al desarrollo sostenible de América del Sur.

Roberto Muniz

Director de Relaciones Institucionales de la CNI



1 ANTECEDENTES

1.1 ALCANCE Y OBJETIVO DE ESTE DOCUMENTO

El objetivo de este documento es consolidar y difundir, para los países de América del Sur, los conocimientos adquiridos por la Confederación Nacional de la Industria de Brasil (CNI) a partir de diez estudios sobre el potencial de reúso no potable para la industria, realizados entre 2017 y 2025.

Estos estudios fueron desarrollados por la CNI en colaboración con actores locales, como las Federaciones de la in, empresas de saneamiento y organismos públicos de medio ambiente y recursos hídricos. Así, además del desarrollo técnico de los estudios, hubo una necesidad constante de articulación con estos actores, tanto para las etapas preliminares de recopilación de datos como para favorecer futuros desarrollos de los resultados obtenidos.

El tema del reúso industrial involucra diversos y diferentes aspectos relacionados con el tratamiento de aguas residuales (efluentes), el abastecimiento de agua, las especificidades de los procesos industriales y la gestión de los recursos hídricos, siendo imprescindible una fuerte articulación entre los actores involucrados, ya sea en la elaboración de estudios como estos estratégicos o en la materialización de las oportunidades identificadas.

1.2 CONTENIDO E HISTÓRICO DE LOS ESTUDIOS

Los estudios de reúso de la CNI se iniciaron en 2017, a partir de una indagación por parte de la CNI: ¿cuáles son las oportunidades de reúso a partir de las PTAR municipales, considerando la existencia de industrias próximas que pueden ser potenciales usuarias de agua de reúso?

En el ámbito del saneamiento básico, es bien sabido que el transporte de agua es uno de los principales costos de inversión y de operación de los sistemas de abastecimiento, lo que también se aplica en el caso del reúso. Un usuario significativo, pero muy alejado del punto de producción, implica elevados costos de conducción, lo que puede hacer inviable la iniciativa, tanto por las inversiones en obras lineales como por los costos de energía eléctrica y operación. Por otra parte, múltiples usuarios de bajo caudal cercanos a una PTAR requieren una red de distribución demasiado dispersa, lo que también reduce la viabilidad.

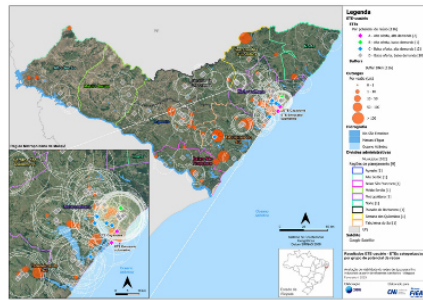
Con el fin de estudiar el potencial de reúso en los diversos estados brasileños, se llevaron a cabo estudios utilizando tres enfoques principales, que se analizarán en detalle en este documento, siendo estos:

- **Potencial de reúso por PTAR – modelo PTAR -usuario.** Evaluación del potencial de reúso a partir de todas las PTAR del estado, independientemente de su capacidad y proceso de tratamiento. Se consideran los usuarios industriales cercanos a cada una de las estaciones, caracterizados por su demanda de agua, tipo de actividad industrial y ubicación. Las PTAR se clasifican en grupos de potencial de reúso, con el fin de facilitar la interpretación de los resultados.
- **Potencial de reúso por área – Índice de Aptitud de Reúso (IAR).** Uso de un modelo de apoyo para la toma de decisiones formado por múltiples criterios y que devuelve un valor de IAR para cada área analizada. Las áreas con mayor IAR tienen un mayor potencial de reúso en comparación con las demás. El modelo contempla criterios y subcriterios considerados importantes para la viabilidad de los esquemas de reúso. Como resultado, todo el estado se clasifica según su IAR, lo que permite identificar las áreas que presentan una mayor superposición entre los factores favorables al reúso.
- **Estudios de caso.** Detalle de los casos elegidos para ejemplificar posibles acuerdos de reúso, incluyendo estimaciones de los costos de tratamiento, almacenamiento y distribución del agua de reúso y estimación del coste unitario.

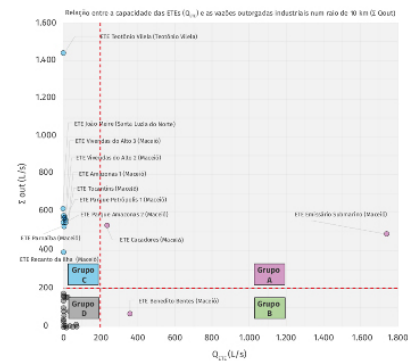
La Figura 1 ilustra gráficamente estos enfoques.

FIGURA 1 – Resumen gráfico de los estudios de reúso industrial de la CNI**PTAR-usuario**

Oportunidades de reúso por PTAR, con base en los usuarios industriales cercanos y sus características.



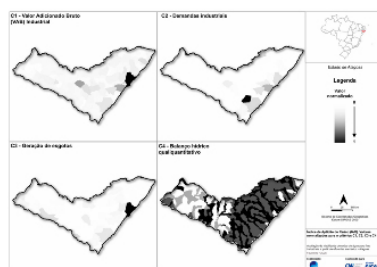
Caracterización de las PTAR y usuarios industriales. Evaluación de las industrias dentro de un radio de 10 km alrededor de cada PTAR.



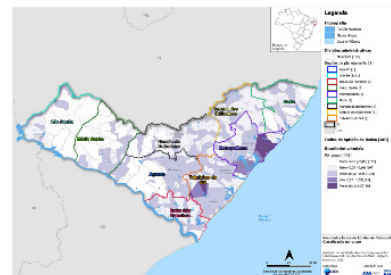
Clasificación de las PTAR de acuerdo con grupos de potencial de reúso.

Índice de Aptitud de Reúso (IAR)

Evaluación multicriterio de potencial de reúso, con clasificación de las áreas de la región de estudio según su potencial de reúso.



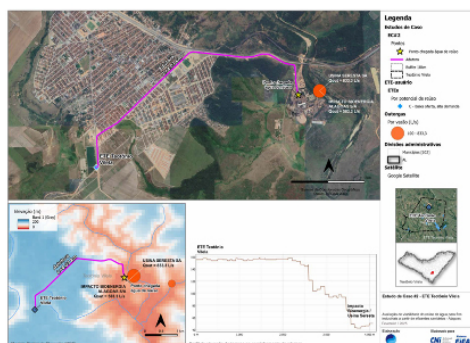
Uso del Método Multicriterio de Apoyo a la Decisión (MMAD) para la estructuración del Índice de Aptitud de Reúso (IAR).



Clasificación del territorio del estado según el valor de IAR resultante.

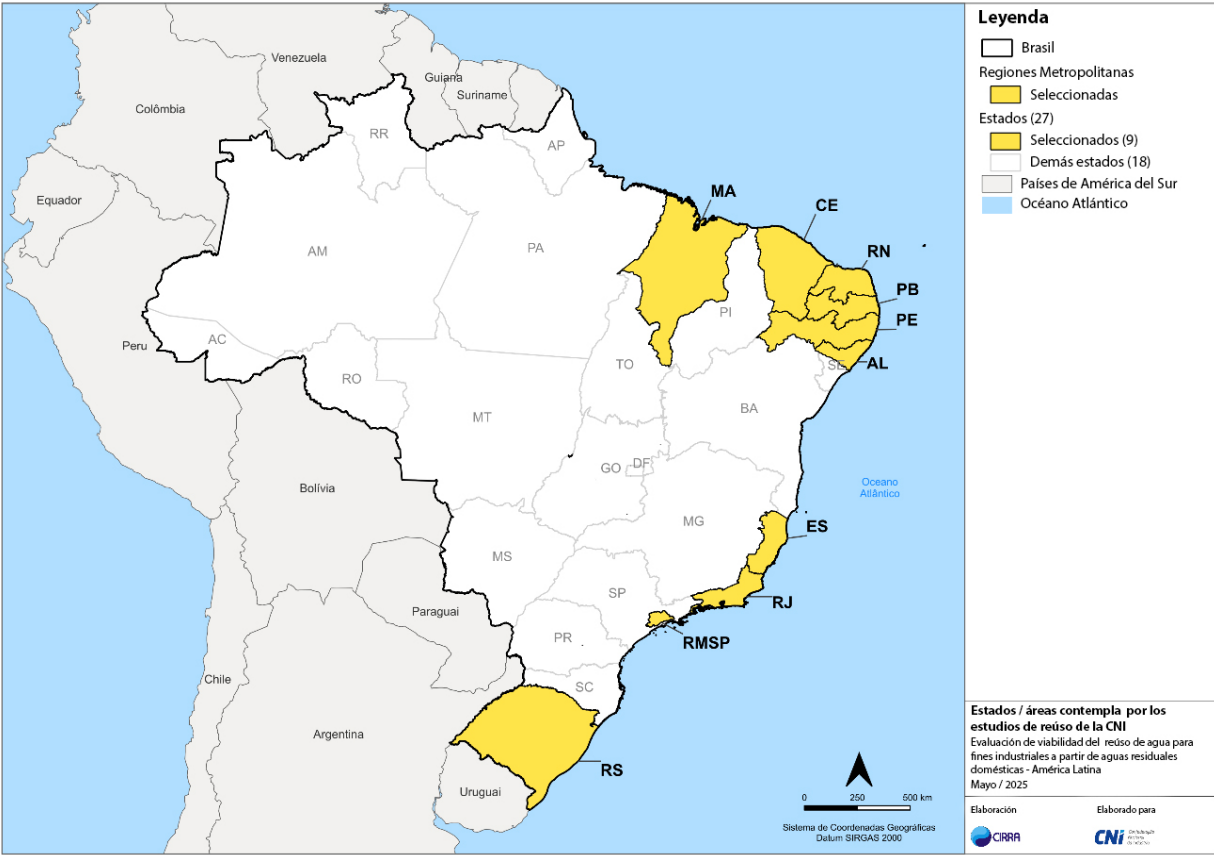
Estudios de caso

Estudios de caso seleccionados con base en los resultados por PTAR y por área. Propuesta de tratamiento para la producción de agua de reúso, transporte hasta el usuario (bombeo/impulsión) y estimaciones de costos (Capex y Opex).



Hasta 2025, se contemplaron nueve estados brasileños y la Región Metropolitana de São Paulo, el mayor conglomerado urbano de América del Sur, indicados en la Figura 2.

FIGURA 2 – Estados y regiones contemplados por los estudios y el reúso de la CNI



Fuente: elaboración propia.

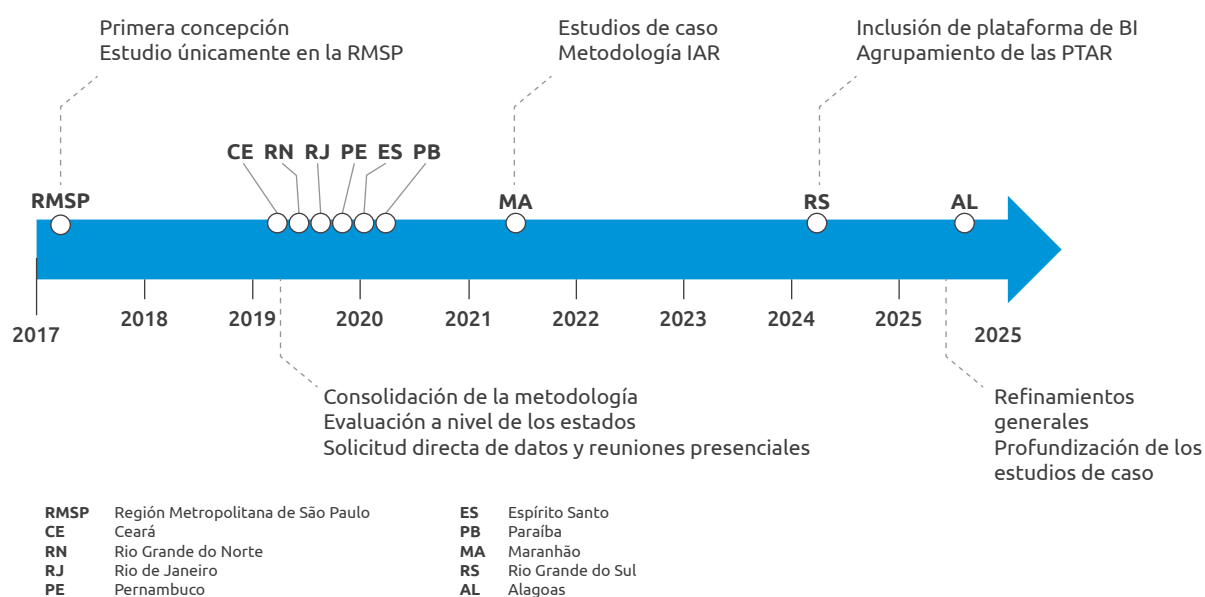
Los enlaces de acceso a las versiones digitales de cada uno de los estudios figuran en la Tabla 1 a continuación.

TABLA 1 – Enlaces de acceso a los estudios de reúso de la CNI

Año	Área estudiada	Acceso
2017	Región Metropolitana de São Paulo (RMSP)	Enlace de acceso - RMSP
2019	Ceará (CE)	Enlace de acceso - CE
	Rio Grande do Norte (RN)	Enlace de acceso - RN
	Rio de Janeiro (RJ)	Enlace de acceso - RJ
	Pernambuco (PE)	Enlace de acceso - PE
	Espírito Santo (ES)	Enlace de acceso - ES
2020	Paraíba (PB)	Enlace de acceso - PB
2021	Maranhão (MA)	Enlace de acceso - MA
2024	Rio Grande do Sul (RS)	Enlace de acceso - RS
2025	Alagoas (AL)	Enlace de acceso - AL

Los estudios se iniciaron en 2017 y, a lo largo del tiempo, se realizaron diversos cambios y mejoras, derivados del propio proceso de elaboración. Los principales fueron la inclusión del IAR y de los estudios de caso, así como mejoras puntuales realizadas entre cada una de las ediciones. La Figura 3 muestra una línea temporal del desarrollo de los trabajos, destacando los cambios realizados.

FIGURA 3 – Línea temporal de los principales cambios metodológicos realizados a lo largo del desarrollo de los estudios, de 2017 a 2025



Fuente: elaboración propia.



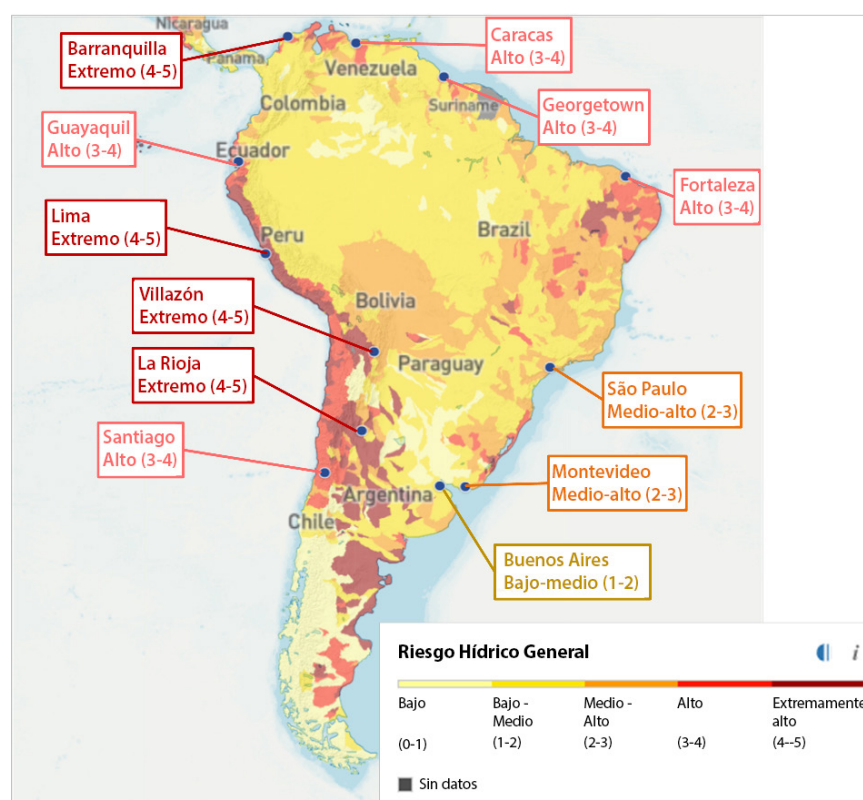
2 INTRODUCCIÓN

2.1 ESCASEZ HÍDRICA, SANEAMIENTO BÁSICO Y LA URGENCIA DE FUENTES ALTERNATIVAS DE AGUA EN AMÉRICA DEL SUR

El agravamiento de la crisis hídrica es una realidad mundial incuestionable, con implicaciones diferentes en cada región del planeta. América del Sur, a pesar de albergar cuencas hidrográficas como las de los ríos Amazonas y de la Plata, así como los sistemas acuíferos Guaraní y Grande Amazonía, posee innumerables regiones afectadas por problemas de escasez hídrica, dado que el patrón de uso y ocupación del suelo no coincide con la distribución espacial de la disponibilidad hídrica natural.

Diversas regiones, altamente pobladas y localizadas en las costas de los océanos Atlántico y Pacífico, viven en estado de escasez hídrica crónica. La Figura 4 muestra el Índice de Riesgo Hídrico [Water Risk Index \(WRI\)](#) (*Índice de Riesgo Hídrico*) para América del Sur, destacando diferentes áreas a lo largo del subcontinente que presentan distintos grados de riesgo hídrico, principalmente los de riesgo alto, muy alto y extremo.

FIGURA 4 – Índice de Riesgo Hídrico (Water Risk Index) para América del Sur

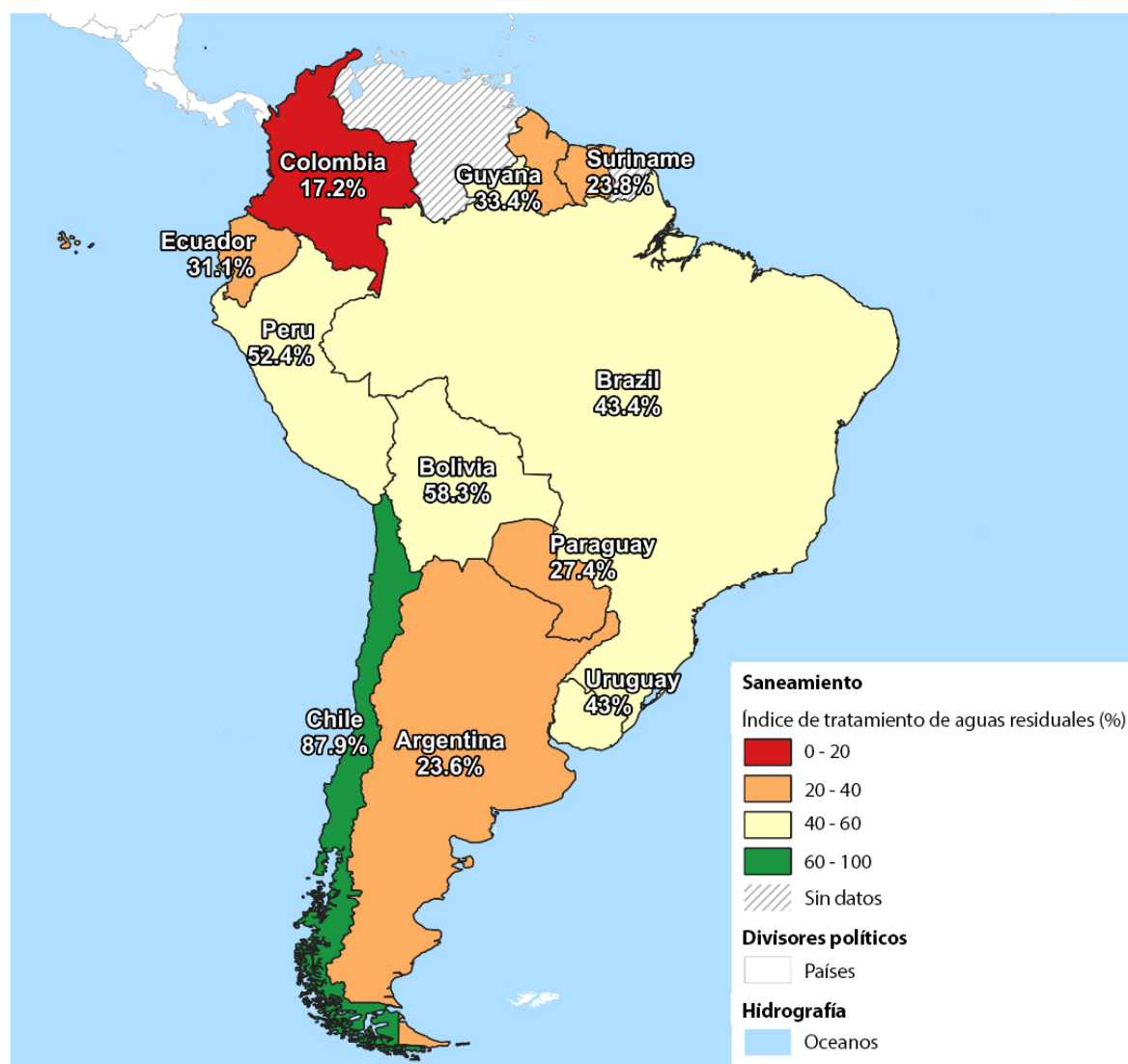


Fuente: adaptado de AQUEDUCT (2025). Elaboración propia.

El WRI es un indicador que agrega riesgos físicos cuantitativos (estrés hídrico, riesgo de sequías y reducción de la disponibilidad natural, entre otros), físico-cualitativos (aguas residuales no tratadas y potencial de eutrofización) y regulatorios y reputacionales (acceso a agua potable, conexión a la red de alcantarillado y ausencia de estructuras de tratamiento).

Otra realidad de la región es el estado aún incipiente del tratamiento de aguas residuales (efluentes sanitarios). [Datos más recientes de UN-Water](#)¹ relativos al Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS6 – Agua Potable y Saneamiento) presentan índices de tratamiento cercanos al 40% en los países sudamericanos, lo que indica la necesidad de inversiones masivas en la implantación de redes de recolección y sistemas de tratamiento, como se muestra en la Figura 5.

FIGURA 5 – Índice de tratamiento de aguas residuales por país



Fuente: datos de BID (2020); UN-Water (2025). Elaboración propia.

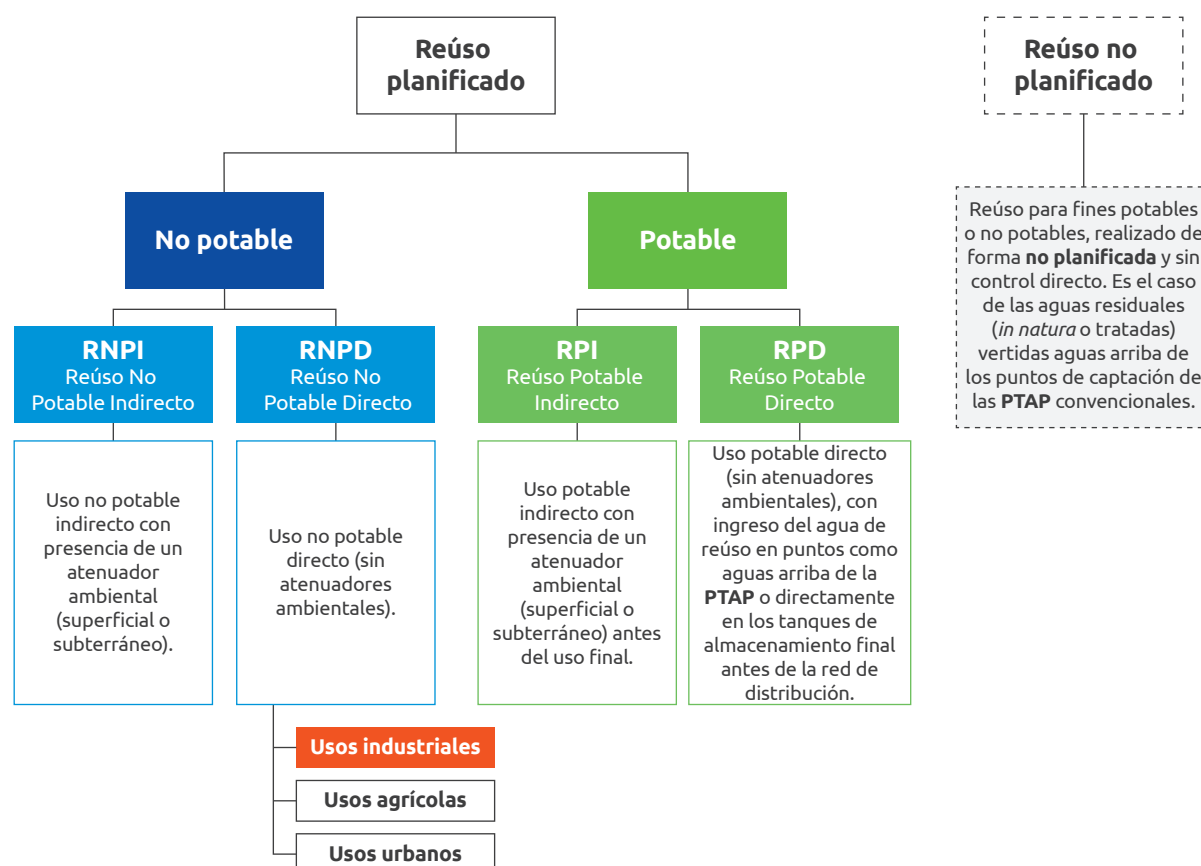
1 UN-Water: Organización de las Naciones Unidas para el Agua

La conjunción entre el alto riesgo hídrico y la necesidad de expansión de la infraestructura de saneamiento básico (alcantarillado) crea una condición favorable para la búsqueda de fuentes alternativas de agua, entre las cuales se encuentra el reúso. El uso de aguas residuales tratadas no solo garantiza una mayor seguridad hídrica al sector productivo, sino que también reduce la presión sobre las fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas actualmente utilizadas, aumentando la disponibilidad para el suministro de los demás usos, principalmente el consumo humano.

2.2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL REÚSO

Aunque existen variaciones en la definición de lo que es el reúso, en general se entiende como la utilización de agua regenerada (o recuperada) a partir de aguas residuales para el suministro de demandas múltiples, desde usos no potables, como la industria y el riego, hasta usos potables para consumo humano. Una manera conveniente y comúnmente utilizada para categorizar los tipos de reúso tiene en cuenta el tipo de uso final (potable o no potable) y la configuración (directa o indirecta), como ilustra la Figura 6.

FIGURA 6 – Modalidades de reúso según tipo de uso (no potable y potable) y configuración (directa o indirecta)



Fuente: adaptado de Fukasawa (2021). Elaboración propia.

