



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA PARA LA
DESINFECCIÓN DE EFLUENTES SECUNDARIOS CON
ALTO CONTENIDO DE PATÓGENOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

P R E S E N T A :

M. en C. NORMA ANGÉLICA BELTRÁN ZARZA

TUTOR:

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS

SEPTIEMBRE, 2006

INGENIERÍA
AMBIENTAL

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA
Secretario: DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ
1er. Vocal: DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS
2do. Vocal: DR. ENRIQUE CIFUENTES GARCÍA
3er. Vocal: DRA. MARISA MAZARI HIRIART
1er. Suplente: DRA. GABRIELA MOELLER CHÁVEZ
2do. Suplente: DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS

FIRMA

*Hay hombres que luchan un día y son buenos,
Hay los que luchan una semana y son mejores,
Hay los que luchan un año y son muy buenos,
Pero hay los que luchan toda la vida,
Esos son los indispensables*

Bertolt Brecht

AGRADECIMIENTOS

A la **Dra. Blanca Jiménez Cisneros** por todas sus enseñanzas y el apoyo que me otorgó durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería. Gracias.

A mis sinodales **Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma, Dra. Gabriela Moeller Chávez, Dra. Georgina Fernández Villagómez, Dra. Marisa Mazari Hiriart, Dr. Víctor Manuel Luna Pabello y Dr. Enrique Cifuentes García** por el tiempo dedicado al desarrollo y revisión de este trabajo.

Al **Instituto de Ingeniería** por el apoyo económico que me brindó a través del programa de becas PBII durante la realización del doctorado.

A mis amigas, a las que menciono no por orden de importancia, pues bien saben que todas ocupan un lugar muy especial en mi corazón: **Lupita, Maggi, Caty, Ana Laura, Jessica, Gaby y Aurora**. Porque siempre estuvieron ahí en las buenas y en las malas. Las quiero.

A mis amigos **Juan Manuel y Abelardo**, por tenderme su mano y dejarme compartir con ustedes una parte de su vida.

A todos mis compañeros del Instituto de Ingeniería: **Neftalí, Isaura, Paz, Toño Martínez, Toño Tinajero, Juan Pablo, Ricardo, Iván, Germán, Mauricio, Rosa, Paulina y Andrés** por hacer mi estancia en el Instituto de Ingeniería más llevadera.

A los muchachos de servicio social que me apoyaron en el trabajo del laboratorio: **Paola, Karina, Iván, Ethna, Jorge, Alejandra y Leonardo**.

A **Soledad y a Don Pedro** por apoyarme cuando tuve algún contratiempo en el laboratorio. Gracias por su disposición.

DEDICATORIAS

A mi pequeña Angélica

Por haber crecido junto conmigo en esta etapa de mi vida. Gracias por tu amor y paciencia, pero sobre todo por hacer mi vida FELIZ. Te amo Pech.

A mi compañero Enrique

Por apoyarme incondicionalmente todo este tiempo. Al fin terminamos Ne, te debo una.
Te amo

A mis padres Antonio y Elvia

Por todo su apoyo durante esta y todas las etapas de mi vida, sin él no hubiera llegado hasta donde estoy.

A mi abuelo Norberto[†]

Porque aunque te has adelantado se que estarías feliz de verme llegar hasta este momento.

A mi hermana Clau y mi cuñado Raúl

Por estar ahí siempre en las buenas y en las malas y formar parte de mi vida.

A mi suegra Rosario

Por que siempre escuche de su boca solo palabras de aliento. Gracias Chayo.

REFERENCIAS

- Abdennaceur H., M. Mahrouk, H. Ouzari, M. Cherif, A. Boudabous y J. Damelincourt (2000) UV Disinfection of Treated Wastewater in a Large-Scale Plant and Inactivation of Selected bacteria in a laboratory UV Device. **Bioresource Technology**, **74** : 141-150.
- Acher A., E. Fischer, R. Turnheim y Y. Manor (1997) Ecologically Friendly Wastewater Disinfection Techniques. **Water Research**, **31 (6): 1398-1404**.
- Aksozen A., K. McClellan, K. Howard, J. Niederkorn y H. Alizadeh (2002) Resistance of *Acanthamoeba castellanii* Cysts to Physical, Chemical, and Radiological Conditions. **Journal of Parasitology**, **88(3):621-623**.
- Andreadakis A., D. Mamais, D. Christoulas y S. Kabylafka (1999) Ultraviolet Disinfection of Secondary and Tertiary Effluent in the Mediterranean Region. **Water Science and Technology**, **40(4/5):253-260**.
- Angelakis A., M. Marecos do Monte, L. Bontoux y T Asano (1999) The Status of Wastewater Reuse Practice in the Mediterranean Basin: Need for Guidelines. **Water Research**, **33(10): 2201-2217**.
- APHA, AWWA y WPCF (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association Washington, D.C. L. Clesceri, A. Greenberg y A. Eaton (Ed). 20th Edition. Washington, USA.
- Asano T. (1999) Wastewater Reuse for Non-Potable Applications: An Introduction. International Symposium on "Efficient Water Use in Urban Areas-Innovative Ways of Finding Water for Cities". June 8-10.
- AWWOA (1999) An Overview of the Use of UV Systems in Wastewater Treatment. Trojan Technologies. Alberta Water and Wastewater Operators Association (AWWOA).: 2.1-2.16. Disponible en: www.awwoa.ab.ca.
- Bahri A. (1999) Agricultural Reuse of Wastewater and Global Water Management. **Water Science and Technology**, **40(4/5):339-346**.
- Bahri A., C. Basset, F. Oueslati y F. Brissaud (2001) Reuse of Reclaimed Wastewater for Golf Course Irrigation in Tunisia. **Water Science and Technology**, **43(10):117-124**.
- Bark Y., E. Barkhudarov, Y. Koslov, I. Kossyi, V. Silakov, M. Taktakishvili y S. Temchin (2000) Slipping Surface Discharges as a Source of hard UV Radiation. **Journal of Physics D - Applied Physics**, **33:859-863**.
- Baron J. (1997) Repair of Wastewater Microorganisms after Ultraviolet Disinfection under Seminatural Conditions. **Water Environment Research**, **69 (5):992-998**.
- Bazza M. (2003) Wastewater Recycling and Reuse in the East Region: Experience and Issues. **Water Science and Technology: Water Supply**, **3(4):33-50**.
- Blatchley III E., C. Bastian, R. Duggirala, J. Allegan, M. Moore y P. Schuerch (1996) Ultraviolet Irradiation and Chlorination/Dechlorination for Municipal Wastewater Disinfection: Assessment of Performance Limitations. **Water Environment Research**, **68(2):194-204**.
- Blatchley III E., B. Hunt, R. Duggirala, J. Thompson, J. Zhao, T. Halaby, R. Cowger, C. Straub y J. Alleman (1997) Effects of Disinfectants on Wastewater Effluent Toxicity. **Water Research**, **31(7):1581-1588**.
- Bolton J. y L. Henke (1999) Ultraviolet Disinfection: A Basic Primer. **Water Conditioning and Purification Magazine**, **41(4):34-38**.

-
- Braunstein J., F. Loge, G. Tchobanoglous y J. Darby (1996) Ultraviolet Disinfection of Filtered Activated Sludge Effluent for Reuse Applications. **Water Environment Research**, **68(2):152-161**.
- Bukhari Z., T. Hargy, J. Bolton, B. Dussert y J. Clancy (1999) Medium-Pressure UV for Oocysts Inactivation. **Journal AWWA**, **91(3):86-94**.
- Cacciò S., M. De Giacomo, F. Aulicino, y E. Pozio (2003) Giardia Cysts in Wastewater Treatment Plants in Italy. **Applied and Environmental Microbiology**, **69(6):3393-3398**.
- Cairns W. (1993) Comparing Disinfection by Ultraviolet Light and Chlorination-The Implications of Mechanism for Practice. Planning, Design and Operations of Effluent Disinfection Systems Specialty Conference Series. May 23-25 WEF, Whippany N.J, 555.
- Cairns W., G. Sakamoto, M. Devries y D. van Dijk (1995) The Impacts of Wastewater Quality on Ultraviolet Disinfection of Reclaimed Wastewater. Disponible en: <http://www.trojanuv.com/papers/waterreclaim.htm>.
- Carnimeo D., E. Contini, R. Di Marino, F. Donadio, L. Liberti y E. Ranieri (1994) Wastewater Disinfection by UV at Trani Municipal Plant. **Water Science and Technology**, **30(4):125 - 132**.
- CCC (2003) Drinking Water Chlorination. A Review of Disinfection Practices and Issues. Chlorine Chemistry Council.
- CDC (2001) Typhoid Fever. Centers for Disease Control and Prevention. National Center for Infectious Diseases. Division of Bacteria and Mycotic Diseases. Disponible en <http://www.cdc.gov>.
- CFE (2004) Tarifas para el Suministro y Venta de Energía Eléctrica (2004-2005). Comisión Federal de Electricidad. Disponible en <http://www.cfe.gob.mx>.
- Chang J., S. Ossoff, D. Lobe, M. Dorfman, C. Dumais, R. Qualls y J. Johnson (1985) UV Inactivation of Pathogenic and Indicators Microorganisms. **Applied and Environmental Microbiology**, **49(6):1361-1365**.
- Chen Y.S., O.J. Sproul y A.J. Rubin (1985) Inactivation of *Naegleria gruberi* Cysts by Chlorine Dioxide. **Water Research**, **19 (6):783-787**.
- Cheremisinoff N.P. y Cheremisinoff P.N. (1993) "Water Treatment and Waste Recovery. Advanced Technology and Applications". Prentice Hall. United States.: 147-158.
- Chu W.H., J.Y. Wang y C.M. Kao (2003) A Simplified Risk-Based Approach for Process Screening in Municipal Wastewater Reclamation and Reuse. **Water Science and Technology**, **47(1):257-262**.
- Chu- Fei H., P. Pitt, D. Mamais, C. Chiu y D. Jolis (1998) Evaluation of UV Disinfection Systems for Large-Scale Secondary Effluent. **Water Environment Research**, **70(6):1142-1150**.
- Cifuentes E., M.J. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios y S. Beneth (1992) Health Impact Evaluation of Wastewater in México. **Public Health Review**, **19:243-250**.
- Clancy J., Z. Bukhari, T. Hargy, J. Bolton, B. Dussert y M. Marshall (2000) Using UV to Inactivate *Cryptosporidium*. **Journal AWWA**, **92(9):97-104**.
- CNA (2001) Programa Nacional Hidráulico 2001-2006. Comisión Nacional del Agua-México: CNA, 2001. Primera edición. ISBN 968-817-502-1. 175 pp.
- CNA (2002) Programa Nacional de Regulación de Reuso del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. Comisión Nacional de Agua, CNA. Disponible en: www.cna.gob.mx.
- Cooper R. y A. Olivieri (1998) Infectious Disease Concerns in Wastewater Reuse. T. Asano (ed). Technomic publishing Co. Inc, pp. 203.

-
- Craik S., G. Finch, J. Bolton y M. Belosevic (2000) Inactivation of *Giardia muris* Cysts Using Medium-Pressure Ultraviolet Radiation in Filtered Drinking Water. **Water Research**, **34(18):4325-4332**.
- Craik S., D. Weldon, G. Finch, J. Boltn y M. Belosevic (2001) Inactivation of *Cryptosporidium parvum* Oocysts Using Medium and Low-Pressure Ultraviolet Radiation. **Water Research**, **35(6):1387-1398**.
- Craun G. (1991) Epidemiologic Studies of Organic Micropollutants in Drinking Water. En: The Handbook of Environmental Chemistry. O. Hutzinger (ed). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. v. 5, pt. A.
- Darby J., K. Snider y G. Tchobanoglous (1993) Ultraviolet Disinfection for Wastewater Reclamation and Reuse Subject to Restrictive Standards. **Water Environment Research**, **65(2):169-180**.
- Darby J., M. Heath, J. Jacangelo, F. Loge, P. Swaim y G. Tchobanoglous (1995) Comparison of UV Irradiation to Chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Water Environment Research Foundation.
- Diario Oficial de la Federación (1997) NOM-001-SEMARNAT-1996 Norma Oficial Mexicana que Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas Residuales y Bienes Nacionales. Diario Oficial de la Federación, enero 6, 1997, pp 67-81.
- Díaz Díaz F. y L. Serrano (2002) Desinfección de Agua con Luz Ultravioleta. **Agua Latinoamérica**, **2(2):46-49**.
- Dietrich J., H. Basagaoglu, F. Loge y T. Ginn (2003) Preliminary Assessment of Transport Process Influencing the Penetration of Chlorine into Wastewater Particles and the Subsequent Inactivation of Particle-Associated Organisms. **Water Research**, **37:139-149**.
- Dodds L, W. King, C. Woolcott y J. Pole (1999) Trihalomethanes in Public Water Supplies and Adverse Birth Outcomes. **Epidemiology**, **10(3):33-237**.
- Droste R. (1997) Theory and Practice of Water and Wastewater. Ed. John Wiley and Sons.
- Dunnick J. y R. Melnick (1993) Assessment of the Carcinogenic Potential of Chlorinated Water: Experimental Studies of Chlorine, Chloramine, and Trihalomethanes. **Journal of the National Cancer Institute**, **85(10):817-822**.
- Durbeej B. y L. A. Eriksson (2003) On the Formation of Cyclobutane Pyrimidine Dimers in UV-Irradiated DNA: Why are Thymines More Reactive?. **Photochemistry and Photobiology**, **78 (2):159-167**.
- Elefritz R. (2000) Comparison of Alternate Methods of Disinfection for Reclaim Effluents. **Florida Water Resources Journal**, **July:19-25**.
- Emerick R. y J. Darby (1995) Ultraviolet Light Disinfection of Secondary Effluents: Predicting Performance Based on Water Quality Parameters. **Water Environment Federation**, **187-198**.
- Emerick R., F. Loge, D. Thompson y J. Darby (1999) Factors Influencing Ultraviolet Disinfection Performance Part II: Association of Coliform Bacteria with Wastewater Particles. **Water Environment Research**, **71(6):1178-1187**.
- Emerick R., F. Loge, T. Ginn y J. Darby (2000) Modeling the Inactivation of Particle-Associated Coliform Bacteria. **Water Environment Research**, **72(4):432-438**.
- Fahey R. (1990) The UV Effect on Wastewater. **Water Engineering and Management**, **December 1990:15-18**.
- Facile N., B. Barbeau, M. Prévost y B. Koudjonou (2000) Evaluating Bacterial Aerobic Spores as a Surrogate for *Giardia* and *Cryptosporidium* Inactivation by Ozone. **Water Research**, **34(12):3228-3246**.

-
- Farrel A. y J. Burris (1995) Alternative to Chlorine- Is Ultraviolet Radiation the Answer. Florida **Water Resources Journal**, June:32-33.
- Feachem R., D. Bradley, H. Garelick y D. Mara (1983) Sanitation and Disease. Health Aspects of Excreta and Wastewater Management. John Wiley and Sons. Pp. 501.
- Friedler E. (1999) The Jeezrael Valley Project for Wastewater Reclamation and Reuse. **Water Science and Technology**, 40 (4/5):347-354.
- FWR (1998) Disinfection By-Products from Drinking Water Treatment. Foundation for Water Research. Report No. FR/DW004. Disponible en: <http://www.fwr.org.index.htm>.
- Garza V. (2000) Reuso Agrícola de las Aguas Residuales de Cd. Juárez, (Chih., México). En el Valle de Juárez y su Impacto en la Salud Pública. **Revista Salud Pública y Nutrición. Facultad de Salud Pública y Nutrición, Universidad Autónoma de Nuevo León. Vol. 1, Enero-Marzo.**
- Gehr R. (1996) “Desinfección con UV y Desinfección con Ozono”. Apuntes de Conferencia. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gehr R. y H. Wright (1998) UV Disinfection of Wastewater coagulated with Ferric Chloride: Recalcitrance and Fouling Problems. **Water Science and Technology**, 38(3):15-23.
- González J.F. (1996) Wastewater Treatment in the Fishery Industry. FAO Fisheries Technical Paper-355. ISBN 92-5-103788-4.
- Hanzon B. Y R. Vigilia (1999) Just the Facts. **Water Environment and Technology**, November:34:42.
- Harris G., D. Adams, D. Sorensen y R. Dupont (1987) The Influence of Photoreactivation and Water Quality on Ultraviolet Disinfection of Secondary Municipal Wastewater. **Journal of Water Pollution Control Federation**, 59 (8):781-787.
- Harris G., V. Adams, D. Sorensen y M. Curtis (1987a) Ultraviolet Inactivation of Selected Bacteria and Viruses with Photoreactivation of the Bacteria. **Water Research**, 21(6):687-692.
- Hinrichsen D., B. Robey y U. Upadhyay (1998) Solutions for a Water-Short World. Population Reports. Series M, No. 14. Baltimore, Maryland: Population Information Program, Johns Hopkins University School of Public Health; and United Nations Environment Programme.
- Hinrichsen D. y B. Robey (2000) Population and the Environment: The Global Challenge. Population Reports. Series M, No. 15. Baltimore, Maryland: Population Information Program, Johns Hopkins University School of Public Health; and United Nations Environment Programme.
- Ho C., P. Pih, D. Mamais, C. Chiu y D. Jolis (1998) Evaluation of UV Disinfection Systems for large-Scale Secondary Effluent. **Water Environment Research**, 70(6):1142-1150.
- Hussain I., L. Raschid, M. Hanjra, F. Marikar y W. van der Hoek (2001) A Framework for Analyzing Socioeconomic, Health and Environmental Impacts of Wastewater Use in Agriculture in developing Countries: Working Paper 26. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. IWMI.
- Jacangelo J., P. Loughran, B. Petrik, D. Simpson y C. McIlroy (2003) Removal of Enteric Viruses and Selected Microbial Indicators by UV Radiation of Secondary Effluent. **Water Science and Technology**, 47 (9):193-198.
- Janex M., P. Savoye, Z. Do-Quang, E. Blatchley III y M. Lainé (1998) Impact of Water Quality and Reactor Hydrodynamics on Wastewater Disinfection by UV, Use of CFD Modeling for Performance Optimization. **Water Science and Technology**, 38(6):71-78.
- Jiménez B., A. Chávez y C. Hernández (1999) Alternative Treatment for Wastewater Destined for Agricultural Use. **Water Science and Technology**, 40(4/5):355-362.

-
- Jiménez B., A. Chávez, C. Maya y L. Jardines (2001) Removal of Microorganisms in Different Stages of Wastewater Treatment from Mexico City. **Water Science and Technology**, **43(10):155-162**.
- Jiménez-Cisneros B., C. Maya-Rendón y G. Salgado-Velázquez (2001) The Elimination of Helminth Ova, Faecal Coliforms, *Salmonella* and Protozoan Cysts by Various Physicochemical Processes in Wastewater and Sludge. **Water Science and Technology**, **43 (12):179-182**.
- Joret J., V. Mennecart, C. Robert, B. Compagnon y P. Cervantes (1997) Inactivation of Indigenous Bacteria in Water by Ozone and Chlorine. **Water Science and Technology**, **35(11/12):81-86**.
- Kashimada K., N. Kamiko, K. Yakamoto and S. Ohgaki (1996) Assessment of Photoreactivation Following Ultraviolet Light Disinfection. **Water Science and Technology**, **33 (10/11):261-269**.
- Kenneth C., C. Lynch, M. Hildesheim, M. Dosemeci, J. Lunin, M. Alavanja y G. Craun (1998) Drinking Water Source and Chlorination Byproducts I. Risk of Bladder Cancer. **Epidemiology**, **9(1):21-28**.
- Kretschmer N., L. Ribbe y H. Gaese (2002) Wastewater Reuse for Agriculture. In: Technology, Resource Management and Development, Vol. 2. Special Issue: Water Management. F. Köln (Ed). Pp. 145. Disponible en: <http://www.tt.fh-koeln.de>.
- Lainé S., T. Poujol, S. Dufay, J. Baron y P. Robert (1998) Treatment of Stormwater to Bathing Water Quality by Dissolved Air Flotation, Filtration and Ultraviolet Disinfection **Water Science and Technology**, **38(10):99-105**.
- Lazarova V., M. Janex, F. Fiksdal, C. Oberg, I. Barcina y M. Pompepuy (1998) Advanced Wastewater Disinfection Technologies: Short and Long Term Efficiency. **Water Science and Technology**, **38(12):109-117**.
- Lazarova V., P. Savoye, M. Janex, E. Blatchley y M. Pompepuy (1999) Advanced Wastewater Disinfection Technologies: State of the Art and Perspectives. **Water Science and Technology**, **40(4/5):203-213**.
- Lee F. y A. Jones-Lee (1993) Public Health Significance of Waterborne Pathogens in Domestic Water Supplies and Reclaimed Water. Disponible en: http://water.sesep.drexel.edu/outbreaks/misc_documents/fredlee1.html
- Liltved H. y B. Landfald (1996) Influence of Liquid Holding Recovery and Photoreactivation on Survival of Ultraviolet-Irradiated Fish pathogenic Bacteria. **Water Research**, **30 (5):1109-1114**.
- Liltved H. y B. Landfald (2000) Effects of High Intensity Light o Ultraviolet-Irradiated and Non-Irradiated Fish Pathogenic Bacteria. **Water Research**, **34(2):481-486**.
- Linden K. y J. Darby (1998) Investigation of Disinfection By-Product Formation Following Low and Medium Pressure UV Irradiation of Wastewater. Water Environment Federation Disinfection Specialty Conference. Proceedings., Baltimore, MD, April 1998.
- Linden K. y J. Darby (1998a) Ultraviolet Disinfection of Marginal Effluents: Determining Ultraviolet Absorbance and Subsequent Estimation of Ultraviolet Intensity. **Water Environment Research**, **70(2):214-223**.
- Linden K., G. Shin y M. Sobsey (2001) Comparative Effectiveness of UV Wavelengths for the Inactivation of *Cryptosporidium parvum* Oocysts in Water. **Water Science and Technology**, **43 (12):171-174**.
- Linden K., G. Shin, G. Faubert, W. Cairns y M. Sobsey (2002) UV Disinfection of *Giardia lamblia* Cysts in Water. **Environmental Science and Technology**, **36 (11):2519-2522**.

-
- Lindenauer K. y J. Darby (1994) Ultraviolet Disinfection of Wastewater Effect of Dose on Subsequent Phororeactivation. **Water Research**, **28 (4):805-817**.
- Loge F., R. Emerick, M. Heath, J. Jacangelo, G. Tchobanoglous y J. Darby (1996) Ultraviolet Disinfection of Secondary Wastewater Effluents: Prediction of performance and Design. **Water Environment Research**, **68(5):900-916**.
- Loge F., J. Darby y G. Tchobanoglous (1996a) UV Disinfection of Wastewater: Probabilistic Approach to Design. **Journal of Environmental Engineering**, **1078-1084**.
- Loge F., J. Darby y G. Tchobanoglous (1998) Ultraviolet (UV) Disinfection for Wastewater Reuse. In: Wastewater reclamation and reuse. T. Asano (Ed). Technomic publishing Co. Inc, pp. 203.
- Loge F., R. Emerick, D. Thompson, D. Nelson y J. Darby (1999) Factors Influencing Ultraviolet Disinfection Performance Part I: Light Penetration to Wastewater Particles. **Water Environment Research**, **71(3):377-381**.
- Loge F., R. Emerick, T. Ginn y J. Darby (2002) Association of Coliform Bacteria with Wastewater Particles: Impact of Operational Parameters of the Activated Sludge Process. **Water Research**, **36:41-48**.
- Madigan M., J. Martinko y J. Parker (1999) Biología de los Microorganismos. Brock (Ed.). Prentice Hall. Octava edición. ISBN: 84-89660-36-0. pp. 1064.
- Mahin T. y O. Pancorbo (1999) Waterborne Pathogens. **Water Environment and Technology**, **11 (4):51-55**.
- Marciano-Cabral F., R. Puffenbauer y G. Cabral (2000) The Increasing Importance of *Acanthamoeba* Infections. **Journal of Eukaryotic Microbiology**, **47(1):29-36**.
- Martínez A. (1980) Is Acanthamoebic Encephalitis an Opportunistic Infection? **Neurology**, **30(6):567-574**.
- Martínez A. (1993) Free-Living Amebas: Infection of the Central Nervous System. **The Mount Sinai Journal of Medicine**, **60:271-277**.
- Martínez, A. y G. Visvesvara (1997). Free-Living, Amphizoic and Opportunistic Amebas. **Brain Pathology**, **7(1):583-589**.
- Maya (2000) Modificación de la calidad físico-química y microbiológica de los efluentes de agua tratada por su embalse en el Lago Nabor Carrillo. Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Maya C., N. Beltrán., B. Jiménez y P. Bonilla (2003) Evaluation of the UV Disinfection Process in Bacteria and Amphizoic Amoebae Inactivation. **Water Science and Technology. Water Supply**, **3(4):285-291**.
- Metcalf y Eddy (1991) Treatment Disposal Reuse. Ed. Mc GrawHill. 3rd edition. 1334 Pp.
- Metcalf y Eddy (1996) Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Ed. McGrawHill. 3^a edición.
- Metcalf y Eddy (2003) Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. Ed. Mc Graw Hill. 4th Edition. ISBN 0-07-041878-0. 1819 Pp.
- Moeller-Chávez G., L. Seguí-Amórtégui, O. Alfranca-Burriel, V. Escalante-Estrada, F. Pozo-Román y A. Rivas-Hernández (2004) Water Reuse in the Apatlaco River Basin (México):a Feasibility Study. **Water Science and Technology**, **50(2):239-337**.
- Montgomery D. y G. Runger (1999) Applied Statistics and Probability for Engineers. John Wiley and Sons, Inc. 2nd Edition. ISBN 0-471-17027-5. 817 Pp.
- Morales R. (1997) Desinfección de Aguas Residual por Luz Ultravioleta Provenientes de Tratamiento Físico-Químico o Biológico para Reúso Agrícola. Tesis de Maestría. Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.

-
- Moreland V., A. Asahina, T. Unutoa y R. Fujioka (1998) UV Disinfection to Pilot or not to Pilot?. **Water Environment and Technology**, **10 (6):47-51**.
- Morowitz, H. (1950). Absorption effects in volume irradiation of microorganisms. **Science**, 111:229-230.
- Moscoso J. (1994) Wastewater Use. Hojas de Divulgación Técnica. CEPIS/OPS.
- Mujeriego R. y T. Asano (1999) The Role of Advance Treatment in Wastewater Reclamation and Reuse. **Water Science and Technology**, **40(4/5):1-9**.
- Neis U. y A. Tiehm (1997) Particle Size Analysis in Primary and Secondary Wastewater Effluents. **Water Science and Technology**, **36(4):151-158**.
- Oliver B. y E. Cosgrove (1975) The Disinfection of Sewage Treatment Plant Effluents Using Ultraviolet Light. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, **53:170-174**.
- OAS/UNEP (1997) Source Book of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. International Environmental Technology Center. Unit of Sustainable Development and Environment of the General Secretariat of the Organization of American States (OAS). Pp. 323.
- Oguma K., H. Katayama y S. Ohgaki (2002) Photoreactivation of *Escherichia coli* after Low- or Medium-Pressure UV Disinfection Determined by an Endonuclease Sensitive Site Assay. **Applied and Environmental Microbiology**, **68(12):6029-6035**.
- Page A., A. Ayanaba, M. Baram, G. Barrett, W. Boggess, A. Chang, R. Cooper, R. Dick, S. Graef, T. Long, C. Hilaire, J. Silverstein, S.C (1996) Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production. National Academy Press. Washington, D.C.
- Papadopoulos I. (1997) Water Pollution Control. A Guide to the Use of Water Quality Management Principles. World Health Organization. United Nations Environment Programme.
- Parker J. y J. Darby (1995) Particle- Associated Coliform in Secondary Effluents: Shielding from Ultraviolet Light Disinfection. **Water Environment Research**, **67(7):1065-1075**.
- Parrota M. (1998) UV Disinfection of Small Groundwater Supplies. **Journal AWWA**, **90(2):71-81**.
- Pescod M. (1992) Wastewater Treatment and Use in Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome 1992. ISBN 92-5-1031355.
- Pietrobon E. (2002) Desinfección por Luz Ultravioleta. **Agua Latinoamérica**, **2(2):28-35**.
- Pinjing H., L. Phan, G. Guowei y G. Hervouet (2001) Reclaimed Municipal Wastewater- A Potential Water Resource in China. **Water Science and Technology**, **43 (10):51-58**.
- Qualls R., M. Flynn y D. Johnson (1983) The Role of Suspended Particles in Ultraviolet Disinfection. **Journal WPCF**, **55(10):1280-1285**.
- Qualls R., J. Chang, S. Ossoff y D. Johnson (1984) Comparison of Methods of Enumerating Coliforms after UV Disinfection. **Applied and Environmental Microbiology**, **48(4):699-701**.
- Qualls R., S. Ossoff, J. Chang, M. Dorfman, C. Dumais, D. Lobe y J. Johnson (1985) Factors Controlling Sensitivity in Ultraviolet Disinfection of Secondary Effluents. **Journal of Water Pollution Control Federation**, **54 (10):1006-1011**.
- Rajeshwar K. y J. Ibañez (1997) "Environmental Electrochemistry". Fundamentals and Applications in Pollution Abatement. Ed. Academic Press. 625-693.
- Reynolds K. (2002) Ultraviolet Light: An Alternative Disinfectant. **Water Conditioning and Purification**, **44 (6):74-77**.
- Rice E. y J. Hoff (1981) Inactivation of *Giardia lamblia* cysts by ultraviolet irradiation. **Applied Environmental Microbiology**, **42(3):546-547**.

-
- Rojas N. (2004) Tratamiento Avanzado de Desinfección con Ozono para Eliminar *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, Amebas y Huevos de helmintos en Aguas Residuales Tratadas para Reúso. Tesis Doctoral. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. 200 Pp.
- Rojas- Valencia N., T. Orta de Velásquez, M. Vaca-Mier y V. Franco (2004) Ozonation by-Products Issued from the Destruction of Microorganisms Presented in Wastewaters Treated for Reuse. **Water Science and Technology**, **50(2):187-193**.
- Sakamoto G. y W. Cairns (1996) México City UV Disinfection Study. Informe de Trojan Technologies Inc. para el Instituto de Ingeniería. Pp 54.
- Sakamoto G. (2000) Finite and Nonrenewable. UV Disinfection of Reclaimed Wastewater: The North American Experience. **Environmental Protection**, **11(10):20-25**.
- Sakamoto G., D. Schwartzel y D. Tomowich (2001) UV Disinfection for Reuse Applications in North America. **Water Science and Technology**, **43(10):173-178**.
- Salgot M., M. Folch, E. Huertas, J. Tapias, D. Avellaneda, G. Girós, F. Brissaud, C. Vergés, J. Molina y J. Pigem (2002) Comparison of Different Advanced Disinfection Systems for Wastewater Reclamation. **Water Supply**, **2(3):213-218**.
- Scheible K. (1987) Development of a Rationally Based Design Protocol for the Ultraviolet Light Disinfection Process. **Journal Water Pollution Control Federation**, **59 (1): 25-31**.
- Schlegel H. (1992) General Microbiology. 7th Edition. Cambridge University Press. Pp. 655.
- Scott C., Zarazúa J y G. Levine (2000) Urban Waste-water Reuse for Crop Production in the Water-Short Guanajuato River Basin, Mexico. Colombo, Sri-Lanka. Research Report 41. Colombo, Sri-Lanka: International Water Management Institute. ISBN 92-9090-404-6.
- Secretaría de Salud (2002) Boletín Epidemiología. Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. Sistema Único de Información. No. 52. Vol. 19. ISSN1405-2636.
- Secretaria de Salud (2003) Salud: México 2002. Información para la rendición de cuentas. Segunda Edición 2003. ISBN 970-721-148-2.
- Severin B. (1980) Disinfection of Municipal Wastewater Effluents with Ultraviolet Light. **Journal of Water Pollution Control Federation**, **52(7):2007-2018**.
- Severin B., M. Suidan y R. Engelbrecht (1983) Kinetic Modeling of U.V. Disinfection of Water. **Water Research**, **17(11):1669-1678**.
- Severin B. y M. Suidan (1985) Ultraviolet Disinfection for Municipal Wastewater. **Chemical Engineering Progress**, **Abril:37-44**.
- Shaban A., G. El-Taweel y G. Ali (1997) UV Ability to Inactivate Microorganisms Combined with Factors Affecting Radiation. *Water Science and technology*. 35(11/12) : 107-112.
- Sheldon C. (1993) Amebic Brain Abscess and Meningoencephalitis. *Seminars in Neurology*. **Thieme Medical Publishers**, **13:153-160**.
- Shin G., K. Linden y M. Sobsey (2000) Comparative Inactivation of *Cryptosporidium parvum* Oocysts and *Coliphage* MS2 by Monochromatic UV Irradiation. *Disinfection 2000: Disinfection of Wastes in the New Millenium*. New Orleans, LA. USA. March 15-18.
- Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998) Ultraviolet Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFS0M20. **Environmental Technology Initiative. ETI, 1-4**.
- Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998a) Ultraviolet Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFSGN98. **Environmental Technology Initiative. ETI, 1-2**.

-
- Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998b) Chlorine Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFS0M21. **Environmental Technology Initiative. ETI, 1-4.**
- Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998c) Chlorine Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFSGN99. **Environmental Technology Initiative. ETI, 1-2.**
- Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998d) Ozone Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFS0M22. **Environmental Technology Initiative. ETI, 1-4.**
- Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998e) Ozone Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFSGN100. **Environmental Technology Initiative. ETI, 1-4.**
- Sommer R., A. Cabaj, D. Schoenen, J. Gebel, A. Kolch, A. Havelaar y F. Schets (1995) Comparison of Three Laboratory Devices for UV-Inactivation of Microorganisms. **Water Science and Technology, 31 (5/6):147-156.**
- Sommer R., A. Cabaj, W. Pribil y T. Haider (1997) Influence of lamp Intensity and Water Transmittance on the UV Disinfection of Water. **Water Science and Technology, 35(11/12):113-118.**
- Sommer R., T. Haider, A. Cabaj, W. Pribil y M. Lhotsky (1998) Time Dose Reciprocity in UV Disinfection of Water. **Water Science and Technology, 38(12):145-150.**
- Stott R., E. May y D. Mara (2003) Parasite Removal by Natural Wastewater Systems: Performance of Waste Stabilisation Ponds and Constructed Wetlands. **Water Science and Technology, 48 (2):97-104.**
- Swift J., J. Wilson, M. Johnson, D. Welch, P. Conley y D. Bowman (2001) This Little Light of Mine. **Water Environment and Technology, 13(3):52-58.**
- Task Force on Wastewater Disinfection (1996) Wastewater Disinfection. Water Environment Federation. Municipal Subcommittee. III. Series: Manual of Practice. FD; no. 10. ISBN 1-57278-036-3.
- Tchobanoglous G., F. Loge, J. Darby y M. Devries (1996) UV Design: Comparison of Probabilistic and Deterministic Design Approaches. **Water Science and Technologies, 33 (10/11):251-260.**
- Toft P., R. Tobin y Sharp J. (1988) "Drinking Water Treatment Small System Alternatives". Proceedings of the Third National Conference on Drinking Water, St John's, Newfoundland, Canada. June 12-14 : 159-174.
- Tosa K. y T. Hirata (1999) Photoreactivation of Enterohemorrhagic *Escherichia coli* Following UV Disinfection. **Water Research, 33 (2):361-366.**
- Tree J., M. Adams y D. Lees (2003) Chlorination of Indicator Bacteria and Viruses in Primary Sewage Effluent. **Applied and Environmental Microbiology, 69 (4):2038-2043.**
- Trojan Engineering (1994) Ultraviolet Disinfection System. Design Manual for Consulting Engineers. Trojan Technologies : 2-15.
- Trojan Technologies (2003) Disinfection By-Products DBP. Trojan Technical Bulletin # 55.
- Trojan Technologies Inc. (1997) Saneamiento del Valle de México. Propuesta de Desinfección de Aguas Residuales por un Sistema Avanzado de Ultravioleta.
- UCATLAS (2003) Cause of Death. UC Atlas of Global Inequality. Disponible en: <http://ucatlas.ucsc.edu>.
- Umbreit W. (1962) Modern Microbiology. W.H. Freeman and Company. Pp. 507.

-
- UNEP (2002) International Source Book on Environmentally Sound Technologies for Wastewater and Stormwater Management. United Nations Environment Programme. Division of Technology, Industry and Economics.
- U.S. Department of Energy Human Genome Program (2004) Disponible en: <http://www.ornl.gov/hgmis>.
- US EPA (1986) Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection. Chapter 7 Ultraviolet Radiation. EPA/625/1-86/021. Office of Research and Development, Water Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.
- US EPA (1992) Guidelines for Water Reuse. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/004.
- US EPA (1999) Alternative Disinfectants and Oxidants. EPA guidance Manual.
- Whitby G. y G. Palmateer (1993) The Effect of UV Transmission, Suspended Solids and Photoreactivation on Microorganisms in Wastewater Treated with UV Light. **Water Science and Technology**, **27(3/4):379-386**.
- Whitby E., G. Palmateer, W. Cook, J. Maarschalkerweerd, D. Huber y K. Flood (1984) Ultraviolet Disinfection of Secondary Effluent. **Journal Water Pollution Control Federation**, **56(7):844-850**.
- WHO (1989) Health Guidelines for the Safe Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture. WHO Technical Report Series No. 778.
- WHO (1998) Typhoid Fever. Fact Sheet N149. Disponible en <http://www.who.int/inf-fs/en/fact149.html>.
- WHO/CHS/CAH/98.1 (1999) Integrated Management of Childhood Illness (IMCI) Information. Department of Child and Adolescent Health and Development (CAH). Health Systems and Community Health (CHS). Rev. 1.
- WHO (2003) Communicable Diseases 2002. Global Defense against the Infectious Disease Threat. M. Kay Ed. Geneva, 2003.
- Wiandt S., B. Baleux, C. Casellas y J. Bontoux (1995) Occurrence of Giardia sp. Cysts During a Wastewater Treatment by a Stabilization Pond in the South of France. **Water Science and Technology**, **31(12): 257-265**
- Wolfe R. (1990) Ultraviolet Disinfection of Potable Water. **Environmental Science and Technology**, **24(6):768-773**.
- Wright H. y W. Cairns (2002) Desinfección de Agua por Medio de Luz Ultravioleta. Disponible en <http://www.ingenieroambiental.com/zinfo/ultravio.pdf>.
- Yates M. y C. Gerba (1998) Microbial considerations in wastewater reclamation and reuse. In: Wastewater reclamation and reuse. T. Asano (ed). Technomic publishing Co. Inc, pp. 203.
- Yates M. (2003) Pathogens in Reclaimed Water. Geoflow Around the World. Disponible en: <http://www.geoflow.com/wastewater/pathogens.htm>.
- Zimmer J., R. Slawson y P. Huck (2003) Inactivation and Potential Repair of *Cryptosporidium parvum* Following Low- and Medium- Pressure Ultraviolet Irradiation. **Water Research**, **37:3517-3523**.
- Zukovs G., J. Kollar, H. Monteith, K. Ho y S. Ross (1986) Disinfection of Low Quality Wastewater by Ultraviolet Light Irradiation. **Journal WPCF**, **58(3):199-206**.

CONTENIDO

Página

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | 1 |
| 1 GENERALIDADES..... | 3 |
| 1.1 Reúso de agua residual..... | 3 |
| 1.1.1 Países en desarrollo..... | 3 |
| 1.1.1.1 América Latina y el Caribe..... | 3 |
| 1.1.1.2 Asia..... | 4 |
| 1.1.1.3 África..... | 4 |
| 1.1.2 Situación en México..... | 5 |
| 1.1.3 Riesgos a la salud..... | 6 |
| 1.1.4 Agentes infecciosos..... | 7 |
| 1.2 Tratamiento del agua residual..... | 9 |
| 1.2.1 Desinfección..... | 11 |
| 1.2.2 Tipos de desinfección..... | 11 |
| 1.3 Desinfección con luz ultravioleta..... | 14 |
| 1.3.1 Radiación UV..... | 14 |
| 1.3.1.1 Generación de la luz UV..... | 14 |
| 1.3.2 Modo de acción..... | 15 |
| 1.3.2.1 Reparación del daño fotoquímico..... | 19 |
| 1.3.2.2 Factores que influyen en la reparación..... | 21 |
| 1.4 Efecto germicida..... | 23 |
| 1.4.1 Tipo de microorganismo..... | 23 |
| 1.4.2 Dosis de luz UV..... | 27 |
| 1.4.3 Estimación de la dosis..... | 27 |
| 1.4.3.1 Actinometría química..... | 28 |
| 1.4.3.2 Ensayos biológicos o bioensayos..... | 28 |
| 1.4.3.3 Métodos matemáticos | 29 |
| 1.5 Factores que afectan la dosis de luz UV..... | 31 |
| 1.5.1 Calidad del agua..... | 31 |
| 1.5.1.1 Transmisión de la luz..... | 31 |
| 1.5.1.2 Sustancias disueltas..... | 32 |
| 1.5.1.3 Efecto de las partículas..... | 33 |
| 1.5.2 Condición de la lámpara..... | 34 |
| 1.5.2.1 Tiempo de uso..... | 34 |
| 1.5.2.2 Temperatura..... | 35 |
| 1.5.2.3 Limpieza..... | 36 |
| 1.5.3 Hidráulica del reactor..... | 36 |
| 1.6 Cinética de desinfección..... | 37 |
| 1.7 Formación de subproductos y toxicidad..... | 39 |
| 1.8 Costos..... | 41 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 1.8.1 | Comparación con otros desinfectantes..... | 44 |
| 1.9 | Ventajas y limitaciones de la desinfección con luz UV..... | 46 |
| 2 | JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ALCANCES..... | 48 |
| 2.1 | Justificación..... | 48 |
| 2.2 | Hipótesis..... | 50 |
| 2.3 | Objetivo general..... | 50 |
| 2.4 | Objetivos específicos..... | 50 |
| 2.5 | Alcances..... | 50 |
| 3 | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL..... | 51 |
| 3.1 | Estrategia..... | 51 |
| 3.2 | Sitio del muestreo..... | 51 |
| 3.2.1 | Justificación de la selección..... | 51 |
| 3.2.2 | Descripción..... | 51 |
| 3.2.3 | Muestreo..... | 55 |
| 3.3 | Primera etapa. Efecto del tipo de tratamiento secundario en la calidad del efluente..... | 56 |
| 3.3.1 | Pruebas de radiación..... | 58 |
| 3.3.1.1 | <i>Determinación de la dosis.....</i> | <i>59</i> |
| 3.4 | Segunda etapa. Pruebas de reactivación..... | 60 |
| 3.5 | Tercera etapa. Efecto de la concentración de sólidos suspendidos en la concentración de bacterias asociadas a partículas..... | 61 |
| 3.5.1 | Preparación de las muestras..... | 61 |
| 3.5.2 | Radiación de las muestras..... | 62 |
| 3.5.3 | Correlaciones matemáticas..... | 62 |
| 3.6 | Cuarta etapa. Inactivación de amibas anfitróficas patógenas..... | 62 |
| 3.6.1 | Aislamiento e identificación de amibas..... | 63 |
| 3.6.2 | Preparación de la suspensión de amibas..... | 63 |
| 3.6.3 | Radiación de la suspensión de amibas..... | 63 |
| 4 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 65 |
| 4.1 | Primera etapa. Efecto del tipo de tratamiento secundario en la calidad del efluente..... | 65 |
| 4.1.1 | Caracterización de los efluentes secundarios..... | 65 |
| 4.1.1.1 | <i>Sólidos suspendidos.....</i> | <i>66</i> |
| 4.1.1.2 | <i>Transmitancia.....</i> | <i>67</i> |
| 4.1.1.3 | <i>Transmitancia en los tres efluentes secundarios con filtración.....</i> | <i>69</i> |
| 4.1.1.4 | <i>Distribución y tamaño de partículas.....</i> | <i>70</i> |
| 4.1.2 | Pruebas de desinfección de coliformes fecales, enterococos fecales y <i>Salmonella typhi</i> en tres efluentes secundarios..... | 76 |
| 4.1.2.1 | <i>Respuesta de coliformes fecales, enterococos fecales y Salmonella typhi a la luz UV y cinética de inactivación</i> | <i>77</i> |
| 4.1.2.2 | <i>Coliformes fecales.....</i> | <i>77</i> |
| 4.1.2.3 | <i>Enterococos fecales.....</i> | <i>81</i> |
| 4.1.2.4 | <i>Salmonella typhi.....</i> | <i>84</i> |
| 4.1.2.5 | <i>Comparación de coliformes fecales, enterococos fecales y Salmonella typhi</i> | <i>86</i> |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1.2.6 | <i>Comparación del comportamiento de coliformes fecales y Salmonella typhi</i> | 87 |
| 4.1.2.7 | <i>Comparación de las constantes de inactivación</i> | 88 |
| 4.2 | Segunda etapa. Pruebas de reactivación | 90 |
| 4.2.1 | Reactivación de coliformes fecales..... | 90 |
| 4.2.2 | Reactivación de Salmonella typhi..... | 93 |
| 4.3 | Tercera etapa. Efecto de la concentración de sólidos suspendidos en la concentración de bacterias asociadas a partículas | 96 |
| 4.3.1 | Efluente de lodos activados adicionado..... | 97 |
| 4.3.2 | Desinfección del efluente secundario adicionado..... | 98 |
| 4.3.3 | Determinación de la concentración de microorganismos asociados a partículas (Np)..... | 101 |
| 4.3.4 | Evaluación de la ecuación matemática para calcular Np..... | 102 |
| 4.3.4 | Correlación entre Np y partículas mayores que 40 μm (V>40 μm) en el efluente de lodos activados..... | 103 |
| 4.4 | Cuarta etapa. Inactivación de amibas anfizoicas patógenas | 104 |
| 4.4.1 | Comparación de la inactivación de bacterias y amibas..... | 108 |
| 4.5 | Diseño de un sistema de desinfección | 110 |
| 4.5.1 | Diseño matemático..... | 110 |
| 4.5.2 | Aproximación de costos..... | 118 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 121 |
| 5.1 | Conclusiones | 121 |
| 5.2 | Recomendaciones | 123 |
| | REFERENCIAS | 124 |
| | ANEXO I..... | 134 |
| | ANEXO II..... | 145 |
| | ANEXO III..... | 193 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|--|---------------|
| Tabla 1.1 Reúso de agua residual en países en desarrollo..... | 5 |
| Tabla 1.2 Principales causas de muerte por enfermedades infecciosas en el año 2001..... | 6 |
| Tabla 1.3 Tipo de microorganismos patógenos presentes en aguas residuales..... | 8 |
| Tabla 1.4 Dosis infectiva y probabilidad de infección de microorganismos entéricos..... | 8 |
| Tabla 1.5 Concentración de microorganismos en agua residual de países desarrollados y en desarrollo..... | 9 |
| Tabla 1.6 Porcentajes típicos de remoción de microorganismos con tratamientos convencionales..... | 10 |
| Tabla 1.7 Tipos de desinfección y agentes empleados..... | 12 |
| Tabla 1.8 Comparación entre ventajas y limitaciones de la luz UV, el cloro y el ozono..... | 13 |
| Tabla 1.9 Estructura química de las bases púricas y pirimídicas..... | 18 |
| Tabla 1.10 Estudios de reactivación usando una lámpara fluorescente como fuente de radiación..... | 22 |
| Tabla 1.11 Inactivación de diversos microorganismos al aplicar luz UV..... | 25 |
| Tabla 1.12 Factores que afectan la dosis..... | 31 |
| Tabla 1.13 Valores de transmitancia típicos del agua de diferentes procesos de tratamiento..... | 32 |
| Tabla 1.14 Efecto del tamaño de las partículas en la capacidad de desinfección..... | 34 |
| Tabla 1.15 Formación de subproductos de desinfección con luz UV en agua residual..... | 40 |
| Tabla 1.16 Efecto de los desinfectantes en la toxicidad del agua..... | 41 |
| Tabla 1.17 Costos de capital para sistemas de desinfección con luz UV..... | 43 |
| Tabla 1.18 Costos de operación y mantenimiento para sistemas de desinfección con luz UV..... | 43 |
| Tabla 1.19 Costos estimados para sistemas de radiación UV..... | 44 |
| Tabla 1.20 Comparación de los costos anuales de desinfección con luz UV y cloración-decloración..... | 44 |
| Tabla 1.21 Comparación de costos de diversas alternativas de desinfección..... | 46 |
| Tabla 1.22 Comparativa de los costos ^{a, b} por m ³ de agua residual desinfectada con cloro, luz ultravioleta y ozono..... | 46 |
| Tabla 1.23 Ventajas y limitaciones de la desinfección con luz UV..... | 47 |
| Tabla 3.1 Origen del agua residual que trata la PTARCU..... | 52 |
| Tabla 3.2 Tiempo de retención de los tres sistemas de tratamiento de la PTARCU..... | 56 |
| Tabla 3.3 Técnicas empleadas para la evaluación de la calidad fisicoquímica de los efluentes..... | 57 |
| Tabla 3.4 Técnicas para la cuantificación microbiológica..... | 57 |
| Tabla 4.1 Valores de transmitancia para efluentes de diferentes procesos de tratamiento secundario..... | 67 |
| Tabla 4.2 Efecto del tamaño de las partículas en la capacidad de desinfección..... | 71 |
| Tabla 4.3 Tamaño medio de partícula y volumen de partículas presentes en tres efluentes secundarios..... | 74 |
| Tabla 4.4 Porcentaje en volumen y número de partículas presentes en tres efluentes secundarios..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.5 Tiempos de retención aplicados para las pruebas de desinfección..... | 77 |
| Tabla 4.6 Constantes de inactivación de coliformes fecales presentes en tres efluentes secundarios | 80 |
| Tabla 4.7 Constante de inactivación de enterococos fecales presentes en tres efluentes secundarios..... | 83 |
| Tabla 4.8 Concentración de Salmonella spp. reportada en estudios de desinfección con luz UV | 84 |
| Tabla 4.9 Constante de inactivación de Salmonella typhi presente en tres efluentes secundarios | 86 |
| Tabla 4.10 Valores de las constantes de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales y Salmonella typhi en tres efluentes secundarios..... | 89 |
| Tabla 4.11 Expresiones de la cinética de inactivación con luz UV de coliformes fecales, enterococos fecales y Salmonella typhi en efluentes secundarios de la PTARCU..... | 89 |
| Tabla 4.12 Reactivación de coliformes fecales en condiciones de luz..... | 91 |
| Tabla 4.13 Reactivación de coliformes fecales en condiciones de oscuridad..... | 93 |
| Tabla 4.14 Reactivación de Salmonella typhi en condiciones de luz..... | 94 |
| Tabla 4.15 Reactivación de Salmonella typhi en condiciones de oscuridad..... | 95 |
| Tabla 4.16 Constante de inactivación de coliformes fecales en la fase de “cola” de la cinética de desinfección..... | 100 |
| Tabla 4.17 Constantes de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales, Salmonella typhi, Acanthamoeba culbertsoni y Acanthamoeba spp..... | 109 |
| Tabla 4.18 Configuración propuesta de un sistema de luz UV para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU..... | 117 |
| Tabla 4.19 Costos de un sistema de luz UV comercial..... | 118 |
| Tabla 4.20 Resumen de análisis de costos por energía en un sistema de luz UV..... | 119 |
| Tabla 4.21 Costo por concepto de operación y mantenimiento de un sistema de luz UV.. | 120 |
| Tabla 4.22 Costos totales por año del sistema de desinfección con UV para la PTARCU. | 120 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| Figura 1.1 Comparación de la distribución del uso del agua residual en California, Florida y Japón..... | 4 |
| Figura 1.2 Reúso de agua residual en México..... | 6 |
| Figura 1.3 Causas de muerte en niños menores de 5 años en países en desarrollo..... | 7 |
| Figura 1.4 Espectro electromagnético..... | 15 |
| Figura 1.5 Espectro electromagnético con escala expandida de la radiación ultravioleta...15 | 15 |
| Figura 1.6 Espectro de absorción de bases púricas y pirimídicas a un pH 7..... | 16 |
| Figura 1.7 Estructura del ADN..... | 17 |
| Figura 1.8 Acción germicida de la luz UV sobre las bases nitrogenadas..... | 19 |
| Figura 1.9 Mecanismo de 2 pasos propuesto para la fotorreactivación..... | 20 |
| Figura 1.10 Mecanismo de reparación en la oscuridad..... | 21 |
| Figura 1.11 Esquema típico de un equipo de luz colimada..... | 29 |
| Figura 1.12 Esquema de la geometría de la lámpara usada en la técnica de PSS..... | 30 |
| Figura 1.13 Efecto de las partículas en la radiación de luz UV..... | 33 |
| Figura 1.14 Intensidad de una lámpara de baja presión en función del tiempo..... | 35 |
| Figura 1.15 Variación de la intensidad en función de la temperatura..... | 35 |
| Figura 1.16 Cinética de inactivación de coliformes fecales en un efluente de lodos activados..... | 38 |
| Figura 1.17 Costos de operación y mantenimiento de la desinfección con luz UV de dos efluentes secundarios..... | 42 |
| Figura 1.18 Comparación de costos de construcción, capital y OM de los procesos de cloración-decloración y radiación ultravioleta..... | 45 |
| Figura 3.1 Diagrama de flujo del estudio de la aplicación de la luz ultravioleta para desinfectar agua residual..... | 52 |
| Figura 3.2 Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria..... | 53 |
| Figura 3.3 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua residual de Ciudad Universitaria..... | 54 |
| Figura 3.4 Puntos de muestreo en los sedimentadores secundarios de cada sistema de tratamiento secundario..... | 55 |
| Figura 4.1 Concentración de sólidos suspendidos en los tres efluentes secundarios de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU)..... | 66 |
| Figura 4.2 Relación entre la concentración de SST y la transmitancia de tres efluentes secundarios..... | 68 |
| Figura 4.3 Comparación de valores de transmitancia y transmitancia filtrada en tres efluentes secundarios..... | 69 |
| Figura 4.4 Distribución de tamaño de partícula del efluente de lodos activados..... | 71 |
| Figura 4.5 Distribución de tamaño de partícula del efluente de contactores biológicos rotatorios..... | 72 |
| Figura 4.6 Distribución de tamaño de partícula del efluente de filtros rociadores..... | 73 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.7 Interpretación de la distribución de tamaño de partícula en términos de número y volumen..... | 75 |
| Figura 4.8 Curva de respuesta de coliformes fecales a diferentes dosis de luz UV en tres efluentes secundarios..... | 78 |
| Figura 4.9 Distribución de frecuencia de la concentración de coliformes fecales al aplicar una dosis de luz UV de 30 mW·s/cm ² | 79 |
| Figura 4.10 Cinética de inactivación de coliformes fecales en los tres efluentes secundarios..... | 80 |
| Figura 4.11 Curva de respuesta de enterococos fecales a diferentes dosis de luz UV en tres efluentes secundarios..... | 82 |
| Figura 4.12 Micrografía de <i>Streptococcus faecalis</i> | 82 |
| Figura 4.13 Cinética de inactivación de enterococos fecales en tres efluentes Secundarios..... | 83 |
| Figura 4.14 Curva de respuesta de <i>Salmonella typhi</i> a diferentes dosis de luz UV en tres efluentes secundarios..... | 85 |
| Figura 4.15 Cinética de inactivación de <i>Salmonella typhi</i> en tres efluentes secundarios.. | 86 |
| Figura 4.16 Cinética de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales y <i>Salmonella typhi</i> en un efluente de lodos activados..... | 87 |
| Figura 4.17 Comparación de la inactivación con luz UV de coliformes fecales y <i>Salmonella typhi</i> en un efluente de lodos activados..... | 88 |
| Figura 4.18 Reactivación de coliformes fecales después de 2 h en condiciones de luz solar..... | 91 |
| Figura 4.19 Reactivación de coliformes fecales después de 2 h en condiciones de oscuridad..... | 92 |
| Figura 4.20 Reactivación de <i>Salmonella typhi</i> después de 2 h en condiciones de luz solar..... | 93 |
| Figura 4.21 Reactivación de <i>Salmonella typhi</i> después de 2 h en condiciones de oscuridad..... | 94 |
| Figura 4.22 Curva de respuesta de inactivación de las bacterias coliformes fecales a diferentes dosis de luz UV en un efluente secundario. (a) Primera fase correspondiente a la cinética de primer orden y (b) Segunda fase, correspondiente a la inactivación de microorganismos contenidos en las partículas..... | 96 |
| Figura 4.23 Concentración de coliformes fecales en muestras sintéticas con diferentes concentraciones de sólidos suspendidos..... | 98 |
| Figura 4.24 Efecto de la concentración de sólidos suspendidos en la inactivación de coliformes fecales..... | 99 |
| Figura 4.25 Cinética de inactivación de coliformes fecales presentes en un efluente de lodos activados con diferentes concentraciones de sólidos suspendidos..... | 100 |
| Figura 4.26 Concentración de coliformes fecales asociados a partículas en función de la concentración de la concentración de sólidos suspendidos..... | 102 |
| Figura 4.27 Correlación entre los valores observados y calculados de Np..... | 103 |
| Figura 4.28 Correlación entre el volumen de partículas mayores que 40 mm de un efluente de lodos activados con la concentración de coliformes fecales inmersos en partículas..... | 104 |
| Figura 4.29 Inactivación de amibas anfitriónicas para diferentes dosis de luz UV..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.30 Cinética de inactivación de <i>Acanthamoeba culbertsoni</i> y <i>Acanthamoeba</i> spp..... | 107 |
| Figura 4.31 Comparación de la cinética de inactivación con luz UV de coniformes y enterococos fecales, <i>Salmonella typhi</i> y <i>Acanthamoeba</i> spp. en el efluente de lodos activados..... | 109 |
| Figura 4.32 Inactivación de coliformes fecales en el efluente de lodos activados con luz UV..... | 110 |
| Figura 4.33 Curva de la relación entre la intensidad promedio dentro del reactor con la transmitancia filtrada del agua residual (curva basada en un arreglo de 2 x 2 con un espacio central entre líneas de 75 mm)..... | 112 |
| Figura 4.34 Vista seccional de un arreglo de lámparas de luz UV de 2 x 2..... | 112 |
| Figura 4.35 Componentes del sistema de desinfección de luz UV. (a) Configuración del canal, bancos, módulos y lámparas; (b) Corte transversal del sistema, para el sistema de desinfección de la planta de tratamiento de CU..... | 118 |

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

| | Página |
|--|---------------|
| Fotografía 3.1 Riego de áreas verdes del campus con agua residual tratada en la PTARCU..... | 55 |
| Fotografía 3.2 Sedimentadores de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria..... | 56 |
| Fotografía 3.3 Equipo de luz colimada..... | 59 |
| Fotografía 4.1 Quistes (a) y trofozoítos (b) de <i>Acanthamoeba</i> spp. (técnica Nomarski) 40 x 1 (fotografías tomadas con la colaboración del Dr. Mirek Macek, ENEP-Iztacala, UNAM)..... | 108 |

RESUMEN

Hoy en día, el reúso de agua residual es una práctica común. Las altas concentraciones y gran variedad de microorganismos presentes en el agua residual hacen necesaria la desinfección antes de la disposición de las mismas. La selección apropiada del desinfectante, se complica por la amplia variedad de microorganismos con diferentes susceptibilidades, así como de costos y otras consideraciones. Actualmente, se reconoce que la luz ultravioleta es un desinfectante alternativo y eficiente para inactivar bacterias, virus y algunos protozoarios.

Un aspecto importante en la eficacia de desinfección es la calidad del agua, primordialmente en lo que se refiere a la cantidad de partículas. Aunado a esto, la presencia de microorganismos agregados o asociados con las partículas dificulta la penetración de la luz UV aún cuando se apliquen altas dosis, lo que disminuye la eficacia de desinfección.

Estos planteamientos llevaron a considerar la necesidad de evaluar la eficacia de la luz UV en efluentes de procesos de tratamiento con principios de operación diferente, con altas concentraciones de microorganismos patógenos tales como *Salmonella typhi* o *Acanthamoeba* spp. dando relevancia al efecto de la reactivación y el efecto de los microorganismos inmersos en partículas. Las pruebas de desinfección se realizaron a nivel laboratorio por medio de un equipo de luz colimada.

El agua residual provino de una planta de tratamiento que cuenta con tres sistemas de tratamiento secundario biológico que trabajan en paralelo, ventaja que fue aprovechada para evaluar la calidad de diferentes efluentes en la eficacia de desinfección. En la primera etapa se caracterizaron cada uno de los efluentes secundarios (lodos activados, contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores) y se realizaron las pruebas de desinfección aplicando diversas dosis de luz UV (de 5 a 120 mW·s/cm²). Los resultados mostraron que una dosis de 30 mW·s/cm² es una dosis óptima para lograr la inactivación de coliformes fecales hasta niveles que cumplan con los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y de *Salmonella typhi* hasta concentraciones que no representen riesgo para la salud. Además, a pesar de existir diferencias fundamentales en la calidad -en términos de concentración de sólidos suspendidos, transmitancia y distribución de tamaño de partícula- de los tres efluentes, estas no fueron determinantes en la eficacia de desinfección. Esto se debió principalmente a la escasa presencia de partículas mayores de 40 µm (0.1% del total).

En la segunda etapa se determinó la capacidad de reactivación de las bacterias coliformes fecales, así como de *S. typhi* después de ser irradiados con luz UV, así como al ser expuestos a la luz solar y a la oscuridad, por diferentes periodos. Las bacterias coliformes fecales y *S. typhi* mostraron capacidad de reparar el daño causado por la luz UV (3 y 2 unidades logarítmicas, respectivamente) a dosis bajas (≤ 30 mW·s/cm²), lo que genera la necesidad de aplicar dosis de luz UV mayores (2 veces la óptima) para evitar su reactivación. Los procesos de reactivación en ausencia de luz no son significativos.

En la tercera etapa se evaluó la cantidad de microorganismos asociados a partículas en función de la concentración de sólidos suspendidos y de las partículas mayores que 40 µm, a través de

correlaciones matemáticas. Éstas se ajustaron adecuadamente, por lo que resultan herramientas de gran utilidad para evaluar *a priori* la posibilidad de cumplir o no con el nivel deseado de desinfección.

Por último, en la cuarta etapa se realizó la radiación de amibas anfizoicas patógenas, esto con el fin de evaluar la eficacia de este desinfectante en protozoarios. Para inactivar las amibas hasta concentraciones menores que 10 y 20 quistes (dosis infectiva) es necesario aplicar altas dosis de luz UV (del orden de $170 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$) lo que en términos de costos resultaría extremadamente caro. Los resultados de la parte experimental sirvieron por último para proponer el diseño de un sistema de desinfección para los efluentes característicos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria.

Los resultados demostraron la eficacia de la luz ultravioleta para la desinfección de bacterias y protozoarios en efluentes secundarios, siempre y cuando se consideren aspectos tales como reactivación, efecto de las partículas y costos.

1 GENERALIDADES

1.1 Reúso de agua residual

Actualmente, el reúso de agua residual es una práctica común que se ha incrementado en las últimas décadas, promovida por el aumento de la población y la demanda de fuentes alternas de agua para diversos usos (Solomon *et al.*, 1998; Jiménez *et al.*, 1999; Bahri *et al.*, 2001; Bazza, 2003; Chu *et al.*, 2003). De acuerdo con Kretschmer *et al.* (2002), los principales tipos del reúso desarrollados y aplicados a nivel mundial son:

- a) Usos potables
 - Directo del agua residual tratada después de un tratamiento riguroso, para aumentar el suministro de agua potable,
 - Indirecto después de su vertido al ambiente y su reingreso posterior al ciclo hidrológico.
- b) Usos no potables
 - Agrícola
 - Recreativos (parques, campos de golf)
 - Acuicultura
 - Recarga de acuíferos, la cual eventualmente se torna en reúso potable indirecto
 - Industria

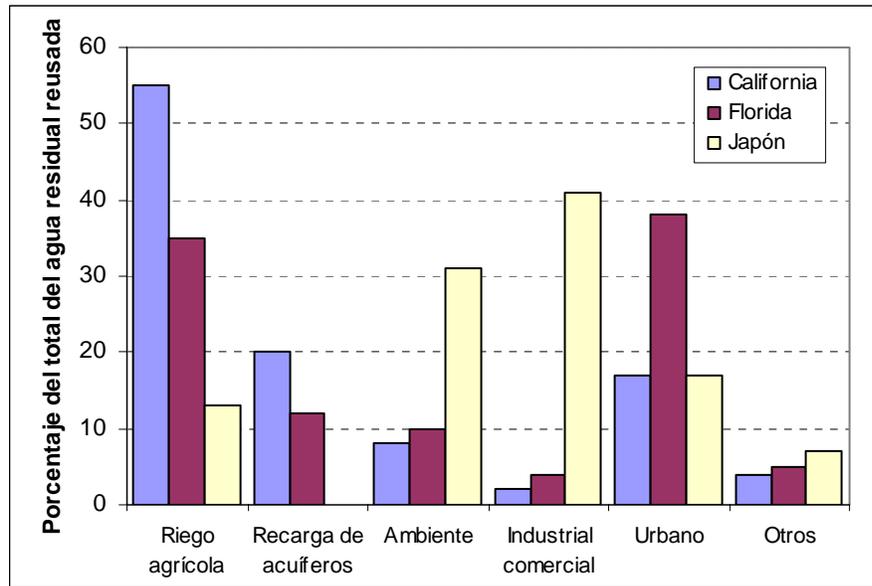
En términos de volumen, el reúso de agua residual en riego agrícola, la recarga de acuíferos, los usos municipales e industrial, son los más importantes, en ese orden. El porcentaje de reúso depende del balance de agua en cada región. Por ejemplo, en California se reúsa el 70% del total de agua residual, 51% en Florida y el 54% en Japón (Figura 1.1; Kretschmer *et al.*, 2002).

1.1.1 Países en desarrollo

El tratamiento de agua residual y su reúso en países en desarrollo depende principalmente de consideraciones económicas, de los usos potenciales que se le pueda dar y de las regulaciones en cuestión de la protección al ambiente (Asano, 1999).

1.1.1.1 América Latina y el Caribe

De acuerdo con UNEP (2002), en los países de centro y Sudamérica, principalmente México, Chile y Perú, el agua residual es usada para regar cerca de 500,000 ha de diversos cultivos, que representan entre el 20-25% del total a nivel mundial. En el caso específico de Brasil, el agua residual es usada en la agricultura, la acuicultura y el uso industrial.



Fuente: Kretschmer *et al.* (2002)

Figura 1.1 Comparación de la distribución del uso del agua residual en California, Florida y Japón

1.1.1.2 Asia

El reúso de agua residual en Asia occidental es muy común debido a la grave carencia de agua. En esta región, países como Arabia Saudita, Israel, China, Jordania y Omán, cuentan con plantas de tratamiento cuyos efluentes son empleados para riego agrícola (UNEP, 2002). Sin embargo, países como Yemen, Siria, Líbano e Irán practican el uso directo del agua residual en la agricultura sin restricción alguna (UNEP, 2002).

La recarga de acuíferos es otro uso, menos expandido, pero que es aplicado en Omán y en Jordania.

1.1.1.3 África

En muchas de las zonas semi-áridas de África, el agua es escasa y el reúso de agua residual es primordial. En estas zonas el agua residual constituye del 25 al 75% del agua disponible para riego, que es la actividad más común, aunque en países como Namibia constituye también una fuente para consumo humano. El porcentaje de agua residual tratada que se mezcla con agua potable en ese país varía desde un 5% hasta un 50%, dependiendo de la época del año (UNEP, 2002).

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de las actividades en las que algunos de los países en desarrollo aplican el agua residual tratada.

Tabla 1.1 Reúso de agua residual en países en desarrollo

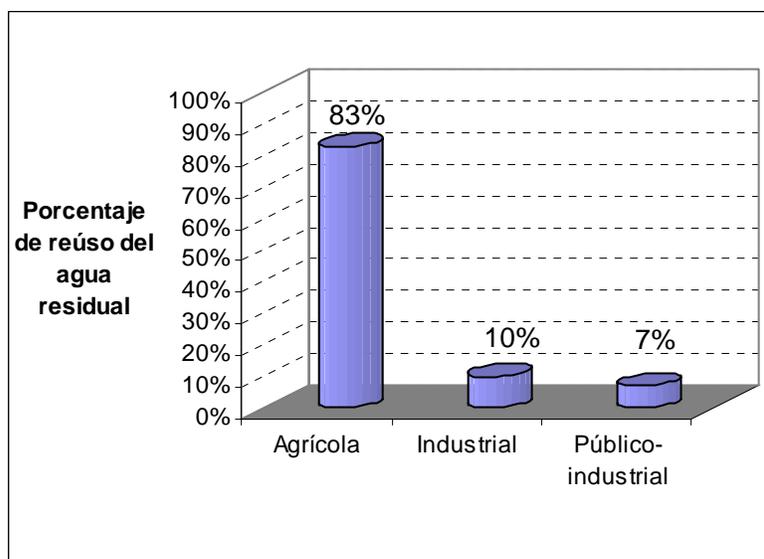
| PAÍS | USOS | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|---------|-----------|-------------|-------------|----------------------|-------------|
| | Caminos | Parques | Industria | Acuacultura | Agricultura | Recarga de acuíferos | Uso potable |
| América Latina y el Caribe | | | | | | | |
| Jamaica | | * | * | | | | |
| Chile | | | | | * | | |
| Brasil | | | * | * | * | | |
| Perú | | | | * | * | | |
| Argentina | | * | | | * | | |
| México | | * | * | * | * | | |
| Asia | | | | | | | |
| Arabia Saudita | * | | * | | * | | |
| China | | | * | | * | | |
| Israel | | | * | | * | | |
| Jordania | | | | | * | * | |
| Omán | * | | | | * | * | |
| África | | | | | | | |
| Egipto | | | | * | * | * | |
| Namibia | | | | | | | * |
| Sudáfrica | | * | | | | | |
| Túnez | | * | | | * | | |
| Chipre | | | | | * | * | |

Fuente: OAS/UNEP (1997); Papadopoulos (1997); Friedler (1999); Pinjing *et al.* (2001); Pescod (1992); UNEP (2002)

1.1.2 Situación en México

El reúso de agua residual en México, se considera como el de mayor magnitud en América Latina (OAS/UNEP, 1997). Del total de agua residual (municipal e industrial) producida y colectada en el país (370 m³/s), se reúsan 108 m³/s que representa el 29% del total, siendo los principales usos el agrícola, el público-urbano y el industrial (Moeller-Chávez *et al.*, 2004). El reúso constituye una alternativa de gran relevancia principalmente en los estados áridos y semiáridos del país, en donde el mayor problema es la escasez del recurso. Del volumen total de 108 m³/s, tan sólo el 38 % es sometido a algún tipo de tratamiento, mientras que el resto se aplica en forma directa (CNA, 2002).

El reúso de agua residual en riego agrícola es el más común (83% del total de agua residual, Figura 1.2). La aplicación se realiza actualmente en los Valles del Yaqui, Mayo y Guaymas en Sonora; en Chiconautla en el Estado de México; Tula, Alfajayucan y Tulancingo en Hidalgo; Valle de Juárez en Chihuahua y Valsequillo en Puebla, entre otros, que representan aproximadamente 350,000 ha (Moscoso, 1994; Garza, 2000; Scott *et al.* 2000). Esta práctica es favorecida por los agricultores debido a que los nutrientes contenidos en el agua residual mejora la productividad agrícola (Jiménez *et al.*, 1999; CNA, 2001).



