III CONGRESO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2025

Viabilidad del uso de plasma frío como proceso de oxidación avanzada para tratamiento de lixiviados municipales en Guatemala

Gerardo Oswaldo Ortiz Vanegas – Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, Jeonbuk National University.

02/09/2025





1. Introducción

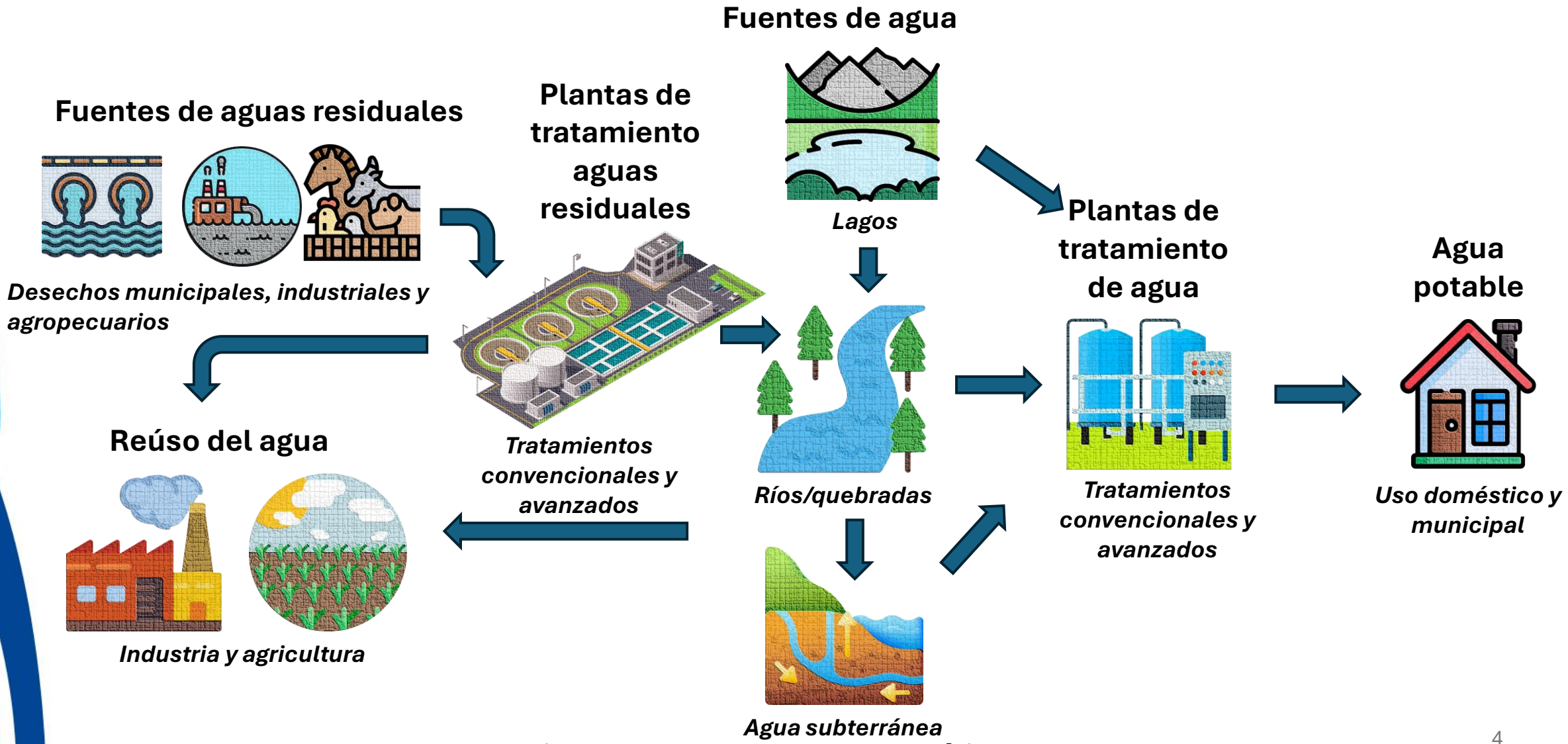
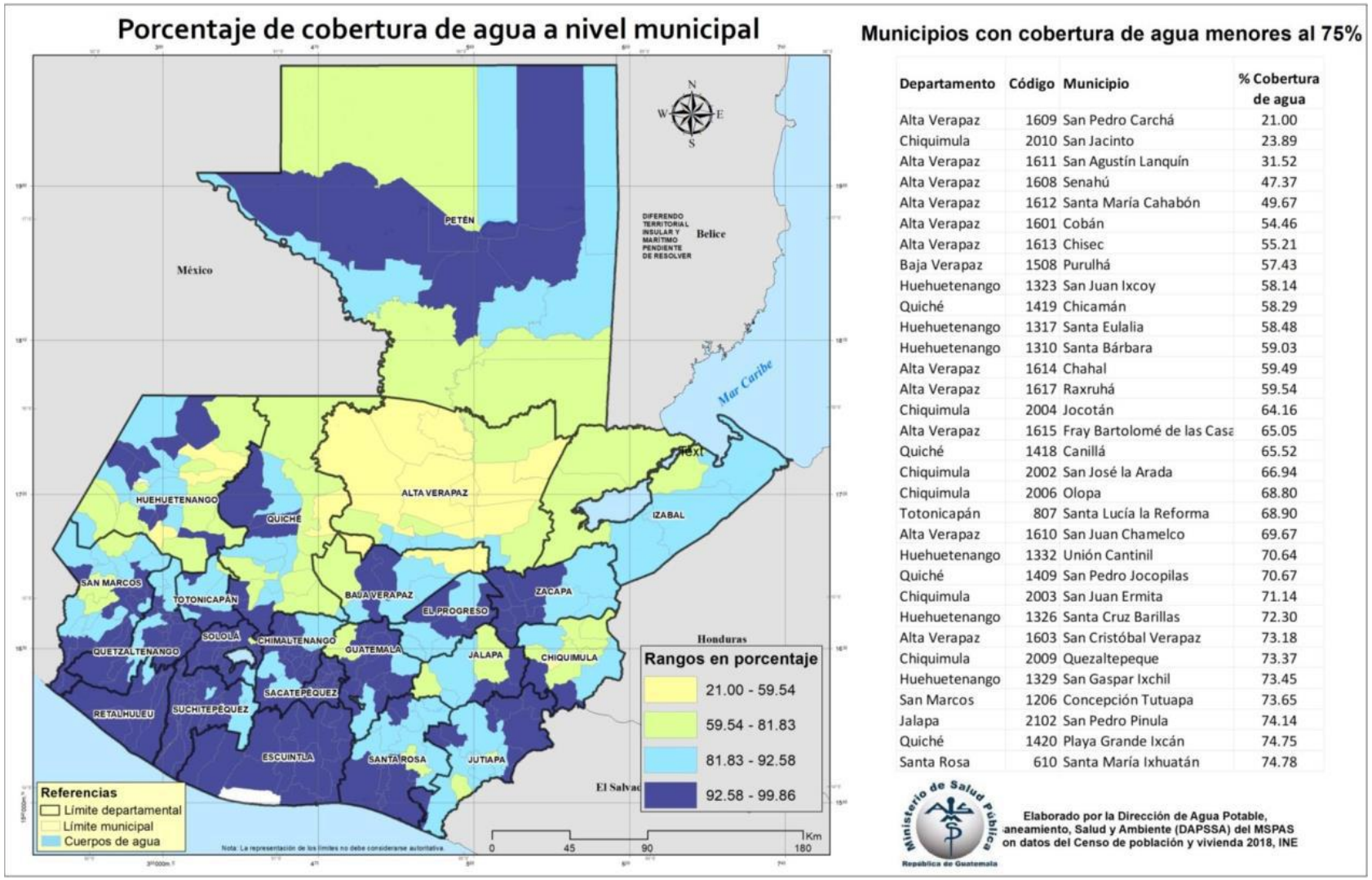


Diagrama no. 1 – Abstracto gráfico

1. Introducción



Municipios con cobertura de agua menores al 75%

Departamento	Código	Municipio	% Cobertura de agua
Alta Verapaz	1609	San Pedro Carchá	21.00
Chiquimula	2010	San Jacinto	23.89
Alta Verapaz	1611	San Agustín Lanquín	31.52
Alta Verapaz	1608	Senahú	47.37
Alta Verapaz	1612	Santa María Cahabón	49.67
Alta Verapaz	1601	Cobán	54.46
Alta Verapaz	1613	Chisec	55.21
Baja Verapaz	1508	Purulhá	57.43
Huehuetenango	1323	San Juan Ixcoy	58.14
Quiché	1419	Chicamán	58.29
Huehuetenango	1317	Santa Eulalia	58.48
Huehuetenango	1310	Santa Bárbara	59.03
Alta Verapaz	1614	Chahal	59.49
Alta Verapaz	1617	Raxruhá	59.54
Chiquimula	2004	Jocotán	64.16
Alta Verapaz	1615	Fray Bartolomé de las Casa	65.05
Quiché	1418	Canillá	65.52
Chiquimula	2002	San José la Arada	66.94
Chiquimula	2006	Olopa	68.80
Totonicapán	807	Santa Lucía la Reforma	68.90
Alta Verapaz	1610	San Juan Chamelco	69.67
Huehuetenango	1332	Unión Cantinil	70.64
Quiché	1409	San Pedro Jocopilas	70.67
Chiquimula	2003	San Juan Ermita	71.14
Huehuetenango	1326	Santa Cruz Barillas	72.30
Alta Verapaz	1603	San Cristóbal Verapaz	73.18
Chiquimula	2009	Quezaltepeque	73.37
Huehuetenango	1329	San Gaspar Ixchil	73.45
San Marcos	1206	Concepción Tutuapa	73.65
Jalapa	2102	San Pedro Pinula	74.14
Quiché	1420	Playa Grande Ixcán	74.75
Santa Rosa	610	Santa María Ixhuatán	74.78