Según el tipo de uso:

- **No potable:** Uso de agua regenerada para cubrir demandas no potables, como usos industriales (reposición en sistemas de enfriamiento, generación de vapor en calderas, lavado, preparación de soluciones), riego agrícola y usos urbanos (limpieza de vías, desobstrucción de alcantarillado pluvial, riego paisajístico). Corresponde a prácticamente la totalidad de los usos de agua de reúso en el mundo.
- **Potable:** Uso de agua regenerada para fines potables (consumo humano). Existen pocas experiencias de este tipo en el mundo, como algunas en Namibia (Windhoek) y EE. UU. (Orange County y Big Spring). Aún existe poca regulación sobre este tipo de reúso, siendo las principales barreras para su difusión la comprensión más profunda de los efectos de los denominados Contaminantes de Interés Emergente (CIE), así como temas ligados a la aceptación pública de la práctica del reúso potable.

Según la configuración:

- **Directo:** El agua de reúso se pone directamente a disposición para su uso tras su producción, pasando solamente por procesos de almacenamiento y distribución antes de llegar al punto de consumo.
- **Indirecto:** El agua de reúso se vierte en un cuerpo receptor (natural o construido), como una fuente de abastecimiento superficial o subterránea, de la cual el agua es captada y tratada en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) convencional. Solo después de este nuevo tratamiento, el agua se pone a disposición para su uso. Estos atenuadores ambientales tienen como objetivo reducir las concentraciones y el potencial deletéreo de los contaminantes mediante diversos mecanismos, como la dilución, metabolización y oxidación por radiación solar, entre otros, disminuyendo así los posibles efectos adversos asociados.

Planificado / No planificado:

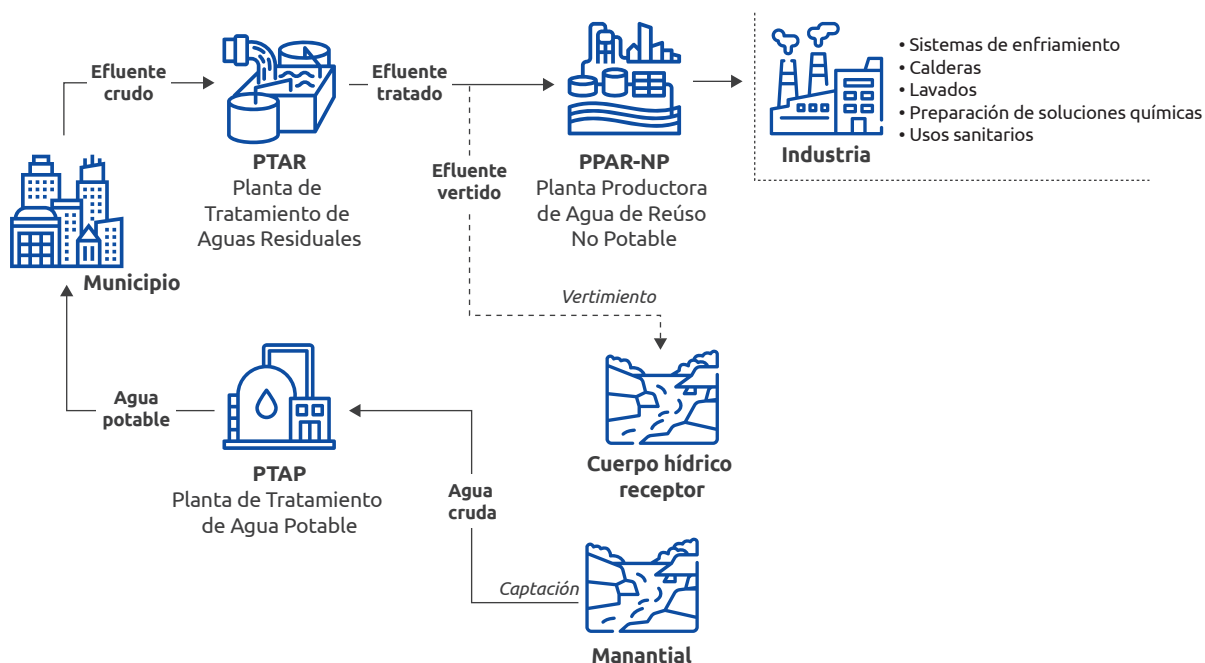
- Es una práctica común la existencia de vertimientos de aguas residuales no tratadas o insuficientemente tratadas en cuerpos hídricos. Estos mismos cuerpos hídricos son utilizados como fuentes de abastecimiento por otros municipios o incluso por el mismo municipio que realiza los vertimientos, lo que resulta en un reúso indirecto no planificado, incluso para fines potables.

Cabe enfatizar que el contenido de este documento trata exclusivamente del Reúso No Potable Directo (**RNPD**) para **fines industriales**.

La Figura 7 ilustra un esquema típico de RNPD para fines industriales. En este esquema, el agua se capta de una fuente natural, se trata en una PTAP convencional y se distribuye para su uso en el municipio. Las aguas residuales generadas y recolectadas se envían a una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), cuyo objetivo principal es adecuar su calidad para el vertimiento al medio ambiente. Sin embargo, una parte de esta agua residual tratada se

desvía para la producción de agua de reúso no potable para fines industriales, mientras que la otra parte se vierte en el cuerpo hídrico.

FIGURA 7 – Configuración esquemática de Reúso No Potable Directo (RNPD) para fines industriales



Fuente: elaboración propia.

Más allá del reúso, actualmente existe también una tendencia de transición del paradigma del efluente (agua residual) como residuo al efluente como fuente de recursos. También pueden recuperarse otros recursos, como macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio), metales de interés (cobre, litio, oro), ácidos y bases, sales y carbono en forma de biogás.

2.3 ESPECIFICIDADES DEL REÚSO INDUSTRIAL

2.3.1 USOS DE AGUA SUSCEPTIBLES DE SUMINISTRO MEDIANTE AGUA DE REÚSO NO POTABLE

La práctica del reúso para fines industriales requiere, ante todo, comprender cuáles son las características cuali-cuantitativas de los usos del agua en cada tipo de industria y, a un nivel más profundo, en las instalaciones que serán abastecidas.

Los usos del agua en la industria son múltiples, entre los cuales se pueden destacar (MIERZWA; ESPÍNDOLA y HESPAÑHOL, 2024): uso como materia prima (incorporación al producto final), preparación de soluciones químicas, lavados, generación de vapor y reposición de sistemas de enfriamiento (o refrigeración).

Entre ellos, hay uno que presenta una característica especial: el uso en sistemas de enfriamiento (o Torres de Enfriamiento — TE), los cuales pueden representar fracciones muy relevantes de la demanda de agua en una unidad industrial. Esta proporcionalidad puede superar, en algunos sectores, el 90% del total, lo que, sumado al hecho de que el proceso tolera la utilización de agua con estándares de calidad menos restrictivos (MIERZWA, 2002) y es independiente de la calidad requerida en el proceso productivo en sí (CNI, 2017), genera oportunidades para la práctica del reúso no potable.

La Tabla 2 presenta el Coeficiente No Potable (C_{NP}), el cual representa la proporción de agua no potable demandada por las industrias de acuerdo con la clasificación CNAE, basándose principalmente en el uso para enfriamiento.

TABLA 2 – Coeficiente de demanda no potable (C_{NP}) por divisiones (1 a 43) de la CNAE 2.0

Actividad	C_{NP}
Actividades de apoyo para la extracción de minerales	3%
Fabricación de productos alimenticios	50%
Elaboración de bebidas	61%
Fabricación de productos de tabaco	66%
Fabricación de productos textiles	36%
Confección de prendas de vestir y accesorios	17%
Preparación de cueros y fabricación de productos de cuero, artículos de viaje y calzados	7%
Fabricación de productos de madera	38%
Fabricación de celulosa, cartón y productos de papel	26%
Impresión y reproducción de grabaciones	3%
Fabricación de coque, de productos derivados del petróleo y de biocombustibles	87%
Fabricación de productos químicos	86%
Fabricación de productos farmoquímicos y farmacéuticos	92%
Fabricación de productos de caucho y de material de plástico	65%
Fabricación de productos minerales no metálicos	66%
Metalurgia	60%
Fabricación de productos de metal, excepto maquinarias y equipamientos	9%
Fabricación de equipamientos de informática, productos electrónicos y ópticos	11%
Fabricación de máquinas, aparatos y materiales eléctricos	63%
Fabricación de maquinarias y equipamientos	0%
Fabricación de vehículos automotores, remolques y carrocerías	44%
Fabricación de otros equipos de transporte, excepto vehículos automotores	44%
Fabricación de muebles	0%
Fabricación de productos diversos	26%
Mantenimiento, reparación e instalación de maquinarias y equipamientos	0%
Otras industrias de transformación ^(a)	36% ^(b)
Electricidad, gas y otras utilidades	68%

(a) C_{NP} considerado igual a cero en los casos en los que no se encontró una correlación de la actividad económica en la literatura.

(b) Otras actividades de transformación. División inexistente en la CNAE 2.0. C_{NP} utilizado para las actividades de transformación para las cuales no fue posible determinar la división de acuerdo con la CNAE 2.0.

Fuente: Fukasawa (2021)

Estos valores se basaron en literatura principalmente de los EE. UU. y Europa; existe un importante vacío de literatura nacional brasileña sobre el asunto, lo cual, probablemente, también ocurre en los demás países de América del Sur.

2.3.2 ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA

El estándar de calidad del agua de reúso para la industria debe ser compatible con los usos que se pretenden suministrar, lo cual debe estudiarse caso a caso. Un tratamiento insuficiente genera agua de baja calidad, lo que puede perjudicar los procesos, productos y equipos involucrados. Por el contrario, tratar el agua a niveles innecesariamente elevados puede resultar en costos excesivos.

En el caso de Brasil, no existen leyes o normas que establezcan estándares de calidad para usos industriales, por lo que corresponde a las partes involucradas (productor y usuario de agua de reúso) establecer acuerdos sobre el tema.

La Tabla 3 relaciona algunas referencias de estándares de calidad del agua de reúso no potable para usos comunes en la industria: reposición de sistemas de enfriamiento, generación de vapor en calderas y otros usos no potables, tales como descargas en sanitarios, riego paisajístico y lavado de pisos.

TABLA 3 – Usos industriales comunes de agua de reúso y requisitos de calidad

Finalidad	Uso	Requisitos comunes de calidad
Torres de enfriamiento (TE) (Tabla 5)	Reposición de sistemas de enfriamiento	• Materia orgánica (DBO y DQO) • Sólidos en suspensión (SST y turbiedad) • Sólidos disueltos (SDT y conductividad eléctrica) • Compuestos que causan incrustación, abrasión y corrosión (alcalinidad, dureza, sílice, cloruros) • Microorganismos patógenos y formadores de biofilm (bacterias heterótrofas, coliformes termotolerantes y totales)
Calderas (Tabla 6)	Producción de vapor	• Aplicables todos los listados para TE • Mayor control sobre sólidos disueltos (SDT y conductividad eléctrica) • Mayor control sobre compuestos que causan incrustación, abrasión y corrosión (alcalinidad, dureza, sílice, cloruros)
Otros usos (Tabla 1)	Descarga de inodoros y urinarios, lavado de pisos, riego paisajístico	• Materia orgánica (DBO e DQO) • Sólidos en suspensión (SST y turbiedad) • Microorganismos patógenos y formadores de biofilm (bacterias heterótrofas, coliformes termotolerantes y totales)

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4 presenta el estándar de calidad para agua de enfriamiento utilizado en Aquapolo, la mayor experiencia de reúso no potable industrial de Brasil (abordada en el Ítem 2.4.1).

TABLA 4 – Referencia de estándar de calidad para uso en sistemas de enfriamiento industrial

Parámetro	Unidad	(a)
pH	-	6,5 - 7,5
DBO _{5,20}	mgO ₂ /L	< 10
DQO	mgO ₂ /L	< 20
Sólidos Suspensos Totales (SST)	mg/L	< 5
Turbiedad	NTU	< 1,0
Conductividad eléctrica	µS/cm	< 600
Nitrógeno amoniacal	mg/L	< 1
Nitrato	mg/L	< 5
Fósforo total	mg/L	< 0,5
Dureza	mgCaCO ₃ /L	< 100
Aluminio	mg/L	< 0,2
Cobre	mg/L	< 0,1
Fenoles	mg/L	< 0,13
Hierro	mg/L	< 0,3
Aceites y Grasas (A&G)	mg/L	< 5
Sílice	mg/L	< 20
Sulfuros	mg/L	< 0,1
Surfactantes	mg/L	< 1,0

Conforme: Sabesp (2010); MCidades (2017)

Fuente: elaboración propia.

El uso de agua en sistemas de enfriamiento depende de una serie de factores que hacen necesario el estudio individual de cada situación. Ejemplos de estas variables son: el tipo de enfriamiento (directo o indirecto); en el caso del enfriamiento directo, las características y sensibilidades de los elementos a enfriar; los equipos, materiales e instrumentos empleados en los depósitos de agua, torres, tuberías, boquillas aspersoras, material de relleno y hélices; las temperaturas de entrada y salida del agua (ΔT); y los requisitos ambientales que deben cumplirse para el vertimiento del agua de purga (*blowdown*), entre otros.

En sistemas de enfriamiento, las mayores preocupaciones de calidad están relacionadas con los daños causados por incrustaciones, deposición, formación de biofilm (biopelícula) y corrosión. Para ello, es común el control en línea o mediante análisis de laboratorio de variables de calidad como pH, conductividad eléctrica / SDT (Sólidos Disueltos Totales), cloruros, dureza, alcalinidad, sílice, turbiedad / SST (Sólidos Suspendidos Totales), DBO, bacterias heterótrofas y especies de nitrógeno, fósforo y sulfatos.

Existe una relación directa entre la calidad del agua de reposición y el número de ciclos de concentración posibles en los circuitos, principalmente en el caso de los sólidos disueltos. Un agua de mejor calidad requiere tratamientos más avanzados (es decir, mayores costos), pero permite mayores ciclos de concentración, reduciendo consecuentemente la demanda de

agua de reposición. Análogamente, el uso de agua de menor calidad y menores costos implica menores ciclos de concentración y, por consiguiente, un mayor consumo de agua.

En cuanto al uso de agua de reúso en calderas, la Tabla 5 presenta un estándar sugerido por la USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) de acuerdo con diferentes presiones de operación.

TABLA 5 – Referencia de estándar de calidad para uso en calderas según la presión de operación

Parámetro	Unid.	Presión de operación en el domo (psig)			
		0-300	601-750	901-1000	1501-2000
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	700 - 3.500	200 - 1.000	125 - 625	50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	15	3,0	1,0	ND
Conductividad eléctrica	μS/cm	1.100 - 5.400	300 - 1500	200 - 1000	80
Alcalinidad total	mgCaCO ₃ /L	350	200	100	ND
Sílice	mgSiO ₂ /L	150	30	8,0	1,0

ND: no detectable

Fuente: EPA (U.S. EPA, 2012)

En el caso de las calderas, es necesario un control más riguroso de sales y de compuestos que pueden causar incrustaciones, siendo necesaria, dependiendo de la presión de operación, la utilización de procesos de tratamiento que eliminen compuestos disueltos, como la ósmosis inversa o el intercambio iónico, lo que a su vez presupone la necesidad de un elevado control de sólidos suspendidos.

Además de los usos industriales propiamente dichos, existen también otros usos no potables en las unidades industriales, como descargas en inodoros y urinarios, riego paisajístico, lavado de pisos y áreas de circulación de vehículos, y control de polvo, entre otros. En este caso específico, existen resoluciones y normas brasileñas que definen estándares de calidad para los denominados “usos urbanos” o usos dentro de edificaciones. La Tabla 6 presenta tres referencias brasileñas que tratan el reúso no potable para estas finalidades: la Resolución SES/SIMA N°01/2020 (estado de São Paulo), la Resolución COEMA N°02/2017 (estado de Ceará) y la norma ABNT NBR 16783/2019 (norma técnica nacional).

TABLA 6 – Referencias de compilación de estándares de calidad de agua de reúso previstos en referencias nacionales

Parámetro	Unidad	Resolución SES/SIMA N° 01/20 (São Paulo)		Resolución COEMA N° 02/2017 (Ceará)	ABNT NBR 16783: 2019
		Clase A ^(a)	Clase B ^(a)		
Usos contemplados		Fines urbanos: Riego paisajístico; lavado de vías y otros espacios públicos y privados; construcción civil; desobstrucción de galerías de aguas lluvias y red de alcantarillado; lavado de vehículos; extinción de incendios.		Fines urbanos: Riego paisajístico, lavado de vías públicas y vehículos, desobstrucción de tuberías, construcción civil, edificaciones y extinción de incendios dentro del área urbana.	Usos en edificaciones: Descarga de inodoros y urinarios; lavado de vías y áreas externas; lavado de vehículos; riego paisajístico; uso ornamental; enfriamiento de techos; sistemas de enfriamiento.
pH	-	6 - 9	6 - 9	6 - 8,5	6 - 9
DBO _{5,20}	mgO ₂ /L	≤ 10	≤ 30	-	≤ 20
Turbiedad ^(b)	NTU	≤ 0,2 ^(b) ≤ 2,0	-	-	≤ 5
SST ^(b)	mg/L	≤ 0,5 ^(b)	< 30	-	-
SDT	mg/L	-	-	-	< 2.000
Conductividad eléctrica ^(c)	μS/cm	< 700 ^(c)	< 3.000 ^(c)	≤ 3.000	≤ 3.200
Coliformes termotolerantes ^(d)	UFC/100 ml	ND	< 200	≤ 1.000	-
E. Coli ^(d)		ND	< 120	-	≤ 200
Huevos de helmintos ^(d)	huevos/L	< 1	1	≤ 1	-
Giardia ^(d) e <i>Cryptosporidium</i> ^(d)	quistes u oocistos/L	ND	-	-	-
Cloro residual total	mg/L	1,0 - 5,0	≥ 1,0	-	-
Cloro residual libre	mg/L	-	-	-	0,5 - 5,0 (0,5 - 2,0) ^(e)
Cloruros ^(c)		< 106 ^(c)	< 350 ^(c)	-	-
RAS ^(c)		< 0,7 ^(c)	< 2,0 ^(c)	-	-
Boro ^(c)		< 3 ^(c)	3 - 9 ^(c)	-	-

Hacer clic sobre el nombre de las resoluciones / normas para acceder al enlace de los textos

OD: Oxígeno disuelto. SST: Sólidos suspendidos totales. SDT: Sólidos disueltos totales. ND: No detectable.

(a) La Resolución establece dos tipos de reúso: Clase A (uso irrestricto) y Clase B (uso restringido). La diferenciación reside en el hecho de que, para el reúso Clase B, no puede haber tránsito de personas en el área donde ocurre la práctica de reúso, y debe existir una señalización adecuada. Así mismo, algunos usos solo pueden ser abastecidos por agua Clase A, como el lavado interno de vehículos y la extinción de incendios. Se recomienda acceder a la norma para la visualización completa de las especificidades de cada clase.

(b) Para el caso de sistemas con membranas, la turbidez debe ser ≤ 0,5 NTU y SST ≤ 0,5 mg/L. Es decir, la resolución posee un estándar más rígido para el caso de uso de sistemas de membranas.

(c) Requeridos solamente para el caso de riego paisajístico.

(d) Monitoreo de patógenos en caso de que se utilice MBR y/u OI (ósmosis inversa) y se garantice una turbidez ≤ 0,2 NTU

(e) El valor entre paréntesis (0,5 – 2,0 mg/L) es el recomendado.

Fuente: CEARÁ (2017), ABNT (2019), ESTADO DE SÃO PAULO (2020)

Es posible notar que las normas presentan enfoques y estándares de calidad sustancialmente diferentes. La Resolución SES/SIMA n°01/20 de São Paulo incluye solamente los usos urbanos y establece clases distintas (Clase A y Clase B) de acuerdo con el nivel de restricción del área donde ocurre el reúso, cada una con finalidades, estándares de calidad, rutas tecnológicas y frecuencias de monitoreo diferentes. La Resolución COEMA n°02/17 abarca un mayor número

de finalidades de reúso además de los usos urbanos, y presenta estándares de calidad menos restrictivos y detallados en comparación con el estado de São Paulo. La norma técnica NBR ABNT 16.783/19 se enfoca en usos en edificaciones y abarca también otras fuentes de agua no potable (agua de lluvia y agua condensada de sistemas de aire acondicionado), e incluye usos como descargas en inodoros y usos ornamentales (fuentes, espejos de agua), los cuales no están presentes en los otros textos.

2.3.3 EXPERIENCIAS CONSOLIDADAS Y TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA DE REÚSO NO POTABLE

La necesidad de tratamiento para la producción de agua de reúso depende, básicamente, de la calidad del agua residual cruda y de la calidad final requerida (ver Ítem 2.3.2), así como de eventuales condicionantes sanitarias, ambientales o normativas que establezcan rutas de tratamiento específicas. Así, las experiencias de reúso pueden adoptar rutas tecnológicas diferentes dependiendo de sus necesidades.

La Tabla 7 compila experiencias de reúso industrial en el mundo, identificando los caudales de proyecto, el tipo de tratamiento secundario a partir del cual se genera el agua de reúso, la ruta tecnológica para la producción de agua de reúso, el estado actual y cuáles son los usos finales suministrados actualmente.

TABLA 7 – Compilación de experiencias de reúso industrial en el mundo

Nombre	Ubicación	Caudal de proyecto (L/s)	Tratamiento secundario en la PTAR municipal	Tratamiento adicional para producción de agua de reúso	Estado	Uso suministrado
Huaifang Reclamation Plant	Pekín, China	6.342	MBR	O3 + UV	Operando	Industrial / recarga de humedales
Western Corridor Scheme	Queensland, Australia	2.685	LA	MF + OI + POA	Stand-by	Industrial
NEWater - Sembcorp (Changi)	Singapur	2.191	MBR	MF + OI + UV	Operando	Industrial
NEWater - BEWG-UESH (Changi)	Singapur	2.190	MBR	MF + OI + UV	Operando	Industrial
NEWater - Keppel Seghers (Ulu Pandan)	Singapur	1.446	MBR	MF + OI + UV	Operando	Industrial
Michelson Water Reclamation Plant (MWRP)	California, EE. UU.	1.226	LA	FT + OI + UV	Operando	Industrial, riego paisajístico, usos urbanos no potables
Aquapolo ⁽¹⁾	São Paulo, Brasil	1.000	LA	MBR + OI + CL	Operando	Complejo petroquímico Capuava (enfriamiento, calderas)
NEWater - Kranji	Singapur	964	MBR	MF + OI + UV	Operando	Industrial

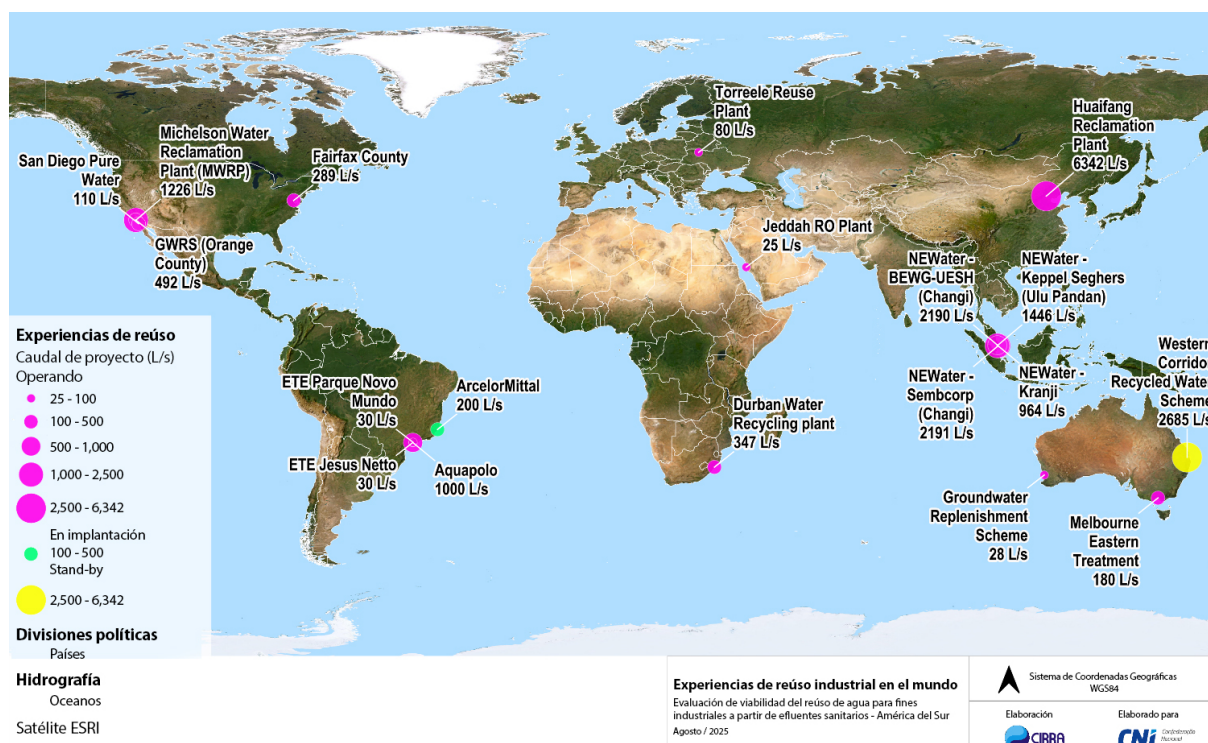
Nombre	Ubicación	Caudal de proyecto (L/s)	Tratamiento secundario en la PTAR municipal	Tratamiento adicional para producción de agua de reúso	Estado	Uso suministrado
GWRS (Orange County)	California, EE. UU.	492	LA	MF + OI + POA	Operando	Recarga de acuífero
Durban Water Recycling plant	Durban, Sudáfrica	347	LA	UF + UV	Operando	Refinerías e industria de papel
Fairfax County	Virginia, EE. UU.	289	LA	FT + CL	Operando	Industrial, riego de campos de golf y campos deportivos
ArcelorMittal / CESAN ⁽¹⁾	Vitória, Brasil	200	LA	UF + OI + CL	En proyecto	Industrial
Melbourne Eastern Treatment	Melbourne, Australia	180	LA	FT + CL	Operando	Industrial / agricultura
San Diego Pure Water	San Diego, EE. UU.	110	LA	MF + OI + UV	Operando	Industrial / recarga
Torreele Reuse Plant	Koksijde, Bélgica	80	LA	UF + OI + UV	Operando	Recarga de acuíferos + uso industrial estacional
PTAR Jesus Netto ⁽¹⁾	São Paulo, Brasil	30	LA	FT + CL	Operando	Industrial
PTAR Parque Novo Mundo ⁽¹⁾	São Paulo, Brasil	30	LA / UASB (dos líneas paralelas)	FT + CL	Operando	Industrial
Groundwater Replenishment Scheme	Perth, Australia	28	MBR	OI + UV	Operando	Industria / Recarga
Jeddah RO Plant	Yeda, Arabia Saudita	25	MBR	OI + UV	Operando	Enfriamiento

(1) Estas experiencias se presentan con mayor detalle en el ítem 2.4.

CL: Cloración. FT: Filtración terciaria. MBR: *Membrane Bioreactor* (Biorreactor de membrana). MF: Microfiltración. O3: Oxidación con ozono. OI: Ósmosis inversa. POA: Proceso de Oxidación Avanzada. UF: Ultrafiltración. UV: Ultravioleta. UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reactor anaerobio de flujo ascendente).