Fuente: CNA (2002)

Figura 1.2 Reúso de agua residual en México

A pesar del beneficio que representa el uso de agua residual en los cultivos, sus componentes químicos y microbiológicos constituyen un riesgo para la salud de los pobladores de las zonas de riego.

1.1.3 Riesgos a la salud

El reúso de agua residual ha sido asociado con riesgos ambientales, y principalmente, de salud pública por el contacto, la inhalación o la ingestión de agua contaminada (Angelakis *et al.*, 1999; Bahri, 1999). Se estima que sólo el 10% de las enfermedades de origen hídrico se relacionan con agentes químicos, mientras que el 90% restante se debe a agentes microbianos (Lee y Jones-Lee, 1993).

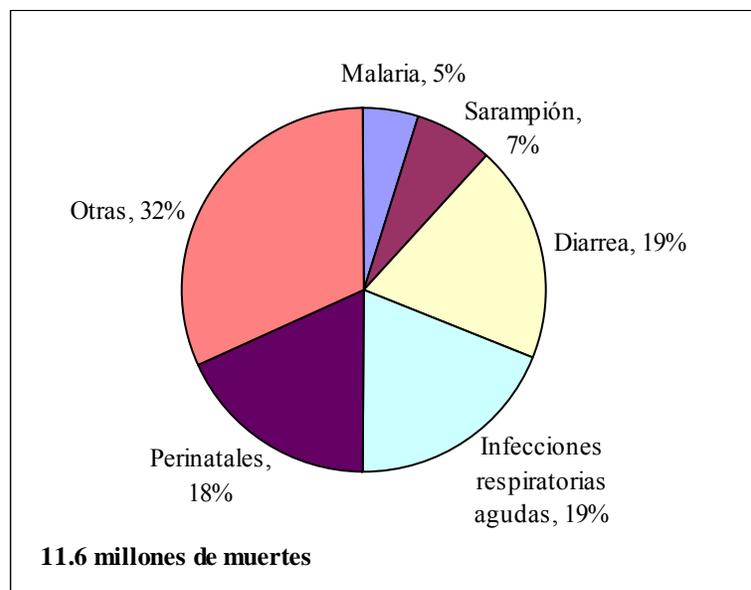
A nivel mundial, las enfermedades microbianas de origen hídrico, como las diarréicas, se consideran las de mayor importancia en cuestión de salud pública debido a su alta incidencia. En el año 2001 éstas representaron el 13% de las 14.7 millones de muertes a nivel mundial debidas a enfermedades infecciosas (Tabla 1.2; WHO, 2003).

Tabla 1.2 Principales causas de muerte por enfermedades infecciosas en el año 2001

| Enfermedad infecciosa | millones | % |
|---------------------------|-------------|----|
| Infecciones respiratorias | 3.9 | 34 |
| SIDA | 2.9 | 25 |
| Enfermedades diarréicas | 1.9 | 17 |
| Tuberculosis | 1.6 | 14 |
| Malaria | 1.1 | 10 |
| TOTAL | 11.4 | |

Adaptado de: WHO (2003)

En los países en desarrollo y particularmente en las comunidades rurales, las enfermedades diarreicas son un problema importante de salud pública, debido a las bajas condiciones socioeconómicas y de sanidad que prevalecen (Cifuentes *et al.*, 1992; Hinrichsen *et al.*, 1998; Mahin y Pancorbo, 1999; Hinrichsen y Robey, 2000). La población infantil y de preescolar es la más susceptible de contraerlas. La Organización Mundial de la Salud reportó que el 19% de las muertes debido a enfermedades diarreicas en el año 1997, fueron de menores de 5 años (Figura 1.3).



Adaptado de: WHO/CHS/CAH/98.1 (1999)

Figura 1.3 Causas de muerte en niños menores de 5 años en países en desarrollo

En México, las muertes por enfermedades diarreicas en menores de 5 años se han reducido en más del 85% en los últimos 10 años. Sin embargo, la tasa de mortalidad sigue siendo muy alta, de más de 35.8 muertes por cada 1,000 niños menores de 5 años en el año 2000 (Secretaría de Salud, 2003), comparada con la reportada para Estados Unidos en el mismo año de 8.7 por 1,000 niños menores de 5 años (UCATLAS, 2003).

1.1.4 Agentes infecciosos

Desde el punto de vista de salud pública, los contaminantes de mayor preocupación cuando se trata del reúso en riego son los microorganismos patógenos (Mujeriego y Asano, 1999; Hussain *et al.*, 2001; Jiménez *et al.*, 2001). Los principales agentes que se encuentran en agua residual se pueden clasificar en: bacterias, virus y parásitos (protozoarios y helmintos). En la Tabla 1.3 se presentan algunos de los microorganismos encontrados en agua residual doméstica y las enfermedades asociadas con ellos.

Tabla 1.3 Tipo de microorganismos patógenos presentes en aguas residuales

| Organismo | Enfermedad |
|---|--|
| Bacterias | |
| <i>Escherichia coli</i> enteropatógena | Gastroenteritis |
| <i>Salmonella typhi</i> | Fiebre tifoidea |
| <i>Salmonella</i> (≈2,100 serotipos) | Salmonelosis |
| <i>Shigella</i> (4 spp.) | Disentería bacilar (shigelosis) |
| <i>Campylobacter</i> | Gastroenteritis |
| <i>Vibrio cholerae</i> | Cólera |
| Virus | |
| Enterovirus (72 tipos, como polio, eco y coxsackie) | Gastroenteritis, anomalías del corazón, meningitis |
| Virus de la Hepatitis A | Hepatitis A |
| Agente Norwalk | Gastroenteritis |
| Rotavirus | Gastroenteritis |
| Protozoarios | |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | Disentería amibiana |
| <i>Giardia lamblia</i> | Diarrea (giardiasis) |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | Diarrea (criptosporidiasis) |
| Helmintos | |
| <i>Ascaris lumbricoides</i> | Anemia (ascariasis) |
| <i>Taenia solium</i> | Teniasis |
| <i>Trichuris trichiura</i> | Diarrea, dolor abdominal (tricuriasis) |

Adaptada de: Yates y Gerba (1998); Solomon *et al.* (1998)

El riesgo de infección por alguno de estos microorganismos depende de la dosis infectiva, de la capacidad del microorganismo para causar la infección (patogenicidad) y de la susceptibilidad del huésped (US EPA, 1992). En la Tabla 1.4 se presentan las dosis infectivas de algunos microorganismos, así como la probabilidad de infección.

Tabla 1.4 Dosis infectiva y probabilidad de infección de microorganismos entéricos

| Organismo | Dosis infectiva (número) | Probabilidad de infección al exponerse a un microorganismo |
|--|---------------------------------|---|
| <i>Escherichia coli</i> (enteropatógena) | 10^6 - 10^{10} | --- |
| <i>Salmonella typhi</i> | 10^3 - 10^7 | 3.8×10^{-5} |
| <i>Vibrio cholerae</i> | 10^3 - 10^7 | 7.0×10^{-6} |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | 20 | 2.8×10^{-1} |
| <i>Shigella dysenteriae</i> | 10 | 1.0×10^{-3} |
| <i>Giardia lamblia</i> | <10 | 1.9×10^{-2} |
| Virus | 1-10 | 1.5×10^{-2} a 3.1×10^{-1} |
| <i>Ascaris lumbricoides</i> | 1-10 | --- |

Adaptado de: US EPA (1992); Yates y Gerba (1998)

El tipo y número de microorganismos presentes en el agua residual depende del origen del agua, de las enfermedades infecciosas que prevalecen en la comunidad, de la época del año, del nivel económico de la población y de la calidad del agua de consumo. En general, la

ocurrencia de agentes infecciosos y sus enfermedades es poco frecuente en comunidades con regulaciones sanitarias muy estrictas, como es el caso de los países desarrollados, mientras que la situación contraria ocurre en los países en desarrollo (Cooper y Olivieri, 1998) (Tabla 1.5).

Tabla 1.5 Concentración de microorganismos en agua residual de países desarrollados y en desarrollo

| Microorganismos | Países desarrollados | Países en desarrollo |
|---|----------------------|----------------------|
| Salmonella NMP/100 mL | 10^3 - 10^4 | 10^6 - 10^9 |
| Virus entéricos UFP/100 mL | 10^2 - 10^4 | 10^4 - 10^6 |
| Huevos de helmintos HH/L | 1-9 | 6-800 |
| Quistes de protozoarios Organismos/L | 28 | 1000 |

Fuente: Page (1996); Jiménez *et al.* (2001)

La cantidad de microorganismos patógenos presentes en el agua residual se refleja en la incidencia de enfermedades. Un ejemplo de esta situación, es la incidencia de la fiebre tifoidea producida por *Salmonella typhi*, cuya principal vía de transmisión es el agua contaminada. La fiebre tifoidea es una de las causas más comunes de enfermedad en regiones pobres, donde afecta cerca de 12.5 millones de personas cada año (WHO, 1998; CDC, 2001) pero no en regiones industrializadas como Estados Unidos (donde ocurren 400 casos/año), Canadá, Europa occidental, Australia y Japón. Específicamente en México, la fiebre tifoidea es una de las causas de morbilidad más comunes, de la que se reportaron 7,481 casos en el año 2002 (Secretaría de Salud, 2002).

1.2 Tratamiento del agua residual

Para poder disponer del agua residual en forma segura, es necesario aplicar en un tratamiento adecuado de tal forma que se minimicen los riesgos a la salud, y mientras mayor sea la probabilidad de contacto con el ser humano el tratamiento debe ser más riguroso. Los distintos procesos de tratamiento de agua residual pueden remover los patógenos, dependiendo de su tipo, desde un 50 % hasta cerca del 100% (Tabla 1.6).

Tabla 1.6 Porcentajes típicos de remoción de microorganismos con tratamientos convencionales

| Microorganismo | Tratamiento primario | Tratamiento secundario |
|---------------------|----------------------|------------------------|
| Salmonella | 50 | 99 |
| Virus entéricos | 70 | 99 |
| Quistes de Giardia | 50 | 75 |
| Huevos de helmintos | 90 | 99.9 |

Adaptado de: Cooper y Olivieri (1998); Jiménez *et al.* (2001); Yates (2003)

A pesar de que los huevos de helmintos son unos de los principales causantes de enfermedades gastrointestinales, especialmente en países en desarrollo donde las condiciones sanitarias son mínimas o escasas, no representan un problema si el agua residual es convenientemente tratada. Estas estructuras, con un tamaño aproximado de 20 a 100 μm , son resistentes a condiciones ambientales adversas y a los métodos tradicionales de desinfección, con excepción del ozono el cual ha demostrado su completa destrucción con una dosis de 18.4 mg O_3/min y un tiempo de contacto de una hora (Rojas-Valencia *et al.*, 2004). A pesar de esto, al encontrarse asociadas con partículas pueden ser removidos por procesos tales como la sedimentación, la coagulación-floculación (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2001), la filtración (Jiménez *et al.*, 1999), los humedales (Stott *et al.*, 2003) y las lagunas de estabilización (Bouhoum *et al.*, 2000; Stott *et al.*, 2003). Los porcentajes de remoción alcanzados con estos procesos son de más del 90% (Jiménez *et al.*, 1999; Jiménez-Cisneros *et al.*, 2001; Stott *et al.*, 2003).

Esta situación no es la misma para el caso de las bacterias, ya que por su tamaño, del orden de 0.3 x 5 μm , no pueden ser removidas en su totalidad por dichos procesos. Jiménez *et al.* (2001) reportaron una remoción de 96% de huevos de helmintos al aplicar un tratamiento primario avanzado (TPA), mientras que las bacterias coliformes fecales y *Salmonella* fueron removidas en tan sólo una unidad logarítmica (90%).

Esta situación se agrava si se considera que la concentración de bacterias en agua residual de países en desarrollo es mucho más alta que la de los países desarrollados (hasta 3 unidades log). Por tanto, una reducción entre el 50 y 90% de la concentración original representaría aún un riesgo para la salud. Por ejemplo, la concentración de *Salmonella* en agua residual de países en desarrollo oscila entre 10^6 - 10^9 NMP/100 mL, por lo que un 90% de remoción representaría un remanente de aproximadamente 10^5 - 10^8 NMP/100 mL. Esta dosis constituye un alto riesgo si se considera que la dosis infectiva para el caso específico de *Salmonella typhi* es 10^3 - 10^7 (US EPA, 1992).

Por tal motivo, para reducir el número de microorganismos y el riesgo de infección, es necesario aplicar un desinfectante con el que se pueda asegurar la calidad microbiológica de los efluentes (Cooper y Olivieri, 1998).

1.2.1 Desinfección

El principal objetivo de la desinfección es proteger la salud pública a través del control de los microorganismos causantes de enfermedad. La importancia de la desinfección en el tratamiento de agua residual, se debe a que este proceso es la última barrera en un tren de tratamiento, que evita la descarga de microorganismos patógenos en cuerpos de agua receptores o cultivos (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996).

Según Cairns (1993) un desinfectante ideal debe cumplir lo siguiente:

- a. Inactivar todos los patógenos en igual forma (el organismo indicador usado para cada caso reflejaría la inactivación del patógeno más resistente e infeccioso)
- b. Ser insensible a la variación de parámetros físicos y químicos del agua
- c. No producir subproductos tóxicos para el hombre o dañinos a la naturaleza durante la desinfección
- d. Inactivar patógenos incluso dentro de los sólidos suspendidos
- e. Evitar mecanismos de reparación luego de la desinfección primaria
- f. Tener un costo razonable y capaz de ser incorporado dentro de un proceso de ingeniería.

1.2.2 Tipos de desinfección

Existe una gran cantidad de desinfectantes físicos y químicos. La filtración, la temperatura, la sedimentación, la radiación (solar, luz UV, gamma) y los procesos electrolíticos se encuentran dentro de los primeros, mientras que el yodo, el bromo, la plata ionizada, el ozono y el cloro son desinfectantes químicos, pero no todos son aplicables al agua residual por su costo y otras consideraciones (Tabla 1.7).

Estos métodos de desinfección actúan sobre los microorganismos por medio de uno o más de los siguientes mecanismos (Darby *et al.*, 1995):

- Daño a la membrana o pared celular
- Modificación de la permeabilidad de la membrana
- Modificación de la naturaleza del protoplasma
- Inhibición de la actividad enzimática
- Daño en los ácidos nucleicos de la célula
- Inducción de procesos anormales de oxido-reducción

Tabla 1.7 Tipos de desinfección y agentes empleados

| Desinfección | Agentes o medios |
|---------------------|---|
| Química | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Halógenos y sus derivados (Cl₂, Br₂, I₂, HOCl, OCl⁻, ClO₂, HOBr, HOI) ▪ Compuestos oxigenados y altamente oxidantes (ozono, peróxido de hidrógeno, fenoles, alcoholes, persulfatos y percarbonatos, ácido peracético y permanganato de potasio) ▪ Iones metálicos (Ag⁺ y Cu⁺²) ▪ Compuestos cuaternarios del amonio ▪ Ácidos y bases fuertes |
| Mecánica | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sedimentación ▪ Filtración |
| Física | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Radiación electromagnética (ondas ultrasónicas, calor, luz visible, luz ultravioleta, radiación gamma y rayos X) ▪ Radiación de partículas (electrones) ▪ Corriente eléctrica |

Adaptado de: Rajeshwar e Ibañez (1997); Salgot *et al.* (2002)

Los desinfectantes empleados con mayor frecuencia son los químicos debido a que poseen atributos que les confieren ventajas tales como (Rajeshwar e Ibañez, 1997):

- Alto potencial para inactivar microorganismos
- Interacción activa con materia orgánica y agentes reductores inorgánicos (aunque esto podría considerarse también una desventaja, ver apartado 1.5)
- Buena solubilidad en medio acuoso (excepto los dihalogenados debido a su naturaleza no polar)
- Capacidad para penetrar la superficie y membrana celular
- Capacidad desodorizante de moderada a buena

Pero, la selección apropiada de un desinfectante a ser aplicado en agua residual, se complica por la amplia variedad de microorganismos con diferentes susceptibilidades, por lo que, para realizar la elección correcta es necesario conocer las ventajas y limitaciones de los diferentes métodos de desinfección. En la Tabla 1.8 se presenta una comparación de las ventajas y limitaciones entre los desinfectantes más usados para la desinfección de agua residual.

Actualmente, el cloro y sus derivados son los desinfectantes más usados en todo el mundo debido a su bajo costo y alta efectividad. No obstante, su uso ha sido cuestionado por la formación de subproductos organoclorados, como los trihalometanos (cloroformo, bromodichlorometano, clorodibromometano y bromoformo), a los que se les atribuye un efecto tóxico o carcinógeno en humanos y animales (Craun, 1991; Dunnick y Melnick, 1993; Acher *et al.*, 1997; Kenneth *et al.*, 1998; Dodds *et al.*, 1999; CCC, 2003). Aunado a esto, su almacenamiento, transporte y aplicación representan una constante amenaza para ciudadanos, operadores de sistemas de agua y al ambiente en general por el alto riesgo de accidentes y fugas que involucran (Rajeshwar e Ibañez, 1997). Por otra parte, el ozono se considera un desinfectante efectivo pero costoso y también fuente de subproductos no deseados (Ver sección 1.8.1; Blatchley *et al.*, 1996).

Tabla 1.8 Comparación entre ventajas y limitaciones de la luz UV, el cloro y el ozono

| Desinfectante | Ventajas | Limitaciones |
|---------------|---|---|
| Luz UV | <ul style="list-style-type: none"> - Eficaz en la inactivación de virus, esporas y quistes - No produce residuos tóxicos - No representa peligro en la generación, manejo, transporte o almacenamiento de productos químicos - Se requieren tiempos de contacto cortos (20-30 segundos) - El equipo requiere menos espacio que otros métodos - Es fácil de operar | <ul style="list-style-type: none"> - A bajas dosis usadas para inactivación de coliformes, pueden no ser inactivados algunos virus, esporas o quistes - No tiene efecto residual - Los organismos pueden reparar el daño causado - Se requiere un programa de mantenimiento de limpieza de lámparas - La presencia de SST y turbiedad pueden afectar la eficacia - No es tan barato como la cloración pero es competitiva cuando se requiere cloración |
| Cloro | <ul style="list-style-type: none"> - Tecnología bien establecida - Provee un efecto residual - Efectivo en la inactivación de bacterias y virus - Menor costo (excepto cuando es necesario cloración y cumplimiento del <i>fire code</i>¹) | <ul style="list-style-type: none"> - El cloro residual es tóxico a la vida acuática, por lo que requiere cloración - Altamente corrosivo y tóxico por lo que representa una amenaza constante en su almacenamiento, transporte y manejo - Oxida materia orgánica lo que genera trihalometanos considerados carcinogénicos - Ineficaz en la inactivación de protozoarios como <i>Cryptosporidium</i>, <i>Gardia</i> y <i>Entamoeba</i> |
| Ozono | <ul style="list-style-type: none"> - Altamente eficaz en la inactivación de bacterias, virus y protozoarios - Tiempos de contacto cortos (10-30 minutos) - No produce residuos peligrosos pues se descompone rápidamente - Evita el recrecimiento - Se genera <i>in-situ</i> por lo que no hay problemas asociados al transporte y manejo | <ul style="list-style-type: none"> - Bajas dosis no son efectivas en la inactivación de algunos virus, esporas y quistes - Tecnología que requiere equipo complicado y sistemas de contacto eficientes - Es muy reactivo y corrosivo, por lo que requiere materiales resistentes a la corrosión tal como el acero inoxidable - Es un gas irritante por lo que se requiere destruirlo para prevenir exposición de los operadores - Puede resultar caro en cuestión de inversión y operación - No tiene efecto residual |

Fuente: Adaptado de Solomon *et al.* (1998); Solomon *et al.* (1998a); Solomon *et al.* (1998b); Solomon *et al.* (1998c); Solomon *et al.* (1998d); Solomon *et al.* (1998e)

¹ Conjunto de normas establecidas e impulsadas por el gobierno de Estados Unidos de América (USA) dentro de las que se regula la disposición de sustancias peligrosas, entre ellas el cloro.

Por estos motivos, se ha impulsado el reemplazo del cloro por desinfectantes “ecológicamente amigables”. Entre ellos se encuentran los métodos físicos, en especial, la luz ultravioleta que es efectiva para inactivar gran variedad de bacterias, virus e incluso algunos protozoarios con dosis de 30 a 120 mW·s/cm² y tiempos de retención hidráulica del orden de segundos (Mujeriego y Asano, 1999). El éxito de la radiación UV se fundamenta más que en su costo y eficacia para inactivar bacterias, virus y hasta protozoarios con dosis relativamente bajas (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996; Clancy *et al.*, 2000; Linden *et al.*, 2002), en que no forma subproductos que pongan en riesgo la salud (Sakamoto, 2000). Por tal motivo, es considerada como una tecnología aceptada en Europa, Estados Unidos y Canadá desde hace dos décadas (Rice y Hoff, 1981; Qualls *et al.*, 1983; Harris *et al.*, 1987; Fahey, 1990; Cairns, 1993; Andreadakis *et al.*, 1999).

1.3 Desinfección con luz ultravioleta

En las últimas dos décadas la radiación UV ha sido considerada como una tecnología establecida, principalmente en Europa, Estados Unidos y Canadá. En Estados Unidos hay más de 2,000 instalaciones para desinfectar efluentes primarios, secundarios y terciarios de agua residual. El éxito de la radiación UV se fundamenta en términos de costos y eficacia pero particularmente en que no se ha demostrado la formación de subproductos que pongan el riesgo la salud (Sakamoto, 2000).

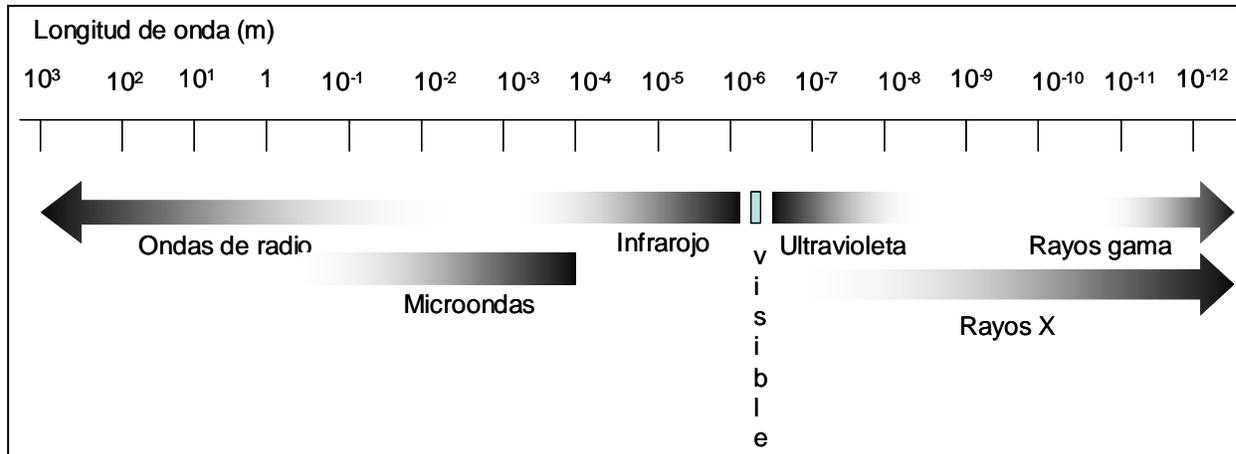
1.3.1 Radiación UV

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética presente en el espectro natural de la radiación solar. Tiene una longitud de onda menor a la de la luz visible (400 nm) pero mayor a la de los rayos X (100 nm) (Figura 1.4). La región de UV se divide en cuatro subregiones: UV de vacío (100-200), UV-C (200-280 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-A (315-400 nm) (Figura 1.5).

1.3.1.1 Generación de la luz UV

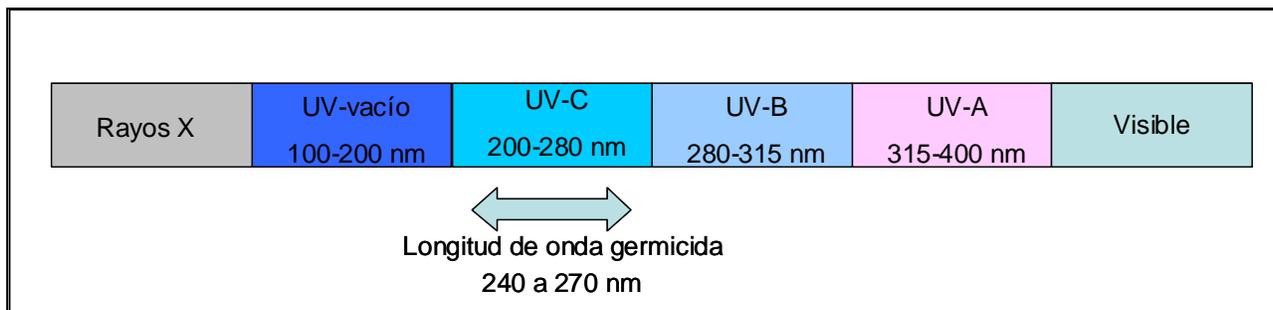
La radiación ultravioleta es generada en tubos de cuarzo, conocidos como lámparas germicidas, que contienen vapor de mercurio a baja presión. Cuando se induce una corriente eléctrica en los polos de la lámpara, se genera un arco voltaico que ioniza los átomos de mercurio, los electrones incrementan su energía y se convierten en fotones de luz UV (Díaz Díaz y Serrano, 2002). La presión dentro de la lámpara afecta la distribución espectral, por lo que se pueden clasificar en:

- Lámparas de baja presión, que emiten cerca del 85% de su energía a una longitud de onda de 254 nm y,
- Lámparas de presión media, que emiten su energía en longitudes de onda desde 180 hasta 370 nm.



Adaptada de: Pietrobon (2002)

Figura 1.4 Espectro electromagnético



Adaptada de: Pietrobon (2002)

Figura 1.5 Espectro electromagnético con escala expandida de la radiación ultravioleta

1.3.2 Modo de acción

A diferencia de la mayoría de los desinfectantes, la radiación ultravioleta no inactiva a los microorganismos por interacción química sino por medio de una reacción fotoquímica en la que la luz absorbida altera los componentes esenciales de la función celular. Los ácidos nucleicos tal como el ácido desoxirribonucleico ² (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN) así como las proteínas absorben la radiación UV, en particular aquella con longitud de onda entre 240 a 270 nm (Figura 1.6, *Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). Debido a que las lámparas de baja presión emiten cerca del 85% de su luz con una longitud de onda cercana a 254 nm, son consideradas como la mejor fuente de generación empleada para la desinfección (US EPA, 1999).

² Molécula en forma de hélice que almacena y transfiere la información genética de la célula

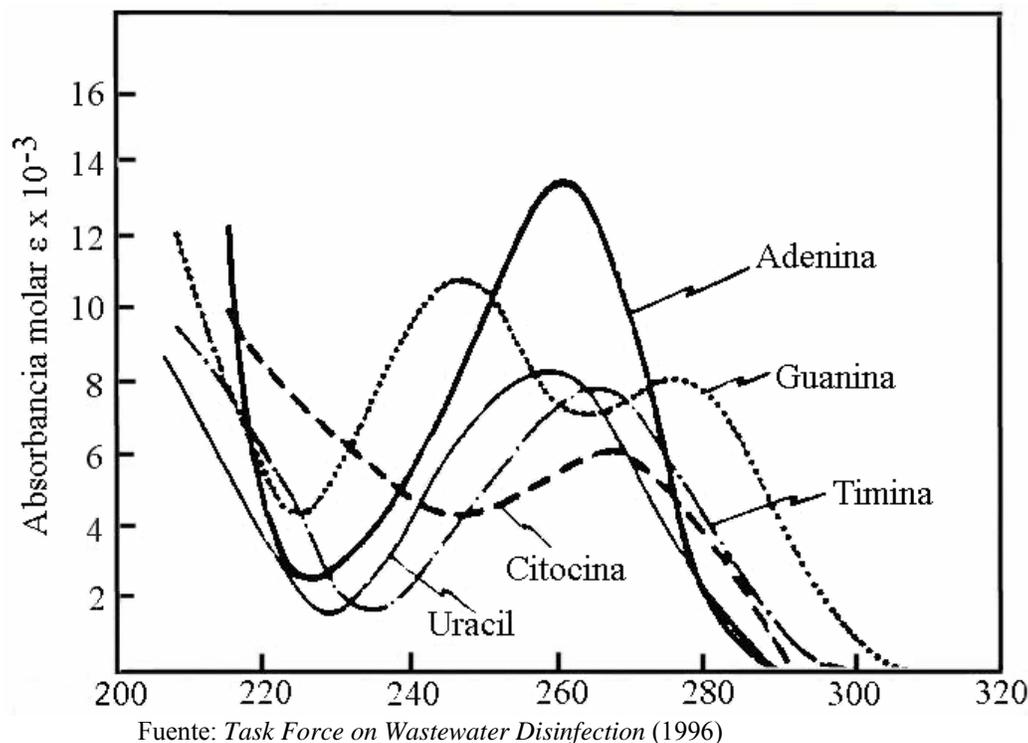


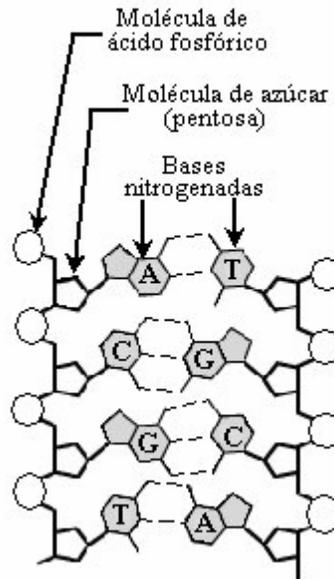
Figura 1.6 Espectro de absorción de bases púricas y pirimídicas a un pH 7

A pesar de que las proteínas y los ácidos nucleicos absorben efectivamente la luz UV, se cree que el daño producido por la radiación se realiza particularmente en los ácidos nucleicos (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). Los cambios fotoquímicos inducidos en estos compuestos han sido ampliamente estudiados (Liltved y Landfald, 2000; Oguma *et al.*, 2002; Zimmer *et al.*, 2003).

A medida que los rayos de luz UV penetran la pared celular de los microorganismos, la energía altera los componentes nucleicos (ADN) lo que resulta en el daño o muerte de la célula. Las unidades monoméricas del ADN son los nucleótidos que tienen tres componentes:

- a. Una base nitrogenada que puede ser púrica o pirimídica
- b. Una molécula de azúcar (pentosa) y
- c. Una molécula de ácido fosfórico (Figura 1.7).

De estos componentes, las moléculas del azúcar y de fosfato no absorben en forma significativa luz UV con longitudes de onda mayores que 220 nm. Por lo que los efectos se observan en las bases púricas y pirimídicas, siendo éstas últimas las más sensibles a la luz UV (Cheremisinoff y Cheremisinoff, 1993). En la Tabla 1.9 se presentan las bases que componen tanto el ADN como el ARN, así como su estructura química (Madigan *et al.*, 1999).

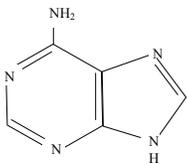
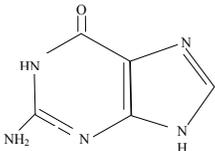
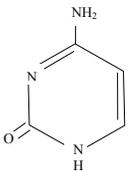
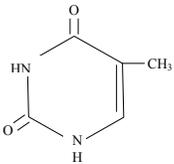
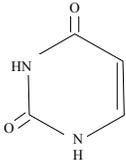


Adaptado de: U.S. Department of Energy Human Genome Program (2004)

Figura 1.7 Estructura del ADN

La energía absorbida genera un doble enlace entre dos bases pirimídicas adyacentes (Figura 1.8). Esta dimerización, que desde el punto de vista energético favorece la unión de timinas (Durbeej y Eriksson, 2003), impide la reproducción de la célula (Darby *et al.*, 1995; Metcalf y Eddy, 1996). Cuando se forman varios dímeros en la cadena de ADN la duplicación es más difícil pues la estructura helicoidal se distorsiona. Normalmente una célula que no se puede duplicar o reproducir se considera muerta, aunque en este caso se acostumbra decir que ha sido **“inactivada”**, debido a que es incapaz de multiplicarse e infectar al huésped

Tabla 1.9 Estructura química de las bases púricas y pirimídicas

| BASES | | ADN | ARN |
|--------------------|---|-----|-----|
| PÚRICAS | | | |
| Adenina (A) |  | ✓ | ✓ |
| Guanina (G) |  | ✓ | ✓ |
| PIRIMÍDICAS | | | |
| Citosina (C) |  | ✓ | ✓ |
| Timina (T) |  | ✓ | |
| Uracilo (U) |  | | ✓ |

Fuente: Mandingan *et al.* (1999)

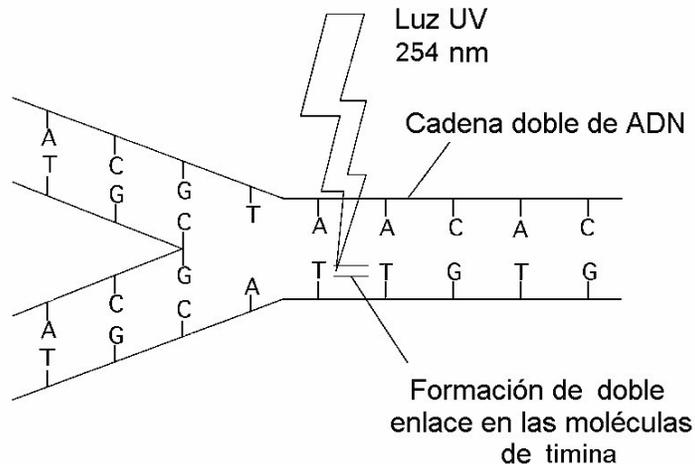


Figura 1.8 Acción germicida de la luz UV sobre las bases nitrogenadas

1.3.2.1 Reparación del daño fotoquímico

La mayoría de los microorganismos pueden reparar los daños que sufren por condiciones ambientales hostiles en su ADN y este es el caso también de la exposición a la radiación UV (Lindenauer y Darby, 1994). Los mecanismos de reparación más estudiados son:

- La fotorreactivación
- La reparación en la oscuridad

El proceso más sencillo es la **fotorreactivación**, la cual se realiza en presencia de luz con longitud de onda entre 330 y 480 nm (Shaban *et al.*, 1997; Liltved y Landfald, 2000), por lo que no ocurre en ductos cerrados de distribución o en cuerpos receptores profundos de agua (Cairns, 1993). Durante la fotorreactivación, los dímeros formados en los ácidos nucleicos son reparados catalíticamente para restablecer sus formas monoméricas, las de la Tabla 1.9 (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). Este mecanismo se caracteriza por la disociación de los dímeros de pirimidina (T-T, C-C o C-T) con ayuda de una enzima fotorreactivante (EFR). De acuerdo con Lindenauer y Darby (1994) la fotorreactivación es una reacción de dos pasos (Figura 1.9).

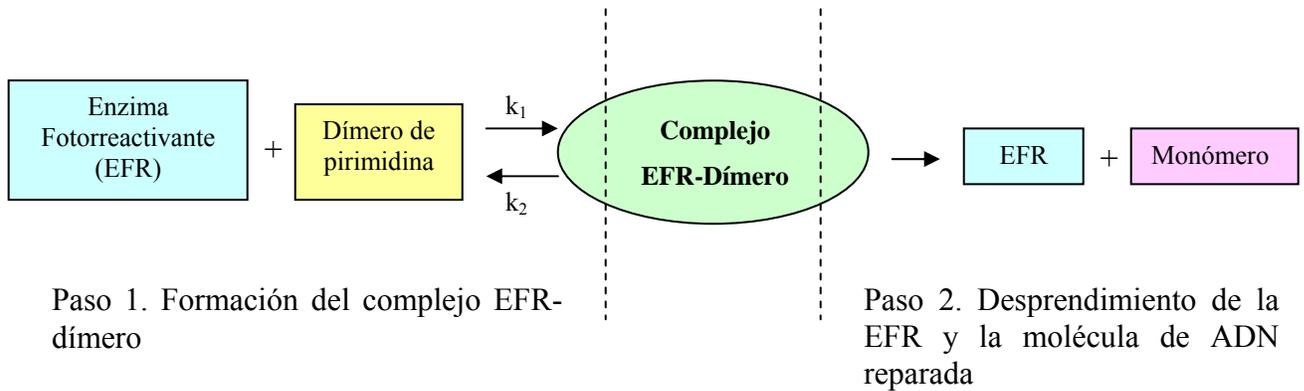


Figura 1.9 Mecanismo de 2 pasos propuesto para la fotorreactivación

Paso 1. La enzima se une con el dímero de pirimidina y forma un complejo EFR-Dímero. Este paso no requiere luz. La reacción es reversible pero se favorece la formación del complejo por la cinética puesto que $k_1 \gg k_2$. El número de enzimas fotorreactivantes varía de un organismo a otro. La velocidad a la cual la EFR se une al dímero de pirimidina depende de la temperatura, el pH y la fuerza iónica.

Paso 2. La formación del complejo resulta en la monomerización del dímero y subsiguiente desprendimiento de la EFR. La transformación del dímero a su forma monómera original es absolutamente dependiente de la intensidad de la luz y de la cinética de reacción. La reacción ocurre en menos de un milisegundo y la reparación es perfecta. La longitud de onda que cataliza la fotorreactivación en diferentes organismos se encuentra generalmente entre 310 y 490 nm.

La fotorreactivación depende de la cantidad de complejos EFR-dímero. El número de éstos es limitado en cada célula. Sin embargo, la exposición a un periodo de tiempo más largo genera el desprendimiento del producto reparado (paso 2) y por lo tanto la liberación de EFRs que estarían disponibles para formar nuevos complejos (paso 1) (Lindenauer y Darby, 1994).

La **reparación en la oscuridad** es un mecanismo poco común. En éste se involucra el reconocimiento de la doble ligadura en la cadena del ADN y su eliminación a través de la acción de una enzima endonucleasa, a lo que le sigue un proceso de “parchado” que involucra la síntesis del ADN (Figura 1.10) (Rose, 1970).

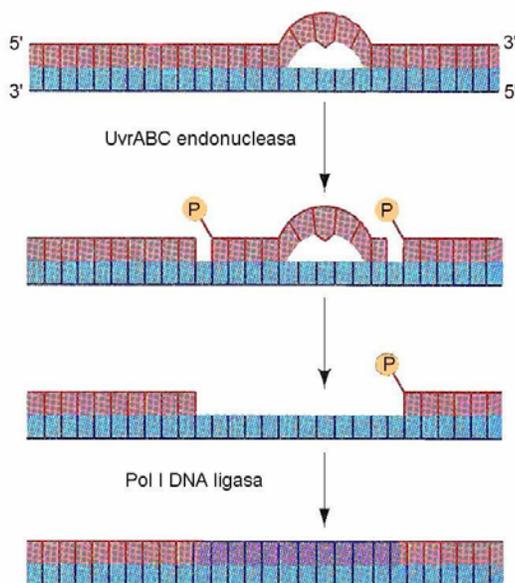


Figura 1.10 Mecanismo de reparación en la oscuridad

1.3.2.2 Factores que influyen en la reparación

La reparación de los daños causados al ADN por la luz ultravioleta, principalmente por medio de la fotorreactivación, depende de dos factores:

1. La dosis de inactivación (luz UV), y de
2. El tipo de microorganismo

1. Dosis de inactivación

De acuerdo con Baron (1997) la dosis de luz UV es el factor principal que gobierna la reparación. Lindenauer y Darby (1994) reportaron que el aumento en la dosis disminuye el grado de reparación de los microorganismos. Esto debido a que al aumentar la dosis inactivadora, el microorganismo expuesto acumula mayor número de dímeros de pirimidina y se dañan tanto los genes que codifican la síntesis de las enzimas reparadoras como cualquier otro sitio de regulación que intervenga en el proceso. Por tanto, la reparación se limita ya que solo algunas enzimas (pocas) pueden realizarla. Por ello, conviene aplicar una dosis alta de tal forma que se limite este proceso. Lindenauer y Darby (1994) señalan que el efecto de la reactivación es insignificante para dosis entre 60 a 80 mW s/cm^2 (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). De acuerdo con Baron (1997) la reparación de coliformes termotolerantes fue siempre mayor (aproximadamente 1 log) después de una dosis de 40 $\text{mW}\cdot\text{s/cm}^2$ que cuando se aplicaron dosis de 50 y 60 $\text{mW}\cdot\text{s/cm}^2$.

Por otro lado, para realizar las pruebas de reactivación a nivel laboratorio pueden emplearse dos fuentes de radiación reactivante: una fuente artificial, que generalmente es una lámpara fluorescente, o la luz solar. La mayoría de los estudios relacionados con la fotorreactivación se

realizan mediante la exposición de la muestra desinfectada a luz fluorescente con longitud de onda promedio de 360 (Harris *et al.*, 1987, 1987a; Liltved y Landfald, 1996; Tosa e Hirata, 1999) y a la luz solar (Whitby *et al.*, 1984; Lindenauer y Darby, 1994; Carnimeo *et al.*, 1994; Kashimada *et al.*, 1996).

En los casos donde se ha empleado lámparas fluorescentes como fuentes de radiación fotorreactivante, se han registrado grados de recrecimiento de hasta 3 unidades log, dependiendo de la dosis de luz UV aplicada y del tipo de microorganismo (ver siguiente sección). En la Tabla 1.10 se presenta algunos de los trabajos relacionados con estos estudios y los resultados.

Por otro lado, los estudios realizados con luz solar reportan una rápida reactivación (en los primeros 20 minutos) al exponer la muestra desinfectada a la luz solar y un posterior decremento gradual debido al mismo efecto germicida de la luz solar (Kashimada *et al.*, 1996).

Tabla 1.10 Estudios de reactivación usando una lámpara fluorescente como fuente de radiación

| Organismo | Tiempo de exposición a la luz (h) | Reactivación (log) | Referencia |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Coliformes totales | 2 | >2 | Harris <i>et al.</i> , 1987 |
| Coliformes fecales | | >1 | |
| Enterococos fecales | | N.D. | |
| <i>Escherichia coli</i> | 2 | >3 | Harris <i>et al.</i> , 1987a |
| Bacterias heterotróficas | 2 | ≈ 1 | Kashimada <i>et al.</i> , 1996 |
| Coliformes totales | | ≈ 1 | |
| Coliformes fecales | | ≈ 1 | |
| <i>Aeromonas salmonicida</i> | 12 | 3 | Liltved y Landfald, 1996 |
| <i>Vibrio anguillarum</i> | | 3 | |
| <i>Yersinia ruckeri</i> | | 3 | |
| <i>Escherichia coli</i> O26 | 3, 5 | 3 | Tosa e Hirata, 1999 |
| <i>Escherichia coli</i> O157:H7 | | N.D. | |

N.D. No detectado

De acuerdo con Tosa e Hirata (1999), la intensidad de la luz solar es de alrededor de 2 mW/cm² (con longitud de onda principalmente de 360 nm). Este valor es por lo menos 100 veces mayor al de una lámpara fluorescente (0.023 mW/cm²). Por lo tanto, en tanques abiertos o cuerpos receptores es más probable que exista reactivación durante el día, de la que se ha reportado en diversos estudios a nivel laboratorio. Aunque el grado de reactivación estará determinado por la profundidad de la descarga, la migración en la columna de agua y la calidad del agua, las cuales influyen la intensidad de la luz y la distribución espectral (Liltved y Landfald, 2000). Por tanto, se debe considerar un aumento en la dosis de luz UV en el diseño de un sistema de desinfección cuyo efluente sea descargado a receptores abiertos tales como ríos o lagos (Tosa e Hirata, 1999).

2. Tipo de microorganismo

Referente al tipo de microorganismo se han realizado estudios de reactivación principalmente con bacterias y virus. En cuanto a bacterias se refiere, Harris *et al.* (1987a) reportaron una fotorreactivación mayor de 3 unidades log para *Escherichia coli* así como Tosa e Hirata (1999) que reportaron el mismo grado de reactivación para *Escherichia coli* O26. Sin embargo, éstos últimos encontraron que bajo las mismas condiciones, la especie *Escherichia coli* enterohemorrágica O157:H7 no presentó ningún grado de recrecimiento. Por otro lado, el grupo de enterococos fecales no ha evidenciado reactivación alguna de acuerdo con los estudios de Whitby *et al.* (1984) y Harris *et al.* (1987).

En cuanto a virus se refiere, Baron (1997) reportó que no existió reactivación de colifagos al ser expuestos por dos horas a la radiación solar. Esto se debe a que los virus, que constan simplemente de ácido nucleico y una capa o pared que lo contiene, no poseen un sistema enzimático que pueda reparar los daños causados a su estructura (Baron, 1997).

En resumen, los ingenieros que diseñan y operan los sistemas de desinfección deben tomar en cuenta el aspecto de la reactivación ya que desde el punto de vista operacional, la existencia de éstos mecanismos inducen a aumentar la dosis requerida para que no se lleven a cabo, lo que en ocasiones implica también la introducción de más equipo o tiempos de exposición prolongados (US EPA, 1986).

1.4 Efecto germicida

Para que una reacción fotoquímica se lleve a cabo se deben cumplir por lo menos dos condiciones:

- Debe existir disponibilidad de energía suficiente de radiación para alterar enlaces químicos y,
- La radiación debe ser absorbida por las moléculas de los microorganismos.

El efecto germicida está directamente relacionado con la naturaleza de cada **microorganismo** y con la **dosis de luz UV** aplicada al agua residual.

1.4.1 Tipo de microorganismo

El tipo de microorganismo es el aspecto más importante en la desinfección. La cantidad de daño celular depende de la energía absorbida por ellos y de su resistencia a la luz UV. Los microorganismos responden de diferente manera a la luz UV en función de su estructura física. De acuerdo con la literatura se ha sugerido que la dosis requerida parece aumentar con el tamaño de la célula así como con la cantidad de ADN (Umbreit, 1962; Darby *et al.*, 1995; Joret *et al.*, 1997; Facile *et al.*, 2000). De acuerdo con este planteamiento las bacterias requerirían menor dosis para su inactivación que los protozoarios. No obstante, estudios

recientes han demostrado que los protozoarios tales como *Cryptosporidium* pueden ser inactivados hasta en 3 unidades log con dosis muy bajas ($3 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$).

Anteriormente, se reportaba la necesidad de dosis muy elevadas con tiempos de exposición de hasta 150 minutos para la inactivación de protozoarios (Reynolds, 2002). Por ejemplo, la *Task Force on Wastewater Disinfection* (1996) reportaron dosis de hasta $80 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ para inactivar en menos de 1 unidad log a *Giardia muris*. Sin embargo de acuerdo con Bukhari *et al.*, 1999 la clave en la contradicción de resultados reside en las técnicas empleadas para determinar la eficacia de la desinfección, que han sido comúnmente la determinación de viabilidad o infectividad.

Por lo general, la viabilidad de protozoarios se determina por medio de tinción y exquistación *in vitro*³. Pero actualmente, se hace uso de la infectividad en cultivo de células o en ratones como un indicador de la eficacia de desinfección (Craik *et al.*, 2000; Clancy *et al.*, 2000; Craick *et al.*, 2001; Linden *et al.*, 2002). Con el uso de esta técnica se han determinado mayores grados de inactivación cuando se aplican menores dosis de UV. Estos resultados se deben considerar para estudios futuros, en los que sería primordial establecer la importancia de determinar viabilidad o infectividad y sus implicaciones en la salud (Reynolds, 2002).

En la Tabla 1.11 se resumen varios de los trabajos que existen sobre la inactivación de microorganismos al aplicar luz UV. En términos generales las bacterias vegetativas son más sensibles que los virus y éstos más sensibles que las bacterias formadoras de esporas.

En general, los estudios realizados con desinfectantes se llevan a cabo principalmente en países desarrollados y giran en torno a la inactivación del tipo y la concentración de microorganismos presentes en aguas residuales de estos países, los cuales distan, principalmente en cantidad, de las presentes en agua residual de países en desarrollo (ver Tabla 1.5).

La mayor parte de la literatura disponible en torno a la desinfección con luz UV, se enfoca en la inactivación de indicadores de contaminación como las bacterias coliformes fecales y enterococos fecales, así como de bacterias de las cuales la más estudiada es *E. coli* (Lazarova *et al.*, 1998; Sommer *et al.*, 1998). Por ello, a pesar de la gran variedad de información que existe, hay muy pocos estudios acerca de la inactivación de *Salmonella typhi*, cuya presencia en el agua residual es de gran preocupación para la población de países en desarrollo, tal como es México.

³ Proceso mediante el cual se desarrollan condiciones favorables para promover la transformación del microorganismo de su estado de quiste.

Tabla 1.11 Inactivación de diversos microorganismos al aplicar luz UV

| Microorganismo | Concentración inicial | Dosis aplicada mW·s/cm ² | Inactivación (Log) | Condiciones | Referencia |
|---|--|-------------------------------------|--------------------|---|--------------------------------|
| BACTERIAS (0.5-1.5 x 1-3 µm) | | | | | |
| Coliformes fecales Enterococos fecales | N.E. | 30-45 30-45 | 3-5 3-5 | Efluentes secundarios y terciarios | Lazarova <i>et al.</i> , 1999 |
| Coliformes totales Coliformes fecales Enterococos fecales | N.E. | 35 35 35 | 3 3 3 | N.E. | Lazarova <i>et al.</i> , 1998 |
| <i>Escherichia coli</i> <i>Bacillus subtilis</i> | 10 ⁶ UFC/mL | 10 60 | >5 3 | Microorganismos de colección. Pruebas en solución salina. Lámpara de baja presión | Sommer <i>et al.</i> , 1998 |
| <i>Escherichia coli</i> Enterococos fecales | 10 ⁶ -10 ⁷ UFC/mL 10 ⁶ -10 ⁷ UFC/mL | 3-7 10 | 3 >2 | Suspensión en solución buffer. Microorganismo de colección. Lámpara de baja presión | Harris <i>et al.</i> , 1987a |
| <i>Bacillus subtilis</i> | 1.3 x 10 ⁶ esporas/mL | 40 | 3 | Agua destilada estéril. Lámpara de baja presión | Sommer <i>et al.</i> , 1995 |
| Coliformes fecales Enterococos <i>Clostridium perfringens</i> | 10 ⁵ UFC/100 mL 10 ⁴ UFC/100 mL 10 ⁴ UFC/100 mL | 30-45 30-45 75 | >3 >3 2 | Efluente secundario. Lámpara de baja presión. | Jacangelo <i>et al.</i> , 2003 |
| VIRUS (0.015-0.2 µm) | | | | | |
| Bacteriofago MS2 | N.E. | 17-200 | 2-5 | Efluentes secundarios y terciarios | Lazarova <i>et al.</i> , 1999 |
| Bacteriofago MS2 Bacteriofago φx174 | N.E. | 100 30 | <5 6 | N.E. | Lazarova <i>et al.</i> , 1998 |
| Bacteriofago φx174 Bacteriofago B40-8 Bacteriofago MS2 | 10 ⁶ UFP/mL 10 ⁶ UFP/mL 10 ⁶ UFP/mL | 15 27 50 | 4 4 >2 | Microorganismos de colección. Pruebas en solución salina. Lámpara de baja presión | Sommer <i>et al.</i> , 1998 |
| Bacteriofago MS2 | N.E. | 68-87 | 4 | N.E. | US EPA, 1999 |
| Bacteriofago MS2 | N.E. | 30 | 2 | Luz monocromática. Pruebas en solución salina y buffer de fosfatos a temperatura ambiente | Shin <i>et al.</i> , 2000 |
| Virus hepatitis A | N.E. | 6-15 | 4 | N.E. | US EPA, 1999 |
| Bacteriofago F Enterovirus Adenovirus | 10 ³ UFP/mL 10 ² UFP/mL 10 ² UFP/mL | 35-45 35-45 40-45 | 2 2 2 | Efluente secundario. Lámpara de baja presión. | Jacangelo <i>et al.</i> , 2003 |

N.E. No especificados

Continuación ...

| Microorganismo | Concentración inicial | Dosis aplicada mW·s/cm ² | Inactivación (Log) | Condiciones | Referencia |
|--------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------|---|------------------------------|
| PROTOZOARIOS (2-200 µm) | | | | | |
| <i>Giardia lamblia</i> | 10 ⁶ quistes/mL | 1 | >4 | Solución buffer. Lámpara de baja presión. Uso de infectividad en ratones para medir inactivación | Linden <i>et al.</i> , 2002 |
| <i>Giardia muris</i> | 1.5-3 x 10 ⁶ quistes | 5-83 | 2-3 | Lámpara de presión media. Agua potable filtrada a condiciones ambientales. Uso de 3 métodos (tinción, ex - quistación <i>in vitro</i> e infectividad) para medir inactivación | Craik <i>et al.</i> , 2000 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | | 8 800 | 2-3 | N.E. | US EPA, 1999 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | 6 x10 ⁵ a 1.5 x10 ⁶ quistes/mL | 10-25 | 2-3 | Agua potable filtrada, condiciones ambientales. Cambios de temperatura. Uso de infectividad para medir inactivación | Craik <i>et al.</i> , 2001 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | N.E. | 19 | 4 | Lámpara de presión media. Uso de infectividad para medir inactivación | Bukhari <i>et al.</i> , 1999 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | N.E. | 3 3 | 3.4 3 | Lámpara de presión media. Uso de infectividad para medir inactivación | Clancy <i>et al.</i> , 2000 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | N.E. | 3 | 3 | Luz monocromática. Pruebas en solución salina y buffer de fosfatos a temperatura ambiente | Shin <i>et al.</i> , 2000 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | 10 ⁶ quistes/mL | 2 | 1.8-2.3 | Solución buffer. Lámpara de presión media. Uso de longitudes de onda entre 250 y 275 nm. Pruebas de infectividad en células de hígado | Linden <i>et al.</i> , 2001 |

N.E. No especificados

Asimismo, la presencia de amibas patógenas de alta peligrosidad como *Acanthamoeba* spp. en agua residual ha sido demostrada por Maya (2000). Éstas representan una amenaza continua porque pueden llegar a producir lesiones patológicas en ojos, pulmón, piel y cerebro, e incluso la muerte. En particular, la peligrosidad de estas últimas radica en su capacidad de enquistarse, lo que le confiere una mayor resistencia a diversos procesos convencionales de desinfección. En México se han confirmado 10 casos de muerte debido a la encefalitis granulomatosa⁴ producida por esta amiba, comparada con 100 en Estados Unidos y 5 en Canadá (Maya, 2000).

⁴ Enfermedad del sistema nervioso central, donde los hemisferios cerebrales están usualmente caracterizados por edemas focales asociados con necrosis y hemorragias recientes.

La cifra podría parecer poco alarmante, sin embargo se deben considerar todos los casos que no han sido confirmados y que se reportan como muerte bacteriana aún cuando el diagnóstico clínico indique la ausencia de las mismas (Martínez, 1993; Sheldon, 1993).

1.4.2 Dosis de luz UV

La dosis se describe como el producto de la velocidad a la cual la energía es emitida (intensidad) y el tiempo al que los organismos son expuestos a tal energía (Loge *et al.*, 1998), es decir:

$$D = I \times t \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde

D : Dosis, $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$
 I : Intensidad, mW/cm^2
 t : Tiempo, s

La experiencia indica que cuando los microorganismos son expuestos a la radiación UV, una fracción constante de los microorganismos son inactivados por cada incremento progresivo en el tiempo (US EPA, 1999).

1.4.3 Estimación de la dosis

A nivel laboratorio, la determinación de la dosis de luz UV se puede realizar fácilmente con un equipo de luz colimada, en el que la cantidad de luz generada de forma paralela puede ser medida a través de un radiómetro con un detector sensible y debidamente calibrado. La intensidad medida por el radiómetro se ajusta para considerar la absorbancia del agua y al ser multiplicada por el tiempo de exposición se obtiene la dosis (Bolton y Henke, 1999). Sin embargo, la dosis de luz UV que se debe aplicar en un reactor no se puede determinar con facilidad. Ello se debe a que en el laboratorio se mide la radiación de luz UV en un punto específico y de luz paralela por medio de un radiómetro. Mientras que en la práctica, las lámparas emiten luz en todas direcciones y la medida del laboratorio no es representativa de ello (Bolton y Henke, 1999). Existen tres formas indirectas de establecer la dosis en un reactor, estas son:

- Actinometría⁵ química
- Ensayos biológicos o bioensayos
- Modelos matemáticos

Los dos primeros son los más usados y proporcionan una medida directa de la dosis, mientras que los modelos matemáticos proveen un estimado de la intensidad de luz, que junto con el tiempo promedio estimado de exposición, son usados para calcular la dosis (Loge *et al.*, 1998).

⁵ Medida de la intensidad y la acción química de las radiaciones luminosas

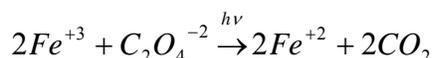
1.4.3.1 Actinometría química

La actinometría química es un método con el cual se mide el total de energía disponible en un sistema de luz UV a través de una reacción química. Los reactivos (sensibles a la luz UV con longitud de onda determinada) son expuestos a ésta y el producto formado por la acción de los fotones absorbidos es determinado analíticamente (Bolton y Henke, 1999).

En la práctica, una celda de cuarzo que contiene una mezcla de compuestos químicos se coloca dentro del reactor y se expone a la radiación por determinado tiempo. La intensidad de la luz UV se obtiene a partir de la cantidad de producto que se genera debido a la radiación (Bolton y Henke, 1999).

Los compuestos químicos más comunes son el ferrioxalato de potasio, el bisulfato peróxido de potasio en ter-butanol, el peróxido de hidrógeno y las sales de oxalato de uranio. Pero el actinómetro químico más usado es el formado por ferrioxalato de potasio ($K_3Fe(C_2O_4)_3$) (Bark *et al.*, 2000).

La acción de éste actinómetro se basa en la fotorreducción del hierro férrico (Fe^{+3}) a su forma ferrosa (Fe^{+2}) de acuerdo con la reacción



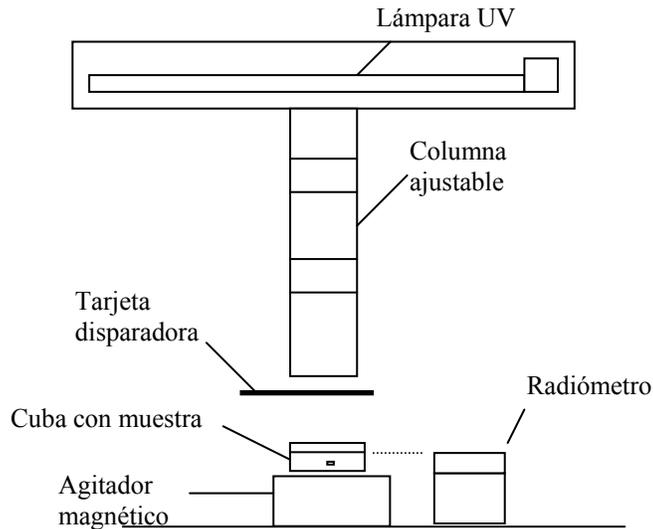
La reducción del hierro dependerá de la cantidad de luz que absorba el ferrioxalato. La luz UV con una longitud de onda entre 200 y 310 nm es absorbida en cerca de 99% por el actinómetro (Linden y Darby, 1998a). La cantidad de Fe^{+2} se mide indirectamente por espectrofotometría a través de la cuantificación de un complejo hierro-quelante. El quelante más usado para este propósito es la fenantrolina (Sözgen y Tütem, 2001). La determinación de la dosis se basa en el cálculo del coeficiente de extinción de dicho complejo (Linden y Darby, 1998a).

A pesar de que la actinometría química es un método confiable, sencillo, rápido, preciso y de bajo costo, su principal problema es que al ser aplicado para aguas residuales el actinómetro puede reaccionar con los compuestos químicos o partículas presentes en el efluente, lo que resultaría en falsas mediciones de la dosis de la luz UV (Linden y Darby, 1998a).

1.4.3.2 Ensayos biológicos o bioensayos

En este tipo de ensayo, la relación entre la dosis de UV y la inactivación de los microorganismos se desarrolla bajo condiciones controladas. Los organismos seleccionados, típicamente esporas de *Bacillus subtilis* o fagos MS2, se colocan en solución y se exponen a la radiación de un equipo de luz colimada (Figura 1.11) con una intensidad conocida (medida con un radiómetro) por un periodo determinado. El propósito del equipo de luz colimada es producir una radiación casi paralela de tal modo que sea expuesta de forma perpendicular a una superficie plana. Ello se requiere debido a que los radiómetros usados para medir la intensidad están diseñados para cuantificar la intensidad de la luz perpendicular a la superficie del detector (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996; Loge *et al.*, 1998).

La dosis es el producto de la intensidad, corregida con la absorbancia del líquido de acuerdo con la ley de Beer (Morowits, 1950), y el tiempo de exposición. La dosis varía cambiando el tiempo de exposición (Loge *et al.*, 1998). Una vez que se obtiene la curva de dosis-respuesta, ésta sirve como base para conocer la dosis aplicada en un sistema continuo, con base en la inactivación registrada (Bolton y Henke, 1999).



Fuente: Loge *et al.* (1998)

Figura 1.11 Esquema típico de un equipo de luz colimada

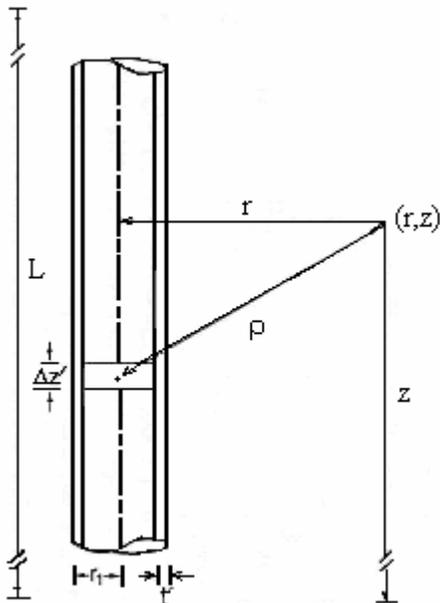
Los microorganismos son sembrados en el influente del sistema de luz UV. El sistema es monitoreado en el influente y el efluente para registrar la inactivación. La dosis de luz UV se obtiene al registrar la dosis correspondiente a la magnitud de inactivación en la gráfica dosis-respuesta (Bolton y Henke, 1999).

Una de las desventajas de este método es que representa una inversión en tiempo ya que se requieren muestreos frecuentes y de réplicas para asegurar la precisión. Por tal motivo, se considera un método costoso comparado con otros utilizados para determinar la dosis de luz UV (US EPA, 1986; Linden y Darby, 1998a).

1.4.3.3 Métodos matemáticos

El método matemático más usado para determinar la intensidad promedio de UV es el *Point Source Summation* (PSS) (Qualls *et al.*, 1985; Loge *et al.*, 1996a; Loge *et al.* 1996a; Braunstein *et al.*, 1996; Chu-Fei *et al.*, 1998). En este método, la intensidad de luz UV promedio para un reactor, con geometría y configuración de lámparas definida, es función de la transmitancia del líquido a ser irradiado. El cálculo matemático de la radiación en un reactor se realiza tomando en cuenta que la mayoría de las fuentes de radiación son lámparas largas y delgadas y considerando que las lámparas son una serie finita de puntos fuente espaciados de forma

uniforme a lo largo del eje de la lámpara que irradian en forma de esferas en todas direcciones. La intensidad en cualquier punto del reactor se calcula sumando las intensidades que se reciben en ese punto procedentes de todos los puntos fuentes del sistema. Por tal motivo, es necesario el uso de programas numéricos que faciliten el trabajo (Figura 1.12; Bolton y Henke, 1999).



Donde:

- z : Coordinada longitudinal del sitio receptor, cm
- r : Distancia radial del eje de la lámpara al sitio receptor, cm
- t : Espesor de la camisa de cuarzo
- ρ : $[r^2 + (z-h)^2]^{1/2}$, cm

Fuente: *Task Force on Wastewater Disinfection* (1996)

Figura 1.12 Esquema de la geometría de la lámpara usada en la técnica de PSS

En este método se deben tomar en cuenta los mecanismos de disipación y de absorción que pueden atenuar la intensidad de la luz en el incremento de la distancia de la fuente. Los parámetros que son importantes de considerar son la geometría del reactor y de las lámparas, la transmitancia de las camisas de cuarzo y la transmitancia del agua que fluye a través del sistema (Loge *et al.*, 1998).

De los métodos mencionados, los bioensayos han sido favorecidos por diversos autores (Qualls *et al.*, 1983; Harris *et al.*, 1987a; Cairns *et al.*, 1995; Parker y Darby, 1995; Kashimada *et al.*, 1996; Braunstein *et al.*, 1996; Sommer *et al.*, 1997; Lazarova *et al.*, 1998; Loge *et al.*, 1999) no solo para determinar la dosis en un sistema sino para realizar pruebas de desinfección. Esto debido a que las pruebas de desinfección a nivel laboratorio con un equipo de luz colimada pueden ser fácilmente controladas. Por tal motivo este método fue el seleccionado para desarrollar las pruebas de desinfección del presente trabajo.

1.5 Factores que afectan la dosis de luz UV

La dosis de desinfección dependerá de la magnitud de la intensidad de la luz UV aplicada y el tiempo de exposición. Por tal motivo, cualquier factor que altere estas dos variables tiene influencia en la magnitud de la dosis (Tabla 1.12).

Tabla 1.12 Factores que afectan la dosis

| DOSIS | = | INTENSIDAD | X | TIEMPO DE RETENCIÓN |
|--------------|----------|---|----------|---|
| | | Calidad del agua <ul style="list-style-type: none"> • Transmisión UV • Sólidos suspendidos • Sustancias disueltas (orgánicos e inorgánicos) | | <ul style="list-style-type: none"> • Caudal • Patrón de flujo • Existencia de cortos circuitos o zonas muertas • Diseño del reactor • Disponibilidad del terreno |
| | | Condición de la lámpara <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de uso • Temperatura • Limpieza de la camisa | | |

1.5.1 Calidad del agua

La calidad del agua puede afectar la cantidad de la luz UV que es transmitida a través del agua en un reactor. Los principales factores que la afectan son la presencia de sustancias y de partículas que absorben la luz UV.

1.5.1.1 Transmisión de la luz

La absorbancia y la transmitancia son medidas que indican la cantidad de luz monocromática que es absorbida por o pasa a través de una solución. La capacidad que tiene el agua para dejar pasar la luz a través de ella se define como transmitancia, es leída a una longitud de onda de 254 nm y se expresa como un porcentaje de la transmitancia que presenta el agua desionizada (establecida como 100%).

La absorbancia y la transmitancia se relacionan por medio de la siguiente expresión

$$A = \log \frac{100}{\%T} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde

A : Absorbancia

%T : Porcentaje de transmitancia

La reducción de la transmitancia en el agua residual resulta en una intensidad más baja aplicada al efluente. Debido a que la dosis es el producto de la intensidad por el tiempo de exposición, entonces una intensidad reducida debe ser compensada con largos tiempos de retención.

La transmitancia de la luz UV en el agua residual tratada depende del tipo de proceso, de la fuente y de la concentración de los contaminantes industriales. En la Tabla 1.13 se presentan los valores de transmitancia típicos de efluentes de diversos tratamientos biológicos. (Sakamoto y Cairns, 1996). La *Task Force on Wastewater Disinfection* (1996), recomienda una transmitancia del agua residual del 65% como límite mínimo para que un sistema de desinfección convencional pueda operar eficientemente. De lo contrario, el sistema de desinfección debe ser precedido por otro tratamiento de tal forma que el valor de la transmitancia del agua residual sea mayor (US EPA, 1999).

Tabla 1.13 Valores de transmitancia típicos del agua de diferentes procesos de tratamiento

| Proceso de tratamiento | % T |
|-------------------------------|------------|
| Crecimiento en suspensión | 60-65 |
| Crecimiento en biopelícula | 50-55 |
| Lagunas | 35-45 |

Fuente: Adaptado de Sakamoto y Cairns (1996)

Algunas de las industrias cuyos aportes orgánicos e inorgánicos pueden afectar la transmitancia del agua son la textil, la de la pulpa y el papel, la de procesamiento de alimentos y la de manufactura química.

1.5.1.2 Sustancias disueltas

Las sustancias disueltas, orgánicas e inorgánicas afectan la absorción de la luz UV. Las principales son algunos pigmentos de algas, los ácidos fúlvicos y húmicos, los compuestos fenólicos y la triptona (Gehr, 1996).

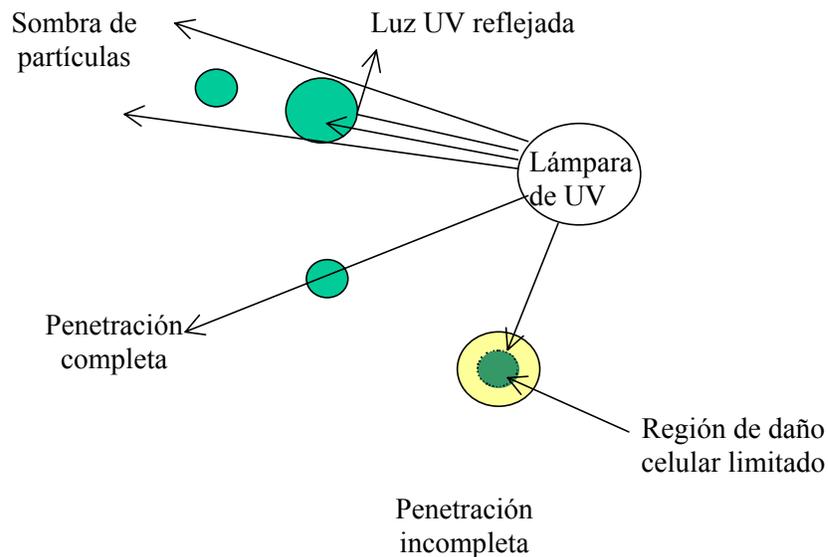
Las sustancias inorgánicas como el hierro, el calcio, el magnesio y el manganeso afectan los equipos de luz UV. Estos compuestos precipitan y se depositan en las camisas de cuarzo de las lámparas, evitando que la luz UV penetre en el agua. Un límite máximo de hierro y magnesio de 0.3 mg/L es, por tanto, recomendable (Toft *et al.*, 1988).

Así también, los procesos que utilizan altas concentraciones de cloruro férrico para mejorar la remoción de sólidos, producen generalmente efluentes con valores bajos de transmitancia, debido tanto a la presencia de hierro disuelto que absorbe la luz como a su precipitación (Gehr y Wright, 1998). Otro de los efectos del uso del hierro es la formación de una capa protectora para las bacterias inmersas en las partículas. El empleo de sulfato de aluminio como coagulante produce mayores valores de transmitancia y no inhibe la penetración de la luz (Toft *et al.*, 1988).

1.5.1.3 Efecto de las partículas

La presencia de partículas en el agua residual afecta no sólo la desinfección con luz UV, sino también con el cloro, el dióxido de cloro y el ozono, entre otros (Chen *et al.*, 1985; Cairns, 1993; Lazarova *et al.*, 1998).