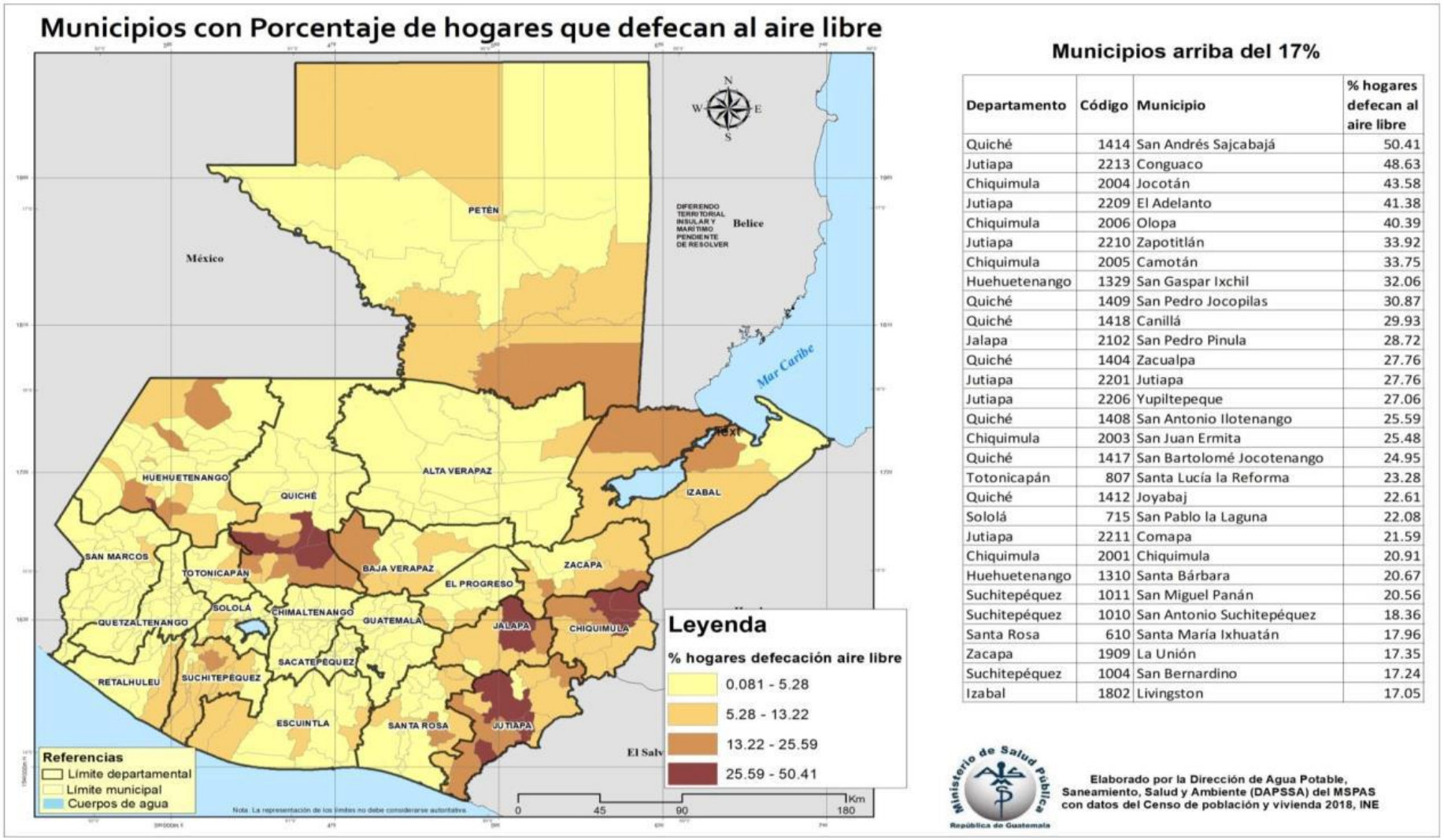
Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social
República de Guatemala

Elaborado por la Dirección de Agua Potable, Saneamiento, Salud y Ambiente (DAPSSA) del MSPAS con datos del Censo de población y vivienda 2018, INE

(MSPAS, 2024)

Imagen no. 1 – Cobertura de agua a nivel municipal

1. Introducción



Municipios arriba del 17%

Departamento	Código	Municipio	% hogares defecan al aire libre
Quiché	1414	San Andrés Sajcabajá	50.41
Jutiapa	2213	Conguaco	48.63
Chiquimula	2004	Jocotán	43.58
Jutiapa	2209	El Adelanto	41.38
Chiquimula	2006	Olopa	40.39
Jutiapa	2210	Zapotitlán	33.92
Chiquimula	2005	Camotán	33.75
Huehuetenango	1329	San Gaspar Ixchil	32.06
Quiché	1409	San Pedro Jocopilas	30.87
Quiché	1418	Canillá	29.93
Jalapa	2102	San Pedro Pinula	28.72
Quiché	1404	Zacualpa	27.76
Jutiapa	2201	Jutiapa	27.76
Jutiapa	2206	Yupiltepeque	27.06
Quiché	1408	San Antonio Ilotenango	25.59
Chiquimula	2003	San Juan Ermita	25.48
Quiché	1417	San Bartolomé Jocotenango	24.95
Totonicapán	807	Santa Lucía la Reforma	23.28
Quiché	1412	Joyabaj	22.61
Sololá	715	San Pablo la Laguna	22.08
Jutiapa	2211	Comapa	21.59
Chiquimula	2001	Chiquimula	20.91
Huehuetenango	1310	Santa Bárbara	20.67
Suchitepéquez	1011	San Miguel Panán	20.56
Suchitepéquez	1010	San Antonio Suchitepéquez	18.36
Santa Rosa	610	Santa María Ixhuatán	17.96
Zacapa	1909	La Unión	17.35
Suchitepéquez	1004	San Bernardino	17.24
Izabal	1802	Livingston	17.05

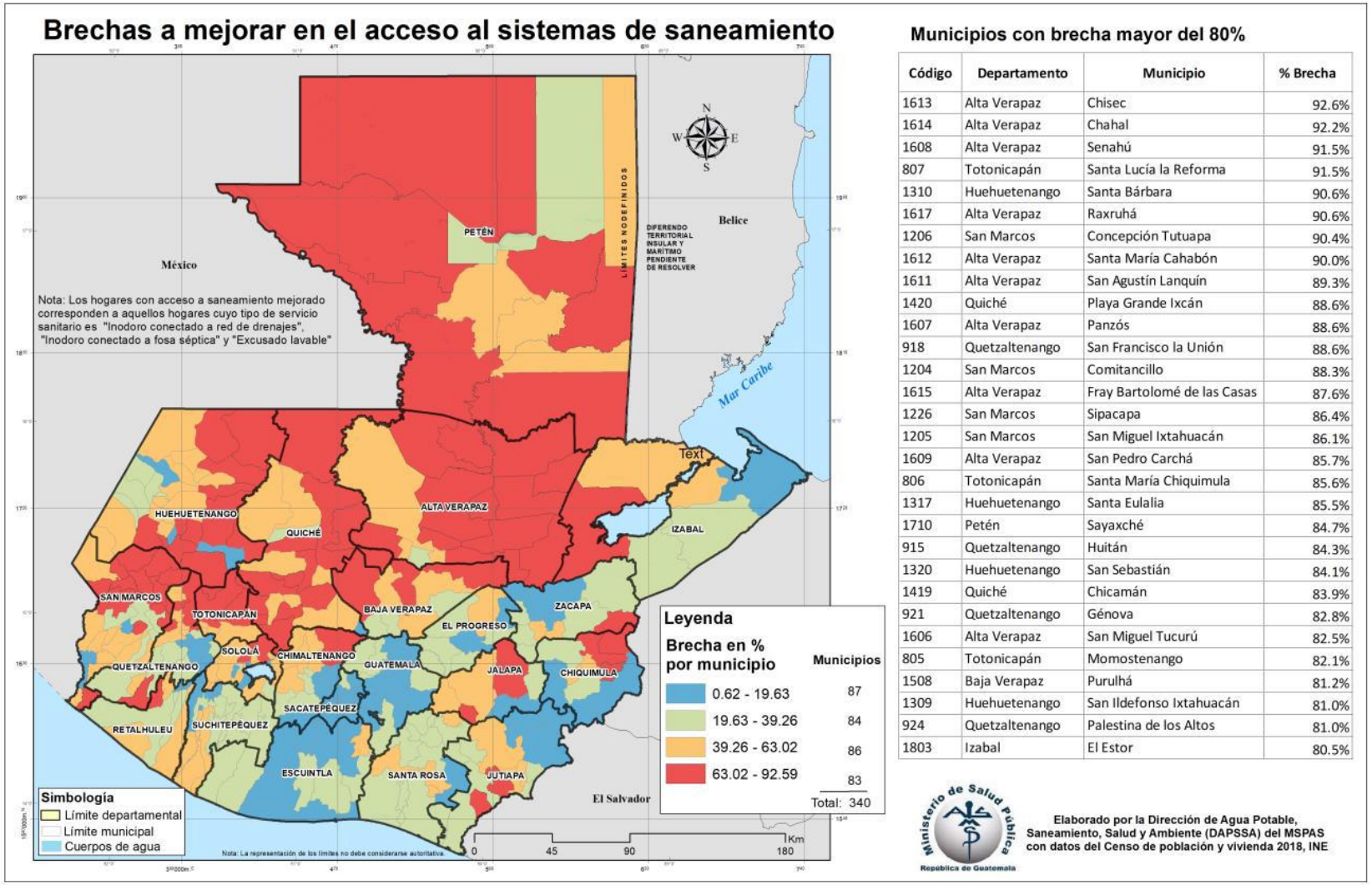
Ministerio de Salud Pública
República de Guatemala