Fuente: elaboración propia.

El mapa de la Figura 8 muestra la ubicación de las experiencias relacionadas en la Tabla 8, representadas de acuerdo con su caudal de proyecto.

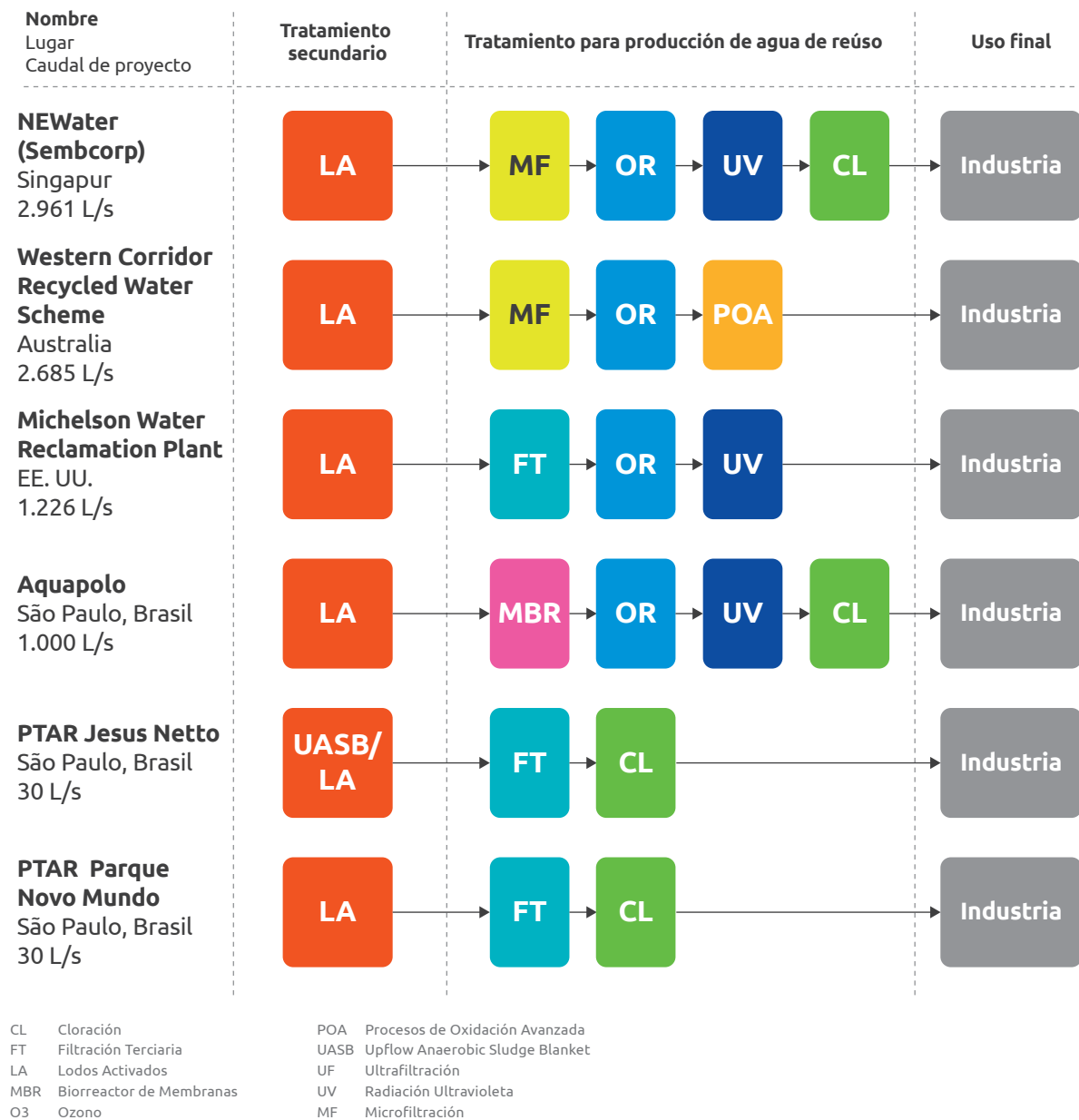
FIGURA 8 – Mapa con experiencias de reúso industrial en el mundo

Fuente: elaboración propia.

Las principales experiencias de reúso no potable industrial están localizadas en países como Singapur, EE. UU., Australia, China y Brasil, con algunas experiencias puntuales en África y Europa.

La Figura 9 destaca los principales procesos de tratamiento empleados en experiencias de RNPd para fines industriales.

FIGURA 9 – Ilustración de los procesos de tratamiento aplicados para la producción de agua de reúso no potable directo según diferentes experiencias mundiales



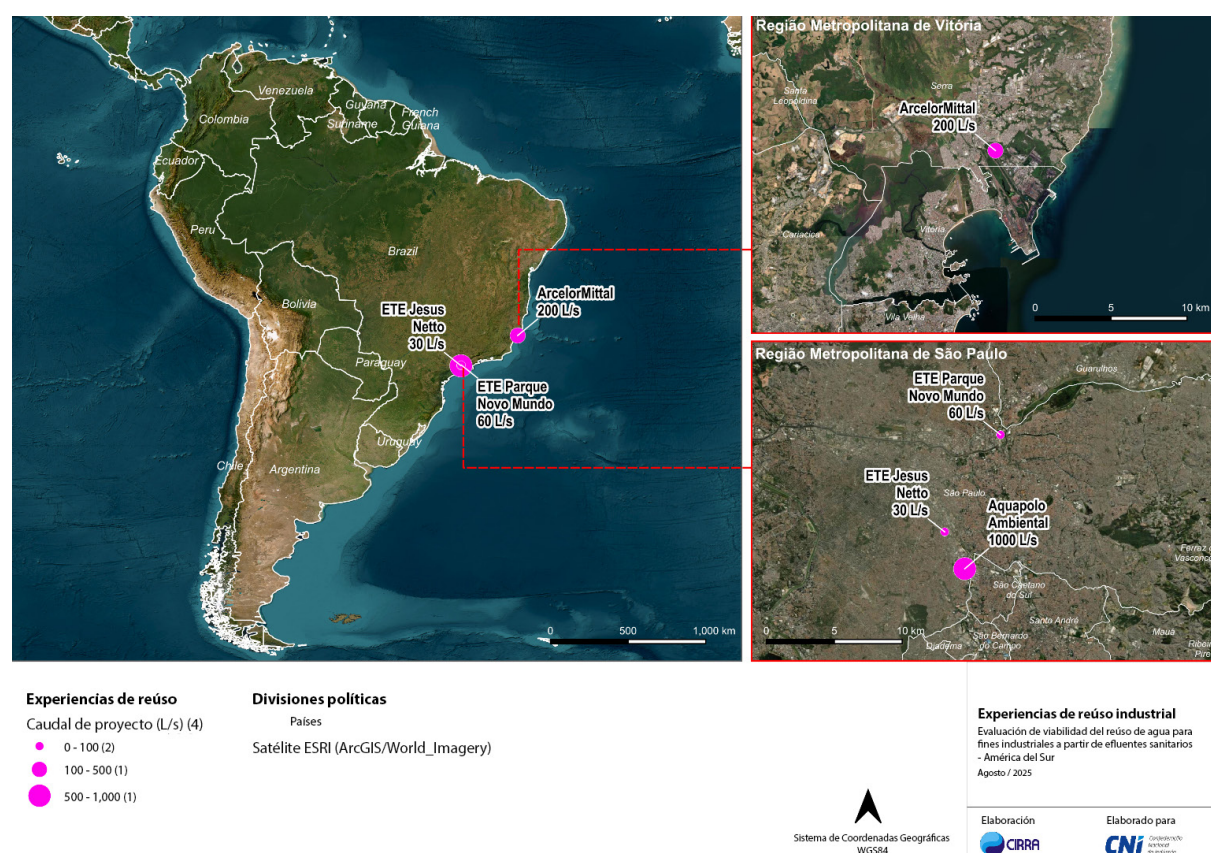
Fuente: elaboración propia.

El tipo de ruta más común consiste en la captación de aguas residuales de lodos activados y la utilización de MF/UF (micro/ultrafiltración) seguida de OI (ósmosis inversa), desinfección por UV (radiación ultravioleta) y aplicación de cloro para el mantenimiento del residual. Existen configuraciones que utilizan MBR para la remoción adicional de materia orgánica y nutrientes, POA (Proceso de Oxidación Avanzada) para la oxidación de compuestos persistentes o FT (filtración terciaria) en caso de que el estándar exigido no sea muy elevado.

2.4 DETALLES SOBRE ALGUNAS EXPERIENCIAS BRASILEÑAS DE REÚSO INDUSTRIAL

En este ítem se presentan cuatro experiencias brasileñas de reúso industrial a partir de PTAR municipales. Tres de ellas están localizadas en el estado de São Paulo y operan desde hace más de una década; la otra se encuentra en el estado de Espírito Santo y está en fase de implantación, con previsión de inicio en 2027. La Figura 10 muestra la ubicación de estas experiencias, y en los siguientes ítems se presentan más detalles sobre cada una.

FIGURA 10 – Ubicación de experiencias de reúso industrial brasileñas



Fuente: elaboración propia.



3 METODOLOGIA

La metodología adoptada en los estudios se compone de dos enfoques diferentes: el método PTAR-usuario (presentado en el Ítem 4.1) y el Índice de Aptitud de Reúso (Ítem 4.2). Estos enfoques buscan identificar las oportunidades de reúso a partir de perspectivas distintas, pero complementarias.

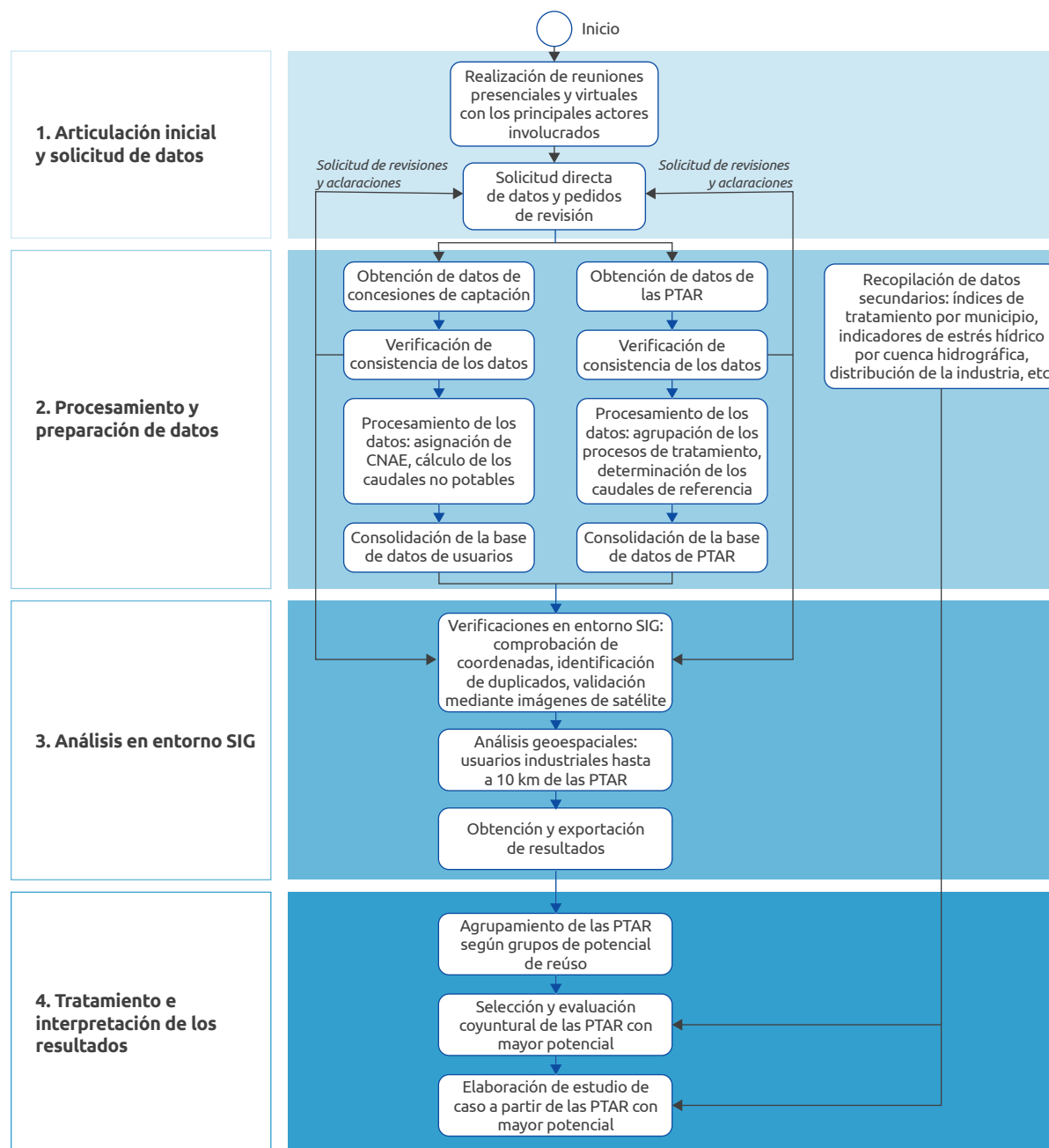
Un punto central en la utilización de ambas metodologías se relaciona con la calidad, disponibilidad y dificultad de obtención de datos sobre la demanda de agua y la recolección y tratamiento de aguas residuales, asunto abordado con más detalle en el **Ítem 4.3**.

3.1 OPORTUNIDADES DE REÚSO POR PTAR-USUARIO

La identificación de oportunidades de reúso de agua por **PTAR-usuario** tiene en cuenta las características de la oferta de aguas residuales por parte de las PTAR y de las demandas de agua de la industria, a partir de la evaluación de sus caudales y ubicaciones.

En resumen, el propósito es caracterizar a los usuarios industriales localizados cerca de las PTAR existentes, así como indicar los lugares donde la concentración de demandas industriales tiene potencial de reúso a partir de futuras estaciones. Esto se realiza haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), dado que uno de los principales atributos a considerar en la planificación del reúso es la distancia entre el lugar de producción del agua de reúso y el usuario final.

El método adoptado se compone, en líneas generales, de los procedimientos ilustrados en el diagrama de flujo de la Figura 11.

FIGURA 11 – Método PTAR-usuario: diagrama de flujo metodológico

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan algunos detalles de las etapas principales. Los pormenores específicos sobre la gestión de datos se abordan en el Ítem 4.3.

3.1.1 ARTICULACIÓN INICIAL Y SOLICITUD DE DATOS

3.1.1.1 Realización de reuniones presenciales

A lo largo del desarrollo de los estudios, se llegó a la conclusión de que la realización de reuniones presenciales al inicio de los estudios es la estrategia más eficaz de comunicación con los actores relevantes. Conforme se explorará más adelante a lo largo de este documento, la evaluación del potencial de reúso industrial requiere un cierto nivel de compromiso y disponibilidad para ceder datos por parte de diferentes actores, siendo los principales las empresas de saneamiento responsables del tratamiento de aguas residuales domésticas, las autoridades responsables de la gestión de recursos hídricos y la concesión de derechos de uso de agua (otorgamiento de permisos), y las industrias, siendo estas los potenciales usuarios del agua de reúso.

Las verificaciones de integridad de los datos (Etapas 2) siempre conducen a la necesidad de revisiones y complementaciones por parte de los proveedores de los datos iniciales. Por ello, el establecimiento de contacto cercano durante la etapa de articulación es de extrema importancia para garantizar datos de calidad.

Además, en los estados de Rio Grande do Sul y Alagoas, la articulación inicial llevó incluso al establecimiento de acuerdos de cooperación técnica entre la industria y los actores locales, con el objetivo de actualizar las bases de datos de los estudios y crear la posibilidad de evaluaciones continuas del potencial de reúso de los estados.

4.1.1.2 Solicitud de bases de datos

Los datos de PTAR y derechos de uso de agua (otorgamientos) son de carácter público, pero casi nunca están disponibles al público de forma estructurada e íntegra. Aunque son relativamente simples (como caudales concesionados por los permisos de vertimiento, coordenadas geográficas, procesos de tratamiento de las PTAR y caudales de proyecto, entre otros), su obtención es demorada y requiere solicitud directa a los proveedores.

Para optimizar y direccionar la obtención de datos, se elaboran oficios y plantillas estándar para que el proveedor de datos tenga claridad sobre qué información es necesaria. Esto tiende a facilitar la disponibilidad de información, dado que el proveedor no necesita decidir qué datos serán enviados y cuál será el formato. En el **ANEXO B** se proporcionan los formatos de solicitud de datos utilizados. Las formas de requisición son:

- Para las PTAR, se solicita a las empresas de saneamiento que completen una plantilla adjunta. De lo contrario, los datos tienden a ser proporcionados de forma inconsistente, incompleta y poco clara. Véase plantilla en el **ANEXO B**.

- Para los permisos de vertimiento/concesiones de agua, los productores de datos generalmente ya poseen planillas propias, las cuales tienen decenas o cientos de miles de registros. Así, la solicitud destaca cuáles datos se consideran importantes, solicitándose el filtrado de los datos para que sean enviados solamente los de interés. Véase modelo de solicitud en el **ANEXO B**.

3.1.2 PROCESAMIENTO Y PREPARACIÓN DE DATOS

3.1.2.1 Verificación de consistencia

Una vez recibidas las bases de datos, se procede a la verificación de su consistencia. Las verificaciones tienen en cuenta la naturaleza de los datos, el formato en que fueron suministrados y los objetivos del estudio. Ejemplos de verificaciones son:

- Caudales y tiempos de captación, y caudales de proyecto (o afluentes) de las PTAR: orden de magnitud (verificación de valores muy elevados o muy bajos) y uso equivocado de unidades de caudal (hay casos en los que en una misma plantilla se utilizan unidades de caudal diferentes).
- Fechas de concesión o de vencimiento de derechos de uso incompatibles con la realidad.
- Uso de nomenclaturas, códigos y nombres de columnas no informados claramente en un diccionario de datos, lo que imposibilita la comprensión plena del contenido.
- Existencia de duplicados: atributos con nombres muy similares o con nombres desactualizados.
- Exceso de registros nulos, principalmente en columnas importantes como caudales y coordenadas.
- Errores de ortografía en la identificación de los usuarios / PTAR, de los municipios o en otra información relevante.
- Errores de coordenadas y/o de sistemas de coordenadas. Algunos errores pueden identificarse fácilmente incluso fuera de un entorno SIG, como latitud/longitud incompatibles con el estado o país.

En caso de ser necesario, se contacta a los proveedores de información para la revisión de los datos y/o aclaraciones. No obstante, esto generalmente se realiza después de verificaciones adicionales hechas en entorno SIG, como se abordará más adelante.

3.1.2.2 Procesamiento de datos

Tras las verificaciones iniciales, los datos son tratados y complementados para su utilización. Esta etapa incluye diversas transformaciones y adaptaciones, como la homogeneización de las unidades de caudal de todas las bases de datos; la adopción de formas estandarizadas de identificación de los municipios (utilizando el geocódigo numérico del instituto nacional de estadística, como el IBGE); y la garantía de la consistencia de los tipos de datos de cada columna (asegurar que en columnas de tipo decimal no haya valores tipo *string*, por ejemplo).

Para el caso de las concesiones de agua de captación, ejemplos de procesamiento son:

- Identificar la actividad económica de cada usuario, utilizando el nombre del usuario o el número de identificación tributaria (CNPJ). Se utilizan las Divisiones, Clases y Subclases de la CNAE, según se detalla en el Ítem 4.3.2.3.
- Como el número de usuarios tiende a ser de cientos o decenas de miles, no es factible buscar o cruzar las actividades económicas de todos ellos. Se priorizan aquellos con los mayores caudales concesionados, de modo que al menos el 95-98% del caudal total otorgado tenga su actividad económica identificada. Existe una tendencia a que los mayores usuarios concentren una parte muy elevada de los caudales totales concedidos. En los estudios realizados, entre el 10-20% de los usuarios solía concentrar el 90-98% de los caudales. Es decir, el otro 80-90% se repartía el 2-10% restante, con caudales muy bajos y dispersos en el territorio, condición poco relevante bajo el prisma del potencial de reúso. Este procedimiento puede realizarse mediante el cruce con bases de datos de organismos tributarios (*Receita federal*) o por búsquedas de actividad económica en internet.

Para el caso de las PTAR, ejemplos de procesamiento son:

- Determinar el Q_{PTAR} o caudal de referencia de la PTAR. No siempre están disponibles los datos de caudal de proyecto (capacidad), siendo necesaria la adopción del caudal medio afluente. También hay casos en los que la PTAR consta en un determinado archivo, pero el dato de caudal proviene de otra base. Más detalles sobre el caudal de referencia de la PTAR (Q^{PTAR}) en el Ítem 4.3.3.1
- Agrupación de los procesos de tratamiento. Cada PTAR posee sus especificidades en cuanto a la ruta tecnológica de tratamiento, y manejar un número muy elevado de valores es inviable. Por ello, los procesos se agrupan en diez grupos más amplios, como: Preliminar/Primario, Lagunas, Lodos activados y similares, y Tratamiento Terciario. Más detalles en el Ítem 4.3.3.2.

Las bases de datos son consolidadas y estructuradas de modo adecuado (formato .csv) para su uso en entorno SIG, así como para su utilización en herramientas de *Business Inteligente* (ver Ítem 0 sobre BI).

3.1.3 ANÁLISIS EN ENTORNO SIG (SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA)

3.1.3.1 Verificaciones en entorno SIG

Los principales análisis de potencial de reúso se realizan en entorno SIG, dada la ya mencionada naturaleza espacial del estudio. Todos los procedimientos se llevan a cabo en Quantum GIS (QGIS). No obstante, antes de estos análisis se realizan verificaciones adicionales que solo pueden hacerse efectivamente en un entorno SIG, lo que da lugar a solicitudes de revisión o aclaración al proveedor de los datos.

En el caso de las concesiones, se realizan las siguientes verificaciones:

- Cotejo con hidrografía: en caso de haber concesiones de captación superficial con caudales elevados en áreas donde no hay indicación de cuerpos hídricos (ríos, embalses) relevantes, es posible que exista un error en las coordenadas o en los caudales informados.
- Identificación de concesiones en puntos coincidentes o muy próximos: *clusters* o conjuntos de concesiones exactamente coincidentes indican un posible error en las coordenadas. Es relativamente común que un gran número de usuarios comparta un par de coordenadas genérico, derivado probablemente de simplificaciones realizadas al momento del registro.
- Patrones inusuales: caudales muy elevados en áreas donde los caudales concesionados suelen ser bajos también son sospechosos, pudiendo tratarse de errores en los datos informados.

En el caso de las PTAR, se realizan las siguientes verificaciones:

- Cotejo del proceso de tratamiento: hay ocasiones en las que el proceso de tratamiento informado es, por ejemplo, lodos activados, pero la imagen de satélite muestra una configuración evidente de lagunas. A partir de la comprensión de las geometrías habituales de estas unidades, es posible verificar eventuales incompatibilidades.
- Localización: es común que las coordenadas informadas estén a algunos cientos de metros o incluso kilómetros de la PTAR visualizada en la imagen de satélite. En ese caso, se solicitan revisiones o, para pequeñas diferencias, la corrección se realiza directamente mediante la superposición con la imagen satelital.
- Estado (Status): hay PTAR que se informan como “en operación”, pero las imágenes de satélite muestran un área desocupada o en obra. Lo mismo ocurre con las PTAR que figuran “en proyecto”, pero que ya se pueden ver construidas en las imágenes.

3.1.3.2 Análisis geoespaciales

Se define un área de influencia (*buffer*) de 10 km de radio alrededor de cada PTAR (cada planta es representada por una capa de puntos). La Figura 12 muestra el radio de 10 km alrededor de una PTAR, así como los usuarios contenidos en esa área. La planta usada como ejemplo es la PTAR Nova São Miguel, ubicada en São Miguel dos Campos, Alagoas.

FIGURA 12 – Ejemplo de aplicación del método PTAR-usuario para el caso de la PTAR Nova São Miguel, en São Miguel dos Campos



Fuente: CNI (2025)

La precisión de las dimensiones del *buffer* depende del tipo de sistema de coordenadas utilizado. Si los análisis se realizan en coordenadas planas, la precisión será exacta, independientemente de la ubicación de la planta. En el caso de coordenadas geográficas, el *buffer* tendrá que delimitarse a partir de una relación entre grados y distancia, y las deformaciones serán mayores a medida que se aleja de la línea del Ecuador. Esto será especialmente importante para los análisis realizados al sur del continente.

A partir de la superposición entre el área de influencia y las concesiones, la información se extrae en el propio entorno SIG. Se realiza la unión de las concesiones por atributo (área de influencia), con el cálculo de la suma de los caudales concesionados para el área de influencia de cada PTAR.

La sumatoria de los caudales concesionados dentro del área de influencia de cada PTAR se denomina ΣQ_{con} , magnitud expresada en L/s, al igual que el caudal de referencia de la PTAR (Q_{PTAR}). Los múltiples usuarios pueden identificarse individualmente dentro de cada área de influencia de la PTAR y luego relacionarse con la base de datos de concesiones.

3.1.4 TRATAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Tras la extracción de los resultados en el entorno SIG, las PTAR se agrupan en categorías de potencial de reúso. Se adoptan cuatro grupos para la clasificación de las PTAR de acuerdo con el potencial de oferta de agua de reúso (es decir, el caudal de agua residual tratada) y su demanda (demandas industriales cercanas), tal como se muestra en la Tabla 8.

TABLA 8 – Clasificación de las PTAR según su potencial de reúso

Grupo	Descripción	Criterio	Característica
A	Alta oferta, alta demanda PTAR con alto caudal Q_{PTAR} y con altos caudales industriales concesionados en un radio de 10 km	$Q_{PTAR} \geq 200 \text{ L/s}^*$ $\Sigma Q_{con} \geq 200 \text{ L/s}^*$	PTAR con el mayor potencial actual, dado que existe disponibilidad de aguas residuales tratadas y demandas cercanas.
B	Alta oferta, baja demanda PTAR con alto caudal Q_{PTAR} y con bajos caudales industriales concesionados en un radio de 10 km	$Q_{PTAR} \geq 200 \text{ L/s}^*$ $\Sigma Q_{con} \geq 200 \text{ L/s}^*$	PTAR cuyo potencial reside en la disponibilidad de oferta, aunque actualmente no existan demandas representativas. Para las plantas de este grupo, conviene la planificación para el asentamiento de industrias en sus cercanías.
C	Baja oferta, alta demanda PTAR con bajo caudal Q_{PTAR} y con altos caudales industriales concesionados en un radio de 10 km	$Q_{PTAR} \geq 200 \text{ L/s}^*$ $\Sigma Q_{con} \geq 200 \text{ L/s}^*$	PTAR de baja capacidad ubicadas en áreas con demandas industriales elevadas. Su potencial reside en la posibilidad de expansión o modernización de las estaciones, principalmente en zonas donde el déficit de saneamiento es significativo.
D	Baja oferta, baja demanda PTAR con bajo caudal Q_{PTAR} y con bajos caudales industriales concesionados en un radio de 10 km	$Q_{PTAR} \geq 200 \text{ L/s}^*$ $\Sigma Q_{con} \geq 200 \text{ L/s}^*$	PTAR con bajo potencial de reúso, dado que coinciden los bajos caudales de aguas residuales y la ausencia de demandas industriales representativas.