En la desinfección con luz UV, las partículas absorben la luz y reducen la intensidad irradiada por el sistema (Qualls *et al.*, 1983, Sakamoto y Cairns, 1996). Cuando las partículas son grandes o cuando los microorganismos están inmersos en ellas, pueden actuar como protección (Hanzon y Vigilia, 1999), (Figura 1.13).



Fuente: Loge *et al.* (1996)

Figura 1.13 Efecto de las partículas en la radiación de luz UV

No todas las partículas absorben la luz UV, tal es el caso de las arcillas, que no absorben sino que reflejan la luz y por lo tanto tienen un efecto menor en la eficacia de desinfección (Qualls *et al.*, 1983). La luz que es reflejada no se considera como un factor significativo debido a que a su paso puede inactivar otros microorganismos libres o asociados a partículas. Aunque, debido al incremento de la distancia recorrida desde la fuente de luz hasta el microorganismo, la luz reflejada disminuye su intensidad (Darby *et al.*, 1995). A pesar de esto Loge *et al.* (1999) reportaron que la atenuación de la luz se debe principalmente a la absorbancia de las partículas y no al reflejo.

Con el objeto de distinguir los efectos de la luz UV que es absorbida y la que es reflejada por las partículas, Qualls *et al.* (1983) determinaron que del 100% de absorbancia que produce un agua cruda (sin filtrar), el 47% es debido a las sustancias solubles, el 41% a las partículas y sólo el 12% a la luz que es reflejada por las partículas. Mientras, que de la absorbancia debida a las partículas, cerca del 75% fue realmente absorbida y el 25% fue reflejada.

1.5.1.3.1 *Tamaño de la partícula*

Recientemente se le ha dado una gran relevancia a la determinación de la cantidad y el tamaño de las partículas, ya que según Sakamoto (2000) el número y la distribución del tamaño de las partículas, así como la transmitancia de la luz UV a través de ellas afectan en la desinfección de un efluente. La eficacia de desinfección puede mejorar cuando existen pocas partículas y de tamaño pequeño. En la Tabla 1.14 se presenta el efecto del tamaño de las partículas en la desinfección del agua.

Tabla 1.14 Efecto del tamaño de las partículas en la capacidad de desinfección

| Diámetro de la partícula (µm) | Efecto de la luz UV en el agua |
|--------------------------------------|--|
| < 10 | Penetra fácilmente |
| 10-40 | Puede penetrar completamente pero se incrementa la demanda de luz UV |
| >40 | No penetra completamente |

Adaptado de: *Trojan Engineering* (1994)

Gehr y Wright (1998) encontraron que es más difícil desinfectar agua con gran cantidad de partículas con diámetro promedio de 19 µm. Por tal motivo, para mejorar la eficacia de desinfección es necesario remover partículas suficientemente grandes (≥ 11 µm de diámetro) como para esconder las bacterias (Qualls *et al.*, 1983).

Existe una variedad de técnicas para medir el tamaño de partículas, entre las que se encuentran el análisis de microscopía, el cambio de resistencia eléctrica, la desviación de la luz, el bloqueo de la luz, la filtración de membranas y el fraccionamiento del campo de flujo (Neis y Tiehm, 1997). De estos, el análisis de imagen o microscopía es preferible debido a que las partículas no distorsionan su forma tal como sucede con otras técnicas en las que la muestra es obligada a pasar a través de un orificio, que puede romper la partícula (Emerick *et al.*, 1999; Loge *et al.*, 2002).

1.5.2 *Condición de la lámpara*

La intensidad de la emisión de una lámpara de mercurio es función del tiempo, de la temperatura de la pared de la lámpara y de la limpieza de la camisa que la recubre.

1.5.2.1 *Tiempo de uso*

En general, las lámparas empiezan con una radiación muy alta que disminuye en forma muy lenta durante las primeras 1,000 a 2,000 horas de operación, sigue entonces un declive gradual, durante el cual pueden perder del 30 a 40 % de su intensidad, hasta el punto de falla (Figura 1.14).

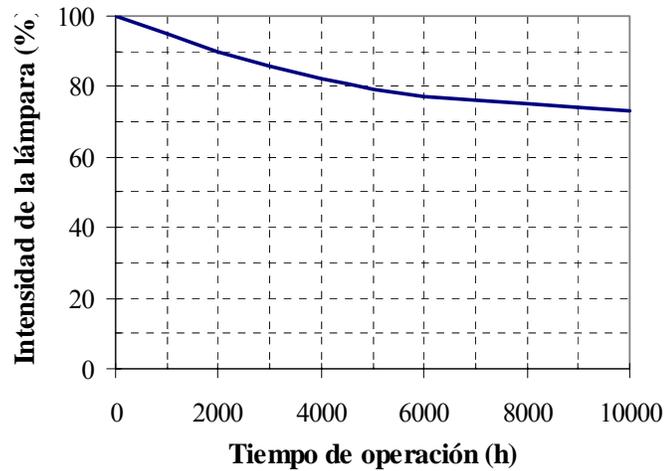


Figura 1.14 Intensidad de una lámpara de baja presión en función del tiempo

La vida de operación para una lámpara de mercurio varía de 5,000 a 8,000 horas, a pesar de esto, algunas son operadas hasta por 10,000 horas. Por tal motivo, son la única parte de un sistema de UV que necesita un cambio programado para mantener la radiación relativamente uniforme. Generalmente, las lámparas se reemplazan después de 7000 a 8000 horas de operación, aunque ello depende de las condiciones de operación de cada planta (Fahey, 1990).

1.5.2.2 Temperatura

La eficacia de las lámparas depende de la temperatura. La máxima emisión se presenta cuando la superficie está a 40 °C. Las fluctuaciones en la temperatura causan una disminución de hasta el 40% (Figura 1.15). Es por esto, que se recomienda usar una camisa de cuarzo como aislante, la cual además protege las lámparas de roturas.

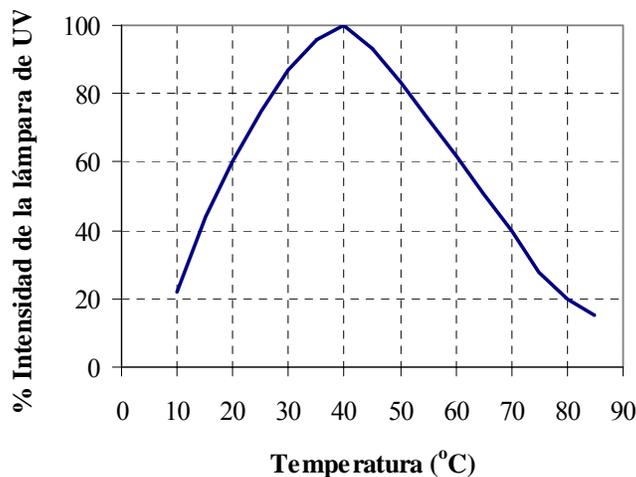


Figura 1.15 Variación de la intensidad en función de la temperatura

El control de la variación de temperatura se logra por el espesor de la camisa (espacio entre la pared de cuarzo y la de la lámpara), la temperatura del líquido y la energía con que se opera. Cuando la temperatura del líquido oscila entre 15 y 25 °C, la lámpara se encuentra cerca de las condiciones óptimas (85% de la radiación máxima) pero la intensidad disminuye significativamente por arriba o debajo de este intervalo.

La temperatura de operación es afectada por la energía suministrada por las balastras⁶. A temperatura constante del líquido, altas corrientes aumentan la temperatura y viceversa. En consecuencia, el impacto de la temperatura del líquido puede ser contrarrestado al variar la corriente en la balastro, para así mantener la radiación cerca del óptimo. Existe una gran diversidad de balastras por lo que es posible diseñar la aplicación de UV para intervalos de temperaturas de operación del líquido muy amplios. Así, en plantas de tratamiento de clima cálido, las consideraciones de diseño deben incluir el espesor de la camisa de cuarzo y el tipo de balastro que mantendrán la radiación óptima para una temperatura del líquido de 20 a 30 °C.

1.5.2.3 Limpieza

La acumulación de sólidos orgánicos e inorgánicos (incrustaciones de calcio, magnesio y hierro) y el crecimiento de microorganismos en la superficie de las lámparas, así como el crecimiento de algas, pueden reducir la intensidad promedio de la luz irradiada al agua residual. Por tal motivo es necesario implantar un programa de limpieza para mantener la radiación de la luz ultravioleta en condiciones óptimas (Darby *et al.*, 1995).

La limpieza de las lámparas se puede realizar por medios físicos o químicos. De acuerdo con la US EPA (1999), la limpieza física se puede realizar por:

- Limpiadores mecánicos (de forma automática)
- Dispositivos de ultrasonido
- Lavado con agua o aire a alta presión

En la limpieza química se emplean desde soluciones de agua y jabón hasta soluciones ácidas como de ácido sulfúrico o clorhídrico (Darby *et al.*, 1995; US EPA, 1999).

1.5.3 Hidráulica del reactor

Las condiciones hidráulicas óptimas para un reactor UV son de flujo tipo pistón con suficiente dispersión axial y sin mezclado transversal para maximizar la exposición a la radiación UV (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). Para asegurar que cada segmento del líquido sea irradiado se debe controlar el mezclado en la zona de irradiación. En términos generales, esto se logra por la minimización de cortos circuitos y zonas muertas por

⁶ Dispositivo con el que se logra mantener la frecuencia y el voltaje constante

medio de la geometría de las estructuras de la entrada y la salida que deben ser diseñadas para promover perfiles uniformes de velocidad (Fahey, 1990; Solomon *et al.*, 1998).

1.6 Cinética de desinfección

Para evaluar la velocidad de una reacción fotobioquímica es necesario considerar al fotón como un reactivo y conocer su valor. La velocidad de la reacción depende de la disponibilidad de los reactivos, en este caso, la intensidad de la radiación de luz UV (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996).

La inactivación de microorganismos con luz UV se modela tradicionalmente como una reacción de primer orden (Ley de Chick) con respecto a la dosis de luz UV aplicada (Ec. 1.3).

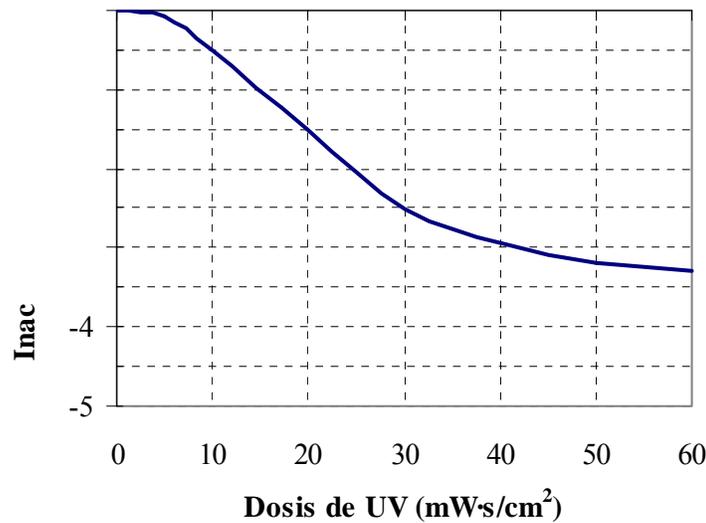
$$N = N_0 e^{-k I t} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde

- N : concentración de los microorganismos después de la exposición a la luz UV
- N_0 : concentración inicial de los microorganismos
- k : constante de velocidad de inactivación
- I : intensidad de luz UV
- t : tiempo de exposición

Sin embargo, se han reportado dos desviaciones importantes de este modelo (Figura 1.16) (Oliver y Cosgrove, 1975; Qualls *et al.*, 1983; US EPA, 1986; Darby *et al.*, 1993; Emerick y Darby, 1995; Loge *et al.*, 1996; Ho *et al.*, 1998; Moreland *et al.*, 1998; Janex *et al.*, 1998; Emerick *et al.*, 1999; Loge *et al.*, 2002; Dietrich *et al.*, 2003). La primera es conocida como fase de hombro o lag, que se presenta en ocasiones al aplicar dosis bajas de luz UV. Se atribuye a la capacidad que tienen ciertos microorganismos para absorber luz UV sin que su viabilidad se afecte. La segunda desviación o fase de cola, corresponde a la menor variación en la inactivación de los microorganismos por encontrarse éstos agregados o asociados con partículas, lo que dificulta la penetración de la luz UV aún cuando se aplique altas dosis (Andreadakis *et al.*, 1999).

En la práctica, debido a la presencia de sólidos suspendidos en el efluente, las plantas de tratamiento operan en la fase de cola y emplean altas dosis de luz UV. De ahí la importancia de predecir esta desviación de la cinética de primer orden. Para considerar dicho efecto, varios autores (Darby *et al.*, 1995; Ho *et al.*, 1998; Loge *et al.*, 1999; Emerick *et al.*, 1999) adicionan al modelo de Chick el término N_p , el cual relacionan con la concentración de microorganismos inmersos en partículas (Ec. 1.4).



Adaptada de: Loge *et al.* (1996)

Figura 1.16 Cinética de inactivación de coliformes fecales en un efluente de lodos activados

$$N = N_0 e^{-k_1 t} + N_p \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Donde

N_0 : concentración inicial de los microorganismos

N_p : concentración de microorganismos asociados en las partículas y que no son afectados por la radiación

Los métodos más usados para determinar la concentración de microorganismos inmersos en partículas (N_p) son la hibridación *in situ* y la correlación con sólidos suspendidos.

Hibridación *in situ*

Esta técnica es muy precisa no únicamente para cuantificar sino también para identificar microorganismos presentes en las partículas de un efluente. Consiste en sintetizar y marcar con tinta fluorescente un pequeño segmento de ácido nucleico conocido como sonda. Mediante un proceso de desnaturalización, la sonda se une a la secuencia complementaria de ácido nucleico de los microorganismos que se desea identificar. Los microorganismos permanecen morfológicamente intactos y se puedan localizar fácilmente a través de un microscopio de fluorescencia, aún cuando se encuentren inmersos en las partículas (Emerick *et al.*, 1999; Loge *et al.*, 2002; Dietrich *et al.*, 2003). Para determinar el valor de N_p se realiza un conteo de microorganismos por medio de análisis de imagen y se correlaciona con el número de partículas.

Esta técnica es poco empleada pues requiere un amplio conocimiento y manejo de técnicas moleculares, es tardada y costosa (Ho *et al.*, 1998). Motivos por los cuales no se emplea en el campo del tratamiento del agua.

Correlación con sólidos suspendidos

En la literatura (US EPA, 1986; Zukovs *et al.*, 1986; Darby *et al.*, 1995) se establece que el valor de N_p puede ser determinado a partir de un indicador fácilmente cuantificable como son los sólidos suspendidos. Esta determinación aproximada de N_p se realiza por medio de la ecuación 1.5.

$$N_p = cSS^m \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde

N_p : bacterias asociadas a las partículas
 SS : concentración de sólidos suspendidos
 c, m : constantes

Al aplicar dosis elevadas de luz ultravioleta, la mayoría de los microorganismos que no están asociados a partículas se inactivan y la concentración microbiana residual resulta muy cercana al valor de N_p (Ho *et al.*, 1998). Por esta razón, los valores de N_p que se utilizan en esta correlación se determinan como el residual que queda después de aplicar dosis mayores que 30 $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ (US EPA, 1986; Ho *et al.*, 1998; Andreadakis *et al.*, 1999).

1.7 Formación de subproductos y toxicidad

Todos los procesos de desinfección (halogenación, ozonación o radiación UV) son capaces de producir cambios químicos en los constituyentes no microbianos que pueden llevar a producir cambios en la toxicidad del efluente. En otras palabras, todos los desinfectantes tienen la capacidad de cambiar la composición del agua residual, la cual puede persistir hasta después del proceso de desinfección y el resultado de estos cambios químicos es la alteración en la toxicidad del efluente (Blatchley *et al.*, 1997).

La luz UV produce una mínima cantidad de subproductos como resultado de la desinfección, comparado con los desinfectantes químicos. Recientemente se han realizado estudios con el objeto de determinar la posible formación de subproductos con el uso de luz UV. Linden y Darby (1998) realizaron estudios en sistemas de desinfección en planta piloto o a gran escala, usando lámparas de baja y media presión. Se analizaron compuestos volátiles, semi-volátiles y no volátiles en muestras antes y después de la desinfección. No se detectaron subproductos a pesar de que se manejó un intervalo amplio de dosis de luz UV (hasta de $2800 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$), dosis que fueron de 2 a 100 veces mayores que las que se requieren comúnmente para lograr la desinfección (Linden y Darby, 1998). En la Tabla 1.15 se presentan los resultados de estos estudios.

La luz UV con longitudes de onda menores que 240 nm promueven la conversión de nitratos a nitritos y se ha demostrado que con dosis cercanas a 100 mW·s/cm² y concentraciones altas de nitratos (50 mg/L), la concentración de nitritos puede llegar hasta 100 µg/L. Aunque, con dosis bajas (25-30 mW·s/cm²) esto no sucede. A pesar de este hecho, las lámparas que se utilizan comúnmente (baja presión) emiten una longitud de onda cercana a los 254 nm por lo que el riesgo de la formación de nitritos se elimina. Y en el caso de las lámparas de presión media, que tienen una emisión policromática, pueden ser modificadas de tal forma que absorban las longitudes de onda menores a 240 nm (FWR, 1998; Trojan Technology, 2003).

Tabla 1.15 Formación de subproductos de desinfección con luz UV en agua residual

| Sitio | Tipo de lámpara | Dosis de UV mW·s/cm ² | Análisis | Resultados |
|------------|-----------------|----------------------------------|--|--|
| Oak Rodge | BP | 13-61 | Orgánicos (CL) COV (CG, CE) | Sin cambio |
| Elsinore | BP | 188 300 2800 | Orgánicos (HPLC, CG/EM) COV (EPA5030/8260) Semi y no volátiles (CL/EM) | Sin cambio Pico no identificado a la dosis de 2800 mW·s/cm ² |
| Goldbar | PM | 70 | COV (CG/EM) Semi volátiles (CG/EM) | Sin cambio Incremento en acetona |
| Santa Rosa | PM | 100 200 | COV (EPA 8260) Semivolátiles (EPA8270) Ácido carboxílico (EPA300M) Compuestos clorados (EPA551) Aniones inorgánicos (EPA300B) Aldehídos (CG/) | Los aldehídos incrementaron con la dosis de luz UV. Sin mayor cambio |
| Fairfield | BP,PM | 150-898 | Orgánicos (HPCL, CG/EM) | Sin cambio |
| Santa Rosa | BP | 150 300 | Orgánicos (HPCL, CG/EM) | Sin cambio |
| Vallejo | BP,PM | 150-1138 | Orgánicos (HPCL, CG/EM) | Sin cambio |
| Sacramento | BP,PM | 144-903 | Orgánicos (HPCL, CG/EM) | Sin cambio |
| Greenville | PM | 60-80 | Orgánicos (HPCL, CG/EM) | Sin cambio |

BP=Baja presión; PM=Presión media; CL=Cromatografía de líquidos; COV=Compuestos orgánicos volátiles; CE=Conductividad electrolítica; CG=Cromatografía de gases; EM=Espectrometría de masas, HPLC=Cromatografía de gases de alto rendimiento. Fuente: Linden y Darby (1998).

La información que existe sobre toxicidad, en especial para radiación UV, es muy contradictoria. Se han empleado pruebas de toxicidad en *Daphnia sp.* y algas, así como la prueba Microtox y la de Ames y se ha confirmado que la luz UV no forma compuestos que resulten tóxicos o mutagénicos. A pesar de esto, existen estudios en los que se reporta lo contrario. Blatchley *et al.* (1997) realizaron pruebas de toxicidad en efluentes con aguas residuales provenientes de diferentes plantas de tratamiento. El organismo con el que se llevaron a cabo las pruebas fue *Ceriodaphnia dubia*. Los resultados obtenidos muestran que los cambios en la toxicidad del efluente desinfectado pueden ser negativos o positivos. Las aguas residuales de origen doméstico o de otras fuentes biodegradables generalmente no

tienen una respuesta toxicológica ni antes ni después de la desinfección. En la Tabla 1.16 se presentan algunos de los desinfectantes más usados y su efecto en la toxicidad del efluente.

Tabla 1.16 Efecto de los desinfectantes en la toxicidad del agua

| Desinfectante | Organismos | | | |
|---------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| | <i>Pimephales promelas</i> | <i>Ceriodaphnia dubia</i> | <i>Selenastrum capricornium</i> | Bacterias heterotróficas |
| UV | N | N | N/S | S |
| Cloro | S | -- | -- | -- |
| Ozono | N | N | N | -- |

S: Toxicidad demostrada; N: Toxicidad no demostrada; Adaptado de Blatchley *et al.* (1997)

En las plantas en donde la toxicidad crónica fue evidente antes de la desinfección, los cambios en la toxicidad del efluente fueron atribuidos a los desinfectantes en el orden siguiente:

cloración/decloración > ozonación > radiación UV

Definitivamente, la naturaleza de la toxicidad del efluente requiere un análisis particular de cada caso.

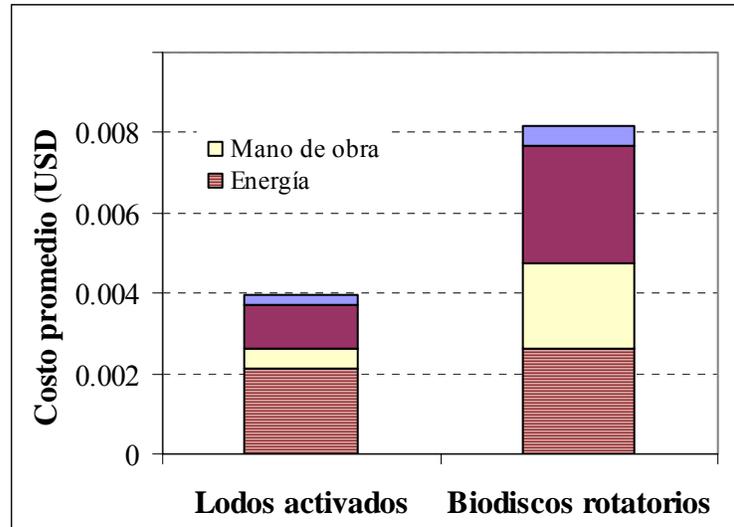
1.8 Costos

Los costos de los sistemas de desinfección con luz UV han disminuido recientemente debido a la creciente oferta por parte de los proveedores, así como a la mejora en el diseño de lámparas y sistemas que recaé en un menor costo de fabricación (US EPA, 1999). El costo está en función del fabricante, el sitio, la capacidad de la planta y las características del agua residual a ser desinfectada, por ejemplo, el costo de los equipos de desinfección para tratar un flujo de 0.5 m³/s oscila desde \$500,000 USD hasta \$700,000 USD (Fahey, 1990; Parrota, 1998; Solomon *et al.*, 1998; US EPA, 1999; Swift *et al.*, 2001).

Dado que el costo del equipo representa una parte importante de la inversión, se estima que el costo de capital debe ser establecido con base en el costo del equipo, más un 20% (Wright y Cairns, 2002). Los costos de los sistemas de desinfección pueden ser estimados casi de forma precisa a través de los métodos que los fabricantes de los equipos utilizan para estimar costos de construcción. Sin embargo, la evaluación de los costos de operación y mantenimiento (OM) es más complicada (Swift *et al.*, 2001) ya que, de acuerdo con Solomon *et al.* (1998) y US EPA, (1999) depende de factores tales como:

- Consumo de energía
- Compuestos químicos para limpieza de lámparas y provisiones
- Reparación de equipo
- Reemplazo de lámparas, balastras y camisas
- Requerimientos del personal

En la Figura 1.17 se resumen los costos de operación y mantenimiento del proceso de desinfección en dos plantas de tratamiento, en función de los costos de compuestos químicos para limpieza, partes de reemplazo, mano de obra y energía.



Adaptada de: Swift *et al.* (2001)

Figura 1.17 Costos de operación y mantenimiento de la desinfección con luz UV de dos efluentes secundarios

A su vez, estos factores dependen de:

- Las características físicas del sistema de desinfección
- La calidad del efluente
- Las políticas de mantenimiento de cada planta de tratamiento
- El servicio y garantía otorgada por cada fabricante

En la Tabla 1.17 se presenta una comparación de costos de capital para la desinfección de efluentes secundarios realizado por la *Water Environment Research Foundation* en 1995. Las plantas estudiadas presentaron flujos promedios en época de estiaje de 0.04, 0.4 y 4.4 m³/s y de 0.1, 0.9 y 7.7 m³/s en época de lluvias (Darby *et al.*, 1995).

Tabla 1.17 Costos de capital para sistemas de desinfección con luz UV

| Concepto | Intervalo | Típico* |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| Lámparas UV | (\$/lámpara) | (\$/lámpara) |
| 0.04-0.2 m ³ /s | 397-1,365 | 575 |
| 0.2-0.4 m ³ /s | 343-594 | 475 |
| 0.4-4.4 m ³ /s | 274-588 | 400 |
| >4.4 m ³ /s | | 375 |
| Costos de construcción de las instalaciones | (% del costo de la lámpara) 75-200 | (% del costo de la lámpara) 150 |

* Los costos son en dólares americanos y están basados en un índice de costo de 5,210 del *Engineering News Record Construction* de 1993. Fuente: Darby *et al.* (1995).

Asimismo, en la Tabla 1.18 se presenta una estimación de costos anuales por OM basada en las siguientes suposiciones.

1. Consumo de energía de 85 W/lámpara (lámpara y balastra) en un intervalo de 70-85 W/lámpara
2. Reemplazo de lámpara cada 12,000 h de uso (intervalo de 8,760-14,000 h)
3. Reemplazo de balastra cada 10 años (intervalo 10-15 años)
4. Reemplazo de camisas de cuarzo cada 5 años (intervalo, 5-8 años)
5. Limpieza química cada cuatro meses
6. Requerimiento de personal para sistemas grandes (≥ 0.4 m³/s) de 30 minutos por lámpara por año. Para sistemas pequeños (0.04-0.2 m³/s), 45 minutos por lámpara por año
7. Costo de reparación de equipo basado en un valor de 2.5% del costo total del equipo.

Tabla 1.18 Costos de operación y mantenimiento para sistemas de desinfección con luz UV

| Concepto | Costo unitario (\$) | Costo/año, \$/lámpara* |
|-------------------------------|---------------------|------------------------|
| Energía (por kWh) | 0.08 | 29.78 |
| Reemplazos | | |
| Lámpara | 40 cada una | 14.76 |
| Balastra | 80 cada una | 4 |
| Camisa de cuarzo | 40 cada una | 4 |
| Limpieza (lámpara/año) | 5 | 5 |
| Personal (por hora) | 36 | 18-27 |
| Reparación de equipo (varios) | | 10-14.38 |
| Total | | 85.4-98.8 |

* Los costos son en dólares americanos y están basados en un índice de costo de 5,210 del *Engineering News Record Construction* de 1993. Fuente: Solomon *et al.* (1998).

Los costos de capital y de operación y mantenimiento de un sistema de desinfección varían significativamente dependiendo de la calidad del agua residual, los criterios de descarga y el flujo (Tabla 1.19). Por ejemplo para un flujo promedio de 0.04 m³/s, el costo de capital estimado varía entre \$115,000 y \$621,000 USD. Y de forma similar para flujos de 0.44 m³/s y

de 4.4 m³/s el costo oscila entre \$836,000 a \$4,522,000 USD y \$6,048,000 a \$33,264,000 USD respectivamente. Asimismo, los costos anuales de desinfección oscilan de \$19,600 a \$105,900 USD para un flujo de diseño de 0.04 m³/s hasta \$1,132,400 a \$6,228,000 USD para un flujo de 4.4 m³/s (Darby *et al.*, 1995).

Tabla 1.19 Costos estimados para sistemas de radiación UV

| Escenario | Flujo (m ³ /s) | | Número de lámparas | Costo (USD) | | |
|-----------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------------|
| | Época de estiaje | Época de lluvias | | Estimado de capital | Estimado de OM | Total anual (\$ por año) |
| 1 | 0.04 | 0.09 | 80 | 115,000 | 7,900 | 19,600 |
| | 0.4 | 0.8 | 704 | 836,000 | 67,800 | 152,900 |
| | 4.4 | 7 | 6,048 | 6,048,000 | 516,400 | 1,132,400 |
| 2 | 0.04 | 0.09 | 96 | 138,000 | 9,500 | 23,600 |
| | 0.4 | 0.8 | 768 | 912,000 | 73,900 | 166,800 |
| | 4.4 | 7 | 6,656 | 6,656,000 | 568,300 | 1,246,200 |
| 3 | 0.04 | 0.09 | 120 | 172,500 | 11,900 | 29,500 |
| | 0.4 | 0.8 | 1,056 | 1,254,000 | 101,600 | 229,300 |
| | 4.4 | 7 | 9,120 | 9,120,000 | 778,700 | 1,707,600 |
| 4 | 0.04 | 0.09 | 432 | 621,000 | 42,700 | 105,900 |
| | 0.4 | 0.8 | 3,808 | 4,522,000 | 366,500 | 827,100 |
| | 4.4 | 7 | 33,264 | 33,264,000 | 2,840,100 | 6,228,000 |

Nota: Los escenarios se refiere a las diferentes suposiciones respecto a la calidad del agua. Fuente: Darby *et al.* (1995).

1.8.1 Comparación con otros desinfectantes

Los costos totales de la desinfección con luz UV, que incluyen costos de capital y OM, pueden ser competitivos con los de la cloración cuando se requiere la dechloración (Fahey, 1990; Parrota, 1998; Solomon *et al.*, 1998; US EPA, 1999; Swift *et al.*, 2001). Sin embargo, el flujo y la calidad del agua a tratar son factores determinantes en los costos (Tabla 1.20).

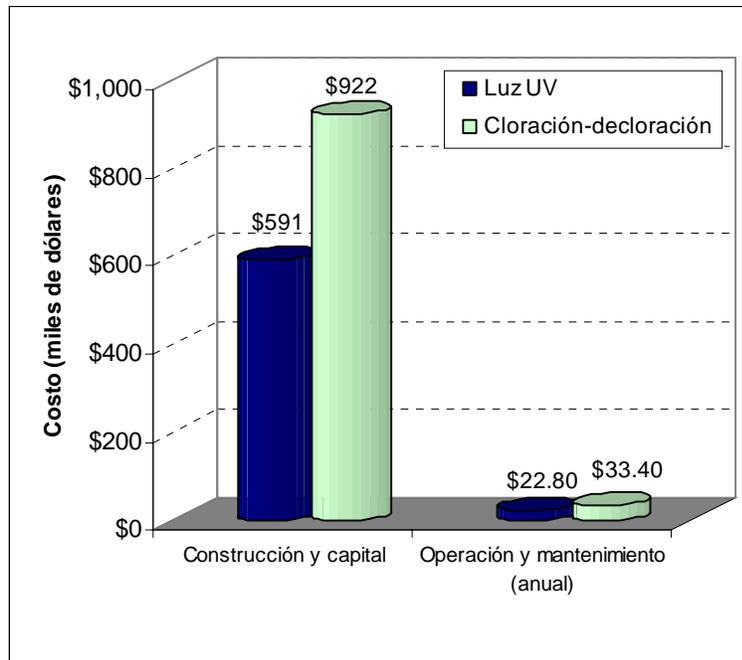
Tabla 1.20 Comparación de los costos anuales de desinfección con luz UV y cloración-dechloración

| Flujo (m ³ /s) | Costo anual total (miles de dólares) | |
|---------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| | Radiación UV | Cloración-Dechloración |
| 0.04 | 19.6 - 106 | 164 - 206 |
| 0.44 | 153 - 827 | 478 - 781 |
| 4.4 | 1,132 - 6,228 | 2,120 - 2,820 |

Fuente: Darby *et al.* (1995)

Blatchley *et al.* (1996) realizaron una comparación de costos entre el proceso de cloración-dechloración y la desinfección con luz UV en una planta de tratamiento de aguas residuales en

Indiana, Estados Unidos. La comparación del análisis económico se realizó con base en un flujo promedio de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 1.18). Para este caso en particular, los resultados mostraron que la desinfección con luz UV es más rentable en cuanto a costos se refiere.



Fuente: Blatchley *et al.* (1996)

Figura 1.18 Comparación de costos de construcción, capital y OM de los procesos de cloración-decloración y radiación ultravioleta

La comparación de los costos anuales de desinfección, que incluyen costos de capital y OM de diferentes métodos de desinfección, con base en un factor de incremento revelan la competitividad en costos de la luz ultravioleta (Tabla 1.21). Los resultados indican que los procesos de cloración son entre 10 y 30% más caros que la radiación ultravioleta, siendo la ozonación el proceso más caro. Esto se corrobora en el desglose de costos de desinfección en moneda nacional, de cada m^3 de agua desinfectada por diferentes procesos de desinfección. Los costos están en función del flujo de agua tratado (Tabla 1.22).

Esta comparación ilustra la competitividad de la luz UV frente a la cloración en cuestión de costos. Actualmente, la necesidad de decloración (normada en países como Estados Unidos por el *Fire Code*) convierte a la luz UV en una alternativa viable para la desinfección.

Tabla 1.21 Comparación de costos de diversas alternativas de desinfección

| Alternativa | Costo anual ^a (dólares) | Factor de incremento |
|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Radiación ultravioleta | 1,793,000 | 1 |
| Cloración con cloro gas | 1,947,374 | 1.1 |
| Cloración con cloro gas | | |
| Decloración con dióxido de azufre | 2,397,374 | 1.3 |
| Ozonación | 3,389,960 | 1.9 |

a. Considerando un flujo de agua de 0.44 m³/s. Adaptada de: Solomon *et al.* (1998); Solomon *et al.* (1998b); Solomon *et al.* (1998d); Elefritz (2000)

Tabla 1.22 Comparativa de los costos^{a,b} por m³ de agua residual desinfectada con cloro, luz ultravioleta y ozono

| Desinfectante | Flujo (m ³ /s) | | |
|---------------------|---------------------------|-------|-------|
| | 0.22 | 0.44 | 0.66 |
| Luz UV | 613 | 540 | 451 |
| Cloro | 777 | 586 | 542 |
| Cloro c/decloración | 1,018 | 722 | 643 |
| Ozono | 1,462 | 1,021 | 1,001 |

a. Costo en pesos moneda nacional. Tipo de cambio 1USD = \$11.4 MN Banco de México con fecha 5 de noviembre del 2004; b. Incluye equipo, operación y mantenimiento Operación y mantenimiento calculado con 5% de inflación a 10 años =7.722. Desinfección con luz UV con lámparas de baja presión. Dosis de cloro=10 mg/L, TR = 15 min. Adaptada de: Solomon *et al.* (1998); Solomon *et al.* (1998b); Solomon *et al.* (1998d); Elefritz (2000)

1.9 Ventajas y limitaciones de la desinfección con luz UV

De acuerdo con la revisión anterior se pueden listar las ventajas y limitaciones de la desinfección con luz ultravioleta con respecto a otros desinfectantes (Tabla 1.23).

Tabla 1.23 Ventajas y limitaciones de la desinfección con luz UV

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Desinfectante efectivo • No produce residuos tóxicos • Es más efectivo que el cloro en la inactivación de más virus, esporas y quistes • Mayor seguridad • Puede requerir menos espacio | <ul style="list-style-type: none"> • Relativamente caro (sin embargo el precio disminuye conforme nueva tecnología está disponible en el mercado) • A bajas dosis usadas para inactivación de coliformes, pueden no ser inactivados algunos virus o esporas • No existe un efecto residual |

Adaptado de: Darby *et al.* (1995)

2 JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1 Justificación

Hoy en día, el reúso de agua residual es una práctica común que se realiza incluso de forma no intencional (Solomon *et al.*, 1998; Jiménez *et al.*, 1999; Bahri *et al.*, 2001; Bazza, 2003; Chu *et al.*, 2003). Para reusar el agua residual en forma segura es necesario aplicar un tratamiento que minimice todos los riesgos a la salud, en particular, aquellos de origen microbiológico. Ello es importante en la medida de que la probabilidad de contacto directo entre el agua de reúso y el hombre sea mayor ya que en ese sentido la desinfección debe ser más estricta.

A pesar de que existe una gran cantidad de desinfectantes físicos y químicos, su aplicación en agua residual se ve limitada por diferentes aspectos, tales como, costos, generación de subproductos con carácter tóxico, susceptibilidad de los diferentes microorganismos presentes en el agua residual, entre otros. Por lo que, es necesario conocer las ventajas y limitaciones de los diferentes métodos de desinfección para elegir el desinfectante más adecuado para cada caso.

La cloración es el proceso más usado por su costo y difusión, a pesar de formar compuestos organoclorados y de las evidencias cada día más comunes de su ineficacia para inactivar todo tipo de microorganismos. Por otra parte, el ozono es un desinfectante efectivo pero costoso y también fuente de subproductos (Blatchley *et al.*, 1996).

En este marco, la luz ultravioleta se considera como un método de desinfección eficiente para inactivar bacterias, virus y protozoarios con dosis relativamente bajas (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996; Clancy *et al.*, 2000; Linden *et al.*, 2002).

En general, los estudios realizados con desinfectantes se llevan a cabo principalmente en países desarrollados y giran en torno a la inactivación del tipo y la concentración de microorganismos presentes en aguas residuales de estos países, los cuales distan, principalmente en cantidad, de las presentes en agua residual de países en desarrollo.

La cantidad de microorganismos patógenos en el agua residual se refleja en la incidencia de enfermedades, tales como la fiebre tifoidea. Esta enfermedad, producida por *Salmonella typhi*, se transmite principalmente vía agua contaminada y es una de las causas más comunes de enfermedad en regiones pobres (12.5 millones de casos/año), no así en regiones industrializadas (400 casos/año). Específicamente en México, se considera la fiebre tifoidea como un problema de salud pública debido a su alta incidencia (7,481 casos en el año 2002).

A pesar de la gran cantidad de información que existe actualmente respecto a la desinfección con luz UV, muy poco son los estudios que se enfocan a la inactivación de *Salmonella typhi*, cuya presencia en agua residual es de gran preocupación para la población de países en desarrollo, tal como México. Aunado a esto, la demostrada presencia de amibas patógenas de alta peligrosidad, tal como *Acanthamoeba* spp., en agua residual en México representan una amenaza (Maya,

2000). La existencia de casos confirmados de muerte por encefalitis granulomatosa¹ producida por esta amiba así como su capacidad de enquistarse que le confiere una mayor resistencia a los procesos convencionales de desinfección hacen de este microorganismo un importante caso de estudio.

Por otro lado, es bien sabido que un aspecto importante en la eficacia de desinfección es la calidad del agua, primordialmente en lo que se refiere a la presencia de partículas. La cantidad y el tamaño de éstas afectan en la desinfección de un efluente (Cairns *et al.*, 1995; Sakamoto, 2000). Aunado a esto, la presencia de microorganismos agregados o asociados con las partículas dificulta la penetración de la luz UV aún cuando se apliquen altas dosis, lo que disminuye la eficacia de desinfección (Andreadakis *et al.*, 1999).

A pesar de que este aspecto es muy relevante, en los estudios publicados se reporta la desinfección de agua sintética preparada a partir de soluciones buffer, de efluentes secundarios y terciarios, pero pocos son aquellos que se enfocan al efecto de las partículas en la desinfección y mucho menos aún los que determinan la cantidad de microorganismos inmersos en partículas como una herramienta en la evaluación de la eficacia de un sistema de desinfección. Por supuesto que estudios con *Salmonella typhi* y *Acanthamoeba* no han sido reportados en la literatura accesible.

Estos planteamientos llevaron a considerar la necesidad de evaluar la eficacia de la luz UV en efluentes de procesos de tratamiento con principios de operación diferente, que de acuerdo con la literatura presentan una presencia y distribución de partículas también diferente (Metcalf y Eddy, 1996). Aunado a esto, se considerará la eficacia de desinfección en efluentes con altas concentraciones de microorganismos patógenos tales como *Salmonella typhi* o *Acanthamoeba* spp. dando relevancia al efecto de la reactivación y el efecto de los microorganismos inmersos en partículas.

¹ Enfermedad del sistema nervioso central, donde los hemisferios cerebrales están usualmente caracterizados por edemas focales asociados con necrosis y hemorragias reciente.

2.2 Hipótesis

La cantidad de partículas presentes y la calidad del agua residual tratada por diferentes procesos biológicos con contenidos elevados de microorganismos afectan la eficacia de inactivación con luz ultravioleta.

2.3 Objetivo general

Evaluar la aplicación de la luz ultravioleta para la desinfección de efluentes secundarios con alto contenido de microorganismos.

2.4 Objetivos específicos

1. Comparar el efecto de la cantidad de partículas y la calidad de tres efluentes biológicos secundarios provenientes del tratamiento de una misma agua residual en la eficacia de desinfección con luz UV.
2. Determinar la dosis óptima y recomendable de luz UV para inactivar *Salmonella typhi*
3. Establecer la relación entre las condiciones para inactivar *Salmonella typhi* y las bacterias indicadoras de contaminación fecal (coliformes fecales).
4. Determinar el grado de reactivación de coliformes fecales y *Salmonella typhi* en condiciones de luz y oscuridad para las dosis óptimas de desinfección.
5. Ajustar un modelo matemático para determinar *a priori* la concentración de microorganismos inmersos en partículas que no será posible inactivar mediante la desinfección UV.
6. Comparar la inactivación de amibas anfizoicas aisladas de un efluente de lodos activados con la de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* utilizando luz UV, por medio de sus cinéticas de inactivación.
7. Proponer la configuración de un sistema de desinfección con luz UV aplicable a la PTARCU con base en un método matemático y en los resultados obtenidos a nivel laboratorio.

2.5 Alcances

1. Las pruebas de desinfección se realizaron en efluentes secundarios provenientes de un solo influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria, a nivel experimental en el laboratorio y con un equipo de luz colimada cuyos resultados son extrapolables al diseño.
2. Los microorganismos utilizados en las determinaciones fueron coliformes fecales, enterococos fecales, *Salmonella typhi* y *Acanthamoeba* spp. Estos microorganismos fueron seleccionados debido a su importancia normativa y sanitaria y a que representan los grupos de bacterias de diferente tipo (gram + y gram -) así como los parásitos.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental se planteó de acuerdo con la justificación y los objetivos específicos establecidos con anterioridad. En este capítulo se describe en detalle la estrategia que se propuso para lograr cumplir con los objetivos planteados.

3.1 Estrategia

El trabajo experimental se desarrolló en los laboratorios de la Coordinación de Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM y se dividió en cuatro etapas. En la primera etapa se caracterizaron cada uno de los efluentes secundarios (lodos activados, contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores) y se realizaron las pruebas de desinfección aplicando diversas dosis de luz UV (de 5 a 120 mW·s/cm²). Los resultados de la caracterización se tomaron como base para determinar el efecto del tratamiento previo del agua en la desinfección. La evaluación de la eficacia se realizó con base en la inactivación de coliformes y enterococos fecales y *Salmonella typhi*. En la segunda etapa se determinó la capacidad de reactivación de las bacterias coliformes fecales, así como de *S. typhi* después de ser irradiados con luz UV y al ser expuestos a la luz solar y a la oscuridad, por diferentes periodos. En la tercera etapa se determinó la cantidad de microorganismos que se encontraron asociados a partículas en función de la concentración de sólidos suspendidos y de las partículas mayores que 40 µm. En la cuarta etapa, se realizó la radiación de amibas anfitozoicas patógenas, esto con el fin de comparar la eficacia de este desinfectante en diferentes microorganismos (Figura 3.1). Los resultados de la parte experimental sirvieron por último para proponer el diseño de un sistema de desinfección para los efluentes característicos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU.

3.2 Sitio del muestreo

3.2.1 Justificación de la selección

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU) fue seleccionada debido a que cuenta con tres sistemas de tratamiento secundario biológico que trabajan en paralelo, ventaja que fue aprovechada para evaluar la calidad de diferentes efluentes en la eficacia de desinfección. Dos de los sistemas operan con un principio de crecimiento en biopelícula (contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores) y el tercero con un principio de crecimiento suspendido (lodos activados), lo que supone calidad diferente en sus efluentes, principalmente en lo que se refiere al tamaño de partícula.

3.2.2 Descripción

La PTARCU se encuentra localizada en el circuito interior del *campus* (Figura 3.2). Por su ubicación, la planta recibe aguas residuales de tipo doméstico (con aportes de algunos laboratorios). El agua residual proviene de tres colectores que comprenden diferentes zonas. Los

dos primeros colectan el agua residual de dos zonas de Ciudad Universitaria, mientras que el tercero lo hace de una zona habitacional ubicada a las afueras de Ciudad Universitaria (Tabla 3.1).

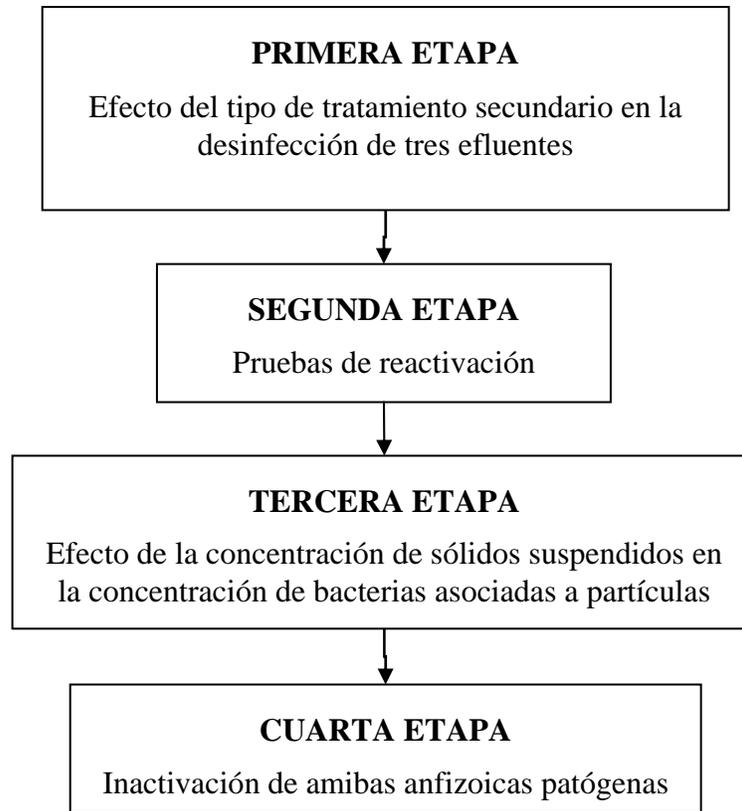


Figura 3.1 Diagrama de flujo del estudio de la aplicación de la luz ultravioleta para desinfectar agua residual

Tabla 3.1 Origen del agua residual que trata la PTARCU

| | |
|------------|---|
| Colector 1 | Zona antigua de CU que comprende Facultad de Economía, Facultad de Filosofía, Facultad de Derecho, Facultad de Química, Facultad de Odontología. |
| Colector 2 | Zona de institutos, que comprende Institutos de Investigación tales como el de Ciencias del Mar y Limnología, Geografía, Geología, Química, Matemáticas, Geofísica, Astronomía, Fisiología Celular, Física, Investigación de los Materiales y Ciencias Nucleares. |
| Colector 3 | Zona habitacional de la colonia Copilco el Alto |

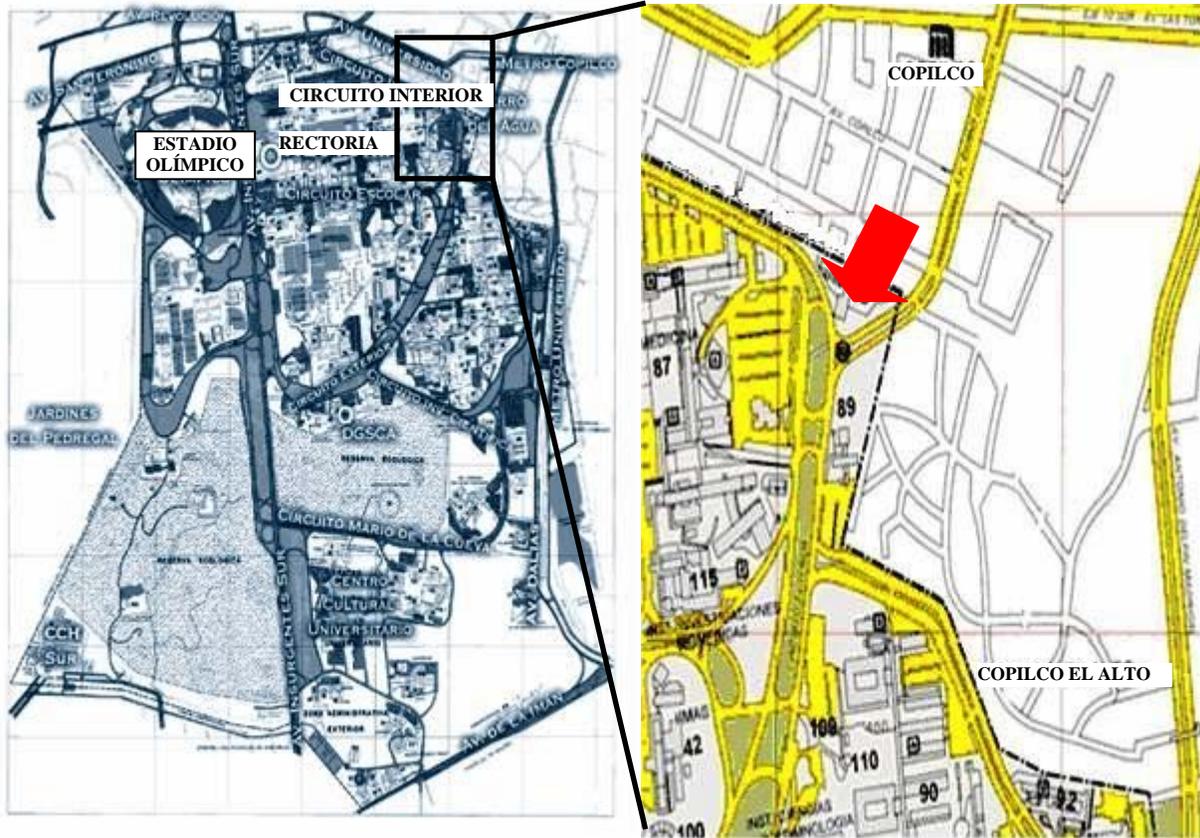


Figura 3.2 Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria

La PTARCU tiene una capacidad de operación de 30 L/s, pero generalmente opera con un flujo promedio de 21 a 22 L/s. Cada uno de los tres sistemas de tratamiento biológico con que opera la planta cuenta con un sedimentador y los efluentes de cada uno de éstos se unen en una sola canaleta que conduce el agua a filtración y desinfección con cloro (Figura 3.3). El efluente de la planta es empleado para riego de áreas verdes en el mismo *campus* (Fotografía 3.1).

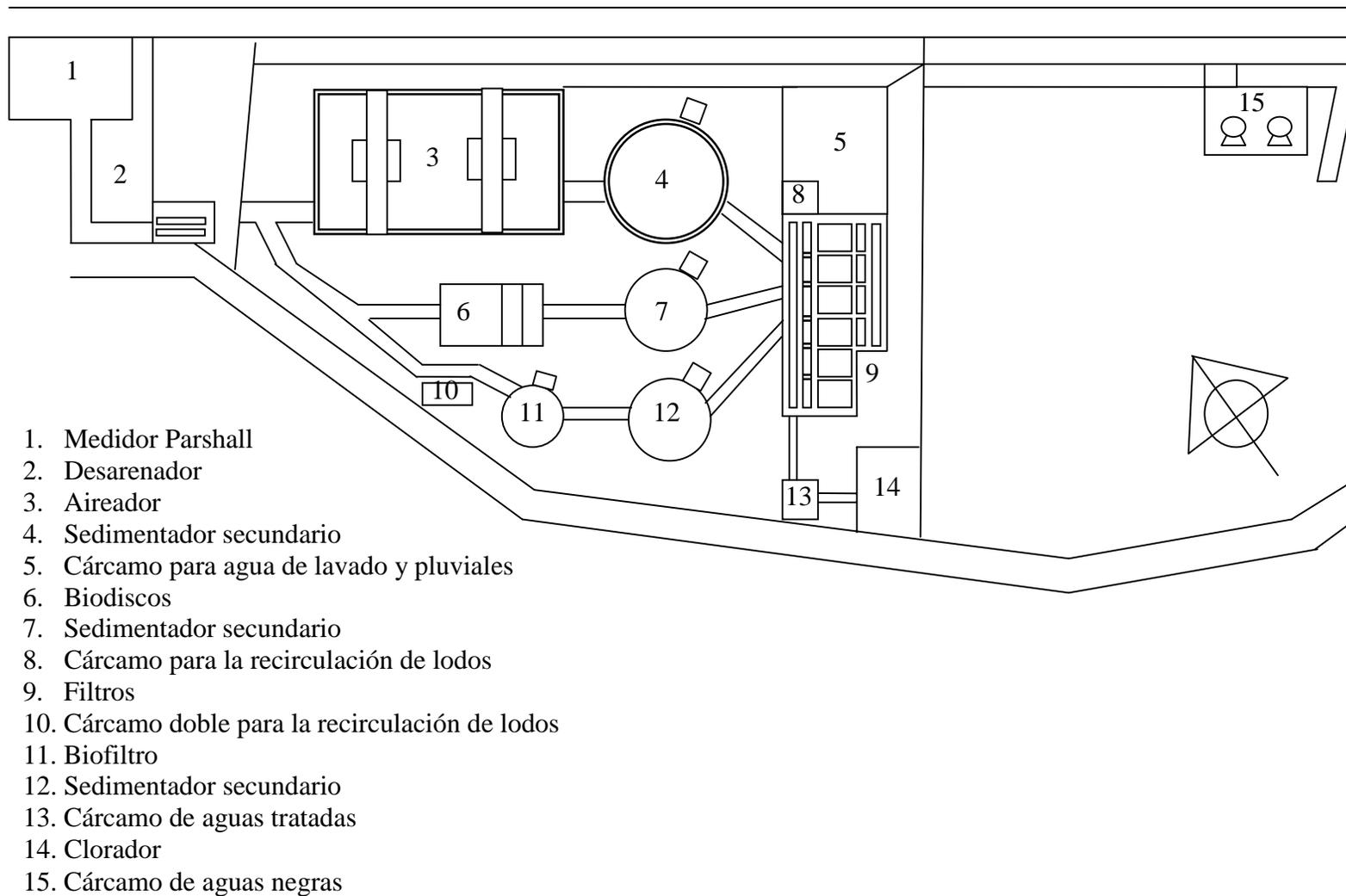


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de agua residual de Ciudad Universitaria



Fotografía 3.1 Riego de áreas verdes del *campus* con agua residual tratada en la PTARCU

3.2.3 Muestreo

Los muestreos se realizaron en los meses de mayo a julio del año 2001 al 2003. Las muestras fueron tomadas de los sedimentadores de cada sistema de tratamiento (Figura 3.4, Fotografía 3.2) considerando el tiempo de retención (TR) de cada uno (Tabla 3.2).

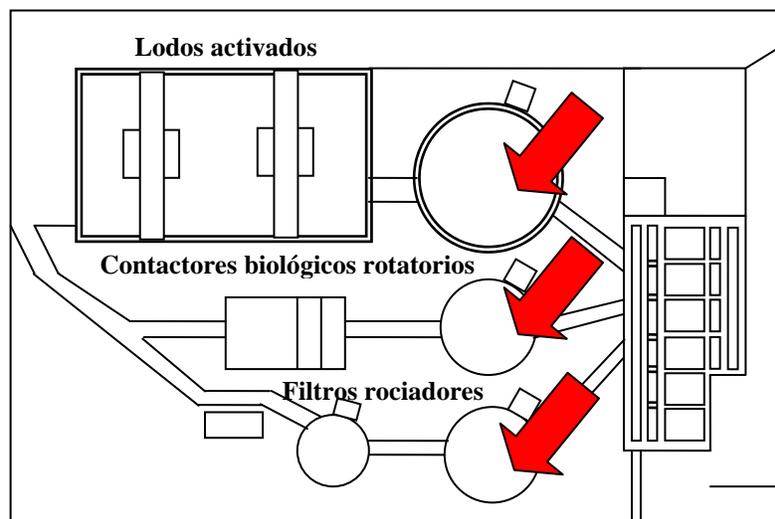


Figura 3.4 Puntos de muestreo en los sedimentadores secundarios de cada sistema de tratamiento secundario



Fotografía 3.2 Sedimentadores de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria

Tabla 3.2 Tiempo de retención de los tres sistemas de tratamiento de la PTARCU

| Sistema de tratamiento | TR (h) |
|-----------------------------------|---------------|
| Lodos activados | 5 - 5.5 |
| Contactores biológicos rotatorios | 1 |
| Filtros rociadores | 0.6 - 0.7 |

Se tomó un volumen aproximado de 4 L en recipientes de plástico limpios de 5 L cada uno sin preservadores, tal como se describe en Trojan Technologies Inc. (1997). Las muestras fueron llevadas inmediatamente al laboratorio para realizar las pruebas de desinfección y análisis fisicoquímicos.

3.3 Primera etapa. Efecto del tipo de tratamiento secundario en la calidad del efluente

La primera etapa de la experimentación tuvo dos objetivos principales. El primero fue la determinación el efecto de la calidad de cada efluente (principalmente en lo que se refiere a la cantidad y tamaño de partículas) en la eficacia de desinfección y el segundo la determinación de las dosis óptimas de desinfección de dos grupos indicadores de contaminación fecal: coliformes y enterococos fecales y de la bacteria patógena *Salmonella typhi*, presentes en los tres efluentes secundarios. Las razones para elegir la bacteria así como los indicadores se presentan a continuación.

Coliformes fecales. Es el indicador de contaminación fecal más usado y es considerado en la normatividad Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997), como indicador de contaminación fecal con posible presencia de patógenos. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de 1,000 y 2,000 NMP/100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente.

Enterococos fecales. Este grupo se ha empleado para determinar fuentes de contaminación fecal reciente (humana o de animales de granja), pero no está considerado en la normatividad mexicana. A pesar de esto, su estudio es de importancia debido a que ha demostrado ser más resistente que las bacterias coliformes fecales, hecho que podría ser relevante si se le considerase como un indicador alterno de contaminación fecal.

Salmonella typhi. Es un agente causante de altas tasas de morbilidad y mortalidad en México. Su concentración en agua residual tratada, del orden de 10^5 y 10^6 NMP/100 mL (Jiménez *et al.*, 2001), que es alta considerando su dosis infectiva que es de 10^3 - 10^7 organismos (US EPA, 1992) y la concentración que normalmente se encuentra en agua residual cruda de Estados Unidos de 10^0 - 10^2 NMP/mL (Metcalf y Eddy, 1991). Esto, la convierte en factor de riesgo para la población que está en contacto con ella, principalmente en zonas donde el agua residual se dispone sin tratamiento alguno, como sucede en las zonas de riego.

La calidad del agua residual fue determinada en función de parámetros físicos. En la Tabla 3.3 se presentan las técnicas empleadas para la determinación de los parámetros evaluados. La descripción detallada de cada técnica se presenta en el Anexo I.

Tabla 3.3 Técnicas empleadas para la evaluación de la calidad fisicoquímica de los efluentes

| Parámetros | Unidad | Técnica/Fuente |
|---------------------------------------|---------|---|
| Sólidos suspendidos totales | mg/L | Gravimetría 2540 D/APHA <i>et al.</i> , 1998 |
| Transmitancia | % | Fotométrica |
| Transmitancia filtrada (0.45 μ m) | % | Fotométrica |
| Distribución de tamaño de partícula | μ m | Principio coulter 2560 B/APHA <i>et al.</i> , 1998 |

Para evaluar la inactivación de coliformes y enterococos fecales, así como de *Salmonella typhi*, se llevó a cabo la cuantificación de los microorganismos viables antes y después de la aplicación de la luz UV. Las técnicas empleadas para su cuantificación se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Técnicas para la cuantificación microbiológica

| Parámetros | Unidad | Técnica/Fuente |
|-------------------------|------------|---|
| Coliformes fecales | UFC/100 mL | Filtración a través de membrana 9222 D/APHA <i>et al.</i> , 1998 |
| Enterococos fecales | UFC/100 mL | Filtración a través de membrana 9230 C/APHA <i>et al.</i> , 1998 |
| <i>Salmonella typhi</i> | UFC/100 mL | Filtración a través de membrana 9260 D/APHA <i>et al.</i> , 1998 |

Las determinaciones microbiológicas se realizaron por medio de la técnica de filtración a través de membrana, esto debido a que en otros estudios (Qualls *et al.*, 1984) se ha demostrado que no existen diferencias estadísticamente significativas en la cuantificación de microorganismos por medio de la técnica de filtración a través de membrana y tubos múltiples. Aunado a esto, su

sencillez y rapidez de determinación fueron factores para preferirla ante la técnica de tubos múltiples.

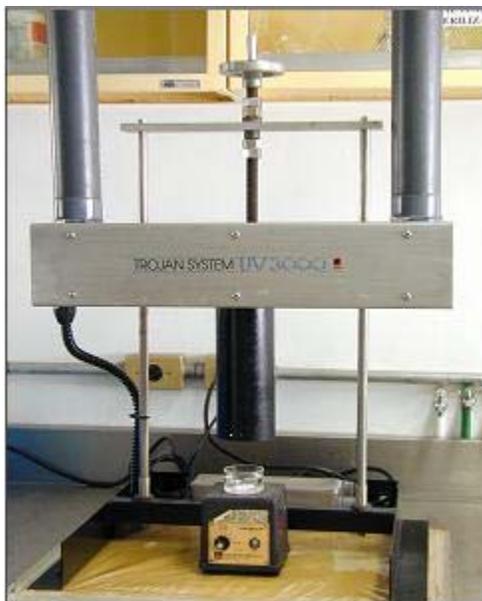
Para llevar un control de crecimiento de *S. typhi* se utilizó la cepa de *Salmonella typhi* ATCC 6539 adquirida de la colección de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. La cepa fue mantenida en medio sólido a 4°C (Schlegel, 1992) y fue identificada en periodos de tiempo de 1 mes con el API 20E Bio Merieux (sistema de identificación basado en una serie de pruebas bioquímicas). Este sistema fue utilizado por la rapidez y facilidad de identificación.

3.3.1 Pruebas de radiación

Las pruebas de desinfección se realizaron a nivel laboratorio con un equipo de luz colimada¹ debido a que con este dispositivo se pueden controlar fácilmente tanto la intensidad como el tiempo de exposición. Las dosis que se aplicaron en las pruebas de desinfección (5, 10, 15, 30, 60, 120 mW·s/cm²) se seleccionaron con base en las dosis reportadas en la literatura (Harris *et al.*, 1987; Sommer *et al.*, 1995; Lazarova *et al.*, 1998; Sommer *et al.*, 1998; Lazarova *et al.*, 1999; Shin *et al.*, 2000; Jacangelo *et al.*, 2003).

El equipo de luz colimada, donado por *Trojan Technologies Inc*, consta de una lámpara de mercurio de baja presión suspendida en forma horizontal (Fotografía 3.3). La lámpara debe ser encendida por lo menos 30 minutos antes de realizar las radiaciones de tal forma que se asegure que la intensidad de la radiación sea constante. Las muestras de agua residual en alícuotas de 50 mL se irradiaron en cubas estériles de 55 mm de diámetro y fueron agitadas continuamente con barras magnéticas de 25 mm. Para controlar la exposición de las muestras a la luz ultravioleta se empleó un obturador de cartón oscuro que permite controlar la radiación por un tiempo determinado. Por su diseño, en este tipo de equipo, las radiaciones se realizan por lote de tal forma que el tiempo de exposición se conoce con precisión.

¹ Equipo con el que los rayos de luz se hacen incidir perpendicularmente a la superficie de la muestra



Fotografía 3.3 Equipo de luz colimada

3.3.1.1 Determinación de la dosis

La intensidad de la luz UV se midió con un radiómetro calibrado International Light, Inc IL 1700 con detector SED240 #4817 que tiene la capacidad de rechazar toda energía con longitud de onda mayor que 320 nm y mide sólo aquella con longitud de onda entre 200 y 320 nm. Además cuenta con un filtro NS254 #17415 para transmitir sólo luz con longitud de onda de 254 nm. El detector es colocado a la misma elevación de la superficie de la muestra a ser irradiada y la intensidad medida es corregida considerando la absorbancia del líquido de acuerdo con la ley de Beer (Morowits, 1950).

$$\text{Intensidad promedio} = \frac{I_0(1 - \exp(-\alpha d))}{\alpha d} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde

d : Profundidad de la muestra (2.2 cm para este caso específico)

α : Absorbancia de la muestra calculada a partir de la transmitancia [$\alpha = -\log (\% T / 100)$]

I_0 : Intensidad medida en la superficie de la muestra con el radiómetro

De acuerdo con Sakamoto y Cairns (1996) las pruebas con un equipo de luz colimada se deben de realizar aplicando una intensidad aproximadamente constante, del orden de 0.20 a 0.25 mW/cm², por lo que la única variable es el tiempo de exposición que fue calculado a partir de la expresión.

$$D = I_{\text{promedio}} \times t \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde

D : Dosis de luz UV ($\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)
 I : Intensidad promedio (mW/cm^2)
 t : Tiempo (s)

3.4 Segunda etapa. Pruebas de reactivación

La dosis óptima de un desinfectante es aquella que logra inactivar los microorganismos hasta las concentraciones deseadas, en este caso, que cumpla con los límites establecidos por la normatividad mexicana para coliformes fecales y que asegure que no hay riesgo de infección por *S. typhi* con base en su dosis infectiva (10^3 - 10^7 organismos). Pero además, esta dosis debe ser suficiente para evitar el recrecimiento de los microorganismos. Por tal motivo, se evaluó la reactivación de coliformes fecales y *Salmonella typhi* al aplicar diferentes dosis y exponer las muestras desinfectadas tanto a la luz como a la oscuridad.

Se seleccionaron solo las bacterias coliformes fecales y *Salmonella typhi*, debido a que el primero es el indicador considerado en la legislación y la segunda por su importancia sanitaria para nuestro país. Debido a que la reactivación de los microorganismos no esta en función de las características físicas de los efluentes, se seleccionó solo uno de ellos (lodos activados) para realizar las pruebas de reactivación.

La reactivación fue evaluada tal como lo describen Liltved y Lanfald (2000). Las muestras fueron irradiadas con dosis de 5 a $120 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ como en la etapa anterior, para determinar la dosis óptima de desinfección. Las muestras irradiadas fueron colocadas en botellas de 100 mL de vidrio estériles y se expusieron a la luz solar inmediatamente después de la radiación con luz UV. Otras muestras irradiadas con las mismas dosis se colocaron en botellas cubiertas con papel aluminio para utilizarlas como control (o evaluación del grado de reactivación en la oscuridad). El tiempo límite de prueba fue de dos horas, ya que de acuerdo con Harris *et al.* (1987a); Kashimada *et al.* (1996) y Baron (1997) con este tiempo se evita la posible muerte de microorganismos debido al confinamiento de la muestra.

El grado de reactivación se obtuvo mediante la diferencia de la concentración logarítmica de los microorganismos antes de la reactivación ($\log N/N_0$) y después de la reactivación ($\log N_r/N_0$). Es decir

$$\text{Log} \frac{N_r}{N_0} - \text{Log} \frac{N}{N_0} = \text{Log} \frac{N_r/N_0}{N/N_0} = \text{Log} \frac{N_r}{N} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde

N_0 : Concentración de microorganismos antes de la radiación UV (UFC/100 mL)
 N : Concentración de microorganismos después de la radiación UV (UFC/100 mL)
 N_r : Concentración de microorganismos después de la reactivación (UFC/100 mL)

3.5 Tercera etapa. Efecto de la concentración de sólidos suspendidos en la concentración de bacterias asociadas a partículas

Los resultados de la primera etapa demostraron la existencia de dos etapas en la inactivación. La primera, en la que existe una reducción inicial rápida de los microorganismos, se lleva a cabo generalmente con dosis menores a 30 mWs/cm^2 , mientras que la segunda etapa, en la que existe una variación y disminuye la velocidad, se observa al aplicar dosis mayores. Este fenómeno ha sido reportado anteriormente por diversos autores y atribuido a la asociación de microorganismos con las partículas presentes en el efluente (N_p) (Oliver y Cosgrove, 1975; Qualls *et al.*, 1983; US EPA, 1986; Darby *et al.*, 1993; Emerick y Darby, 1995; Loge *et al.*, 1996; Ho *et al.*, 1998; Moreland *et al.*, 1998; Janex *et al.*, 1998; Emerick *et al.*, 1999; Abdennaceur *et al.*, 2000; Loge *et al.*, 2002; Dietrich *et al.*, 2003).

Esta asociación, evita el contacto de los microorganismos con la luz UV, por lo que, a pesar de aplicar dosis muy altas, la inactivación no puede ser mejorada. Debido a que N_p es función de la cantidad de partículas presentes en cada efluente, el objetivo principal de esta etapa fue establecer una herramienta útil para la determinación rápida de los valores de N_p en efluentes secundarios en función de la concentración de sólidos suspendidos.

3.5.1 Preparación de las muestras

En esta etapa, el parámetro determinante fue la concentración de partículas medidas como sólidos suspendidos, y no el tamaño de partícula, por lo que se decidió trabajar sólo con uno de los efluentes secundarios. Las pruebas se realizaron con el efluente del sistema de lodos activados y de la misma forma, se eligieron únicamente a las bacterias coliformes fecales para las determinaciones microbiológicas.

Las muestras, de 4 L cada una, fueron tomadas del licor mezclado y del sedimentador del reactor de lodos activados en recipientes limpios de 5 L sin preservadores tal como lo describe Trojan Technologies Inc. (1997).

Las muestras del sedimentador secundario se adicionaron con el licor mezclado del reactor de lodos activados, con el objeto de generar muestras sintéticas cuya concentración de sólidos suspendidos oscilaran entre 20 y 100 mg/L. Este intervalo de valores es el que se reporta generalmente para este tipo de determinaciones y representan el mejor y el peor escenario en cuanto a calidad de los efluentes secundarios (Whitby y Palmateer, 1993; Andreadakis *et al.*, 1999).

A las muestras sintéticas se les determinó la transmitancia y la concentración de sólidos suspendidos de acuerdo con los métodos establecidos anteriormente.

3.5.2 Radiación de las muestras

Las muestras con diferentes concentraciones de sólidos suspendidos se expusieron a radiación con luz UV por medio del equipo de luz colimada (tal como se describe en el apartado 3.3.1), con dosis que oscilaron entre 5 y 120 mW·s/cm². La dosis se determinó tal como se describe en el apartado 3.3.1.1.

La inactivación de coliformes fecales en cada muestra después de la desinfección, se evaluó de acuerdo con la técnica 9222 D de los métodos estándar (APHA *et al.*, 1998).

3.5.3 Correlaciones matemáticas

Para determinar de forma *a priori* la cantidad de microorganismos que no serán inactivados después de la desinfección (N_p) se establecieron dos correlaciones matemáticas en función de parámetros fácilmente cuantificables: sólidos suspendidos totales y tamaño de partícula.

En la primera expresión se estableció una correlación entre la concentración residual de las bacterias coliformes fecales (N_p) después de la desinfección (variable dependiente) y la concentración de sólidos suspendidos (variable independiente), a través de la siguiente ecuación.

$$N_p = cSS^m \quad (\text{Ec. 3.4})$$

De la cual c es la ordenada al origen y m la pendiente. Éstas constantes fueron específicas para el tipo de agua con el que se realizó el experimento.