Elaborado por la Dirección de Agua Potable, Saneamiento, Salud y Ambiente (DAPSSA) del MSPAS con datos del Censo de población y vivienda 2018, INE

(MSPAS, 2024)

Imagen no. 2 – Hogares que defecan al aire libre

1. Introducción



Código	Departamento	Municipio	% Brecha
1613	Alta Verapaz	Chisec	92.6%
1614	Alta Verapaz	Chahal	92.2%
1608	Alta Verapaz	Senahú	91.5%
807	Totonicapán	Santa Lucía la Reforma	91.5%
1310	Huehuetenango	Santa Bárbara	90.6%
1617	Alta Verapaz	Raxruhá	90.6%
1206	San Marcos	Concepción Tutuapa	90.4%
1612	Alta Verapaz	Santa María Cahabón	90.0%
1611	Alta Verapaz	San Agustín Lanquín	89.3%
1420	Quiché	Playa Grande Ixcán	88.6%
1607	Alta Verapaz	Panzós	88.6%
918	Quetzaltenango	San Francisco la Unión	88.6%
1204	San Marcos	Comitancillo	88.3%
1615	Alta Verapaz	Fray Bartolomé de las Casas	87.6%
1226	San Marcos	Sipacapa	86.4%
1205	San Marcos	San Miguel Ixtahuacán	86.1%
1609	Alta Verapaz	San Pedro Carchá	85.7%
806	Totonicapán	Santa María Chiquimula	85.6%
1317	Huehuetenango	Santa Eulalia	85.5%
1710	Petén	Sayaxché	84.7%
915	Quetzaltenango	Huitán	84.3%
1320	Huehuetenango	San Sebastián	84.1%
1419	Quiché	Chicamán	83.9%
921	Quetzaltenango	Génova	82.8%
1606	Alta Verapaz	San Miguel Tucurú	82.5%
805	Totonicapán	Momostenango	82.1%
1508	Baja Verapaz	Purulhá	81.2%
1309	Huehuetenango	San Ildefonso Ixtahuacán	81.0%
924	Quetzaltenango	Palestina de los Altos	81.0%
1803	Izabal	El Estor	80.5%

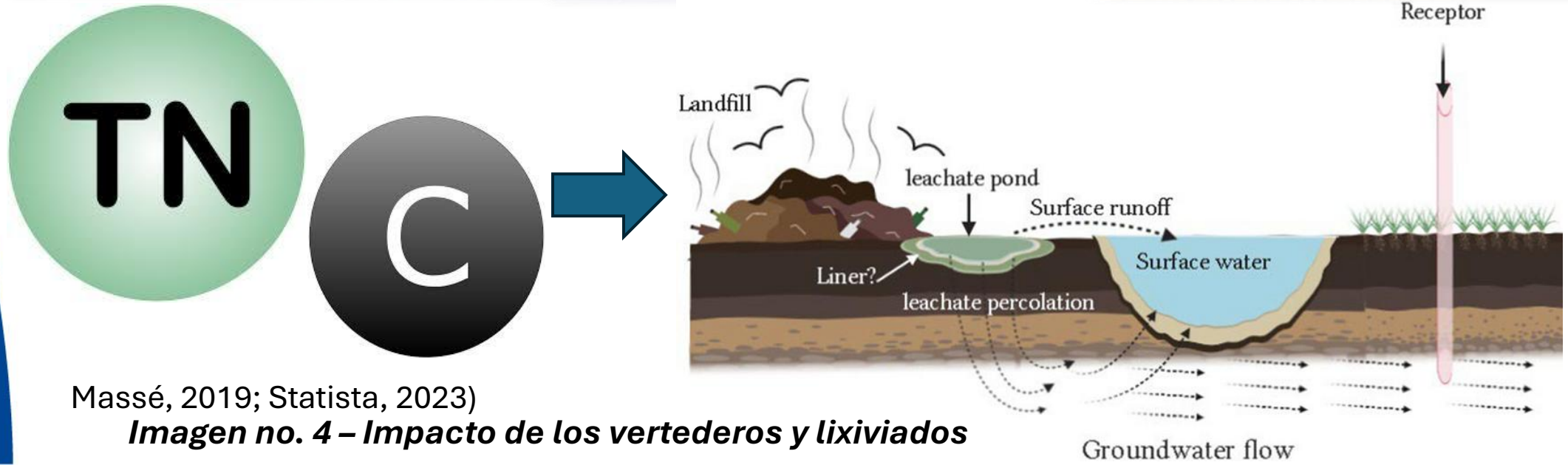
(MSPAS, 2024)

Imagen no. 3 – Acceso a sistemas de saneamiento

1. Introducción

Impacto ambiental de lixiviados y aguas residuales no controladas





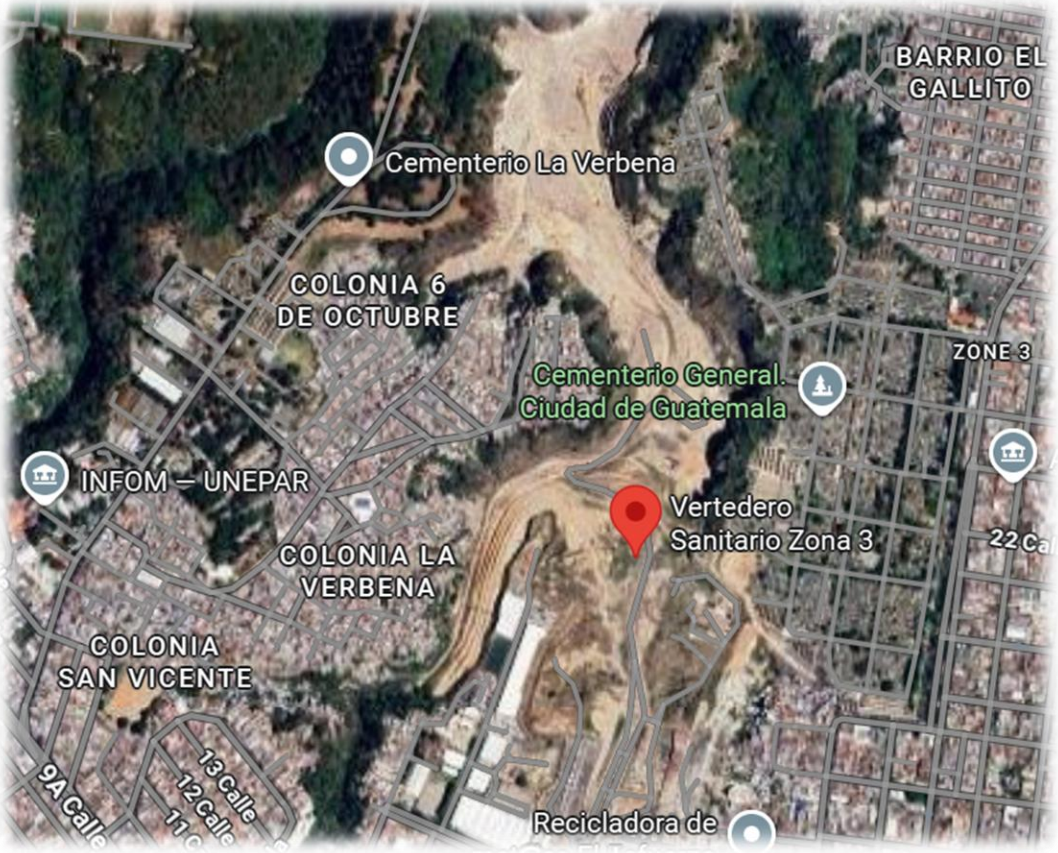
Massé, 2019; Statista, 2023)

Imagen no. 4 – Impacto de los vertederos y lixiviados

1. Introducción

Sitios de disposición final en Guatemala

- Zona 3 – Ciudad de Guatemala:



Inicio de operaciones: 1950-1953

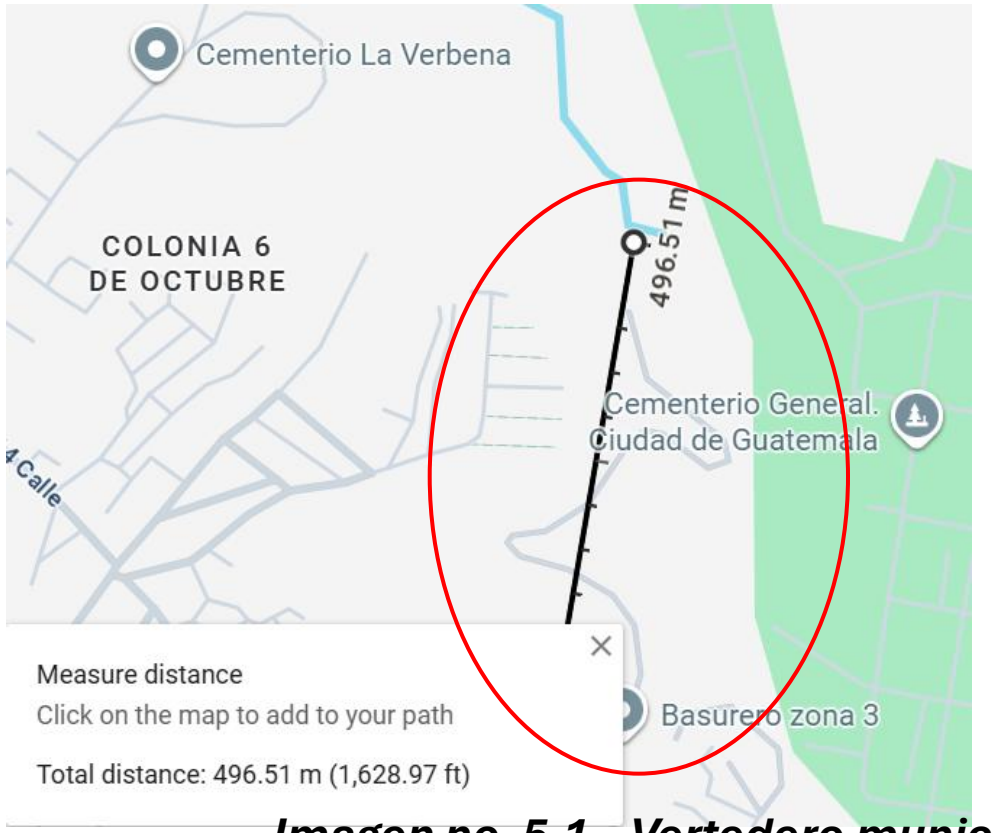
(Google Maps, 2025)