*Estos caudales de corte pueden sufrir variaciones según el área de estudio. Para estados menores con bajos caudales promedio de tratamiento de aguas residuales y de demandas industriales, se adoptaron valores más bajos. En estados con caudales mayores, se adoptaron valores más elevados.

Los valores de $Q_{PTAR} = 200 \text{ L/s}$ y $\Sigma Q_{con} = 200 \text{ L/s}$ fueron los adoptados en el estudio más reciente (Alagoas) y, por lo tanto, se presentan como ejemplo.

Q_{PTAR} : Caudal de referencia de la PTAR (ver Ítem 4.3.3.1). ΣQ_{con} : Sumatoria de los caudales concesionados para la industria contenidos en el radio de 10 km alrededor de la PTAR.

Fuente: elaboración propia.

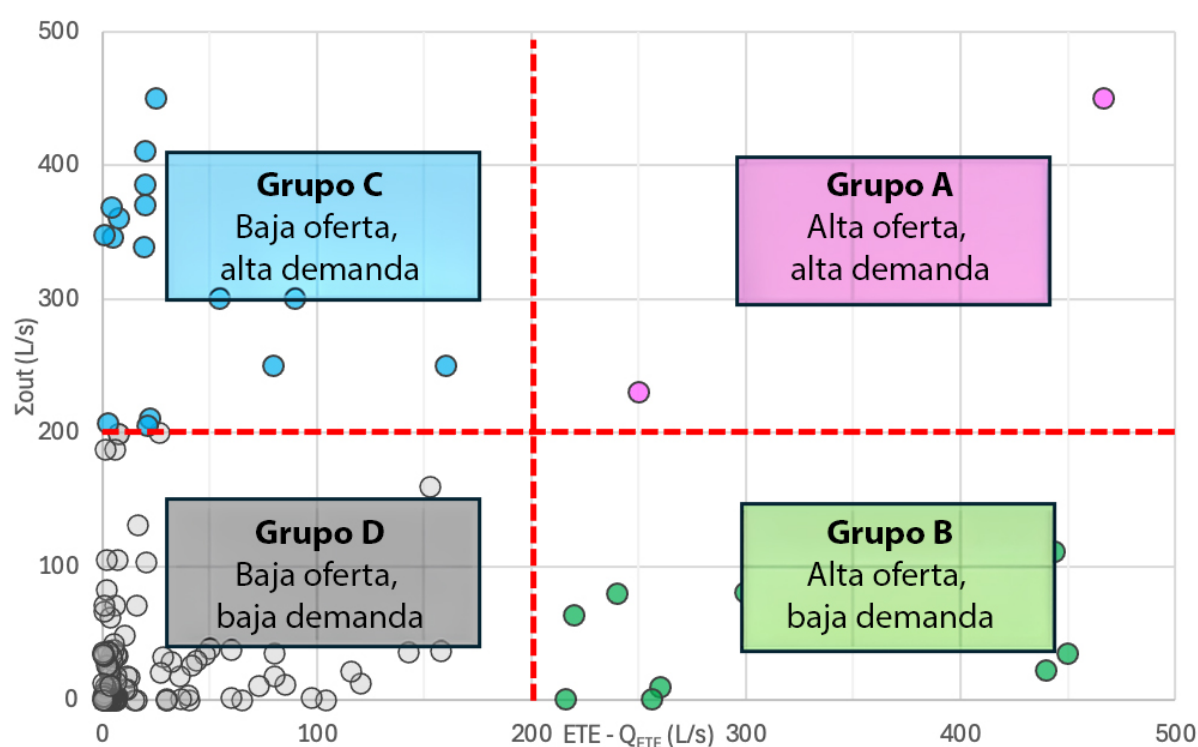
Cada uno de los grupos representa un tipo de potencial de reúso. Esta división tiene como objetivo facilitar la interpretación de los resultados, orientando la toma de decisiones en relación con las diferentes realidades de potencial de reúso y priorizando las PTAR para las cuales existe un mayor potencial:

- Las PTAR del **Grupo A** poseen un potencial inmediato de reúso, dado que hay una convergencia entre la alta disponibilidad de aguas residuales tratadas y las elevadas demandas industriales cercanas.
- Las del **Grupo B** son aquellas que poseen aguas residuales tratadas disponibles, pero cerca de las cuales aún no existen usuarios relevantes. Esto indica que futuros usuarios que se instalen pueden considerar el agua de reúso como una fuente potencial de abastecimiento, lo que puede, incluso, orientar el desarrollo económico de la región.

- Las PTAR del **Grupo C** poseen un bajo caudal, pero están ubicadas cerca de usuarios hidroatensivos. Futuras expansiones o ampliaciones de la capacidad de tratamiento de aguas residuales en la región pueden, entonces, considerar la producción de agua de reúso como un factor de impulso, generando, incluso, ingresos para el prestador.
- Por último, las PTAR del **Grupo D** son las menos prioritarias en relación con el potencial de reúso y pueden ser consideradas tras la evaluación de las estaciones de los demás grupos. En general, es el grupo con el mayor número de plantas.

La Figura 13 ejemplifica gráficamente la clasificación de las PTAR en función de los grupos definidos, con los mismos valores de corte presentados en la Tabla 9, $Q_{PTAR} = 200$ L/s e $Q_{con} = 200$ L/s. En el eje "x" está representado el caudal de la PTAR (Q_{PTAR}) y en el eje "y" la sumatoria de los caudales concesionados circunscritos al radio de 10 km.

FIGURA 13 – Ejemplo o Referencia de los grupos de clasificación de las PTAR según su potencial de reúso



Nota 1: Se utilizaron como caudales de corte $Q_{PTAR} = 200$ L/s y $\Sigma Q_{con} = 200$ L/s. Q_{PTAR} : Caudal de referencia de la PTAR (ver ítem 4.3.3.1). ΣQ_{con} : sumatoria de los caudales concesionados para la industria contenidas en el radio de 10 km entorno de la PTAR.

Nota 2: Los puntos representados en el gráfico son aleatorios y meramente ilustrativos.

Fuente: elaboración propia.

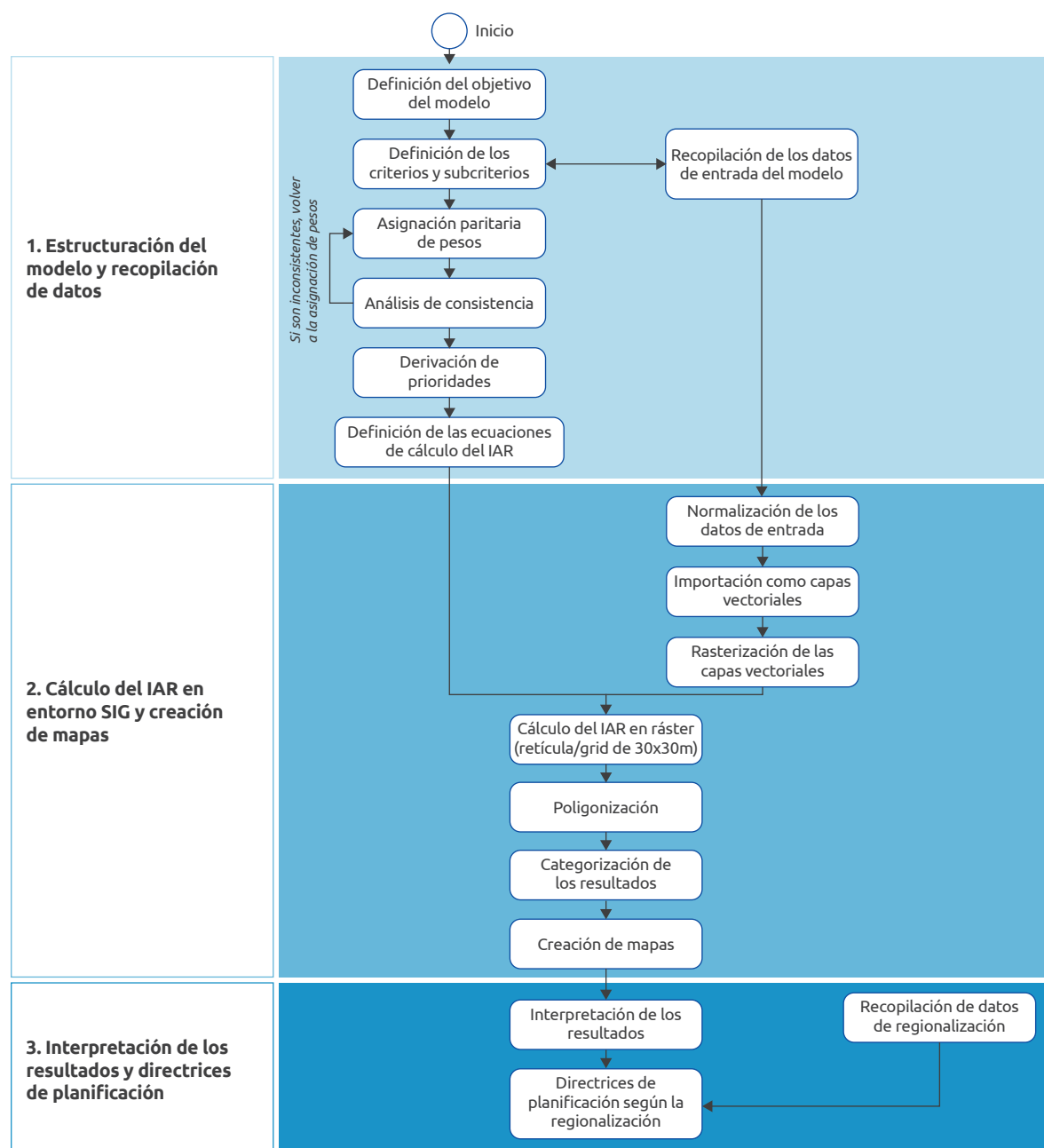
3.2 OPORTUNIDADES DE REÚSO MEDIANTE EL ÍNDICE DE APTITUD DE REÚSO (IAR)

La identificación de oportunidades de reúso de agua mediante el **Índice de Aptitud de Reúso (IAR)** posee un carácter más integral que el del método PTAR-usuario, analizando el territorio con base en unidades geográficas más amplias, como municipios y/o microcuencas hidrográficas.

El IAR se basa en un análisis multicriterio, haciendo uso de un Modelo Multicriterio de Apoyo a la Decisión (MMAD): el *Analytic Hierarchy Process* (AHP), un MMAD de análisis jerárquico basado en el principio de comparación por pares (SAATY, 2008). El AHP se aplica conjuntamente con el uso de SIG, configurando lo que se denomina SIG-MMAD. Todos los procedimientos de SIG se realizaron en Quantum GIS 3 (QGIS3)².

En líneas generales, el modelo da como resultado un valor numérico que representa la aptitud de reúso de una determinada área en relación con las demás, permitiendo la clasificación de las zonas consideradas de acuerdo con su respectivo valor de IAR. La Figura 14 ilustra el diagrama de flujo metodológico del IAR.

2 Software libre disponible para descargar en: <https://qgis.org/en/site/>.

FIGURA 14 – IAR: diagrama de flujo metodológico

Fuente: elaboración propia.

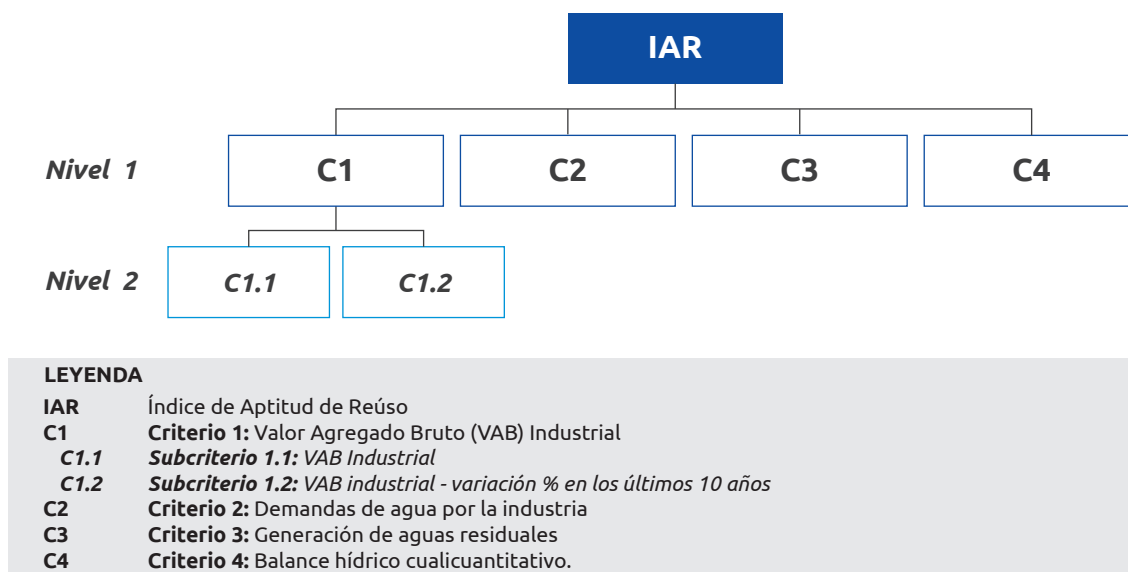
Información adicional sobre los procedimientos de estructuración del modelo del IAR se presenta en el Anexo A.

3.2.1 ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO Y LEVANTAMIENTO DE DATOS

El modelo se estructuró considerando los siguientes aspectos:

- Tiene como objetivo presentar una variable cuantitativa que expresa el atractivo de reúso en determinada área.
- Utiliza como base el *Analytic Hierarchal Process* (AHP).
- Se compone de criterios y subcriterios considerados importantes para la identificación de una zona como apta para la práctica de reúso industrial. Los criterios fueron elegidos con base en la comprensión de los autores sobre qué factores influyen en el potencial de reúso y en el conocimiento de las bases de datos disponibles y de actualización frecuente, de modo que el modelo pueda actualizarse conforme se disponga de nuevos datos.
- El modelo posee dos niveles: Nivel 1 – criterios; Nivel 2 – subcriterios. Solo el criterio C1 posee subcriterios.
- A cada criterio se le asigna un peso (o relevancia) que lo clasifica en relación con los demás. Este procedimiento se realiza mediante la comparación por pares (paritaria) entre los criterios, según lo preconiza el AHP. También se prevén otros procedimientos, como el análisis de consistencia y la derivación de prioridades, para obtener la importancia de cada uno de los criterios.
- Cada criterio representa un atributo real expresado por una variable cualitativa o cuantitativa (por ejemplo, el valor de la demanda industrial). Dado que los criterios poseen naturalezas distintas, es necesario adoptar un patrón único para su utilización mediante un procedimiento denominado “normalización”.
- La normalización consiste en la conversión de los valores de cada criterio a una escala específica. Se adoptó una escala de 0 a 1, donde 0 representa la condición menos deseable en relación con el objetivo del modelo y 1 equivale a la condición más deseable. Las normalizaciones se realizaron mediante transformación lineal o reglas discretas específicas.
- A partir de las importancias paritarias se realiza la derivación de prioridades, dando como resultado los pesos globales de cada uno de los criterios.
- A partir de los pesos de los criterios y de los valores normalizados, el IAR se calcula para cada región mediante la sumatoria de los productos entre los criterios y los valores normalizados.
- La comparación de los valores de IAR por región indica aquellas que poseen mayor atractivo para el reúso. Cuanto mayor sea el IAR, más apta es el área para el reúso.

El modelo se compone de cuatro criterios y dos subcriterios relevantes para el cálculo de la aptitud de reúso de cada región, como muestra la Figura 15.

FIGURA 15 – Estructura del modelo del Índice de Aptitud de Reúso (IAR)

Fuente: CNI (2025)

La Tabla 9 resume las principales características de los criterios y subcriterios adoptados.

TABLA 9 – Detalles sobre los criterios y subcriterios que componen el IAR

Criterio	Nombre	Unidad	Unidad geográfica	Justificación y uso
C1	Valor Agregado Bruto (VAB) industrial	10 ⁶ BRL/año	Municipio	El VAB se utiliza como indicador de la intensidad de la actividad industrial, partiendo del supuesto de que una mayor actividad industrial en determinada área implica una mayor aptitud de reúso. Se consideraron, en forma de subcriterios, tanto el valor absoluto del VAB en el último año base (2021) como la tendencia de los últimos 10 años (2011-2021), a fin de comprender no solo el panorama actual, sino también la tendencia para los próximos años. Estos datos están disponibles por municipio, no siendo posible la adopción de recortes geográficos más detallados. Posee dos subcriterios: • C1.1 VAB industrial en 2021: valor, en R\$ MM/año, del VAB industrial para el año base. Indica la intensidad. • C1.2 Variación % del VAB industrial en los últimos años: variación porcentual (%) del VAB industrial en los últimos 10 años. Indica la tendencia de la industria en el lugar.
C2	Demandas de agua industriales	L/s	Municipio/ microcuenca hidrográfica	Las demandas industriales son uno de los principales factores para la aptitud del reúso industrial. Se consideraron los caudales medios concesionados para fines industriales agregados por municipio, partiendo del supuesto de que cuanto mayores son las demandas de agua por parte de la industria, mayor es la aptitud de reúso. La demanda se obtiene mediante la sumatoria de las concesiones industriales (puntos), siendo posible el agrupamiento por cualquier unidad geográfica representable por polígonos. En los estudios realizados, se utilizó el municipio como recorte geográfico, pero el uso de microcuencas hidrográficas también es posible y será adoptado en las próximas versiones.

Criterio	Nombre	Unidad	Unidad geográfica	Justificación y uso
C3	Generación de aguas residuales	L/s	Municipio	La obtención de agua de reúso depende de la disponibilidad de aguas residuales en cada municipio. Así, se definió que cuanto mayor es la generación de aguas residuales, mayor es la aptitud de reúso. Estos datos están disponibles por municipio, no siendo posible la adopción de recortes geográficos más detallados.
C4	Balance hídrico cuali-cuantitativo	Sin unidad (cualitativo)	Microcuenca hidrográfica	El balance hídrico cualicuantitativo es un criterio no numérico que clasifica la condición del balance hídrico teniendo en cuenta aspectos cuantitativos (caudales extraídos versus disponibilidad hídrica natural) y cualitativos (compromiso de la calidad de las fuentes o manantiales). Es un análisis integrado de la criticidad bajo los puntos de vista cualitativo y cuantitativo. Se definió que cuanto más crítico es el balance hídrico, más deseable y necesaria es la diversificación de fuentes de agua; es decir, mayor es la aptitud de reúso. Estos datos están disponibles por microcuenca hidrográfica, no siendo posible la adopción de recortes geográficos más detallados.

Fuente: elaboración propia.

Estos criterios contemplan temas relevantes para la evaluación del potencial de reúso y se miden mediante bases de datos disponibles y actualizadas recurrentemente en Brasil. Su utilización en otros países puede adaptarse según la disponibilidad de datos, buscando equivalencias entre los datos utilizados.

El modelo se basa en la asignación de pesos paritarios entre cada uno de los criterios y subcriterios, llegando a valores de peso global para cada uno de ellos según la metodología AHP. A partir de la asignación paritaria de importancia, el análisis de consistencia y la derivación de prioridades, se llega a los pesos de la Tabla 10 (Nivel 1 – Criterios) y de la Tabla 11 (subcriterios). Los procesos de asignación de importancia y derivación de prioridades (pesos) constan en el Anexo A.

TABLA 10 – Matriz de importancia de los criterios – Nivel 1 – Criterios

Sigla	Criterio	Escala	Unidad	Peso global (w)
C1	VAB industrial	Municipio	10 ⁹ BRL/ano	0,269
C2	Demanda industrial	Municipio / Microcuenca hidrográfica	L/s	0,381
C3	Aguas residuales generadas	Municipio	L/s	0,222
C4	Balance hídrico	Microcuenca hidrográfica	-	0,128

Fuente: elaboración propia.

TABLA 11 – Matriz de importancia de los criterios – Nivel 2 – Subcriterios

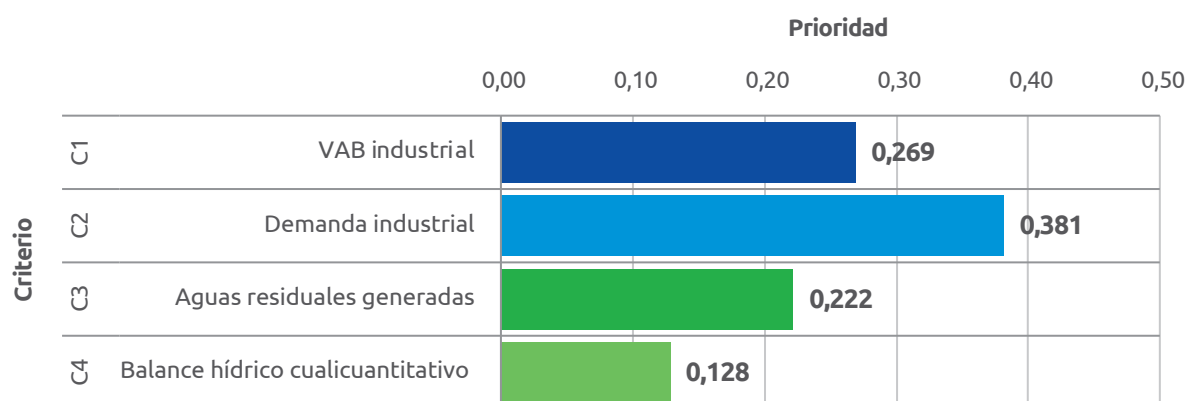
Sigla	Subcriterio	Escala	Unidad	Peso local (w _j)
C1.1	VAB industrial en el año analizado	municipio	10 ⁹ BRL/ano	0,750
C1.2	Variación % do VAB industrial en los últimos 10 años	municipio	%	0,250

Fuente: elaboración propia.

La asignación de los pesos se realiza de acuerdo con la percepción de los creadores del modelo sobre cuáles son los atributos más relevantes en la composición del potencial de reúso, pudiendo modificarse según la necesidad, siempre que se respeten los criterios de consistencia interna.

Los pesos obtenidos significan que, en el caso del Nivel 1, el C1 (VAB industrial) representa 0,269 (o 26,9%) del peso total de los criterios, lo cual se aplica para todos los demás. El peso global (w) es la representación numérica de la importancia global del criterio en relación con los demás, variando de 0 a 1,0. En el caso de los subcriterios C1.1 y C1.2, los cuales están anidados en el criterio C1, los pesos mostrados son los locales, mientras que los globales se obtienen mediante la multiplicación por el peso global del criterio padre (C1). La Figura 16 ilustra gráficamente las prioridades de los criterios (Nivel 1).

FIGURA 16 – Representación gráfica de las prioridades de los Criterios (Nivel 1) del modelo IAR



Fuente: elaboración propia

Para la aplicación en el modelo y la obtención del IAR, los valores brutos de cada criterio deben ser normalizados, lo cual se realizó mediante transformación lineal para una escala entre 0 (cero) y 100 (cien), según se muestra en el Anexo A.

A partir de los valores normalizados (N) y de los pesos (w) para cada criterio, el IAR se calcula según la Ecuación 1:

$$IAR = \sum_i^n (N_{Ci} \times w_i)$$

Equación 1

IAR: Índice de Aptitud de Reúso (IAR)
 N: Valor normalizado para el criterio, "Ci"
 w: Peso del criterio, "Ci"
 n: Cantidad de criterios

Al utilizar los pesos presentados en la Tabla 11 en la Ecuación 1, el IAR se calcula mediante la Ecuación 2:

$$IAR = 0,269N_{C1} + 0,381N_{C2} + 0,222N_{C3} + 0,128N_{C4}$$

Equação 2

IAR: Índice de atractivo de reúso
N_{1,4}: Valor normalizado de los criterios 1 a 4

Donde IAR es el Índice de Aptitud de Reúso, y N_{C1}, N_{C2}, N_{C3}, N_{C4} son los valores normalizados de los criterios Valor Agregado Bruto Industrial, demanda industrial, generación de aguas residuales y balance hídrico cualicuantitativo, respectivamente. Los coeficientes representan los pesos atribuidos a cada criterio.

La aplicación del IAR da como resultado la obtención de valores de aptitud de reúso, entre 0 y 1, para una determinada área. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se aplican grupos de IAR. La Tabla 12 presenta una división comúnmente utilizada en los estudios.

TABLA 12 – Clasificación de los valores de IAR

IAR	Valores
Muy bajo	IAR ≤ 0,05
Bajo	0,05 < IAR ≤ 0,10
Medio	0,10 < IAR ≤ 0,25
Alto	0,25 < IAR ≤ 0,50
Muy alto	IAR > 0,50

Fuente: CNI (2025).

Estos grupos permiten clasificar áreas según su aptitud, facilitando el análisis comparativo y la planificación para el reúso de agua.

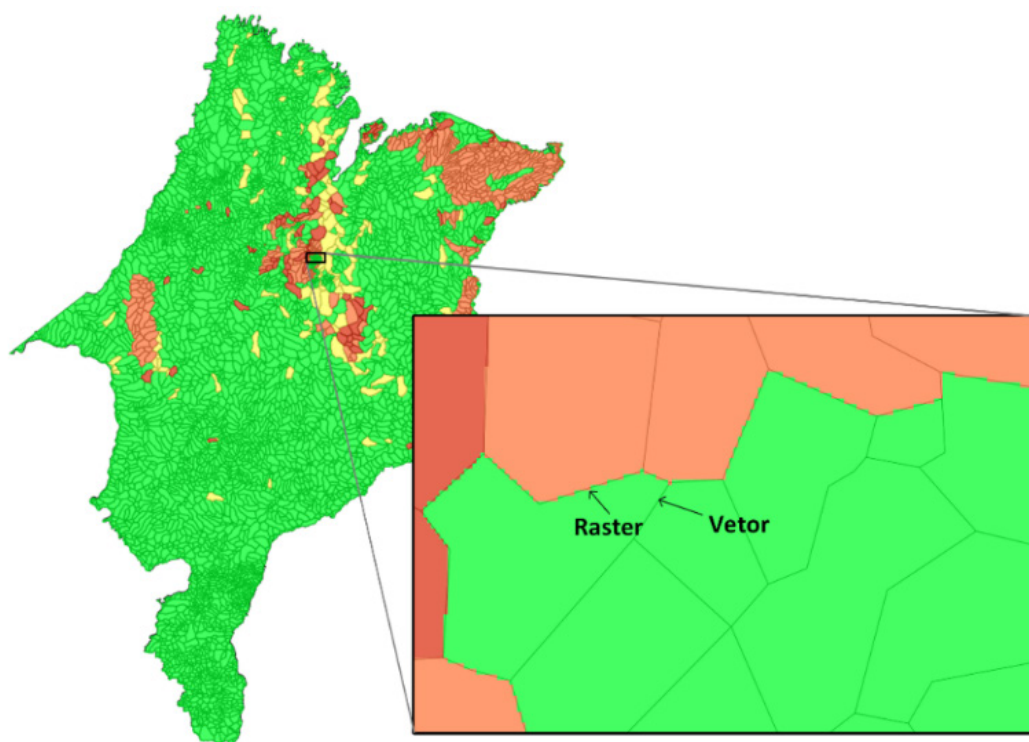
3.2.2 CÁLCULO DEL IAR EN ENTORNO SIG Y CREACIÓN DE MAPAS

El cálculo del IAR se realiza directamente en el entorno SIG, mediante herramientas integradas que permiten la ejecución de fórmulas a partir de determinadas variables contenidas en los elementos espaciales. Sin embargo, el conjunto de criterios del IAR posee una particularidad: no todos se presentan en los mismos recortes geográficos. Por ejemplo, el VAB industrial (C1) tiene como unidad geográfica mínima el municipio, mientras que el balance hídrico cuali-cuantitativo (C4) se representa por microcuenca hidrográfica.