La segunda expresión se determinó en función del tamaño de partícula. Debido a que las partículas mayores que 40 μm tienen un efecto negativo en la eficacia de desinfección y aprovechando los resultados de la distribución de tamaño de partícula del efluente de lodos activados, se realizó una correlación entre la cantidad de partículas mayores que 40 μm (en términos de volumen, $V_{>40 \mu\text{m}}$) y N_p . El valor de $V_{>40 \mu\text{m}}$ se determinó mediante la suma del volumen que representan todas las partículas mayores que 40 μm . Mientras que N_p , se determinó como el promedio de la concentración en la etapa de “cola” en cada cinética de desinfección.

3.6 Cuarta etapa. Inactivación de amibas anfitriónicas patógenas

La presencia de amibas patógenas de alta peligrosidad como *Acanthamoeba* spp. en agua residual de nuestro país ha sido demostrada por Maya (2000) y Rojas (2004). La peligrosidad de estos microorganismos radica en su alta patogenicidad y capacidad de enquistarse, lo que le confiere una mayor resistencia a diversos procesos convencionales de desinfección (Martínez y Visvesvara, 1997; Martínez, 1980; Marciano-Cabral *et al.*, 2000). Aunado a esto, el alto riesgo de infección debido al contacto de pobladores, agricultores y consumidores de cultivos regados con agua residual incrementa su importancia.

En la literatura se reporta que la luz UV es capaz de inactivar bacterias (*Escherichia coli* y coliformes fecales como indicador), virus (enterovirus y hepatitis A) y protozoarios (*Giardia* y *Cryptosporidium*) y señala que la resistencia de los microorganismos a la inactivación es en el siguiente orden: quistes>virus>bacterias. No obstante, estudios recientes demuestran que algunos quistes de protozoarios, como *Cryptosporidium* pueden ser inactivados en hasta 3 unidades log con dosis muy bajas de luz UV (3 mW·s/cm²; Clancy *et al.*, 2000; Shin *et al.*, 2000), lo que sin duda representa una ventaja de este desinfectante frente a otros.

El principal objetivo de esta etapa fue analizar el efecto de la luz UV en la inactivación de las amibas anfitriónicas² y compararlo con el efecto sobre las bacterias.

3.6.1 Aislamiento e identificación de amibas

Las amibas empleadas para realizar la experimentación fueron aisladas a partir del efluente del sistema de lodos activados e identificadas por Maya (2000). Éstas amibas identificadas como *Acanthamoeba* spp. mostraron una patogenicidad (evaluada en ratones) de un 100% (Maya *et al.*, 2003).

3.6.2 Preparación de la suspensión de amibas

Las amibas aisladas se cultivaron en un medio axénico³, que fue resembrado continuamente hasta que se alcanzó una concentración de trofozoítos de las amibas de 10⁵ células/mL de medio. El conteo de las amibas se realizó en una cámara Neubauer para hematocitos con profundidad de 0.1 mm. Una vez alcanzada dicha concentración, el medio fue centrifugado a 2 500 rpm/10 minutos para recuperar el concentrado de amibas. El mismo proceso se realizó con la *Acanthamoeba culbertsoni* ATCC 30171 que se empleó como cepa de referencia.

El agua residual del sistema de lodos activados, fue filtrada y esterilizada para evitar cualquier interferencia en el proceso de desinfección. Para lograr suspensiones con concentraciones de *Acanthamoeba culbertsoni* ATCC 30171 y de la cepa aislada *Acanthamoeba* spp. de aproximadamente 10⁴ quistes/mL, se inocularon 200 µL del concentrado de amibas en 50 mL del agua residual.

3.6.3 Radiación de la suspensión de amibas

Las muestras preparadas fueron irradiadas con el equipo de luz colimada con dosis que oscilaron entre 7.5 y 173 mW·s/cm². Estas dosis se seleccionaron con base en los estudios realizados en la inactivación de protozoarios como *Cryptosporidium parvum* y *Giardia lamblia* (Rice y Hoff, 1981; US EPA, 1999) y en los que se emplea la técnica de ex-quistación para determinar la inactivación de estos organismos. Después de la radiación y de forma casi inmediata, las muestras fueron recuperadas por centrifugación (a 2 500 rpm/15 min), cuantificadas y resembradas en un

² Amibas que son capaces de vivir como parásitos u organismos de vida libre.

³ Medio que por su composición es idóneo para la reproducción de las amibas (ver composición en anexo I).

medio monoxénico⁴ para su incubación a 30 °C. Las cajas fueron observadas diariamente para identificar las formas tróficas y quísticas a través de un microscopio de contraste de fases con objetivos de 20 × y 40 ×. La inactivación fue determinada con base en los microorganismos que fueron capaces de desarrollar trofozoítos a partir de su forma quística durante el periodo que se mantuvieron en condiciones favorables en el medio monoxénico (método de ex-quistación).

⁴ Medio empleado para el sostenimiento de las amibas (ver composición en anexo I).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en cada una de las cuatro etapas experimentales. Tal como se ha mencionado, la eficacia de inactivación con luz ultravioleta, depende estrechamente de la calidad del efluente, por ello la sección 4.1 contiene la caracterización de los tres efluentes secundarios usados y se relaciona con la eficacia de desinfección en términos del contenido de coliformes y enterococos fecales, así como de *Salmonella typhi*. Para cada uno de estos microorganismos se describe además, su cinética de inactivación. Dichas cinéticas son útiles para determinar la dosis mínima de luz UV necesaria para desinfectar un agua. En la práctica, esta dosis difiere de la recomendable que es la que evita la reactivación de los microorganismos y debe por tanto ser la empleada para el diseño de las plantas de depuración. Por tal motivo, en la sección 4.2 se presenta la segunda etapa cuyo objetivo fue estudiar la capacidad de reactivación de las bacterias coliformes fecales y de *Salmonella typhi* con diferentes dosis para, con base en ello, seleccionar la dosis recomendable de desinfección.

Por otra parte, puesto que la presencia de microorganismos inmersos en las partículas limita de manera importante la eficacia de desinfección, incluso con dosis de luz UV elevadas, en la tercera fase se buscó cómo determinar *a priori* la concentración de microorganismos que no será posible inactivar por estar protegidos en los sólidos suspendidos. Así, a partir de los datos experimentales se logró obtener dos correlaciones matemáticas que ayudan a estimar la concentración de coliformes fecales dentro de las partículas (N_p) que no será posible inactivar. La primera evalúa N_p a partir de la concentración de sólidos suspendidos y la segunda, aprovechando los datos de la distribución de tamaño de partícula, lo hace a partir del volumen de las partículas mayores de 40 μm (que es el tamaño de partícula limitante para la desinfección con luz UV), ambas en un efluente de lodos activados por ser éste el que mayores interferencias presentó por la presencia de partículas en un amplio intervalo de tamaños (2-60 μm).

En la cuarta etapa se analizó la inactivación de amibas anfitriónicas, organismos de alta patogenicidad y cuya presencia en aguas residuales en México ha sido demostrada recientemente, y para el cual no existen datos en la literatura.

Por último, los resultados obtenidos en la parte experimental fueron de utilidad para llevar a cabo un diseño preliminar de un sistema de desinfección para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU.

4.1 Primera etapa. Efecto del tipo de tratamiento secundario en la calidad del efluente

4.1.1 Caracterización de los efluentes secundarios

De acuerdo con la literatura, las características del agua residual tales la concentración de sólidos suspendidos, la transmitancia y la distribución y tamaño de partículas determinan la eficacia de

desinfección. A continuación se describen los resultados de la evaluación de la calidad de los tres tipos de efluentes estudiados en términos de los parámetros de interés.

4.1.1.1 Sólidos suspendidos

La cantidad de sólidos suspendidos determina la eficacia de desinfección ya que las partículas reducen la cantidad de luz UV que llega a los microorganismos, ya sea por absorción, refracción o reflexión de la luz. En la Figura 4.1 se presenta la concentración de sólidos suspendidos promedio en los tres efluentes secundarios. El efluente de lodos activados tuvo un valor de 31 ± 10 mg/L, contactores biológicos rotatorios de 9 ± 2 mg/L y filtros rociadores de 12 ± 1 mg/L.

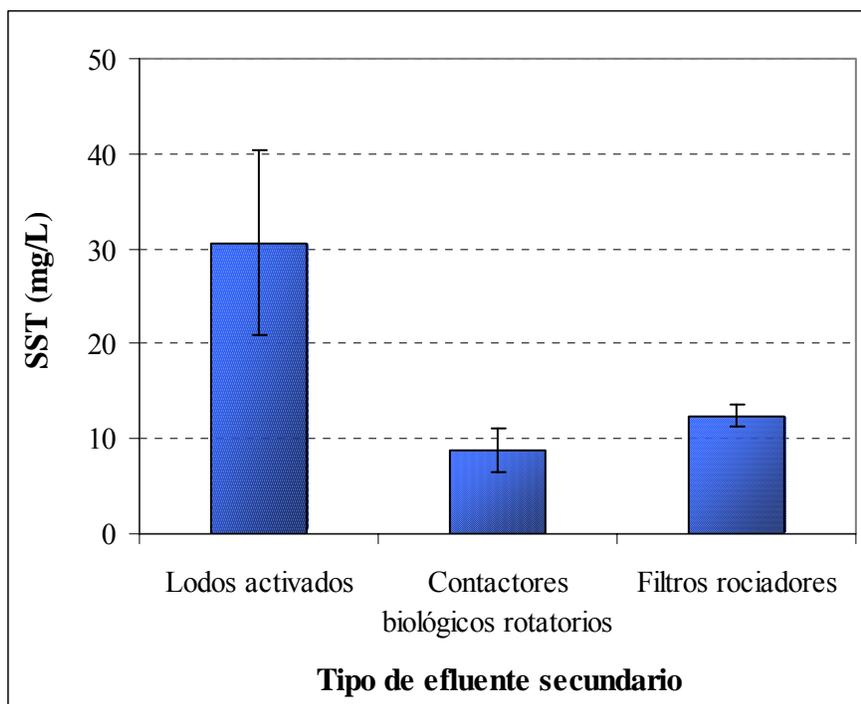


Figura 4.1 Concentración de sólidos suspendidos en los tres efluentes secundarios de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU)

De acuerdo con la literatura, los sistemas de crecimiento en suspensión presentan concentraciones de sólidos suspendidos promedio de 30 mg/L, por lo que la concentración reportada para lodos activados (31 ± 10 mg/L) se puede considerar representativa de este tipo de efluentes. Por otro lado, los sistemas de crecimiento en biopelícula (contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores), presentaron las concentraciones más bajas de sólidos suspendidos, de 9 y 12 mg/L respectivamente. Estos valores son comunes para este tipo de sistema, ya que la presencia de partículas grandes -debida al desprendimiento de la biopelícula- facilita su precipitación en el sedimentador secundario (González, 1996). De acuerdo con Metcalf y Eddy (2003), con el diseño apropiado de un sedimentador secundario de un proceso de crecimiento en biopelícula se pueden lograr concentraciones de sólidos suspendidos menores que 20 mg/L. Por lo que se puede inferir

que en el caso de la PTARCU, los sedimentadores de los sistemas de crecimiento en biopelícula operan eficientemente.

De acuerdo con Solomon *et al.* (1998) la desinfección no es del todo eficiente ni viable en efluentes secundarios con concentraciones de sólidos suspendidos mayores que 30 mg/L. Esto debido a que la presencia de partículas evita el contacto de la luz UV con los microorganismos, lo que hace necesario la aplicación de dosis de luz UV elevadas para lograr la concentración final deseada de microorganismos. Ello se refleja directamente en el aumento de costos. Por tal motivo, la aplicación de la luz UV como desinfectante en los efluentes de crecimiento en biopelícula, cuya concentración de sólidos suspendidos osciló entre 7 y 14 mg/L representaría una alternativa tanto factible como viable. Sin embargo, para el caso de los lodos activados se debe tener precaución ya que a pesar de presentar una concentración promedio de sólidos suspendidos de 31 mg/L, se registraron valores de hasta 44 mg/L. Estadísticamente, en la práctica, ello obliga a supervisar el buen funcionamiento de los sedimentadores, o bien, a implementar un sistema de tratamiento previo, como la filtración, que ayude a disminuir las concentraciones de sólidos suspendidos antes de la desinfección.

En la sección 3.3.2 se analiza con mayor detalle el efecto que las concentraciones de sólidos suspendidos mayores que 30 mg/L tiene en la eficacia de desinfección.

4.1.1.2 Transmitancia

La transmitancia mide la capacidad del agua para dejar pasar la luz UV a través de ella en porcentaje. Su valor depende de la presencia de partículas que absorben o reflejan la luz, y de algunas sustancias disueltas, orgánicas o inorgánicas, que la absorben (Cairns *et al.*, 1995). Por tal motivo en esta sección se discutirán los resultados de la evaluación de dicho parámetro y su relación principalmente con la cantidad de sólidos suspendidos presentes en cada uno de los efluentes, ya que este es un parámetro de interés para el trabajo.

Los valores de transmitancia del efluente de lodos activados fueron de 55 ± 7 %, para el de contactores biológicos rotatorios de 75 ± 9 % y para filtros rociadores de 64 ± 8 %. En la Tabla 4.1 se presenta la comparación de los valores de transmitancia encontrados en este trabajo con los reportados en la literatura.

Tabla 4.1 Valores de transmitancia para efluentes de diferentes procesos de tratamiento secundario

| Proceso | Transmitancia (%) | |
|-----------------------------------|-------------------|-------------|
| | Este trabajo | AWWOA, 1999 |
| Crecimiento en suspensión | | |
| Lodos activados | 48-59 | 45-65 |
| Crecimiento en biopelícula | | |
| Contactores biológicos rotatorios | 66-84 | 50-55 |
| Filtros rociadores | 56-72 | 50-55 |
| Lagunas | ND | 30-50 |

N.D. No determinado

El efluente del sistema de lodos activados presentó un valor promedio de 55%, que está dentro del intervalo esperado para este tipo de sistemas (crecimiento en suspensión) y que es de 45 a 65 % (AWWOA, 1999). Por otro lado, los efluentes de los sistemas de crecimiento en biopelícula presentaron valores hasta 17% (contactores biológicos rotatorios) y 29% (filtros rociadores) superiores a los esperados para este tipo de sistemas, ya que la transmitancia usualmente oscila entre 50 y 55%. Puesto que, de acuerdo con la *Task Force on Wastewater Disinfection* (1996) un efluente debe presentar un 65% de transmitancia como mínimo para que la desinfección con luz UV sea económicamente factible, los efluentes en estudio, con excepción del de los contactores biológicos rotatorios, debieran ser sometidos a un proceso de filtración con el objeto de eliminar la mayor cantidad de partículas que disminuyen la transmisión de la luz.

En efecto, el sistema de contactores biológicos rotatorios sería el único que podría ser desinfectado con luz UV a bajo costo, aún sin someterlo a un proceso de filtración, ya que presenta un porcentaje de transmitancia de 75 %. Pero, en los otros dos casos (lodos activados, 55% y filtros rociadores, 64 %) es necesario mejorar su calidad por medio de la eliminación de partículas ya que éstas juegan un papel importante en la transmitancia del efluente tal como se observa en la Figura 4.2. En dicha figura se puede observar que mientras mayor sea la cantidad de sólidos suspendidos presentes en el efluente, la transmitancia será menor. El análisis detallado del efecto de las partículas en la transmitancia de los efluentes se presenta en la siguiente sección 3.1.1.3.

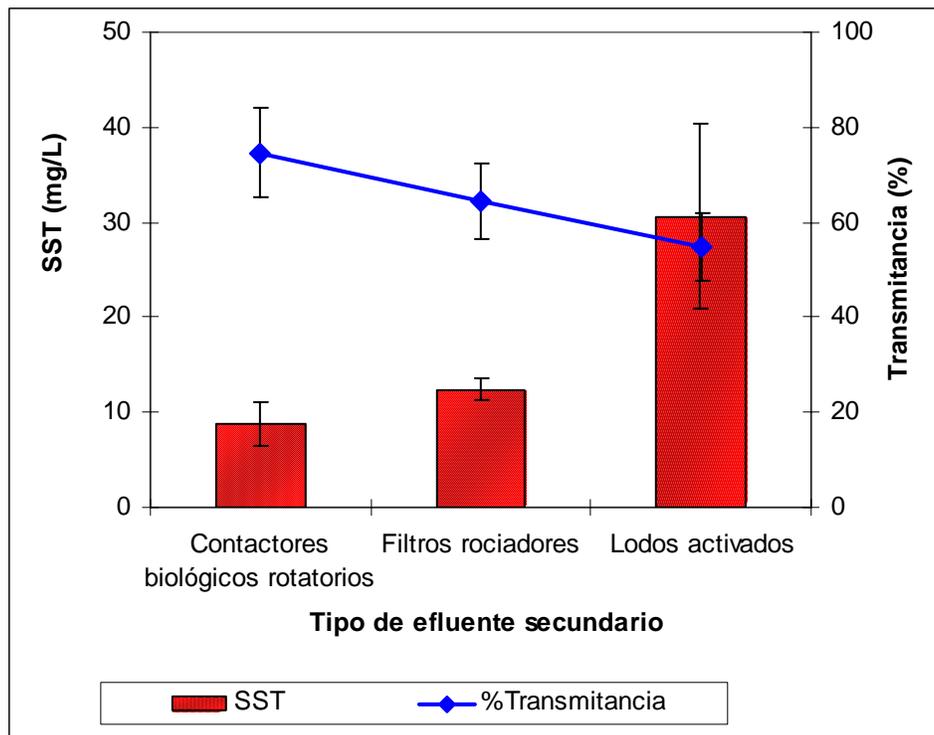


Figura 4.2 Relación entre la concentración de SST y la transmitancia de tres efluentes secundarios

4.1.1.3 Transmitancia en los tres efluentes secundarios con filtración

La filtración es un proceso con el cual se eliminan partículas presentes en los efluentes de aguas residuales (como los secundarios) y sirve, entre otras cosas, para mejorar la transmitancia del agua y reducir la dosis desinfectante, o bien, para incrementar la eficacia de desinfección. Por ello, los tres efluentes fueron sometidos a un proceso de filtración terciaria. Para realizar esto a nivel laboratorio (dado que en la PTARCU los tres efluentes se mezclan durante la filtración en arena y no es posible como consecuencia usarlos en este estudio), se tuvo que simular a nivel laboratorio el proceso. Los efluentes filtrados para cada uno de los sistemas se obtuvieron pasando cada uno a través de un filtro de 0.45 μm , de acuerdo con recomendaciones de Qualls *et al.* (1985) y Darby *et al.* (1995).

En la Figura 4.3 se presentan los valores de transmitancia en el efluente con y sin filtrar para los tres procesos en estudio. Se observa de forma general que la transmitancia aumenta en un 12 % a un 26 % debido a la filtración. En promedio, para lodos activados la transmitancia aumentó de 55 ± 7 a 74 ± 3 , para los contactores biológicos rotatorios de 75 ± 9 a 85 ± 3 y para filtros rociadores de 64 ± 8 a 79 ± 3 . Así, con la filtración se logró obtener valores superiores a 70% para los tres efluentes de manera que se supera el valor de 65% de transmitancia establecido por la *Task Force on Wastewater Disinfection* (1996) como el mínimo requerido.

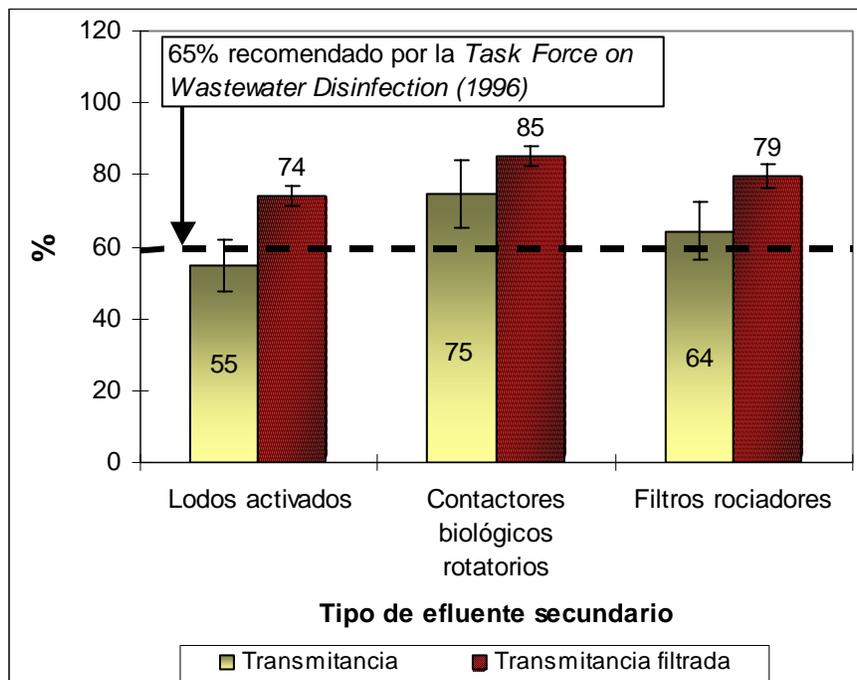


Figura 4.3 Comparación de valores de transmitancia y transmitancia filtrada en tres efluentes secundarios

Estos resultados indican, por una parte, que las partículas de los tres efluentes representan en términos de la transmitancia un 26% en lodos activados, 12% en contactores biológicos rotatorios y 19% en filtros rociadores. Pero por otra, también revelan que existen sustancias disueltas a las

cuales se debe la absorbancia restante de luz UV, y cuya determinación no se realizó por no ser de importancia para el desarrollo de este trabajo.

En conclusión de este apartado, el someter un efluente secundario a un proceso de filtración mejora la transmisión de la luz UV, con lo cual podría disminuirse la dosis necesaria para cumplir con los requerimientos de desinfección y se hace posible el empleo de la luz UV. A pesar de ello, y para fines de este trabajo, se continuaron usando muestras de los efluentes secundarios sin filtrar debido a que el objetivo de la tesis se refiere a determinar el efecto de las partículas presentes y no al de la composición del agua que en principio es similar debido a que los tres procesos usan el mismo influente. En la práctica, la aplicación o no de un proceso de filtración se determina en función de los costos comparativos de incluir este proceso contra el usar una mayor dosis de desinfección. Severin, 1980 reportó que los costos operacionales de desinfección de un efluente secundario (con transmitancia de 70%) son de \$0.0055 USD por m³, mientras que en un efluente terciario sometido a filtración y con transmitancia superior a 80%, el costo disminuye notablemente a \$0.0019 USD por m³. Además, de acuerdo con Severin (1980), a pesar de que la filtración no es necesaria para muchos efluentes secundarios con calidad aceptable para su desinfección ($T > 60\%$), su empleo se practica para ahorrar costos de desinfección. Los datos básicos para hacer el análisis comparativo de costos se puede obtener en laboratorio con los procedimientos empleados en esta tesis.

4.1.1.4 Distribución y tamaño de partículas

El tamaño de las partículas es un parámetro que recientemente ha sido considerado como el determinante de la eficacia de desinfección con luz UV, ya que mejora conforme las partículas presentes son pocas y pequeñas (Cairns *et al.*, 1995; Sakamoto, 2000). Así, el tamaño y la cantidad de las partículas en un efluente determina la dosis de luz UV que un sistema debe irradiar para lograr los niveles de desinfección deseados (Cairns *et al.*, 1995).

En la literatura se ha determinado que las partículas mayores que 40 μm afectan negativamente la eficacia de desinfección debido a que evitan la penetración de la luz UV dentro de las partículas. Por tal motivo, es deseable que los efluentes a ser desinfectados presenten partículas de tamaño menor al mencionado. Para realizar el análisis de las partículas presentes en los efluentes de los tres sistemas de tratamiento, se utilizó un equipo Coulter con capacidad para determinar tamaños de partícula entre 0.4 y 1200 μm . El análisis de las partículas se realizó evaluando un intervalo de 2 a 60 μm por dos razones principales. En primer lugar, las partículas menores que 2 μm no tienen un efecto en la eficacia de desinfección por lo que no son de interés para este trabajo. Y en segundo lugar, un análisis preliminar de los efluentes demostró la ausencia de partículas mayores que 60 μm , por lo que no fue necesario el análisis de partículas con diámetro mayor.

De acuerdo con *Trojan Engineering* (1994), la eficacia de desinfección es función del tamaño de la partícula tal como se presentó en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Con base en esta clasificación se discutieron los resultados de este apartado, considerando que las partícula de 40 μm de tamaño son limitante para lograr altas eficiencias en la desinfección.

Tabla 4.2 Efecto del tamaño de las partículas en la capacidad de desinfección

| Diámetro de la partícula (μm) | Efecto y demanda de la luz UV en el agua |
|--|--|
| < 10 | Penetra fácilmente y la demanda de luz es baja |
| 10-40 | Puede penetrar completamente pero se incrementa la demanda de luz UV |
| >40 | No penetra completamente y la demanda de luz es alta |

Adaptado de: Trojan Engineering, 1994; AWWOA, 1999

La Figura 4.4 muestra la distribución de tamaño de partícula del efluente de lodos activados obtenida mediante la técnica del principio Coulter. La gráfica ilustra el volumen de partículas en mL/m^3 de agua residual que representa cada tamaño de partícula analizado.

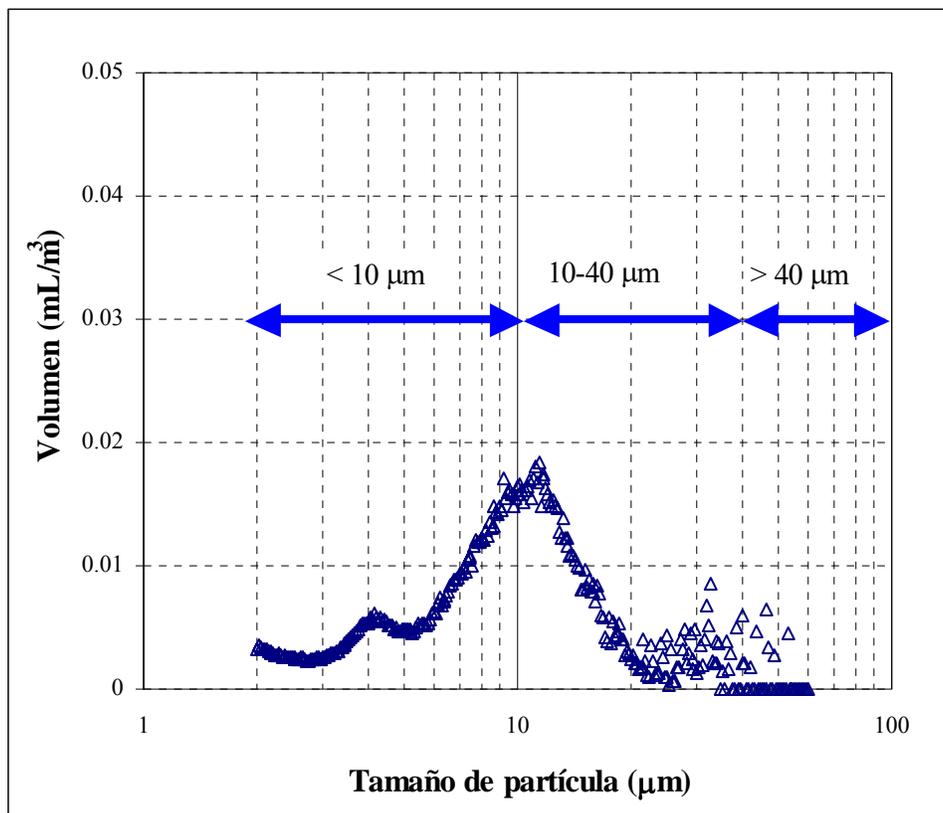


Figura 4.4 Distribución de tamaño de partícula del efluente de lodos activados

El efluente de lodos activados presentó un diámetro medio de partícula de $11.5 \pm 8.3 \mu\text{m}$. Para estimar el volumen de partículas que representó cada intervalo de tamaños (<10, 10-40 y >40 μm), se determinó el área bajo la curva para cada uno (Montgomery y Runger, 1999). Del total del volumen de partículas cuantificado para este efluente, $0.06 \text{ mL}/\text{m}^3$ lo generan las partículas con diámetro < 10 μm , las de 10-40 μm representaron $0.15 \text{ mL}/\text{m}^3$, mientras que las partículas con diámetro mayor a 40 μm generaron $0.01 \text{ mL}/\text{m}^3$ del total. Estos valores indican que las partículas con diámetro entre 10 y 40 μm son las que representan el mayor volumen del total

(65%), debido principalmente a la cantidad de ellas presentes entre estos tamaños de partículas. En la práctica, de acuerdo con *Trojan Engineering* (1994), la presencia de esta cantidad de partículas representaría un incremento en la demanda de luz UV (ver sección 3.1.2). Las partículas mayores que $40\ \mu\text{m}$ fueron las que aportaron el menor volumen del total por lo no representarían una limitación en la desinfección con luz UV. La discusión en torno al número de partículas presentes en el efluente se presenta más adelante.

Por otro lado, la Figura 4.5 presenta la distribución de tamaño de partícula del efluente de los contactores biológicos rotatorios. Los resultados muestran un cambio en el sesgo de la curva (hacia mayor tamaño de partícula) pero un volumen total de partículas menor (alrededor de $0.01\ \text{mL}/\text{m}^3$) con respecto a la de lodos activados. De acuerdo con el análisis de los datos, el tamaño medio de partícula para este efluente fue de $22\pm 16\ \mu\text{m}$, lo que indica la presencia de partículas más grandes que en el efluente de lodos activados. Las partículas $<10\ \mu\text{m}$ generaron un volumen de $0.02\ \text{mL}/\text{m}^3$, $0.19\ \text{mL}/\text{m}^3$ las partículas con tamaño entre $10\text{-}40\ \mu\text{m}$ y por último las partículas mayores que $40\ \mu\text{m}$ constituyeron $0.10\ \text{mL}/\text{m}^3$. Estos valores indican que las partículas con tamaños entre $10\text{-}40$ y $> 40\ \mu\text{m}$ son las que aportan el mayor volumen del total (61% y 32 % respectivamente). Lo anterior se explica con base en el principio de operación de los sistemas de crecimiento en biopelícula ya que en este tipo de sistemas, el desprendimiento continuo de la biopelícula favorece la presencia de partículas grandes en sus efluentes.

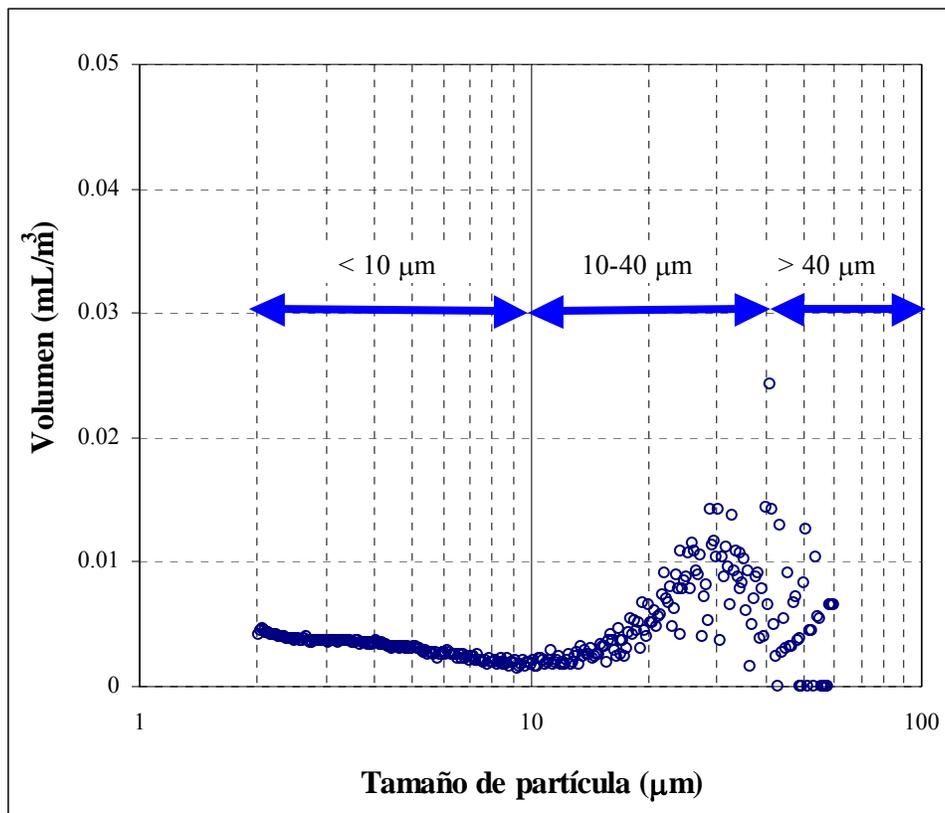


Figura 4.5 Distribución de tamaño de partícula del efluente de contactores biológicos rotatorios

Los filtros rociadores, es otro sistema con principio de operación de crecimiento en biopelícula por lo que es de esperar que las partículas presentes sean de mayor tamaño que en el caso de los lodos activados. La Figura 4.6 presenta la distribución de tamaño de partícula del efluente de filtros rociadores. En este efluente, el tamaño medio de partícula fue de $19 \pm 13 \mu\text{m}$, del orden del obtenido en los contactores biológicos rotatorios (sistema con el mismo principio de operación). Las partículas $< 10 \mu\text{m}$ representaron $0.04 \text{ mL}/\text{m}^3$, las de tamaño entre 10 y $40 \mu\text{m}$ generaron $0.31 \text{ mL}/\text{m}^3$ y las partículas mayores que $40 \mu\text{m}$ aportaron $0.07 \text{ mL}/\text{m}^3$. Es decir, que en este caso la mayor cantidad de partículas se encuentran en un intervalo de tamaño de partícula entre 10 y $40 \mu\text{m}$, lo cual representa un 74% del total del volumen de partículas. Las partículas mayores de $40 \mu\text{m}$ también tuvieron un aporte significativo del total (17%), aunque no comparable con el caso de los contactores biológicos rotatorios.

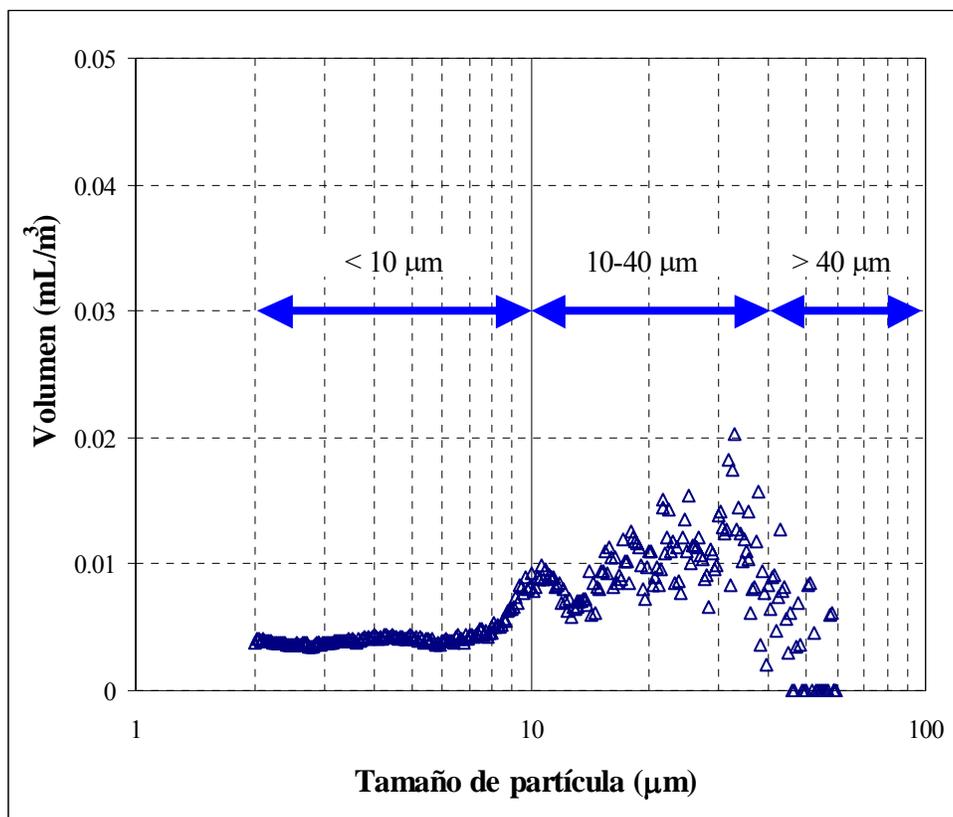


Figura 4.6 Distribución de tamaño de partícula del efluente de filtros rociadores

Para poder discutir las diferencias entre cada uno de los efluentes secundarios, se presenta la Tabla 4.3 en la que se realiza una comparación del volumen de partículas para los intervalos de tamaño de interés (< 10 , $10-40$ y $> 40 \mu\text{m}$), así como el tamaño medio de partícula.

Tabla 4.3 Tamaño medio de partícula y volumen de partículas presentes en tres efluentes secundarios

| Tratamiento | Tamaño medio de partícula (μm) | <10 μm | | 10-40 μm | | >40 μm | | TOTAL |
|-----------------------------------|---|------------------------------------|----|------------------------------------|----|------------------------------------|----|------------------------------------|
| | | Volumen (mL/m^3) | % | Volumen (mL/m^3) | % | Volumen (mL/m^3) | % | Volumen (mL/m^3) |
| Lodos activados | 12 \pm 8 | 0.06 | 29 | 0.15 | 65 | 0.01 | 6 | 0.23 |
| Contactores biológicos rotatorios | 22 \pm 16 | 0.02 | 7 | 0.19 | 61 | 0.10 | 32 | 0.32 |
| Filtros rociadores | 19 \pm 13 | 0.04 | 9 | 0.31 | 74 | 0.07 | 17 | 0.42 |

De acuerdo con lo esperado, el sistema de crecimiento en suspensión (lodos activados) presenta partículas con menor tamaño (12 μm en promedio) con respecto a los sistemas de crecimiento en biopelícula los cuales presentaron un tamaño medio de partícula de 22 μm para contactores biológicos rotatorios y 19 μm para filtros rociadores. Para el caso de los tres efluentes, el mayor volumen de partículas lo representan aquellas con tamaño entre 10 y 40 μm , a pesar de esto y de acuerdo con la literatura su presencia no afectan de forma negativa en la eficacia de desinfección, pero si implica un incremento en la demanda de luz UV. Las partículas mayores de 40 μm , que son las que podrían presentar un problema en cuestión de la eficacia de desinfección, así como en la demanda de luz UV, representan un 32% y un 17 % del volumen total de las partículas en los sistemas de contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores respectivamente. Mientras que en el efluente de lodos activados tan sólo representa un 6% del volumen total, lo que hace suponer que para este último sistema la eficiencia de desinfección sería mayor.

Como era de esperarse, la distribución de tamaño de partícula en términos de volumen muestra un sesgo de los sistemas de crecimiento en biopelícula hacia partículas grandes >40 μm . Este resultado no indica necesariamente la presencia de un gran número de partículas de este tamaño, sino únicamente el volumen que representan. Es decir, que en términos de volumen, tan sólo dos partículas grandes podrían representar mayor volumen que una gran cantidad de partículas pequeñas (Figura 4.7).

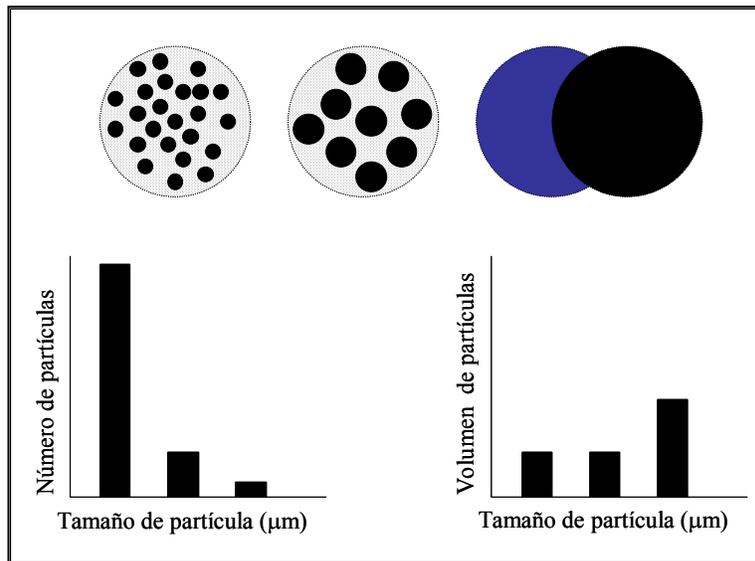


Figura 4.7 Interpretación de la distribución de tamaño de partícula en términos de número y volumen

Esto es, que el volumen no es necesariamente proporcional a la cantidad de partículas. Esto puede ser corroborado al evaluar la distribución de tamaño de partícula con base en su cantidad. En la Tabla 4.4 se presenta una comparación del porcentaje tanto en volumen como en tamaño de las partículas presentes en cada uno de los efluentes. Esta clasificación se realizó con base en los intervalos de tamaño de partícula que se consideran importantes en la desinfección con luz UV de acuerdo con *Trojan Engineering*, 1994.

Tabla 4.4 Porcentaje en volumen y número de partículas presentes en tres efluentes secundarios

| | Volumen de partículas (%) | | | Número de partículas (%) | | |
|--|---------------------------|------------|--------|--------------------------|------------|--------|
| | <10 µm | 10 a 40 µm | >40 µm | <10 µm | 10 a 40 µm | >40 µm |
| Lodos activados | 29 | 65 | 6 | 97.2 | 2.7 | 0.1 |
| Contactores biológicos rotatorios | 7 | 61 | 32 | 99.3 | 0.6 | 0.1 |
| Filtros rociadores | 9 | 74 | 17 | 98.2 | 1.7 | 0.1 |

Los resultados muestran que a pesar de que en términos de volumen, las partículas mayores que 40 µm tienen una presencia significativa en los sistemas de crecimiento en biopelícula (32% y 17% para contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores respectivamente), en número, estas representan un porcentaje muy bajo e igual al del sistema de lodos activados, del orden del 0.1% (el cual en términos de volumen tan sólo presenta 6% de partículas mayores que 40 µm). Esto

indica que en los efluentes de los sistemas de crecimiento en biopelícula existen muy pocas partículas pero de gran tamaño, lo cual se refleja en el volumen que representan del total.

A pesar de que se esperaba que los efluentes de crecimiento en biopelícula presentaran una mayor cantidad de partículas de gran tamaño, debido al desprendimiento de la biopelícula, se pudo corroborar nuevamente la buena operación de los sedimentadores secundarios. Ello se afirma ya que logran sedimentar la mayor parte de las partículas de gran tamaño ($>40\ \mu\text{m}$) y se generan efluentes de buena calidad para la desinfección con luz UV.

Estos resultados podrían indicar que el tamaño de partícula de los tres efluentes **no es una limitante** en la eficacia de desinfección ya que la mayoría de partículas presentes tienen un tamaño $<40\ \mu\text{m}$ y aunque existen partículas mayores que $40\ \mu\text{m}$, éstas son muy pocas. Para poder confirmar esta hipótesis es necesario realizar las pruebas de inactivación.

4.1.2 Pruebas de desinfección de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* en tres efluentes secundarios

Actualmente, la mayor parte de literatura disponible en torno de la desinfección con luz UV se enfoca a la inactivación de indicadores de contaminación (coliformes fecales y enterococos fecales) y *E. coli* (Lazarova *et al.*, 1998; Sommer *et al.*, 1998). Son muy pocos los estudios sobre la inactivación de *Salmonella typhi* y de protozoos, cuya presencia en el agua residual de países en desarrollo es común. Por ello, a parte de usar indicadores convencionales en este trabajo, se evaluó la eficacia de desinfección de la luz ultravioleta en términos de la bacteria patógena *Salmonella typhi* (en esta sección) y de ameba *Acanthamoeba* spp. en la sección 3.4 por ser un ensayo con una metodología diferente.

La radiación de las muestras de los tres efluentes se realizó con el equipo de luz colimada descrito en la sección 2.4.1. La intensidad irradiada fue aproximadamente constante, del orden de 0.20 a $0.25\ \text{mW}/\text{cm}^2$, por lo que al variar el tiempo de exposición fue posible cubrir un intervalo de dosis entre 5 - $120\ \text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ con base en lo reportado en la literatura (Harris *et al.*, 1987; Trojan Engineering, 1994; Sommer *et al.*, 1995; Lazarova *et al.*, 1998; Sommer *et al.*, 1998; Lazarova *et al.*, 1999; Shin *et al.*, 2000; Jacangelo *et al.*, 2003). Para determinar la dosis por aplicar se calculó el tiempo de exposición a partir de la transmitancia promedio como se describe en la sección 2.4.1.1. Las dosis y tiempo usados para cada efluente se muestran en la Tabla 4.5.

A pesar de aplicar las mismas dosis en cada uno de los efluentes, los tiempos de radiación resultaron ser mayores cuando la transmitancia del efluente fue muy baja. Los mayores tiempos de radiación se obtuvieron para el efluente de lodos activados (con una transmitancia promedio de 55%). Además, con base en la distribución de tamaño de partícula de los efluentes era de esperarse una mayor demanda para este efluente que presentó la mayor cantidad y volumen de partículas con tamaño entre 10 y $40\ \mu\text{m}$ (2.7 % y 65% respectivamente).

Tabla 4.5 Tiempos de retención aplicados para las pruebas de desinfección

| Dosis (mW·s/cm ²) | Tiempo de retención (s) | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--|------------------------------------|
| | Lodos activados ^a | Contactores biológicos rotatorios ^b | Filtros rociadores ^c |
| 5 | 42 | 30 | 36 |
| 10 | 78 | 60 | 72 |
| 15 | 120 | 90 | 108 |
| 30 | 240 | 186 | 210 |
| 60 | 486 | 366 | 420 |
| 120 | 972 | 732 | 846 |

a. Transmitancia promedio de 55 %; b. Transmitancia promedio de 75 %; c. Transmitancia promedio de 64%

Los resultados de las cinéticas de desinfección se discuten en función de la comparación de la respuesta de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* a la luz UV irradiada a los tres efluentes secundarios, apoyada en la determinación de las constantes de velocidad de cada microorganismo.

4.1.2.1 Respuesta de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* a la luz UV y cinética de inactivación

En esta sección se presentan las curvas de respuesta de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* para diferentes dosis de luz UV irradiada. También se analizan las cinéticas de inactivación para cada uno de los microorganismos en los tres efluentes secundarios.

4.1.2.2 Coliformes fecales

Las bacterias coliformes fecales se encontraron en concentraciones del orden de 10^6 UFC/100 mL en el efluente de lodos activados, contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores. Este grupo es considerado por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997) como el indicador de contaminación fecal, en la que se establece, al igual que la WHO (1989), una concentración máxima de coliformes fecales de 1000 NMP/100 mL cuando el agua residual sea usada para riego agrícola, práctica que es muy común en nuestro país. Las pruebas de radiación con luz UV mostraron que para cumplir con esta concentración es necesario aplicar dosis del orden de $15 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Con esta se logra reducir hasta en más de 3 unidades logarítmicas la concentración inicial (Figura 4.8).

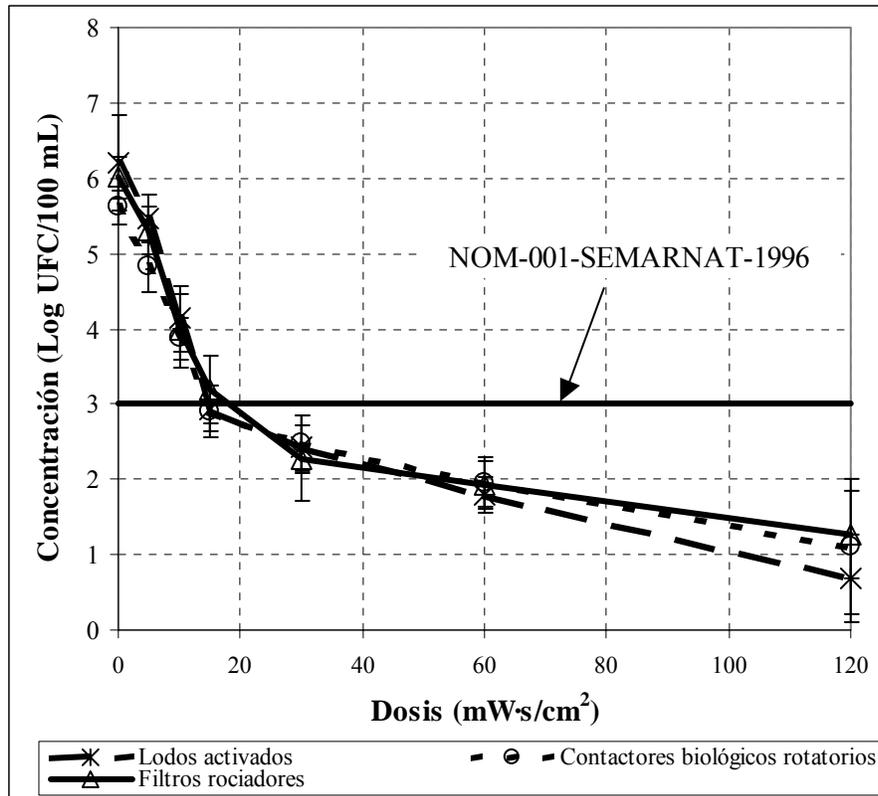


Figura 4.8 Curva de respuesta de coliformes fecales a diferentes dosis de luz UV en tres efluentes secundarios

No obstante, la concentración final de coliformes fecales que se logra al aplicar una dosis de 15 mW·s/cm², que osciló entre 200 y 7,000 UFC/100 mL, no cumple del todo con la normatividad ya que del total de las muestras, el 54% no cumple con los límites especificados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997). Por tal motivo, es recomendable aplicar para este tipo de efluentes una dosis mayor, por ejemplo, 30 mW·s/cm², con la cual se asegura la calidad y cumplimiento de la normatividad en la mayoría de los casos (91%, Figura 4.9).

Así mismo, como se discutirá más adelante, el efecto de la reactivación es un factor importante a considerar en la selección de la dosis óptima de desinfección.

La dosis de 30 mW·s/cm² es comparable con las reportadas en la literatura, del orden de 30-45 mW·s/cm² para inactivar coliformes fecales hasta en 3 unidades log (Lazarova *et al.*, 1999 y Jacangelo *et al.*, 2003). Asimismo, Trojan Technologies Inc. (1997) reportó que efluentes secundarios con concentraciones de sólidos suspendidos menores a 20 mg/L y valores de transmitancia alrededor de 65% requieren una dosis entre 20 y 30 mW·s/cm² para lograr una concentración de 200 coliformes fecales/100 mL.

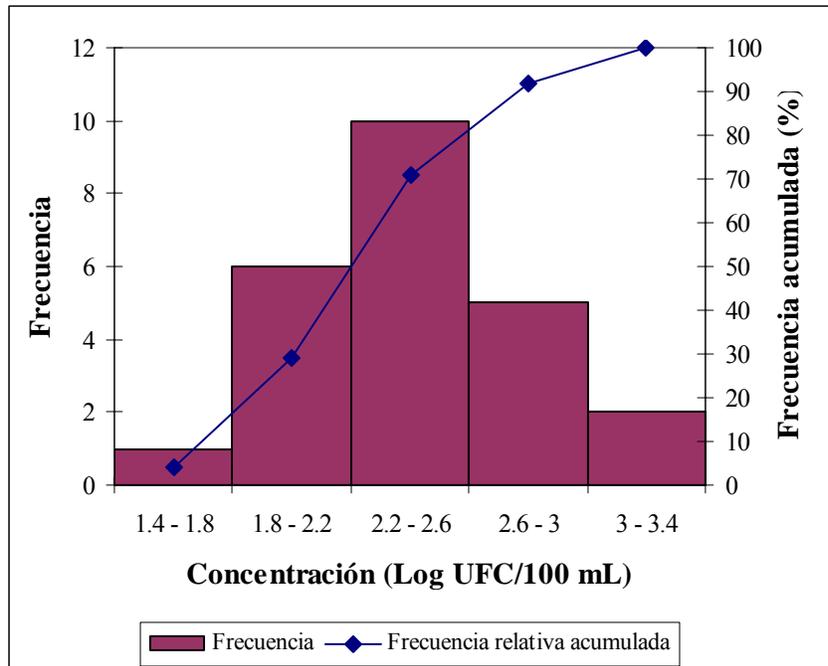


Figura 4.9 Distribución de frecuencia de la concentración de coliformes fecales al aplicar una dosis de luz UV de 30 mW·s/cm²

Para realizar un análisis detallado de la respuesta de las bacterias coliformes fecales a la luz UV, se analizó la cinética de desinfección. La inactivación de bacterias expuestas a luz UV ha sido descrita tradicionalmente por la expresión de primer orden (US EPA, 1986)

$$N = N_0 e^{(-kt)} \tag{Ec. 4.1}$$

Donde

- N: Concentración de los microorganismos viables al tiempo t
- N₀ : Concentración de los microorganismos viables antes de la exposición
- t : Tiempo
- I: Intensidad promedio de la radiación, mW/cm²
- k: Constante de inactivación de primer orden, cm²/mW s

Como la dosis (D) es igual al producto de la intensidad y el tiempo (D = I x t), al reordenar la ecuación 3.1 queda:

$$\ln N/N_0 = -kD \tag{Ec. 4.2}$$

En una curva de inactivación, **D versus Ln N/N₀**, es posible diferenciar una porción lineal que se presenta generalmente al aplicar dosis bajas de luz UV (<60 mW·s/ cm²) y cuya pendiente es igual a la velocidad de inactivación. El modelo anterior, mejor conocido como la **Ley de Chick**, es una buena aproximación del comportamiento en esta etapa que se ha sido atribuida generalmente a la inactivación de bacterias en estado libre (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996; Ho *et al.*, 1998; Andreadakis *et al.*, 1999).

La Figura 4.10 muestra una comparación de las cinéticas de inactivación de las bacterias coliformes fecales en los tres efluentes secundarios. Tal como se observa, las curvas de inactivación presentan inicialmente una porción lineal, la cual se aprecia a dosis menores que 30 $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ seguida de un aplanamiento en las curvas. Ésta última se presenta a dosis altas y ha sido relacionado con el efecto de sombra u oclusión que producen las partículas a los microorganismos (Ho *et al.*, 1998; Andreadakis *et al.*, 1999, Emerick *et al.*, 2000; Dietrich *et al.*, 2003). Debido a que este aspecto también es determinante en la eficacia de desinfección, se trata con mayor profundidad en la sección 3.3.

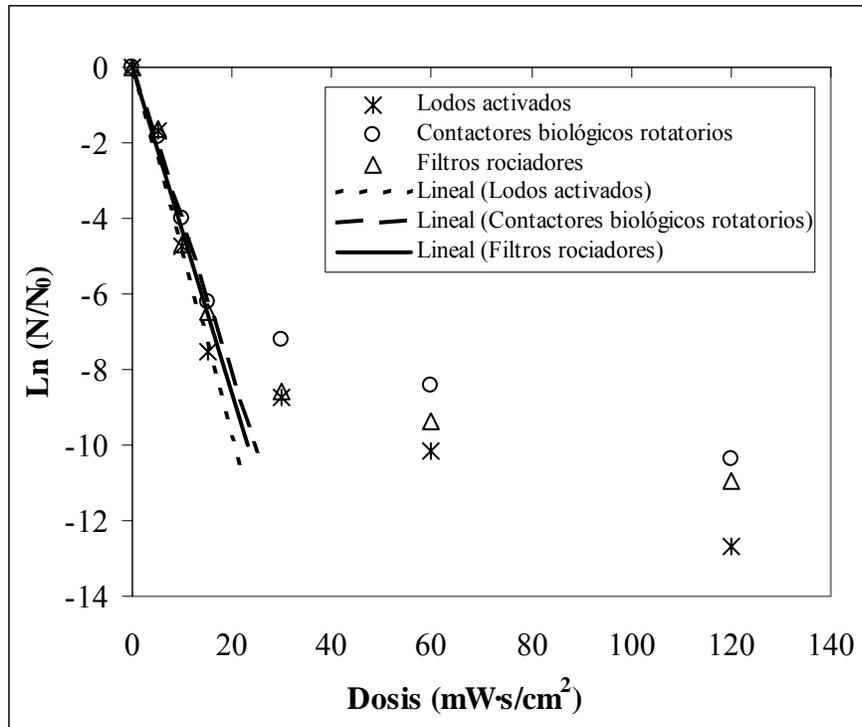


Figura 4.10 Cinética de inactivación de coliformes fecales en los tres efluentes secundarios

Para eliminar los efectos de las partículas, el análisis de la cinética de inactivación de acuerdo con la ley de Chick se realizó exclusivamente con los datos de inactivación obtenidos con las dosis menores que $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Los valores de las constantes de inactivación, que no es más que la medida de la sensibilidad de las bacterias coliformes fecales a la radiación de luz UV se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Constantes de inactivación de coliformes fecales presentes en tres efluentes secundarios

| | k ($\text{cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) | R^2 |
|-----------------------------------|---|-------|
| Lodos activados | 0.48 | 0.98 |
| Contactores biológicos rotatorios | 0.41 | 0.99 |
| Filtros rociadores | 0.43 | 0.98 |

La similitud de las constantes de inactivación de las bacterias coliformes fecales (del orden de $0.4 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) en los tres efluentes secundarios muestran que el tipo de efluente no tiene un efecto significativo en la velocidad de inactivación de los microorganismos que se encuentran **en estado libre**. En la literatura se han reportado valores de las constantes de inactivación para *Escherichia coli* (bacteria que representa más del 90% de las coliformes fecales; Feachem *et al.*, 1983, Droste, 1997) entre 0.7 a $1.73 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$ (Severin y Suidan, 1985; *Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996; Morales, 1997). Por otro lado, Andreadakis *et al.* (1999) reportaron constantes de inactivación para coliformes fecales del orden de 0.107 a $0.325 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$ y Moreland *et al.* (1998) de $0.343 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$.

De acuerdo con la U.S. EPA, 1986; Scheible, 1987 y Andreadakis *et al.*, 1999, los valores de las constantes de inactivación son específicas para cada sitio de estudio ya que su valor depende tanto de la calidad del agua como de la intensidad irradiada en cada caso. Lo que indica que el cálculo de la constante de inactivación depende de las condiciones de operación del sistema de desinfección, por lo que no se puede hacer una comparación directa entre las constantes de inactivación. Sin embargo, estos datos son muy útiles cuando se desea hacer una determinación aproximada de las dosis o del tiempo de retención necesarios para alcanzar un nivel de inactivación deseado (Moreland *et al.*, 1998).

4.1.2.3 *Enterococos fecales*

Otro de los indicadores determinados en estas pruebas fueron los enterococos fecales. Este grupo indicador no está legislado por la normatividad mexicana, ello debido a que varias de las cepas presentes en este grupo parecen ser ubicuas y por lo tanto no se pudo distinguir de los verdaderos enterococos fecales con las técnicas de detección comunes (Metcalf y Eddy, 2003). Sin embargo, su estudio es de importancia debido a que ha demostrado ser más resistente que las bacterias coliformes fecales y *Escherichia coli* (Tree *et al.*, 2003), hecho que podría ser importante si se le considerase como un indicador alternativo de contaminación fecal.

Los resultados denotan una tendencia de inactivación muy similar a la de las bacterias coliformes fecales (Figura 4.11). Aunque en general, muestra una resistencia mayor a la desinfección comparada con la del primer grupo indicador. A dosis bajas ($<15 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$) se observa una mayor resistencia de los enterococos fecales a ser inactivados (fase lag), lográndose inactivar tan sólo 2 unidades comparado con las 3 unidades logarítmicas de las bacterias coliformes fecales. Este comportamiento puede tener varias explicaciones que han sido reportadas también en la literatura.

Este comportamiento en los enterococos fecales ha sido atribuido a una cinética denominada de sitios múltiples (Severin *et al.*, 1983; Chang *et al.*, 1985). En este tipo de cinética se supone que los microorganismos tienen un número finito de sitios, cada uno de los cuales deben ser irradiados e inactivados antes de alcanzar la inactivación total del microorganismo (Severin *et al.*, 1983). Este mismo comportamiento es definido por la *Task Force on Wastewater Disinfection* (1996) como la absorción de una dosis “sub-letal” de radiación, la cual no produce inactivación que pueda ser registrada por medio de las técnicas analíticas empleadas para cuantificar la viabilidad de los microorganismos, hasta que se logra la dosis letal.

Por otro lado, la fase lag puede ser explicada también con base en la característica de estas bacterias para formar agregados. Los cocos generalmente se disponen en forma de cadenas o racimos (Figura 4.12). Esta formación puede conferir una “protección” a los microorganismos que se encuentran en el interior de la estructura formada lo que se refleja en la cinética de desinfección. Pues tal y como ya se ha mencionado, los microorganismos libres son los primeros en ser inactivados al entrar en contacto con la luz UV.

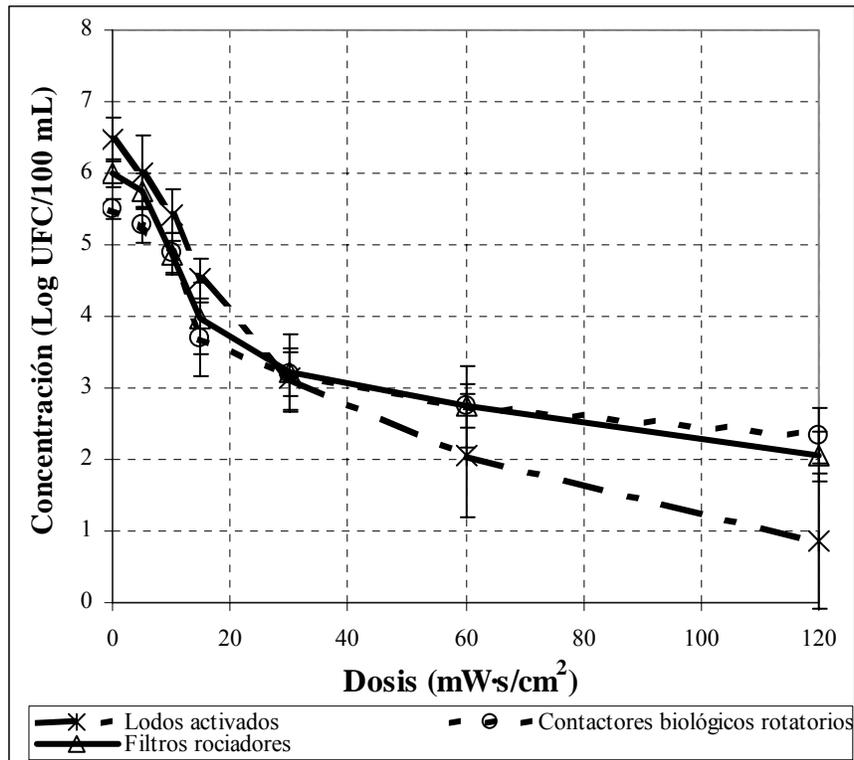
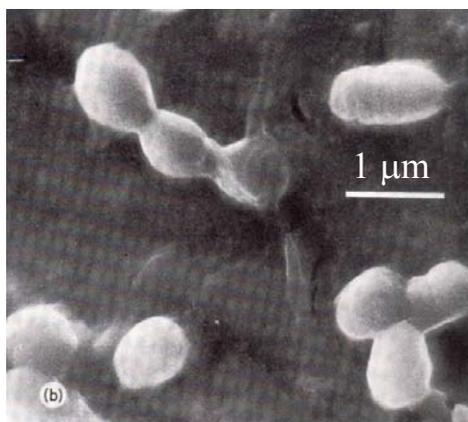


Figura 4.11 Curva de respuesta de enterococos fecales a diferentes dosis de luz UV en tres efluentes secundarios



Fuente: Feachem *et al.*, 1983

Figura 4.12 Micrografía de *Streptococcus faecalis*

La concentración de enterococos fecales se logra disminuir en 5 unidades logarítmicas, pero a pesar de aplicar dosis del orden de $120 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ no se les logra inactivar en su totalidad. Por tal motivo, y con base en los resultados de este trabajo, se debe resaltar la importancia de los enterococos fecales como grupo indicador, ya que resultó ser más resistente a la inactivación con luz UV que las bacterias coliformes fecales.

La determinación de las constantes de inactivación para enterococos fecales se realizó de igual manera que para las bacterias coliformes fecales, al aplicar el modelo de Chick en la región lineal de la curva de la cinética de inactivación, a dosis menores que $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ (Figura 4.13). Los valores de las constantes de inactivación de enterococos fecales se presentan en la Tabla 4.7.

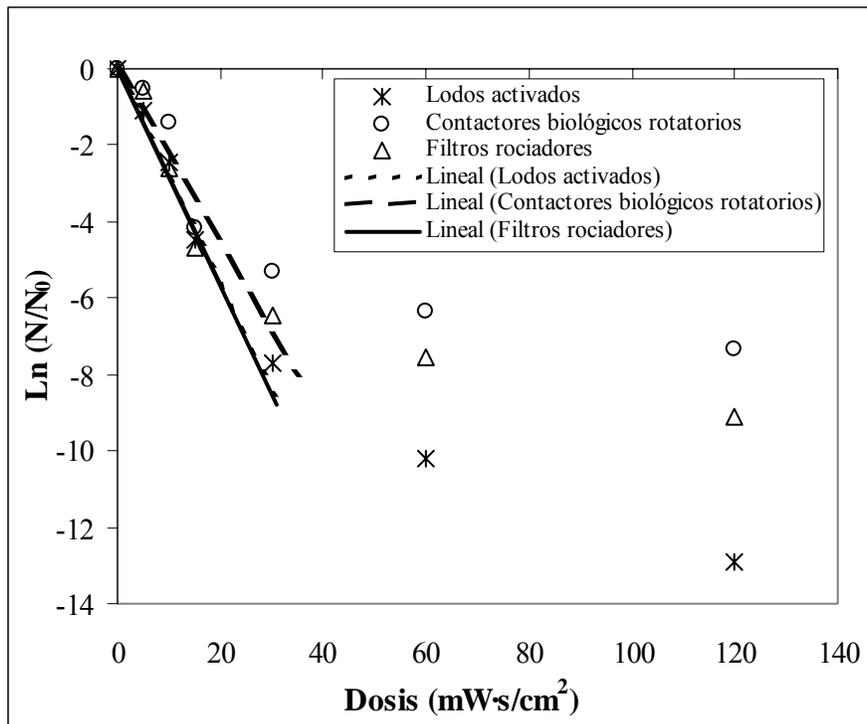


Figura 4.13 Cinética de inactivación de enterococos fecales en tres efluentes secundarios

Tabla 4.7 Constante de inactivación de enterococos fecales presentes en tres efluentes secundarios

| | k ($\text{cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) | R^2 |
|-----------------------------------|---|-------|
| Lodos activados | 0.28 | 0.96 |
| Contactores biológicos rotatorios | 0.23 | 0.82 |
| Filtros rociadores | 0.28 | 0.92 |

Las constantes de inactivación, del orden de $0.2 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$, no presentan variación significativa entre ellas, aún cuando se consideraron tres efluentes secundarios con principio de operación

diferente. Los valores reportados en la literatura para *Streptococcus faecalis* son del orden de 0.52 cm²/mW·s (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996), de 0.278 cm²/mW·s (Moreland *et al.*, 1998) y de 0.29 cm²/mW·s (Morales, 1997), éstos últimos valores muy similares a los obtenidos en este trabajo.

4.1.2.4 *Salmonella typhi*

La bacteria *Salmonella typhi* fue encontrada en los tres efluentes secundarios en concentraciones del orden de 10⁴ UFC/100 mL, valores que superan por mucho la concentración reportada para *Salmonella* spp. por los pocos trabajos encontrados en la literatura en torno a desinfección con luz UV (Tabla 4.8). Los valores reportados en el trabajo de Jiménez *et al.* (1999) se refieren a efluentes de un tratamiento primario avanzado aplicado a agua residual de la Ciudad de México. Motivo por el cual la concentración de *Salmonella* es similar la reportada en este trabajo. Los resultados de las pruebas de radiación muestran que 15 mW·s/cm² es una dosis suficiente para reducir la concentración de *Salmonella typhi* de entre 4-5 a 1-2 unidades logarítmicas (Figura 4.14). Con lo cual se logran concentraciones menores que la mínima requerida para causar infección en el ser humano que es de 10³ a 10⁷ organismos (Baron, 1997).

Tabla 4.8 Concentración de *Salmonella* spp. reportada en estudios de desinfección con luz UV

| Referencia | Concentración | Origen |
|-------------------------------|----------------------------|--|
| Zukovs <i>et al.</i> , 1986 | 13 NMP/100 mL | NE |
| Carnimeo <i>et al.</i> , 1994 | 192 UFC/100 mL | Efluente secundario |
| Shaban <i>et al.</i> , 1997 | 6.4 x 10 ² | Agua residual cruda |
| Baron, 1997 | 58 org/L | Efluente secundario |
| Lainé <i>et al.</i> , 1998 | 6.8 /L | NE |
| Jiménez <i>et al.</i> , 1999 | 1.9 x 10 ⁵ | Efluente tratamiento primario avanzado |
| Este trabajo | 10 ⁴ UFC/100 mL | Efluentes biológicos secundarios |

NE: No especificado

A pesar de que *Salmonella typhi* es un organismo frecuentemente encontrado en agua residual típica de países en desarrollo, éste no se considera dentro de la normatividad y las bacterias coliformes fecales son el indicador de este tipo de bacterias patógenas. Más adelante (sección 3.1.2.6) se realiza una comparación entre las curvas de inactivación de coliformes fecales y *Salmonella typhi*.