Imagen no. 5 – Vertedero municipal zona 3

1. Introducción

Sitios de disposición final en Guatemala

- Zona 3 – Ciudad de Guatemala:



Distanciamiento del río “La barraca”

(Google Maps, 2025)

Imagen no. 5.1 – Vertedero municipal zona 3

1. Introducción

Sitios de disposición final en Guatemala

- Carretera CA-09 Villa Nueva – Amatitlán:



Imagen no. 6 – Vertedero municipal Villa Nueva - Amatitlán

Inicio de operaciones: 1999

(Google Maps, 2025)

1. Introducción

Sitios de disposición final en Guatemala

- Carretera CA-09 Villa Nueva – Amatitlán:



Distanciamiento del área urbana

(Google Maps, 2025)

Imagen no. 6.1 – Vertedero municipal Villa Nueva - Amatitlán

1. Introducción

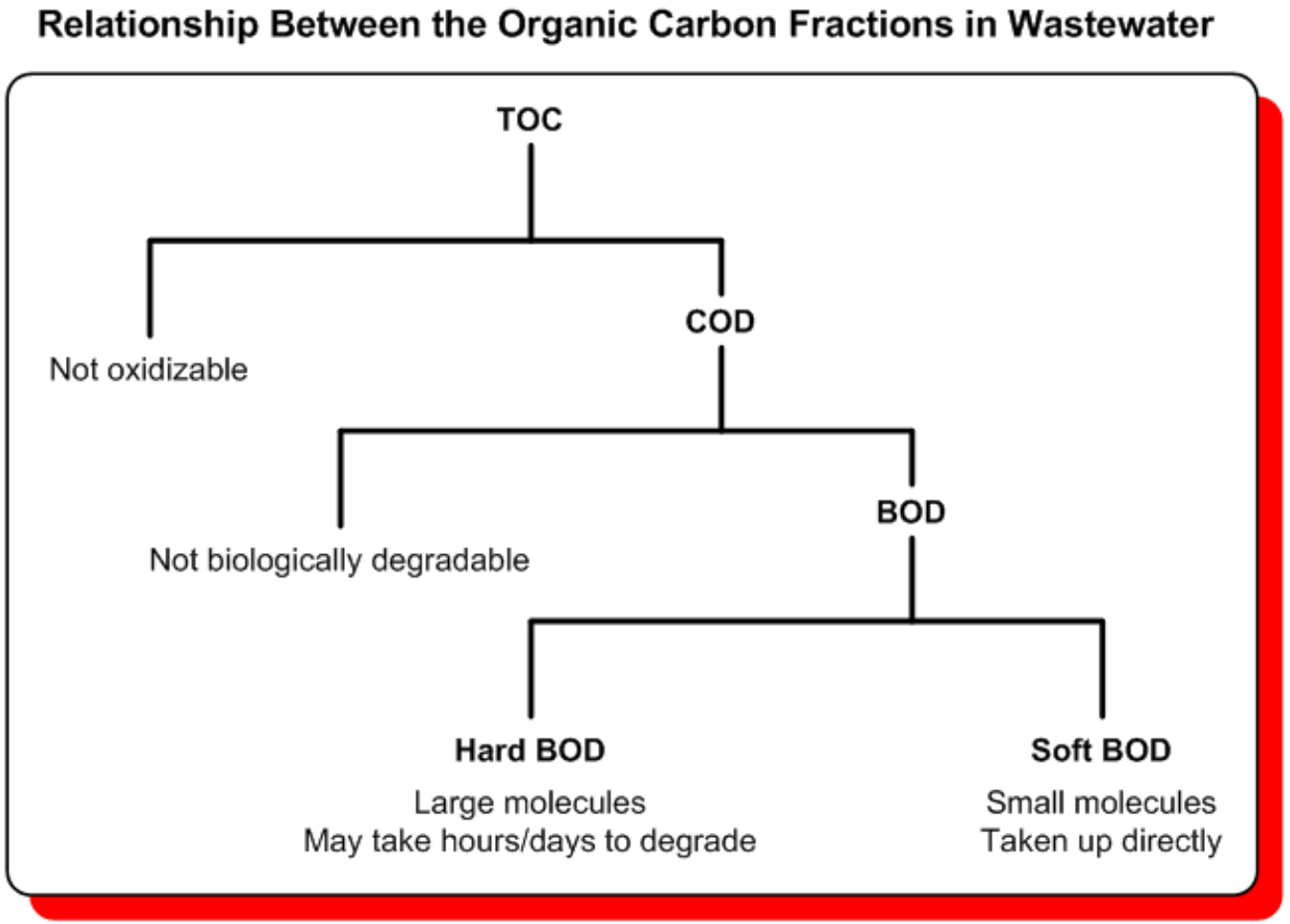
Características de afluentes en el departamento de Guatemala (datos promedio):

Municipio	Guatemala	Mixco	Villa Nueva	Villa Canales	Amatilán	Límites permisibles año 2026 (AG-285-2022)
DBO5 (mg/L)	400.0	377.0	569.0	526.0	285.0	250.0
DQO (mg/L)	743.6	900.0	N/D	963.0	506.0	**N/A**
DBO5/DQO (-)	***0.54***	***0.42***	***N/D***	***0.55***	***0.56***	***N/A***
DQO/DBO5 (-)	***1.86***	***2.39***	***N/D***	***1.83***	***1.77***	***N/A***
Fósforo total (mg/L)	N/D	11.0	13.0	9.0	6.8	40
Nitrógeno total (mg/L)	N/D	55.0	55.0	61.1	21.1	150.0

(MARN, 2022; FUNCAGUA, 2022)

Tabla no. 1 – Características promedio de afluentes en ríos del departamento de Guatemala

1. Introducción



Prueba	Tiempo
DBO (común)	3 - 7 días
DQO	120 min
COT	*15 – 60 min*

(Spencer, 2005)

Imagen no. 7 – Relaciones entre fracciones orgánicas de carbono

1. Introducción

- Relaciones comunes entre TOC,DQO y DBO

Diluciones de aguas residuales	Concentrada (0% dilución)	Moderada (25% dilución)	Diluida (50% dilución)	Muy diluida (75% dilución)
DBO5 (mg/L)	350	250	150	100
DQO (mg/L)	740	530	320	210
COT (mg/L)	*250*	*180*	*110*	*70*
DQO/DBO5 (-)	***2.1***	***2.1***	***2.1***	***2.1***
DQO/COT (-)	***3.0***	***2.9***	***2.9***	***3.0***
COT/DBO5 (-)	0.7	0.7	0.7	0.7

(Henze et al., 2002)

Tabla no. 2 – Relaciones entre fracciones de carbono

1. Introducción

Tratamientos convencionales (agua y aguas residuales)

Tratamientos anaeróbicos	Tratamientos aeróbicos	Tratamientos combinados
• Digestión anaeróbica • Tanques anaeróbicos • Filtros anaeróbicos	• Tanques de aeración • Filtros aeróbicos • Filtros percoladores • Reactores discontinuos de secuenciación • Lodos activados convencionales • ASM, ASM1, etc.	• Reactores discontinuos de secuenciación anaerobic / Sequencing Batch Reactors (ASBR/SBRs) • Procesos A_2O • Sistemas de biofilm anaeróbicos-aeróbicos

Diagrama no. 2 – Tratamiento de aguas convencionales

1. Introducción

Tratamientos convencionales (agua)



(Bressani-Ribeiro, 2018)

Diagrama no. 3 – Tratamiento convencional de agua potable

1. Introducción

Desinfección del agua:

- Procesos convencionales

Cloro	Cloraminas	Ácido peracético
$Cl_2 + H_2O \leftrightarrow H^+ + Cl^- + HOCl$ $HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$	$HOCl + NH_3 \leftrightarrow NH_2Cl + H_2O$ $HOCl + NH_2Cl \leftrightarrow NHCl_2 + H_2O$ $HOCl + NH_2Cl \leftrightarrow NCl_3 + H_2O$	$CH_3CO_3H \leftrightarrow CH_3COOH + H_2O$
(Dang et al, 2016)	(Kinani et al., 2012)	(Ragazzo et al., 2020)

Diagrama no. 4 – Proceso convencional de desinfección

1. Introducción

Desinfección del agua:

- Procesos de oxidación avanzada (agua)