Para sortear esta condición, se utilizan recursos de SIG que fragmentan la información espacial en áreas menores, permitiendo que la comparación se realice en pequeñas porciones estandarizadas de territorio. Este procedimiento se denomina “rasterización” y consiste en la conversión de atributos vectoriales (polígonos, en este caso) en imágenes (ráster) compuestas por píxeles.

Cada píxel, en la resolución utilizada, equivale a una porción territorial de aproximadamente 30 x 30 m (rejilla o *grid* 30x30). La Figura 17 ejemplifica el proceso de “rasterización”.

FIGURA 17 – Comparación entre capas vectoriales y ráster de balance hídrico por microcuenca hidrográfica



Fuente: elaboración propia. Mapa del estado de Maranhão, presentado en CNI (2021)

El IAR se calculó entonces para cada píxel, equivalente a una porción de 30x30 del territorio, representándose en una capa de tipo ráster. La capa es luego convertida en una capa vectorial (vectorización o poligonización), la cual agrupa los píxeles de acuerdo con criterios de proximidad y valor. Con esto, es posible la categorización de los resultados según los grupos de IAR de la Tabla 13. La categorización se realiza también en el entorno SIG.

De esta poligonización, por lo tanto, resultan recortes geográficos diferentes a los municipios, microcuencas hidrográficas o cualquier otra capa vectorial inicialmente utilizada, dado que el criterio de agrupación se basa en el resultado del IAR.

3.2.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DIRECTRICES DE PLANIFICACIÓN

Los mapas generados evalúan todo el territorio del estado en términos de IAR, asignando valores más altos a las áreas con mayor aptitud. Con el fin de analizar el territorio de forma objetiva y clara, se adopta alguna división geográfica estratégica ya utilizada en el estado, como zonificaciones, regiones de planificación o distritos. Este procedimiento tiene como objetivo facilitar la propuesta estratégica de directrices, permitiendo que los tomadores de decisiones comprendan cuáles son las áreas prioritarias en lo que se refiere al reúso industrial.

El criterio de regionalización varía de estado a estado, dependiendo de la disponibilidad de datos y de lo que es efectivamente utilizado por el Poder Público para la planificación. Por ejemplo, en el estado de Maranhão se utilizaron las zonas de la Zonificación Ecológica-Económica (ZEE); en Rio Grande do Sul, se adoptaron las regiones de los Consejos Regionales de Desarrollo (COREDEs); en Alagoas, se utilizaron las Regiones de Planificación.

Con base en esto, se evalúan las potencialidades de reúso en cada una de esas regiones, buscando identificar no solamente dónde están los mayores valores de IAR, sino también cuáles son sus características. Determinadas áreas pueden tener un IAR elevado debido a altas demandas industriales (criterio C2), mientras que otras lo tienen por una conjunción de altos VAB Industrial (C1), alta generación de aguas residuales (C3) y un balance hídrico crítico (C4), por ejemplo.

3.3 TÓPICOS ESPECÍFICOS SOBRE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Un punto central en la elaboración de los estudios está relacionado con la obtención y utilización de datos. No es novedad que las áreas de recursos hídricos y saneamiento básico enfrentan dificultades en la gestión de datos, una realidad ampliamente conocida por profesionales e investigadores que trabajan en el tema. Uno de los ejes principales del 8° Foro Mundial del Agua, de hecho, estuvo relacionado con los datos sobre el agua, o "*water-related data*", evidenciando la centralidad de este asunto.

Por ello, en este ítem se presentan algunos puntos importantes relacionados con la obtención y utilización de los datos, tanto para el método PTAR-usuario como para el método IAR.

3.3.1 FUENTES DE DATOS

Las principales bases de datos utilizadas para los estudios realizados en Brasil, así como sus respectivas fuentes y formas de obtención, se presentan en la Tabla 13.

TABLA 13 – Bases de datos utilizadas en los estudios

Tipo	Nombre	Productor / fuente	Tipo de acceso
Usos de agua y recursos hídricos	Concesiones de agua (captación) para fines industriales	- Autoridades de los estados para concesiones de su competencia. - Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (ANA) para concesiones federales.	- Concesiones de los estados: solicitud directa a las autoridades de cada estado. Modelo de solicitud en el ANEXO B. - Concesiones federales: Outorgas emitidas — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)
	Balances hídricos	- Sistema Nacional de Información sobre Recursos Hídricos (SNIRH) de la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (ANA) - Secretarías regionales de medio ambiente y/o recursos hídricos o agencias de cuenca hídrica.	- SNIRH de la ANA: Balanço hídrico — Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - Sitios web de agencias y autoridades de los estados (varían según el estado).
	Hidrografía	- Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (ANA). - Secretarías de medio ambiente y/o recursos hídricos de los estados.	SNIRH de la ANA: Divisão hidrográfica — Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
Saneamiento básico	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)	- Empresas de saneamiento - Atlas de Aguas Residuales, elaborado por la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (ANA) para las demás PTAR (sistemas de menor capacidad y/o no informados por las empresas de saneamiento)	- Datos suministrados directamente por las empresas de saneamiento. Modelo de solicitud en el ANEXO B. - Datos del Atlas de Aguas Residuales: Catálogo de Metadados da ANA – Atlas Esgotos
	Índices de recolección y tratamiento de aguas residuales	Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento Básico (SINISA) del Ministerio de las Ciudades.	Serie histórica SNIS: SNIS - Série Histórica
Industria	Valor Agregado Bruto (VAB) por la industria por municipio	Instituto Brasileiro de Geografia y Estadística (IBGE)	Producto Interno Bruto (PIB) de los municipios: Produto Interno Bruto dos Municípios IBGE
	Datos sobre actividad de la industria	Perfil de las industrias por estado.	Confederación Nacional de la Industria: CNI - Perfil da Indústria nos Estados

Fuente: elaboración propia

3.3.2 DEMANDAS INDUSTRIALES DE AGUA

3.3.2.1 *Uso de derechos de captación para la caracterización de las demandas industriales*

Tanto para la identificación de oportunidades por el método PTAR-usuario como para el cálculo del IAR, las demandas de agua para uso industrial se identificaron a partir de los registros de concesiones de aguas de captaciones subterráneas y superficiales para fines industriales, otorgadas por las autoridades de los estados (concesiones estatales) y por la ANA (concesiones federales).

Existen limitaciones e incertidumbres conocidas derivadas del uso de este tipo de datos. Una de las principales es el hecho de que el caudal concesionado corresponde al caudal otorgado legalmente y no al efectivamente demandado por los usuarios. Otras son: no todas las captaciones de agua están debidamente concesionadas (captaciones clandestinas); las concesiones no informan sobre usuarios de pequeña escala que utilizan agua directamente de las redes de abastecimiento; los departamentos poseen diferentes niveles de calidad de datos sobre concesiones, siendo que en algunos de ellos los registros poseen menor confiabilidad.

No obstante, incluso con estas limitaciones, se entiende que las concesiones son la mejor opción para la caracterización de las demandas industriales de acuerdo con los objetivos de los estudios de potencial de reúso, por tres razones:

- a) Son la única fuente de datos que permite la geolocalización de las demandas por punto coordinado, permitiendo la realización de los análisis PTAR-usuario. Además, la identificación individual permite conocer la actividad económica principal de cada usuario.
- b) Los caudales concesionados, al ser superiores a los caudales efectivamente extraídos, corresponden a las demandas máximas potenciales de cada usuario. Por lo tanto, aunque el caudal otorgado no sea el efectivamente utilizado por el titular, el valor concesionado comunica también potenciales demandas futuras.
- c) Las concesiones son instrumentos de gestión de recursos hídricos utilizados en todo el territorio nacional y se actualizan con frecuencia prácticamente diaria en los registros internos de las autoridades responsables.

3.3.2.2 Cálculo del caudal medio demandado

Para la utilización de los datos de concesión, se definió que se utilizaría el caudal medio anual. Es decir, el volumen total de captación autorizado distribuido a lo largo del año.

Es común que se otorguen caudales de captación diferentes para cada mes, con un determinado número máximo de días por mes y un determinado número de horas por día. Por ejemplo, en marzo puede otorgarse un caudal de 50 m³/h, por 22 días por mes y 20 horas por día. Con esto, el caudal medio de enero será de $50 \times 22/30 \times 20/24 = 30,6$ m³/h. Realizando el mismo procedimiento para todos los meses, y asumiendo 365 días/año, se llega al caudal medio anual, que es la variable efectivamente utilizada para los cálculos de demanda.

No en todos los casos se definen caudales diferentes por mes, y también existen estados que no definen días/mes o horas/día para la captación. En estos casos, se asume que el caudal concesionado puede ser captado los 365 días del año, las 24 horas del día.

3.3.2.3 Asignación de actividad económica

A cada usuario se le asigna una actividad económica industrial, con el fin de caracterizar el tipo de uso del agua. Esta asignación se realiza con base en el Registro Nacional de Personas Jurídicas (conocido en Brasil como *Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica* – CNPJ) de los solicitantes, utilizando la tipología de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE 2.0), contemplando las Secciones B a F, conforme a la Tabla 14.

TABLA 14 – Secciones y divisiones CNAE 2.0 contempladas en los estudios

Sección CNAE 2.0	Descripción	División CNAE 2.0
B	Industrias extractivas	5 a 9
C	Industrias de transformación	10 a 33
D	Electricidad y gas	35
E	Suministro de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de descontaminación	36 a 39
F	Construcción	41 a 43

Fuente: IBGE | Concla | Busca online

En algunos casos, cuando fue posible profundizar, también se identificaron niveles más detallados de las actividades, llegando a la subclase, lo que permite una caracterización más precisa de los usos del agua. La Tabla 15 muestra un extracto de la estructura CNAE para un determinado grupo (Grupo 101 – Sacrificio de ganado y fabricación de productos cárnicos).

TABLA 15 – Estructura CNAE para la División 10, Grupo 101

Códigos					Denominación
Sección	División	Grupo	Clase	Subclase	
C					INDUSTRIAS DE TRANSFORMACIÓN
	10				ELABORACIÓN DE PRODUCTOS ALIMENTARIOS
		10.1			Sacrificio de ganado y elaboración de productos cárnicos
			10.11-2		Sacrificio de ganado, excepto porcinos
				1011-2/01	Frigorífico - sacrificio de bovinos
				1011-2/02	Frigorífico - sacrificio de equinos
				1011-2/03	Frigorífico - sacrificio de ovinos y caprinos
				1011-2/04	Frigorífico - sacrificio de bufalinos
				1011-2/05	Matadero - sacrificio de ganado bajo contrato, excepto porcinos
			10.12-1		Sacrificio de porcinos, aves y otros animales pequeños
				1012-1/01	Sacrificio de aves
				1012-1/02	Sacrificio de animales pequeños
				1012-1/03	Frigorífico - sacrificio de porcinos
				1012-1/04	Matadero - sacrificio de porcinos bajo contrato
			10.13-9		Elaboración de productos de carne
				1013-9/01	Elaboración de productos cárnicos
				1013-9/02	Preparación de subproductos del sacrificio

Fuente: IBGE | Concla | Busca online

3.3.3 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

La identificación de la oferta potencial de aguas residuales para la producción de agua de reúso se realiza mediante los datos de las PTAR existentes y futuras (en proyecto o estudio).

Existen dos fuentes principales de datos de PTAR: las empresas de saneamiento que operan las PTAR y el Atlas de Aguas Residuales, que es un estudio de nivel nacional que presenta una base de datos integrada de todas las PTAR de Brasil. Aunque representa un avance importante en la gestión de datos de saneamiento, estos Atlas de Aguas Residuales no presentan muchos detalles sobre las PTAR, presentando inconsistencias o desactualizaciones

Por ello, se prioriza siempre el uso de datos de los operadores de saneamiento (empresas), procediendo a la solicitud directa de información cuando es posible. En cada región se contacta a las principales empresas de saneamiento y las bases de datos del Atlas de Aguas Residuales se utilizan como complemento, principalmente para municipios y PTAR de pequeña escala.

En el caso de las PTAR, la solicitud de datos es más eficiente cuando se suministra a la empresa una plantilla para el diligenciamiento de la información requerida, como se presenta en el ANEXO B. De lo contrario, las empresas suelen demorar en sus respuestas y enviar información poco estructurada e incompleta.

3.3.3.1 Caudal de referencia de la PTAR (Q_{PTAR})

Para trabajar con una variable única de caudal en el caso de las PTAR, se adopta una variable denominada “caudal de referencia de la PTAR”, expresada como Q_{PTAR} . Esto es necesario porque la información sobre las PTAR es a veces incompleta, ya que no siempre constan datos de caudal de proyecto o de caudal afluente³.

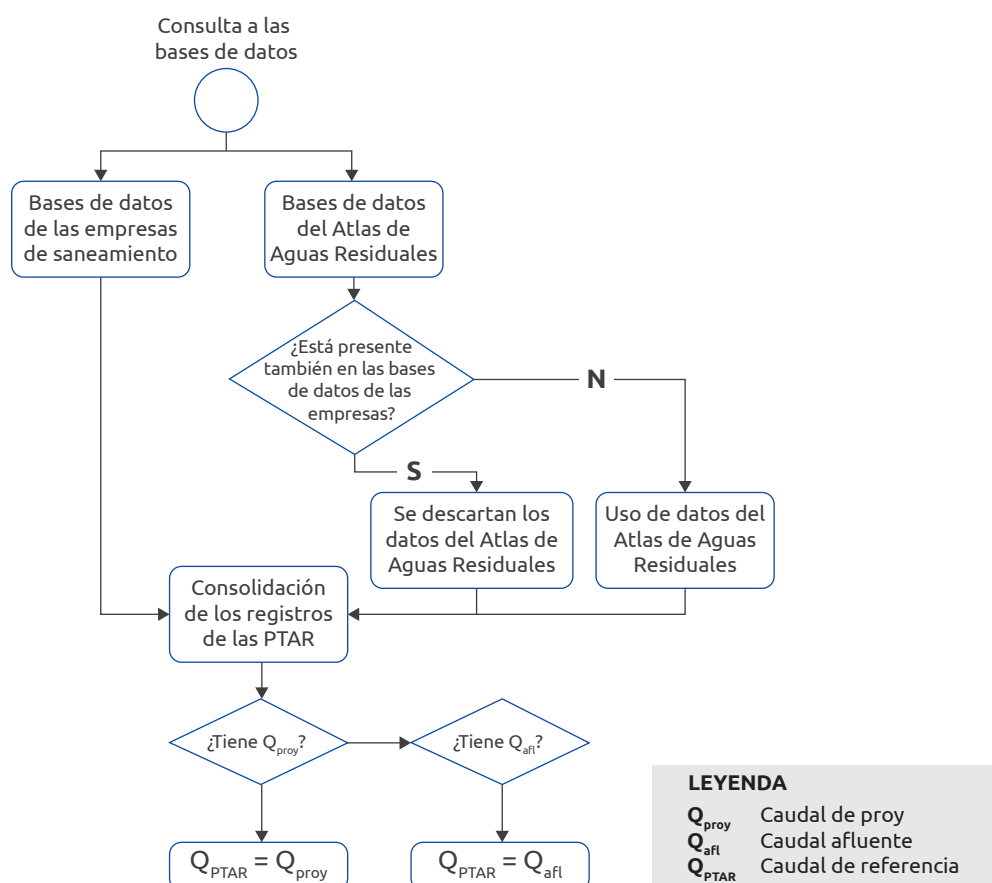
El Q_{PTAR} para cada PTAR se determina según los siguientes criterios:

1. Se utilizan, prioritariamente, los datos de caudal suministrados por las empresas de saneamiento. Los datos de los Atlas de Aguas Residuales de la ANA tienden a abarcar un mayor número de plantas y municipios, pero suelen ser menos precisos.
2. La prioridad es el uso de datos de caudal de proyecto (Q_{proy}), pero, en su ausencia, se adopta el valor de caudal afluente (Q_{afl}).
3. El Atlas de Aguas Residuales, en su versión más reciente, no informa datos de caudal de las PTAR. Por ello, para las PTAR que constan solamente en dicho Atlas – es decir, que no están presentes en ninguna de las otras bases de datos –, no se dispone de datos de caudal de referencia Q_{PTAR} , por lo que se considera igual a cero.

³ Caudal afluente es el caudal promedio que llega a la planta. Se optó por el uso prioritario del caudal de proyecto y no el del afluente debido a que el primero representa la capacidad máxima de tratamiento de las PTAR, lo cual, al igual que en el caso de las concesiones, es más coherente con el alcance de la planificación estratégica del presente estudio.

La Figura 18 ilustra el proceso de definición del Q_{PTAR} considerando las diferentes bases de datos disponibles.

FIGURA 18 – Diagrama de flujo para la determinación del Q_{PTAR} (caudal de referencia) de las PTAR



Fuente: elaboración propia.

3.3.3.2 Agrupamiento de los procesos de tratamiento

A fin de uniformizar la terminología adoptada para la evaluación de las PTAR, se realiza el agrupamiento de los procesos de tratamiento informados en las bases de datos. Las bases de datos brutas informan decenas de tipos diferentes de procesos, muchos de los cuales poseen variaciones mínimas en términos de ruta tecnológica y de calidad final posible del efluente tratado.

Se adoptan diez grupos, los cuales agrupan procesos de acuerdo con la calidad de agua residual tratada que es posible alcanzar, considerando principalmente materia orgánica, sólidos y nutrientes. La Tabla 16 presenta los grupos utilizados.

TABLA 16 – Agrupamiento de procesos de tratamiento de las PTAR

Calidad del agua residual tratada	Grupo	Ejemplos de procesos presentes en las bases de datos (no exhaustivo)
 Mayor calidad	Terciario	Procesos biológicos aerobios con etapas de remoción de nutrientes y/o separación avanzada de sólidos (filtración terciaria o membranas de MF/UF). Biomasa granular (Nereda®).
	Lodos activados y similares	<i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> (MBBR). <i>CFIC®</i> (<i>Continuous Flow Intermittent Cleaning</i>). <i>Integrated Fixed-film Activated Sludge</i> (IFAS). Lodos activados con aireación prolongada. Lodos activados por lotes (SBR). Lodos activados convencionales. Lodos activados de alta tasa.
	Otros procesos aerobios	Filtro Aireado Sumergido (FAS). Filtro Biológico Percolador (FBP). Biodiscos.
	Físico-químico	Flotación por aire disuelto. Decantación secundaria asistida químicamente.
	Lagunas	Lagunas aerobias + laguna de decantación. Laguna aireada facultativa. Laguna anaerobia + laguna facultativa. Lagoa facultativa.
	UASB y/o otros procesos anaerobios	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (UASB) (en español, Reactor anaerobio de flujo ascendente) Reactores anaerobios.
	Biosistemas	Biodigestor + filtro anaerobio + <i>wetlands</i> (en español, humedades). Biodigestor + filtro anaerobio
	Pozo séptico y filtro	Pozo séptico + filtro anaerobio Decanto-digestor + filtro anaerobio
	Preliminar/primario	Estación de Preacondicionamiento (EPC). Decantación primaria asistida químicamente. Decantación primaria. Tanque Imhoff. Solo cribado y/o desarenador
Menor calidad	Otros	No especificado / no informado.

Fuente: elaboración propia.

Es evidente que dentro del grupo ‘Lodos activados y similares’ se encontrarán PTAR con procesos, eficiencias y calidad de agua residual tratada sustancialmente diferentes, dado que existen diferencias inevitables en aspectos como la calidad del agua residual bruta, las rutinas operativas, la calidad del proyecto, la calidad de los equipos y dispositivos instalados, la edad y el estado de mantenimiento de los activos, el nivel de automatización y control, y la experiencia del equipo de operación.

Sin embargo, en general, la calidad media de un efluente proveniente de un proceso de lodos activados será mayor que la de un proceso netamente anaerobio, que a su vez será superior a la de un sistema dotado solo de etapa primaria, lo que justifica la simplificación adoptada en el agrupamiento.



4 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

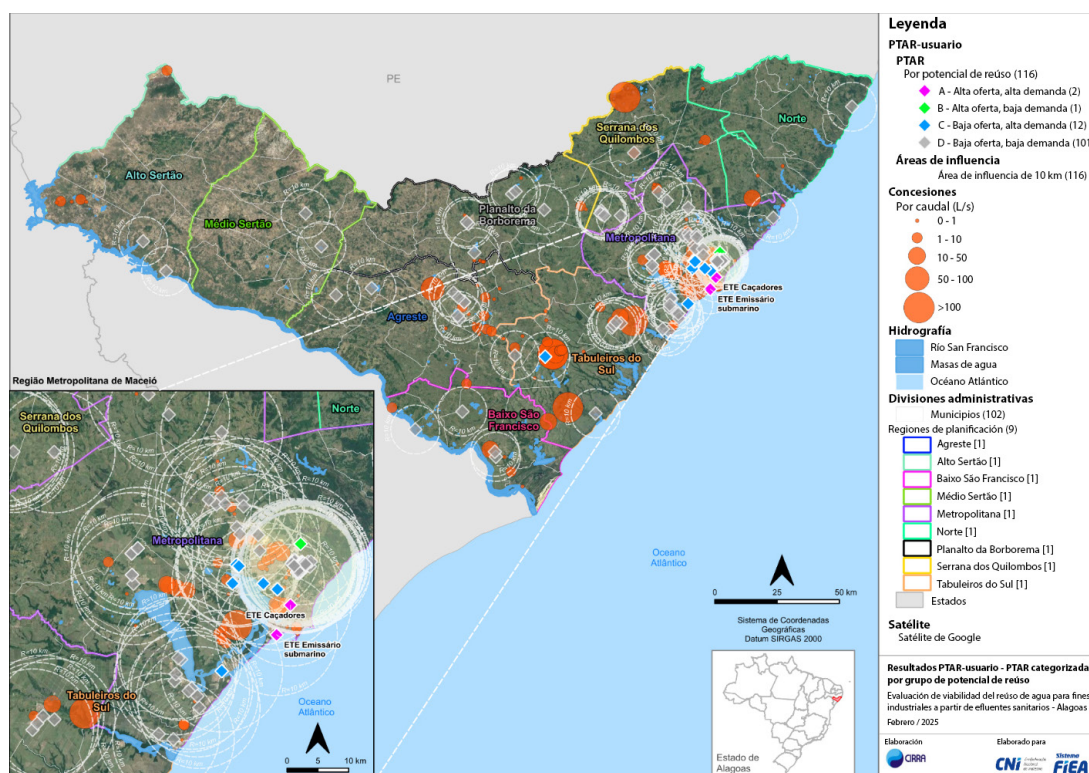
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las dos metodologías expuestas anteriormente: el modelo **PTAR-usuario** (explicado en el Ítem 4.1) y el **IAR** (explicado en el Ítem 4.2). El estudio más reciente fue el de Alagoas, finalizado en 2025. Al ser este el más actual, las metodologías y enfoques adoptados están más refinados que los de los demás estudios y, por ello, se presentarán detalles de dicho estado con mayor profundidad.

4.1 OPORTUNIDADES DE REÚSO MEDIANTE EL MODELO PTAR-USUARIO

Los principales resultados del modelo PTAR-usuario son los mapas de superposición de las PTAR y los usuarios, así como el agrupamiento de las plantas de acuerdo con su potencial de reúso.

La Figura 19 muestra el mapa de superposición de PTAR y concesiones para el estado de Alagoas, así como los radios de 10 km alrededor de las plantas. Se destaca la Región Metropolitana de Maceió (capital del estado), dado que posee un elevado número de PTAR e industrias.

FIGURA 19 – Superposición de PTAR, concesiones y radio de 10 km alrededor de las PTAR – estado de Alagoas



Fuente: CNI (2025).

Los lugares donde existe proximidad entre las PTAR existentes y los usuarios industriales están concentrados en la Región Metropolitana de Maceió y en la Región de Planificación de Tabuleiros do Sul, con algunos casos aislados en municipios como Arapiraca y Penedo.

Cada una de las 116 PTAR fue evaluada teniendo en cuenta las concesiones de captación para fines industriales identificadas. Las concesiones contenidas en cada región formada por la circunferencia fueron computadas, lo que dio como resultado la sumatoria de los caudales concesionados (ΣQ_{con}) y la cantidad de concesiones para cada una de las PTAR. Así, naturalmente, aquellas ubicadas más cerca de los usuarios industriales de agua tendrán una mayor ΣQ_{con} , indicando un mayor potencial para la práctica del reúso.

Como resultado, se llegó al panorama presentado en la Tabla 17. De las 116 PTAR, 2 están en el Grupo A, 1 en el Grupo B, 12 en el Grupo C y las otras 101 se encuentran en el Grupo D. Es decir, los Grupos A, B y C suman 15 PTAR.