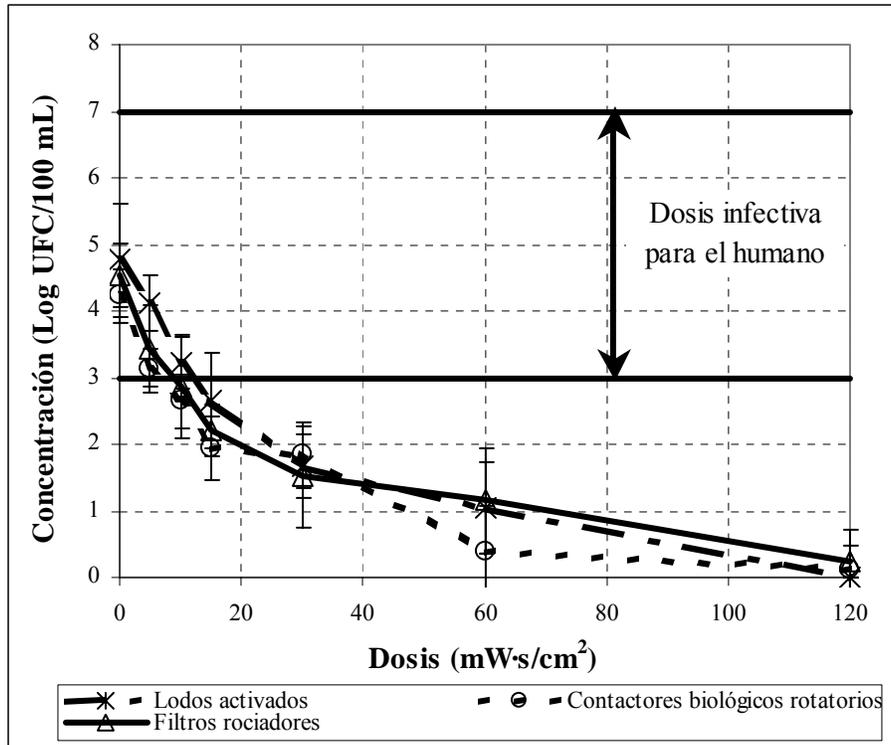


Figura 4.14 Curva de respuesta de *Salmonella typhi* a diferentes dosis de luz UV en tres efluentes secundarios

La determinación de las constantes de inactivación de *Salmonella typhi* se realizó por medio de la aplicación de la ecuación de Chick a los datos de inactivación obtenidos para las dosis menores que 30 mW·s/cm, que es donde se presenta la porción lineal de las curvas de inactivación (Figura 4.15). Los valores de las constantes de inactivación de *Salmonella typhi* así como los coeficientes de correlación se presenta en la Tabla 4.9. Los valores de las constantes de inactivación de *Salmonella typhi* son del orden de 0.3 cm²/mW·s no importando el tipo de efluente secundario. Las constantes de inactivación reportadas en la literatura oscilan entre 0.92 y 1.1 cm²/mW·s valores que son muy superiores a los encontrados en este trabajo (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996).

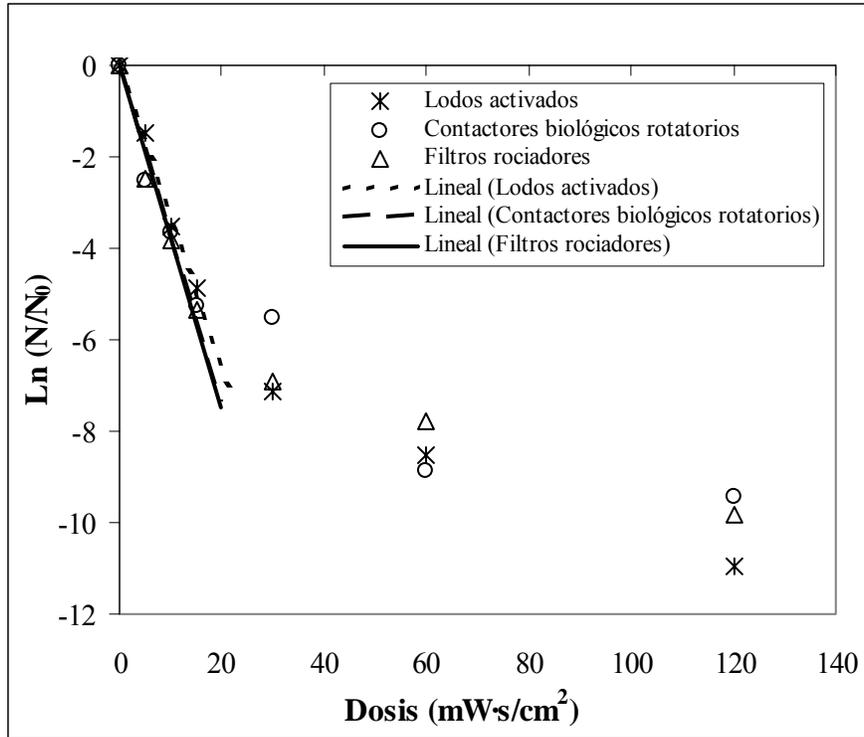


Figura 4.15 Cinética de inactivación de *Salmonella typhi* en tres efluentes secundarios

Tabla 4.9 Constante de inactivación de *Salmonella typhi* presente en tres efluentes secundarios

| | k (cm ² /mW·s) | R ² |
|-----------------------------------|------------------------------|----------------|
| Lodos activados | 0.33 | 0.98 |
| Contactores biológicos rotatorios | 0.37 | 0.96 |
| Filtros rociadores | 0.37 | 0.96 |

4.1.2.5 Comparación de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi*

Una vez que se han analizado las curvas de inactivación de cada uno de los microorganismos en cuestión y comparado su comportamiento para cada tipo de efluente, en esta sección se analiza el comportamiento relativo de las curvas de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* para el efluente de lodos activados. Para los efluentes de contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores no se presenta dicha comparación pues es similar y no modifican la presente discusión. Las curvas de los otros efluentes se pueden encontrar en el anexo II.

En la Figura 4.16, en primer lugar se observa que la luz UV, en dosis desde 5 hasta 120 mW·s/cm² es eficiente para inactivar coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* hasta en 5 ordenes de magnitud. Si se toma como base de referencia la inactivación de coliformes

fecales, por ser el indicador de contaminación considerado dentro de la normatividad mexicana y además (y sólo para este análisis) por el momento se ignoran los mecanismos de reactivación, la dosis de luz UV efectiva para aplicar en un sistema de desinfección sería del orden de 15 mW·s/cm². Con esta dosis se cumple con el límite establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para coliformes fecales que es de 1000 NMP/100 mL y se logra reducir *Salmonella typhi* hasta concentraciones que no representan riesgo para la salud (10³ a 10⁷ organismos). Sin embargo, esta dosis no es muy efectiva para inactivar enterococos fecales pues tal como se mencionó en la sección 4.1.2.3., a dosis bajas (<30 mW·s/cm²), la inactivación de enterococos fecales presentó una fase lag. Este hecho corrobora la resistencia de dicho indicador al compararlo con lo coliformes fecales, por lo que se recomienda llevar a cabo estudios en los que se compare y evalúe la factibilidad de su uso como un indicador de contaminación fecal y su inclusión en la normatividad mexicana.

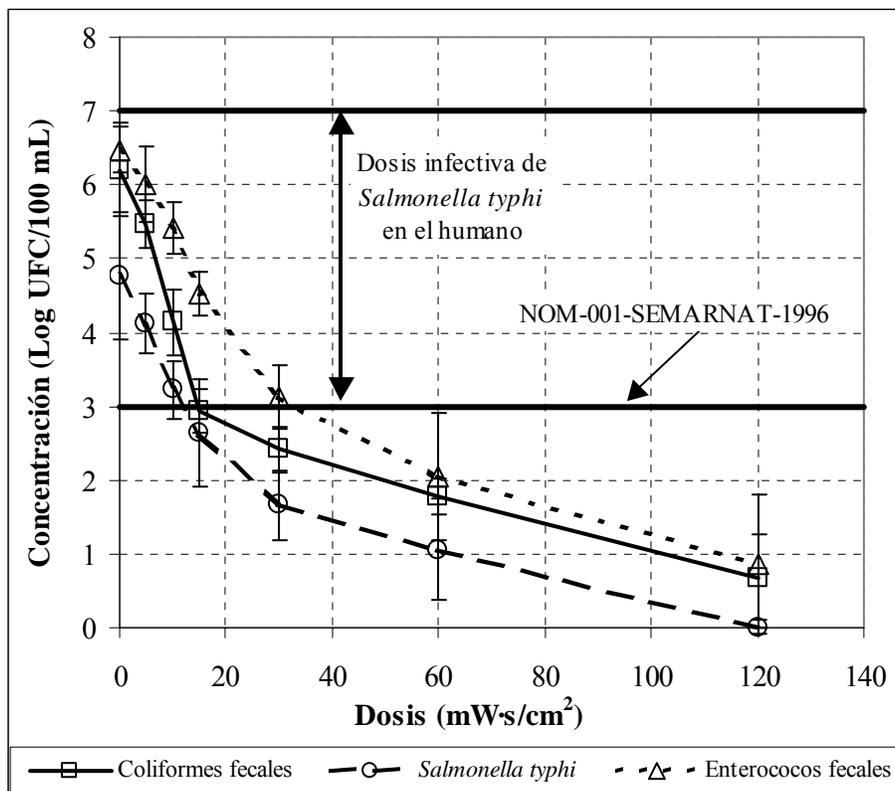


Figura 4.16 Cinética de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* en un efluente de lodos activados

4.1.2.6 Comparación del comportamiento de coliformes fecales y *Salmonella typhi*

Tal como se mencionó anteriormente, las bacterias coliformes fecales se pueden inactivar hasta concentraciones que cumplan la norma (<1000 NMP/100 mL) al aplicar una dosis de luz UV de 30 mW·s/cm². Y tal como se puede observar en la Figura 4.17 esta dosis es suficiente para inactivar *Salmonella typhi* presente en los efluentes secundarios hasta niveles que no representen

riesgo para la salud. Por ello, se corrobora que las bacterias coliformes fecales son un indicador de la contaminación por bacterias patógenas.

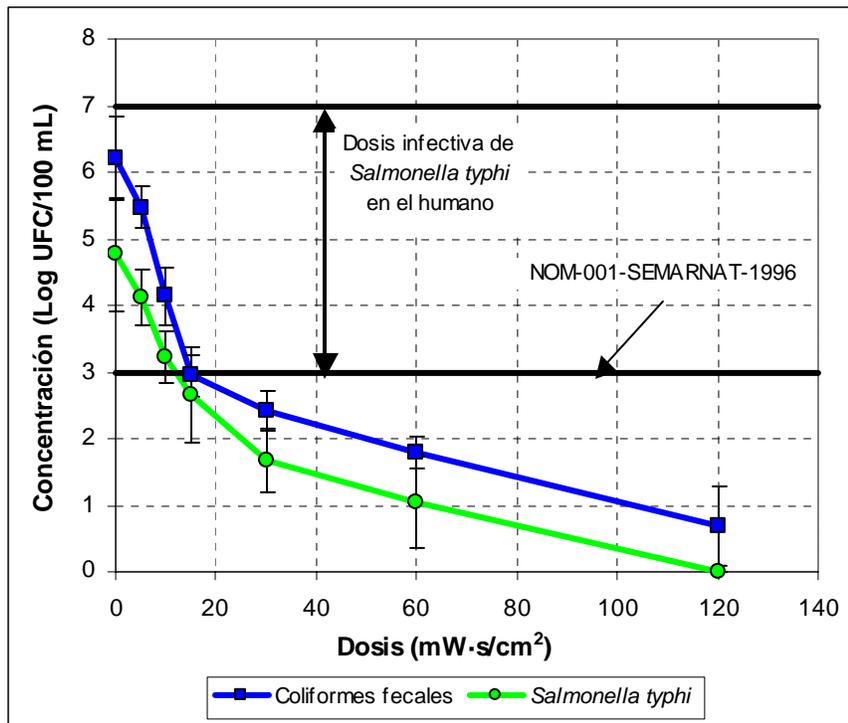


Figura 4.17 Comparación de la inactivación con luz UV de coliformes fecales y *Salmonella typhi* en un efluente de lodos activados

Para poder elegir una dosis de luz UV óptima para la desinfección es necesario considerar tanto el cumplimiento de la normatividad, la reducción de riesgos con respecto a dosis infectivas y la reactivación de los microorganismos. Por lo tanto, a pesar de que las curvas de desinfección son una base para determinar las dosis efectivas de desinfección, que en este caso resultó de 30 mW·s/cm², es necesario considerar los mecanismos de reactivación para elegir la dosis de luz UV adecuada. Por tal motivo, en la siguiente etapa (sección 4.2), se presentan los resultados de las pruebas de reactivación.

4.1.2.7 Comparación de las constantes de inactivación

En la Tabla 4.10 se presentan las constantes de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* para cada uno de los efluentes secundarios.

El análisis de los valores de las constantes de inactivación conduce a dos conclusiones.

1. Un sólo influente de agua residual con tres diferentes tratamientos secundarios (lodos activados, contactores biológicos rotatorios y filtros rociadores) produce efluentes cuya

calidad no tiene un efecto en la velocidad de inactivación de los microorganismos libres. La velocidad de inactivación de cada microorganismo evaluado al aplicar dosis menores que 30 mW s/cm^2 es del mismo orden en los tres tipos de efluente. Por tal motivo se puede concluir que cuando los microorganismos están libres y para el caso de la PTARCU, sin importar el tipo de tratamiento del efluente, la constantes de inactivación de coliformes fecales será $0.44 \pm 0.04 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$, de enterococos fecales $0.26 \pm 0.03 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$ y para *Salmonella typhi* $0.36 \pm 0.02 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$.

2. La sensibilidad de los microorganismos a la luz ultravioleta se da en el siguiente orden:

Coliformes fecales > *Salmonella typhi* > Enterococos fecales

Tabla 4.10 Valores de las constantes de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* en tres efluentes secundarios

| | k ($\text{cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) | | |
|-----------------------------------|--|---------------------|-------------------------|
| | Coliformes fecales | Enterococos fecales | <i>Salmonella typhi</i> |
| Lodos activados | 0.48 | 0.28 | 0.33 |
| Contactores biológicos rotatorios | 0.41 | 0.23 | 0.37 |
| Filtros rociadores | 0.43 | 0.28 | 0.37 |

Debido a que la constante de velocidad es un indicador de la sensibilidad de los microorganismos a la luz UV, sus valores dan una idea de ese aspecto. Las constantes de velocidad de las bacterias coliformes fecales fueron las mayores (del orden de $0.4 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) lo que indica una gran sensibilidad hacia la luz UV. Sin embargo, los enterococos fecales presentaron las constantes de inactivación más pequeñas, $0.26 \pm 0.03 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$, lo que indica su mayor resistencia comparada con los otros microorganismos evaluados.

Por lo tanto se pueden establecer las expresiones de la cinética de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* de acuerdo con la ley de Chick para los efluentes secundarios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU, como se muestra en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Expresiones de la cinética de inactivación con luz UV de coliformes fecales, enterococos fecales y *Salmonella typhi* en efluentes secundarios de la PTARCU

| Microorganismo | Cinética de inactivación |
|-------------------------|-----------------------------|
| Coliformes fecales | $\text{Ln } N/N_0 = -0.44D$ |
| Enterococos fecales | $\text{Ln } N/N_0 = -0.26D$ |
| <i>Salmonella typhi</i> | $\text{Ln } N/N_0 = -0.36D$ |

Cabe recalcar que estas expresiones sólo son representativas de la inactivación de los microorganismos libres ya que la inactivación de los microorganismos asociados con las partículas no se tomó en cuenta para la evaluación. En la sección 4.3 se lleva a cabo un análisis de la etapa de “cola” en las curvas de inactivación.

El conocimiento de la velocidad de inactivación de los microorganismos de interés es de gran utilidad cuando se desea diseñar un sistema de desinfección. En la práctica, el efecto de la dosis de luz UV en la velocidad de inactivación determinará la mejor combinación del tiempo de contacto y la intensidad de luz a irradiar.

4.2 Segunda etapa. Pruebas de reactivación

Una limitación del empleo de la luz ultravioleta para desinfectar aguas residuales es la ausencia de un efecto residual en el agua desinfectada. Aunado a esto, se sabe que la mayoría de los microorganismos tienen la capacidad de reparar los daños que en general sufre su ADN por condiciones hostiles y esto también ocurre con la exposición a la radiación UV (Lindenauer y Darby, 1994). El proceso de reparación más común es la **fotorreactivación**, la cual se realiza en presencia de luz con longitud de onda de 330 a 480 nm (Shaban *et al.*, 1997; Liltved y Landfald, 2000), por lo que no ocurre en ductos cerrados o cuerpos de agua profundos (Cairns, 1993). Este fenómeno obliga, en la práctica de desinfección, a determinar dosis de inactivación mayores a las que sólo producen los primeros efectos observados para asegurar que los microorganismos no se recuperen.

A continuación se presenta un análisis de las dosis que serían suficientes para evitar la reactivación de coliformes fecales y *Salmonella typhi*, en condiciones de luz solar y oscuridad. Para este estudio se usaron sólo coliformes fecales y *Salmonella typhi*, debido a que el primero es el indicador considerado en la legislación y la segunda por su importancia sanitaria para nuestro país. Debido a que la reactivación de los microorganismos no es función de las características físicas de los efluentes se usó exclusivamente el efluente de lodos activados. El tiempo de prueba después de la desinfección fue de 2 horas, pues este se considera un tiempo adecuado para la prueba (Harris *et al.*, 1987a; Kashimada *et al.*, 1996; Baron, 1997).

El grado de reactivación se obtuvo mediante la diferencia de la concentración logarítmica de los microorganismos antes de la reactivación ($\log N/N_0$) y después de la reactivación ($\log N_r/N_0$) tal como se describe en la sección 3.4 del capítulo de metodología experimental.

4.2.1 Reactivación de coliformes fecales

La reactivación de coliformes fecales para cada dosis de luz UV aplicada se probó en condiciones tanto de luz (fotorreactivación) como de oscuridad. La fotorreactivación de las bacterias coliformes fecales fue evidente en este estudio (Figura 4.18). Los resultados confirman lo ya expuesto por otros autores, que el grado de reactivación es menor conforme la dosis de luz UV sea mayor. De acuerdo con Lindenauer y Darby (1994), a bajas dosis, se produce un daño mínimo en la composición celular de los microorganismos, por lo que su sistema enzimático puede reparar rápidamente el daño. Sin embargo, cuando se aplican dosis elevadas el daño es mucho mayor y por ende la capacidad de reparación se ve minimizada. Lindenauer y Darby (1994), señalan que el efecto de la reactivación es insignificante para dosis entre 60 a 80 mW/s/cm², lo cual se corroboró con los resultados de este estudio.

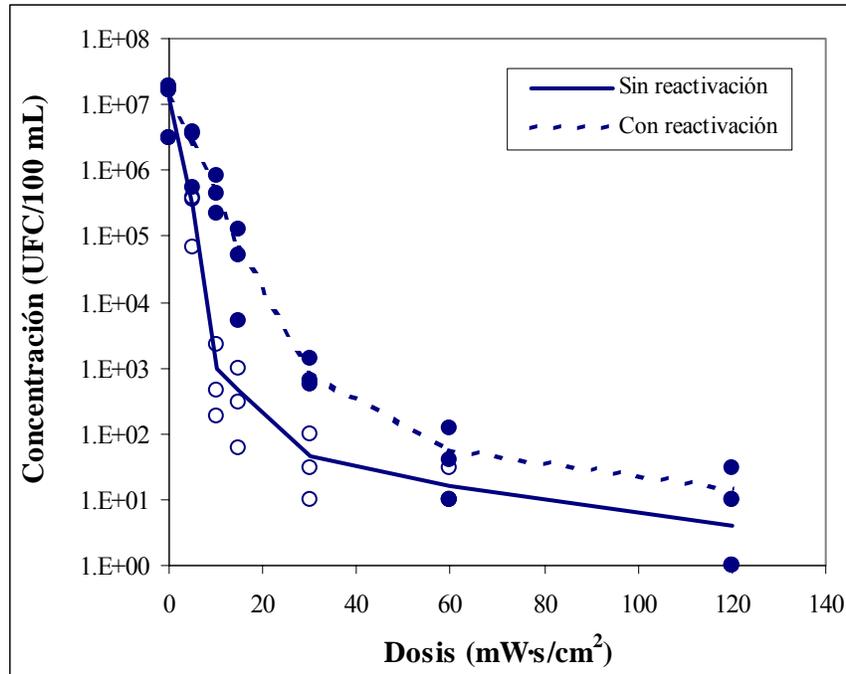


Figura 4.18 Reactivación de coliformes fecales después de 2 h en condiciones de luz solar

El máximo grado de reactivación fue de 2.88 log cuando se aplicó una dosis de 10 mW·s/cm². Mientras que al aplicar dosis mayores que 60 mW·s/cm² la reactivación no llega a ser ni siquiera de 1 unidad log. En la Tabla 4.12 se presenta el grado de reactivación de las bacterias coliformes fecales después de exponer la muestra desinfectada a la luz solar.

Tabla 4.12 Reactivación de coliformes fecales en condiciones de luz

| Dosis (mW·s/cm ²) | n | Log N/N ₀ | Log Nr/N ₀ | Reactivación (Log) |
|-------------------------------|---|----------------------|-----------------------|--------------------|
| 0 | 3 | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) |
| 5 | 3 | -1.66 (0.05) | -0.71 (0.05) | 0.95 (0.07) |
| 10 | 3 | -4.24 (0.68) | -1.35 (0.24) | 2.88 (0.45) |
| 15 | 3 | -4.57 (0.81) | -2.49 (0.96) | 2.09 (0.15) |
| 30 | 3 | -5.50 (0.30) | -4.10 (0.36) | 1.40 (0.30) |
| 60 | 3 | -5.83 (0.40) | -5.43 (0.74) | 0.40 (0.35) |
| 120 | 3 | -6.66 (0.48) | -6.17 (0.39) | 0.49 (0.85) |

El error estándar está dado entre paréntesis; n: Número de observaciones; NA: No aplica

Estos resultados llevan a sugerir que para lograr los menores grados de recrecimiento se tendrían que aplicar dosis de luz UV mayores que 60 mW·s/cm², lo que además aseguraría el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997) en cuanto a la concentración máxima permisible de coliformes fecales (1000 NMP/100 mL).

Carnimeo *et al.* (1994) y Baron (1997) reportaron una reactivación menor que 1 unidad logarítmica cuando se aplicaron dosis de luz UV entre 60-90 mW·s/cm² en condiciones de luz, lo cual es comparable con los resultados obtenidos en este trabajo.

Por otro lado, las pruebas de reactivación realizadas en ausencia de luz, mostraron que los mecanismos de reparación en oscuridad **no son** favorecidos en este tipo de microorganismos, aún cuando se aplicaron dosis bajas de luz UV (Figura 4.19). El grado máximo de reactivación que se alcanzó en condiciones de oscuridad fue menor a una unidad (0.34 log) cuando se aplicó una dosis de 60 mW·s/cm² (Tabla 4.13). Pero, en general, aún en el amplio intervalo de dosis aplicado (5-120 mW·s/cm²), la reactivación es menor a la unidad logarítmica para coliformes fecales. Lo cual indica que el mantener un efluente desinfectado alejado de la luz, pueden evitarse los mecanismos de reparación y por lo tanto no sería necesario aplicar dosis de luz UV elevadas. Sin embargo, las limitaciones en cuestión de infraestructura favorecen la exposición de los efluentes desinfectados a la luz solar y por lo tanto la necesidad de aumentar las dosis de luz UV irradiadas.

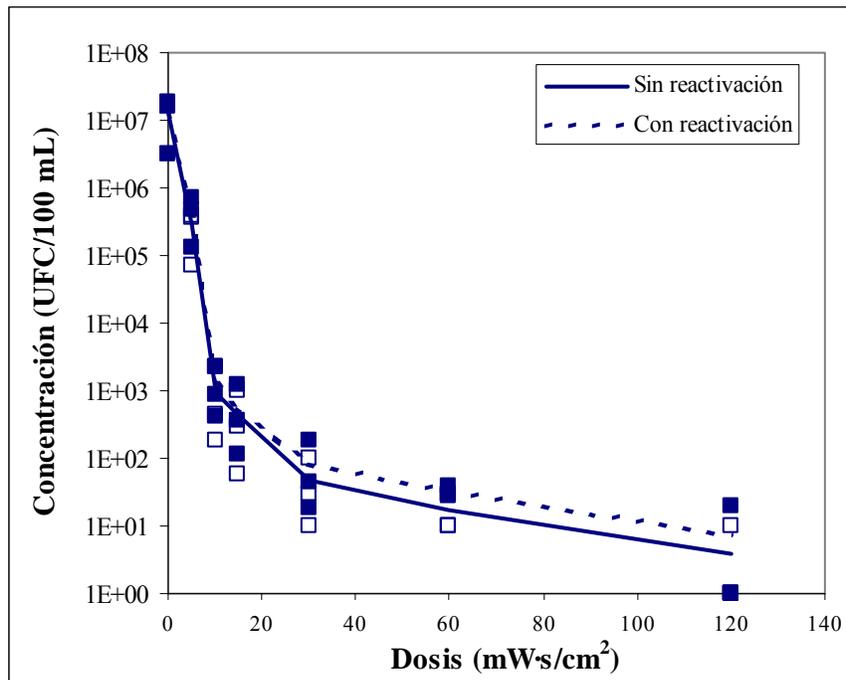


Figura 4.19 Reactivación de coliformes fecales después de 2 h en condiciones de oscuridad

Tabla 4.13 Reactivación de coliformes fecales en condiciones de oscuridad

| Dosis (mW·s/cm ²) | n | Log N/N ₀ | Log Nr/N ₀ | Reactivación (Log) |
|-------------------------------|---|----------------------|-----------------------|--------------------|
| 0 | 3 | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) |
| 5 | 3 | -1.66 (0.05) | -1.45 (0.14) | 0.21 (0.10) |
| 10 | 3 | -4.24 (0.68) | -4.01 (0.57) | 0.23 (0.19) |
| 15 | 3 | -4.57 (0.81) | -4.42 (0.69) | 0.15 (0.12) |
| 30 | 3 | -5.50 (0.30) | -5.27 (0.34) | 0.23 (0.05) |
| 60 | 3 | -5.83 (0.40) | -5.49 (0.37) | 0.34 (0.31) |
| 120 | 3 | -6.66 (0.48) | -6.56 (0.62) | 0.10 (0.17) |

El error estándar está dado entre paréntesis; n: Número de observaciones; NA: No aplica

4.2.2 Reactivación de *Salmonella typhi*

Al igual que para las bacterias coliformes fecales, la reactivación de *Salmonella typhi* fue evaluada tanto en condiciones de luz como de oscuridad al cabo de dos horas de su inactivación. Los resultados de reactivación de *Salmonella typhi* mostraron que este microorganismo tuvo menor capacidad para reactivarse en condiciones de luz que las bacterias coliformes fecales (Figura 4.20). El grado máximo de reactivación alcanzado fue de 1.9 log cuando se aplicó una dosis de 30 mW·s/cm² y aún con esta reactivación no se llega a los valores mínimos de su dosis infectiva (10³). Con dosis mayores que 60 mW·s/cm² no se observó reactivación (Tabla 4.14). Baron (1997) reportó que no existió reactivación de esta bacteria al aplicar dosis entre 40 y 60 mW·s/cm². Los resultados son comparables a los reportados por este estudio cuando se aplicaron dosis mayores que 60 mW·s/cm².

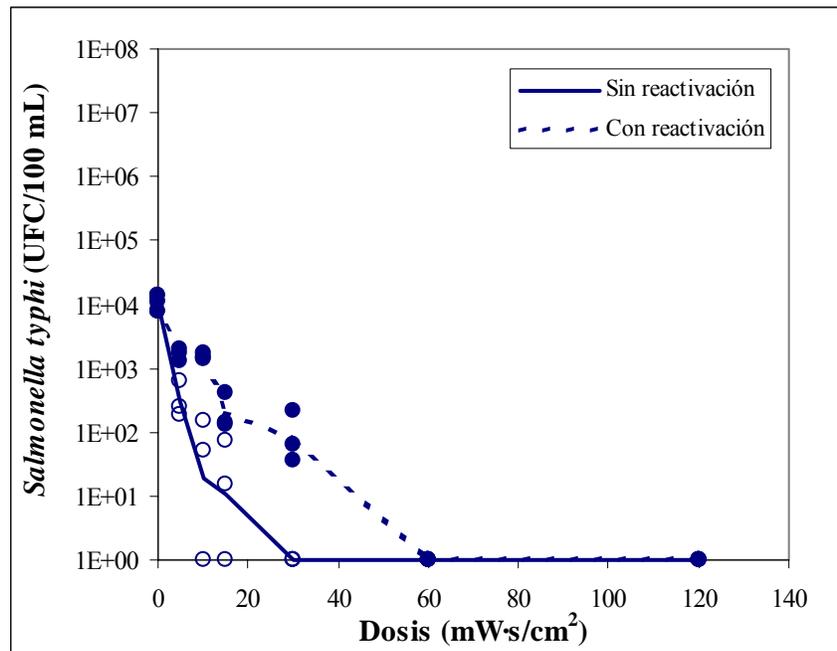


Figura 4.20 Reactivación de *Salmonella typhi* después de 2 h en condiciones de luz solar

Tabla 4.14 Reactivación de *Salmonella typhi* en condiciones de luz

| Dosis (mW·s/cm ²) | n | Log N/N ₀ | Log Nr/N ₀ | Reactivación (Log) |
|-------------------------------|---|----------------------|-----------------------|--------------------|
| 0 | 3 | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) |
| 5 | 3 | -1.54 (0.22) | -0.82 (0.22) | 0.73 (0.36) |
| 10 | 3 | -2.74 (1.13) | -0.85 (0.10) | 1.89 (1.11) |
| 15 | 3 | -3.02 (0.91) | -1.74 (0.39) | 1.28 (0.97) |
| 30 | 3 | -4.03 (0.12) | -2.13 (0.38) | 1.90 (0.41) |
| 60 | 3 | -4.03 (0.12) | -4.03 (0.12) | 0.00 (NA) |
| 120 | 3 | -4.03 (0.12) | -4.03 (0.12) | 0.00 (NA) |

El error estándar está dado entre paréntesis; n: Número de observaciones; NA: No aplica

Por otro lado, las pruebas de reactivación en condiciones de oscuridad mostraron que *Salmonella typhi*, al igual que las bacterias coliformes fecales, no tiene la capacidad de reparar el daño producido en su material genético en condiciones de oscuridad, aún cuando se aplicaron dosis bajas de luz UV (Figura 4.21). Los grados máximos de reactivación registrados fueron de tan sólo 0.1 unidad logarítmica cuando se aplicó la mínima dosis (5 mW·s/cm², Tabla 4.15).

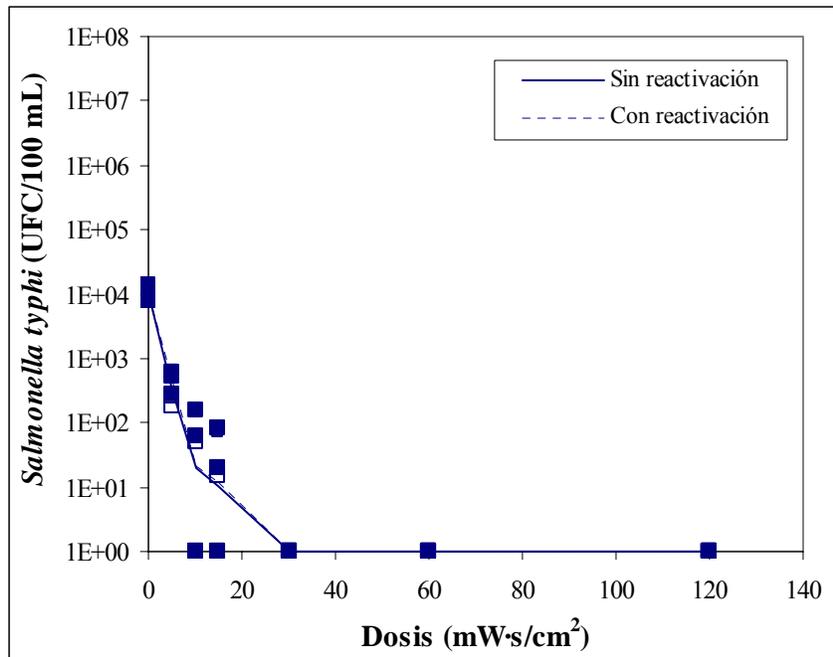


Figura 4.21 Reactivación de *Salmonella typhi* después de 2 h en condiciones de oscuridad

Tabla 4.15 Reactivación de *Salmonella typhi* en condiciones de oscuridad

| Dosis (mW·s/cm ²) | n | Log N/N ₀ | Log Nr/N ₀ | Reactivación (Log) |
|----------------------------------|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 3 | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) | 0.00 (NA) |
| 5 | 3 | -1.54 (0.22) | -1.38 (0.30) | 0.16 (0.46) |
| 10 | 3 | -2.74 (1.13) | -2.70 (1.16) | 0.04 (0.04) |
| 15 | 3 | -3.02 (0.91) | -2.96 (0.95) | 0.05 (0.06) |
| 30 | 3 | -4.03 (0.12) | -4.03 (0.12) | 0.00 (NA) |
| 60 | 3 | -4.03 (0.12) | -4.03 (0.12) | 0.00 (NA) |
| 120 | 3 | -4.03 (0.12) | -4.03 (0.12) | 0.00 (NA) |

El error estándar está dado entre paréntesis; n: Número de observaciones; NA: No aplica

Tomando como referencia los resultados de este trabajo y si se considera que:

- El grado de reactivación es menor conforme mayor es la dosis de luz UV aplicada,
- Los sistemas de reparación en la oscuridad no influyen considerablemente en el grado de reactivación

Entonces, es recomendable desinfectar el agua residual con dosis de luz UV, que además de ser suficientes para cumplir con normatividad, eviten la reparación de los microorganismos, asunto, que pondría en riesgo la salud de las personas que están en contacto con ella. Desde el punto de vista operativo, este aspecto implica la introducción de una mayor cantidad de equipo (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996), por lo que es necesario que los ingenieros que diseñan y operan los sistemas de desinfección tomen en cuenta este aspecto.

Para el caso específico de este trabajo es recomendable aplicar una dosis de luz UV del orden de **60 mW·s/cm²**, la cual asegura por un lado el cumplimiento de la legislación mexicana en cuanto a la concentración de coliformes fecales (1000 NMP/100 mL) en agua usada para riego agrícola y simultáneamente disminuye la concentración de *Salmonella typhi* por debajo de la dosis infectiva de esta bacteria para el humano.

Por último, con esta dosis se minimiza la reactivación, principalmente de coliformes fecales, por lo que se puede asegurar un agua residual que cumpla la norma mexicana. Aunado a la aplicación de esta dosis y en la medida de lo posible, es recomendable mantener el agua residual desinfectada en ductos cerrados, lo que evitaría la reparación de los microorganismos por fotorreactivación.

Cabe mencionar que el recrecimiento que se alcanza en condiciones controladas puede disminuir en condiciones naturales, esto debido a que en el ambiente los microorganismos se ven sometidos a una disminución abrupta de energía y los que sobreviven pueden sedimentarse o ser depredados por la fauna nativa del cuerpo de agua (Baron, 1997). Además, debido a que la técnica que se utiliza en el laboratorio para cuantificar el recrecimiento provee condiciones óptimas de energía, temperatura y luz, es difícil extrapolar los resultados obtenidos a nivel laboratorio, que algunas veces corresponden a los potenciales máximos de reparación (Carnimeo *et al.*, 1994; Baron, 1997). Los estudios de reactivación *in situ* demuestran la existencia de la fotorreactivación, que

resulta ser insignificante en cuerpos receptores de agua, debido a los procesos naturales de estrés, muerte y depredación (Whitby y Palmateer; 1993).

4.3 Tercera etapa. Efecto de la concentración de sólidos suspendidos en la concentración de bacterias asociadas a partículas

En la práctica, tal y como se ha observado en los resultados de este trabajo y que es considerado por varios autores (Emerick *et al.*, 1999; Loge *et al.*, 2002; Dietrich *et al.*, 2003), existen dos etapas en las curvas de inactivación. La primera ocurre por la inactivación rápida de los microorganismos con dosis menores de $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Etapa que se relaciona con los microorganismos que se encuentran libres y son fácilmente inactivados (Emerick *et al.*, 1999; Loge *et al.*, 2002; Dietrich *et al.*, 2003). La segunda etapa, denominada de “cola” o aplanamiento de la curva, tiene que ver con los microorganismos que se encuentran localizados dentro de partículas de sólidos y que no pueden ser inactivados ya que la luz UV no llega fácilmente a ellos. Por ello, es común observar cómo al inicio la eficacia aumenta y posteriormente a pesar de que se elevan las dosis la desinfección no mejora sustancialmente (Figura 4.22). Lo anterior, deriva en términos matemáticos en una desviación de los resultados respecto de una cinética de primer orden, que se observaría sólo si todos los microorganismos estuviesen en forma desagregada.

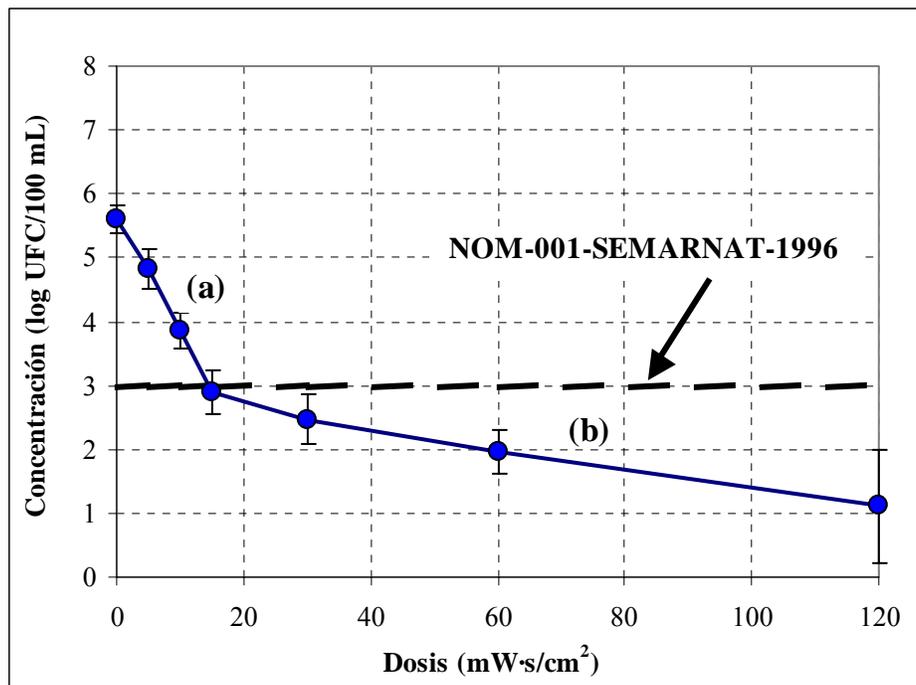


Figura 4.22 Curva de respuesta de inactivación de las bacterias coliformes fecales a diferentes dosis de luz UV en un efluente secundario. (a) Primera fase correspondiente a la cinética de primer orden y (b) Segunda fase, correspondiente a la inactivación de microorganismos contenidos en las partículas

En la realidad, de acuerdo con Loge *et al.* (1996), muchas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, operan en la región de “cola” debido a que en los efluentes se encuentran flóculos más que microorganismos libres. Por tal motivo es importante aceptar de antemano que la eficacia de desinfección no sólo estará asociada con la cantidad de microorganismos sino con las dosis necesarias para inactivar a aquellos que se encuentren contenidos dentro de flóculos. El método más sencillo para conocer la concentración de microorganismos asociados a partículas o N_p , como se conoce en la literatura correspondiente, consiste en una correlación matemática con los sólidos suspendidos. Como es de suponerse, el empleo de los sólidos suspendidos es de gran utilidad por ser un parámetro fácil de determinar en todo laboratorio por lo que dicha correlación es ampliamente usada (US EPA, 1986; Zukovs *et al.*, 1986; Darby *et al.*, 1995; Loge *et al.*, 1996).

Esta etapa tuvo como objeto desarrollar una herramienta matemática que usara un parámetro de fácil evaluación (como los sólidos suspendidos) y que ayudara a determinar *a priori* la cantidad de microorganismos que a pesar de aplicar dosis de luz UV elevadas, no podrían ser inactivados. Por lo que con ella se puede evaluar de forma predeterminada la factibilidad y viabilidad de aplicar un sistema de desinfección con luz UV a un efluente con calidad determinada.

Para este ensayo se empleó únicamente el efluente de lodos activados, debido a que es el que tuvo el número y tipo de partículas necesarios para este estudio. Las bacterias coliformes fecales fueron seleccionadas como microorganismos de estudio en esta etapa debido a que este grupo indicador es considerado en la normatividad y en este estudio demostró ser un buen indicador de la presencia de *Salmonella typhi*. Los resultados de la fase experimental y la correlación matemática resultante del análisis se presentan a continuación.

4.3.1 Efluente de lodos activados adicionado

Tal como se mencionó en la sección de metodología, las muestras del sedimentador del sistema de lodos activados, fueron adicionadas con diversos volúmenes del licor del reactor del mismo sistema, con el objeto de obtener muestras con concentraciones diferentes de sólidos suspendidos. Las concentraciones de sólidos suspendidos oscilaron en un amplio intervalo de valores, desde 5 hasta 100 mg/L, mientras que la concentración de coliformes fecales tuvo una variación mínima en este intervalo de concentraciones, entre 5.4×10^6 y 3.5×10^7 UFC/100 mL, lo que equivale a tan sólo un 11% de variación entre 5 y 100 mg/L de sólidos suspendidos (Figura 4.23).

Estos resultados indican que la adición del licor de lodos activados al efluente secundario, para lograr las diferentes concentraciones de sólidos suspendidos, no tiene un efecto significativo en el aumento de la concentración de coliformes fecales en las muestras, por lo que esta variable no tendrá interferencia en los resultados de las pruebas.

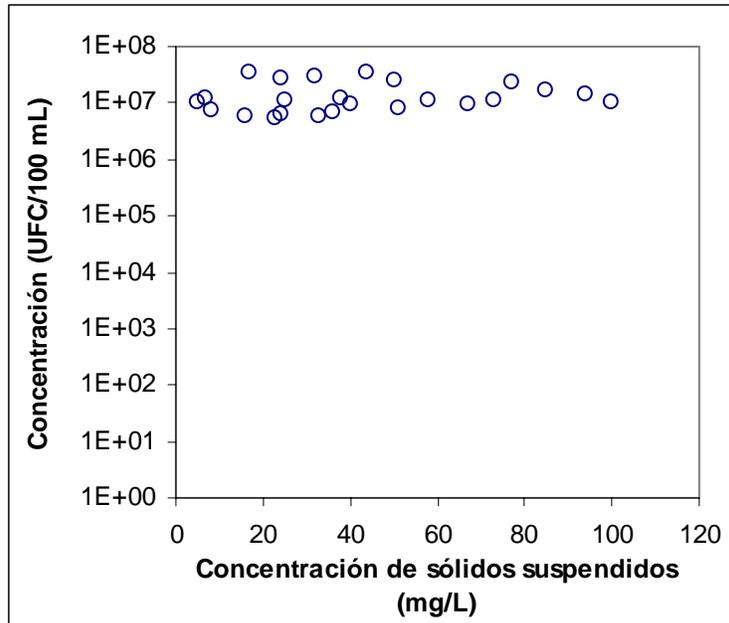


Figura 4.23 Concentración de coliformes fecales en muestras sintéticas con diferentes concentraciones de sólidos suspendidos

4.3.2 Desinfección del efluente secundario adicionado

Las muestras del efluente del sistema de lodos activados adicionadas con el licor del mismo sistema fueron sometidas a la desinfección con luz UV. Las dosis aplicadas fueron las usadas en las etapas anteriores (de 5 a 120 $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$). Para presentar los resultados se clasificaron las muestras por concentración de sólidos suspendidos en grupos de 0-15 mg/L, 15-30 mg/L, 30-45 mg/L, 45-60 mg/L y 60-100 mg/L. Los resultados se muestran en la Figura 4.24.

Los resultados dan pie a dos puntos de discusión. El primero es en torno de la primera fase de desinfección, la que corresponde a la cinética lineal y que se observa en la Figura 4.24. Dicha fase se observa hasta una dosis de 15 $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. A pesar de que la concentración de sólidos suspendidos varía de una curva a otra, éstas presentan pendientes muy similares (0.217 ± 0.04). Lo que indica que en ella se lleva a cabo la inactivación de microorganismos que se encuentran libres en el medio líquido y por tanto su inactivación no depende de la concentración de partículas presentes (Qualls *et al.*, 1985; Cairns *et al.*, 1995; Moreland *et al.*, 1998).

El segundo aspecto de la discusión tiene que ver con la segunda fase, o fase de “cola”. En la Figura 4.24 es claro el efecto que tiene una mayor concentración de sólidos suspendidos en la inactivación alcanzada con la misma dosis. Es evidente que los efluentes con concentraciones de sólidos suspendidos menores de 30 mg/L son mucho más fáciles de desinfectar que aquellos con concentraciones mayores que 30 mg/L (Solomon *et al.*, 1998). De hecho se observa un comportamiento muy similar en las curvas de inactivación de las muestras con más de 30 mg/L de sólidos suspendidos (de 30 mg/L hasta 100 mg/L).

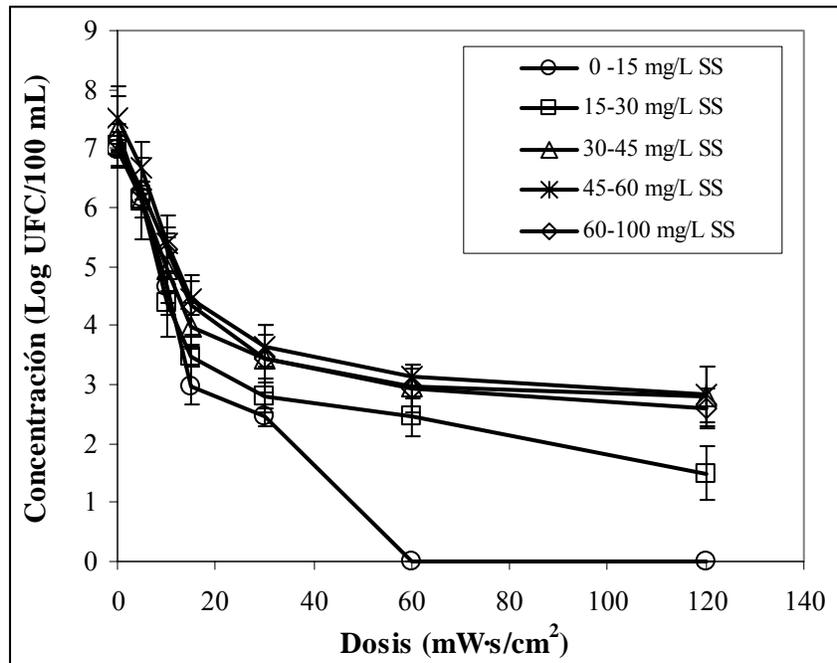


Figura 4.24 Efecto de la concentración de sólidos suspendidos en la inactivación de coliformes fecales

Para corroborar este comportamiento en las muestras con concentración de sólidos suspendidos mayores que 30 mg/L, se realizó un ajuste de los datos generados para la fase de “cola” (dosis entre 30 y 120 mW·s/cm²). Los datos fueron ajustados por medio de la ecuación de Chick, ya que esta etapa también tiene un comportamiento de primer orden. De acuerdo con Moreland *et al.*, 1998, la primera fase de las curvas se considera como la inactivación de los microorganismos libres y cuya constante de inactivación fue calculada anteriormente. Mientras que en la segunda fase se considera la inactivación de los microorganismos que están asociados a partículas por lo que la constante de inactivación determinada en esta etapa es influenciada por cantidad de partículas (Figura 4.25).

Los resultados de la constante de inactivación determinada por medio de la ecuación de Chick en la fase de “cola” de la curva de inactivación así como sus coeficientes de correlación se presentan en la Tabla 4.16.

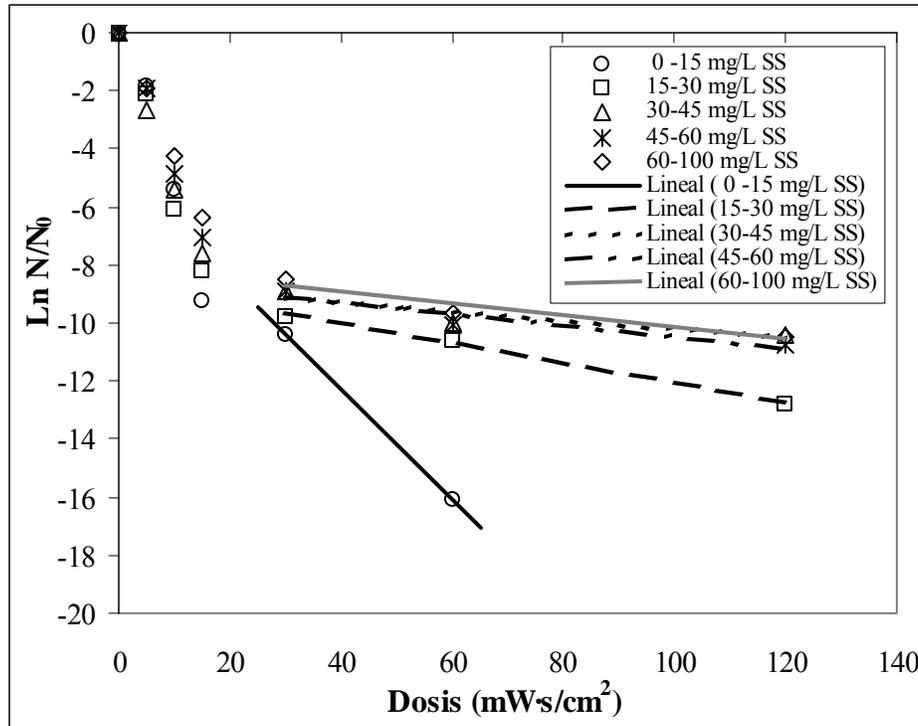


Figura 4.25 Cinética de inactivación de coliformes fecales presentes en un efluente de lodos activados con diferentes concentraciones de sólidos suspendidos

Tabla 4.16 Constante de inactivación de coliformes fecales en la fase de “cola” de la cinética de desinfección

| Intervalo de concentración de SST (mg/L) | k^*^a (cm ² /mW·s) | R ² |
|--|---------------------------------|----------------|
| 0-15 | 0.19 | 1.00 |
| 15-30 | 0.03 | 1.00 |
| 30-45 | 0.02 | 0.80 |
| 45-60 | 0.02 | 0.90 |
| 60-100 | 0.02 | 0.93 |

a. Constante de inactivación de coliformes fecales en la fase de “cola” de la curva de inactivación

El análisis de los coeficientes de inactivación obtenidos del ajuste de los datos de esta fase de “cola” demuestran que la velocidad de inactivación disminuye conforme la concentración de sólidos suspendido aumenta. La concentración de 30 mg/L representa un parte aguas en esta tendencia ya que en concentraciones menores a este valor, los coeficientes de inactivación varían considerablemente, de 0.19 a 0.03 cm²/mW·s, conforme aumenta la concentración de sólidos suspendidos. Sin embargo, cuando la concentración de sólidos suspendidos es mayor que 30 mg/L, los coeficientes de inactivación permanecen constantes (0.02 cm²/mW·s) a pesar de que la concentración de sólidos osciló en un intervalo de 30 hasta 100 mg/L. Estos resultados denotan

que cuando la concentración de sólidos suspendidos es mayor que 30 mg/L (no importa cuanto), la cinética de desinfección es similar.

Así, cuando la concentración de SS es mayor que 30 mg/L no existe una variación significativa en la concentración de coliformes fecales en la fase de “cola” a pesar de aplicar dosis de hasta $120 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Con base en el análisis de la Figura 4.24 se observa que la concentración de coliformes fecales protegidos por las partículas es de alrededor de 1000 UFC/100 mL. A pesar de que esta concentración representa alrededor del 0.01% de la población total de coliformes fecales presentes en el efluente adicionado, se convierte en un factor limitante cuando se requiere cumplir con la normatividad. Además, se debe recordar que aunque una partícula con bacterias se cuantifique como una unidad formadora de colonia (UFC), ésta puede contener más de un organismo. Esto corrobora la necesidad de contar con efluentes con concentración de sólidos suspendidos $< 30 \text{ mg}/\text{L}$ para poder lograr la eficacia de desinfección deseada a bajos costos de operación.

Actualmente, se le ha dado gran importancia al diseño de los sistemas de sedimentación secundaria ya que con un diseño apropiado se puede lograr efluentes con concentraciones de sólidos suspendidos de hasta 5 mg/L. Con lo que la filtración puede ser omitida. Sin embargo, cuando la concentración en sólidos suspendidos oscila en un intervalo muy amplio, es necesario la filtración para asegura la calidad del agua (Metcalf y Eddy, 2003).

4.3.3 *Determinación de la concentración de microorganismos asociados a partículas (N_p)*

De acuerdo con la US EPA (1986), los datos que se emplean en la determinación de N_p se tienen que generar al aplicar dosis muy elevadas ($> 100 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$), lo que parte de la premisa de que a dosis elevadas solamente aquellas bacterias que están inmersas en partículas sobrevivirán. Sin embargo, Loge *et al.* (1996) establecieron que a nivel laboratorio y pequeña escala, la fase de “cola” se puede presentar a partir de dosis del orden de entre 10 y $50 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, que es el caso que se presenta en este estudio. Por tal motivo, se decidió determinar la correlación entre N_p y SS con los resultados de una dosis intermedia. En este caso, $60 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ es una dosis cuya respuesta genera un aplanamiento en la curva de inactivación.

El valor de N_p se describe como una función de la concentración de sólidos suspendidos mediante la correlación del logaritmo de la concentración de las bacterias coliformes fecales y el logaritmo de la concentración de sólidos suspendidos (US EPA, 1986), tal como se presenta en la Figura 4.26).

La ecuación obtenida de la regresión lineal de los datos fue:

$$\text{Log } N_p = 2.42 \text{ Log SS} - 1.2 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

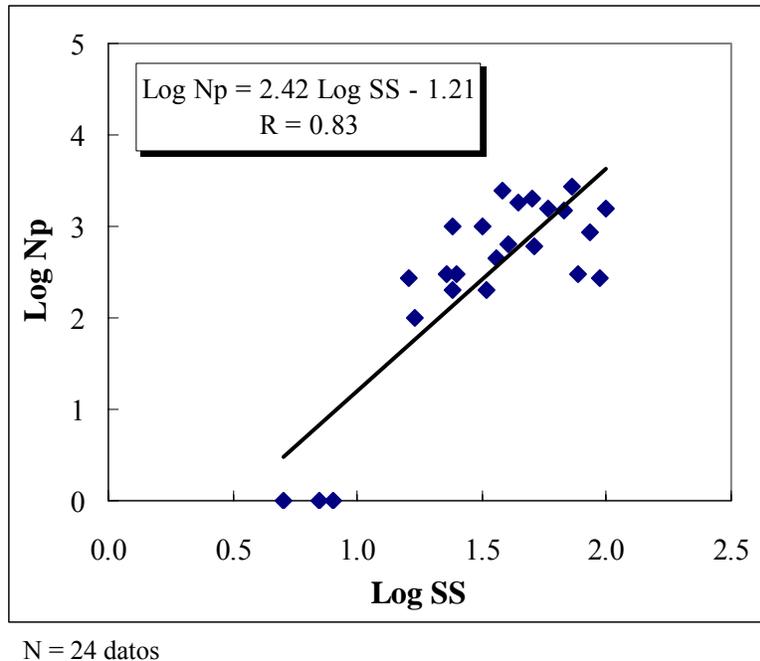


Figura 4.26 Concentración de coliformes fecales asociados a partículas en función de la concentración de la concentración de sólidos suspendidos

Con un coeficiente de correlación de 0.8, lo cual sugiere que la cantidad de microorganismos asociados a las partículas tiene una dependencia importante en la concentración de sólidos suspendidos. Cuando se transforma la ecuación 3.4 queda

$$N_p = 0.06 SS^{2.42} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

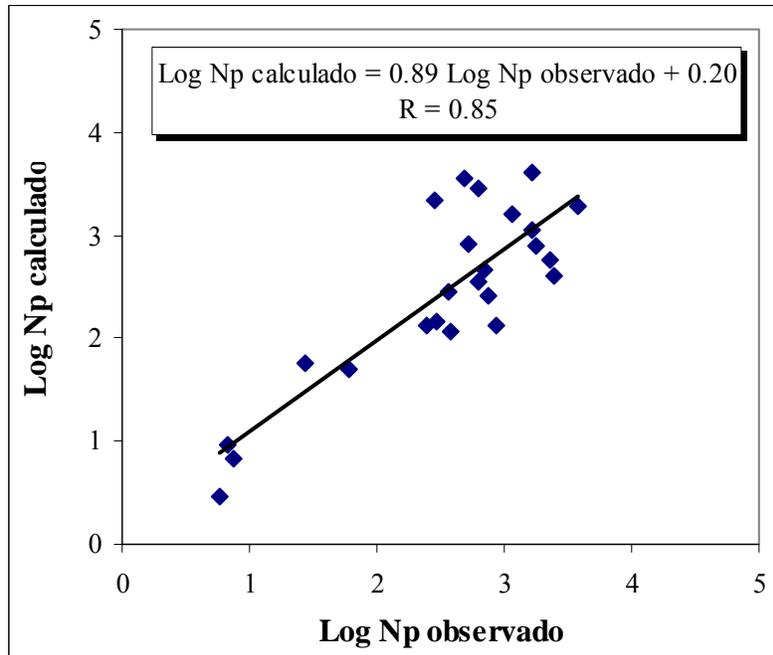
Los coeficientes obtenidos $c = 0.06$ y $m = 2.42$ son específicos para el efluente de lodos activados de la PTARCU.

Scheible (1987) reportó valores de $c = 0.26$ y $m = 1.96$ para una planta con un sistema de tratamiento de lodos activados, valores que difieren de los obtenidos en este trabajo, principalmente el del coeficiente c . El coeficiente de correlación obtenido en el trabajo de Scheible (1987) es muy bajo, muy probablemente debido a la diferencia en las características del agua residual que puede estar influyendo en la concentración de microorganismos presentes en la fase de “cola”. Sin embargo, el uso de estos valores se sugiere cuando no existen valores aplicables a cada sitio específico (US EPA, 1986).

4.3.4 Evaluación de la ecuación matemática para calcular N_p

Con el objeto de evaluar la ecuación y las constantes encontradas, se graficaron los valores experimentales de N_p y los valores calculados con la correlación (Figura 4.27). Los valores experimentales fueron un promedio de la concentración de coliformes fecales a dosis mayores que $15 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, que es a partir de la cual se empieza a presentar la fase de “cola”.

El coeficiente de correlación entre los valores de N_p observados y los calculados con la ecuación es de 0.85, por lo que se concluye que esta ecuación es confiable en la determinación teórica de N_p . Y que otros parámetros de la calidad del agua no tienen mayor influencia en N_p .



N = 24 datos

Figura 4.27 Correlación entre los valores observados y calculados de N_p

Al contar con esta herramienta, donde las constantes $c = 0.06$ y $m = 2.42$ son valores específicos para el efluente del sistema de lodos activados, es posible predecir la inactivación máxima de coliformes fecales que se alcanzará en función de la cantidad de partículas presentes (medida como sólidos suspendidos). Asimismo, se puede establecer la densidad bacteriana cuya inactivación no puede lograrse a pesar de aplicar dosis de luz UV elevadas y que por lo tanto convertiría al tratamiento en económicamente no viable. Finalmente, sirve como una herramienta para evaluar la calidad del efluente y determinar si es necesario contar con un sistema de filtración antes de aplicar la desinfección.

4.3.5 Correlación entre N_p y partículas mayores que $40 \mu\text{m}$ ($V_{>40 \mu\text{m}}$) en el efluente de lodos activados

La determinación de la correlación empírica entre N_p y SS resultó una herramienta confiable y de gran utilidad para determinar el número de microorganismos contenidos en las partículas. Pero, en este apartado se propone además otra correlación que pudiera también ser de utilidad para el mismo fin.

Puesto que la presencia de partículas grandes ($>40 \mu\text{m}$) en los efluentes es una limitante para la desinfección con luz UV (Qualls *et al.*, 1985) se llevó a cabo una correlación entre el volumen de

estas partículas en el efluente de lodos activados (variable independiente) y la concentración de microorganismos asociados con partículas (N_p , variable dependiente). El valor de la concentración de microorganismos asociados a las partículas se obtuvo a partir del promedio de la concentración de coliformes fecales obtenida en la fase de “cola” de las cinéticas de desinfección, es decir para dosis mayores de $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. La correlación matemática entre ambas variables resultó muy buena ($R = 0.93$, Figura 4.28).

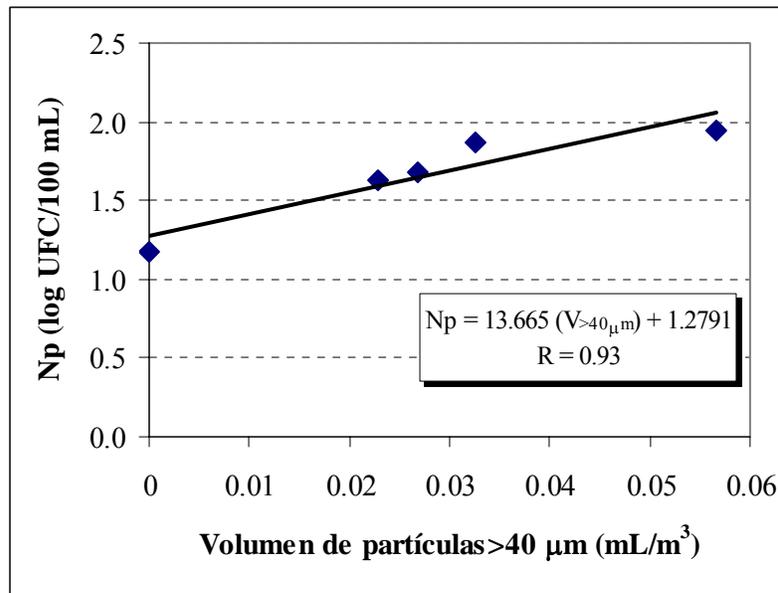


Figura 4.28 Correlación entre el volumen de partículas mayores que $40 \mu\text{m}$ de un efluente de lodos activados con la concentración de coliformes fecales inmersos en partículas

Los resultados indican que mientras exista un mayor volumen de partículas con diámetro que exceda las $40 \mu\text{m}$, la protección de los microorganismos a la luz UV será mayor, lo que se refleja de forma directa en cantidad de microorganismos que no son inactivados.

La correlaciones de N_p en función de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) y el volumen de partículas mayores que $40 \mu\text{m}$ ($V_{<40 \mu\text{m}}$) fueron buenas. Por lo que ambas pueden resultar herramientas de gran utilidad en la evaluación de la factibilidad de desinfección de un efluente con luz UV. La elección de cualquiera de las dos correlaciones dependerá de la disponibilidad de tecnología en el lugar de análisis.

4.4 Cuarta etapa. Inactivación de amibas anfitoicas patógenas

La presencia de amibas patógenas de alta peligrosidad como *Acanthamoeba* spp. en agua residual de nuestro país ha sido demostrada por Maya (2000) y Rojas (2004). La peligrosidad de estos microorganismos radica en su alta patogenicidad y capacidad de enquistarse, lo que le confiere

resistencia a los procesos convencionales de desinfección (Martínez, 1980; Martínez y Visvesvara, 1997; Marciano-Cabral *et al.*, 2000). Aunado a esto, el alto riesgo de infección debido al contacto de pobladores, agricultores y consumidores de cultivos regados con agua residual incrementa su importancia.

La luz UV ha demostrado ser un desinfectante efectivo para la inactivación de bacterias, virus y protozoarios. Estudios recientes han demostrado que con dosis bajas, hasta de $3 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, se pueden inactivar hasta 3 unidades log de *Cryptosporidium*, aspecto que representa una ventaja antes que otros desinfectantes.

Por tal motivo, el principal objetivo de esta etapa fue analizar el efecto de la luz UV en la inactivación de las amibas anfibóticas y compararlo con el efecto sobre las bacterias. Para realizarlo se eliminaron la mayor cantidad de interferencias en la desinfección por lo que el agua residual por emplear (efluente de lodos activados) fue filtrada y esterilizada (tal como se describe en la metodología). El agua residual filtrada y esterilizada fue adicionada con las amibas *Acanthamoeba culbertsoni* (cepa de referencia ATCC 30171 usada como control) y *Acanthamoeba* spp. (cepa aislada) en concentración de 1.6×10^4 trofozoítos/mL. A pesar de que la concentración de *Acanthamoeba* spp. empleada para las pruebas de radiación pareciera elevada, en la literatura se ha reportado la presencia de protozoarios tales como *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia* en concentraciones de 10^1 - 10^4 , 10^1 - 10^1 y 10^3 - 10^4 NMP/100 mL, respectivamente (Wiandt *et al.*, 1995; Metcalf y Eddy, 2003; Cacciò *et al.*, 2003) por lo que el valor parece aceptable. Las dosis de luz UV aplicadas oscilaron entre 5 y $170 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ de acuerdo con lo reportado en la literatura para la inactivación de protozoarios (Rice y Hoff, 1981; US EPA, 1999).

Los resultados mostraron que para lograr la inactivación total tanto de *Acanthamoeba* spp. Como de la cepa de control (*Acanthamoeba culbertsoni*) fue necesario aplicar dosis mayores que $173 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ (Figura 4.29).

Los tiempos de retención que se aplicaron en las pruebas a nivel laboratorio para lograr dichas dosis son demasiado largos (> 20 minutos), esto debido principalmente a dos razones: el tipo de equipo usado para la prueba y la transmitancia del agua residual. De acuerdo con Sakamoto y Cairns (1996) un equipo de luz colimada debe irradiar una intensidad constante de luz UV (alrededor de $0.250 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$), por lo que la única variable es el tiempo de retención. Si la transmitancia es baja, que en este caso osciló entre 30 % y 50 %, es necesario aumentar los tiempos de retención para lograr las dosis deseadas, motivo por el cual los tiempos de exposición de las muestras oscilaron entre 100 y 1200 segundos.

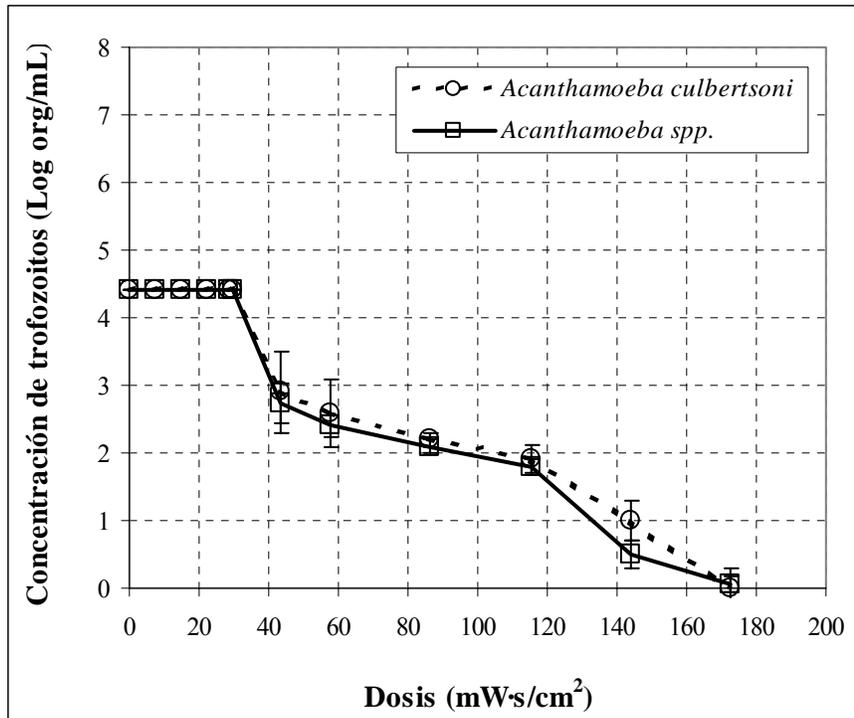


Figura 4.29 Inactivación de amibas anfitriónicas para diferentes dosis de luz UV

Las curvas de respuesta denotan la resistencia de las amibas a la desinfección con luz UV, principalmente a dosis menores de $40 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, con las cuales no se pudo registrar inactivación alguna. Pero al aumentar la dosis de luz UV a $40 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ se observa una repentina inactivación de las amibas (1.7 log), la cual se incrementa gradualmente con la dosis de luz UV hasta su total inactivación con una dosis de $170 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. La súbita inactivación se puede deber a que las dosis menores de $40 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ producen solamente un efecto “sub-lethal” es decir que las amibas tienen la capacidad de absorber dosis de esa magnitud sin que se les produzca daño, que puede ser cuantificado con la técnica analítica empleada (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). Sin embargo, una vez que las amibas han absorbido una dosis suficiente (por lo menos $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$), presentan una inactivación constante con respecto a la dosis de luz UV aplicada. Estos resultados son similares a los reportados por Chang *et al.* (1985), Wolfe (1990) y Aksozek *et al.* (2002), los cuales indican que para lograr la inactivación de 1 unidad log de *Acanthamoeba castellanii* (especie que se encuentra generalmente en la cornea del ojo humano) con luz UV es necesario aplicar aproximadamente $35 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Mientras que para reducir 3 unidades logarítmicas de su concentración inicial fue necesario aplicar dosis del orden de $100 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, lo cual resulta 14 veces mayor a la dosis necesaria para inactivar *E. coli* (Chang *et al.*, 1985).

Por otro lado, para determinar la velocidad de inactivación de las amibas, se aplicó la ley de Chick para los datos generados al aplicar dosis $\geq 40 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. En la Figura 4.30 se presenta la cinética de inactivación de *Acanthamoeba culbertsoni* y *Acanthamoeba spp.*

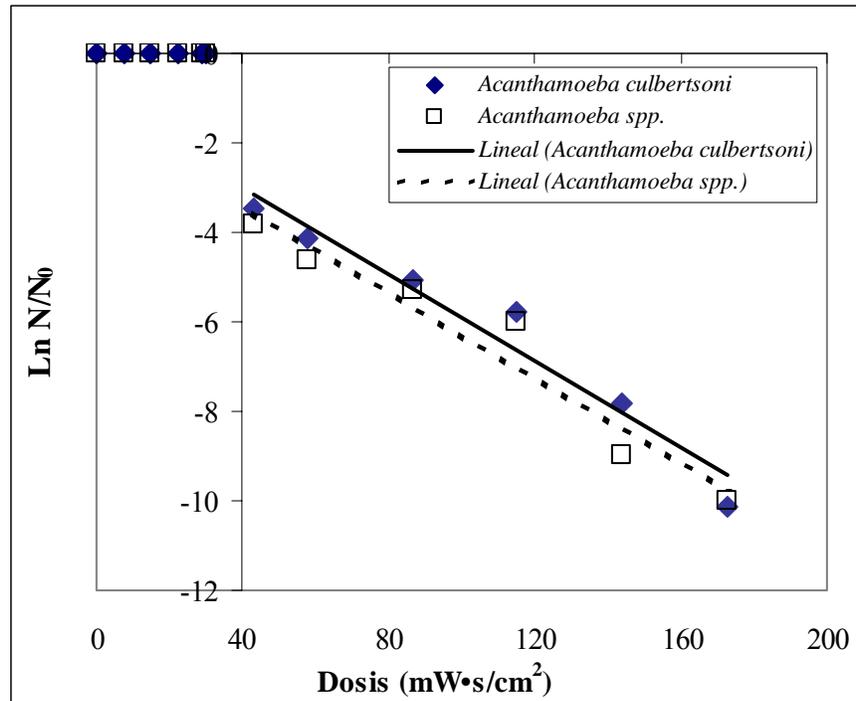
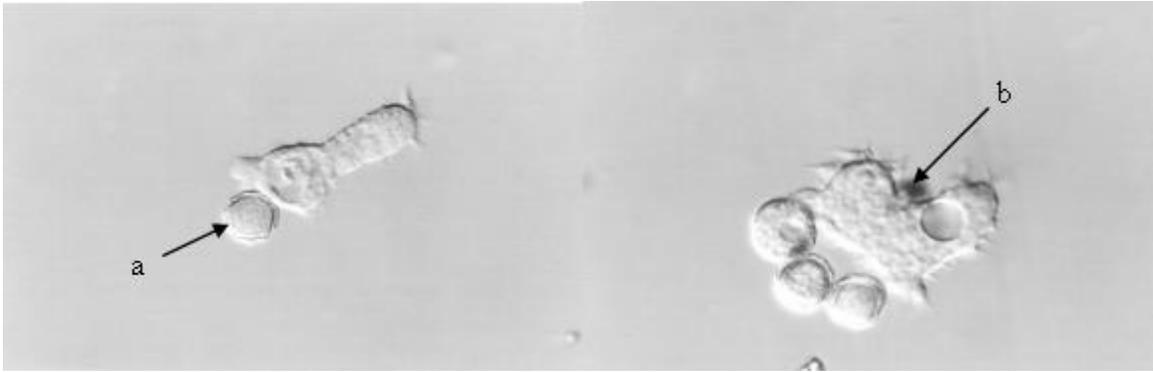


Figura 4.30 Cinética de inactivación de *Acanthamoeba culbertsoni* y *Acanthamoeba spp.*

La constante de velocidad de inactivación para ambas amibas determinada por medio de la ley de Chick fue de $0.05 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$ con coeficientes de correlación de 0.95. Este valor es bajo comparado con los reportados para bacterias que oscila desde 0.1 hasta $3 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$ dependiendo del género y especie (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996). No obstante, los valores son comparables con los reportados en la literatura para protozoarios como *Giardia muris* ($0.028 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) y *Acanthamoeba castellanii* ($0.066 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$) lo que indica la poca sensibilidad de protozoarios a la radiación con luz UV (*Task Force on Wastewater Disinfection*, 1996).