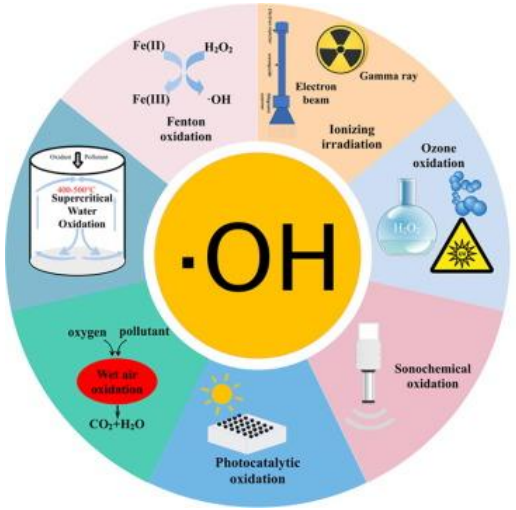
Fotocatálisis	Reacciones Fenton	Ozonificación	Plasma fría
$TiO_2 + hv \rightarrow e^- + h^+$ $h^+ + H_2O \rightarrow \bullet OH + H^+$	$e^- + O_2 \rightarrow \bullet O_2^-$ $\bullet O_2^- + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 + O_2$ $\bullet H_2O_2 + Fe^{2+} \rightarrow \bullet OH + OH^- + Fe^{3+}$	$e + O_2 \rightarrow 2 \bullet O + e^-$ $\bullet O + O_2 \rightarrow O_3$	*Especies reactivas de oxígeno* $\bullet OH$, $\bullet O$, O_3, and H_2O_2 *Especiesreactivas de nitrógeno* $\bullet NO$, $\bullet NO_2$
(Gupta, 2022)	(Jiang, 2014)	(Keris-Sen, 2023)	(Jiang, 2014; Lukes, 2014)

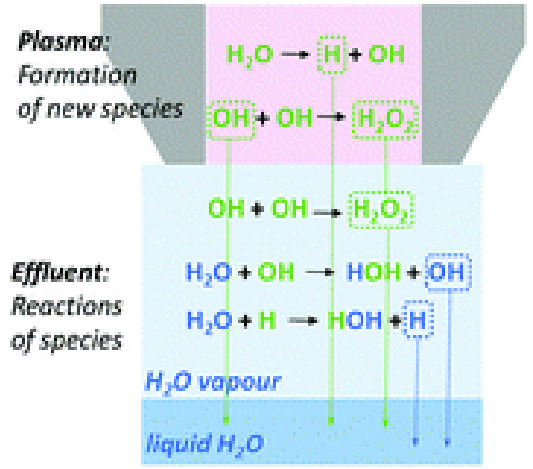
Diagrama no. 5 – Proceso avanzado de desinfección

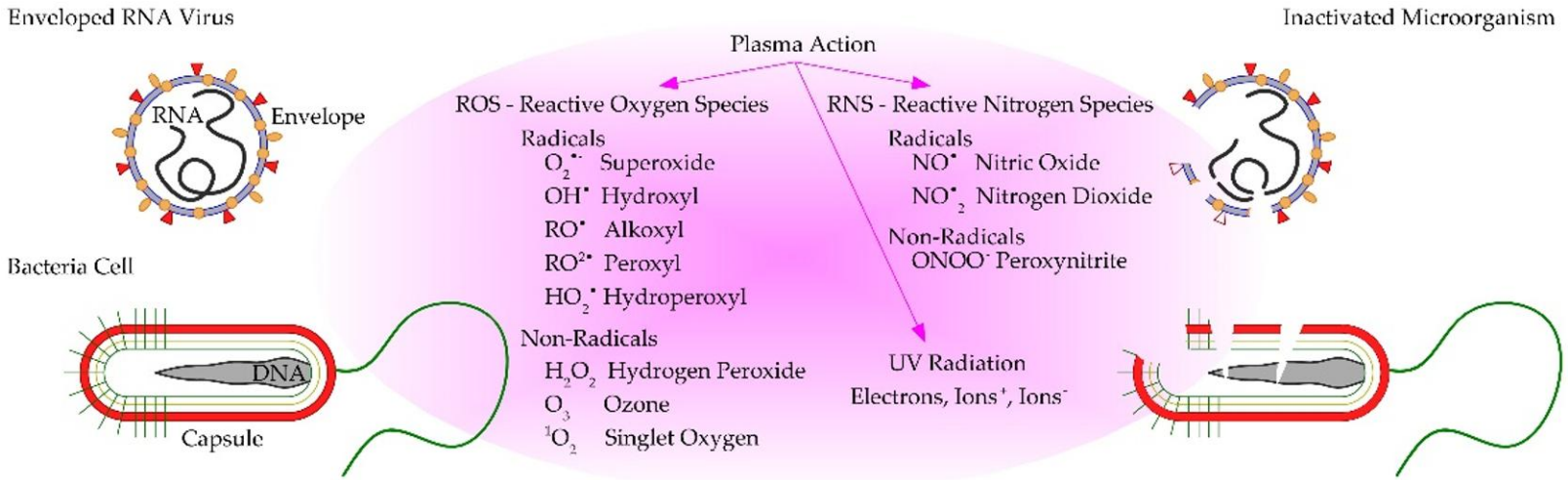
1. Introducción

Tecnología de plasma frío:

Gas más utilizado: aire.







(Wang, 2020)

Diagrama no. 6 – Proceso de oxidación avanzada: plasma frío

1. Introducción

Objetivos:

Evaluar la combinación de un proceso de nitrificación-desnitrificación (oxidación de N) combinado con un tratamiento de plasma frío para oxidar lixiviados municipales mediante especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ERO, ERN).

Indagar sobre el efecto del tiempo de retención hidráulica (TRH) en la remoción de compuestos orgánicos y variación de las bacterias nitrificantes-desnitrificantes bajo operación continua.

Evaluar los cambios en los componentes orgánicos utilizando análisis físico-químico, cinético (pseudo-primer orden) y balance de masas.

2. Materiales y metodología

Caracterización de lixiviados municipales[1]:

Division	Unidades	Medición
Total organic carbon (DOC)	mg C L^{-1}	1650.8
Total nitrogen (T–N)	mg N L^{-1}	3360.6
Organic nitrogen (Org. N)	mg N L^{-1}	2201.7
Ammonia nitrogen (NH_3–N, NH_4^+)	mg N L^{-1}	1049.4
Nitrite (NO_2^--N)	mg N L^{-1}	20.8
Nitrate (NO_3^--N)	mg N L^{-1}	88.7
Chloride ion (Cl^-)	mg Cl L^{-1}	2192.3
Sulfate ion ($[SO_4]^{2-}$)	mg SO_4 L^{-1}	361.6
pH	-	8.8
Dissolved oxygen	mg O L^{-1}	3.4

Tabla no. 1: Elaboración propia.

[1]Fuente: Planta de tratamiento en Condado de Buan, Provincia Chungcheong, Corea del Sur

Tabla no. 3 – Características de lixiviados municipales

2. Materiales y metodología

Diseño de planta de tratamiento a escala:

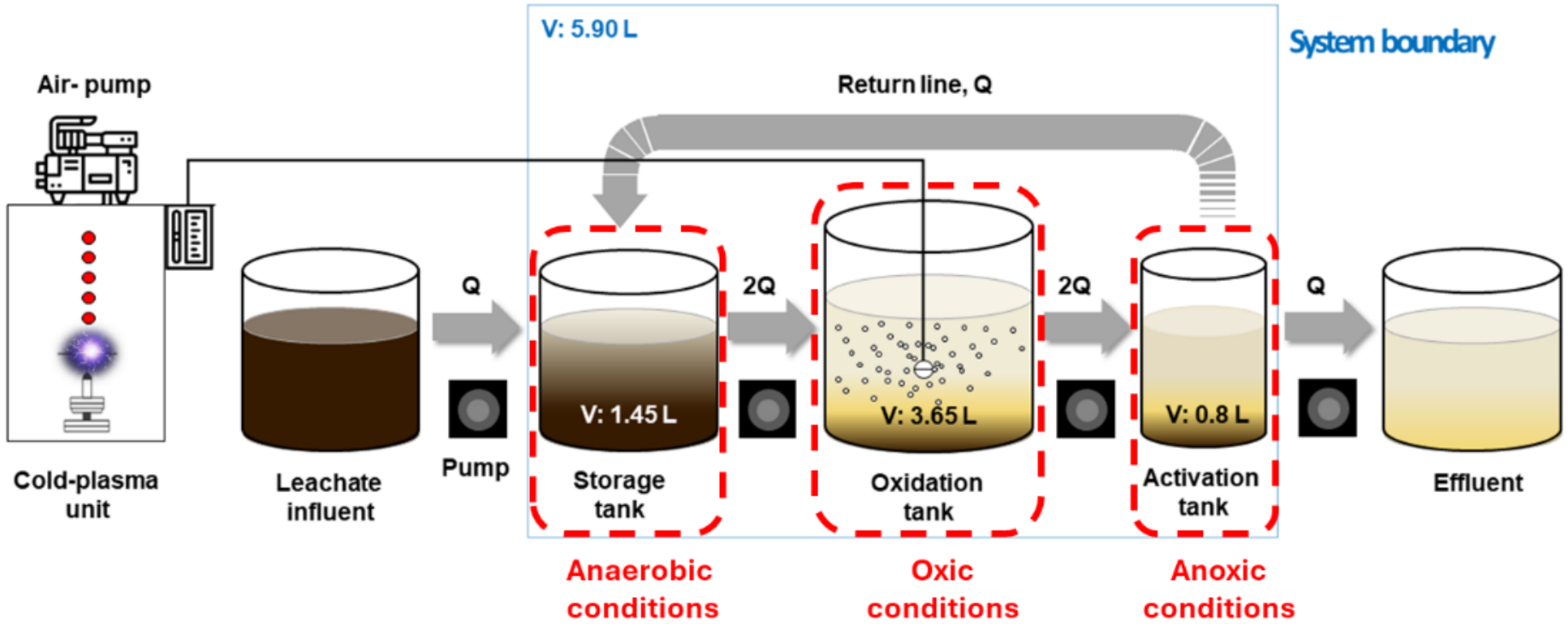
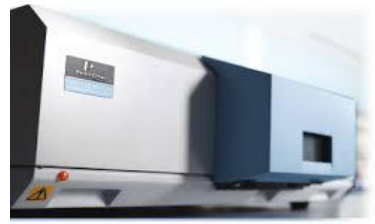
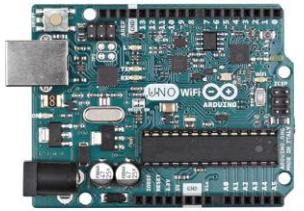