TABLA 17 – PTAR clasificadas según el grupo de potencial de reúso – estado de Alagoas

Grupo / PTAR	Q_{PTAR} (L/s)	ΣQ_{con} (L/s)
A - Alta oferta, alta demanda (2 PTAR)	1.978,0	-
PTAR Emisario submarino (Maceió)	1.740,0	488,9
PTAR Caçadores (Maceió)	238,0	532,0
B - Alta oferta, baja demanda (1 PTAR)	360,0	-
ETE Benedito Bentes (Maceió)	360,0	66,7
C - Baja oferta, alta demanda (12 PTAR)	17,1	-
PTAR Parnaíba (Maceió)	3,5	528,5
PTAR Amazonas 1 (Maceió)	3,5	570,3
PTAR Amazonas 2 (Maceió)	2,5	542,5
PTAR Recanto da Ilha (Maceió)	1,4	390,1
PTAR Tocantins (Maceió)	1,2	584,2
PTAR Viviendas do Alto 2 (Maceió)	0,9	567,0
PTAR Viviendas do Alto 3 (Maceió)	0,9	567,0
PTAR Viviendas do Alto 1 (Maceió)	0,9	567,0
PTAR João Meire (Santa Luzia do Norte)	0,8	617,4
PTAR Parque Petrópolis 2 (Maceió)	0,7	544,6
PTAR Parque Petrópolis 1 (Maceió)	0,7	544,6
PTAR Teotônio Vilela (Teotônio Vilela)	SD	1.440,7
D - Baja oferta, baja demanda (101 ETEs)	545,7	-
Total	2.900,8	-

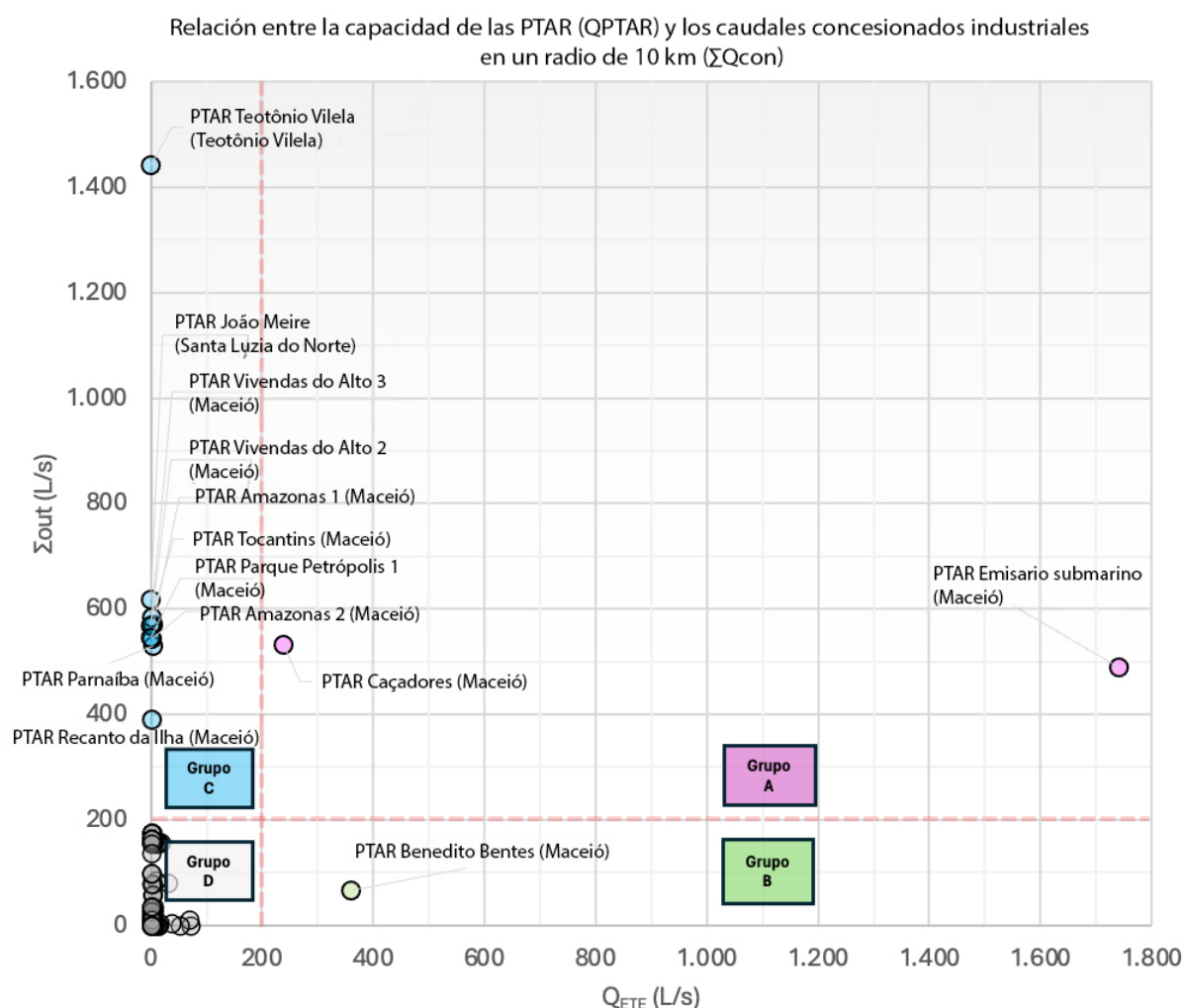
Q_{PTAR} : caudal de referencia de la PTAR (ver ítem 4.3.3.1). ΣQ_{con} : sumatoria de los caudales concesionados para la industria contenidos en el radio de 10 km alrededor de la PTAR. SD: Sin datos.

Fuente: CNI (2025).

Vale la pena recordar que para un número importante de PTAR no existe información de caudal. Es probable que la mayoría de estas tengan capacidades muy reducidas y ciertamente no poseen caudales por encima de 200 L/s para poder ser clasificadas en el Grupo A o Grupo B.

El gráfico de la Figura 20 muestra cada una de las 116 PTAR de acuerdo con su caudal de referencia (Q_{PTAR} , eje "x") y la sumatoria de las concesiones industriales cercanas (ΣQ_{con} , eje "y"), así como su categorización según los grupos A, B, C y D.

FIGURA 20 – PTAR según potencial de reúso y grupo – estado de Alagoas



Fuente: CNI (2025)

Al profundizar en la evaluación de las dos regiones con mayor potencial (Región Metropolitana de Maceió y Región de Tabuleiros do Sul), se tiene:

4.1.1 REGIÓN METROPOLITANA DE MACEIÓ

- La RM de Maceió contempla 13 municipios, siendo Marechal Deodoro, Maceió, Pilar y Rio Largo los más significativos en términos de demanda industrial de agua.
- Concentración moderada de concesiones industriales: Posee el mayor número de concesiones (73), pero solo el segundo mayor caudal total concesionado (688,9 L/s).

- Región con un elevado número de PTAR: Son 77 PTAR, que suman 2.592 L/s. La mayor parte de estas PTAR son sistemas aislados de pequeña escala (pozo séptico con filtro) localizados principalmente en Maceió. No obstante, la capital también cuenta con las PTAR más grandes del estado: la PTAR Emisario Submarino (1.740 L/s), la PTAR Benedito Bentes (360 L/s) y la PTAR Caçadores (238 L/s).
- Presencia destacada de industrias de productos químicos, electricidad y gas, fabricación de bebidas y fabricación de productos alimenticios.
- Prácticamente todos los municipios poseen un índice de tratamiento de aguas residuales por debajo del 20%. Las excepciones son Maceió (31%) y Marechal Deodoro (26%).
- Es la única región que posee PTAR de todos los grupos (A, B, C y D), siendo:
 - **Grupo A (alta oferta, alta demanda): 2 PTAR**, que son la PTAR Caçadores y la PTAR Emisario Submarino.
 - **PTAR Emisario Submarino:** Es la PTAR más grande del estado, con un caudal de 1.740 L/s. Sin embargo, cuenta solo con tratamiento preliminar y realiza el vertimiento de las aguas residuales al mar a través de un emisario submarino. En sus cercanías se localizan concesiones importantes que suman 488 L/s, otorgadas principalmente a Braskem Cloro-Soda en Maceió y a Braskem PVC en Marechal Deodoro.
 - **PTAR Caçadores:** Es la tercera PTAR más grande del estado, con un caudal de 238 L/s y proceso de tratamiento MBBR. Las concesiones en sus cercanías suman 532 L/s, principalmente de Braskem Cloro-Soda en Maceió e industrias localizadas en el Polo Industrial Multisectorial Governador Luiz Cavalcante, en la “parte alta” de Maceió.
 - **Grupo B (alta oferta, baja demanda): 1 PTAR**, la PTAR Benedito Bentes en Maceió.
 - **ETE PTAR Benedito Bentes.** Es la segunda PTAR más grande del estado, con un caudal de 360 L/s y proceso de tratamiento MBBR. Los caudales concesionados cercanos suman 66,7 L/s y se encuentran en el Polo Industrial Multisectorial Governador Luiz Cavalcante. Se destacan usuarios como Norsa Refrigerantes y Braskem.
 - **Grupo C (baja oferta, alta demanda): 11 PTAR.**
 - PTAR de pequeña escala condominales ubicadas en los barrios Santa Amélia, Rio Novo y Petrópolis en Maceió, y en los municipios de Santa Luzia do Norte y en Marechal Deodoro (barrio Santa Rita). Son plantas descentralizadas y generalmente con procesos simplificados, como pozos sépticos con filtro o procesos estrictamente anaerobios.

4.1.2 REGIÓN DE TABULEIROS DO SUL

La región de Tabuleiros do Sul contempla 9 municipios, siendo los más significativos en términos de demanda industrial de agua: Teotônio Vilela, Coruripe y São Miguel dos Campos:

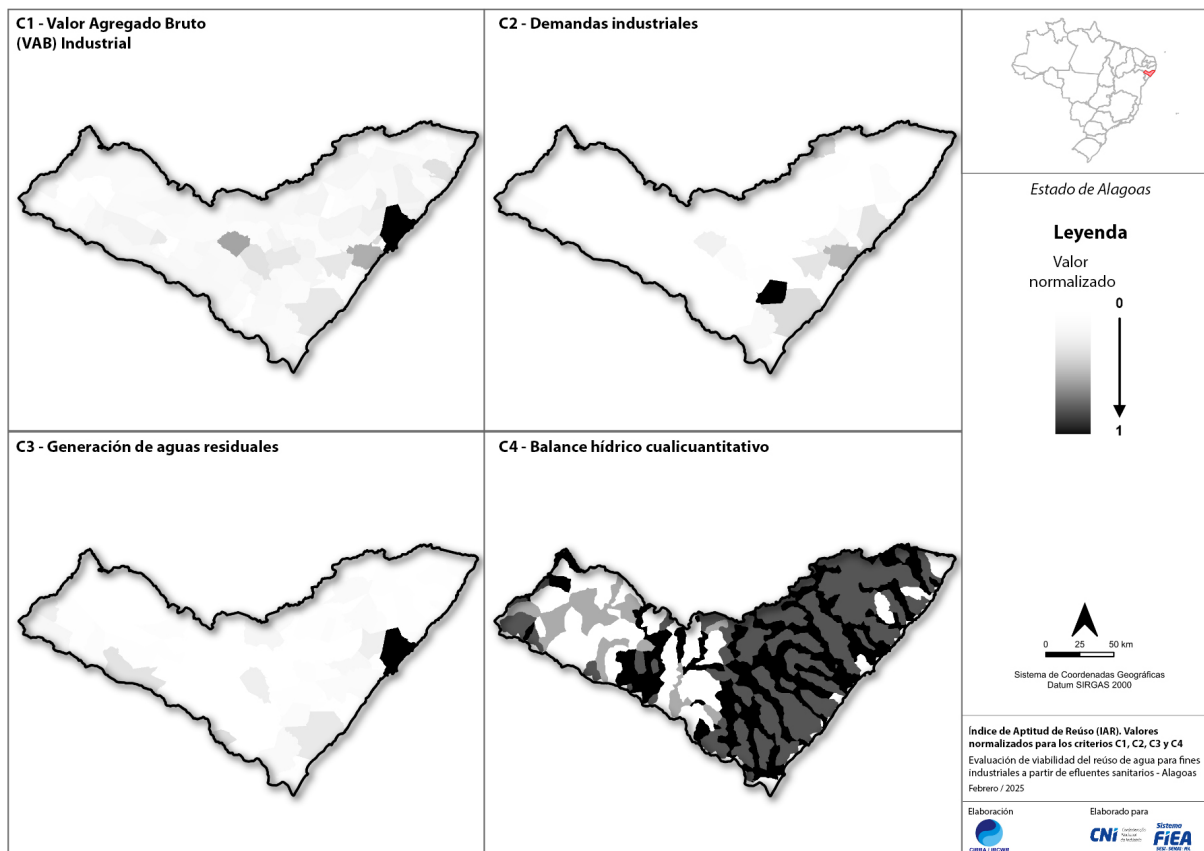
- Alta concentración de concesiones industriales: Posee el mayor caudal total concesionado para la industria en el estado, sumando 1.805 L/s. De estos, 1.437 L/s se encuentran en el municipio de Teotônio Vilela.
- Posee 7 PTAR, aunque para 3 de ellas no se encontraron datos de caudal. Las otras 4 suman una capacidad de 45 L/s y están concentradas, principalmente, en São Miguel dos Campos.
- Presencia destacada de industrias de fabricación de productos alimenticios, electricidad y gas.
- Prácticamente todos los municipios poseen un índice de tratamiento de aguas residuales por debajo del 20%. Las excepciones son Teotônio Vilela (97%) y São Miguel dos Campos (35%).
- Posee PTAR de los Grupos B y D, siendo:
 - **Grupo B (alta oferta, baja demanda):** 1 PTAR, la PTAR Teotônio Vilela.
 - **PTAR Teotônio Vilela:** Ubicada en el municipio del mismo nombre. Cuenta con un proceso de Lagunas de Estabilización (Sistema Australiano). No se encontraron datos oficiales de caudal para esta planta; sin embargo, se realizaron estimaciones de su capacidad, la cual probablemente se sitúa alrededor de los 70 L/s. Los caudales industriales en las cercanías suman 1.440,1 L/s, de los cuales la mayor parte se destinan a la generación de energía eléctrica (Impacto Bioenergía) y a la producción de alimentos (Usinas Seresta, Nordeste Mais Alimentos y Amafil Alagoas).

4.2 OPORTUNIDADES DE REÚSO MEDIANTE EL ÍNDICE DE APTITUD DE REÚSO (IAR)

La identificación de oportunidades de reúso mediante el Método IAR tiene un carácter espacial y es más integral en comparación con el Método PTAR-usuario, ya que abarca la totalidad del estado de Alagoas. Cada porción del estado fue evaluada en relación con los cuatro criterios y dos subcriterios que componen el modelo (ver Ítem 4.2), recibiendo una puntuación final de IAR.

Conforme lo prevé el método del IAR, las áreas con mayor aptitud son aquellas que presentan una convergencia de los atributos que confieren un mayor potencial de reúso, tales como la intensidad y tendencia de la actividad industrial (Criterio C1), las demandas industriales de agua (C2), la oferta de aguas residuales (C3) y la condición del balance hídrico cuali-cuantitativo (C4).

Antes del cálculo del IAR, los valores de cada criterio son normalizados, siendo posible observar su distribución en los mapas de la Figura 21.

FIGURA 21 – Índice de Aptitud de Reúso (IAR). Valores normalizados de los criterios C1 a C4 – estado de Alagoas

Fuente: CNI (2025)

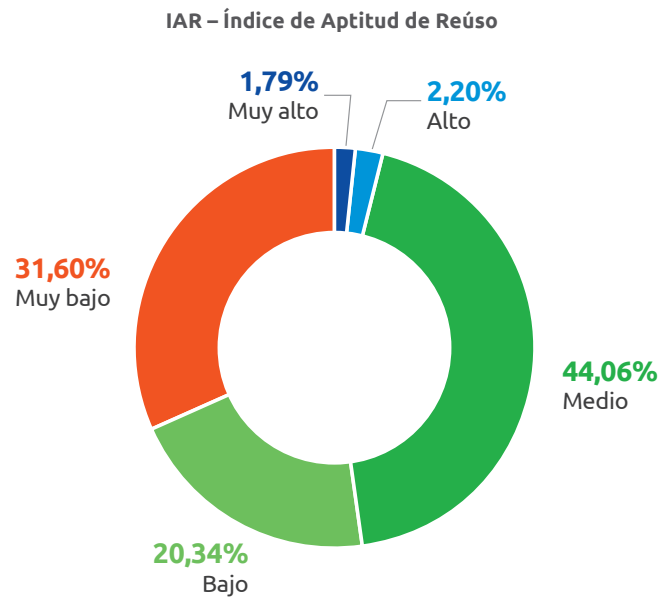
Los resultados obtenidos fueron categorizados según rangos, variando de un IAR “muy bajo” a “muy alto”. La Tabla 18 presenta los rangos definidos y las áreas del estado según el IAR resultante.

TABLA 18 – Clasificación de los valores de IAR y áreas resultantes – estado de Alagoas

IAR	Valores	Área (km²)	% Área
Muy bajo	$IAR \leq 0,05$	8.778	31,6%
Bajo	$0,05 < IAR \leq 0,10$	5.652	20,3%
Medio	$0,10 < IAR \leq 0,25$	12.240	44,1%
Alto	$0,25 < IAR \leq 0,50$	612	2,2%
Muy alto	$IAR > 0,50$	497	1,8%
Total	-	27.780	100,0%

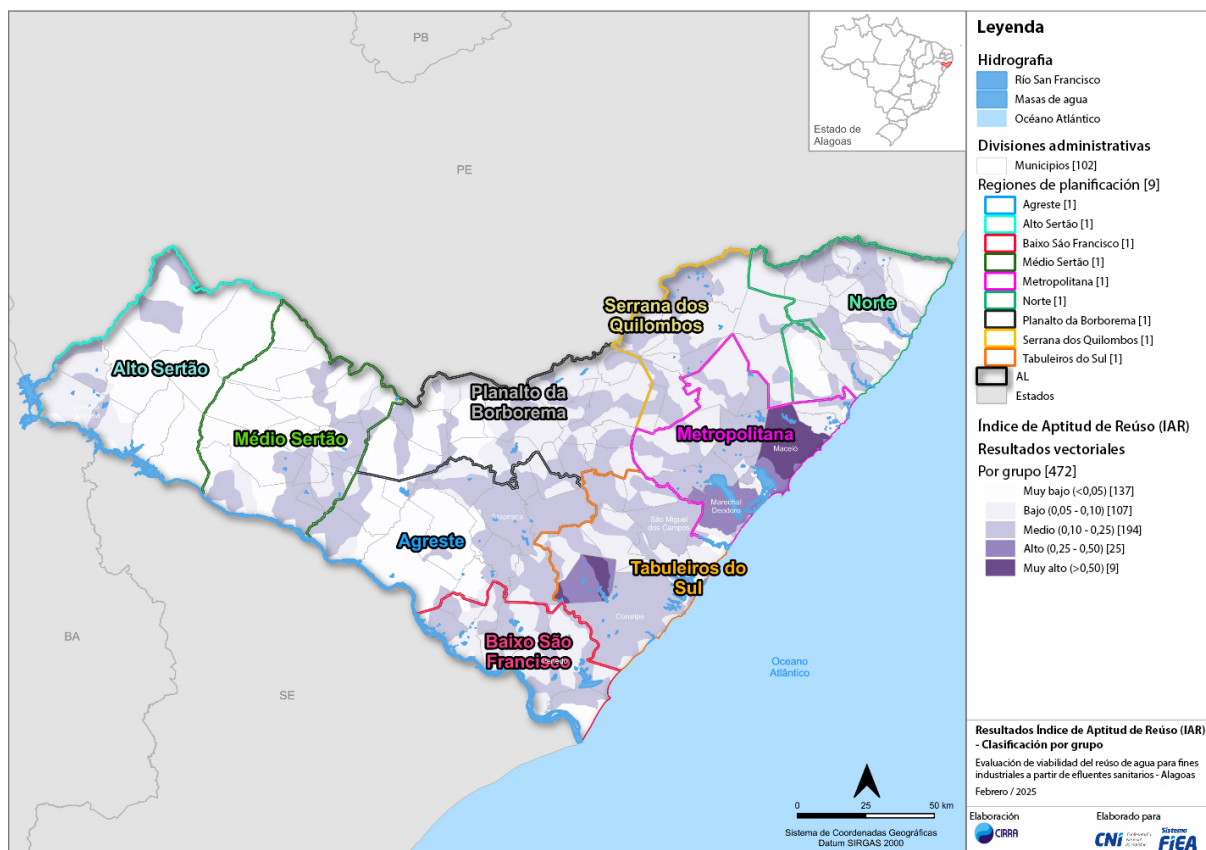
Fuente: CNI (2025).

De la totalidad del territorio, el 1,8% del área fue considerada con un IAR “muy alto” y otro 2,2% con un IAR “alto”. Las áreas con IAR “medio” o “bajo” suman el 64,4%, mientras que el IAR “muy bajo” abarca el restante 31,6% del territorio. La Figura 22 ilustra este panorama de forma gráfica.

FIGURA 22 – Clasificación de los valores de IAR y áreas resultantes – estado de Alagoas

Fuente: CNI (2025).

La Figura 23 muestra los resultados obtenidos de IAR, así como las Regiones de Planificación (RP) del estado.

FIGURA 23 – Resultados de IAR – Clasificación por grupo – estado de Alagoas

Fuente: CNI (2025).

Las áreas con mayor potencial de reúso se localizan en la Región Metropolitana de Maceió, principalmente en Maceió y Marechal Deodoro, y en la Región de Tabuleiros do Sul, en Teotônio Vilela. También existen áreas con potencial moderado en la región de Agreste, principalmente en Arapiraca y sus alrededores. En la Tabla 19 se presenta un resumen por Región de Planificación.

TABLA 19 – Evaluación del IAR por Región de Planificación – estado de Alagoas

Región de planificación	Desempeño general de IAR, características generales y directrices de planificación
Metropolitana de Maceió	IAR muy alto La región es prioritaria en términos de reúso. Concentra los mayores caudales de generación de aguas residuales del estado, así como demandas significativas de agua por parte de la industria, aunque relativamente dispersas por el territorio. La condición del balance hídrico es muy crítica en toda la región, con prácticamente todo el territorio en niveles de criticidad cuali-cuantitativa o cuantitativa. La industria presenta un VAB elevado, con una tendencia sólida de crecimiento en la última década. Se destacan las áreas de los municipios de Maceió y Marechal Deodoro, así como las zonas de Pilar, Rio Largo y Messias.
Tabuleiros do Sul	IAR muy alto Es prioritaria en términos de reúso, principalmente por las altas demandas de agua y por la criticidad hídrica en todo el territorio. Presenta un VAB industrial alto, pero se observa cierta tendencia de contracción de la actividad industrial. La generación de aguas residuales es elevada, principalmente en municipios que también poseen mayor actividad industrial, como Teotônio Vilela, São Miguel dos Campos y Coruripe.
Baixo São Francisco	IAR bajo No presenta áreas con IAR relevantes. A pesar de la criticidad hídrica muy elevada, no existen otras características que favorezcan el reúso. La actividad industrial y las demandas de agua por parte de la industria son bajas. La generación de aguas residuales es moderada, pero no existen demandas industriales significativas.
Agreste	IAR moderado Posee un desempeño moderado en casi todos los criterios. Es una región con VAB y demandas industriales relevantes, principalmente en Arapiraca y municipios cercanos. Es la región que presenta el mayor número de municipios con elevado crecimiento de VAB en la última década, lo que indica una tendencia de crecimiento de la industria y, consecuentemente, de las demandas de agua.
Planalto da Borborema	IAR bajo No presenta áreas con IAR relevantes. A pesar de la criticidad hídrica muy elevada, no existen otras características que favorezcan el reúso. La actividad industrial y las demandas de agua por parte de la industria son bajas. La generación de aguas residuales es moderada, pero no existen demandas industriales significativas.
Médio Sertão	IAR bajo No presenta áreas con IAR relevantes. No existen características que favorezcan el reúso, ni siquiera una criticidad hídrica relevante. La actividad industrial, las demandas de agua por parte de la industria y la generación de aguas residuales son bajas o muy bajas.
Alto Sertão	IAR muy bajo No presenta áreas con IAR relevantes. No existen características que favorezcan el reúso, ni siquiera una criticidad hídrica relevante. La actividad industrial, las demandas de agua por parte de la industria y la generación de aguas residuales son bajas o muy bajas.
Serrana dos Quilombos	IAR bajo No presenta áreas con IAR relevantes. A pesar de la criticidad hídrica muy elevada, no existen otras características que favorezcan el reúso. La actividad industrial y la generación de aguas residuales son bajas. Existe cierta relevancia en términos de uso de agua por parte de la industria, pero se debe básicamente a una única concesión en São José da Laje.
Norte	IAR muy bajo No presenta áreas con IAR relevantes. No existen características que favorezcan el reúso, ni siquiera una criticidad hídrica relevante. La actividad industrial, las demandas de agua por parte de la industria y la generación de aguas residuales son bajas o muy bajas.

4.3 ESTUDIOS DE CASO

A partir de la realización del estudio para el estado de Maranhão, se añadieron a las publicaciones algunos estudios de caso, los cuales consisten en desarrollos más profundos de determinadas oportunidades de reúso detectadas. Para estos casos, se presentan conceptos de ingeniería, verificación de oferta y demanda, definición de la ruta tecnológica de tratamiento, trazado de la conducción (línea de aducción) de distribución de agua de reúso y estimaciones de costos.

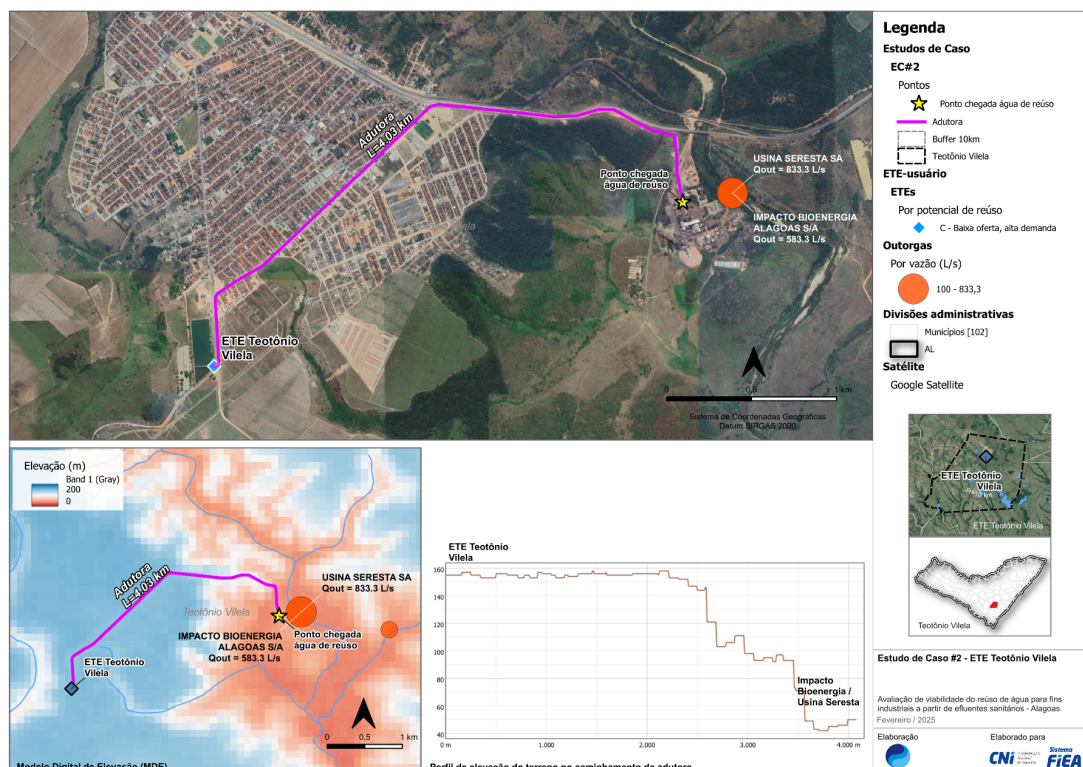
En los siguientes ítems se presentan, de forma resumida, algunos estudios de caso realizados, cada uno con características diferentes. Se encuentran más detalles sobre estos estudios de casos en los estudios de Rio Grande do Sul y Alagoas.