Esto puede deberse a la presencia de paredes en los quistes, que son secretadas como una especie de “armadura extracelular” cuya consistencia fosfoproteica (externa) y de celulosa (interna) les confiere opacidad y por lo tanto una limitada exposición del material genético a la luz UV (Fotografía 4.1(a)). En la foto (b) se observa la forma vegetativa de la amiba, también conocida como trofozoito. En este estado la amiba se caracteriza por la presencia de brazos (acantopodos) que se extienden alrededor de ella.



Fotografía 4.1 Quistes (a) y trofozoítos (b) de *Acanthamoeba* spp. (técnica Nomarski) 40 x 1 (fotografías tomadas con la colaboración del Dr. Mirek Macek, ENEP-Iztacala, UNAM)

4.4.1 Comparación de la inactivación de bacterias y amibas

En este apartado se compara la inactivación de bacterias y amibas con respecto a la radiación de luz UV. En la Figura 4.31 se presenta la comparación de la respuesta de bacterias y amibas a la radiación de luz UV en el efluente de lodos activados.

Para poder cuantificar la inactivación de las amibas fue necesario aplicar dosis mayores que $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, mientras que con esta misma dosis se lograron grados de inactivación para las bacterias de hasta 3 unidades log, con lo que se cumple con la normatividad mexicana para el caso de coliformes fecales y se logran concentraciones por debajo de la dosis infectiva de *Salmonella typhi*. A pesar de que el tiempo de retención es largo (debido a la transmitancia del agua), la dosis necesaria para lograr una inactivación de 2 log de las amibas ($60 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$) es comparable con las reportadas para lograr la misma inactivación de otros protozoarios (Rice y Hoff, 1981; US EPA, 1999; Craik *et al.*, 2000). Sin embargo, si se considera la dosis infectiva de *Acanthamoeba* spp., que de acuerdo con Yates y Gerba (1998) es de <10-20 quistes, una dosis luz UV de $60 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ no es suficiente para eliminar el riesgo de infección. Para lograr reducir la concentración a niveles por debajo de la dosis infectiva sería necesario aplicar dosis de luz UV mayores que $140 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$.

En la práctica, la dosis promedio de luz UV que se aplican cuando se requiere cumplir con límites muy estrictos de coliformes fecales (que es el organismo indicador más común) es de $100 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ (entre 60 y 170), dosis que muchas veces resultan prohibitivas por su alto costo (Farell y Burris, 1995). Pero en la mayoría de los casos, cuando la concentración límite de coliformes fecales es menos estricta, las dosis aplicadas oscilan entre 29 y $60 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$, dosis que resultan en costos razonables (Farell y Burris, 1995; Sakamoto *et al.*, 2001).

La comparación de las constantes de inactivación ofrece información valiosa en cuanto a la sensibilidad que mostraron los organismos evaluados en este trabajo con respecto a la radiación de luz UV. En la Tabla 4.17 se presenta la comparación de las constantes de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales, *Salmonella typhi*, *Acanthamoeba culbertsoni* y *Acanthamoeba* spp.

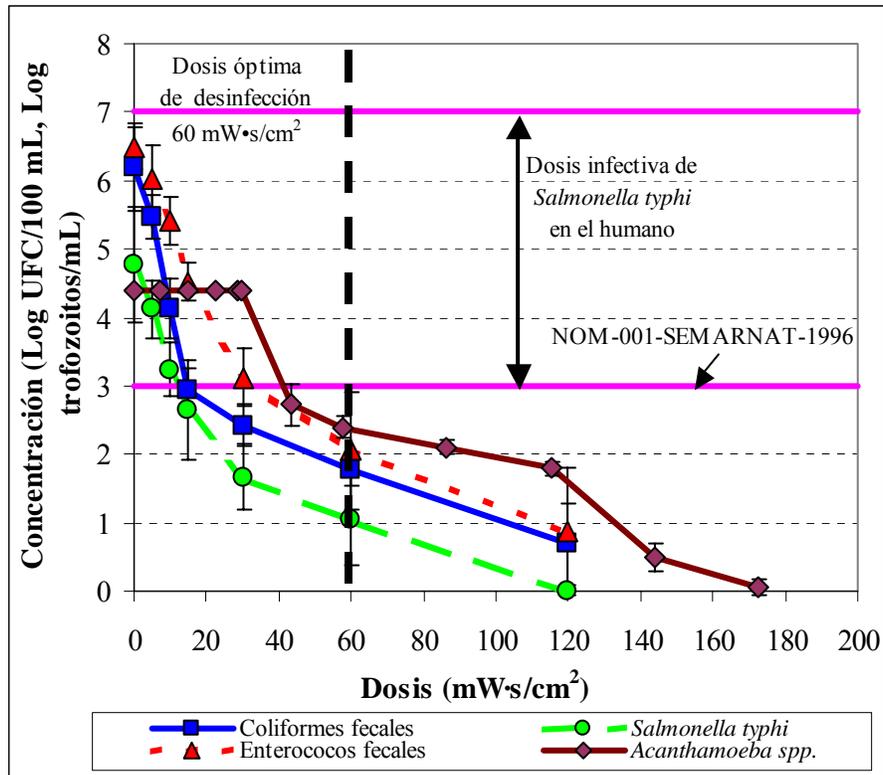


Figura 4.31 Comparación de la cinética de inactivación con luz UV de coliformes y enterococos fecales, *Salmonella typhi* y *Acanthamoeba spp.* en el efluente de lodos activados

Tabla 4.17 Constantes de inactivación de coliformes fecales, enterococos fecales, *Salmonella typhi*, *Acanthamoeba culbertsoni* y *Acanthamoeba spp.*

| | k (cm ² /mW·s) | R ² |
|---------------------------------|---------------------------|----------------|
| Coliformes fecales | 0.48 | 0.98 |
| Enterococos fecales | 0.28 | 0.96 |
| <i>Salmonella typhi</i> | 0.36 | 0.90 |
| <i>Acanthamoeba culbertsoni</i> | 0.05 | 0.95 |
| <i>Acanthamoeba spp.</i> | 0.05 | 0.94 |

Tal como se puede observar, las amibas resultaron ser los microorganismos más resistentes a la luz UV, con una constante de inactivación de 0.05 cm²/mW·s, mientras que las más sensibles fueron las bacterias del grupo coliformes fecales, indicador que tuvo una constante de 0.48 cm²/mW·s.

Los resultados llevan a concluir que la luz UV es efectiva en la inactivación de *Acanthamoeba spp.* Sin embargo, para poder lograr su inactivación total, lo cual es necesario para eliminar el riesgo de infección en la población que entra en contacto con el agua contaminada por este tipo de microorganismos, es necesario aplicar altas dosis de luz UV lo cual en términos de costos resultaría prohibitivo.

4.5 Diseño de un sistema de desinfección

Los resultados obtenidos de la fase experimental fueron de utilidad para realizar una propuesta de diseño de un sistema de desinfección con luz UV para la calidad de los efluentes secundarios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU. A continuación se describe la metodología que se siguió para realizar dicho diseño.

El diseño no probabilístico o determinístico de un sistema de desinfección se realizó con base en los trabajos de Tchobanoglous *et al.* (1996) y Loge *et al.* (1996a). Este método fue seleccionado debido a que en él se puede hacer uso de los resultados obtenidos en laboratorio con un equipo de luz colimada, por lo que la variabilidad de las características del agua residual no es considerada. Para este diseño se utilizaron los resultados obtenidos para la inactivación de coliformes fecales, debido a que: (a) este es el parámetro considerado dentro de la legislación mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997) y por lo tanto el más adecuado para tomar como referencia en el diseño y (b) es un buen indicador de la presencia de *Salmonella typhi*. También, los datos empleados corresponden a los del sistema de lodos activados debido a que no se encontró una diferencia significativa con los correspondientes a los otros efluentes estudiados. A continuación se presenta el ejemplo de diseño.

4.5.1 Diseño matemático

Paso 1. Graficar la concentración de coliformes fecales en función de la dosis aplicada (Figura 4.32).

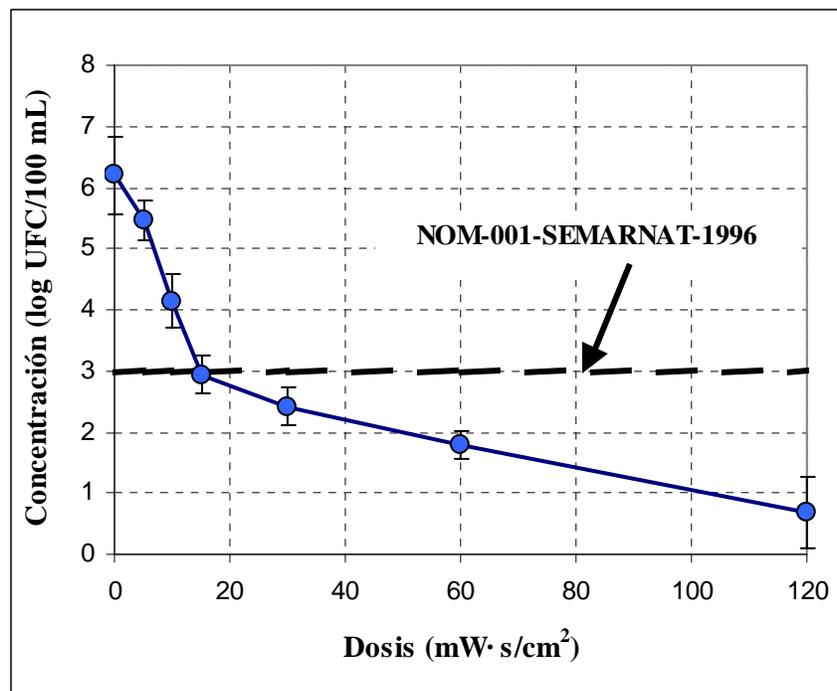


Figura 4.32 Inactivación de coliformes fecales en el efluente de lodos activados con luz UV

Paso 2. A partir de la Figura 4.32, determinar la dosis de luz UV que corresponden al límite máximo permisible por la legislación mexicana para coliformes fecales (1000 UFC/100 mL). Para asegurar la calidad y cumplimiento de la normatividad en la mayoría de los casos, se recomienda aplicar una dosis de $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Sin embargo, es importante tomar en cuenta el grado de reactivación que se presentó en los estudios realizados, los cuales mostraron hasta más de 2 unidades logarítmicas al aplicar esta dosis. Aún con la dosis de $30 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ se seguiría corriendo un riesgo pues con esta dosis se alcanzaron grados de reactivación de 1.6 unidades log. Por tal motivo y para evitar riesgos de no cumplir con la legislación se consideró la dosis de $60 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ para realizar el diseño del sistema de desinfección. Con esta dosis se logra cumplir con la normatividad y además se asegura que no existirá recrecimiento que ponga en riesgo el cumplimiento de los límites permisibles.

Paso 3. Ajustar la dosis requerida, tomando en cuenta el envejecimiento de las lámparas en una instalación a gran escala.

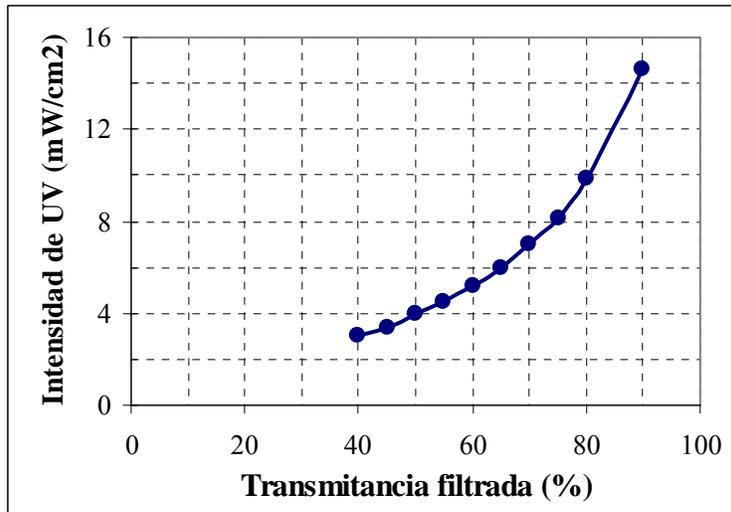
Se aumenta la dosis en un 30% al considerar el tiempo de uso y además se toma en cuenta otro factor de un 30% por causa de falla de la lámpara (Tchobanoglous *et al.*, 1996 y Loge *et al.*, 1996a).

$$\text{Dosis requerida UV} = \frac{\text{Dosis necesaria para cumplir con la normatividad}}{0.7 \times 0.7} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$\text{Dosis requerida UV} = \frac{60 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2}{0.7 \times 0.7} = 122.5 \text{ mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$$

Paso 4. Por medio del método PSS (*point-source summation, Task Force on Wastewater Disinfection, 1996*) se determina la intensidad UV promedio en el sistema. Es bien sabido que el campo de intensidad de un sistema de UV no es constante ya que los cambios en la calidad del agua lo alteran (*Task Force on Wastewater Disinfection, 1996*). Estos factores reducen la cantidad de radiación UV que se aplica al agua a ser desinfectada. Por tal motivo, el procedimiento PSS se usa para estimar la intensidad promedio para determinadas condiciones. Este procedimiento se relaciona con el cálculo del campo de intensidad de la luz UV en un arreglo de lámparas dado. Los datos son integrados en el volumen de la zona irradiada para dar un estimado de la intensidad promedio en ese arreglo específico.

Debido a que el PSS se determina por programas de computo, la intensidad se determinó tomando como base los trabajos de Loge *et al.* (1996a) y Loge *et al.* (1998). En estos trabajos, se determinó la curva que relaciona la intensidad dentro de un reactor con la transmitancia filtrada del agua residual (Figura 4.33).



Adaptada de: Loge *et al.* (1996a) y Loge *et al.* (1998)

Figura 4.33 Curva de la relación entre la intensidad promedio dentro del reactor con la transmitancia filtrada del agua residual (curva basada en un arreglo de 2 x 2 con un espacio central entre líneas de 75 mm)

Para este cálculo, se usó un arreglo de lámparas 2x2, ya que desde el punto de vista operacional este arreglo facilita el manejo de las lámparas en los bancos de desinfección, basado en una emisión de 267 W, diámetro externo (DE) de la camisa de cuarzo de 23 mm y 75 mm entre lámpara- lámpara (línea central) (Loge *et al.*, 1996a; Figura 4.34).

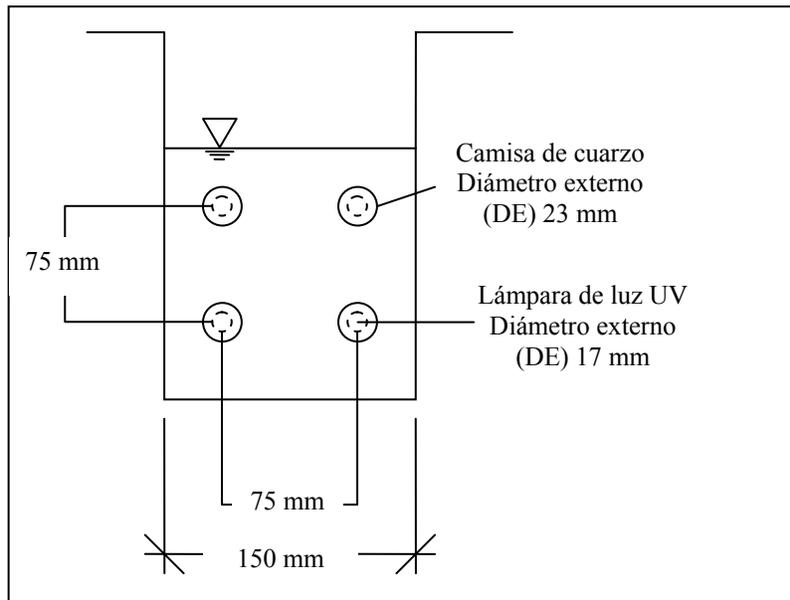


Figura 4.34 Vista seccional de un arreglo de lámparas de luz UV de 2 x 2

Si se considera que el valor promedio de transmitancia filtrada para el efluente de lodos activados fue de 74%, la intensidad promedio es aproximadamente 9 mW/cm^2 .

Paso 5. Dada la intensidad promedio en el paso anterior, se determinó el tiempo de exposición necesario para cubrir la dosis requerida.

$$\text{Tiempo de exposición} = \frac{\text{Dosis UV (mW} \cdot \text{s/cm}^2\text{)}}{\text{Intensidad promedio (mW/cm}^2\text{)}} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$\text{Tiempo de exposición} = \frac{122.5 \text{ mW} \cdot \text{s/cm}^2}{9 \text{ mW/cm}^2}$$

$$\text{Tiempo de exposición} = 13.6 \text{ s}$$

Paso 6. Basado en el flujo a ser tratado, se determina el volumen que debe ser retenido para el tiempo de exposición requerido. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU opera con un flujo de diseño de 30 L/s , el cual fue tomado para calcular el volumen total de agua residual tratada a ser retenido por el tiempo de exposición.

$$\text{Flujo de diseño} = 30 \text{ L/s}$$

$$\text{Volumen total} = \text{Tiempo de exposición} \times \text{Flujo de diseño} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$\text{Volumen total} = (13.6 \text{ s}) \times (30 \text{ L/s})$$

$$\text{Volumen total} = 408 \text{ L}$$

Paso 7. El número de lámparas requeridas para la desinfección se determina al dividir el volumen total a ser desinfectado entre el volumen de agua residual que puede ser desinfectado por cada lámpara. El volumen de agua residual tratada por lámpara es constante por espaciamiento y se calcula restando el área de las camisas de cuarzo del área entre las lámparas (75 mm) y multiplicando por la longitud efectiva de la lámpara (típicamente 1470 mm).

$$D_{\text{camisa de cuarzo}} = 25 \text{ mm}$$

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = 490.9 \text{ mm}^2$$

$$\text{Espacio entre las lámparas} = 75 \text{ mm}$$

$$A = L \times L$$

$$A = 5625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Volumen por lámpara (L/lámpara)} = (5625 - 490.9) \times 1470$$

$$\text{Volumen por lámpara} = 7547274 \text{ mm}^3$$

$$\text{Volumen por lámpara} = 7.6 \text{ L/lámpara}$$

Por último, el número de lámparas requeridas para la desinfección se calcula con la siguiente expresión.

$$\text{Número de lámparas} = \frac{\text{Volumen total, L}}{\text{Volumen por lámpara, L/lámpara}} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$\text{Número de lámparas} = \frac{408 \text{ L}}{7.6 \text{ L/lámpara}}$$

$$\text{Número de lámparas} = 54 \text{ lámparas}$$

Una vez determinado el número de lámparas requeridas para la desinfección basado en la carga de luz UV disponible, se procede a determinar la configuración del sistema de luz UV.

Los pasos que se siguieron para el diseño se presentan a continuación.

1. Se deben suponer diversas configuraciones del sistema y seleccionar una que cumpla con los criterios de desinfección y el número mínimo de lámparas.

Para este caso, se supuso un arreglo de lámparas $N_L \times N_M$ donde N_L es el número de lámparas por módulo y N_M es el número de módulos por banco. Se debe de cumplir con lo siguiente $N_L \leq N_M \leq 1.75N_L$ y N_L debe tomar valores de 2, 4, 8, 12 o 16 (Loge *et al.*, 1996a). Los valores seleccionados de acuerdo con esto se muestran a continuación

$$\begin{aligned} N_L &= 4 \\ N_M &= 4 \\ N_B &= 2 \end{aligned}$$

Donde

N_B : Número de bancos por canal

2. Dados N_B , N_L , N_M y el número de lámparas, se calcula el número de canales N_C de acuerdo con la fórmula siguiente

$$\text{Número de canales} = \frac{\text{Número de lámparas requeridas}}{(N_L \times N_M) \times N_B} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$\text{Número de canales} = \frac{54}{(4 \times 4) \times 2}$$

$$\text{Número de canales} = 1.7$$

Por lo tanto el número de canales es 2 canales

3. Al considerar como base dos canales, se recalcula el número de lámparas en la configuración

$$\text{Total de lámparas} = N_L \times N_M \times N_B \times N_C \quad (\text{Ec. 4.10})$$

$$\text{Total de lámparas} = [(4 \times 4) \text{ lámparas/banco}] \times 2 \text{ bancos/canal} \times 2 \text{ canales}$$

$$\text{Total de lámparas} = 64$$

Se calcula el número de lámparas en exceso como sigue

$$\text{Exceso de lámparas} = \text{Total de lámparas} - \text{Lámparas requeridas para la desinfección} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

$$\text{Exceso de lámparas} = 64 - 54$$

$$\text{Exceso de lámparas} = 10 \text{ lámparas}$$

Y, dadas las suposiciones de diseño para cada canal, la configuración queda como sigue

| |
|-----------------------|
| 4 lámparas por módulo |
| 4 módulos por banco |
| 2 bancos por canal |

4. Como resultado del diseño se debe corroborar que la pérdida de carga en la configuración seleccionada sea aceptable. De acuerdo con Tchobanoglous *et al.* (1996) y Loge *et al.* (1996a), las pérdidas de carga por cada canal deben ser menor que 50 mm. Para calcular la pérdida de carga se determinó lo siguiente:

- a) El área seccional del canal considerando el espacio entre lámparas (75 mm)

$$A = (N_L \times 0.075 \text{ m}) \times (N_M \times 0.075 \text{ m}) \quad (\text{Ec. 4.12})$$

$$A = (4 \times 0.075 \text{ m}) \times (4 \times 0.075 \text{ m})$$

$$A = 0.09 \text{ m}^2$$

- b) El área neta del canal al restar el área seccional del canal menos el área de las camisas de cuarzo

$$DE_{\text{camisa de cuarzo}} = 23 \text{ mm}$$

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi \times (11.5)^2$$

$$A = 415.47 \text{ mm}^2$$

$$A = 4.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{lámpara}$$

$$\text{Area neta del canal} = 0.09 - [(4 \times 2) \text{ lámparas/banco}] \times 4.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{lámpara}$$

$$\text{Area neta del canal} = 0.086 \text{ m}^2$$

c) La velocidad del canal

$$\text{Velocidad} = \frac{Q}{\text{No. de canales} \times \text{área neta del canal}} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

$$\text{Velocidad} = \frac{0.03 \text{ m}^3 / \text{s}}{2 \times 0.086 \text{ m}^2}$$

$$\text{Velocidad} = 0.174 \text{ m/s}$$

d) Y por último, la pérdida de carga en el canal

$$h_L = k \left(\frac{v^2}{2g} \right) \times \text{No. de bancos/canal} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Donde

$k = 2.2$ (valor dado por Trojan Technologies)

v : Velocidad del canal (m/s)

g : Gravedad = 9.81 m/s^2

$$h_L = 2.2 \left(\frac{(0.174 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} \right) \times 2$$

$$h_L = 0.00069 \text{ m}$$

$$h_L = 0.69 \text{ mm}$$

Debido a que la pérdida de carga calculada (0.69 mm) es mucho menor a la establecida en la literatura (50 mm), el diseño generado es aceptado como adecuado. Es importante señalar que el criterio para aceptar un diseño es que debe cumplir con los requerimientos de desinfección y la pérdida de carga.

En la Tabla 4.18 se resume la configuración del sistema de luz UV propuesto para la desinfección del efluente del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales de C.U.

Tabla 4.18 Configuración propuesta de un sistema de luz UV para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU

| Descripción | Diseño |
|--|-----------------|
| Flujo promedio (m ³ /s) | 0.03 |
| Población equivalente | 6,500 |
| Criterio de desinfección (NMP/100 mL) ^a | 1000 |
| Diseño de proceso | |
| Número de lámparas requeridas para la desinfección | 64 |
| Configuración del sistema ^b | 2x4x4x2 (64@75) |
| Exceso de lámparas en la configuración | 10 |
| Pérdida de carga por canal (mm) ^c | 0.69 |

a. El criterio basado en la concentración de coliformes fecales en un promedio de 30 días establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997);

b. Número de bancos por canal x número de módulos por banco x número de lámparas por módulo x número de canales (total del número de lámparas en el sistema con un espacio entre línea central de las lámparas en mm); c. Si la pérdida de carga es menor de 50 mm, la configuración es aceptada, de otra forma, la configuración debe ser revisada

Y en la Figura 4.35 se muestra la distribución de cada canal del sistema de acuerdo a las características obtenidas con el diseño.

Los sistemas de luz UV generalmente contienen dos o más bancos en serie. Un banco puede estar temporalmente fuera de servicio por causa de limpieza o reparación. Cada banco contiene un número específico de módulos (estructuras de lámparas). Los módulos son empleados para facilitar el acceso a las lámparas en cada banco y cada módulo contiene un número específico de lámparas.

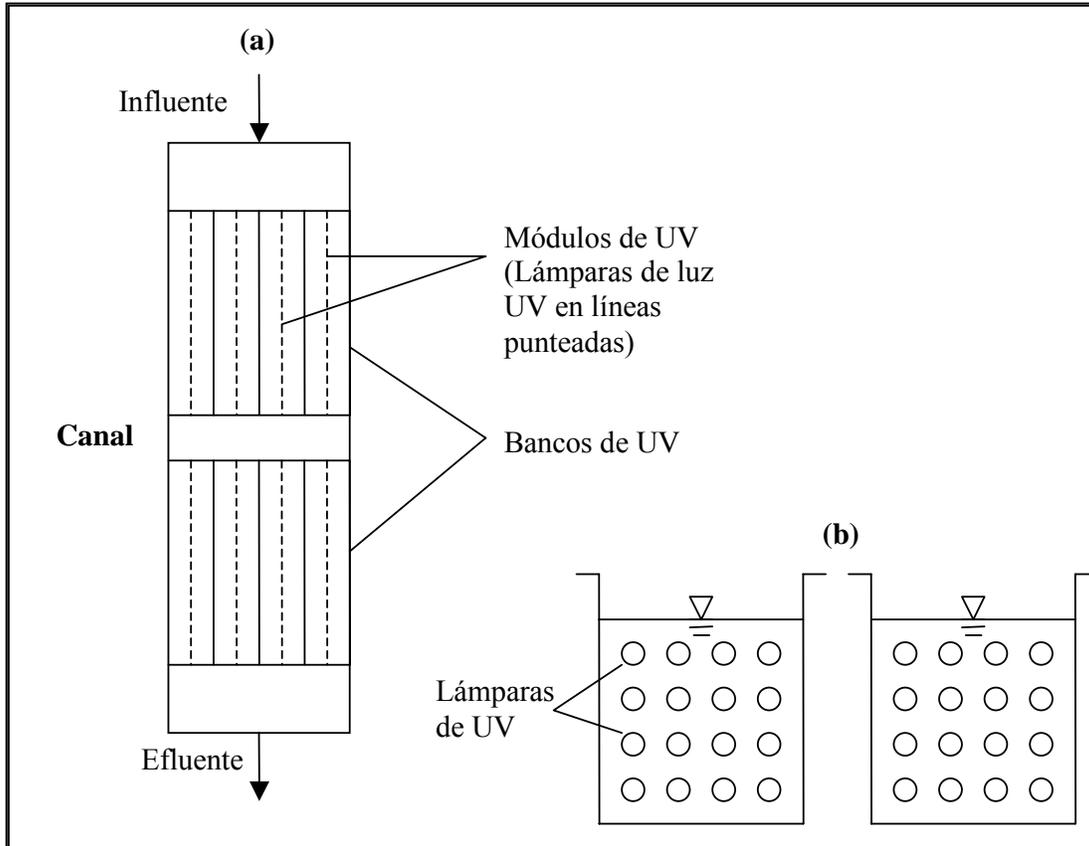


Figura 4.35 Componentes del sistema de desinfección de luz UV. (a) Configuración del canal, bancos, módulos y lámparas; (b) Corte transversal del sistema, para el sistema de desinfección de la planta de tratamiento de CU

4.5.2 Aproximación de costos

De acuerdo con el sistema propuesto, se procedió a realizar una cotización de un sistema de desinfección comercial. La cotización y propuesta del equipo de desinfección se presenta en el anexo C. Esta propuesta cubre las necesidades específicas de la planta de tratamiento de CU. Los costos propuestos por la compañía se muestran en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Costos de un sistema de luz UV comercial

| Concepto | Costo ^a |
|------------------------------------|--------------------|
| Sistema UV | \$187,883 |
| Transformador 3kVa, 240-120V, 50Hz | \$16,758 |
| Fotómetro UV Modelo P254-C UV | \$15,732 |
| Total | \$220,373 |

a. Costo en pesos moneda nacional. Tipo de cambio 1USD = \$11.4 MN Banco de México con fecha 5 de noviembre del 2004

En la Tabla 4.20 se resumen los costos de energía que se generarían para el diseño propuesto para esta planta de tratamiento. Estos costos se hicieron con base a que el consumo de energía de cada lámpara con su balastro oscila entre 70 y 85 W (Darby *et al.*, 1995; Blatchley *et al.*, 1996) y el costo de la energía en México es de \$0.984 kW h (CFE, 2004).

Tabla 4.20 Resumen de análisis de costos por energía en un sistema de luz UV

| | |
|---|------------------------------|
| Número de lámparas | 64.00 |
| Consumo de energía promedio ^a (kW) | 5.44 |
| Flujo promedio (m ³ /h) | 108.00 |
| kWh/m ³ | 0.05 |
| Costos de energía por m ³ a \$0.984 por kWh (\$) | 0.0492 |
| Volumen de agua residual promedio tratada en un año (m ³) | 946,080.00 |
| Costos por energía en un año (\$) ^b | 46,547.00^c |

a. Considerando que cada lámpara consume en promedio 85 W; b. Costos en pesos MN, considerando 30 días por mes; c. Considerar un costo adicional por cargo fijo que establece la CFE de \$179.12 (CFE, 2004)

La mayor parte de los costos de mantenimiento de los sistemas de desinfección de UV es debido al reemplazo de las lámparas. Los costos de las lámparas varían entre \$50 y \$60 dólares con una vida útil de por lo menos un año (Fahey, 1990, Elefritz, 2000).

El costo anual de operación y mantenimiento de un sistema de desinfección con luz UV se basa principalmente el consumo de energía, el reemplazo de las lámparas, de los balastos y de las camisas de cuarzo, además de los requerimientos de productos de limpieza y personal.

En la Tabla 4.21 se presenta una evaluación anual de los costos de operación y mantenimiento que representaría un sistema de desinfección como el diseñado en este trabajo. El cálculo se basa en las siguientes suposiciones.

- Consumo energético (lámpara y balastro) de 85 W/lámpara (entre 70-85 W/lámpara)
- Reemplazo de lámparas basado en 12,000 h de uso (entre 8,760-14,000 h)
- Reemplazo de balastos cada 10 años (entre 10-15 años)
- Reemplazo de camisas de cuarzo cada 5 años (entre 5-8 años)
- Limpieza química cada cuatro meses
- Costos de reparación de equipo vario basado en 2.5% del costo total del equipo.

Si se considera que el sistema consta de 64 lámparas, el costo total por operación y mantenimiento -que incluye costos energéticos, de reemplazos y limpieza- sería de \$85,888 pesos MN. Los costos energéticos son de \$46,912 pesos MN y el costo por concepto de reemplazos y limpieza equivale a \$38,976 pesos MN. En la Tabla 4.22 se presenta un resumen de los costos anuales de capital, energéticos y por reemplazo y mantenimiento que representa un sistema de desinfección como el cotizado por la compañía distribuidora.

Tabla 4.21 Costo por concepto de operación y mantenimiento de un sistema de luz UV

| Concepto | Costo por unidad \$^a | Costo por año \$/lámpara |
|---|--|-------------------------------------|
| Consumo de energía (kW h) | 0.984 | 733.0 |
| Reemplazo de lámparas | 502.0 | 366.0 |
| Reemplazo de balastos | 1,174.0 | 117.0 |
| Reemplazo de camisas de cuarzo | 353.0 | 71.0 |
| Compuestos de limpieza ^b (por lámpara/año) | 55.0 | 55.0 |
| Total | | 1,342.0 |

a. El costo en pesos moneda nacional, Tipo de cambio 1USD = \$11.4 MN Banco de México con fecha 5 de noviembre del 2004; b. Adaptado de Darby *et al.* (1995); Elefritz (2000).

Tabla 4.22 Costos totales por año del sistema de desinfección con UV para la PTARCU

| Concepto | Costo^a \$ |
|--|---------------------------------|
| Costos de capital | 212,641 |
| Costos energéticos ^b | 46,912 |
| Costos por reemplazo y limpieza ^b | 38,976 |
| Total | 298,529 |

a. Costo en pesos MN; b. 64 lámparas

Con base en estos datos y considerando que el flujo promedio de la PTARCU es de 0.03 m³/s, el costo de desinfección de agua residual con las características típicas del efluente de lodos activados, sería de \$0.316 pesos MN/m³, aunado a otras ventajas mencionadas en este trabajo.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. A pesar de existir diferencias fundamentales entre la calidad -en términos de concentración de sólidos suspendidos, transmitancia y distribución de tamaño de partícula- del efluente de lodos activados (crecimiento en suspensión) y de sistema de contactores biológicos rotatorios así como de filtros rociadores (crecimiento en biopelícula) de una planta de tratamiento de aguas residuales en operación, alimentada con un mismo influente, éstas no fueron determinantes en la eficacia de desinfección. Ello puede explicarse por la escasa presencia de partículas mayores de $40\ \mu\text{m}$ (0.1% del total) en todos los casos, condición determinante de este comportamiento mencionado en la literatura. Por lo que se concluye que más que la calidad inicial del efluente, lo que determina la eficacia de desinfección es la cantidad y tamaño de las partículas presentes en él, las cuales dependen tanto del origen del agua residual como del tipo de tratamiento aplicado a ésta. (*i.e* secundario vs terciario, biológico vs fisicoquímico).
2. La luz UV mostró ser un desinfectante efectivo para inactivar *Salmonella typhi*, coliformes fecales y enterococos fecales en altas concentraciones (del orden de 10^6 UFC/100 mL), de los cuales el más sensible a la luz UV fue *Salmonella typhi* y los más resistentes los enterococos fecales. Una dosis de $30\ \text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ se considera una dosis óptima para lograr la inactivación de coliformes fecales hasta niveles que cumplan con los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diario Oficial de la Federación, 1997) y de *Salmonella typhi* hasta concentraciones que no representen riesgo para la salud (4 y 3 unidades log de inactivación, respectivamente).
3. El empleo de coliformes fecales como indicador de contaminación por bacterias gram -, como *Salmonella typhi*, fue corroborado en este estudio. Así mismo, debido a su mayor resistencia en comparación con las bacterias coliformes fecales, se estableció la utilidad de los enterococos fecales como indicadores de contaminación por otro tipo de bacterias (gram +).
4. Las bacterias coliformes fecales y *Salmonella typhi* tienen la capacidad de reparar el daño causado por la luz UV, principalmente a dosis bajas ($\leq 30\ \text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$), ya que al aumentar la dosis de luz UV el grado de reactivación disminuye (menos de una unidad logarítmica) a pesar de encontrarse en condiciones que favorecen esta situación (en presencia de luz solar). Por lo que es necesario aplicar una dosis de $60\ \text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ (2 veces la óptima) para asegurar que no existirá una reactivación que deteriore la calidad del agua desinfectada. Se acota que, también a partir de los resultados, es posible concluir que una forma de evitar la reactivación es mantener el agua desinfectada en tanques o ductos cerrados, ya que los mecanismos de reparación en la oscuridad *no* son significativos.
5. Los modelos matemáticos empleados para evaluar la cantidad de microorganismos que permanecen viables (N_p) a pesar de aplicar dosis de luz UV elevadas (hasta de 120

mW·s/cm²) con base en la concentración de sólidos suspendidos y el volumen de partículas mayores que 40 µm se ajustaron convenientemente, por lo que resultan herramientas de gran utilidad para evaluar *a priori* la posibilidad de cumplir o no con el nivel deseado de desinfección. La elección de cualquiera de las dos correlaciones dependerá de la disponibilidad de tecnología para evaluar las partículas en el lugar de análisis.

6. La luz UV resultó efectiva para la inactivación de *Acanthamoeba* spp., aunque para realizar su inactivación hasta concentraciones menores que 10 y 20 quistes (dosis infectiva), lo cual es necesario para eliminar el riesgo de infección en la población que entra en contacto con el agua contaminada por este tipo de microorganismos, es necesario aplicar altas dosis de luz UV (del orden de 170 mW·s/cm²) lo que en términos de costos resultaría poco práctico e inalcanzable.
7. La naturaleza (el tamaño, la composición) de los microorganismos es determinante en la eficacia de inactivación, tal como se demostró en la comparación entre la desinfección de bacterias (coliformes y *Salmonella*) y los protozoarios (amibas). Las amibas, por su estructura física y capacidad de enquistación resultaron ser los organismos más resistentes a la luz UV ($k = 0.05 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$), mientras que las bacterias coliformes fecales fueron las más sensibles ($k = 0.48 \text{ cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$).
8. Los resultados de las pruebas de desinfección a nivel laboratorio resultaron de gran utilidad en el diseño teórico de un sistema de desinfección. La configuración del sistema aplicable al tipo de efluentes de la PTARCU se basa en 2 canales, con 2 bancos de lámparas por cada canal, 4 módulos de lámparas por banco y 4 lámparas por módulo, lo cual representa un sistema con un total de 64 lámparas. La aproximación de costos realizada con base en el diseño obtenido coloca a la luz UV como una alternativa viable con respecto a otros desinfectantes.

5.2 Recomendaciones

1. A pesar de que los resultados de este trabajo llevaron a concluir que más que la calidad del efluente, el tamaño y cantidad de partículas presentes son las que determinan la eficacia de desinfección, es recomendable realizar trabajos posteriores donde se afine y corrobore esta conclusión, mediante el empleo de agua residual con diferente calidad (principalmente origen de tratamientos diferentes). Enfocándose principalmente a la determinación de tamaño de partícula como una herramienta muy útil en la evaluación de la eficacia de un sistema de desinfección.
2. Es necesario profundizar en el conocimiento de la inactivación de organismos patógenos con luz UV, principalmente de aquellos de interés para países en desarrollo como México. El estudio de la inactivación de amibas, como *Acanthamoeba* spp., requiere además enfocarse a las técnicas de detección y evaluación de inactivación, las cuales en general son deficientes para muchos patógenos, como virus y protozoarios. Recientemente se ha demostrado que la técnica empleada para la evaluación de la inactivación de protozoarios con luz UV es la clave fundamental de un estudio. Por tal motivo se sugiere realizar estudios a futuro en los que se integre la técnica de infectividad en organismos o células y se realice una comparación con la técnica empleada en este estudio.
3. Por otro lado, debido a las altas dosis necesarias para la inactivación de *Acanthamoeba* spp., lo cual implicaría costos elevados, se recomienda realizar una comparación entre los costos de luz UV contra los costos de otros métodos de desinfección para este tipo de microorganismos, en particular con ozono.

ANEXO I

Técnicas analíticas

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES
Adaptada de APHA, AWWA y WPCF, 1998

1. Lavar los filtros de fibra de vidrio (GF/C con 1.2 µm de porosidad) haciendo pasar 3 veces 20 mL de agua destilada. Una vez limpio secar en estufa a 103 a 105 °C por 1 h. Enfríe en desecador y pese. Repetir el ciclo de secado-enfriamiento hasta que el cambio en el peso sea menor al 4% del peso anterior. Almacenar en el desecador hasta su uso.
2. El tamaño de la muestra debe ser aquel que genere entre 10 y 200 mg de residuo. Si la muestra tarda más de 10 minutos en filtrarse, seleccionar una muestra más pequeña. En este caso se filtraron 100 mL de muestra.
3. Humedecer un filtro con una pequeña cantidad de agua destilada. Agitar la muestra y filtrar un volumen determinado a través del filtro con la aplicación de vacío. Lavar 3 veces sucesivas con 10 mL de agua destilada permitiendo la eliminación total de agua entre los lavados. Transferir cuidadosamente el filtro a una canastilla de aluminio y evaporar en estufa a 103 a 105 °C por lo menos 1 h. Enfriar en desecador y pesar. Repetir el ciclo de secado-enfriamiento hasta que el cambio en el peso sea menor al 4% del peso anterior.
4. El calculo de la concentración de sólidos suspendidos se realiza mediante la expresión

$$\text{Solidos suspendidos totales (mg/L)} = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{Volumen de la muestra, mL}}$$

Donde

A : Peso del filtro + peso del residuo, mg

B : Peso del filtro, mg

TRANSMITANCIA Y TRANSMITANCIA FILTRADA

Adaptada de Trojan Technologies, 1997

La transmitancia fue directamente medida a una longitud de onda de 254 nm por medio de un espectrofotómetro P254UV equipado con una celda rectangular de cuarzo de 1 cm.

1. Ajustar el espectrofotómetro a cero
2. Colocar agua destilada en la celda de cuarzo y ajustar el espectrofotómetro a un valor de transmitancia de 100%, que sirve como referencia. Desechar el agua y secar la celda.
3. Colocar la muestra de interés en la celda de cuarzo y leer directamente el valor en el espectrofotómetro.
4. Tener cuidado de eliminar burbujas de la muestra antes de analizarla, así como de limpiar perfectamente bien las paredes de la celda para evitar interferencias.

Transmitancia filtrada

Filtrar la muestra de interés a través de una membrana de 0.45 μm de porosidad y seguir la misma metodología expuesta con anterioridad.

La transmitancia también puede ser obtenida a través de la absorbancia de la muestra usando la siguiente relación.

$$T = 10^{-(\text{a.u./cm})}$$

Donde

a.u. : Absorbancia (cm^{-1})

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA PRINCIPIO COULTER

El Principio Coulter es también conocido como Zona de Detección Eléctrica (*Electrical Sensing Zone, ESZ*). En este método se hace pasar una suspensión (solución electrolítica-partículas) a través de una pequeña abertura cilíndrica que esta separada por dos electrodos entre los cuales fluye corriente eléctrica. A pesar de que la magnitud de la corriente eléctrica suele ser pequeña (alrededor de 1 mA), la resistencia creada por los electrodos produce una densidad de corriente en la abertura. Cuando las partículas pasan por la abertura (zona de detección), estas desplazan su propio volumen del líquido conductor, lo que incrementa momentáneamente la impedancia de la abertura.

Este cambio de impedancia produce un flujo de corriente pequeñísimo, pero proporcional, en un amplificador que convierte la fluctuación de corriente en pulsos de voltaje que son suficientemente grandes como para ser medidos con precisión. El principio Coulter establece que la amplitud del pulso es directamente proporcional al volumen de la partícula que lo produce.

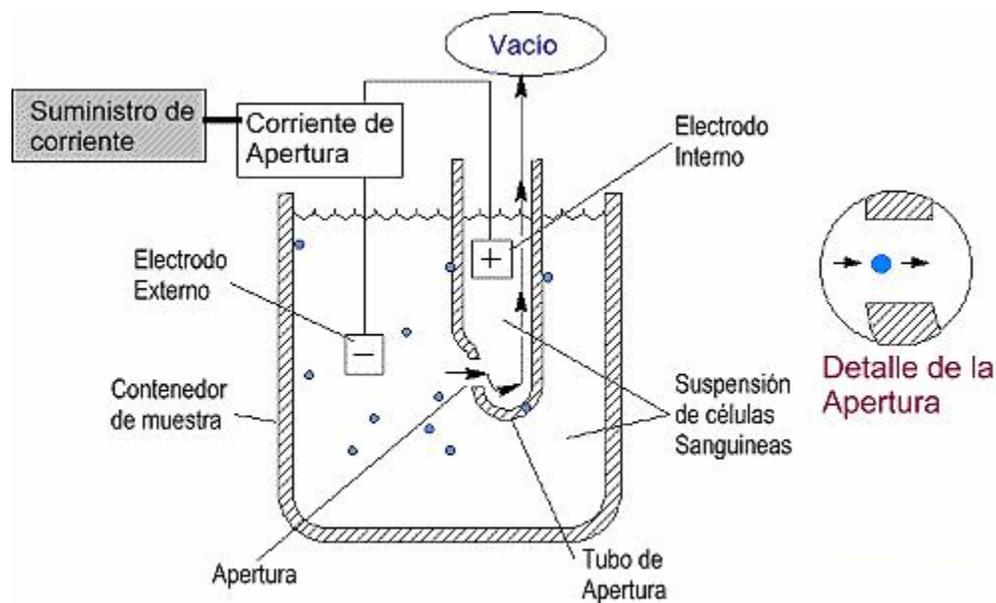


Diagrama del principio Coulter

TÉCNICA DE FILTRO DE MEMBRANA Adaptada de APHA, AWWA y WPCF, 1998

Medios de cultivo

Coliformes fecales

Reactivos

Agar mFC (Difco) 3.7 g

Preparación

Disolver los 3.7 g de agar mFC en 100 mL de agua destilada y calentar hasta su disolución total. Se debe evitar exponer el medio excesivamente al calor. Distribuir de 2 a 3 mL del medio en cajas estériles en condiciones de asepsia.

Enterococos fecales

Reactivos

Agar KF (BBL) 7.64 g
Sol. 2,3,5 Cloruro de trifeniltetrazolio (TCC) 1 % (p/v)

Preparación

Disolver los 7.64 g de agar KF en 100 mL de agua destilada y calentar hasta su disolución total. Se debe evitar exponer el medio excesivamente al calor. Dejar enfriar un poco y agregar 1 mL de solución de TCC al 1 %. Distribuir de 2 a 3 mL del medio en cajas estériles en condiciones de asepsia.

Salmonella typhi

Reactivos

Sulfito y bismuto (Bioxon) 5.2 g

Preparación

Disolver los 5.2 g de agar sulfito y bismuto en 100 mL de agua destilada y calentar hasta su disolución total. Se debe evitar exponer el medio excesivamente al calor. Distribuir de 2 a 3 mL del medio en cajas estériles en condiciones de asepsia.

Agua de dilución

El agua de dilución tiene un uso generalizado en las técnicas de determinación microbiológica.

Reactivos

Sol. de hidróxido de sodio (NaOH) 1 N

Solución patrón A

Fosfato monobásico de potasio (KH₂PO₄) 34 g

Solución patrón B

Cloruro de magnesio (MgCl) 81.1 g

Preparación***Solución patrón A***

Disolver el fosfato monopotásico en 500 mL de agua destilada. Ajustar el pH a 7.2±0.5 con la solución de hidróxido de sodio 1 N. Aforar a 1 L con agua destilada. Esterilizar en autoclave a 121 °C durante 15 minutos. Una vez estéril, almacenar en refrigeración.

Solución patrón B

Disolver el cloruro de magnesio en 1,000 mL de agua destilada. Esterilizar en autoclave a 121 °C durante 15 minutos. Una vez estéril, almacenar en refrigeración.

Agua de dilución

Agregar 1.25 mL de la solución patrón A y 5 mL de la solución patrón B y aforar a 1 L con agua destilada. Distribuir directamente en pizetas para el lavado de membranas. Para realizar las diluciones seriadas distribuir en tubos de rosca en cantidades que aseguren un volumen de 9 ±0.2 mL, esterilizar durante 15 minutos a 121 °C.

Procedimiento

1. Preparación de cajas Petri. Se colocan de 3 a 5 mL del medio estéril en cajas Petri de 50 x 9 mm. Se dejan solidificar a temperatura ambiente. Las cajas pueden ser almacenadas de forma invertida en refrigeración hasta por dos semanas. Excepto para Enterococos fecales, el cual debe prepararse el mismo día.
2. Diluciones seriadas. El volumen a ser filtrado varía de acuerdo con la muestra. Por lo que se debe seleccionar un tamaño de muestra que genere una cuenta entre 20 y 200 UFC por filtro. Para obtener una dilución decimal, se mezcla 1 parte de la muestra por 9 de agua de dilución (en este caso 1 mL de la muestra por 9 mL de agua de dilución).
3. Cada muestra se filtra por duplicado a través de una membrana de nitrato de celulosa de 4.5 cm de diámetro y 0.45 µm de porosidad, con la cual se asegura la retención de las bacterias, en condiciones de vacío. Se enjuaga el sistema con 20 a 30 mL de agua de dilución estéril.
4. La membrana se transfiere a la superficie del medio cultivo de interés y es incubada por el tiempo y temperatura específica para cada microorganismo (Tabla AI.1).

Tabla AI.1 Condiciones de incubación para coliformes fecales, Enterococos fecales y *Salmonella typhi*

| Microorganismo | Cepa de referencia | Medio de crecimiento | Condiciones de incubación |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Coliformes fecales | N.A. | MFC (Difco) | 44.5 °C, 18-24 h |
| Enterococos fecales | N.A. | KF (BBL) | 35 °C, 48 h |
| <i>Salmonella typhi</i> | <i>Salmonella typhi</i> ATCC 6539 | Sulfito y Bismuto (Bioxon) | 35 °C, 18-24 h |

5. El conteo de las colonias, de acuerdo a las especificaciones de la Tabla AI.2, se realiza con un contador de colonias el cual permite una magnificación de 10 a 15 X. La densidad óptima en cada membrana debe ser entre 20 y 200 colonias.

Tabla AI.2 Características de las colonias de coliformes fecales, Enterococos fecales y *Salmonella typhi*

| Microorganismo | Color de colonia |
|-------------------------|------------------|
| Coliformes fecales | Azul |
| Enterococos fecales | Roja |
| <i>Salmonella typhi</i> | Negro metálico |

6. La concentración de los microorganismos se reporta en unidades es formadoras de colonia por 100 mL (UFC/100 mL) y el cálculo se realiza mediante la expresión

$$\text{UFC/100mL} = \frac{\text{Colonias contadas}}{\text{Volumen real de la muestra, mL}} * 100$$

API 20E Bio Merieux

Principio

Este sistema, útil en la identificación de enterobacterias y otros bacilos Gram-negativos, utiliza 23 pruebas bioquímicos estandarizados y miniaturizado, y una base de datos. Consta de 20 microtubos colocados en una galería que contienen sustratos deshidratados. Estos, se inoculan con una suspensión bacteriana la cual hidrata el medio. Durante la incubación, se producen cambios de color espontáneo o revelado por adición de reactivos. La lectura de las reacciones se hace de acuerdo con la tabla de lectura y la identificación de acuerdo con la base de datos de API 20 E.

Técnica

1. Preparar la galería. Se humedece el fondo con 5 mL de agua y se introduce en la incubadora.
2. Preparar inóculo. En un tubo que contenga 5 mL de solución salina (NaCl 0.85%) estéril, tomar una colonia bien aislada y realizar una suspensión bacteriana.
3. Realizar prueba de oxidasa. Colocar con un aplicador de madera estéril una colonia aislada en un papel absorbente impregnado con reactivo de oxidasa. El resultado es positivo cuando se presenta color púrpura. La ausencia de color indica un resultado negativo
4. Inoculación de la galería. Llenar los tubos y cúpulas de las pruebas CIT, VP y GEL con la suspensión bacteriana. Llenar solo los tubos y no las cúpulas de las pruebas restantes. A las pruebas ADH, LDC, ODC, H₂S, URE, se les crea un ambiente anaerobio por medio de la adición de aceite mineral.
5. Incubar a 35-37 °C durante 18-24 h.
6. La lectura de los resultados se hace con ayuda de la tabla de lectura (Tabla AI.3). Se anotan los resultados y la identificación se obtienen a través del perfil numérico

Tabla AI.3 Tabla de lectura del API 20 E

| PRUEBA | SUSTRATO | REACCION/ENZIMA | RESULTADOS | |
|--------|--|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| | | | NEGATIVO | POSITIVO |
| ONPG | Orto-nitro-fenil-b-D-galactopiranosido (ONPG) Isopropil-tiogalactopiranosido (IPTG) | Beta-galactosidasa | Incoloro | Amarillo (1) |
| ADH | Arginina | Arginina dehidrolasa | Amarillo | Rojo/naranja (2) |
| LDC | Lisina | Lisina descarboxilasa | Amarillo | Rojo/naranja (2) |
| ODC | Ornitina | Ornitina descarboxilasa | Amarillo | Rojo/naranja (2) |
| CIT | Citrato sódico | Utilización del citrato | Verde pálido/amarillo | Azul-verdoso/azul (3) |
| H2S | Tiosulfato sódico | Producción de H2S | Incoloro/grisáceo | Depósito negro/línea sutil |
| URE | Urea | Ureasa | Amarillo | Rojo/naranja |
| | | | TDA/inmediato | |
| TDA | Triptofano | Triptofano desaminasa | Amarillo | Marrón-rojizo |
| | | | JAMES/inmediato | |
| IND | Triptofano | Producción del indol | Incoloro Verde pálido/amarillo | Rosa |
| | | | VP1 + VP2 /10 min | |
| VP | Creatina piruvato sódico | Producción de acetoína | Incoloro | Rosa/rojo (5) |
| GEL | Gelatina de Kohn | Gelatinasa | No hay difusión de pigmento negro | Difusión de pigmento negro |
| GLU | Glucosa | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | Amarillo/amarillo gris |
| MAN | Manitol | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| INO | Inositol | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| SOR | Sorbitol | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| RHA | Ramnosa | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| SAC | Sacarosa | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| MEL | Melibiosa | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| AMY | Amigdalina | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| ARA | Arabiosa | Fermentación/oxidación (4) | Azul/azul verdoso | amarillo |
| OX | Oxidasa | Citocromo-oxidasa | Incolora | Púrpura |

- (1) Un amarillo muy pálido debe considerarse como positivo
(2) Un color naranja que aparece después de 36-48 h de incubación debe considerarse negativo
(3) La lectura debe hacerse en la cúpula (zona de anaerobiosis)
(4) La fermentación empieza en la parte inferior de los tubos, la oxidación empieza en la cúpula
(5) La aparición de una coloración rosa pálido después de 10 minutos debe considerarse como negativa

MANTENIMIENTO DE AMIBAS

MEDIO AXÉNICO. Medio líquido Fosfato, Biotriptasa, Suero, Medio de Glucosa (PBSGM, Chang modificado)

Este medio se empleó para mantener las cepas de amibas de vida aisladas anteriormente por Maya (2000).

Reactivos

| | |
|--|--------|
| Biotriptasa | 16.6 g |
| Dextrosa | 2.7 g |
| Fosfato dibásico de sodio (Na_2HPO_4) | 1.5 g |
| Fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4) | 0.9 g |
| Suero fetal de ternera adicionado con Penicilina y Kanamicina a una concentración de 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ c/u | 0.3 mL |

Preparación

Disolver la biotriptasa, la dextrosa, Na_2HPO_4 y KH_2PO_4 en 1,000 mL de agua destilada. Envasar 0.3 mL del medio en tubos de rosca y esterilizar a 121 °C o 1.5 lbs de presión durante 15 minutos. Dejar enfriar. Una vez frío, agregar 0.3 mL de la solución de suero fetal de ternera. Conservar en refrigeración hasta antes de su utilización.

**MEDIO MONOXÉNICO. Medio sólido de Agar No Nutritivo
adicionado con *Enterobacter aerogenes* muerta (NNE)**

Este medio proporciona las sales y la fuente de carbono (en forma de bacterias) necesarios para su reproducción y sostenimiento.

Reactivos

| | |
|--|---------|
| Cloruro de sodio (NaCl) | 0.120 g |
| Sulfato de magnesio (MgSO ₄ ·7H ₂ O) | 0.004 g |
| Cloruro de calcio (CaCl ₂ ·2H ₂ O) | 0.004 g |
| Fosfato dibásico de sodio (Na ₂ HPO ₄) | 0.142 g |
| Fosfato monobásico de potasio (KH ₂ PO ₄) | 0.136 g |
| Agar bacteriológico | 15 g |
| Solución de <i>Enterobacter aerogenes</i> | 0.5 mL |

Disolver todos los reactivos (excepto *Enterobacter aerogenes*) en 1,000 mL de agua destilada y calentar hasta punto de ebullición. Esterilizar a 121 °C durante 15 minutos y dejar enfriar a 60 °C. Vaciar de 15 a 20 mL en cajas Petri de 100 x 20 mm estériles. Una vez que el agar haya solidificado, se inoculan 0.5 mL de la solución de *E. aerogenes* muerta (*E. aerogenes* en solución con agua destilada que ha sido inactivada en baño María a 70 °C por 30 minutos), distribuyéndola homogéneamente por toda la superficie del medio con una varilla acodada. Las cajas se dejan reposar 1 h aproximadamente y se guardan en refrigeración.

ANEXO II

Resultados

- AII.1 Sólidos suspendidos, transmitancia y transmitancia filtrada de los tres efluentes secundarios
- AII.2 Distribución de tamaño de partícula de los tres efluentes secundarios
- AII.3 Inactivación de microorganismos en los tres efluentes secundarios
- AII.4 Reactivación de coliformes fecales y *Salmonella typhi* en condiciones de luz y oscuridad
- AII.5 Concentración de microorganismos inmersos en partículas
- AII.6 Inactivación de amibas

| AII.1 Sólidos suspendidos, transmitancia y transmitancia filtrada de los tres efluentes secundarios | | | | | | | | |
|--|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|-------------|
| LODOS ACTIVADOS | | | | | | | | |
| Parámetro | Unidad | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA | D.S. |
| Transmitancia | % | 54 | 62 | 50 | 62 | 46 | 55 | 7 |
| Transmitancia filt 0.45 µm | % | 73 | 77 | 74 | 76 | 70 | 74 | 3 |
| SST | mg/L | 33 | 17 | 28 | 44 | 31 | 31 | 10 |
| CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS | | | | | | | | |
| Parámetro | Unidad | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA | D.S. |
| Transmitancia | % | 81 | 77 | 58 | 79 | 78 | 75 | 9 |
| Transmitancia filt 0.45 µm | % | 85 | 82 | 88 | 88 | 83 | 85 | 3 |
| SST | mg/L | 13 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 2 |
| FILTRO ROCIADORES | | | | | | | | |
| Parámetro | Unidad | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA | D.S. |
| Transmitancia | % | 72 | 69 | 51 | 65 | 65 | 64 | 8 |
| Transmitancia filt 0.45 µm | % | 81 | 74 | 83 | 80 | 79 | 79 | 3 |
| SST | mg/L | 14 | 11 | 13 | 12 | 12 | 12 | 1 |