Diagrama no. 7 – Diagrama de operación de planta de tratamiento experimental

2. Materiales y metodología



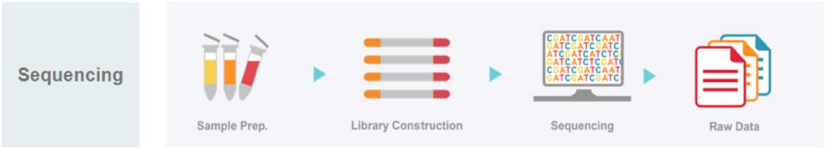












- Métodos analíticos e instrumentación
  - Medidor TOC / T-N: Shimadzu TOC-L / TNM
  - Cromatografía de iones: Thermo Scientific IC-3000
  - Métodos Estándares: APHA
- Sistema de monitoreo de gases:
  - Arduino® UNO boards.
  - Arduino Integrated Development Environment (IDE) software.
  - Oxygen (O2) : DF Robot Co., Ltd.
  - Ozone (O3): Forensics Detectors, California, USA.
- Cuantificación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) :
  - DMP method (Kosaka, 1998)
  - UV-spectrometer: UV-18 Shimadzu, Japan.
- Cuantifiación de radical hidroxilo (•OH) :
  - UV-spectrometer (LS 55, Perkin Elmer, USA)
- 16s rRNA metagenomic sequencing:
  - DNA/ cDNA y 5’ to 3’ ligation (E6120)
  - Library kit Herculase II Fusion DNA Polymerase Nextera XT Index V2 (Macrogen Inc., Corea del Sur).

Imagen no. 8 – Instrumentación y metodología

3. Discusión de resultados

Remoción de compuestos orgánicos utilizando incremento de TCO y decremento de TRH:

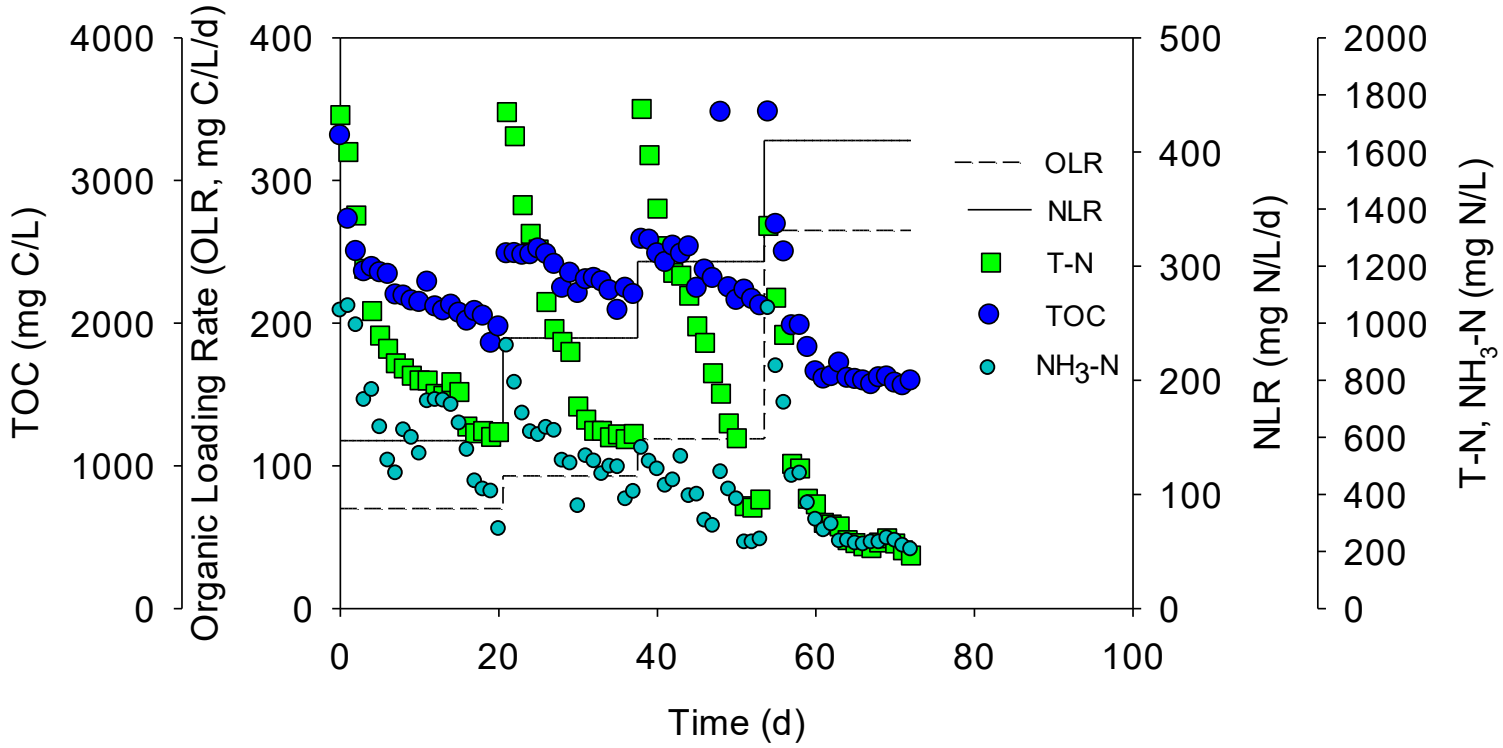


Imagen no. 9 – Características fisico-químicas bajo TCO y TRH variables

3. Discusión de resultados

Remoción de compuestos nitrogenados por TRH: (a) TRH 24d, (b) TRH 16d, (c) TRH 12d y (d) TRH 6d

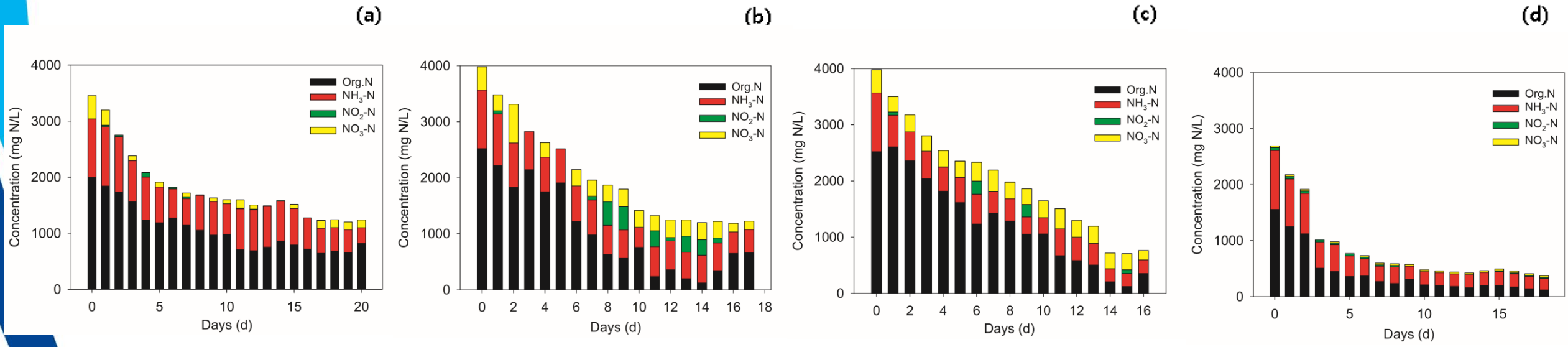


Imagen no. 10 – Características fisico-químicas por decrementos de TRH

3. Discusión de resultados

Producción de ERO por unidad de plasma fría durante el tratamiento (Flujo de aire = 10 L)