4.3.1 ESTUDIO DE CASO #1 – PTAR TEOTÔNIO VILELA, ALAGOAS – PTAR GRUPO B

Teotônio Vilela es el municipio con los mayores caudales concesionados para la industria en el estado de Alagoas, con un total de 1.437 L/s. El municipio cuenta con una planta, la PTAR Teotônio Vilela, la cual tiene un proceso de Lagunas y un caudal de proyecto de 80 L/s. De acuerdo con el método PTAR-usuario, esta es una planta del **Grupo B**, dado que posee un bajo caudal actual y elevadas demandas cercanas.

La Figura 24 muestra la ubicación de la PTAR, la conducción trazada para la estimación de costos y las 3 concesiones importantes que suman 1.427 L/s, destinadas a la fabricación de productos alimenticios (azúcar) y electricidad y gas (generación de energía eléctrica).

FIGURA 24 – Estudio de caso #1: PTAR Teotônio Vilela, en Teotônio Vilela, Alagoas



El Capex total estimado fue de R\$35,7 millones, y el Opex anual de R\$6,0 millones, (16,8% del Capex). El Opex unitario es de R\$2,38/m³, lo que resulta en valor unitario de **R\$ 4,14**, considerando la inversión del CAPEX en el año cero, un horizonte de 30 años y una tasa de interés del 12% anual (ver ANEXO C). El CAPEX de la conducción representa el 10,4% del total, a diferencia del EC#1, donde el valor superaba el 30%. El Opex de conducción también es bajo, dado que la PTAR se encuentra en una cota superior a la del usuario final. La Tabla 20 presenta el Capex, Opex y costos unitarios obtenidos, así como otros resultados del dimensionamiento.

TABLA 20 – Estudio de Caso #1 – PTAR Teotônio Vilela. Estimaciones de CAPEX, OPEX y costos unitarios

Grupo	Ítem	Unid.	EC1	% del total (cuando sea aplicable)
Caudales	PTAR	-	Teotônio Vilela	-
	QPTAR	L/s	80	-
	Proceso PTAR	-	MBR + 50%OR	-
	QPTAR (agua de reúso)	L/s	66,6	-
Capex	EPAR (Planta de Reúso)	R\$	R\$29.646.676	83,0%
	Tanque de almacenamiento	R\$	R\$919.773	2,6%
	Estación de bombeo	R\$	R\$1.439.897	4,0%
	Conducción	R\$	R\$3.715.755	10,4%
	Total Capex	R\$	R\$35.722.101	100%
Opex	EPAR (Planta de Reúso)	R\$/ano	R\$5.487.702	91,3%
	Tanque de almacenamiento	R\$/ano	R\$41.390	0,7%
	Conducción	R\$/ano	R\$479.895	8,0%
	Total Opex	R\$/ano	R\$6.008.987	100%
Impulsión	L de impulsión (longitud de la línea de impulsión)	Km	4,03	-
	ADT (Altura Dinámica Total) (originalmente AMT)	M	29,6	-
	Potencia requerida	CV	45	-
Variables e indicadores	Capex unitario	R\$MM/(m ³ /s)	R\$ 446,53	-
	Opex unitario	R\$/m ³	R\$ 2,38	-
	Opex anual / Capex	-	16,8%	-
	Costo unitario	R\$/m³	R\$ 4,14	-

Fuente: CNI (2025).

4.3.2 ESTUDIO DE CASO #2 – POLO INDUSTRIAL JOSÉ APRÍGIO VILELA – PTAR PROYECTADA

El Polo Industrial José Aprígio Vilela está ubicado en Marechal Deodoro y es uno de los usuarios industriales de agua más relevantes de Alagoas. Posee ocho concesiones de captación para abastecer las demandas de las industrias, sumando un caudal de 389,1 L/s. De estos, 375 L/s (96%) están concesionados a Braskem, empresa del sector petroquímico.

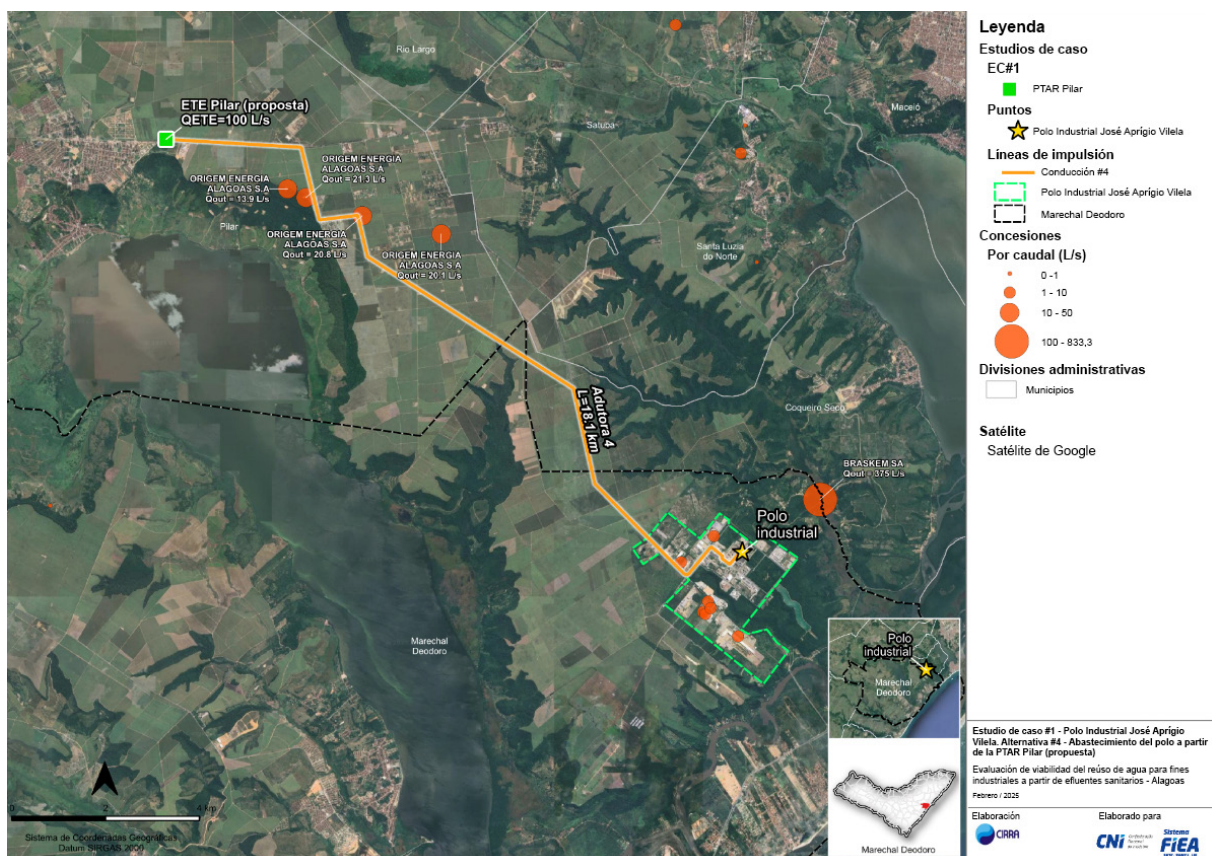
Se propuso que la demanda de agua no potable sea suministrada por una futura PTAR en el municipio vecino, el cual posee un índice de cobertura de tratamiento de aguas residuales cercano a cero. Esta nueva PTAR tendría una capacidad de 100 L/s.

Cabe destacar que esta es una oportunidad no detectada directamente por el método PTAR-usuario, ya que se está proponiendo una planta nueva. Es decir, en este caso, la detección de un *cluster* de consumidores industriales, junto con el levantamiento de datos sobre recursos hídricos y saneamiento básico, permitió proponer una configuración diferente.

Es importante resaltar que la planificación brasileña busca alcanzar la universalización de la recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas para 2033. Asumiendo que se perseguirá esta meta, la construcción a mediano plazo de una PTAR en el municipio de Pilar es una realidad totalmente factible; hacerlo bajo la posibilidad de suministrar agua de reúso a usuarios industriales hidroatensivos configura una oportunidad estratégica desde el punto de vista de los recursos hídricos.

Con esto se llegó al esquema mostrado en la Figura 25, donde se observa la ubicación de la PTAR Pilar, la conducción propuesta y el Polo Industrial.

FIGURA 25 – Estudio de caso #2: Polo Industrial José Aprígio Vilela, en Marechal Deodoro, Alagoas



Fuente: CNI (2025).

El esquema propuesto incluye la implantación de una PTAR con capacidad de tratamiento de 100 L/s, con una ruta tecnológica principal de MBR seguido de OI, con capacidad de producción de 83,3 L/s de agua de reúso⁴ con un estándar compatible para sistemas de enfriamiento. La conducción posee un DN450-500mm⁵ (dependiendo del tramo), una longitud total de 18 km y una cota favorable, ya que la PTAR Pilar propuesta está a una altura 30 m superior al punto de uso.

El Capex total estimado es de R\$57,8 millones, y el Opex anual es de R\$7,9 millones (13,6% del Capex). El Opex unitario es de R\$3,00/m³, lo que resulta en un valor unitario de **R\$ 5,73**, considerándose la aplicación del Capex en el año cero, horizonte de 30 años y una tasa de intereses del 12% anual (ver ANEXO B). Se observa que el costo de la conducción es elevado, representando el 33,3% del CAPEX. Sin embargo, el Opex de conducción es relativamente bajo, siendo el 16,1% del Opex anual. La Tabla 21 presenta los valores de Capex, Opex y los costos unitarios obtenidos, así como los demás resultados del dimensionamiento.

TABLA 21 – Estudio de Caso #2 – Polo Industrial José Aprígio Vilela. Estimaciones de CAPEX, OPEX y costos unitarios

Grupo	Ítem	Unid.	Alternativa A4 – PTAR Pilar abasteciendo el Polo	% del total (cuando sea aplicable)
Caudales	PTAR	-	Pilar	-
	QPTAR	L/s	100	-
	Proceso PTAR	-	MBR + 50%OR	-
	QPTAR (agua de reúso)	L/s	83,3	-
Capex	EPAR (Planta de Reúso)	R\$	R\$35.882.946	62,1%
	Tanque de almacenamiento	R\$	R\$1.077.672	1,9%
	Estación de bombeo	R\$	R\$1.604.833	2,8%
	Conducción	R\$	R\$19.235.205	33,3%
	Total Capex	R\$	R\$57.800.656	100%
Opex	EPAR (Planta de Reúso)	R\$/ano	R\$6.566.668	83,3%
	Tanque de almacenamiento	R\$/ano	R\$48.495	0,6%
	Conducción	R\$/ano	R\$1.265.088	16,1%
	Total Opex	R\$/ano	R\$7.880.251	100%
Impulsión	L de impulsión (longitud de la línea de impulsión)	km	18,14	-
	ADT (Altura Dinámica Total) (originalmente AMT)	m	31,2	-
	Potencia requerida	CV	60	-
Variables e indicadores	Capex unitario	R\$MM/(m ³ /s)	R\$ 693,89	-
	Opex unitario	R\$/m ³	R\$ 3,00	-
	Opex anual / Capex	-	13,6%	-
	Costo unitario	R\$/m³	R\$ 5,73	-

MBR: Biorreactor de membrana. OI: Ósmosis Inversa.

Fuente: CNI (2025).

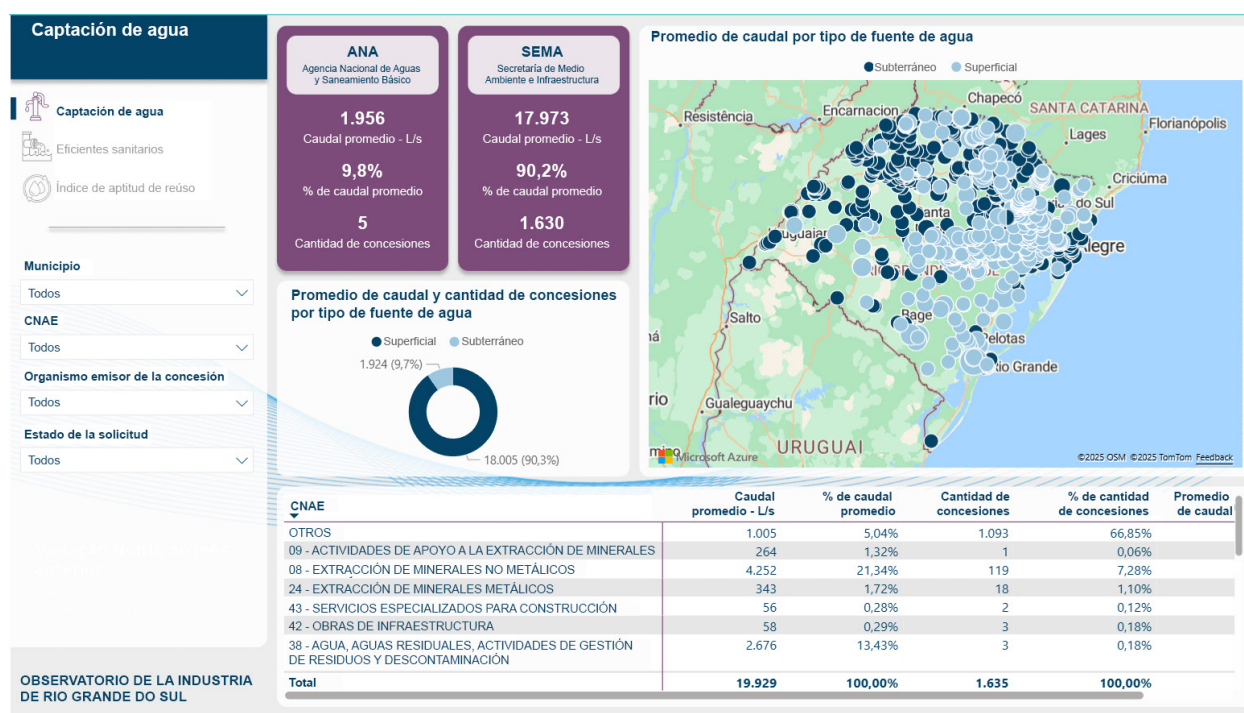
4 El caudal de agua de reúso es menor debido a las pérdidas en forma de lodo biológico en el MBR y de concentrado en la OI. Solo una fracción del agua es tratada por la OI, dado que no se requiere agua desmineralizada para el suministro de los usos definidos.

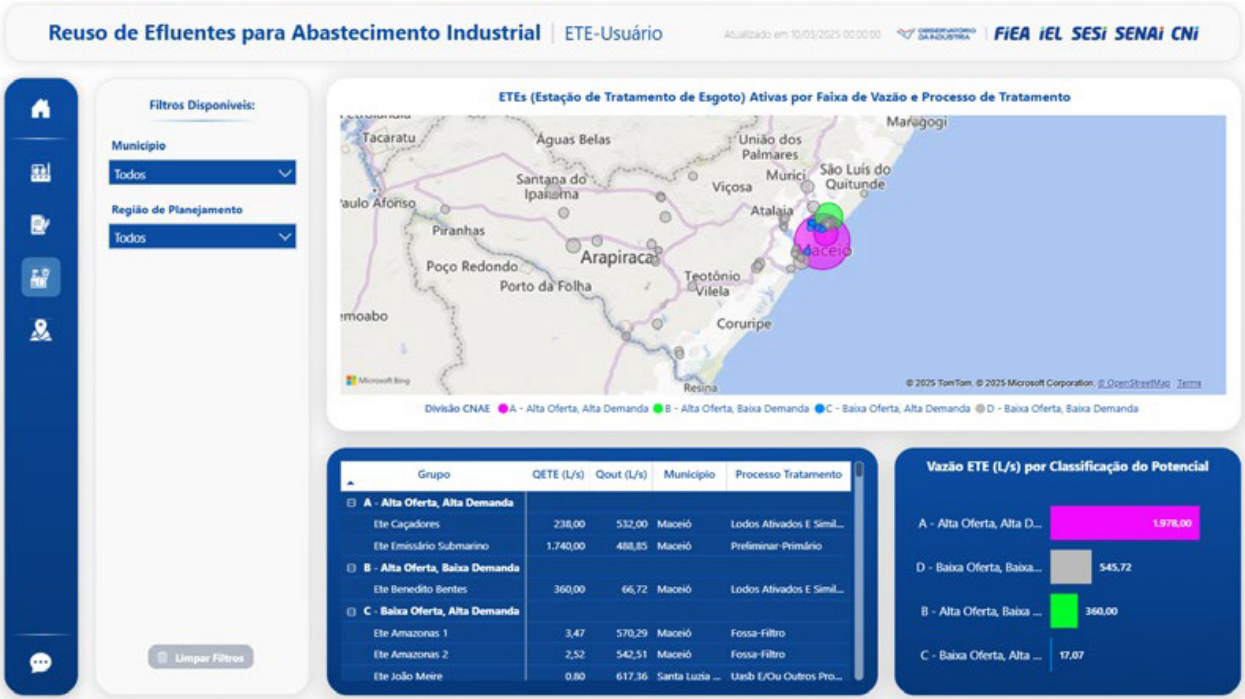
5 DN: diámetro nominal de la tubería.

4.4 PLATAFORMAS DE *BUSINESS INTELLIGENCE* (BI) Y DISPONIBILIDAD PROACTIVA DE DATOS

Dada la naturaleza espacial y la cantidad de resultados generados en los estudios, la comunicación mediante informes es limitada. Por ello, a partir del estudio para el estado de Rio Grande do Sul, se inició el desarrollo de plataformas de *Business Intelligence* (BI) para la disposición de los datos de forma interactiva y dinámica. Los paneles se generaron con los datos de entrada utilizados en los modelos, así como con algunos de los resultados. En esta plataforma, el público en general puede interactuar con tablas, cuadros de mando (*dashboards*) y mapas interactivos. La Figura 26 muestra una captura de pantalla de las plataformas desarrolladas para los estados de [Rio Grande do Sul](#) y [Alagoas](#). El acceso se puede realizar a través de los enlaces o haciendo clic sobre las imágenes.

FIGURA 26 – Captura de pantalla de la plataforma de BI elaborada para los estados de Rio Grande do Sul y Alagoas





Fuente: Plataforma de BI elaborada por las federaciones.

Los datos disponibles no son solamente los resultados del estudio. Se incluyeron también datos de PTAR y de concesiones. Como ya se abordó en el Ítem4.3, una parte muy importante del trabajo se refiere a la solicitud, obtención, verificación, tratamiento y estructuración de estos datos, los cuales, por su naturaleza, son públicos. Por lo tanto, dado el esfuerzo dedicado en todas estas etapas, la plataforma pone a disposición las bases de datos de manera organizada y de fácil acceso, de modo que otros usuarios puedan utilizarlas según sus propios objetivos.



5 CONSIDERACIONES FINALES, DESARROLLOS Y DESAFÍOS

Este documento presentó la experiencia de la CNI en la realización de estudios de reúso industrial en Brasil. Aunque se basa en la experiencia brasileña, el país comparte diversas similitudes con los demás países de América del Sur, lo que permite realizar adaptaciones para la aplicación del estudio en otras naciones.

Los estudios de reúso de la CNI se convierten en una herramienta de planificación que tiene como objetivo suministrar insumos para la toma de decisiones estratégicas en materia de reúso industrial. Su intención no es entregar parámetros de diseño para la ejecución de proyectos de ingeniería, sino poner de relieve el potencial del reúso industrial en las áreas estudiadas, proponiendo formas estructuradas para dicha evaluación.

En un universo de cientos o miles de PTAR e industrias, la tarea de identificar las oportunidades más relevantes no es sencilla. Las metodologías presentadas tienen justamente el objetivo de destacar y caracterizar cuáles son las plantas y áreas que demuestran mayor potencial, abriendo camino a estudios más detallados que puedan convertirse en efectivos proyectos de ingeniería.

La estructura de este documento fue organizada para transmitir de forma clara y objetiva los puntos principales de los estudios brasileños, bajo el siguiente:

- En el **Capítulo 1** se presenta una contextualización general de los estudios de la CNI, con un breve historial de los estados contemplados y destacando los cambios metodológicos realizados a lo largo del tiempo.
- En el **Capítulo 2** se abordan los principales elementos y conceptos relacionados con el reúso industrial. Incluye un panorama sobre recursos hídricos y saneamiento básico en América del Sur; la conceptualización teórica del reúso y la modalidad contemplada en este estudio; las especificidades del reúso industrial (usos suministrados, estándares de calidad y tecnologías); y detalles sobre algunas de las principales experiencias brasileñas.
- En el **Capítulo 3** se presentan las metodologías utilizadas en los estudios de la CNI: el método PTAR-usuario y el método del Índice de Aptitud de Reúso (IAR), cada uno con sus características, alcances y objetivos. En los anexos (ANEXO A, ANEXO B e ANEXO C)

- En el **Capítulo 4** se exponen ejemplos de los resultados derivados de la aplicación de estas metodologías, utilizando como referencia el estado de Alagoas, el cual fue objeto de estudio del trabajo más reciente (2025).

Constan también secciones auxiliares, destacando el GLOSARIO DE TERMINOLOGÍAS BRASILEÑAS, que busca aclarar a públicos no brasileños algunas peculiaridades legales, temas específicos de recursos hídricos y saneamiento, y las clasificaciones de actividades económicas.

Los anexos complementan el contenido del texto, siendo:

- ANEXO A: MODELO DEL ÍNDICE DE APTITUD DE REÚSO (IAR) – ASPECTOS METODOLÓGICOS COMPLEMENTARIOS. Información adicional sobre la estructuración del modelo del IAR, como la asignación por pares (paritaria) de importancia, evaluación de consistencia, normalización y derivación de prioridades.
- ANEXO B: FORMATOS DE SOLICITUD DE DATOS. Materiales utilizados para la solicitud de datos junto a los proveedores de datos.
- ANEXO C: PARÁMETROS PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS. Curvas de costos para Capex y Opex de producción, almacenamiento y distribución de agua de reúso

Brasil comparte innumerables características con los demás países de América del Sur, entre ellas la elevada escasez hídrica en áreas densamente pobladas, los déficits en la recolección y tratamiento de aguas residuales y el gran potencial de crecimiento industrial.

América del Sur alberga biomas muy distintos con patrones de uso y ocupación del suelo igualmente variados y complejos. Posee una disponibilidad hídrica natural media elevada, gracias a cuerpos hídricos como los ríos Amazonas, Paraná, Madeira, San Francisco y Purus, así como los acuíferos Guaraní, Alter do Chão, Amazonas y Puelche. No obstante, esto suele generar la impresión errónea de que todo el territorio suramericano se encuentra en una situación cómoda en términos hídricos. Existen áreas con un elevado estrés hídrico en países con un balance hídrico promedio positivo, como es el caso de Brasil y Colombia. Hay zonas áridas y desérticas en Bolivia, Perú, Chile y Argentina, así como áreas nevadas al sur del continente y en las altitudes de los Andes.

Las áreas con mayor disponibilidad natural no son las más densamente pobladas. La cuenca del Amazonas, por ejemplo, posee una baja densidad demográfica y una disponibilidad hídrica muy elevada, mientras que existen innumerables cuencas densamente pobladas que no poseen disponibilidad natural suficiente. Ejemplos de áreas que enfrentan situaciones de estrés hídrico crónico son las regiones metropolitanas de Santiago, Lima, Bogotá, São Paulo, Fortaleza y Río de Janeiro.

La cobertura limitada de recolección y tratamiento de aguas residuales genera también presión sobre los recursos hídricos, ya que la degradación de los cuerpos receptores reduce la disponibilidad para el consumo humano, resultando en balances hídricos críticos no solo en términos cuantitativos, sino también cualitativos. La necesidad de universalización de los

servicios más elementales, como el suministro de agua potable y el alcantarillado, impone cierta resistencia a la planificación de fuentes alternativas de agua, ya que es común que los operadores de saneamiento básico entiendan que la diversificación de la matriz hídrica debe ocurrir tras el cumplimiento de estas metas básicas.

Por ello, raramente existen metas y planes objetivos que incluyan, efectivamente, el reúso de agua como una medida de adaptación al cambio climático y como elemento estratégico del saneamiento, siendo este un desafío importante en términos de cambio de paradigma por parte de los tomadores de decisiones. Además, el tema del reúso es frecuentemente relegado a un segundo plano por no ser visto como una agenda ambiental tan relevante como otras más mediáticas, como la transición energética, el control de emisiones de carbono y la conservación de biomas.

El reúso requiere un tipo especial de articulación entre diversos actores, ya que interactúa con las áreas de tratamiento de aguas residuales, suministro de agua y gestión de recursos hídricos. En los estados de Rio Grande do Sul y Alagoas, los dos más recientes, un avance importante fue el establecimiento de convenios de cooperación técnica entre las federaciones de la industria y las secretarías de recursos hídricos, con el fin de producir actualizaciones recurrentes de los estudios, dado que las concesiones otorgadas cambian con el tiempo, así como la situación de los recursos hídricos y del saneamiento básico. Algunas de las oportunidades identificadas pasaron a ser efectivamente consideradas tanto por las industrias involucradas como por las empresas de saneamiento tras el lanzamiento del estudio, lo que se ve como un desarrollo positivo y aún en evolución.

El tema de los costos también es central. Los usuarios de agua, principalmente aquellos que poseen captaciones propias, no ven justificación para asumir costos potencialmente más altos, dado que perciben su situación actual como cómoda. Es muy común que el industrial que capta y produce su propia agua no tenga control de los costos involucrados en este proceso (energía eléctrica, químicos e insumos, depreciación de activos, mantenimiento y sustitución de equipos, licencias y mano de obra). Al ser consultado sobre su disposición a pagar por una fuente alternativa de agua, el usuario no posee una referencia clara de su costo actual, lo que nubla su toma de decisiones y genera un rechazo a valores que considera altos, pero que podrían ser, incluso, más bajos que los actuales.

El agua de reúso tiende a ser erróneamente vista como un producto de calidad inferior y que, por ello, debería costar menos que el agua de una fuente convencional. Existe una tendencia de rechazo al agua de reúso, lo que incluso se denomina en la literatura como “efecto asco” (*yuck factor*). Este cambio de mentalidad es de fundamental importancia para la difusión de la práctica del reúso, teniendo en cuenta que determinados sectores pueden ser más sensibles a este tema. Existen relatos de industrias de los segmentos de alimentos y bebidas que no llevaron adelante iniciativas de reúso por temor a la difusión de noticias falsas (*fake news*) sobre el uso de agua de reúso.

La problemática de los datos sobre agua y saneamiento (*water-related data*) es internacionalmente conocida y fue uno de los temas principales del Foro Mundial del Agua de 2019. Como se abordó en este documento, la obtención y utilización de datos relativamente simples, como concesiones y PTAR, requiere diversas etapas de solicitud, evaluación, revisión y estructuración de las bases de datos. Los datos sobre agua son complejos y muchas veces no están debidamente estructurados para su uso; son suministrados y organizados por múltiples agentes, cada uno con culturas de datos y objetivos diferentes. Raramente están disponibles públicamente en formato, cantidad y calidad suficiente; además, aún existen innumerables bases de datos que ni siquiera han sido digitalizadas.