| AII.2 Distribución de tamaño de partícula de los tres efluentes secundarios | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Número de partículas ($N_o \times 10^6/m^3$) del efluente de lodos activados | | | | | | | |
| Diámetro μm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
| 2.01137 | 166.5240 | 16.5377 | 96.7243 | 10.9182 | 22.2534 | 62.5915 | 67.7961 |
| 2.0343 | 161.8060 | 16.2872 | 102.9700 | 12.7714 | 23.8629 | 63.5395 | 66.3240 |
| 2.0575 | 147.9410 | 15.4601 | 100.3710 | 11.6204 | 22.2201 | 59.5225 | 61.4695 |
| 2.08096 | 137.5230 | 14.6654 | 86.0206 | 11.2874 | 21.3257 | 54.1644 | 55.7684 |
| 2.10469 | 137.0330 | 13.5383 | 90.1349 | 11.0515 | 19.8353 | 54.3186 | 56.6759 |
| 2.12868 | 129.0640 | 13.7308 | 82.0100 | 10.3429 | 19.3123 | 50.8920 | 52.6822 |
| 2.15295 | 119.8110 | 12.2408 | 75.7130 | 10.1246 | 17.8466 | 47.1472 | 48.8459 |
| 2.1775 | 111.8710 | 11.6569 | 74.2434 | 8.8472 | 16.9288 | 44.7095 | 46.1878 |
| 2.20233 | 106.9900 | 10.4027 | 69.2378 | 8.9743 | 15.8285 | 42.2867 | 43.9864 |
| 2.22744 | 100.2440 | 10.4853 | 63.8102 | 8.6411 | 14.2752 | 39.4912 | 40.9611 |
| 2.25283 | 93.3383 | 10.0894 | 60.6925 | 8.3141 | 13.5429 | 37.1954 | 38.1852 |
| 2.27852 | 90.8011 | 9.4356 | 61.6358 | 7.8662 | 13.3161 | 36.6110 | 37.6504 |
| 2.3045 | 87.5183 | 9.6995 | 56.7424 | 7.9389 | 12.3563 | 34.8511 | 35.7629 |
| 2.33078 | 85.9354 | 9.0875 | 54.3392 | 6.9941 | 11.6779 | 33.6068 | 35.2080 |
| 2.35735 | 78.4510 | 8.8362 | 47.0942 | 6.6793 | 11.0037 | 30.4129 | 31.5891 |
| 2.38423 | 73.9091 | 8.0144 | 49.6243 | 6.6004 | 11.2363 | 29.8769 | 30.3975 |
| 2.41141 | 72.8293 | 8.0857 | 45.3852 | 6.4432 | 10.1140 | 28.5715 | 29.5443 |
| 2.43891 | 68.5201 | 7.6310 | 42.4456 | 6.0374 | 8.9469 | 26.7162 | 27.8504 |
| 2.46672 | 66.7624 | 7.1727 | 41.3841 | 5.8618 | 8.8687 | 26.0099 | 27.1650 |
| 2.49484 | 61.0802 | 7.0679 | 43.7972 | 5.4925 | 8.4671 | 25.1810 | 25.6437 |
| 2.52328 | 59.1478 | 6.9206 | 39.6162 | 5.4258 | 8.2505 | 23.8722 | 24.3100 |
| 2.55205 | 57.1192 | 6.2393 | 36.3849 | 4.9837 | 6.8431 | 22.3140 | 23.4919 |
| 2.58115 | 54.9520 | 6.2042 | 36.6750 | 5.1047 | 7.3223 | 22.0516 | 22.6471 |
| 2.61059 | 51.6310 | 6.0654 | 35.5580 | 4.8324 | 6.9900 | 21.0154 | 21.3945 |
| 2.64035 | 50.8137 | 6.2326 | 35.6108 | 4.6627 | 6.5795 | 20.7799 | 21.1839 |
| 2.67046 | 51.0229 | 5.7873 | 37.1488 | 4.2873 | 6.4944 | 20.9481 | 21.6985 |
| 2.70091 | 46.7519 | 5.5574 | 33.4423 | 3.9844 | 5.9784 | 19.1429 | 19.7128 |
| 2.7317 | 43.0324 | 5.0630 | 33.6106 | 3.8634 | 5.3040 | 18.1747 | 18.6986 |
| 2.76285 | 39.0677 | 4.9027 | 29.0822 | 4.1721 | 5.0958 | 16.4641 | 16.4631 |
| 2.79435 | 39.0739 | 5.1877 | 29.8477 | 4.0088 | 5.1736 | 16.6583 | 16.5824 |
| 2.8262 | 39.7781 | 4.9723 | 31.1424 | 3.6515 | 4.6019 | 16.8292 | 17.2863 |
| 2.85843 | 38.5906 | 4.7284 | 31.2034 | 3.8633 | 4.6241 | 16.6020 | 16.9073 |
| 2.89102 | 38.8312 | 5.4112 | 28.7309 | 3.8210 | 4.2289 | 16.2046 | 16.4479 |
| 2.92399 | 36.5966 | 4.8395 | 29.7348 | 3.8453 | 4.1605 | 15.8353 | 16.0093 |
| 2.95733 | 35.2778 | 4.5328 | 29.8469 | 3.3246 | 4.0594 | 15.4083 | 15.7826 |
| 2.99105 | 32.1314 | 4.5610 | 29.9059 | 3.0701 | 3.7733 | 14.6883 | 14.9375 |
| 3.02515 | 34.3298 | 4.4993 | 30.1982 | 3.3548 | 3.9824 | 15.2729 | 15.5846 |
| 3.05964 | 31.5239 | 4.6796 | 29.1948 | 3.0701 | 3.4789 | 14.3895 | 14.6137 |
| 3.09453 | 29.9257 | 4.4919 | 31.1454 | 3.3669 | 3.4331 | 14.4726 | 14.6765 |
| 3.12981 | 28.1975 | 4.7981 | 33.8486 | 3.0822 | 3.2168 | 14.6287 | 15.1138 |
| 3.16549 | 28.3050 | 4.6592 | 35.5562 | 2.7917 | 3.5029 | 14.9630 | 15.7141 |
| 3.20159 | 29.8947 | 4.4914 | 34.6157 | 2.9491 | 3.4955 | 15.0893 | 15.7686 |
| 3.23809 | 27.6600 | 4.4839 | 34.2068 | 2.9792 | 3.1394 | 14.4939 | 15.1959 |
| 3.27501 | 27.0154 | 4.5188 | 36.9162 | 3.0217 | 3.1708 | 14.9286 | 15.9525 |
| 3.31235 | 24.6142 | 4.4150 | 36.6137 | 2.9854 | 3.1311 | 14.3519 | 15.4495 |
| 3.35012 | 23.9690 | 4.3730 | 41.9118 | 2.9006 | 3.1781 | 15.2665 | 17.3452 |
| 3.38832 | 23.3550 | 4.3104 | 43.6204 | 2.7069 | 3.4715 | 15.4928 | 17.9305 |
| 3.42695 | 22.2055 | 4.2202 | 44.3268 | 2.5736 | 3.6267 | 15.3906 | 18.1052 |
| 3.46602 | 24.6449 | 4.0735 | 48.0367 | 2.3314 | 3.4028 | 16.4978 | 19.9224 |
| 3.50554 | 23.7684 | 4.4433 | 48.8603 | 2.3798 | 3.4255 | 16.5755 | 20.0977 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 3.54551 | 21.0585 | 4.4784 | 49.0375 | 2.4768 | 3.4333 | 16.0969 | 19.9409 |
| 3.58594 | 20.5854 | 4.6581 | 51.8645 | 2.4767 | 3.0235 | 16.5216 | 21.1296 |
| 3.62682 | 19.6400 | 4.3937 | 50.4584 | 2.3132 | 4.1366 | 16.1884 | 20.3913 |
| 3.66818 | 19.1251 | 4.7145 | 52.1002 | 2.5191 | 3.2478 | 16.3413 | 21.1194 |
| 3.71 | 19.4998 | 4.2334 | 54.0998 | 2.4828 | 3.5578 | 16.7747 | 22.0047 |
| 3.7523 | 18.6879 | 4.5475 | 58.2212 | 2.2164 | 3.7513 | 17.4848 | 23.7171 |
| 3.79508 | 18.8896 | 4.8052 | 59.6975 | 1.9560 | 3.6279 | 17.7952 | 24.3789 |
| 3.83835 | 18.0800 | 4.5265 | 62.7501 | 2.1679 | 3.5797 | 18.2208 | 25.7025 |
| 3.88212 | 18.3492 | 4.4278 | 55.9238 | 2.1134 | 3.8895 | 16.9407 | 22.7399 |
| 3.92638 | 17.1619 | 4.2681 | 58.0457 | 1.9922 | 3.5881 | 17.0112 | 23.7276 |
| 3.97115 | 16.2477 | 3.9691 | 56.1628 | 1.9136 | 3.4476 | 16.3482 | 22.9850 |
| 4.01643 | 16.0469 | 4.0241 | 54.9839 | 1.8227 | 3.5876 | 16.0930 | 22.4621 |
| 4.06222 | 15.6403 | 4.3037 | 55.3442 | 1.8833 | 3.6263 | 16.1595 | 22.5675 |
| 4.10853 | 14.7562 | 3.8302 | 52.8646 | 1.9378 | 3.3096 | 15.3397 | 21.5943 |
| 4.15538 | 15.4036 | 4.2757 | 53.3400 | 2.0104 | 3.5650 | 15.7189 | 21.6912 |
| 4.20276 | 15.3343 | 3.8505 | 48.1009 | 1.7924 | 3.2391 | 14.4634 | 19.5666 |
| 4.25068 | 13.6426 | 3.9270 | 42.6775 | 1.7440 | 3.0702 | 13.0122 | 17.2394 |
| 4.29915 | 15.4702 | 3.2941 | 43.6195 | 2.1194 | 3.0856 | 13.5178 | 17.7003 |
| 4.34817 | 14.9982 | 3.2030 | 37.5002 | 1.7561 | 2.9551 | 12.0825 | 15.1933 |
| 4.39774 | 12.8964 | 3.3703 | 38.5600 | 1.7743 | 2.7378 | 11.8678 | 15.5802 |
| 4.44788 | 14.7252 | 3.0563 | 34.2050 | 1.6834 | 2.5439 | 11.2428 | 13.9056 |
| 4.4986 | 12.2554 | 3.0434 | 30.4365 | 1.6289 | 2.2498 | 9.9228 | 12.2601 |
| 4.54989 | 13.2377 | 2.7641 | 29.9096 | 1.5987 | 2.0344 | 9.9089 | 12.1781 |
| 4.60177 | 11.8475 | 2.7790 | 26.9056 | 1.8167 | 1.9951 | 9.0688 | 10.8174 |
| 4.65423 | 12.6634 | 2.4237 | 21.3759 | 1.5382 | 2.0260 | 8.0054 | 8.7921 |
| 4.7073 | 13.1010 | 2.3680 | 20.1928 | 1.6471 | 1.7469 | 7.8112 | 8.4511 |
| 4.76097 | 12.2192 | 2.4793 | 20.4893 | 1.6108 | 1.7246 | 7.7046 | 8.4266 |
| 4.81526 | 10.6649 | 2.1442 | 17.3115 | 1.6593 | 1.4767 | 6.6513 | 7.1021 |
| 4.87016 | 11.4759 | 2.2346 | 14.9523 | 1.3625 | 1.5077 | 6.3066 | 6.4328 |
| 4.92569 | 10.6978 | 2.2429 | 15.2450 | 1.6229 | 1.2610 | 6.2139 | 6.3844 |
| 4.98185 | 11.5122 | 1.9986 | 14.4234 | 1.5442 | 1.2991 | 6.1555 | 6.3084 |
| 5.03865 | 10.7641 | 2.0466 | 13.4822 | 1.6895 | 1.2138 | 5.8392 | 5.8238 |
| 5.0961 | 11.0729 | 2.0125 | 11.1870 | 1.5684 | 1.1292 | 5.3940 | 5.2456 |
| 5.15421 | 10.0543 | 2.1794 | 10.1238 | 1.5260 | 1.1373 | 5.0041 | 4.6568 |
| 5.21298 | 9.6829 | 1.7614 | 11.7729 | 1.3928 | 0.8968 | 5.1014 | 5.1982 |
| 5.27242 | 9.3755 | 1.8735 | 9.7158 | 1.4594 | 0.9893 | 4.6827 | 4.4519 |
| 5.33253 | 10.0564 | 1.9429 | 9.4190 | 1.4654 | 0.9126 | 4.7593 | 4.5648 |
| 5.39333 | 10.2905 | 1.9221 | 10.1254 | 1.6471 | 0.7576 | 4.9485 | 4.8208 |
| 5.45482 | 10.2260 | 1.9291 | 9.4803 | 1.2656 | 0.8582 | 4.7518 | 4.6799 |
| 5.51702 | 9.4120 | 1.6850 | 10.0056 | 1.5926 | 0.7112 | 4.6813 | 4.6100 |
| 5.57992 | 8.9041 | 1.9220 | 9.4780 | 1.3565 | 0.7272 | 4.4776 | 4.3283 |
| 5.64354 | 9.5482 | 1.8176 | 7.6517 | 1.4291 | 0.6732 | 4.2239 | 4.0714 |
| 5.70789 | 9.5443 | 1.4625 | 7.6529 | 1.3383 | 0.6495 | 4.1295 | 4.1457 |
| 5.77297 | 8.2619 | 1.6502 | 6.3564 | 1.3382 | 0.9125 | 3.7038 | 3.3696 |
| 5.8388 | 8.0911 | 1.8106 | 8.8342 | 1.2898 | 0.6495 | 4.1350 | 3.9806 |
| 5.90537 | 7.8204 | 1.8516 | 9.2412 | 1.4412 | 0.7349 | 4.2179 | 3.9891 |
| 5.9727 | 8.3605 | 1.9286 | 7.8304 | 1.4171 | 0.6882 | 4.0450 | 3.7285 |
| 6.0408 | 8.4282 | 1.7272 | 6.9463 | 1.3443 | 0.6648 | 3.8222 | 3.5872 |
| 6.10968 | 9.1081 | 1.8733 | 8.0637 | 1.4957 | 0.8197 | 4.2721 | 3.9732 |
| 6.17934 | 9.4465 | 1.9984 | 9.4787 | 1.3807 | 0.7812 | 4.6171 | 4.4442 |
| 6.24979 | 8.7368 | 1.7550 | 7.7112 | 1.3141 | 0.6265 | 4.0287 | 3.8678 |
| 6.32105 | 9.4795 | 1.8316 | 7.6536 | 1.3141 | 0.6955 | 4.1949 | 4.0626 |
| 6.39313 | 7.2807 | 1.7621 | 7.0664 | 1.2959 | 0.7579 | 3.6326 | 3.2528 |
| 6.46602 | 7.6494 | 1.7194 | 7.8884 | 1.3020 | 0.8659 | 3.8850 | 3.5593 |
| 6.53974 | 8.3246 | 1.7963 | 7.5926 | 1.3262 | 0.7420 | 3.9563 | 3.6817 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 6.61431 | 7.7527 | 1.7894 | 7.9474 | 1.4170 | 0.8121 | 3.9437 | 3.5837 |
| 6.68972 | 8.4608 | 1.7549 | 8.4189 | 1.2535 | 0.8423 | 4.1461 | 3.9330 |
| 6.766 | 7.7874 | 1.9921 | 7.1818 | 1.2596 | 0.7815 | 3.8005 | 3.3974 |
| 6.84314 | 8.0901 | 1.8657 | 8.1823 | 1.1808 | 0.6572 | 3.9952 | 3.8045 |
| 6.92116 | 7.7532 | 1.4833 | 8.4166 | 1.3383 | 0.7661 | 3.9515 | 3.7900 |
| 7.00008 | 7.7194 | 1.6779 | 8.0083 | 1.2172 | 0.8430 | 3.8932 | 3.6382 |
| 7.07989 | 8.7709 | 1.6293 | 6.8286 | 1.1505 | 0.7269 | 3.8212 | 3.7100 |
| 7.16061 | 7.9892 | 1.7410 | 6.8868 | 1.1142 | 0.8276 | 3.7118 | 3.4397 |
| 7.24226 | 7.9565 | 1.5388 | 6.2397 | 1.1021 | 0.7814 | 3.5237 | 3.3298 |
| 7.32484 | 7.7191 | 1.9218 | 6.6526 | 0.9931 | 0.9050 | 3.6383 | 3.2845 |
| 7.40836 | 7.5831 | 1.6718 | 7.3571 | 1.1929 | 0.7892 | 3.7188 | 3.4396 |
| 7.49282 | 7.4815 | 1.6152 | 7.0661 | 1.0537 | 0.7505 | 3.5934 | 3.3772 |
| 7.57825 | 6.6023 | 1.4973 | 6.5334 | 0.9386 | 0.7196 | 3.2582 | 3.0346 |
| 7.66466 | 7.3123 | 1.8249 | 6.5354 | 1.1203 | 0.6422 | 3.4870 | 3.1774 |
| 7.75205 | 7.3806 | 1.5875 | 6.8886 | 1.1567 | 0.8890 | 3.5805 | 3.2587 |
| 7.84044 | 6.0925 | 1.6853 | 6.5344 | 1.1505 | 0.7347 | 3.2395 | 2.8306 |
| 7.92983 | 6.7024 | 1.4555 | 6.4168 | 1.0718 | 0.8277 | 3.2948 | 2.9904 |
| 8.02025 | 7.1760 | 1.6292 | 5.9470 | 0.9689 | 0.6803 | 3.2803 | 3.0462 |
| 8.11169 | 6.2645 | 1.3716 | 6.6537 | 0.9144 | 0.8431 | 3.2095 | 2.9766 |
| 8.20418 | 6.8395 | 1.3931 | 6.0055 | 1.0234 | 0.8433 | 3.2210 | 2.9441 |
| 8.29773 | 6.5356 | 1.4348 | 4.9457 | 0.8901 | 0.7501 | 2.9113 | 2.6557 |
| 8.39233 | 5.7886 | 1.5110 | 5.8283 | 1.0597 | 0.7577 | 2.9891 | 2.5877 |
| 8.48802 | 5.3154 | 1.4765 | 5.7095 | 0.9023 | 0.7427 | 2.8293 | 2.4685 |
| 8.5848 | 5.8208 | 1.1282 | 5.6529 | 0.9689 | 0.8352 | 2.8812 | 2.6096 |
| 8.68268 | 6.3979 | 1.2880 | 6.4751 | 0.9568 | 0.8588 | 3.1953 | 2.9632 |
| 8.78168 | 6.4327 | 1.2951 | 5.5324 | 0.8114 | 0.8119 | 2.9767 | 2.7694 |
| 8.88181 | 5.2465 | 1.1771 | 5.0628 | 0.8478 | 0.9279 | 2.6524 | 2.2883 |
| 8.98308 | 5.2498 | 1.4416 | 4.7659 | 0.7812 | 0.8585 | 2.6194 | 2.2019 |
| 9.0855 | 5.2803 | 1.2605 | 5.3564 | 0.7570 | 0.6962 | 2.6701 | 2.4276 |
| 9.18909 | 5.8900 | 1.4691 | 4.9445 | 0.9628 | 0.8276 | 2.8188 | 2.4074 |
| 9.29387 | 4.8411 | 1.2745 | 4.5323 | 0.8357 | 0.7420 | 2.4451 | 2.0590 |
| 9.39983 | 5.3499 | 1.1908 | 5.2996 | 0.6722 | 0.8507 | 2.6726 | 2.4283 |
| 9.50701 | 4.8077 | 1.2880 | 4.8866 | 0.6782 | 0.7805 | 2.4882 | 2.1659 |
| 9.61541 | 4.8418 | 1.0933 | 4.2391 | 0.6722 | 0.8352 | 2.3363 | 2.0289 |
| 9.72504 | 3.6210 | 0.8985 | 3.9446 | 0.7266 | 0.8199 | 2.0021 | 1.6307 |
| 9.83592 | 4.4680 | 1.0929 | 2.9437 | 0.7327 | 0.6497 | 1.9774 | 1.6756 |
| 9.94806 | 4.1294 | 1.1767 | 3.5897 | 0.5753 | 0.8192 | 2.0581 | 1.6693 |
| 10.0615 | 4.2305 | 1.0657 | 4.1808 | 0.5813 | 0.7574 | 2.1632 | 1.8727 |
| 10.1762 | 3.6911 | 1.0100 | 3.0031 | 0.6722 | 0.6419 | 1.8037 | 1.4371 |
| 10.2923 | 3.2838 | 0.9540 | 3.7670 | 0.5995 | 0.6879 | 1.8584 | 1.5368 |
| 10.4096 | 3.6219 | 0.8563 | 3.3551 | 0.5026 | 0.5957 | 1.7863 | 1.5621 |
| 10.5283 | 3.1480 | 0.8983 | 3.5928 | 0.5208 | 0.6880 | 1.7696 | 1.4759 |
| 10.6483 | 3.2156 | 0.8423 | 3.0030 | 0.4663 | 0.8117 | 1.6678 | 1.3263 |
| 10.7698 | 3.4552 | 0.8843 | 3.0597 | 0.4663 | 0.6961 | 1.7123 | 1.4251 |
| 10.8926 | 2.6066 | 0.7173 | 2.5313 | 0.4905 | 0.7040 | 1.4099 | 1.0622 |
| 11.0168 | 2.9127 | 0.7242 | 3.6506 | 0.4541 | 0.7192 | 1.6922 | 1.4783 |
| 11.1424 | 2.8111 | 0.7801 | 3.2370 | 0.4360 | 0.8350 | 1.6198 | 1.2997 |
| 11.2694 | 2.3690 | 0.7730 | 3.1204 | 0.4542 | 0.5798 | 1.4593 | 1.2085 |
| 11.3979 | 2.9112 | 0.7798 | 3.2379 | 0.4118 | 0.6881 | 1.6057 | 1.3526 |
| 11.5279 | 2.2355 | 0.5570 | 2.3533 | 0.3391 | 0.6034 | 1.2177 | 0.9888 |
| 11.6593 | 2.2021 | 0.7033 | 2.4728 | 0.3452 | 0.7264 | 1.2899 | 0.9728 |
| 11.7922 | 1.9975 | 0.6060 | 2.3538 | 0.4300 | 0.6421 | 1.2059 | 0.8978 |
| 11.9267 | 2.3349 | 0.5782 | 2.1183 | 0.2786 | 0.6420 | 1.1904 | 0.9589 |
| 12.0627 | 1.9978 | 0.5571 | 1.6483 | 0.3149 | 0.5957 | 1.0228 | 0.7487 |
| 12.2002 | 1.4896 | 0.4386 | 2.2368 | 0.3149 | 0.5717 | 1.0103 | 0.8272 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 12.3393 | 1.9644 | 0.4944 | 1.4727 | 0.2665 | 0.5027 | 0.9401 | 0.7377 |
| 12.4799 | 1.5908 | 0.3759 | 1.3546 | 0.3573 | 0.5721 | 0.8501 | 0.5805 |
| 12.6222 | 1.2863 | 0.4599 | 1.6491 | 0.2846 | 0.4794 | 0.8318 | 0.5993 |
| 12.7662 | 1.0831 | 0.4180 | 1.2365 | 0.2180 | 0.6106 | 0.7132 | 0.4340 |
| 12.9117 | 1.1166 | 0.4180 | 1.2359 | 0.2059 | 0.3556 | 0.6664 | 0.4737 |
| 13.0589 | 0.9825 | 0.2856 | 1.4133 | 0.1998 | 0.4019 | 0.6566 | 0.5220 |
| 13.2078 | 1.1167 | 0.4041 | 1.0590 | 0.1575 | 0.4714 | 0.6417 | 0.4242 |
| 13.3584 | 0.8130 | 0.2994 | 0.9421 | 0.1575 | 0.4405 | 0.5305 | 0.3354 |
| 13.5108 | 1.0496 | 0.2577 | 0.7650 | 0.1998 | 0.3868 | 0.5318 | 0.3636 |
| 13.6648 | 1.0155 | 0.2368 | 1.1181 | 0.1211 | 0.3633 | 0.5710 | 0.4621 |
| 13.8206 | 0.7788 | 0.2089 | 1.2370 | 0.1453 | 0.2709 | 0.5282 | 0.4690 |
| 13.9782 | 0.6776 | 0.1812 | 0.5893 | 0.1272 | 0.4173 | 0.3985 | 0.2426 |
| 14.1376 | 0.6766 | 0.2158 | 0.9424 | 0.0969 | 0.3247 | 0.4513 | 0.3497 |
| 14.2987 | 0.6433 | 0.1671 | 1.1182 | 0.0908 | 0.3095 | 0.4658 | 0.4217 |
| 14.4618 | 0.6092 | 0.1322 | 0.8830 | 0.1272 | 0.2704 | 0.4044 | 0.3316 |
| 14.6267 | 0.4741 | 0.1254 | 0.6476 | 0.0969 | 0.3326 | 0.3353 | 0.2333 |
| 14.7935 | 0.2027 | 0.1462 | 0.3533 | 0.0969 | 0.2396 | 0.2077 | 0.0979 |
| 14.9622 | 0.5417 | 0.1603 | 0.4124 | 0.0424 | 0.2090 | 0.2731 | 0.2010 |
| 15.1328 | 0.3048 | 0.1184 | 0.7072 | 0.1090 | 0.2551 | 0.2989 | 0.2436 |
| 15.3053 | 0.3721 | 0.0975 | 0.7649 | 0.0666 | 0.2012 | 0.3005 | 0.2857 |
| 15.4798 | 0.3721 | 0.0975 | 0.5893 | 0.0606 | 0.2473 | 0.2734 | 0.2159 |
| 15.6563 | 0.3387 | 0.1183 | 0.4124 | 0.0727 | 0.1626 | 0.2209 | 0.1470 |
| 15.8348 | 0.3384 | 0.1045 | 0.4709 | 0.0969 | 0.1625 | 0.2346 | 0.1641 |
| 16.0153 | 0.3721 | 0.0905 | 0.4706 | 0.0363 | 0.1936 | 0.2326 | 0.1846 |
| 16.1979 | 0.3050 | 0.0975 | 0.1179 | 0.0484 | 0.1624 | 0.1462 | 0.0977 |
| 16.3826 | 0.3052 | 0.0904 | 0.2356 | 0.0727 | 0.1855 | 0.1779 | 0.0979 |
| 16.5694 | 0.3388 | 0.0836 | 0.3532 | 0.0484 | 0.1546 | 0.1957 | 0.1425 |
| 16.7583 | 0.1015 | 0.0487 | 0.2351 | 0.0666 | 0.1160 | 0.1136 | 0.0730 |
| 16.9494 | 0.0677 | 0.0418 | 0.2942 | 0.0545 | 0.1238 | 0.1164 | 0.1042 |
| 17.1427 | 0.0680 | 0.0556 | 0.0590 | 0.0242 | 0.0929 | 0.0599 | 0.0247 |
| 17.3381 | 0.1356 | 0.0418 | 0.1765 | 0.0121 | 0.0696 | 0.0871 | 0.0677 |
| 17.5358 | 0.1693 | 0.0418 | 0.2947 | 0.0484 | 0.0851 | 0.1279 | 0.1062 |
| 17.7358 | 0.0000 | 0.0418 | 0.1176 | 0.0182 | 0.0774 | 0.0510 | 0.0472 |
| 17.938 | 0.1357 | 0.0627 | 0.1178 | 0.0182 | 0.1004 | 0.0870 | 0.0470 |
| 18.1425 | 0.0339 | 0.0487 | 0.1175 | 0.0182 | 0.0697 | 0.0576 | 0.0385 |
| 18.3494 | 0.1016 | 0.0070 | 0.0587 | 0.0303 | 0.1083 | 0.0612 | 0.0440 |
| 18.5586 | 0.1016 | 0.0557 | 0.1179 | 0.0303 | 0.0309 | 0.0673 | 0.0405 |
| 18.7702 | 0.1356 | 0.0279 | 0.2352 | 0.0121 | 0.0926 | 0.1007 | 0.0902 |
| 18.9842 | 0.1013 | 0.0348 | 0.1176 | 0.0121 | 0.0541 | 0.0640 | 0.0445 |
| 19.2006 | 0.1356 | 0.0209 | 0.1177 | 0.0363 | 0.0309 | 0.0683 | 0.0539 |
| 19.4196 | 0.1693 | 0.0070 | 0.0589 | 0.0000 | 0.0464 | 0.0563 | 0.0679 |
| 19.641 | 0.0679 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0303 | 0.0310 | 0.0286 | 0.0254 |
| 19.8649 | 0.0337 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0242 | 0.0465 | 0.0223 | 0.0190 |
| 20.0914 | 0.0000 | 0.0070 | 0.1179 | 0.0121 | 0.0309 | 0.0336 | 0.0485 |
| 20.3205 | 0.1014 | 0.0209 | 0.0587 | 0.0000 | 0.0309 | 0.0424 | 0.0392 |
| 20.5522 | 0.0340 | 0.0139 | 0.0589 | 0.0061 | 0.0231 | 0.0272 | 0.0205 |
| 20.7865 | 0.0677 | 0.0139 | 0.0589 | 0.0182 | 0.0000 | 0.0317 | 0.0297 |
| 21.0235 | 0.0676 | 0.0069 | 0.0587 | 0.0061 | 0.0078 | 0.0294 | 0.0310 |
| 21.2632 | 0.0337 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0077 | 0.0135 | 0.0125 |
| 21.5057 | 0.0676 | 0.0209 | 0.0000 | 0.0242 | 0.0309 | 0.0287 | 0.0246 |
| 21.7509 | 0.1014 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0155 | 0.0248 | 0.0433 |
| 21.9988 | 0.0340 | 0.0069 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0232 | 0.0152 | 0.0135 |
| 22.2497 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0154 | 0.0043 | 0.0068 |
| 22.5034 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0078 | 0.0096 | 0.0141 |
| 22.76 | 0.1019 | 0.0209 | 0.1178 | 0.0061 | 0.0077 | 0.0509 | 0.0544 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 23.0195 | 0.0337 | 0.0069 | 0.0590 | 0.0061 | 0.0155 | 0.0243 | 0.0224 |
| 23.2819 | 0.0338 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0096 | 0.0149 |
| 23.5474 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0000 | 0.0038 | 0.0055 |
| 23.8159 | 0.0000 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0061 |
| 24.0875 | 0.1020 | 0.0139 | 0.0587 | 0.0121 | 0.0077 | 0.0389 | 0.0409 |
| 24.3621 | 0.0677 | 0.0070 | 0.0587 | 0.0061 | 0.0078 | 0.0294 | 0.0310 |
| 24.6399 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0026 | 0.0036 |
| 24.9207 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0029 | 0.0040 |
| 25.2049 | 0.0676 | 0.0139 | 0.1177 | 0.0061 | 0.0155 | 0.0442 | 0.0478 |
| 25.4923 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0068 | 0.0152 |
| 25.7829 | 0.0338 | 0.0139 | 0.1180 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0344 | 0.0485 |
| 26.0769 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0015 | 0.0035 |
| 26.3743 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0015 | 0.0034 |
| 26.675 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0182 | 0.0000 | 0.0036 | 0.0081 |
| 26.9791 | 0.0340 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0097 | 0.0140 |
| 27.2868 | 0.1015 | 0.0139 | 0.0589 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0364 | 0.0430 |
| 27.5979 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0590 | 0.0121 | 0.0078 | 0.0226 | 0.0240 |
| 27.9125 | 0.0000 | 0.0279 | 0.0590 | 0.0000 | 0.0155 | 0.0205 | 0.0245 |
| 28.2308 | 0.0000 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0061 |
| 28.5527 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0589 | 0.0121 | 0.0000 | 0.0156 | 0.0247 |
| 28.8782 | 0.0000 | 0.0348 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0082 | 0.0151 |
| 29.2075 | 0.0000 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0043 | 0.0063 |
| 29.5405 | 0.0000 | 0.0069 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0026 | 0.0036 |
| 29.8773 | 0.0338 | 0.0209 | 0.0587 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0242 | 0.0232 |
| 30.2179 | 0.0674 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0135 | 0.0302 |
| 30.5625 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0000 | 0.0024 | 0.0054 |
| 30.911 | 0.0339 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0111 | 0.0140 |
| 31.2634 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0029 | 0.0040 |
| 31.6198 | 0.0000 | 0.0139 | 0.1178 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0263 | 0.0515 |
| 31.9804 | 0.0679 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0155 | 0.0207 | 0.0271 |
| 32.345 | 0.0339 | 0.0208 | 0.0590 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0227 | 0.0249 |
| 32.7138 | 0.0340 | 0.0278 | 0.0590 | 0.0061 | 0.0078 | 0.0269 | 0.0217 |
| 33.0868 | 0.0000 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0028 | 0.0062 |
| 33.4641 | 0.0338 | 0.0000 | 0.0587 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0185 | 0.0268 |
| 33.8456 | 0.0338 | 0.0069 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0082 | 0.0147 |
| 34.2315 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0155 | 0.0045 | 0.0068 |
| 34.6218 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0154 | 0.0099 | 0.0150 |
| 35.0165 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 35.4158 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0027 |
| 35.8197 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 36.2281 | 0.0677 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0151 | 0.0296 |
| 36.6411 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0016 | 0.0035 |
| 37.0589 | 0.0337 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0083 | 0.0146 |
| 37.4814 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 37.9088 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 38.341 | 0.0340 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0097 | 0.0140 |
| 38.7782 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 39.2203 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 39.6675 | 0.0000 | 0.0069 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0000 | 0.0038 | 0.0055 |
| 40.1198 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0015 | 0.0034 |
| 40.5772 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0027 |
| 41.0399 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 41.5078 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 41.9811 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0068 | 0.0152 |
| 42.4597 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 42.9439 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 43.4335 | 0.0338 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0083 | 0.0147 |
| 43.9287 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 44.4296 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 44.9362 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 45.4485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 45.9667 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 46.4908 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0078 | 0.0028 | 0.0038 |
| 47.0209 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0015 | 0.0035 |
| 47.557 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 48.0993 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 48.6477 | 0.0339 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0068 | 0.0152 |
| 49.2024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.7633 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.3307 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.9046 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 51.485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.0721 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.6658 | 0.0000 | 0.0069 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0014 | 0.0031 |
| 53.2662 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.8735 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 54.4878 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.1091 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.7375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 56.3729 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.0157 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.6658 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.3233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.9883 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 59.6608 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

| Distribución de tamaño de partícula | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Volumen de partículas (mL/m ³) del efluente de lodos activados | | | | | | | |
| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
| 2.01137 | 0.0048 | 0.0030 | 0.0022 | 0.0024 | 0.0038 | 0.0032 | 0.0011 |
| 2.0343 | 0.0048 | 0.0031 | 0.0024 | 0.0028 | 0.0042 | 0.0035 | 0.0010 |
| 2.0575 | 0.0046 | 0.0030 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0040 | 0.0033 | 0.0009 |
| 2.08096 | 0.0044 | 0.0030 | 0.0021 | 0.0027 | 0.0040 | 0.0032 | 0.0009 |
| 2.10469 | 0.0045 | 0.0028 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0039 | 0.0033 | 0.0009 |
| 2.12868 | 0.0044 | 0.0030 | 0.0022 | 0.0026 | 0.0039 | 0.0032 | 0.0009 |
| 2.15295 | 0.0043 | 0.0028 | 0.0021 | 0.0027 | 0.0037 | 0.0031 | 0.0009 |
| 2.1775 | 0.0041 | 0.0027 | 0.0021 | 0.0024 | 0.0036 | 0.0030 | 0.0008 |
| 2.20233 | 0.0041 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0035 | 0.0029 | 0.0008 |
| 2.22744 | 0.0039 | 0.0026 | 0.0019 | 0.0025 | 0.0033 | 0.0029 | 0.0008 |
| 2.25283 | 0.0038 | 0.0026 | 0.0019 | 0.0025 | 0.0032 | 0.0028 | 0.0007 |
| 2.27852 | 0.0038 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0033 | 0.0028 | 0.0007 |
| 2.3045 | 0.0038 | 0.0027 | 0.0019 | 0.0026 | 0.0032 | 0.0028 | 0.0007 |
| 2.33078 | 0.0039 | 0.0026 | 0.0019 | 0.0023 | 0.0031 | 0.0028 | 0.0008 |
| 2.35735 | 0.0037 | 0.0026 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0030 | 0.0027 | 0.0007 |
| 2.38423 | 0.0036 | 0.0024 | 0.0018 | 0.0024 | 0.0032 | 0.0027 | 0.0007 |
| 2.41141 | 0.0036 | 0.0026 | 0.0017 | 0.0024 | 0.0030 | 0.0027 | 0.0007 |
| 2.43891 | 0.0035 | 0.0025 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0025 | 0.0007 |
| 2.46672 | 0.0036 | 0.0024 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0028 | 0.0026 | 0.0007 |
| 2.49484 | 0.0034 | 0.0025 | 0.0019 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0025 | 0.0006 |
| 2.52328 | 0.0034 | 0.0025 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0028 | 0.0025 | 0.0006 |
| 2.55205 | 0.0034 | 0.0023 | 0.0017 | 0.0022 | 0.0024 | 0.0024 | 0.0006 |
| 2.58115 | 0.0034 | 0.0024 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0006 |
| 2.61059 | 0.0033 | 0.0024 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0006 |
| 2.64035 | 0.0033 | 0.0026 | 0.0018 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0025 | 0.0006 |
| 2.67046 | 0.0035 | 0.0025 | 0.0019 | 0.0022 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0006 |
| 2.70091 | 0.0033 | 0.0025 | 0.0018 | 0.0021 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0006 |
| 2.7317 | 0.0031 | 0.0023 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0005 |
| 2.76285 | 0.0029 | 0.0023 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0022 | 0.0023 | 0.0004 |
| 2.79435 | 0.0030 | 0.0026 | 0.0018 | 0.0023 | 0.0024 | 0.0024 | 0.0004 |
| 2.8262 | 0.0032 | 0.0025 | 0.0019 | 0.0022 | 0.0022 | 0.0024 | 0.0005 |
| 2.85843 | 0.0032 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0024 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0005 |
| 2.89102 | 0.0033 | 0.0029 | 0.0019 | 0.0024 | 0.0021 | 0.0026 | 0.0006 |
| 2.92399 | 0.0033 | 0.0027 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0022 | 0.0025 | 0.0005 |
| 2.95733 | 0.0032 | 0.0026 | 0.0021 | 0.0023 | 0.0022 | 0.0025 | 0.0005 |
| 2.99105 | 0.0031 | 0.0028 | 0.0022 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0025 | 0.0004 |
| 3.02515 | 0.0034 | 0.0028 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0005 |
| 3.05964 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0021 | 0.0026 | 0.0005 |
| 3.09453 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0025 | 0.0026 | 0.0021 | 0.0027 | 0.0004 |
| 3.12981 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0028 | 0.0025 | 0.0021 | 0.0028 | 0.0005 |
| 3.16549 | 0.0032 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0029 | 0.0005 |
| 3.20159 | 0.0035 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0026 | 0.0024 | 0.0030 | 0.0005 |
| 3.23809 | 0.0033 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0027 | 0.0022 | 0.0030 | 0.0005 |
| 3.27501 | 0.0034 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0028 | 0.0023 | 0.0031 | 0.0005 |
| 3.31235 | 0.0032 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0029 | 0.0024 | 0.0031 | 0.0005 |
| 3.35012 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0043 | 0.0029 | 0.0025 | 0.0033 | 0.0007 |
| 3.38832 | 0.0032 | 0.0038 | 0.0047 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0035 | 0.0008 |
| 3.42695 | 0.0032 | 0.0038 | 0.0049 | 0.0027 | 0.0030 | 0.0035 | 0.0009 |
| 3.46602 | 0.0036 | 0.0038 | 0.0055 | 0.0026 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0011 |
| 3.50554 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0058 | 0.0027 | 0.0031 | 0.0039 | 0.0012 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 3.54551 | 0.0033 | 0.0045 | 0.0060 | 0.0029 | 0.0032 | 0.0040 | 0.0013 |
| 3.58594 | 0.0034 | 0.0048 | 0.0066 | 0.0030 | 0.0029 | 0.0041 | 0.0016 |
| 3.62682 | 0.0033 | 0.0047 | 0.0066 | 0.0029 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0014 |
| 3.66818 | 0.0034 | 0.0052 | 0.0071 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0045 | 0.0017 |
| 3.71 | 0.0035 | 0.0049 | 0.0076 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0046 | 0.0018 |
| 3.7523 | 0.0035 | 0.0054 | 0.0084 | 0.0031 | 0.0041 | 0.0049 | 0.0022 |
| 3.79508 | 0.0037 | 0.0059 | 0.0090 | 0.0028 | 0.0041 | 0.0051 | 0.0024 |
| 3.83835 | 0.0036 | 0.0058 | 0.0097 | 0.0032 | 0.0042 | 0.0053 | 0.0026 |
| 3.88212 | 0.0038 | 0.0058 | 0.0090 | 0.0033 | 0.0047 | 0.0053 | 0.0023 |
| 3.92638 | 0.0037 | 0.0058 | 0.0096 | 0.0032 | 0.0045 | 0.0054 | 0.0026 |
| 3.97115 | 0.0036 | 0.0056 | 0.0096 | 0.0032 | 0.0045 | 0.0053 | 0.0026 |
| 4.01643 | 0.0037 | 0.0059 | 0.0098 | 0.0031 | 0.0048 | 0.0055 | 0.0026 |
| 4.06222 | 0.0037 | 0.0065 | 0.0102 | 0.0033 | 0.0051 | 0.0058 | 0.0028 |
| 4.10853 | 0.0036 | 0.0060 | 0.0101 | 0.0036 | 0.0048 | 0.0056 | 0.0027 |
| 4.15538 | 0.0039 | 0.0069 | 0.0105 | 0.0038 | 0.0053 | 0.0061 | 0.0028 |
| 4.20276 | 0.0040 | 0.0064 | 0.0098 | 0.0035 | 0.0050 | 0.0058 | 0.0025 |
| 4.25068 | 0.0037 | 0.0068 | 0.0090 | 0.0035 | 0.0049 | 0.0056 | 0.0023 |
| 4.29915 | 0.0044 | 0.0059 | 0.0095 | 0.0045 | 0.0051 | 0.0059 | 0.0021 |
| 4.34817 | 0.0044 | 0.0059 | 0.0085 | 0.0038 | 0.0051 | 0.0055 | 0.0018 |
| 4.39774 | 0.0039 | 0.0065 | 0.0090 | 0.0040 | 0.0049 | 0.0056 | 0.0021 |
| 4.44788 | 0.0046 | 0.0061 | 0.0083 | 0.0039 | 0.0047 | 0.0055 | 0.0017 |
| 4.4986 | 0.0040 | 0.0062 | 0.0076 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0052 | 0.0016 |
| 4.54989 | 0.0044 | 0.0059 | 0.0077 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0052 | 0.0016 |
| 4.60177 | 0.0041 | 0.0061 | 0.0072 | 0.0047 | 0.0041 | 0.0052 | 0.0014 |
| 4.65423 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0059 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0049 | 0.0008 |
| 4.7073 | 0.0049 | 0.0056 | 0.0058 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0049 | 0.0008 |
| 4.76097 | 0.0047 | 0.0060 | 0.0061 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0051 | 0.0010 |
| 4.81526 | 0.0042 | 0.0054 | 0.0053 | 0.0049 | 0.0034 | 0.0047 | 0.0008 |
| 4.87016 | 0.0047 | 0.0058 | 0.0047 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0046 | 0.0008 |
| 4.92569 | 0.0045 | 0.0060 | 0.0050 | 0.0051 | 0.0031 | 0.0048 | 0.0011 |
| 4.98185 | 0.0051 | 0.0056 | 0.0049 | 0.0051 | 0.0033 | 0.0048 | 0.0008 |
| 5.03865 | 0.0049 | 0.0059 | 0.0047 | 0.0057 | 0.0032 | 0.0049 | 0.0011 |
| 5.0961 | 0.0052 | 0.0060 | 0.0041 | 0.0055 | 0.0031 | 0.0048 | 0.0012 |
| 5.15421 | 0.0049 | 0.0067 | 0.0038 | 0.0055 | 0.0032 | 0.0048 | 0.0014 |
| 5.21298 | 0.0049 | 0.0056 | 0.0046 | 0.0052 | 0.0026 | 0.0046 | 0.0012 |
| 5.27242 | 0.0049 | 0.0062 | 0.0039 | 0.0057 | 0.0030 | 0.0047 | 0.0013 |
| 5.33253 | 0.0054 | 0.0066 | 0.0039 | 0.0059 | 0.0029 | 0.0050 | 0.0015 |
| 5.39333 | 0.0057 | 0.0068 | 0.0044 | 0.0068 | 0.0025 | 0.0052 | 0.0018 |
| 5.45482 | 0.0059 | 0.0071 | 0.0042 | 0.0054 | 0.0029 | 0.0051 | 0.0016 |
| 5.51702 | 0.0056 | 0.0064 | 0.0046 | 0.0071 | 0.0025 | 0.0052 | 0.0018 |
| 5.57992 | 0.0055 | 0.0075 | 0.0045 | 0.0062 | 0.0026 | 0.0053 | 0.0018 |
| 5.64354 | 0.0061 | 0.0074 | 0.0038 | 0.0068 | 0.0025 | 0.0053 | 0.0021 |
| 5.70789 | 0.0063 | 0.0061 | 0.0039 | 0.0066 | 0.0025 | 0.0051 | 0.0018 |
| 5.77297 | 0.0057 | 0.0072 | 0.0034 | 0.0068 | 0.0037 | 0.0053 | 0.0018 |
| 5.8388 | 0.0057 | 0.0081 | 0.0048 | 0.0068 | 0.0027 | 0.0056 | 0.0021 |
| 5.90537 | 0.0057 | 0.0086 | 0.0052 | 0.0079 | 0.0032 | 0.0061 | 0.0022 |
| 5.9727 | 0.0063 | 0.0093 | 0.0046 | 0.0080 | 0.0031 | 0.0062 | 0.0025 |
| 6.0408 | 0.0066 | 0.0086 | 0.0042 | 0.0078 | 0.0031 | 0.0061 | 0.0024 |
| 6.10968 | 0.0074 | 0.0096 | 0.0050 | 0.0090 | 0.0039 | 0.0070 | 0.0025 |
| 6.17934 | 0.0079 | 0.0106 | 0.0061 | 0.0086 | 0.0038 | 0.0074 | 0.0026 |
| 6.24979 | 0.0076 | 0.0097 | 0.0052 | 0.0085 | 0.0032 | 0.0068 | 0.0026 |
| 6.32105 | 0.0085 | 0.0104 | 0.0053 | 0.0088 | 0.0037 | 0.0073 | 0.0028 |
| 6.39313 | 0.0068 | 0.0104 | 0.0051 | 0.0090 | 0.0041 | 0.0071 | 0.0026 |
| 6.46602 | 0.0074 | 0.0105 | 0.0058 | 0.0093 | 0.0049 | 0.0076 | 0.0023 |
| 6.53974 | 0.0083 | 0.0113 | 0.0058 | 0.0098 | 0.0043 | 0.0079 | 0.0029 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 6.61431 | 0.0080 | 0.0117 | 0.0063 | 0.0109 | 0.0049 | 0.0083 | 0.0029 |
| 6.68972 | 0.0090 | 0.0118 | 0.0069 | 0.0099 | 0.0053 | 0.0086 | 0.0026 |
| 6.766 | 0.0086 | 0.0139 | 0.0061 | 0.0103 | 0.0050 | 0.0088 | 0.0035 |
| 6.84314 | 0.0092 | 0.0135 | 0.0072 | 0.0100 | 0.0044 | 0.0089 | 0.0034 |
| 6.92116 | 0.0091 | 0.0111 | 0.0077 | 0.0118 | 0.0053 | 0.0090 | 0.0026 |
| 7.00008 | 0.0094 | 0.0130 | 0.0075 | 0.0111 | 0.0060 | 0.0094 | 0.0028 |
| 7.07989 | 0.0111 | 0.0130 | 0.0066 | 0.0108 | 0.0054 | 0.0094 | 0.0032 |
| 7.16061 | 0.0104 | 0.0144 | 0.0069 | 0.0108 | 0.0063 | 0.0098 | 0.0033 |
| 7.24226 | 0.0107 | 0.0132 | 0.0065 | 0.0111 | 0.0062 | 0.0095 | 0.0031 |
| 7.32484 | 0.0108 | 0.0170 | 0.0072 | 0.0103 | 0.0074 | 0.0105 | 0.0040 |
| 7.40836 | 0.0110 | 0.0153 | 0.0082 | 0.0128 | 0.0067 | 0.0108 | 0.0035 |
| 7.49282 | 0.0112 | 0.0153 | 0.0082 | 0.0117 | 0.0066 | 0.0106 | 0.0034 |
| 7.57825 | 0.0102 | 0.0147 | 0.0078 | 0.0108 | 0.0065 | 0.0100 | 0.0031 |
| 7.66466 | 0.0117 | 0.0185 | 0.0081 | 0.0134 | 0.0060 | 0.0115 | 0.0049 |
| 7.75205 | 0.0122 | 0.0167 | 0.0088 | 0.0143 | 0.0086 | 0.0121 | 0.0035 |
| 7.84044 | 0.0104 | 0.0183 | 0.0086 | 0.0147 | 0.0074 | 0.0119 | 0.0045 |
| 7.92983 | 0.0119 | 0.0164 | 0.0088 | 0.0142 | 0.0086 | 0.0120 | 0.0034 |
| 8.02025 | 0.0132 | 0.0189 | 0.0084 | 0.0132 | 0.0073 | 0.0122 | 0.0046 |
| 8.11169 | 0.0119 | 0.0165 | 0.0097 | 0.0129 | 0.0094 | 0.0121 | 0.0029 |
| 8.20418 | 0.0134 | 0.0173 | 0.0091 | 0.0150 | 0.0097 | 0.0129 | 0.0035 |
| 8.29773 | 0.0133 | 0.0185 | 0.0078 | 0.0135 | 0.0089 | 0.0124 | 0.0043 |
| 8.39233 | 0.0122 | 0.0201 | 0.0095 | 0.0166 | 0.0093 | 0.0135 | 0.0047 |
| 8.48802 | 0.0116 | 0.0204 | 0.0096 | 0.0146 | 0.0095 | 0.0131 | 0.0046 |
| 8.5848 | 0.0131 | 0.0161 | 0.0098 | 0.0162 | 0.0110 | 0.0132 | 0.0029 |
| 8.68268 | 0.0149 | 0.0190 | 0.0116 | 0.0166 | 0.0117 | 0.0148 | 0.0032 |
| 8.78168 | 0.0155 | 0.0198 | 0.0103 | 0.0146 | 0.0115 | 0.0143 | 0.0037 |
| 8.88181 | 0.0131 | 0.0186 | 0.0097 | 0.0157 | 0.0136 | 0.0141 | 0.0033 |
| 8.98308 | 0.0135 | 0.0236 | 0.0095 | 0.0150 | 0.0130 | 0.0149 | 0.0052 |
| 9.0855 | 0.0141 | 0.0213 | 0.0110 | 0.0150 | 0.0109 | 0.0145 | 0.0042 |
| 9.18909 | 0.0162 | 0.0257 | 0.0105 | 0.0198 | 0.0134 | 0.0171 | 0.0059 |
| 9.29387 | 0.0138 | 0.0231 | 0.0100 | 0.0178 | 0.0124 | 0.0154 | 0.0051 |
| 9.39983 | 0.0158 | 0.0223 | 0.0121 | 0.0148 | 0.0147 | 0.0159 | 0.0038 |
| 9.50701 | 0.0147 | 0.0249 | 0.0115 | 0.0154 | 0.0140 | 0.0161 | 0.0052 |
| 9.61541 | 0.0153 | 0.0219 | 0.0103 | 0.0158 | 0.0155 | 0.0158 | 0.0041 |
| 9.72504 | 0.0118 | 0.0186 | 0.0100 | 0.0177 | 0.0157 | 0.0148 | 0.0037 |
| 9.83592 | 0.0151 | 0.0234 | 0.0077 | 0.0185 | 0.0129 | 0.0155 | 0.0059 |
| 9.94806 | 0.0145 | 0.0261 | 0.0097 | 0.0150 | 0.0168 | 0.0164 | 0.0060 |
| 10.0615 | 0.0153 | 0.0245 | 0.0117 | 0.0157 | 0.0161 | 0.0166 | 0.0047 |
| 10.1762 | 0.0138 | 0.0240 | 0.0087 | 0.0188 | 0.0141 | 0.0159 | 0.0058 |
| 10.2923 | 0.0127 | 0.0234 | 0.0113 | 0.0173 | 0.0156 | 0.0161 | 0.0048 |
| 10.4096 | 0.0145 | 0.0218 | 0.0104 | 0.0150 | 0.0140 | 0.0151 | 0.0041 |
| 10.5283 | 0.0131 | 0.0236 | 0.0115 | 0.0161 | 0.0167 | 0.0162 | 0.0047 |
| 10.6483 | 0.0138 | 0.0229 | 0.0099 | 0.0149 | 0.0204 | 0.0164 | 0.0052 |
| 10.7698 | 0.0153 | 0.0249 | 0.0105 | 0.0154 | 0.0181 | 0.0169 | 0.0053 |
| 10.8926 | 0.0120 | 0.0209 | 0.0090 | 0.0168 | 0.0190 | 0.0155 | 0.0049 |
| 11.0168 | 0.0138 | 0.0218 | 0.0134 | 0.0161 | 0.0200 | 0.0170 | 0.0038 |
| 11.1424 | 0.0138 | 0.0243 | 0.0123 | 0.0160 | 0.0241 | 0.0181 | 0.0057 |
| 11.2694 | 0.0121 | 0.0249 | 0.0123 | 0.0172 | 0.0173 | 0.0168 | 0.0052 |
| 11.3979 | 0.0153 | 0.0260 | 0.0132 | 0.0162 | 0.0212 | 0.0184 | 0.0052 |
| 11.5279 | 0.0122 | 0.0192 | 0.0099 | 0.0138 | 0.0193 | 0.0149 | 0.0042 |
| 11.6593 | 0.0124 | 0.0251 | 0.0108 | 0.0145 | 0.0240 | 0.0174 | 0.0067 |
| 11.7922 | 0.0116 | 0.0224 | 0.0106 | 0.0187 | 0.0219 | 0.0170 | 0.0056 |
| 11.9267 | 0.0141 | 0.0221 | 0.0099 | 0.0125 | 0.0227 | 0.0163 | 0.0058 |
| 12.0627 | 0.0125 | 0.0220 | 0.0079 | 0.0146 | 0.0218 | 0.0158 | 0.0061 |
| 12.2002 | 0.0096 | 0.0180 | 0.0111 | 0.0151 | 0.0216 | 0.0151 | 0.0049 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 12.3393 | 0.0131 | 0.0209 | 0.0076 | 0.0133 | 0.0197 | 0.0149 | 0.0054 |
| 12.4799 | 0.0110 | 0.0165 | 0.0072 | 0.0184 | 0.0232 | 0.0153 | 0.0063 |
| 12.6222 | 0.0092 | 0.0208 | 0.0091 | 0.0152 | 0.0201 | 0.0149 | 0.0057 |
| 12.7662 | 0.0080 | 0.0196 | 0.0071 | 0.0120 | 0.0265 | 0.0146 | 0.0083 |
| 12.9117 | 0.0085 | 0.0203 | 0.0073 | 0.0117 | 0.0160 | 0.0128 | 0.0054 |
| 13.0589 | 0.0078 | 0.0143 | 0.0086 | 0.0118 | 0.0187 | 0.0122 | 0.0044 |
| 13.2078 | 0.0091 | 0.0210 | 0.0067 | 0.0096 | 0.0226 | 0.0138 | 0.0074 |
| 13.3584 | 0.0069 | 0.0161 | 0.0062 | 0.0099 | 0.0219 | 0.0122 | 0.0067 |
| 13.5108 | 0.0092 | 0.0143 | 0.0052 | 0.0131 | 0.0199 | 0.0123 | 0.0055 |
| 13.6648 | 0.0092 | 0.0136 | 0.0078 | 0.0082 | 0.0193 | 0.0116 | 0.0049 |
| 13.8206 | 0.0073 | 0.0124 | 0.0090 | 0.0102 | 0.0149 | 0.0108 | 0.0030 |
| 13.9782 | 0.0066 | 0.0112 | 0.0044 | 0.0092 | 0.0238 | 0.0110 | 0.0076 |
| 14.1376 | 0.0068 | 0.0137 | 0.0073 | 0.0073 | 0.0191 | 0.0108 | 0.0054 |
| 14.2987 | 0.0067 | 0.0110 | 0.0090 | 0.0070 | 0.0189 | 0.0105 | 0.0050 |
| 14.4618 | 0.0065 | 0.0090 | 0.0073 | 0.0102 | 0.0170 | 0.0100 | 0.0042 |
| 14.6267 | 0.0053 | 0.0088 | 0.0056 | 0.0080 | 0.0217 | 0.0099 | 0.0068 |
| 14.7935 | 0.0023 | 0.0107 | 0.0031 | 0.0083 | 0.0162 | 0.0081 | 0.0057 |
| 14.9622 | 0.0064 | 0.0121 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0146 | 0.0081 | 0.0050 |
| 15.1328 | 0.0038 | 0.0093 | 0.0067 | 0.0100 | 0.0184 | 0.0096 | 0.0055 |
| 15.3053 | 0.0047 | 0.0079 | 0.0075 | 0.0063 | 0.0150 | 0.0083 | 0.0040 |
| 15.4798 | 0.0049 | 0.0081 | 0.0060 | 0.0060 | 0.0191 | 0.0088 | 0.0059 |
| 15.6563 | 0.0046 | 0.0102 | 0.0043 | 0.0074 | 0.0130 | 0.0079 | 0.0037 |
| 15.8348 | 0.0048 | 0.0094 | 0.0051 | 0.0102 | 0.0134 | 0.0086 | 0.0036 |
| 16.0153 | 0.0054 | 0.0084 | 0.0053 | 0.0040 | 0.0166 | 0.0079 | 0.0051 |
| 16.1979 | 0.0046 | 0.0093 | 0.0014 | 0.0055 | 0.0144 | 0.0070 | 0.0050 |
| 16.3826 | 0.0048 | 0.0090 | 0.0028 | 0.0085 | 0.0170 | 0.0084 | 0.0054 |
| 16.5694 | 0.0055 | 0.0086 | 0.0044 | 0.0058 | 0.0147 | 0.0078 | 0.0041 |
| 16.7583 | 0.0017 | 0.0052 | 0.0030 | 0.0083 | 0.0114 | 0.0059 | 0.0039 |
| 16.9494 | 0.0012 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0070 | 0.0126 | 0.0059 | 0.0043 |
| 17.1427 | 0.0012 | 0.0063 | 0.0008 | 0.0032 | 0.0097 | 0.0043 | 0.0038 |
| 17.3381 | 0.0025 | 0.0049 | 0.0025 | 0.0017 | 0.0076 | 0.0038 | 0.0024 |
| 17.5358 | 0.0032 | 0.0051 | 0.0044 | 0.0069 | 0.0096 | 0.0058 | 0.0025 |
| 17.7358 | 0.0000 | 0.0053 | 0.0018 | 0.0027 | 0.0090 | 0.0037 | 0.0035 |
| 17.938 | 0.0028 | 0.0082 | 0.0019 | 0.0028 | 0.0121 | 0.0055 | 0.0044 |
| 18.1425 | 0.0007 | 0.0066 | 0.0019 | 0.0029 | 0.0087 | 0.0041 | 0.0033 |
| 18.3494 | 0.0022 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0050 | 0.0139 | 0.0046 | 0.0055 |
| 18.5586 | 0.0023 | 0.0080 | 0.0021 | 0.0051 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0024 |
| 18.7702 | 0.0032 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0021 | 0.0128 | 0.0053 | 0.0043 |
| 18.9842 | 0.0025 | 0.0054 | 0.0022 | 0.0022 | 0.0077 | 0.0040 | 0.0025 |
| 19.2006 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0023 | 0.0068 | 0.0046 | 0.0041 | 0.0017 |
| 19.4196 | 0.0044 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0000 | 0.0071 | 0.0028 | 0.0029 |
| 19.641 | 0.0018 | 0.0024 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0049 | 0.0030 | 0.0024 |
| 19.8649 | 0.0009 | 0.0012 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0076 | 0.0030 | 0.0032 |
| 20.0914 | 0.0000 | 0.0013 | 0.0026 | 0.0026 | 0.0052 | 0.0023 | 0.0019 |
| 20.3205 | 0.0030 | 0.0040 | 0.0014 | 0.0000 | 0.0054 | 0.0027 | 0.0021 |
| 20.5522 | 0.0010 | 0.0027 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0042 | 0.0021 | 0.0013 |
| 20.7865 | 0.0022 | 0.0028 | 0.0014 | 0.0043 | 0.0000 | 0.0022 | 0.0016 |
| 21.0235 | 0.0022 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0003 |
| 21.2632 | 0.0012 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0031 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0013 |
| 21.5057 | 0.0024 | 0.0047 | 0.0000 | 0.0064 | 0.0064 | 0.0040 | 0.0028 |
| 21.7509 | 0.0037 | 0.0016 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0033 | 0.0017 | 0.0018 |
| 21.9988 | 0.0013 | 0.0017 | 0.0000 | 0.0034 | 0.0051 | 0.0023 | 0.0020 |
| 22.2497 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0018 | 0.0035 | 0.0011 | 0.0016 |
| 22.5034 | 0.0014 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0010 | 0.0009 |
| 22.76 | 0.0043 | 0.0055 | 0.0038 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0035 | 0.0016 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 23.0195 | 0.0015 | 0.0019 | 0.0020 | 0.0020 | 0.0039 | 0.0022 | 0.0010 |
| 23.2819 | 0.0015 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0011 | 0.0017 |
| 23.5474 | 0.0000 | 0.0021 | 0.0000 | 0.0042 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0019 |
| 23.8159 | 0.0000 | 0.0042 | 0.0000 | 0.0022 | 0.0000 | 0.0013 | 0.0019 |
| 24.0875 | 0.0051 | 0.0044 | 0.0023 | 0.0045 | 0.0023 | 0.0037 | 0.0013 |
| 24.3621 | 0.0035 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0005 |
| 24.6399 | 0.0000 | 0.0023 | 0.0000 | 0.0024 | 0.0000 | 0.0009 | 0.0013 |
| 24.9207 | 0.0000 | 0.0024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0025 | 0.0010 | 0.0014 |
| 25.2049 | 0.0038 | 0.0050 | 0.0052 | 0.0026 | 0.0052 | 0.0044 | 0.0011 |
| 25.4923 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0004 | 0.0009 |
| 25.7829 | 0.0021 | 0.0054 | 0.0055 | 0.0027 | 0.0000 | 0.0031 | 0.0023 |
| 26.0769 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0029 | 0.0006 | 0.0013 |
| 26.3743 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0029 | 0.0006 | 0.0013 |
| 26.675 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0091 | 0.0000 | 0.0018 | 0.0041 |
| 26.9791 | 0.0024 | 0.0031 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0032 | 0.0017 | 0.0016 |
| 27.2868 | 0.0073 | 0.0064 | 0.0033 | 0.0000 | 0.0033 | 0.0040 | 0.0029 |
| 27.5979 | 0.0025 | 0.0000 | 0.0034 | 0.0067 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0024 |
| 27.9125 | 0.0000 | 0.0137 | 0.0035 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0048 | 0.0057 |
| 28.2308 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0036 | 0.0000 | 0.0021 | 0.0032 |
| 28.5527 | 0.0000 | 0.0037 | 0.0038 | 0.0075 | 0.0000 | 0.0030 | 0.0031 |
| 28.8782 | 0.0000 | 0.0189 | 0.0000 | 0.0039 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0082 |
| 29.2075 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0024 | 0.0035 |
| 29.5405 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0041 | 0.0000 | 0.0016 | 0.0022 |
| 29.8773 | 0.0032 | 0.0125 | 0.0043 | 0.0000 | 0.0043 | 0.0049 | 0.0046 |
| 30.2179 | 0.0066 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0013 | 0.0030 |
| 30.5625 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0092 | 0.0000 | 0.0018 | 0.0041 |
| 30.911 | 0.0036 | 0.0093 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0035 | 0.0039 |
| 31.2634 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0049 | 0.0019 | 0.0027 |
| 31.6198 | 0.0000 | 0.0099 | 0.0102 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0055 |
| 31.9804 | 0.0079 | 0.0103 | 0.0000 | 0.0052 | 0.0105 | 0.0068 | 0.0044 |
| 32.345 | 0.0041 | 0.0159 | 0.0055 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0051 | 0.0065 |
| 32.7138 | 0.0042 | 0.0219 | 0.0057 | 0.0056 | 0.0057 | 0.0086 | 0.0075 |
| 33.0868 | 0.0000 | 0.0114 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0023 | 0.0051 |
| 33.4641 | 0.0045 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0021 | 0.0029 |
| 33.8456 | 0.0047 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0021 | 0.0030 |
| 34.2315 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0129 | 0.0038 | 0.0058 |
| 34.6218 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0133 | 0.0037 | 0.0058 |
| 35.0165 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 35.4158 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0071 | 0.0000 | 0.0014 | 0.0032 |
| 35.8197 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 36.2281 | 0.0114 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0038 | 0.0054 |
| 36.6411 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0016 | 0.0036 |
| 37.0589 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0082 | 0.0029 | 0.0040 |
| 37.4814 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 37.9088 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 38.341 | 0.0068 | 0.0089 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0091 | 0.0050 | 0.0046 |
| 38.7782 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 39.2203 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 39.6675 | 0.0000 | 0.0098 | 0.0000 | 0.0200 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0089 |
| 40.1198 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0104 | 0.0021 | 0.0046 |
| 40.5772 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0107 | 0.0000 | 0.0021 | 0.0048 |
| 41.0399 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 41.5078 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 41.9811 | 0.0089 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0018 | 0.0040 |
| 42.4597 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 42.9439 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 43.4335 | 0.0099 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0132 | 0.0046 | 0.0064 |
| 43.9287 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 44.4296 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 44.9362 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 45.4485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 45.9667 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 46.4908 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0161 | 0.0162 | 0.0065 | 0.0089 |
| 47.0209 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0168 | 0.0034 | 0.0075 |
| 47.557 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 48.0993 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 48.6477 | 0.0139 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0028 | 0.0062 |
| 49.2024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.7633 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.3307 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.9046 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 51.485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.0721 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.6658 | 0.0000 | 0.0228 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0046 | 0.0102 |
| 53.2662 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.8735 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 54.4878 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.1091 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.7375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 56.3729 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.0157 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.6658 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.3233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.9883 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 59.6608 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