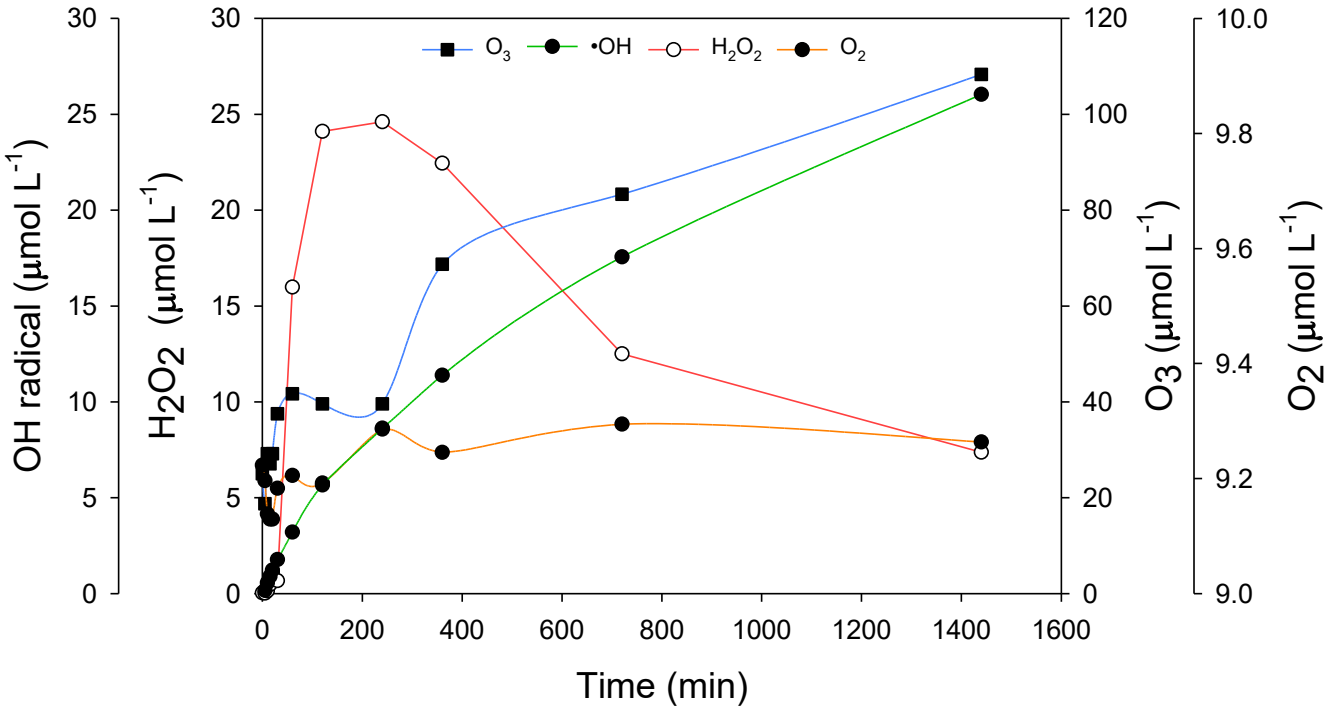


Imagen no. 11 – Estimaciones de ERO producidas por la unidad de plasma frío

3. Discusión de resultados

- Mecanismos de nitrificación – dinitrificación en: (a) tanque de almacenamiento, (b) tanque de oxidación y (c) tanque de activación

Tanque de almacenamiento (a)

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4OH$$

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$$

$$NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow NH_3H_2O \leftrightarrow NH_3 + H_2O$$

Tanque de oxidación (b)

$$OH^- + h^+ \rightarrow \bullet OH$$

$$NH_3 + \bullet OH \rightarrow \bullet NH_2 + H_2O$$

$$NH_3 + 6e^- + 2H_2O \rightarrow NO_2^- + 7H^+$$

$$NH_3 + 8e^- + 3H_2O \rightarrow NO_3^- + 9H^+$$

$$4NH_3 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2N_2 + 4H_2O$$

$$\bullet NH_2 + O \rightarrow HNO + H$$

$$\bullet NH_2 + \bullet OH \rightarrow \bullet NH_2\,OH$$

$$\bullet NH_2\,OH + O_2 + OH^- \rightarrow \bullet OH + NO_2^- + H_2O$$

$$O_2 + e^- \rightarrow 2 \bullet O + e^-$$

$$N_2 + \bullet O \rightarrow \bullet NO + \bullet N$$

$$\bullet NO + \bullet O \rightarrow \bullet NO_2$$

$$\bullet NO_2 + \bullet N, ROS \rightarrow \bullet NO_x, N_xO_x, N_xO$$

Tanque de activación (c)

$$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

3. Discusión de resultados

- Abundancia relativa de composición de comunidades bacterianas (nivel phylum)

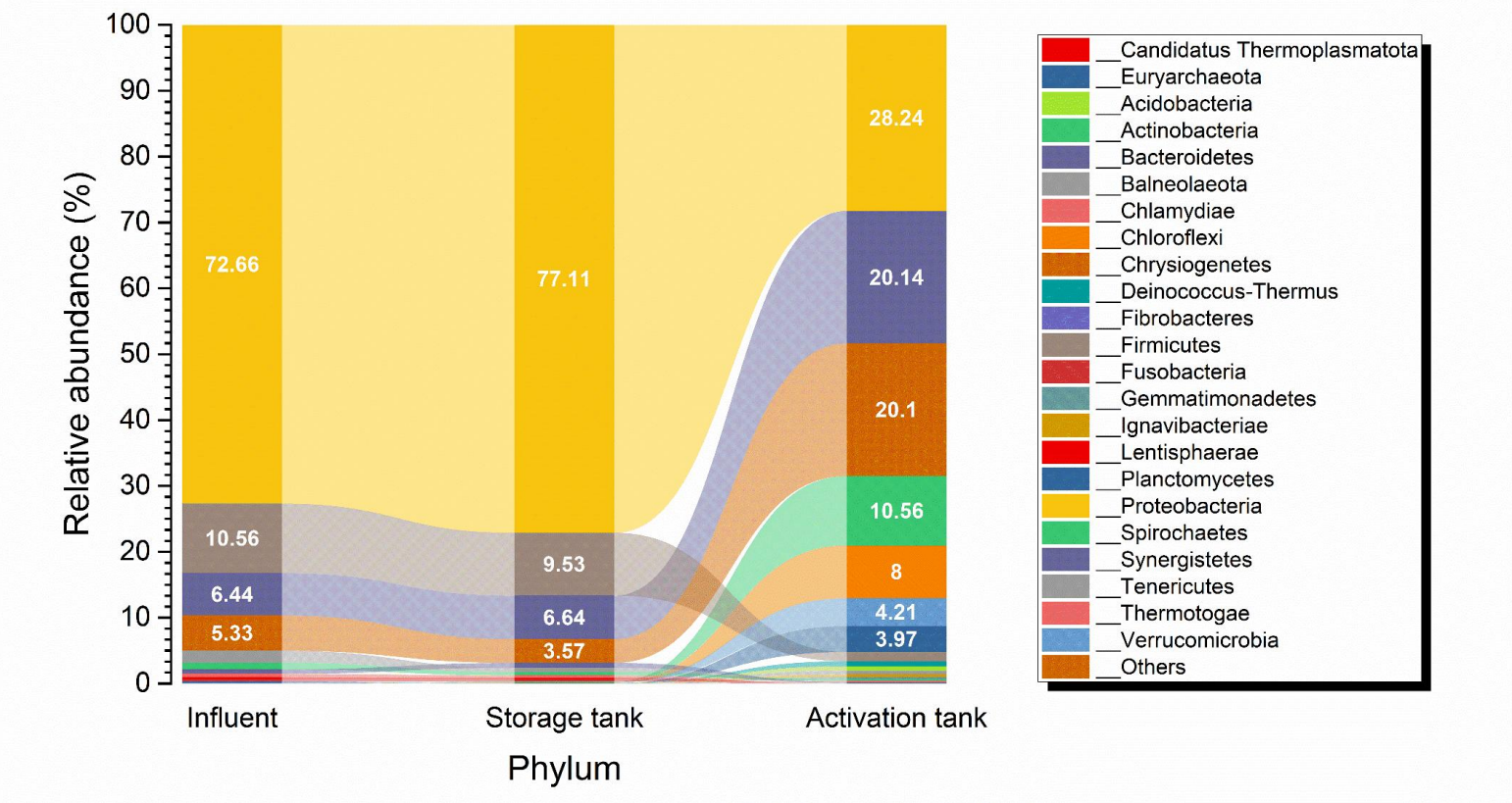
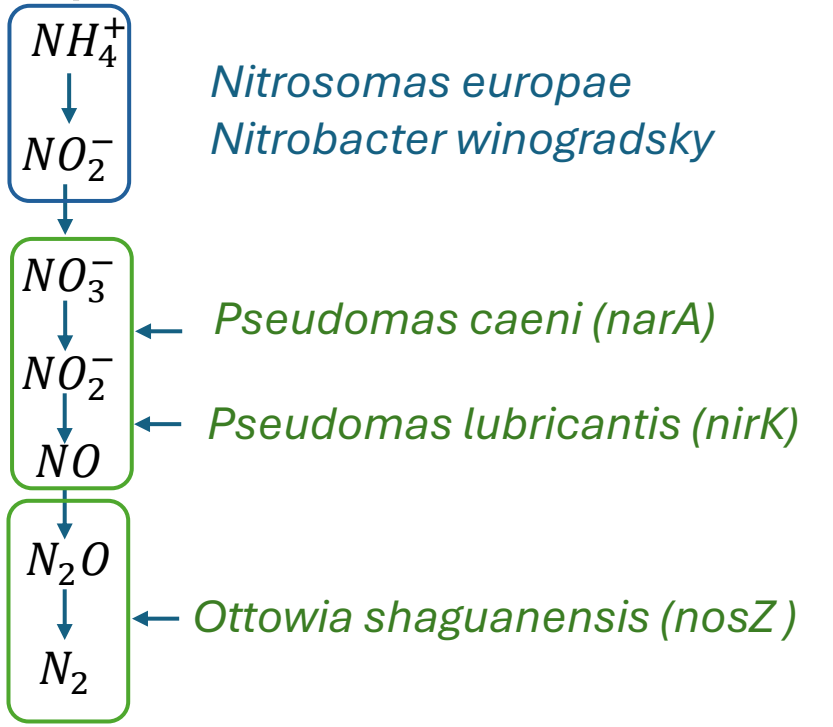


Imagen no. 12 – Composición de comunidades bacterianes (phylum)

3. Discusión de resultados

- Mapa de calor polar con dendrografía de especies proteobacterianas:



Nitrosomas europae
Nitrobacter winogradsky

Pseudomas caeni (narA)

Pseudomas lubricantis (nirK)

Ottowia shaguanensis (nosZ)