Por ello, la creación y mantenimiento de las plataformas de BI (ver Ítem 4.4) tienen justamente el objetivo de simplificar la difusión de información, poniendo a disposición de forma proactiva los datos recolectados y los resultados de los estudios.

La regulación del reúso no fue abordada directamente en este documento, pero es un punto fundamental. Cada país o estado puede establecer criterios distintos. A modo de ejemplo, los enfoques a nivel nacional de Brasil y Colombia son sustancialmente diferentes. En Brasil, la Resolución N° 54/05 del Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) es el único texto nacional sobre el tema y establece de forma sucinta las modalidades de reúso no potable. En Colombia, por su parte, la Resolución 1256/21 establece estándares de calidad para determinados usos (agrícola), diferencia el reúso de la recirculación del agua y define que es necesaria una concesión para el uso de agua de reúso.

La realización de estudios similares en otros países de América del Sur enfrentará desafíos específicos. Se estima que los principales se relacionan con la disponibilidad y utilización de datos de saneamiento y recursos hídricos; el estado de la regulación sobre el reúso; la percepción sobre la problemática de la escasez hídrica y la necesidad de diversificar las fuentes; y la resistencia al cambio de paradigma. La propia manera en que el saneamiento está organizado en cada país, así como la información disponible a nivel nacional, influyen profundamente en la forma en que se pueden realizar los estudios de potencial de reúso, siendo necesarias adaptaciones según la realidad de cada región.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUEDUCT. **Water Risk Atlas**. Disponible en: https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w_awr_def_tot_cat&lat=30&lng=-80&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&threshold&timeScale=annual&year=baseline&zoom=3s. Acceso el: 02 jul. 2025.

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO - BID. **Nota técnica nº IDB-TN-01945**. El estado del sector agua, saneamiento y residuos sólidos en Uruguay: diagnóstico y perspectivas. 2020. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-estado-del-sector-agua-saneamiento-y-residuos-solidos-en-Uruguay-Diagnostico-y-perspectivas.pdf>. Acceso el: 02 jul. 2025.

CONFEDERACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA - CNI. **Reúso de aguas residuales para abastecimiento industrial**: evaluación de la oferta y la demanda en el estado de Maranhão. Brasilia, 2020. Disponible en: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2021/3/reuso-de-efluentes-para-abastecimento-industrial-avaliacao-da-oferta-e-da-demanda-no-estado-do-maranhao-2052/>. Acceso el: 02 jul. 2025.

CONFEDERACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA - CNI. **Reúso de aguas residuales para abastecimiento industrial**: evaluación de la oferta y la demanda en el estado de Rio Grande do Sul. Brasilia, 2024. Disponible en: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2024/4/reuso-de-efluentes-para-abastecimento-industrial-avaliacao-de-oferta-e-da-demanda-no-estado-do-rio-grande-do-sul/>. Acceso el: 02 jul. 2025.

CONFEDERACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA - CNI. **Reúso de aguas residuales para abastecimiento industrial**: evaluación de la oferta y la demanda en el estado de Alagoas. Brasilia, 2025. Disponible en: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2025/3/reuso-de-efluentes-para-abastecimento-industrial-2547/>. Acceso el: 02 jul. 2025.

FUKASAWA, Bruno Nogueira. **Propuesta de modelos de apoyo a la decisión en la planificación de reúso de agua**. 2021. Tesis (Maestría en Ingeniería Hidráulica) - Escuela Politécnica, Universidad de São Paulo, São Paulo, 2021. doi:10.11606/D.3.2021.tde-27032021-114711. Acceso el: 05 mar. 2024.

MIERZWA, J. C.; ESPÍNDOLA, J.; HESPANHOL, I. **Agua en la industria**: uso racional y reúso. 2. ed. rev. y actual. São Paulo: Oficina de Textos, 2024.

UN-WATER. **Programa de las Naciones Unidas para el agua**: progreso de los indicadores del objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 6.3. Disponible en: <https://sdg6data.org/en/indicator/6.3.1>. Acceso el: 28 jul. 2025.



GLOSARIO DE TERMINOLOGÍA BRASILEÑAS

Con el fin de facilitar la comprensión del contenido de este informe por parte de un público no brasileño, a continuación, se presentan algunas especificidades relacionadas con los temas de saneamiento y recursos hídricos.

Unidades de la Federación (o estados) y Unión

- Brasil es una federación que cuenta con 27 UF (Unidades de la Federación), equivalentes a los estados/departamentos de otros países. Al ser una federación, los estados gozan de cierta autonomía en relación con algunos temas, aunque todos ellos están en armonía legislativa con la Unión. Los estados tienen sus propias leyes y atribuciones, que, sin embargo, no pueden ser más permisivas que las federales.

Concesiones de derechos de uso del agua

- Las concesiones son instrumentos de gestión de los recursos hídricos, otorgados por los estados o por la Unión. Al recibir una concesión, un usuario determinado adquiere el derecho a disfrutar de un bien determinado durante un tiempo predeterminado y en condiciones específicas. En el caso de las concesiones de uso de recursos hídricos, se pueden conceder diversos tipos de intervención, como la captación de agua para el abastecimiento, el vertido de aguas residuales tratadas o la construcción de presas.
- En el caso de las masas de agua superficiales contenidas dentro de un solo estado o de las aguas subterráneas, corresponde a las autoridades de cada estado otorgar el derecho de uso (concesiones de los estados). En el caso de ríos que atraviesan más de un estado, como el Amazonas, el San Francisco y el Paraná, las concesiones son otorgadas por la Unión (concesiones federales), a través de la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico (ANA). La Tabla 1 resume las diferencias entre las concesiones de los estados y las federales.

TABLA 22 – Tipos de concesiones según el concedente

Tipo de concesión	Ámbito de aplicación	Concedente y disponibilidad de datos
Estadual	• Masas de agua superficiales de los estados, es decir, ríos, presas y lagunas que se encuentran físicamente contenidos en una sola Unidad de la Federación. • Captaciones subterráneas.	Son otorgadas por autoridades estatales (secretarías de recursos hídricos, institutos de medio ambiente, entre otros). Las bases de datos son mantenidas por las autoridades de los estados. Algunos estados ofrecen plataformas para descarga, mientras que otros no.

Tipo de concesión	Ámbito de aplicación	Concedente y disponibilidad de datos
Federal	- Masas de agua superficiales interestatales, como ríos que cruzan dos o más estados. - Captaciones de agua de mar para desalinización.	Son concedidas por la ANA (Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico). Las bases de datos se pueden obtener en: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/regulacao-e-fiscalizacao/outorga/outorgas-emitidas

Finalidades de reúso conforme a la Resolución CNRH n°54/2005

- La Resolución n.º 54/2005 del Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) establece las finalidades del reúso no potable directo en Brasil. Es la única normativa a nivel nacional sobre este tema. A lo largo de este texto, a veces se utilizarán estas modalidades, como en el caso de agrupar ciertos usos (riego paisajístico, extinción de incendios, etc.) en el grupo de “reúso para fines urbanos”.
- En su Art. 3, la resolución CNRH 54/2005 establece las siguientes modalidades de reúso no potable directo:
 - I - reúso para fines urbanos: Utilización de aguas residuales tratadas para riego paisajístico (zonas verdes), lavado de vías y espacios públicos y vehículos, desobstrucción de tuberías, construcción civil, uso en edificaciones, y extinción de incendios, dentro del área urbana;
 - II - Reúso para fines agrícolas y forestales: Aplicación de aguas residuales tratadas para la producción agrícola y el cultivo de plantaciones forestales;
 - III - Reúso para fines ambientales: Utilización de aguas residuales tratadas para la implantación de proyectos de recuperación del medio ambiente;
 - IV - Reúso para fines industriales: Utilización de aguas residuales tratadas en procesos, actividades y operaciones industriales; y,
 - V - Reúso en la acuicultura: Utilización de aguas residuales tratadas para la cría de animales o cultivo de vegetales acuáticos.

Prestación del servicio de saneamiento básico

- Los servicios de saneamiento básico (agua, alcantarillado, drenaje pluvial y gestión de residuos sólidos) son responsabilidad de los ayuntamientos (administración municipal), los cuales pueden, no obstante, optar por conceder su operación a empresas públicas o privadas
- Existe gran diversidad sobre cómo se operan los servicios de agua y alcantarillado en Brasil. En regiones metropolitanas y grandes ciudades, es común que haya concesión a empresas públicas y/o privadas como SABESP, COPASA, CAGECE, Aegea, BRK y GS Inima. En este caso, debido a la fuerte conurbación, es común que una misma empresa opere en varios municipios vecinos. En ciudades más pequeñas, todavía es común que estos servicios sean operados por empresas autónomas municipales.

CNAE: Clasificación Nacional de Actividades Económicas

- Es el sistema de clasificación de actividades económicas definido por la Comisión Nacional de Clasificación (CONCLA). Es un sistema de estandarización oficial de Brasil, derivado de la ISIC (*International Standard Industrial Classification*) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), y equivalente a otros sistemas, como el NAICS (*North American Industry Classification System*) de EE. UU. y NACE (*Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne*) de la Unión Europea. Más información en: [IBGE](#) | [Concla](#) | [Busca online](#).



ANEXO A – MODELO DEL ÍNDICE DE APTITUD DE REÚSO (IAR) – ASPECTOS METODOLÓGICOS COMPLEMENTARIOS

En este apartado se presenta información adicional sobre el desarrollo del modelo del Índice de Aptitud de Reúso (IAR). El modelo se basa en el *Analytic Hierarchy Process* (AHP); los aspectos muy específicos, como detalles de los métodos de análisis de consistencia y derivación de prioridades, no se explorarán extensamente, pudiéndose consultar bibliografía complementaria como Saaty (2008).

Una vez definidos los criterios que componen el modelo (C1 a C4), cada uno de ellos se compara por pares en relación con los demás (comparación por pares) a partir de un número entero que varía de 1 a 9, conforme a las importancias de la Tabla 23.

TABLA 23 – Intensidad de importancia en la comparación por pares

Intensidad	Importancia	Descripción
1	Igual	Ambas actividades contribuyen igualmente al objetivo.
2	<i>Débil</i>	–
3	Moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente una actividad sobre la otra.
4	<i>Moderada +</i>	–
5	Fuerte	La experiencia y el juicio favorecen levemente una actividad sobre la otra.
6	<i>Fuerte +</i>	–
7	Muy fuerte; importancia demostrada	Una actividad es favorecida muy fuertemente sobre la otra; su dominio está demostrado por la experiencia práctica.
8	<i>Muy fuerte +</i>	–
9	Importancia absoluta	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra posee el grado más alto de afirmación posible.

Fuente: adaptado de Saaty (2008)

Es decir, si se considera que un criterio posee una importancia “fuerte” en relación con otro, se asigna un valor igual a 5 en la comparación por pares del primero respecto al segundo, y así análogamente para otras intensidades.

Las importancias asignadas por los autores para los criterios y subcriterios son las presentadas en la Tabla 24 (criterios) y en la Tabla 25 (subcriterios).

TABLA 24 – Matriz de importancia por pares – Nivel 1 – Criterios

Critério	C1 VAB industrial	C2 Demandas industriales	C3 Generación de aguas residuales	C4 Balance hídrico
C1 VAB industrial	1	1/2	2	2
C2 Demandas industriales	2	1	2	2
C3 Generación de aguas residuales	1/2	1/2	1	3
C4 Balance hídrico	1/2	1/2	1/3	1

Fuente: elaboración propia.

TABLA 25 – Matriz de importancia por pares – Nivel 2 – Subcriterios

Subcriterio	C1.1 VAB industrial en 2021	C1.2 Variación % do VAB industrial entre 2011-2021
C1.1 VAB industrial en 2021	1	3
C1.2 Variación % do VAB industrial entre 2011-2021	1/3	1

Fuente: elaboración propia.

Los elementos debajo de la diagonal (naranja) solo reflejan los que están por encima de la diagonal (amarillo), lo que significa que, si C1 tiene una importancia de 2 sobre C3, entonces C3 tiene una importancia de 1/2 sobre C1. La diagonal principal, evidentemente, tendrá siempre valores iguales a 1.

El AHP prevé algunos pasos intermedios, como el cálculo de la Razón de Consistencia (RC), variable que evalúa la consistencia interna de los pesos asignados en la comparación por pares. Este valor debe ser menor o igual a 0,10, según lo establece el método.

La RC se calcula mediante el Índice de Consistencia (IC) y los Índices Aleatorios (IA), otras variables previstas en el método. Las verificaciones se realizan mediante la determinación del autovalor máximo ($\lambda_{\max}$) de la matriz de prioridades para el cálculo del IC y, seguidamente, mediante la utilización del IA para la obtención de la RC. Para este caso, la RC de la matriz es igual a 0,0806, por debajo del límite de 0,10 permitido por el método, demostrando que la asignación por pares entre los criterios es suficientemente consistente.

De las importancias por pares se obtienen las importancias finales (o pesos) de cada criterio. El procedimiento de obtención de las importancias finales a partir de las paritarias se denomina derivación de prioridades, y existen diversas maneras de realizarlo. En este estudio, se utilizó el método de la media de los valores normalizados.

Finalmente, los pesos finales de cada criterio, así como el autovalor máximo ($\lambda_{\max}$) y la Razón de Consistencia (RC) de la matriz, se presentan en la Tabla 26.

TABLA 26 – Pesos finales – Nivel 1 – Criterios

Criterio	Peso (P)	Ranking
C1 – VAB industrial	0,269	2°
C2 – Demandas industriales	0,381	1°
C3 – Generación de aguas residuales	0,222	3°
C4 – Balance hídrico	0,128	4°
Total	1,000	–

$\lambda_{\max} = 4,2152$

Orden de la matriz: 4

RC= 0,0806 < 0,10 – OK

Fuente: elaboración propia.

TABLA 27 – Pesos finales – Nivel 2 – Subcriterios

Criterio	Peso (P)	Ranking
C1.1 – VAB industrial en 2021	0,750	1°
C1.2 - Variación % do VAB industrial entre 2011-2021	0,250	2°
Total	1,000	–

$\lambda_{\max} = 2,000$

Orden de la matriz: 2

RC= 0,000 < 0,10 – OK

Fuente: elaboración propia.

La sumatoria de los pesos de todos los criterios es igual a uno; es decir, cada uno representa un porcentaje de importancia en la obtención del objetivo final del modelo (cálculo del IAR en este caso).

Como ya se explicó, los valores de cada criterio requieren una normalización antes de su uso. Los criterios cuantitativos (C2 y C3) fueron normalizados por transformación lineal y los cualitativos (C1 y C4) por reglas de normalización discretas específicas. La Tabla 28 presenta la normalización aplicada a cada criterio, así como los gráficos con el valor absoluto (eje x) y el normalizado (eje y).

TABLA 28 – Normalización de los valores de los criterios – Nivel 1

Sigla	Función/ regla de normalización
C1 VAB industrial	$x_{norm} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ Convergencia al máximo. Mayores valores de VAB industrial resultan en un mayor valor de C1.

Sigla	Función/ regla de normalización
C2 Demandas industriales	$x_{norm} = \frac{x - x_{mín}}{x_{máx} - x_{mín}}$ Convergencia al máximo. Mayores valores de demandas industriales resultan en un mayor valor de C2.
C3 Generación de aguas residuales	$x_{norm} = \frac{x - x_{mín}}{x_{máx} - x_{mín}}$ Convergencia al máximo. Mayores valores de generación de aguas residuales resultan en un mayor valor de C3.
C4 Balance hídrico cualicuantitativo	Criticidad cualicuantitativa = 1,0 Criticidad cuantitativa = 0,667 Criticidad cualitativa = 0,333 Condición satisfactoria = 0 Convergencia: Una mayor criticidad del balance hídrico conduce a mayores valores de C4.

x_{norm} = valor normalizado. $x_{mín}$ = valor mínimo da serie. $x_{máx}$ = valor máximo da serie. x = valor no normalizado.

Fuente: elaboración propia.

TABLA 29 – Normalización de los valores de los subcriterios – Nivel 2

Sigla	Función/ regla de normalización
C1.1 VAB industrial	$x_{norm} = \frac{x - x_{mín}}{x_{máx} - x_{mín}}$ Convergencia al máximo. Mayores valores de VAB industrial resultan en un mayor valor de C1.1.
C1.2 Variación porcentual anual promedio del VAB en los últimos 10 años	$x_{norm} = \frac{x - x_{mín}}{x_{máx} - x_{mín}}$ Convergencia al máximo. Mayores valores de variación porcentual resultan en un mayor valor de C1.2.

x_{norm} = valor normalizado. $x_{mín}$ = valor mínimo da serie. $x_{máx}$ = valor máximo da serie. x = valor no normalizado.

Fuente: elaboración propia.

ANEXO B – FORMATOS DE SOLICITUD DE DATOS

A. Concesiones de agua (captación)

Para fines de caracterización y mapeo de las demandas industriales en el estado, se solicita la disponibilidad de las bases de datos, en formato editable (.xlsx, .csv, .txt, etc.), de las concesiones de agua de captación otorgadas, con los siguientes datos principales:

- ID (código de identificación);
- Nombre del solicitante;
- Nombre comercial del solicitante;
- CNPJ del solicitante (identificación tributaria);
- Tipo de actividad económica ejercida por el solicitante;
- Clasificación de la actividad económica del solicitante de acuerdo con la tipología CNAE 2.0;
- Tipo de intervención (captación, vertimiento, etc.);
- Finalidad de uso (industrial, urbano, riego, etc.);
- Fuente (superficial, subterránea);
- Vigencia;
- Estado (*status*: otorgada, negada, etc.);
- Caudal concesionado;
- Caudal consumido (si existe);
- Coordenadas (para georreferenciación);
- Otros datos complementarios no mencionados anteriormente.

B. Datos sobre PTAR

Para fines de mapeo de la posible oferta de aguas residuales municipales tratadas para la producción de agua de reúso, así como para la adaptación de la modelación de costos de producción, distribución y almacenamiento de agua de reúso en el estado, se solicita la siguiente información:

1. Datos de las PTAR operadas por la empresa:

- a) ID (código de identificación de la PTAR, si existe).
- b) Nombre de la PTAR.
- c) Municipio.
- d) Municipios atendidos.
- e) Estado (*status*: activa, en proyecto, en obra).
- f) Caudal de proyecto.

- g) Caudal afluente (promedio).
- h) Proceso de tratamiento.
- i) Eficiencia promedio de remoción de DBO.
- j) Coordenadas.
- k) Planes futuros (expansión, desincorporación, etc.) con especificación de cambios de caudal y/o proceso de tratamiento.
- l) Existencia o planificación de iniciativas de reúso en la PTAR, ya sea interno (propia PTAR) o venta/disponibilización a terceros.

2. Tarifas de energía eléctrica aplicadas a la empresa:

- a) En caso de que la Compañía de Energía Eléctrica posea una tarifa diferenciada para la empresa, favor informarlo.

La siguiente plantilla se envía en formato editable para que las empresas la completen. Este formato ha demostrado ser la mejor forma de recibir datos de las empresas de saneamiento.

Sugerencia de estructura de base de datos de PTAR

Obs 1: En “planes futuros”, insertar ampliaciones, desactivaciones, modificaciones de capacidad y/o de proceso de tratamiento.

Obs 2: Obs 2: Otras columnas de datos no presentes en esta sugerencia son bienvenidas.

[illegible]

ANEXO C – PARÁMETROS PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS

Las estimaciones de costos utilizadas en los estudios se obtuvieron de CNI (2020) y Fukasawa (2021) y fueron reajustadas mediante el Índice Nacional de Precios al Consumidor Ample (IPCA). Los costos se descompusieron en **costos de inversión (Capex, capital expenditures)** y de **operación y mantenimiento (Opex, operational expenditures)**. Las funciones de costos utilizadas son las presentadas en la Tabla 30.

TABLA 30 – Síntesis de métodos, fuentes de datos y funciones para la estimación de costos – valores en BRL actualizados a enero de 2025 con base en índices financieros brasileños

Ítem	Capex (Costos de Inversión)	Opex (Costos de Operación y Mantenimiento)
Tratamiento MBR	$Capex_{MBR} = 4,445 \times Q^{-0,154}$ $Capex_{MBR}$ (R\$/m³/ano), Q (m³/s)	$Opex_{MBR} = 0,3238 \times Q^{-0,179} + EE \times TE$ $Opex_{MBR}$ (R\$/m³), Q (m³/s), EE (kWh/m³), TE (R\$/kWh)
Tratamiento OI	$Capex_{OI} = -2,024 \times \ln(Q) + 8,185$ $Capex_{MBR}$ (R\$/m³/ano), Q (m³/s)	$Opex_{OI} = 1,3943 \times Q^{-0,269}$ $Capex_{OI}$ (R\$/m³/ano)
Estaciones de Bombeo	$Capex_{EB} = 0,1558 \times Q^{-0,514}$ $Capex_{EB}$ (R\$/m³/ano)	$Opex_{cond} = \frac{P \times t \times TE + 4,5\% (Capex_{EB} + Capex_{cond})}{Q_{anual}}$ $Opex_{cond}$ (R\$/m³), P (kW), TE (R\$/kWh), t (h/ano), $Capex_{EB}$ (R\$), $Capex_{cond}$ (R\$), Q_{anual} (m³/ano)
Conducciones	$Capex_{cond} = -0,0011 \times 10^{-2} DN^2 + 2,925 DN + 82,4$ $Capex_{cond}$ (R\$/m), DN (mm)	
Almacenamiento	$Capex_{alm} = 6167 \times V^{-0,29}$ $Capex_{alm}$ (R\$/m³ de almacenamiento), V (m³ de almacenamiento)	$Opex_{alm} = 4,5\% \times Capex_{alm} \times V$ $Opex_{alm}$ (R\$/ano), $Capex_{alm}$ (R\$/m³ de almacenamiento), V (m³ de almacenamiento)

$Capex_{MBR}$ costos de inversión MBR

$Opex_{MBR}$ costos de operación MBR

$Capex_{OI}$ costos de inversión OI

$Opex_{OI}$ costos de operación OI

$Capex_{EB}$ costos de inversión de estaciones bombeo

$Capex_{cond}$ costos de conducciones

$Opex_{cond}$ costos de operación de conducción

$Capex_{alm}$ costos de inversión de almacenamiento

$Opex_{alm}$ costos de operación de almacenamiento

$Capex_{EB}$ costos de inversión de estaciones de bombeo

$Opex_{EB}$ costos de operación de estaciones de bombeo

DN diámetro nominal de la tubería

P potencia do conjunto motor-bomba

V volumen de almacenamiento

TE tarifa de energía eléctrica

t tempo de operação

Fuente: CNI (2025).

El cálculo del costo unitario se realizó considerando las funciones de costos de CAPEX y OPEX, una tasa de interés fija y un periodo de retorno de 30 años. Se adoptó el método del Valor Presente Neto (VPN), el cual consiste en traer al valor presente los flujos futuros — considerando descuentos en razón de las tasas de interés — y restar la inversión inicial.

Se adoptaron las siguientes premisas:

- La inversión es económicamente viable en el plazo de retorno estipulado; es decir, $VPN = 0$.
- El tiempo de retorno es igual a 30 años. Este valor se adoptó con base en prácticas habituales en proyectos de infraestructura y es el mismo utilizado en otros estudios de reúso de la CNI.
- La tasa de interés es fija e igual al 12% anual. Este valor también se adoptó con base en la práctica común de ingeniería (generalmente entre el 10% y el 15%) y es el mismo adoptado en otros estudios sobre reúso de la CNI.

El cálculo genérico del VPN se presenta en la Ecuación 3.

$$0 = VPN = -Capex + \sum_{n=1}^N \frac{FC}{(1+i)^n}$$

Ecuación 3

VPN (R\$) valor presente NETO
FC (R\$/año) flujo de caja anual
N (años) período de retorno de la inversión
n (año) año
i (% anual) tasa anual de interés

Específicamente cuando $n = N$ (es decir, al final del tiempo de retorno analizado), la sumatoria $\sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+i)^n}$ se puede calcular analíticamente, como muestra la Ecuación 4.

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+i)^n} = \frac{1 - (1+i)^{-N}}{i} \leftrightarrow n = N$$

Ecuación 4

i (% anual) tasa anual de interés
N (años) período de retorno de la inversión
n (años) año

En este estudio, el Flujo de Caja (FC) es uniforme e igual a la resta de los ingresos anuales menos el $Opex_{anual}$, o . Así, adaptando la Ecuación 3 a las especificidades de este trabajo y considerándose la equivalencia de la Ecuación 2, la tarifa se obtiene mediante la Ecuación 5.

$$0 = VPN = -Capex + \sum_{n=1}^N \frac{FC}{(1+i)^n} \rightarrow Tarifa = \left(\frac{Capex \times i}{1 - (1+i)^{-N}} + Opex_{anual} \right) \frac{1}{Q_{anual}} \leftrightarrow n = N$$

Ecuación 5

VPN (R\$) valor presente neto
Tarifa (R\$/m³) tarifa unitaria
FC (R\$/año) flujo de caja
Capex (R\$) costo de inversión
 Q_{anual} (m³/a~año) caudal anual
 $Opex_{anual}$ (R\$/año) costo de operación anual
N (años) período de retorno de la inversión
n (año) año
i (% anual) tasa anual de interés

CNI

Antonio Ricardo Alvarez Alban
Presidente

DIRECCIÓN DE RELACIONES INSTITUCIONALES

Roberto de Oliveira Muniz
Director de Relaciones Institucionales

Superintendencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad

Davi Bomtempo
Superintendente de Medio Ambiente y Sostenibilidad

Gerencia de Recursos Naturales

Mario Augusto de Campos Cardoso
Gerente de Recursos Naturales

Maria do Socorro Lima Castello Branco
Equipo Técnico

DIRECCIÓN DE COMUNICACIÓN

André Nascimento Curvello
Director de Comunicación

Superintendencia de Publicidad y Medios Sociales

Mariana Caetano Flores Pinto
Superintendente de Publicidad y Medios Sociales

William Homero Rufino da Silva - FSB Comunicação
Producción Editorial

DIRECCIÓN CORPORATIVA

Cid Carvalho Vianna
Director Corporativo

Superintendencia de Desarrollo Humano

Flavia Azevedo Moreira de Moraes
Superintendente de Desarrollo Humano

Gerencia de Desarrollo y Relacionamiento

Carolina Maia Vendramine
Gerente de Desarrollo y Relacionamiento

Alberto Nemoto Yamaguti
Normalización

ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESARIOS DE COLOMBIA - ANDI

Yeison Ivan Montenegro Castañeda
Coordinador de Gestión Corporativa del Agua Centro Nacional del Agua y la Biodiversidad

Dora Moncada Rasmussen
Directora Centro Nacional del Agua y la Biodiversidad

Editorar Multimídia
Proyecto gráfico y maquetación

 www.cni.com.br

 [/cnibrasil](https://www.facebook.com/cnibrasil)

 [@cnibr](https://www.instagram.com/cnibr)

 [/cniweb](https://www.youtube.com/cniweb)

 [/company/cni-brasil](https://www.linkedin.com/company/cni-brasil)