Denitrifying bacteria

Nitrifying bacteria

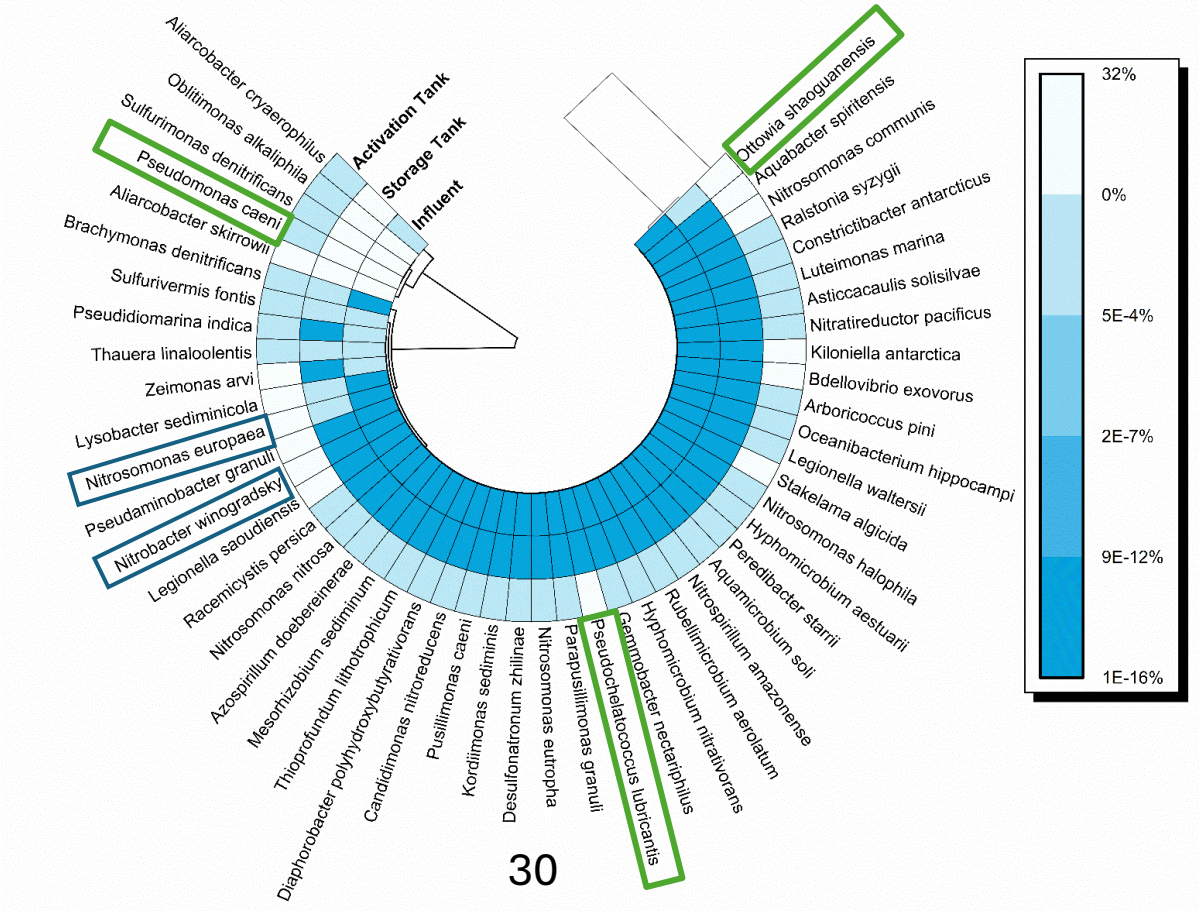
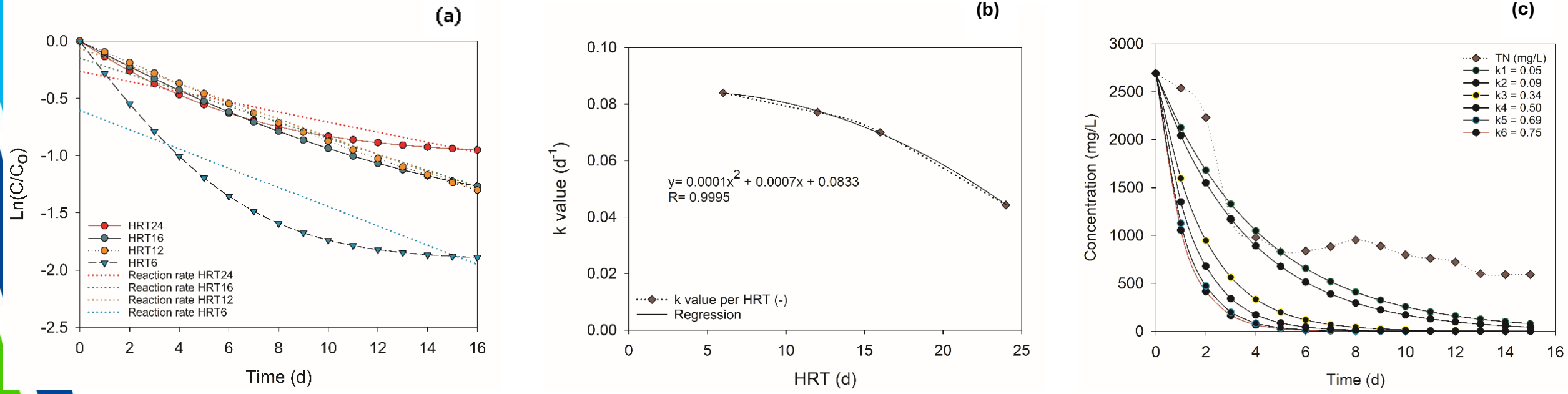


Imagen no. 13 – Mapa de calor con dendrograma de especies de protobacteria

3. Discusión de resultados

- Cinética de NT: (a) Cinética pseudo-primer orden, (b) valores k, (c) kinética primer orden



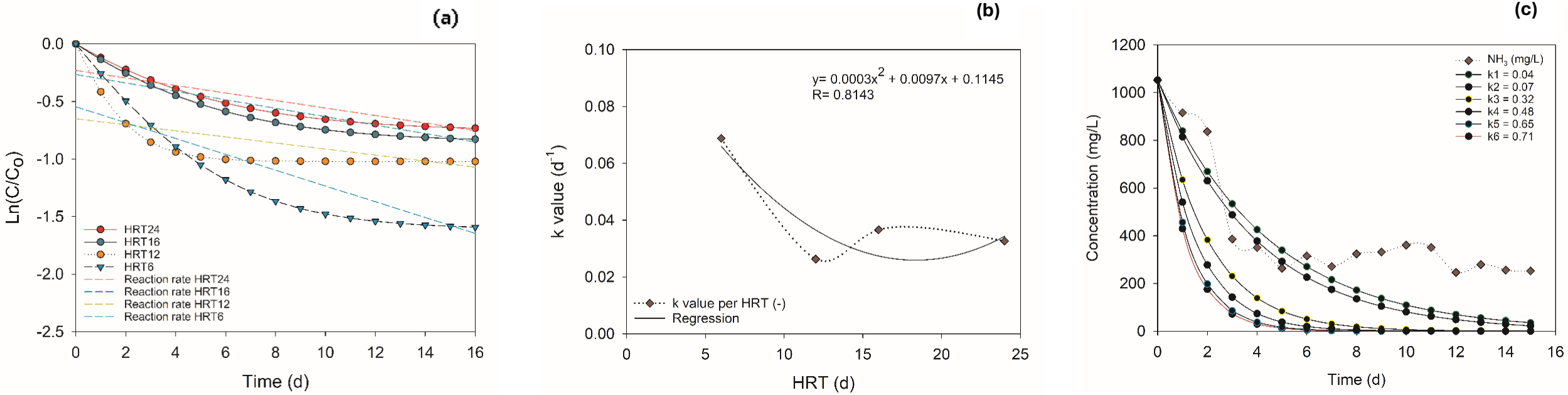
$$\ln\left(\frac{C_t}{C_o}\right) = -kt$$

$$C = (C_{t=0})e^{-\alpha t} + (1 - e^{-\alpha t})\frac{QC_o}{V\alpha}, \propto = \left(\frac{Q}{V} + k\right)$$

Imagen no. 14 – Cinética de NT

3. Discusión de resultados

- Cinética de NH_3: (a) cinética pseudo-primer orden, (b) valores k, (c) kinética primer orden



$$\ln\left(\frac{C_t}{C_o}\right) = -kt$$

$$C = (C_{t=0})e^{-\alpha t} + (1 - e^{-\alpha t})\frac{QC_o}{V\alpha}, \propto = \left(\frac{Q}{V} + k\right)$$

Imagen no. 15 – Cinética de NH3

4. Conclusiones

- El proceso combinado de nitrificación-dinitrificación acoplado con la unidad de plasma frío es una tecnología apropiada para la remoción de compuestos nitrogenados en lixiviados municipales.
- La TRH decremental y TCN incremental resultaron en una menor producción de NO_2^- and NO_3^- y crecimiento metagenómico.
- Análisis cinético reveló una mayor remoción de T-N and NH_3 con el tiempo de retención menor.

Organizado por:

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

FUNCAGUA por la vida

Global Water Partnership Central America
GWP Guatemala

ICC
Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático

UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

The Nature Conservancy
Guatemala

WCS

WWF

III CONGRESO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2025

¡Muchas gracias!

Dudas o preguntas:

Gerardo Ortiz
Viceministerio de Regulación, Vigilancia y Control de la Salud
Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social
g.ortiz@mspas.gob.gt

Información adicional

Treatment technology	Wastewater target	Target compound	Optimal removal efficiency (%)	Research
Electro-oxidation process	Dyeing wastewater	NH_3−N	65%	(Yao, 2019)
Liquid-phase cold plasma	Artificial wastewater	NH_3−N	99%	(Aka, 2022)
Ultrasound/air stripping	Artificial wastewater	NH_3−N	85%	(Wu, 2019)
Ozonation	Artificial wastewater	NH_3−N	72%	(Luo, 2015)
Baffled membrane reactor/Ozonation	Leachate	NH_4^+	99%	(Yuan, 2022)
$S_2O_8^{-2}$ / H_2O_2	Leachate	NH_3−N	83%	(Hilles, 2016)
Nitrification-denitrification/Cold-plasma	Leachate	NH_3−N	80%	This study

Información adicional