| Distribución de tamaño de partícula | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Número de partículas (No x10 ⁶ /m ³) del efluente de contactores biológicos rotatorios | | | | | | | |
| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
| 2.01137 | 187.7300 | 20.5036 | 144.0230 | 13.7466 | 21.5386 | 77.5084 | 82.1899 |
| 2.0343 | 184.2700 | 20.8121 | 155.7650 | 15.0827 | 24.9353 | 80.1730 | 82.7073 |
| 2.0575 | 182.4350 | 20.3269 | 155.5780 | 14.3744 | 23.5001 | 79.2429 | 82.5559 |
| 2.08096 | 160.7050 | 19.4836 | 143.4480 | 13.9811 | 22.4280 | 72.0091 | 73.4080 |
| 2.10469 | 155.1570 | 18.1936 | 137.7930 | 13.5100 | 20.5101 | 69.0327 | 71.0056 |
| 2.12868 | 145.2510 | 18.2321 | 135.3400 | 13.3485 | 19.1249 | 66.2593 | 67.7120 |
| 2.15295 | 145.9420 | 17.5717 | 123.5220 | 12.2103 | 18.1825 | 63.4857 | 65.5611 |
| 2.1775 | 131.8930 | 16.0264 | 124.0680 | 11.4149 | 16.9693 | 60.0743 | 62.0869 |
| 2.20233 | 122.4850 | 15.6117 | 115.8360 | 11.3004 | 16.4345 | 56.3335 | 57.4342 |
| 2.22744 | 118.4090 | 15.4606 | 106.8140 | 11.2045 | 15.5250 | 53.4826 | 54.1608 |
| 2.25283 | 111.0830 | 14.5972 | 107.9500 | 10.9719 | 15.1148 | 51.9434 | 52.5927 |
| 2.27852 | 104.2380 | 14.3287 | 100.6080 | 10.7707 | 13.8059 | 48.7503 | 49.0319 |
| 2.3045 | 95.8507 | 13.7105 | 104.0180 | 9.9325 | 13.7159 | 47.4455 | 48.0273 |
| 2.33078 | 96.2871 | 13.4860 | 94.6365 | 9.6135 | 12.7000 | 45.3446 | 45.7771 |
| 2.35735 | 94.6037 | 12.7629 | 91.7263 | 9.0971 | 12.8575 | 44.2095 | 44.7273 |
| 2.38423 | 87.0303 | 12.4369 | 86.8430 | 8.6368 | 12.1952 | 41.4284 | 41.5704 |
| 2.41141 | 83.3977 | 11.9686 | 79.0306 | 8.2193 | 11.1022 | 38.7437 | 38.8256 |
| 2.43891 | 77.2376 | 11.2690 | 80.3531 | 8.4869 | 10.7423 | 37.6178 | 37.6205 |
| 2.46672 | 75.9440 | 11.0385 | 79.0499 | 7.3174 | 10.1769 | 36.7053 | 37.2791 |
| 2.49484 | 72.9380 | 10.1375 | 72.0275 | 7.3236 | 9.7268 | 34.4307 | 34.7547 |
| 2.52328 | 68.3134 | 10.3794 | 75.0435 | 7.1608 | 9.2626 | 34.0319 | 34.4681 |
| 2.55205 | 70.3983 | 10.2845 | 69.9800 | 7.0788 | 9.6781 | 33.4839 | 33.5291 |
| 2.58115 | 62.1520 | 9.9314 | 64.1050 | 6.2562 | 8.5961 | 30.2081 | 30.0887 |
| 2.61059 | 58.6904 | 9.7312 | 62.0638 | 6.5274 | 8.5681 | 29.1162 | 28.5851 |
| 2.64035 | 60.2864 | 9.4561 | 64.8026 | 6.3691 | 7.9732 | 29.7775 | 29.9745 |
| 2.67046 | 59.3817 | 9.4813 | 65.9711 | 6.4445 | 8.0108 | 29.8579 | 30.0687 |
| 2.70091 | 55.9301 | 8.2132 | 59.8261 | 5.3798 | 8.0371 | 27.4773 | 27.8089 |
| 2.7317 | 48.9531 | 7.6879 | 50.7419 | 5.4896 | 7.4661 | 24.0677 | 23.5577 |
| 2.76285 | 46.0509 | 7.7015 | 51.3211 | 5.2588 | 6.7149 | 23.4094 | 23.1656 |
| 2.79435 | 47.1404 | 7.5660 | 53.6012 | 5.0641 | 6.7116 | 24.0167 | 24.1828 |
| 2.8262 | 46.3394 | 7.6263 | 47.8934 | 4.6792 | 6.3386 | 22.5754 | 22.4339 |
| 2.85843 | 44.0664 | 7.5259 | 48.6973 | 4.7723 | 6.6062 | 22.3336 | 22.0362 |
| 2.89102 | 44.4079 | 7.0270 | 46.7649 | 4.5683 | 6.5726 | 21.8682 | 21.6875 |
| 2.92399 | 41.5533 | 6.8323 | 44.6695 | 4.4251 | 6.2132 | 20.7387 | 20.4722 |
| 2.95733 | 40.8937 | 6.5574 | 43.6233 | 4.3288 | 6.0986 | 20.3004 | 20.0854 |
| 2.99105 | 37.8890 | 6.4481 | 41.9148 | 4.3297 | 5.5751 | 19.2314 | 18.9381 |
| 3.02515 | 34.6918 | 6.2122 | 41.3120 | 4.1954 | 5.8966 | 18.4616 | 18.0070 |
| 3.05964 | 30.9289 | 6.0342 | 39.4225 | 3.8746 | 5.1435 | 17.0807 | 16.8066 |
| 3.09453 | 31.5821 | 5.6694 | 39.4344 | 3.5349 | 5.4715 | 17.1385 | 17.0179 |
| 3.12981 | 30.7563 | 5.4361 | 36.1780 | 3.7120 | 5.1293 | 16.2424 | 15.8538 |
| 3.16549 | 28.5920 | 5.1878 | 37.1422 | 3.6005 | 4.8362 | 15.8718 | 15.8173 |
| 3.20159 | 29.4389 | 5.4133 | 33.8419 | 3.4571 | 5.0233 | 15.4349 | 14.8932 |
| 3.23809 | 27.6945 | 4.7281 | 30.3513 | 2.8731 | 4.8144 | 14.0923 | 13.6841 |
| 3.27501 | 26.9286 | 4.8748 | 33.2573 | 3.0945 | 4.7778 | 14.5866 | 14.3485 |
| 3.31235 | 28.1907 | 4.6812 | 30.1019 | 3.0285 | 4.4759 | 14.0957 | 13.7706 |
| 3.35012 | 26.1689 | 4.2844 | 27.9300 | 2.9291 | 4.5069 | 13.1639 | 12.7054 |
| 3.38832 | 23.3866 | 4.3202 | 27.4371 | 2.9719 | 4.0652 | 12.4362 | 11.9421 |
| 3.42695 | 23.2351 | 4.2052 | 29.4995 | 2.6683 | 3.7928 | 12.6802 | 12.7018 |
| 3.46602 | 21.7685 | 3.9736 | 26.8150 | 2.6212 | 4.0667 | 11.8490 | 11.5121 |
| 3.50554 | 21.8227 | 3.9082 | 25.0098 | 2.6291 | 3.5409 | 11.3821 | 11.0531 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 3.54551 | 20.6162 | 3.6797 | 22.3488 | 2.4904 | 3.5251 | 10.5320 | 10.0255 |
| 3.58594 | 20.1503 | 3.6708 | 24.5353 | 2.4562 | 3.5819 | 10.8789 | 10.5901 |
| 3.62682 | 17.7803 | 3.3314 | 24.1244 | 2.3460 | 3.7746 | 10.2713 | 10.0184 |
| 3.66818 | 16.9554 | 3.3688 | 20.7838 | 2.1186 | 2.9921 | 9.2438 | 8.9023 |
| 3.71 | 15.6882 | 3.3296 | 20.4576 | 2.1401 | 3.3220 | 8.9875 | 8.4773 |
| 3.7523 | 16.1031 | 3.0870 | 19.3347 | 2.0574 | 2.9162 | 8.6997 | 8.3214 |
| 3.79508 | 17.2882 | 2.8009 | 18.0672 | 2.0494 | 3.0971 | 8.6606 | 8.2449 |
| 3.83835 | 15.5221 | 2.7050 | 17.4286 | 1.6943 | 2.7332 | 8.0166 | 7.7624 |
| 3.88212 | 15.6303 | 2.7616 | 18.8900 | 1.8673 | 2.6447 | 8.3588 | 8.2143 |
| 3.92638 | 13.2368 | 2.4923 | 17.6765 | 1.8553 | 2.6459 | 7.5814 | 7.3644 |
| 3.97115 | 14.3596 | 2.7479 | 17.0348 | 1.7566 | 2.1336 | 7.6065 | 7.4545 |
| 4.01643 | 14.3438 | 2.7501 | 17.4869 | 1.6393 | 2.2078 | 7.6856 | 7.6046 |
| 4.06222 | 14.5218 | 2.0931 | 14.3278 | 1.8785 | 2.3318 | 7.0306 | 6.7522 |
| 4.10853 | 12.0529 | 2.2764 | 13.3005 | 1.4723 | 2.1901 | 6.2584 | 5.8839 |
| 4.15538 | 13.2535 | 2.0532 | 15.0930 | 1.5507 | 2.3608 | 6.8622 | 6.7119 |
| 4.20276 | 11.6035 | 1.9456 | 12.7709 | 1.3841 | 2.2983 | 6.0005 | 5.6721 |
| 4.25068 | 11.0752 | 2.1218 | 13.7920 | 1.3887 | 1.7448 | 6.0245 | 5.9347 |
| 4.29915 | 11.6300 | 1.7872 | 12.8196 | 1.2342 | 1.8476 | 5.8637 | 5.8270 |
| 4.34817 | 9.0740 | 1.7195 | 12.2422 | 1.2775 | 1.9282 | 5.2483 | 5.0693 |
| 4.39774 | 9.7362 | 1.6249 | 10.1960 | 1.3054 | 1.8603 | 4.9445 | 4.5911 |
| 4.44788 | 8.9710 | 1.5424 | 11.0724 | 1.1016 | 1.5403 | 4.8455 | 4.7866 |
| 4.4986 | 8.2109 | 1.6370 | 10.7397 | 1.2785 | 1.5730 | 4.6878 | 4.4629 |
| 4.54989 | 7.6222 | 1.6182 | 9.9586 | 1.1731 | 1.5215 | 4.3787 | 4.1145 |
| 4.60177 | 9.0046 | 1.5353 | 9.9530 | 1.0383 | 1.4138 | 4.5890 | 4.4801 |
| 4.65423 | 8.9820 | 1.2434 | 8.1569 | 1.0158 | 1.3144 | 4.1425 | 4.0532 |
| 4.7073 | 7.3157 | 1.4925 | 9.3747 | 1.0061 | 1.3076 | 4.0993 | 3.9475 |
| 4.76097 | 8.5078 | 1.1941 | 8.8453 | 0.9831 | 1.3475 | 4.1756 | 4.1126 |
| 4.81526 | 7.7910 | 1.0297 | 7.7663 | 0.8498 | 1.2580 | 3.7390 | 3.6906 |
| 4.87016 | 7.0747 | 1.1782 | 7.8177 | 0.9447 | 1.3344 | 3.6699 | 3.4600 |
| 4.92569 | 7.1327 | 1.1123 | 8.2100 | 0.7944 | 1.0864 | 3.6671 | 3.6772 |
| 4.98185 | 7.4638 | 1.1352 | 6.6063 | 0.7948 | 1.1090 | 3.4218 | 3.3150 |
| 5.03865 | 7.1347 | 1.1118 | 6.9937 | 0.8114 | 1.0798 | 3.4263 | 3.3234 |
| 5.0961 | 7.0541 | 1.0946 | 6.4588 | 0.7779 | 0.9833 | 3.2737 | 3.1883 |
| 5.15421 | 6.0893 | 1.0122 | 6.3137 | 0.7224 | 0.8530 | 2.9981 | 2.9272 |
| 5.21298 | 5.7530 | 0.9586 | 6.1140 | 0.7280 | 1.0309 | 2.9169 | 2.7590 |
| 5.27242 | 4.8146 | 0.8034 | 6.8944 | 0.7670 | 0.7863 | 2.8132 | 2.8721 |
| 5.33253 | 5.3569 | 0.8530 | 4.9511 | 0.5889 | 0.7314 | 2.4963 | 2.4322 |
| 5.39333 | 4.6478 | 0.7366 | 6.3081 | 0.6334 | 0.7308 | 2.6113 | 2.6822 |
| 5.45482 | 4.9911 | 0.6660 | 4.9537 | 0.4671 | 0.7173 | 2.3590 | 2.3875 |
| 5.51702 | 4.6323 | 0.6794 | 4.7093 | 0.4781 | 0.7866 | 2.2571 | 2.2063 |
| 5.57992 | 4.7644 | 0.7246 | 3.9336 | 0.4559 | 0.7631 | 2.1283 | 2.0518 |
| 5.64354 | 3.5638 | 0.6120 | 4.5664 | 0.5451 | 0.6240 | 1.9823 | 1.9344 |
| 5.70789 | 4.4873 | 0.5648 | 4.2250 | 0.4665 | 0.6080 | 2.0703 | 2.0894 |
| 5.77297 | 3.3493 | 0.4513 | 3.9796 | 0.3778 | 0.5614 | 1.7439 | 1.7686 |
| 5.8388 | 3.5122 | 0.6137 | 3.8384 | 0.3449 | 0.6068 | 1.7832 | 1.7345 |
| 5.90537 | 3.4357 | 0.5714 | 3.7380 | 0.4162 | 0.5433 | 1.7409 | 1.6895 |
| 5.9727 | 3.4562 | 0.5241 | 3.3042 | 0.4339 | 0.6075 | 1.6652 | 1.5677 |
| 6.0408 | 3.2895 | 0.5884 | 3.6877 | 0.4282 | 0.4003 | 1.6788 | 1.6596 |
| 6.10968 | 2.9036 | 0.4402 | 3.6898 | 0.4004 | 0.5097 | 1.5887 | 1.5842 |
| 6.17934 | 3.7744 | 0.5114 | 3.0587 | 0.3949 | 0.4941 | 1.6467 | 1.6359 |
| 6.24979 | 3.1748 | 0.4165 | 3.1504 | 0.3723 | 0.5130 | 1.5254 | 1.4954 |
| 6.32105 | 3.4047 | 0.3687 | 2.8160 | 0.3006 | 0.4304 | 1.4641 | 1.5179 |
| 6.39313 | 3.2037 | 0.2669 | 3.2519 | 0.3668 | 0.4135 | 1.5006 | 1.5777 |
| 6.46602 | 2.8263 | 0.3686 | 3.1097 | 0.2611 | 0.4376 | 1.4007 | 1.4357 |
| 6.53974 | 2.1621 | 0.3034 | 2.1401 | 0.3060 | 0.3803 | 1.0584 | 0.9980 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 6.61431 | 2.3239 | 0.3508 | 2.5279 | 0.3616 | 0.3086 | 1.1746 | 1.1448 |
| 6.68972 | 2.0141 | 0.2739 | 2.6711 | 0.2555 | 0.2847 | 1.0999 | 1.1580 |
| 6.766 | 2.3335 | 0.4216 | 1.8928 | 0.2838 | 0.3493 | 1.0562 | 0.9786 |
| 6.84314 | 1.7790 | 0.3448 | 1.7956 | 0.2446 | 0.3478 | 0.9024 | 0.8089 |
| 6.92116 | 2.0727 | 0.2671 | 2.3338 | 0.2943 | 0.2519 | 1.0439 | 1.0624 |
| 7.00008 | 1.7416 | 0.1964 | 1.7994 | 0.2056 | 0.3669 | 0.8620 | 0.8324 |
| 7.07989 | 1.7675 | 0.2499 | 1.8462 | 0.2611 | 0.3556 | 0.8961 | 0.8329 |
| 7.16061 | 1.4016 | 0.2264 | 2.0898 | 0.2836 | 0.2508 | 0.8504 | 0.8530 |
| 7.24226 | 1.4279 | 0.1969 | 1.9923 | 0.1947 | 0.2509 | 0.8125 | 0.8436 |
| 7.32484 | 1.3281 | 0.2197 | 1.9892 | 0.2446 | 0.3565 | 0.8276 | 0.7955 |
| 7.40836 | 0.8129 | 0.2200 | 1.8462 | 0.1999 | 0.2273 | 0.6613 | 0.7112 |
| 7.49282 | 1.2463 | 0.1904 | 1.3601 | 0.1835 | 0.2446 | 0.6450 | 0.6027 |
| 7.57825 | 1.5825 | 0.1124 | 1.0664 | 0.1776 | 0.2604 | 0.6399 | 0.6532 |
| 7.66466 | 1.2128 | 0.1190 | 1.3102 | 0.2227 | 0.2116 | 0.6153 | 0.5923 |
| 7.75205 | 1.2541 | 0.1541 | 0.8753 | 0.1502 | 0.1295 | 0.5126 | 0.5215 |
| 7.84044 | 0.8354 | 0.1843 | 1.4553 | 0.2056 | 0.2350 | 0.5831 | 0.5584 |
| 7.92983 | 0.8843 | 0.1249 | 1.1627 | 0.1949 | 0.1625 | 0.5058 | 0.4833 |
| 8.02025 | 0.9237 | 0.1252 | 0.9700 | 0.1555 | 0.2354 | 0.4820 | 0.4266 |
| 8.11169 | 1.1594 | 0.1370 | 0.7785 | 0.2169 | 0.1464 | 0.4876 | 0.4605 |
| 8.20418 | 0.8889 | 0.0947 | 0.8260 | 0.1446 | 0.1371 | 0.4183 | 0.4020 |
| 8.29773 | 1.2199 | 0.0892 | 1.0680 | 0.1000 | 0.2021 | 0.5358 | 0.5594 |
| 8.39233 | 1.4640 | 0.1369 | 0.6790 | 0.1556 | 0.1234 | 0.5118 | 0.5816 |
| 8.48802 | 1.1484 | 0.0776 | 0.6314 | 0.1332 | 0.1624 | 0.4306 | 0.4584 |
| 8.5848 | 0.7607 | 0.0772 | 1.1189 | 0.1112 | 0.1218 | 0.4379 | 0.4756 |
| 8.68268 | 0.9410 | 0.0896 | 0.7783 | 0.0836 | 0.1139 | 0.4013 | 0.4225 |
| 8.78168 | 0.7182 | 0.0953 | 0.9222 | 0.1892 | 0.1222 | 0.4094 | 0.3834 |
| 8.88181 | 0.6364 | 0.0533 | 0.7280 | 0.1112 | 0.1133 | 0.3285 | 0.3254 |
| 8.98308 | 0.6686 | 0.0835 | 0.6784 | 0.1170 | 0.1308 | 0.3356 | 0.3089 |
| 9.0855 | 0.5526 | 0.0832 | 0.6328 | 0.1278 | 0.1464 | 0.3086 | 0.2620 |
| 9.18909 | 0.4876 | 0.1191 | 0.8711 | 0.0944 | 0.1445 | 0.3433 | 0.3358 |
| 9.29387 | 0.3620 | 0.0836 | 0.4371 | 0.0722 | 0.1056 | 0.2121 | 0.1736 |
| 9.39983 | 0.4573 | 0.0358 | 0.6328 | 0.0832 | 0.1307 | 0.2680 | 0.2626 |
| 9.50701 | 0.5288 | 0.0476 | 0.5352 | 0.0833 | 0.1218 | 0.2634 | 0.2467 |
| 9.61541 | 0.5320 | 0.0951 | 0.7783 | 0.0832 | 0.0976 | 0.3172 | 0.3206 |
| 9.72504 | 0.4438 | 0.0652 | 0.4860 | 0.0832 | 0.0650 | 0.2286 | 0.2163 |
| 9.83592 | 0.3601 | 0.0893 | 0.7790 | 0.0610 | 0.0816 | 0.2742 | 0.3078 |
| 9.94806 | 0.3111 | 0.1071 | 0.5805 | 0.0833 | 0.0656 | 0.2295 | 0.2197 |
| 10.0615 | 0.2679 | 0.0297 | 0.8241 | 0.0665 | 0.1220 | 0.2621 | 0.3270 |
| 10.1762 | 0.3484 | 0.1010 | 0.4852 | 0.0834 | 0.0892 | 0.2214 | 0.1849 |
| 10.2923 | 0.3614 | 0.0418 | 0.5354 | 0.0558 | 0.0897 | 0.2168 | 0.2209 |
| 10.4096 | 0.3060 | 0.0237 | 0.2912 | 0.0891 | 0.0729 | 0.1566 | 0.1319 |
| 10.5283 | 0.6628 | 0.0356 | 0.4862 | 0.0775 | 0.1302 | 0.2784 | 0.2794 |
| 10.6483 | 0.5410 | 0.0656 | 0.4355 | 0.0389 | 0.1290 | 0.2420 | 0.2302 |
| 10.7698 | 0.5745 | 0.0418 | 0.3395 | 0.0667 | 0.0890 | 0.2223 | 0.2304 |
| 10.8926 | 0.3690 | 0.0476 | 0.2914 | 0.0669 | 0.0487 | 0.1647 | 0.1537 |
| 11.0168 | 0.1321 | 0.0656 | 0.4369 | 0.0778 | 0.0494 | 0.1523 | 0.1621 |
| 11.1424 | 0.1842 | 0.0357 | 0.2433 | 0.0723 | 0.1378 | 0.1346 | 0.0836 |
| 11.2694 | 0.7182 | 0.0357 | 0.3901 | 0.0944 | 0.1140 | 0.2705 | 0.2852 |
| 11.3979 | 0.3060 | 0.0590 | 0.1457 | 0.0609 | 0.0487 | 0.1240 | 0.1089 |
| 11.5279 | 0.4940 | 0.0416 | 0.1936 | 0.0500 | 0.0724 | 0.1703 | 0.1910 |
| 11.6593 | 0.2679 | 0.0414 | 0.2893 | 0.0499 | 0.0964 | 0.1490 | 0.1204 |
| 11.7922 | 0.4006 | 0.0655 | 0.3899 | 0.0554 | 0.0647 | 0.1952 | 0.1827 |
| 11.9267 | 0.4000 | 0.0297 | 0.4371 | 0.0222 | 0.0484 | 0.1875 | 0.2116 |
| 12.0627 | 0.2261 | 0.0417 | 0.2433 | 0.0335 | 0.0564 | 0.1202 | 0.1050 |
| 12.2002 | 0.2666 | 0.0474 | 0.1459 | 0.0390 | 0.0737 | 0.1145 | 0.0949 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 12.3393 | 0.3968 | 0.0299 | 0.0974 | 0.0332 | 0.0650 | 0.1245 | 0.1547 |
| 12.4799 | 0.3587 | 0.0241 | 0.1944 | 0.0501 | 0.0651 | 0.1385 | 0.1396 |
| 12.6222 | 0.3169 | 0.0237 | 0.2921 | 0.0554 | 0.0890 | 0.1554 | 0.1383 |
| 12.7662 | 0.1810 | 0.0415 | 0.1930 | 0.0279 | 0.0487 | 0.0984 | 0.0813 |
| 12.9117 | 0.2209 | 0.0356 | 0.1449 | 0.0498 | 0.0406 | 0.0984 | 0.0819 |
| 13.0589 | 0.2261 | 0.0300 | 0.1953 | 0.0167 | 0.1211 | 0.1178 | 0.0945 |
| 13.2078 | 0.3498 | 0.0416 | 0.1936 | 0.0443 | 0.0725 | 0.1404 | 0.1325 |
| 13.3584 | 0.2209 | 0.0238 | 0.1457 | 0.0168 | 0.0577 | 0.0930 | 0.0880 |
| 13.5108 | 0.5829 | 0.0118 | 0.6314 | 0.0167 | 0.0737 | 0.2633 | 0.3153 |
| 13.6648 | 0.2280 | 0.0300 | 0.2923 | 0.0390 | 0.0410 | 0.1261 | 0.1246 |
| 13.8206 | 0.3150 | 0.0415 | 0.4376 | 0.0333 | 0.0404 | 0.1736 | 0.1901 |
| 13.9782 | 0.1778 | 0.0239 | 0.2429 | 0.0502 | 0.0570 | 0.1103 | 0.0949 |
| 14.1376 | 0.2261 | 0.0299 | 0.2431 | 0.0389 | 0.0400 | 0.1156 | 0.1089 |
| 14.2987 | 0.3903 | 0.0414 | 0.2421 | 0.0279 | 0.0570 | 0.1518 | 0.1593 |
| 14.4618 | 0.1791 | 0.0297 | 0.0970 | 0.0278 | 0.0567 | 0.0780 | 0.0630 |
| 14.6267 | 0.0870 | 0.0299 | 0.2919 | 0.0334 | 0.0321 | 0.0949 | 0.1127 |
| 14.7935 | 0.3163 | 0.0238 | 0.2435 | 0.0167 | 0.0483 | 0.1297 | 0.1400 |
| 14.9622 | 0.0870 | 0.0296 | 0.2925 | 0.0278 | 0.0484 | 0.0970 | 0.1118 |
| 15.1328 | 0.4502 | 0.0239 | 0.1459 | 0.0335 | 0.0567 | 0.1420 | 0.1789 |
| 15.3053 | 0.4824 | 0.0177 | 0.0481 | 0.0388 | 0.0404 | 0.1255 | 0.1998 |
| 15.4798 | 0.1842 | 0.0357 | 0.0978 | 0.0386 | 0.0570 | 0.0827 | 0.0619 |
| 15.6563 | 0.2628 | 0.0178 | 0.0974 | 0.0056 | 0.0240 | 0.0815 | 0.1075 |
| 15.8348 | 0.2731 | 0.0239 | 0.3406 | 0.0111 | 0.0724 | 0.1442 | 0.1521 |
| 16.0153 | 0.4457 | 0.0118 | 0.1459 | 0.0333 | 0.0804 | 0.1434 | 0.1766 |
| 16.1979 | 0.3601 | 0.0299 | 0.2429 | 0.0222 | 0.0410 | 0.1392 | 0.1540 |
| 16.3826 | 0.1842 | 0.0118 | 0.2419 | 0.0278 | 0.0324 | 0.0996 | 0.1058 |
| 16.5694 | 0.1758 | 0.0237 | 0.0974 | 0.0111 | 0.0326 | 0.0681 | 0.0688 |
| 16.7583 | 0.3066 | 0.0298 | 0.2900 | 0.0499 | 0.0247 | 0.1402 | 0.1448 |
| 16.9494 | 0.2209 | 0.0297 | 0.0489 | 0.0332 | 0.0493 | 0.0764 | 0.0813 |
| 17.1427 | 0.2190 | 0.0236 | 0.0978 | 0.0110 | 0.0244 | 0.0751 | 0.0874 |
| 17.3381 | 0.3066 | 0.0239 | 0.0489 | 0.0277 | 0.0404 | 0.0895 | 0.1218 |
| 17.5358 | 0.2647 | 0.0177 | 0.0489 | 0.0056 | 0.0246 | 0.0723 | 0.1087 |
| 17.7358 | 0.1739 | 0.0296 | 0.0489 | 0.0168 | 0.0327 | 0.0604 | 0.0645 |
| 17.938 | 0.3066 | 0.0180 | 0.0974 | 0.0220 | 0.0573 | 0.1003 | 0.1197 |
| 18.1425 | 0.4032 | 0.0238 | 0.2423 | 0.0276 | 0.0406 | 0.1475 | 0.1699 |
| 18.3494 | 0.2229 | 0.0180 | 0.1938 | 0.0334 | 0.0244 | 0.0985 | 0.1010 |
| 18.5586 | 0.1810 | 0.0236 | 0.2419 | 0.0223 | 0.0647 | 0.1067 | 0.0995 |
| 18.7702 | 0.0837 | 0.0238 | 0.1944 | 0.0335 | 0.0410 | 0.0753 | 0.0704 |
| 18.9842 | 0.3671 | 0.0060 | 0.0970 | 0.0389 | 0.0401 | 0.1098 | 0.1475 |
| 19.2006 | 0.0889 | 0.0059 | 0.1451 | 0.0111 | 0.0410 | 0.0584 | 0.0586 |
| 19.4196 | 0.1791 | 0.0541 | 0.1459 | 0.0387 | 0.0403 | 0.0916 | 0.0660 |
| 19.641 | 0.3163 | 0.0178 | 0.0978 | 0.0223 | 0.0160 | 0.0940 | 0.1289 |
| 19.8649 | 0.1778 | 0.0297 | 0.0968 | 0.0055 | 0.0324 | 0.0684 | 0.0699 |
| 20.0914 | 0.2209 | 0.0419 | 0.0962 | 0.0390 | 0.0327 | 0.0862 | 0.0795 |
| 20.3205 | 0.2190 | 0.0118 | 0.2425 | 0.0167 | 0.0320 | 0.1044 | 0.1159 |
| 20.5522 | 0.3111 | 0.0178 | 0.1459 | 0.0111 | 0.0244 | 0.1021 | 0.1294 |
| 20.7865 | 0.1791 | 0.0177 | 0.2425 | 0.0277 | 0.0330 | 0.1000 | 0.1037 |
| 21.0235 | 0.1823 | 0.0238 | 0.1457 | 0.0112 | 0.0244 | 0.0775 | 0.0802 |
| 21.2632 | 0.1391 | 0.0000 | 0.1948 | 0.0333 | 0.0404 | 0.0815 | 0.0819 |
| 21.5057 | 0.0870 | 0.0178 | 0.1936 | 0.0278 | 0.0327 | 0.0718 | 0.0732 |
| 21.7509 | 0.2196 | 0.0357 | 0.1457 | 0.0221 | 0.0324 | 0.0911 | 0.0877 |
| 21.9988 | 0.2261 | 0.0181 | 0.2919 | 0.0279 | 0.0570 | 0.1242 | 0.1260 |
| 22.2497 | 0.2596 | 0.0179 | 0.2423 | 0.0167 | 0.0240 | 0.1121 | 0.1269 |
| 22.5034 | 0.3214 | 0.0239 | 0.0489 | 0.0222 | 0.0160 | 0.0865 | 0.1319 |
| 22.76 | 0.0870 | 0.0179 | 0.1944 | 0.0444 | 0.0320 | 0.0751 | 0.0715 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 23.0195 | 0.0921 | 0.0060 | 0.0968 | 0.0111 | 0.0401 | 0.0492 | 0.0433 |
| 23.2819 | 0.2712 | 0.0059 | 0.2429 | 0.0111 | 0.0083 | 0.1079 | 0.1365 |
| 23.5474 | 0.1771 | 0.0242 | 0.2414 | 0.0278 | 0.0247 | 0.0990 | 0.1032 |
| 23.8159 | 0.3587 | 0.0059 | 0.0976 | 0.0056 | 0.0480 | 0.1032 | 0.1478 |
| 24.0875 | 0.3079 | 0.0059 | 0.2919 | 0.0334 | 0.0321 | 0.1343 | 0.1517 |
| 24.3621 | 0.0889 | 0.0120 | 0.0481 | 0.0222 | 0.0000 | 0.0342 | 0.0353 |
| 24.6399 | 0.1842 | 0.0059 | 0.1951 | 0.0221 | 0.0241 | 0.0863 | 0.0947 |
| 24.9207 | 0.1340 | 0.0296 | 0.0000 | 0.0278 | 0.0327 | 0.0448 | 0.0515 |
| 25.2049 | 0.0000 | 0.0178 | 0.1463 | 0.0333 | 0.0407 | 0.0476 | 0.0573 |
| 25.4923 | 0.2628 | 0.0177 | 0.0489 | 0.0334 | 0.0327 | 0.0791 | 0.1033 |
| 25.7829 | 0.1739 | 0.0118 | 0.0968 | 0.0056 | 0.0407 | 0.0658 | 0.0704 |
| 26.0769 | 0.3047 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0334 | 0.0493 | 0.0787 | 0.1279 |
| 26.3743 | 0.4535 | 0.0118 | 0.0968 | 0.0166 | 0.0080 | 0.1173 | 0.1915 |
| 26.675 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0974 | 0.0276 | 0.0571 | 0.0458 | 0.0361 |
| 26.9791 | 0.0889 | 0.0298 | 0.0000 | 0.0277 | 0.0161 | 0.0325 | 0.0337 |
| 27.2868 | 0.2673 | 0.0119 | 0.0487 | 0.0167 | 0.0323 | 0.0754 | 0.1083 |
| 27.5979 | 0.1307 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0000 | 0.0296 | 0.0567 |
| 27.9125 | 0.0889 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0493 | 0.0300 | 0.0385 |
| 28.2308 | 0.2750 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0326 | 0.0627 | 0.1194 |
| 28.5527 | 0.0451 | 0.0000 | 0.0487 | 0.0222 | 0.0080 | 0.0248 | 0.0217 |
| 28.8782 | 0.3220 | 0.0120 | 0.0978 | 0.0223 | 0.0241 | 0.0956 | 0.1311 |
| 29.2075 | 0.2229 | 0.0241 | 0.1944 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0899 | 0.1092 |
| 29.5405 | 0.1321 | 0.0178 | 0.0487 | 0.0167 | 0.0327 | 0.0496 | 0.0479 |
| 29.8773 | 0.1778 | 0.0118 | 0.0000 | 0.0112 | 0.0324 | 0.0466 | 0.0742 |
| 30.2179 | 0.0419 | 0.0121 | 0.2412 | 0.0278 | 0.0241 | 0.0694 | 0.0966 |
| 30.5625 | 0.0000 | 0.0059 | 0.0974 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0223 | 0.0421 |
| 30.911 | 0.1726 | 0.0177 | 0.0968 | 0.0055 | 0.0080 | 0.0601 | 0.0733 |
| 31.2634 | 0.2126 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0056 | 0.0164 | 0.0481 | 0.0921 |
| 31.6198 | 0.1758 | 0.0118 | 0.0487 | 0.0056 | 0.0241 | 0.0532 | 0.0705 |
| 31.9804 | 0.0451 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0278 | 0.0163 | 0.0191 | 0.0180 |
| 32.345 | 0.0419 | 0.0000 | 0.0481 | 0.0000 | 0.0330 | 0.0246 | 0.0231 |
| 32.7138 | 0.1391 | 0.0239 | 0.0000 | 0.0168 | 0.0164 | 0.0392 | 0.0565 |
| 33.0868 | 0.0837 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0112 | 0.0244 | 0.0250 | 0.0340 |
| 33.4641 | 0.1758 | 0.0120 | 0.0487 | 0.0000 | 0.0164 | 0.0506 | 0.0723 |
| 33.8456 | 0.0870 | 0.0118 | 0.0974 | 0.0056 | 0.0000 | 0.0403 | 0.0476 |
| 34.2315 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0489 | 0.0221 | 0.0000 | 0.0236 | 0.0240 |
| 34.6218 | 0.1340 | 0.0059 | 0.0487 | 0.0056 | 0.0160 | 0.0420 | 0.0543 |
| 35.0165 | 0.0419 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0168 | 0.0083 | 0.0146 | 0.0164 |
| 35.4158 | 0.0921 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0110 | 0.0244 | 0.0255 | 0.0386 |
| 35.8197 | 0.0921 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0056 | 0.0000 | 0.0207 | 0.0400 |
| 36.2281 | 0.1321 | 0.0059 | 0.0487 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0390 | 0.0555 |
| 36.6411 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0487 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0218 |
| 37.0589 | 0.0451 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0118 | 0.0189 |
| 37.4814 | 0.0940 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0056 | 0.0080 | 0.0215 | 0.0407 |
| 37.9088 | 0.0870 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0166 | 0.0000 | 0.0207 | 0.0377 |
| 38.341 | 0.0419 | 0.0060 | 0.0978 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0307 | 0.0409 |
| 38.7782 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0487 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0113 | 0.0212 |
| 39.2203 | 0.0451 | 0.0118 | 0.0481 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0210 | 0.0239 |
| 39.6675 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0000 | 0.0023 | 0.0032 |
| 40.1198 | 0.1256 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0167 | 0.0307 | 0.0534 |
| 40.5772 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0487 | 0.0056 | 0.0080 | 0.0125 | 0.0206 |
| 41.0399 | 0.1256 | 0.0060 | 0.0489 | 0.0167 | 0.0240 | 0.0442 | 0.0481 |
| 41.5078 | 0.1391 | 0.0000 | 0.0968 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0488 | 0.0650 |
| 41.9811 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0110 | 0.0204 |
| 42.4597 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0000 | 0.0011 | 0.0025 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 42.9439 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 43.4335 | 0.1739 | 0.0000 | 0.0481 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0444 | 0.0753 |
| 43.9287 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0016 | 0.0036 |
| 44.4296 | 0.0419 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0100 | 0.0182 |
| 44.9362 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0017 | 0.0037 |
| 45.4485 | 0.0419 | 0.0000 | 0.0489 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0198 | 0.0237 |
| 45.9667 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0027 |
| 46.4908 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0487 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0218 |
| 47.0209 | 0.0000 | 0.0059 | 0.0481 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0108 | 0.0210 |
| 47.557 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0487 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0114 | 0.0212 |
| 48.0993 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0027 |
| 48.6477 | 0.0451 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0202 |
| 49.2024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.7633 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.3307 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0112 | 0.0000 | 0.0022 | 0.0050 |
| 50.9046 | 0.0000 | 0.0118 | 0.0000 | 0.0056 | 0.0000 | 0.0035 | 0.0052 |
| 51.485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.0721 | 0.0000 | 0.0059 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0026 |
| 52.6658 | 0.0419 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0084 | 0.0187 |
| 53.2662 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.8735 | 0.0470 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0106 | 0.0205 |
| 54.4878 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0094 | 0.0210 |
| 55.1091 | 0.0451 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0202 |
| 55.7375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 56.3729 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.0157 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.6658 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.3233 | 0.0451 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0202 |
| 58.9883 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0000 | 0.0011 | 0.0025 |
| 59.6608 | 0.0419 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0084 | 0.0187 |

| Distribución de tamaño de partícula | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Volumen de partículas (mL/m ³) del efluente de contactores biológicos rotatorios | | | | | | | |
| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
| 2.01137 | 0.0056 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0033 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0009 |
| 2.0343 | 0.0056 | 0.0047 | 0.0044 | 0.0037 | 0.0042 | 0.0045 | 0.0007 |
| 2.0575 | 0.0058 | 0.0048 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0046 | 0.0008 |
| 2.08096 | 0.0053 | 0.0047 | 0.0043 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0044 | 0.0006 |
| 2.10469 | 0.0053 | 0.0046 | 0.0043 | 0.0037 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0006 |
| 2.12868 | 0.0051 | 0.0047 | 0.0044 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0043 | 0.0006 |
| 2.15295 | 0.0053 | 0.0047 | 0.0041 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0043 | 0.0007 |
| 2.1775 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0043 | 0.0034 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0006 |
| 2.20233 | 0.0048 | 0.0045 | 0.0041 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0006 |
| 2.22744 | 0.0048 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0006 |
| 2.25283 | 0.0046 | 0.0045 | 0.0041 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0005 |
| 2.27852 | 0.0045 | 0.0046 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0040 | 0.0005 |
| 2.3045 | 0.0043 | 0.0045 | 0.0043 | 0.0036 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0005 |
| 2.33078 | 0.0044 | 0.0046 | 0.0040 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0040 | 0.0006 |
| 2.35735 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0035 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0005 |
| 2.38423 | 0.0043 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0039 | 0.0005 |
| 2.41141 | 0.0043 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0038 | 0.0006 |
| 2.43891 | 0.0041 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0031 | 0.0038 | 0.0005 |
| 2.46672 | 0.0042 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0038 | 0.0006 |
| 2.49484 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0037 | 0.0005 |
| 2.52328 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0034 | 0.0030 | 0.0038 | 0.0006 |
| 2.55205 | 0.0043 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0039 | 0.0006 |
| 2.58115 | 0.0039 | 0.0046 | 0.0037 | 0.0031 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.61059 | 0.0038 | 0.0047 | 0.0037 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.64035 | 0.0040 | 0.0047 | 0.0040 | 0.0034 | 0.0030 | 0.0038 | 0.0007 |
| 2.67046 | 0.0041 | 0.0049 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0031 | 0.0040 | 0.0007 |
| 2.70091 | 0.0040 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0005 |
| 2.7317 | 0.0036 | 0.0042 | 0.0035 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0035 | 0.0004 |
| 2.76285 | 0.0035 | 0.0044 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0029 | 0.0035 | 0.0006 |
| 2.79435 | 0.0037 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.8262 | 0.0038 | 0.0046 | 0.0036 | 0.0031 | 0.0029 | 0.0036 | 0.0007 |
| 2.85843 | 0.0037 | 0.0047 | 0.0038 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.89102 | 0.0039 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.92399 | 0.0038 | 0.0046 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.95733 | 0.0039 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0006 |
| 2.99105 | 0.0037 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0006 |
| 3.02515 | 0.0035 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0005 |
| 3.05964 | 0.0032 | 0.0047 | 0.0038 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0036 | 0.0007 |
| 3.09453 | 0.0034 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0036 | 0.0006 |
| 3.12981 | 0.0034 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0036 | 0.0005 |
| 3.16549 | 0.0033 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0036 | 0.0006 |
| 3.20159 | 0.0035 | 0.0048 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0006 |
| 3.23809 | 0.0034 | 0.0043 | 0.0034 | 0.0029 | 0.0033 | 0.0035 | 0.0005 |
| 3.27501 | 0.0034 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0032 | 0.0034 | 0.0037 | 0.0006 |
| 3.31235 | 0.0037 | 0.0046 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0005 |
| 3.35012 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0035 | 0.0032 | 0.0034 | 0.0036 | 0.0004 |
| 3.38832 | 0.0033 | 0.0045 | 0.0036 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0036 | 0.0005 |
| 3.42695 | 0.0034 | 0.0046 | 0.0040 | 0.0031 | 0.0031 | 0.0036 | 0.0006 |
| 3.46602 | 0.0033 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0034 | 0.0036 | 0.0005 |
| 3.50554 | 0.0034 | 0.0045 | 0.0036 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0036 | 0.0006 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 3.54551 | 0.0033 | 0.0044 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0005 |
| 3.58594 | 0.0034 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0005 |
| 3.62682 | 0.0031 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0033 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0005 |
| 3.66818 | 0.0030 | 0.0045 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0030 | 0.0034 | 0.0006 |
| 3.71 | 0.0029 | 0.0046 | 0.0035 | 0.0032 | 0.0034 | 0.0035 | 0.0006 |
| 3.7523 | 0.0031 | 0.0044 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0034 | 0.0005 |
| 3.79508 | 0.0034 | 0.0041 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0034 | 0.0035 | 0.0003 |
| 3.83835 | 0.0032 | 0.0041 | 0.0033 | 0.0028 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0005 |
| 3.88212 | 0.0033 | 0.0044 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0035 | 0.0005 |
| 3.92638 | 0.0029 | 0.0041 | 0.0036 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0034 | 0.0004 |
| 3.97115 | 0.0033 | 0.0046 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0027 | 0.0035 | 0.0007 |
| 4.01643 | 0.0034 | 0.0048 | 0.0038 | 0.0031 | 0.0029 | 0.0036 | 0.0008 |
| 4.06222 | 0.0035 | 0.0038 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0003 |
| 4.10853 | 0.0030 | 0.0043 | 0.0031 | 0.0030 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0005 |
| 4.15538 | 0.0035 | 0.0040 | 0.0036 | 0.0033 | 0.0034 | 0.0035 | 0.0003 |
| 4.20276 | 0.0031 | 0.0039 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0004 |
| 4.25068 | 0.0031 | 0.0044 | 0.0035 | 0.0031 | 0.0027 | 0.0034 | 0.0006 |
| 4.29915 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0029 | 0.0030 | 0.0033 | 0.0004 |
| 4.34817 | 0.0027 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0004 |
| 4.39774 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0029 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0003 |
| 4.44788 | 0.0029 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0031 | 0.0004 |
| 4.4986 | 0.0027 | 0.0040 | 0.0033 | 0.0034 | 0.0029 | 0.0033 | 0.0005 |
| 4.54989 | 0.0026 | 0.0041 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0029 | 0.0032 | 0.0006 |
| 4.60177 | 0.0032 | 0.0040 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0028 | 0.0032 | 0.0005 |
| 4.65423 | 0.0033 | 0.0034 | 0.0028 | 0.0030 | 0.0027 | 0.0030 | 0.0003 |
| 4.7073 | 0.0028 | 0.0042 | 0.0033 | 0.0031 | 0.0028 | 0.0032 | 0.0006 |
| 4.76097 | 0.0033 | 0.0035 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0029 | 0.0032 | 0.0002 |
| 4.81526 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0029 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0030 | 0.0002 |
| 4.87016 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0030 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0003 |
| 4.92569 | 0.0031 | 0.0036 | 0.0033 | 0.0028 | 0.0026 | 0.0031 | 0.0004 |
| 4.98185 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0027 | 0.0029 | 0.0028 | 0.0031 | 0.0005 |
| 5.03865 | 0.0033 | 0.0038 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0028 | 0.0032 | 0.0004 |
| 5.0961 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0029 | 0.0030 | 0.0026 | 0.0032 | 0.0005 |
| 5.15421 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0024 | 0.0030 | 0.0005 |
| 5.21298 | 0.0030 | 0.0037 | 0.0029 | 0.0030 | 0.0029 | 0.0031 | 0.0003 |
| 5.27242 | 0.0026 | 0.0032 | 0.0034 | 0.0033 | 0.0023 | 0.0029 | 0.0005 |
| 5.33253 | 0.0030 | 0.0035 | 0.0025 | 0.0026 | 0.0022 | 0.0028 | 0.0005 |
| 5.39333 | 0.0027 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0029 | 0.0023 | 0.0029 | 0.0004 |
| 5.45482 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0027 | 0.0022 | 0.0024 | 0.0026 | 0.0003 |
| 5.51702 | 0.0028 | 0.0031 | 0.0026 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0003 |
| 5.57992 | 0.0030 | 0.0034 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0005 |
| 5.64354 | 0.0023 | 0.0030 | 0.0027 | 0.0029 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0003 |
| 5.70789 | 0.0030 | 0.0028 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0003 |
| 5.77297 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0021 | 0.0022 | 0.0023 | 0.0002 |
| 5.8388 | 0.0025 | 0.0033 | 0.0026 | 0.0020 | 0.0024 | 0.0026 | 0.0005 |
| 5.90537 | 0.0026 | 0.0032 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0003 |
| 5.9727 | 0.0027 | 0.0030 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0026 | 0.0027 | 0.0002 |
| 6.0408 | 0.0026 | 0.0035 | 0.0027 | 0.0028 | 0.0018 | 0.0027 | 0.0006 |
| 6.10968 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0002 |
| 6.17934 | 0.0032 | 0.0033 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0024 | 0.0028 | 0.0004 |
| 6.24979 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0026 | 0.0027 | 0.0025 | 0.0027 | 0.0001 |
| 6.32105 | 0.0031 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0022 | 0.0022 | 0.0025 | 0.0004 |
| 6.39313 | 0.0030 | 0.0019 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0022 | 0.0026 | 0.0005 |
| 6.46602 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0028 | 0.0021 | 0.0024 | 0.0025 | 0.0003 |
| 6.53974 | 0.0022 | 0.0023 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0021 | 0.0022 | 0.0002 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 6.61431 | 0.0024 | 0.0027 | 0.0024 | 0.0031 | 0.0018 | 0.0025 | 0.0005 |
| 6.68972 | 0.0022 | 0.0022 | 0.0027 | 0.0022 | 0.0017 | 0.0022 | 0.0003 |
| 6.766 | 0.0026 | 0.0035 | 0.0020 | 0.0026 | 0.0022 | 0.0026 | 0.0006 |
| 6.84314 | 0.0021 | 0.0030 | 0.0019 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0004 |
| 6.92116 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0026 | 0.0029 | 0.0017 | 0.0024 | 0.0004 |
| 7.00008 | 0.0022 | 0.0018 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0025 | 0.0021 | 0.0003 |
| 7.07989 | 0.0023 | 0.0024 | 0.0022 | 0.0027 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0002 |
| 7.16061 | 0.0019 | 0.0022 | 0.0026 | 0.0030 | 0.0019 | 0.0023 | 0.0005 |
| 7.24226 | 0.0020 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0022 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0002 |
| 7.32484 | 0.0019 | 0.0023 | 0.0026 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0025 | 0.0004 |
| 7.40836 | 0.0012 | 0.0024 | 0.0025 | 0.0024 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0005 |
| 7.49282 | 0.0019 | 0.0022 | 0.0019 | 0.0023 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0002 |
| 7.57825 | 0.0025 | 0.0013 | 0.0016 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0020 | 0.0005 |
| 7.66466 | 0.0020 | 0.0014 | 0.0020 | 0.0029 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0005 |
| 7.75205 | 0.0021 | 0.0019 | 0.0014 | 0.0020 | 0.0012 | 0.0017 | 0.0004 |
| 7.84044 | 0.0015 | 0.0024 | 0.0023 | 0.0029 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0005 |
| 7.92983 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0019 | 0.0028 | 0.0016 | 0.0019 | 0.0005 |
| 8.02025 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0004 |
| 8.11169 | 0.0023 | 0.0020 | 0.0014 | 0.0034 | 0.0016 | 0.0021 | 0.0008 |
| 8.20418 | 0.0018 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0023 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0004 |
| 8.29773 | 0.0025 | 0.0014 | 0.0020 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0020 | 0.0005 |
| 8.39233 | 0.0032 | 0.0022 | 0.0013 | 0.0027 | 0.0015 | 0.0022 | 0.0008 |
| 8.48802 | 0.0026 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0024 | 0.0020 | 0.0019 | 0.0006 |
| 8.5848 | 0.0018 | 0.0013 | 0.0024 | 0.0021 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0004 |
| 8.68268 | 0.0022 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0003 |
| 8.78168 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0021 | 0.0037 | 0.0017 | 0.0022 | 0.0009 |
| 8.88181 | 0.0016 | 0.0010 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0005 |
| 8.98308 | 0.0018 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0025 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0004 |
| 9.0855 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0028 | 0.0022 | 0.0020 | 0.0005 |
| 9.18909 | 0.0014 | 0.0025 | 0.0023 | 0.0021 | 0.0023 | 0.0021 | 0.0004 |
| 9.29387 | 0.0011 | 0.0018 | 0.0012 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0015 | 0.0003 |
| 9.39983 | 0.0014 | 0.0008 | 0.0018 | 0.0020 | 0.0022 | 0.0016 | 0.0006 |
| 9.50701 | 0.0017 | 0.0011 | 0.0015 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0017 | 0.0004 |
| 9.61541 | 0.0017 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0022 | 0.0018 | 0.0020 | 0.0003 |
| 9.72504 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0022 | 0.0012 | 0.0016 | 0.0004 |
| 9.83592 | 0.0012 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0019 | 0.0005 |
| 9.94806 | 0.0011 | 0.0028 | 0.0019 | 0.0024 | 0.0013 | 0.0019 | 0.0007 |
| 10.0615 | 0.0010 | 0.0008 | 0.0028 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0018 | 0.0009 |
| 10.1762 | 0.0013 | 0.0029 | 0.0017 | 0.0026 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0006 |
| 10.2923 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0020 | 0.0018 | 0.0020 | 0.0017 | 0.0003 |
| 10.4096 | 0.0013 | 0.0007 | 0.0011 | 0.0029 | 0.0017 | 0.0015 | 0.0009 |
| 10.5283 | 0.0028 | 0.0011 | 0.0019 | 0.0026 | 0.0031 | 0.0023 | 0.0008 |
| 10.6483 | 0.0024 | 0.0021 | 0.0018 | 0.0014 | 0.0031 | 0.0022 | 0.0007 |
| 10.7698 | 0.0026 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0024 | 0.0022 | 0.0020 | 0.0006 |
| 10.8926 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0013 | 0.0025 | 0.0013 | 0.0017 | 0.0005 |
| 11.0168 | 0.0006 | 0.0024 | 0.0020 | 0.0030 | 0.0013 | 0.0019 | 0.0009 |
| 11.1424 | 0.0009 | 0.0013 | 0.0011 | 0.0029 | 0.0038 | 0.0020 | 0.0013 |
| 11.2694 | 0.0037 | 0.0014 | 0.0019 | 0.0040 | 0.0033 | 0.0028 | 0.0012 |
| 11.3979 | 0.0016 | 0.0024 | 0.0007 | 0.0026 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0008 |
| 11.5279 | 0.0028 | 0.0017 | 0.0010 | 0.0022 | 0.0022 | 0.0020 | 0.0007 |
| 11.6593 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0015 | 0.0023 | 0.0031 | 0.0021 | 0.0007 |
| 11.7922 | 0.0024 | 0.0029 | 0.0021 | 0.0027 | 0.0021 | 0.0024 | 0.0003 |
| 11.9267 | 0.0025 | 0.0014 | 0.0025 | 0.0011 | 0.0017 | 0.0018 | 0.0006 |
| 12.0627 | 0.0014 | 0.0020 | 0.0014 | 0.0017 | 0.0020 | 0.0017 | 0.0003 |
| 12.2002 | 0.0018 | 0.0023 | 0.0009 | 0.0021 | 0.0027 | 0.0019 | 0.0007 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 12.3393 | 0.0027 | 0.0015 | 0.0006 | 0.0018 | 0.0025 | 0.0018 | 0.0008 |
| 12.4799 | 0.0025 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0029 | 0.0026 | 0.0021 | 0.0008 |
| 12.6222 | 0.0023 | 0.0013 | 0.0020 | 0.0033 | 0.0036 | 0.0025 | 0.0010 |
| 12.7662 | 0.0014 | 0.0023 | 0.0013 | 0.0017 | 0.0020 | 0.0018 | 0.0004 |
| 12.9117 | 0.0017 | 0.0021 | 0.0010 | 0.0031 | 0.0018 | 0.0019 | 0.0008 |
| 13.0589 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0015 | 0.0011 | 0.0054 | 0.0023 | 0.0018 |
| 13.2078 | 0.0029 | 0.0026 | 0.0015 | 0.0030 | 0.0034 | 0.0027 | 0.0007 |
| 13.3584 | 0.0019 | 0.0015 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0028 | 0.0017 | 0.0007 |
| 13.5108 | 0.0052 | 0.0008 | 0.0052 | 0.0012 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0021 |
| 13.6648 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0025 | 0.0029 | 0.0021 | 0.0023 | 0.0004 |
| 13.8206 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0039 | 0.0026 | 0.0022 | 0.0029 | 0.0006 |
| 13.9782 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0022 | 0.0040 | 0.0031 | 0.0026 | 0.0010 |
| 14.1376 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0032 | 0.0023 | 0.0025 | 0.0004 |
| 14.2987 | 0.0042 | 0.0033 | 0.0024 | 0.0024 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0008 |
| 14.4618 | 0.0020 | 0.0024 | 0.0010 | 0.0025 | 0.0035 | 0.0023 | 0.0009 |
| 14.6267 | 0.0010 | 0.0025 | 0.0031 | 0.0031 | 0.0020 | 0.0023 | 0.0009 |
| 14.7935 | 0.0037 | 0.0021 | 0.0026 | 0.0016 | 0.0032 | 0.0026 | 0.0009 |
| 14.9622 | 0.0011 | 0.0027 | 0.0033 | 0.0027 | 0.0033 | 0.0026 | 0.0009 |
| 15.1328 | 0.0057 | 0.0022 | 0.0017 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0034 | 0.0016 |
| 15.3053 | 0.0063 | 0.0017 | 0.0006 | 0.0041 | 0.0029 | 0.0031 | 0.0022 |
| 15.4798 | 0.0025 | 0.0036 | 0.0012 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0031 | 0.0013 |
| 15.6563 | 0.0037 | 0.0018 | 0.0013 | 0.0006 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0011 |
| 15.8348 | 0.0039 | 0.0026 | 0.0045 | 0.0013 | 0.0058 | 0.0036 | 0.0018 |
| 16.0153 | 0.0067 | 0.0013 | 0.0020 | 0.0040 | 0.0067 | 0.0041 | 0.0025 |
| 16.1979 | 0.0056 | 0.0034 | 0.0035 | 0.0028 | 0.0035 | 0.0037 | 0.0011 |
| 16.3826 | 0.0029 | 0.0014 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0009 |
| 16.5694 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0030 | 0.0024 | 0.0008 |
| 16.7583 | 0.0053 | 0.0038 | 0.0046 | 0.0069 | 0.0023 | 0.0046 | 0.0017 |
| 16.9494 | 0.0039 | 0.0039 | 0.0008 | 0.0047 | 0.0049 | 0.0036 | 0.0016 |
| 17.1427 | 0.0040 | 0.0032 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0025 | 0.0026 | 0.0010 |
| 17.3381 | 0.0058 | 0.0034 | 0.0009 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0037 | 0.0018 |
| 17.5358 | 0.0052 | 0.0026 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0027 | 0.0024 | 0.0018 |
| 17.7358 | 0.0035 | 0.0045 | 0.0009 | 0.0027 | 0.0037 | 0.0031 | 0.0013 |
| 17.938 | 0.0064 | 0.0028 | 0.0019 | 0.0037 | 0.0067 | 0.0043 | 0.0022 |
| 18.1425 | 0.0088 | 0.0038 | 0.0048 | 0.0048 | 0.0049 | 0.0054 | 0.0019 |
| 18.3494 | 0.0050 | 0.0030 | 0.0040 | 0.0060 | 0.0030 | 0.0042 | 0.0013 |
| 18.5586 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0052 | 0.0042 | 0.0084 | 0.0052 | 0.0018 |
| 18.7702 | 0.0020 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0065 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0017 |
| 18.9842 | 0.0091 | 0.0011 | 0.0022 | 0.0078 | 0.0055 | 0.0052 | 0.0035 |
| 19.2006 | 0.0023 | 0.0011 | 0.0034 | 0.0023 | 0.0059 | 0.0030 | 0.0018 |
| 19.4196 | 0.0048 | 0.0107 | 0.0036 | 0.0083 | 0.0060 | 0.0067 | 0.0028 |
| 19.641 | 0.0087 | 0.0036 | 0.0025 | 0.0049 | 0.0024 | 0.0044 | 0.0026 |
| 19.8649 | 0.0051 | 0.0063 | 0.0025 | 0.0013 | 0.0051 | 0.0041 | 0.0021 |
| 20.0914 | 0.0065 | 0.0092 | 0.0026 | 0.0093 | 0.0054 | 0.0066 | 0.0028 |
| 20.3205 | 0.0067 | 0.0027 | 0.0068 | 0.0041 | 0.0054 | 0.0051 | 0.0018 |
| 20.5522 | 0.0098 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0028 | 0.0043 | 0.0051 | 0.0027 |
| 20.7865 | 0.0059 | 0.0043 | 0.0073 | 0.0073 | 0.0060 | 0.0061 | 0.0012 |
| 21.0235 | 0.0062 | 0.0060 | 0.0045 | 0.0030 | 0.0046 | 0.0049 | 0.0013 |
| 21.2632 | 0.0049 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0094 | 0.0078 | 0.0057 | 0.0036 |
| 21.5057 | 0.0031 | 0.0048 | 0.0064 | 0.0081 | 0.0066 | 0.0058 | 0.0019 |
| 21.7509 | 0.0082 | 0.0099 | 0.0050 | 0.0067 | 0.0067 | 0.0073 | 0.0018 |
| 21.9988 | 0.0088 | 0.0052 | 0.0104 | 0.0087 | 0.0123 | 0.0091 | 0.0026 |
| 22.2497 | 0.0104 | 0.0053 | 0.0089 | 0.0054 | 0.0053 | 0.0071 | 0.0024 |
| 22.5034 | 0.0133 | 0.0073 | 0.0019 | 0.0074 | 0.0037 | 0.0067 | 0.0044 |
| 22.76 | 0.0037 | 0.0057 | 0.0077 | 0.0153 | 0.0076 | 0.0080 | 0.0044 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 23.0195 | 0.0041 | 0.0020 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0099 | 0.0048 | 0.0030 |
| 23.2819 | 0.0125 | 0.0020 | 0.0103 | 0.0041 | 0.0021 | 0.0062 | 0.0049 |
| 23.5474 | 0.0084 | 0.0085 | 0.0105 | 0.0106 | 0.0065 | 0.0089 | 0.0017 |
| 23.8159 | 0.0176 | 0.0022 | 0.0044 | 0.0022 | 0.0131 | 0.0079 | 0.0071 |
| 24.0875 | 0.0157 | 0.0022 | 0.0136 | 0.0137 | 0.0091 | 0.0109 | 0.0054 |
| 24.3621 | 0.0047 | 0.0047 | 0.0023 | 0.0094 | 0.0000 | 0.0042 | 0.0035 |
| 24.6399 | 0.0100 | 0.0024 | 0.0098 | 0.0097 | 0.0073 | 0.0078 | 0.0032 |
| 24.9207 | 0.0076 | 0.0123 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0102 | 0.0085 | 0.0052 |
| 25.2049 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0078 | 0.0156 | 0.0132 | 0.0089 | 0.0060 |
| 25.4923 | 0.0159 | 0.0079 | 0.0027 | 0.0162 | 0.0109 | 0.0107 | 0.0057 |
| 25.7829 | 0.0109 | 0.0054 | 0.0056 | 0.0028 | 0.0141 | 0.0077 | 0.0046 |
| 26.0769 | 0.0197 | 0.0028 | 0.0000 | 0.0173 | 0.0177 | 0.0115 | 0.0093 |
| 26.3743 | 0.0303 | 0.0058 | 0.0059 | 0.0089 | 0.0030 | 0.0108 | 0.0111 |
| 26.675 | 0.0032 | 0.0000 | 0.0062 | 0.0153 | 0.0219 | 0.0093 | 0.0090 |
| 26.9791 | 0.0064 | 0.0158 | 0.0000 | 0.0159 | 0.0064 | 0.0089 | 0.0069 |
| 27.2868 | 0.0198 | 0.0065 | 0.0033 | 0.0099 | 0.0133 | 0.0106 | 0.0064 |
| 27.5979 | 0.0100 | 0.0068 | 0.0000 | 0.0034 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0044 |
| 27.9125 | 0.0070 | 0.0035 | 0.0000 | 0.0035 | 0.0217 | 0.0072 | 0.0085 |
| 28.2308 | 0.0225 | 0.0036 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0148 | 0.0082 | 0.0101 |
| 28.5527 | 0.0038 | 0.0000 | 0.0038 | 0.0151 | 0.0038 | 0.0053 | 0.0057 |
| 28.8782 | 0.0282 | 0.0078 | 0.0079 | 0.0157 | 0.0117 | 0.0143 | 0.0085 |
| 29.2075 | 0.0202 | 0.0161 | 0.0162 | 0.0000 | 0.0042 | 0.0114 | 0.0087 |
| 29.5405 | 0.0124 | 0.0124 | 0.0042 | 0.0126 | 0.0170 | 0.0117 | 0.0046 |
| 29.8773 | 0.0173 | 0.0085 | 0.0000 | 0.0087 | 0.0175 | 0.0104 | 0.0073 |
| 30.2179 | 0.0042 | 0.0090 | 0.0223 | 0.0225 | 0.0134 | 0.0143 | 0.0081 |
| 30.5625 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0093 | 0.0000 | 0.0046 | 0.0037 | 0.0039 |
| 30.911 | 0.0186 | 0.0141 | 0.0096 | 0.0048 | 0.0048 | 0.0103 | 0.0060 |
| 31.2634 | 0.0237 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0101 | 0.0087 | 0.0091 |
| 31.6198 | 0.0202 | 0.0100 | 0.0051 | 0.0052 | 0.0154 | 0.0112 | 0.0066 |
| 31.9804 | 0.0054 | 0.0053 | 0.0000 | 0.0266 | 0.0108 | 0.0096 | 0.0102 |
| 32.345 | 0.0052 | 0.0000 | 0.0054 | 0.0000 | 0.0225 | 0.0066 | 0.0093 |
| 32.7138 | 0.0177 | 0.0226 | 0.0000 | 0.0172 | 0.0116 | 0.0138 | 0.0086 |
| 33.0868 | 0.0110 | 0.0057 | 0.0000 | 0.0118 | 0.0178 | 0.0093 | 0.0067 |
| 33.4641 | 0.0240 | 0.0121 | 0.0061 | 0.0000 | 0.0124 | 0.0109 | 0.0089 |
| 33.8456 | 0.0123 | 0.0123 | 0.0126 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0087 | 0.0055 |
| 34.2315 | 0.0069 | 0.0000 | 0.0066 | 0.0259 | 0.0000 | 0.0079 | 0.0106 |
| 34.6218 | 0.0202 | 0.0066 | 0.0068 | 0.0068 | 0.0134 | 0.0108 | 0.0060 |
| 35.0165 | 0.0065 | 0.0068 | 0.0000 | 0.0211 | 0.0072 | 0.0083 | 0.0077 |
| 35.4158 | 0.0149 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0143 | 0.0218 | 0.0102 | 0.0098 |
| 35.8197 | 0.0154 | 0.0075 | 0.0000 | 0.0075 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0064 |
| 36.2281 | 0.0229 | 0.0075 | 0.0077 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0092 | 0.0083 |
| 36.6411 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0016 | 0.0036 |
| 37.0589 | 0.0084 | 0.0083 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0050 | 0.0045 |
| 37.4814 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0086 | 0.0085 | 0.0070 | 0.0075 |
| 37.9088 | 0.0173 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0265 | 0.0000 | 0.0087 | 0.0124 |
| 38.341 | 0.0086 | 0.0092 | 0.0184 | 0.0000 | 0.0091 | 0.0091 | 0.0065 |
| 38.7782 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0095 | 0.0000 | 0.0094 | 0.0038 | 0.0052 |
| 39.2203 | 0.0099 | 0.0192 | 0.0097 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0080 |
| 39.6675 | 0.0000 | 0.0102 | 0.0000 | 0.0101 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0055 |
| 40.1198 | 0.0295 | 0.0103 | 0.0000 | 0.0104 | 0.0217 | 0.0144 | 0.0114 |
| 40.5772 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0109 | 0.0109 | 0.0108 | 0.0065 | 0.0060 |
| 41.0399 | 0.0316 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0337 | 0.0335 | 0.0243 | 0.0119 |
| 41.5078 | 0.0362 | 0.0000 | 0.0232 | 0.0000 | 0.0116 | 0.0142 | 0.0156 |
| 41.9811 | 0.0127 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0049 | 0.0068 |
| 42.4597 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0123 | 0.0000 | 0.0025 | 0.0055 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 42.9439 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 43.4335 | 0.0519 | 0.0000 | 0.0132 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0130 | 0.0225 |
| 43.9287 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0137 | 0.0027 | 0.0061 |
| 44.4296 | 0.0134 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0142 | 0.0055 | 0.0075 |
| 44.9362 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0153 | 0.0031 | 0.0068 |
| 45.4485 | 0.0143 | 0.0000 | 0.0154 | 0.0000 | 0.0158 | 0.0091 | 0.0083 |
| 45.9667 | 0.0000 | 0.0158 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0032 | 0.0071 |
| 46.4908 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0164 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0033 | 0.0073 |
| 47.0209 | 0.0000 | 0.0166 | 0.0167 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0067 | 0.0091 |
| 47.557 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0175 | 0.0000 | 0.0181 | 0.0071 | 0.0098 |
| 48.0993 | 0.0000 | 0.0181 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0036 | 0.0081 |
| 48.6477 | 0.0189 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0038 | 0.0085 |
| 49.2024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.7633 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.3307 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0417 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0186 |
| 50.9046 | 0.0000 | 0.0419 | 0.0000 | 0.0216 | 0.0000 | 0.0127 | 0.0188 |
| 51.485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.0721 | 0.0000 | 0.0225 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0101 |
| 52.6658 | 0.0223 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0100 |
| 53.2662 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.8735 | 0.0268 | 0.0255 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0105 | 0.0143 |
| 54.4878 | 0.0277 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0124 |
| 55.1091 | 0.0275 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0123 |
| 55.7375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 56.3729 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.0157 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.6658 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.3233 | 0.0326 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0065 | 0.0146 |
| 58.9883 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0331 | 0.0000 | 0.0066 | 0.0148 |
| 59.6608 | 0.0324 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0065 | 0.0145 |

| Distribución de tamaño de partícula | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Número de partículas (No x10 ⁶ /m ³) del efluente de filtros rociadores | | | | | | | |
| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
| 2.01137 | 145.6760 | 20.0485 | 133.0140 | 11.7495 | 20.3163 | 66.1609 | 67.0460 |
| 2.0343 | 136.1480 | 20.0649 | 138.7580 | 13.1193 | 22.4959 | 66.1172 | 65.2177 |
| 2.0575 | 128.4430 | 18.9017 | 128.0710 | 12.7464 | 21.9662 | 62.0257 | 60.5519 |
| 2.08096 | 126.9090 | 18.1518 | 127.0840 | 12.1018 | 20.1638 | 60.8821 | 60.4269 |
| 2.10469 | 123.5590 | 17.8420 | 129.0580 | 11.4488 | 19.8280 | 60.3472 | 60.3251 |
| 2.12868 | 116.1560 | 16.4094 | 118.5630 | 11.3129 | 19.0028 | 56.2888 | 55.8247 |
| 2.15295 | 113.8400 | 15.2416 | 111.3620 | 11.1490 | 18.1055 | 53.9396 | 53.6145 |
| 2.1775 | 104.2470 | 15.2022 | 113.9030 | 10.8285 | 17.0443 | 52.2450 | 52.0397 |
| 2.20233 | 104.2070 | 15.3857 | 105.7610 | 10.0545 | 15.6499 | 50.2116 | 50.0529 |
| 2.22744 | 98.5837 | 14.0233 | 100.0660 | 10.0061 | 15.1246 | 47.5607 | 47.2952 |
| 2.25283 | 93.7919 | 13.4818 | 96.1120 | 9.2365 | 14.5969 | 45.4438 | 45.2462 |
| 2.27852 | 88.6931 | 13.6486 | 94.7944 | 9.4251 | 13.8373 | 44.0797 | 43.6003 |
| 2.3045 | 89.5049 | 12.4963 | 87.9711 | 9.1150 | 13.0751 | 42.4325 | 42.3015 |
| 2.33078 | 85.1873 | 12.5138 | 90.6032 | 8.6455 | 12.8144 | 41.9528 | 42.0154 |
| 2.35735 | 85.0542 | 11.4787 | 85.8547 | 8.7284 | 12.5750 | 40.7382 | 40.8452 |
| 2.38423 | 79.6522 | 11.3219 | 80.7689 | 7.9008 | 11.6347 | 38.2557 | 38.3294 |
| 2.41141 | 75.1674 | 10.8490 | 77.8033 | 7.4597 | 11.2958 | 36.5150 | 36.5298 |
| 2.43891 | 72.9494 | 10.2142 | 74.8826 | 7.4355 | 10.6123 | 35.2188 | 35.3533 |
| 2.46672 | 66.9959 | 10.1070 | 70.2236 | 7.0435 | 10.2533 | 32.9247 | 32.6211 |
| 2.49484 | 67.9997 | 9.4726 | 67.2130 | 7.0436 | 10.1948 | 32.3848 | 32.1752 |
| 2.52328 | 64.1680 | 9.6793 | 67.7762 | 6.7923 | 9.5900 | 31.6011 | 31.4236 |
| 2.55205 | 64.0202 | 9.5048 | 63.7283 | 6.4579 | 9.5950 | 30.6613 | 30.3456 |
| 2.58115 | 59.6156 | 9.2842 | 62.2709 | 6.2209 | 8.7866 | 29.2356 | 28.9835 |
| 2.61059 | 59.9134 | 8.5341 | 60.4834 | 6.3998 | 8.1260 | 28.6913 | 28.7737 |
| 2.64035 | 56.7340 | 8.7388 | 59.9638 | 5.9350 | 8.4084 | 27.9560 | 27.7894 |
| 2.67046 | 58.3174 | 8.6900 | 55.9175 | 5.7609 | 8.1689 | 27.3709 | 27.1904 |
| 2.70091 | 55.9322 | 8.0816 | 55.3505 | 5.3540 | 7.8715 | 26.5180 | 26.6083 |
| 2.7317 | 47.6444 | 7.4435 | 48.7612 | 4.7005 | 6.6608 | 23.0421 | 22.9936 |
| 2.76285 | 47.4470 | 6.9482 | 45.1853 | 5.0975 | 6.2936 | 22.1943 | 22.0446 |
| 2.79435 | 45.9900 | 6.6476 | 48.1509 | 5.0731 | 6.2759 | 22.4275 | 22.5163 |
| 2.8262 | 46.3462 | 7.2580 | 46.5028 | 5.0201 | 6.3443 | 22.2943 | 22.0422 |
| 2.85843 | 47.9153 | 7.1318 | 45.4679 | 4.6426 | 6.2932 | 22.2902 | 22.3101 |
| 2.89102 | 45.5414 | 7.0212 | 46.1261 | 4.7199 | 6.0985 | 21.9014 | 21.8635 |
| 2.92399 | 42.9841 | 6.4793 | 41.7022 | 4.6181 | 5.6880 | 20.2943 | 20.1436 |
| 2.95733 | 41.7392 | 5.9158 | 39.5371 | 4.1534 | 5.5622 | 19.3815 | 19.4313 |
| 2.99105 | 41.9249 | 5.9766 | 39.1601 | 4.1727 | 5.7023 | 19.3873 | 19.3489 |
| 3.02515 | 40.6090 | 5.6765 | 39.6786 | 4.3085 | 5.5935 | 19.1732 | 19.1539 |
| 3.05964 | 38.8221 | 5.8309 | 36.9941 | 3.9841 | 5.1643 | 18.1591 | 18.0520 |
| 3.09453 | 36.4467 | 5.4798 | 33.9366 | 3.9164 | 5.0069 | 16.9573 | 16.6789 |
| 3.12981 | 36.5721 | 5.4673 | 34.0306 | 3.6642 | 4.8986 | 16.9266 | 16.8105 |
| 3.16549 | 34.5036 | 5.1285 | 34.0313 | 3.4565 | 4.8844 | 16.4009 | 16.3232 |
| 3.20159 | 35.6105 | 4.9281 | 37.0894 | 3.7178 | 4.6089 | 17.1909 | 17.5032 |
| 3.23809 | 31.9156 | 5.0789 | 33.5128 | 3.6112 | 4.5325 | 15.7302 | 15.5234 |
| 3.27501 | 29.8931 | 4.8249 | 32.5245 | 3.4954 | 4.4563 | 15.0388 | 14.7983 |
| 3.31235 | 31.3241 | 4.5540 | 29.8885 | 3.4031 | 4.0904 | 14.6520 | 14.5788 |
| 3.35012 | 29.4518 | 4.5015 | 32.5240 | 3.0159 | 4.2482 | 14.7483 | 14.8750 |
| 3.38832 | 27.6004 | 4.5916 | 27.5344 | 3.1031 | 4.0260 | 13.3711 | 12.9703 |
| 3.42695 | 28.4254 | 4.3424 | 28.9929 | 2.8900 | 3.8057 | 13.6913 | 13.7207 |
| 3.46602 | 27.0526 | 4.2119 | 29.4178 | 2.9771 | 3.7373 | 13.4794 | 13.5033 |
| 3.50554 | 25.1841 | 4.0615 | 27.8171 | 2.9242 | 3.5345 | 12.7043 | 12.6350 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 3.54551 | 24.7833 | 3.8554 | 25.6990 | 2.9096 | 3.8383 | 12.2171 | 11.8998 |
| 3.58594 | 25.1301 | 3.6330 | 23.9100 | 2.7546 | 3.3079 | 11.7471 | 11.6722 |
| 3.62682 | 24.7961 | 2.9879 | 24.3811 | 2.3189 | 3.4097 | 11.5787 | 11.8836 |
| 3.66818 | 24.4074 | 3.4954 | 23.0626 | 2.7352 | 2.8787 | 11.3159 | 11.3506 |
| 3.71 | 22.2831 | 3.2934 | 24.0054 | 2.4590 | 2.9229 | 10.9928 | 11.1134 |
| 3.7523 | 24.2204 | 3.0776 | 22.7330 | 2.5995 | 2.8980 | 11.1057 | 11.3067 |
| 3.79508 | 23.0305 | 3.3755 | 21.6515 | 2.3383 | 2.9607 | 10.6713 | 10.6705 |
| 3.83835 | 21.6932 | 3.0965 | 20.1453 | 2.2366 | 2.8909 | 10.0125 | 9.9765 |
| 3.88212 | 21.2182 | 3.0703 | 21.1334 | 2.2464 | 2.7210 | 10.0779 | 10.1352 |
| 3.92638 | 20.1498 | 2.8613 | 20.4742 | 2.1253 | 2.5568 | 9.6335 | 9.7523 |
| 3.97115 | 21.0744 | 2.7972 | 18.3565 | 2.2705 | 2.3999 | 9.3797 | 9.4860 |
| 4.01643 | 20.2763 | 2.7241 | 20.1918 | 2.0477 | 2.5820 | 9.5644 | 9.7434 |
| 4.06222 | 19.2588 | 2.6546 | 17.4152 | 2.0286 | 2.3930 | 8.7500 | 8.7787 |
| 4.10853 | 18.2524 | 2.2349 | 16.2859 | 1.9460 | 2.3552 | 8.2149 | 8.2959 |
| 4.15538 | 16.6853 | 2.6031 | 16.5207 | 2.0088 | 2.3354 | 8.0307 | 7.8285 |
| 4.20276 | 16.7982 | 2.3264 | 15.3445 | 1.7960 | 2.1839 | 7.6898 | 7.6710 |
| 4.25068 | 16.6312 | 2.3063 | 16.3790 | 1.7864 | 2.2035 | 7.8613 | 7.8936 |
| 4.29915 | 15.7062 | 2.1542 | 16.7091 | 1.8106 | 2.0261 | 7.6812 | 7.7926 |
| 4.34817 | 14.9509 | 2.1603 | 14.1204 | 1.7960 | 1.9816 | 7.0018 | 6.8849 |
| 4.39774 | 13.8789 | 2.0132 | 14.3555 | 1.6070 | 2.0261 | 6.7761 | 6.7057 |
| 4.44788 | 13.5433 | 2.1082 | 12.8018 | 1.6846 | 2.0330 | 6.4342 | 6.1589 |
| 4.4986 | 13.7271 | 1.9185 | 13.5563 | 1.4863 | 1.8183 | 6.5013 | 6.5205 |
| 4.54989 | 13.9282 | 1.8751 | 13.7914 | 1.4620 | 1.5782 | 6.5270 | 6.6958 |
| 4.60177 | 12.8471 | 1.9573 | 11.8616 | 1.2394 | 1.5844 | 5.8980 | 5.9096 |
| 4.65423 | 12.8121 | 1.8102 | 9.6491 | 1.3603 | 1.6981 | 5.4660 | 5.3824 |
| 4.7073 | 12.4549 | 1.7167 | 11.3903 | 1.2781 | 1.5404 | 5.6761 | 5.7168 |
| 4.76097 | 10.5023 | 1.5791 | 10.5425 | 1.2732 | 1.5720 | 5.0938 | 4.9571 |
| 4.81526 | 10.1223 | 1.5503 | 10.4958 | 1.1038 | 1.5146 | 4.9574 | 4.8903 |
| 4.87016 | 10.5079 | 1.6406 | 8.5657 | 1.0553 | 1.6105 | 4.6760 | 4.4961 |
| 4.92569 | 9.8293 | 1.6284 | 10.4963 | 1.0700 | 1.3639 | 4.8776 | 4.8345 |
| 4.98185 | 9.1643 | 1.5395 | 9.5542 | 1.1862 | 1.4267 | 4.5742 | 4.3722 |
| 5.03865 | 10.2401 | 1.4181 | 8.6131 | 1.1958 | 1.2374 | 4.5409 | 4.4977 |
| 5.0961 | 8.6000 | 1.3561 | 8.6605 | 0.9682 | 1.2054 | 4.1580 | 4.0850 |
| 5.15421 | 8.6627 | 1.2730 | 9.5073 | 1.0069 | 1.1939 | 4.3287 | 4.3532 |
| 5.21298 | 8.6864 | 1.1469 | 7.1548 | 0.8716 | 1.0987 | 3.7917 | 3.8093 |
| 5.27242 | 8.4978 | 1.1906 | 7.4369 | 1.0118 | 1.1108 | 3.8496 | 3.7782 |
| 5.33253 | 8.1817 | 1.1203 | 6.8249 | 0.8183 | 1.1299 | 3.6150 | 3.5840 |
| 5.39333 | 6.3593 | 1.0511 | 6.7779 | 0.7744 | 0.9528 | 3.1831 | 3.0957 |
| 5.45482 | 7.2648 | 1.0130 | 6.3544 | 0.8036 | 1.0604 | 3.2992 | 3.2221 |
| 5.51702 | 7.7812 | 0.9628 | 5.8837 | 0.8278 | 1.0100 | 3.2931 | 3.3006 |
| 5.57992 | 6.8019 | 0.9564 | 6.2600 | 0.8181 | 0.7645 | 3.1202 | 3.1203 |
| 5.64354 | 7.3824 | 0.8297 | 5.8826 | 0.8616 | 0.8396 | 3.1592 | 3.2148 |
| 5.70789 | 5.0064 | 1.0262 | 6.8716 | 0.6100 | 0.6691 | 2.8367 | 2.9122 |
| 5.77297 | 5.7191 | 0.6777 | 5.1307 | 0.6100 | 0.8394 | 2.5954 | 2.5927 |
| 5.8388 | 4.8204 | 0.9120 | 5.2715 | 0.6389 | 0.7514 | 2.4789 | 2.3508 |
| 5.90537 | 4.8214 | 0.7598 | 3.8596 | 0.6584 | 0.7515 | 2.1701 | 2.0106 |
| 5.9727 | 5.3773 | 0.8424 | 5.5073 | 0.5809 | 0.6819 | 2.5979 | 2.5986 |
| 6.0408 | 5.3188 | 0.7284 | 4.5186 | 0.6149 | 0.6572 | 2.3676 | 2.3463 |
| 6.10968 | 4.1979 | 0.7285 | 4.9420 | 0.6439 | 0.7131 | 2.2451 | 2.1388 |
| 6.17934 | 4.1015 | 0.5820 | 5.3655 | 0.6583 | 0.6251 | 2.2665 | 2.2961 |
| 6.24979 | 3.1579 | 0.6838 | 5.2242 | 0.6148 | 0.6061 | 2.0574 | 2.0805 |
| 6.32105 | 3.8292 | 0.7095 | 4.0478 | 0.5810 | 0.5678 | 1.9471 | 1.8204 |
| 6.39313 | 3.7390 | 0.5962 | 3.7184 | 0.5519 | 0.5999 | 1.8411 | 1.7233 |
| 6.46602 | 4.0563 | 0.6973 | 4.3776 | 0.5422 | 0.6129 | 2.0573 | 1.9756 |
| 6.53974 | 4.0484 | 0.6464 | 4.8479 | 0.4791 | 0.6503 | 2.1344 | 2.1321 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 6.61431 | 3.2669 | 0.5702 | 4.4246 | 0.5179 | 0.5111 | 1.8581 | 1.8602 |
| 6.68972 | 3.6896 | 0.5386 | 4.3302 | 0.5084 | 0.4546 | 1.9043 | 1.9357 |
| 6.766 | 3.1655 | 0.4053 | 3.5299 | 0.4453 | 0.5497 | 1.6191 | 1.5841 |
| 6.84314 | 3.7009 | 0.4374 | 4.1421 | 0.5519 | 0.4858 | 1.8636 | 1.8855 |
| 6.92116 | 2.8065 | 0.4941 | 3.2948 | 0.4745 | 0.5173 | 1.5174 | 1.4103 |
| 7.00008 | 3.1147 | 0.4182 | 4.2362 | 0.4987 | 0.4982 | 1.7532 | 1.7993 |
| 7.07989 | 2.9212 | 0.4363 | 4.2362 | 0.4356 | 0.5491 | 1.7157 | 1.7637 |
| 7.16061 | 3.0743 | 0.4695 | 3.9531 | 0.3292 | 0.4797 | 1.6612 | 1.7205 |
| 7.24226 | 3.7461 | 0.3983 | 4.0947 | 0.3099 | 0.4355 | 1.7969 | 1.9429 |
| 7.32484 | 2.8752 | 0.4115 | 3.6243 | 0.3872 | 0.5180 | 1.5632 | 1.5630 |
| 7.40836 | 2.8658 | 0.4244 | 5.1305 | 0.3437 | 0.4101 | 1.8349 | 2.1311 |
| 7.49282 | 2.3625 | 0.4240 | 4.4247 | 0.3873 | 0.4480 | 1.6093 | 1.7847 |
| 7.57825 | 2.1496 | 0.4501 | 3.3419 | 0.3001 | 0.4103 | 1.3304 | 1.3602 |
| 7.66466 | 2.7118 | 0.3922 | 4.4715 | 0.2613 | 0.3661 | 1.6406 | 1.8872 |
| 7.75205 | 2.4584 | 0.3420 | 3.7188 | 0.2710 | 0.2713 | 1.4123 | 1.5941 |
| 7.84044 | 2.0498 | 0.3867 | 4.0480 | 0.2904 | 0.2778 | 1.4105 | 1.6546 |
| 7.92983 | 2.0966 | 0.4308 | 3.3416 | 0.2469 | 0.3157 | 1.2863 | 1.3816 |
| 8.02025 | 2.1011 | 0.4628 | 4.5184 | 0.2372 | 0.3093 | 1.5258 | 1.8410 |
| 8.11169 | 3.2760 | 0.3679 | 3.5771 | 0.2760 | 0.3725 | 1.5739 | 1.6950 |
| 8.20418 | 1.9391 | 0.3486 | 4.5658 | 0.2518 | 0.2589 | 1.4729 | 1.8717 |
| 8.29773 | 2.2982 | 0.3867 | 4.4714 | 0.2130 | 0.2651 | 1.5269 | 1.8630 |
| 8.39233 | 2.7635 | 0.2848 | 3.4358 | 0.2275 | 0.2967 | 1.4017 | 1.5684 |
| 8.48802 | 2.4056 | 0.3041 | 3.6716 | 0.2276 | 0.2967 | 1.3811 | 1.5782 |
| 8.5848 | 3.0317 | 0.3166 | 3.6244 | 0.2324 | 0.2717 | 1.4953 | 1.6863 |
| 8.68268 | 3.5854 | 0.3230 | 2.9652 | 0.2227 | 0.2210 | 1.4635 | 1.6690 |
| 8.78168 | 3.5333 | 0.3295 | 4.0480 | 0.2323 | 0.1955 | 1.6677 | 1.9471 |
| 8.88181 | 4.1079 | 0.2595 | 4.2836 | 0.1646 | 0.2336 | 1.8098 | 2.1792 |
| 8.98308 | 3.5421 | 0.3350 | 3.6714 | 0.1937 | 0.2396 | 1.5963 | 1.8365 |
| 9.0855 | 4.3494 | 0.3038 | 3.3418 | 0.1936 | 0.1894 | 1.6756 | 2.0133 |
| 9.18909 | 3.9347 | 0.3354 | 4.3768 | 0.1694 | 0.2461 | 1.8125 | 2.1456 |
| 9.29387 | 4.2945 | 0.3038 | 3.6715 | 0.1645 | 0.1514 | 1.7172 | 2.0810 |
| 9.39983 | 5.2208 | 0.3293 | 3.6238 | 0.1695 | 0.2779 | 1.9242 | 2.3500 |
| 9.50701 | 5.2852 | 0.3426 | 3.1531 | 0.2130 | 0.1580 | 1.8304 | 2.3082 |
| 9.61541 | 5.2754 | 0.2661 | 3.4834 | 0.1258 | 0.1576 | 1.8617 | 2.3847 |
| 9.72504 | 6.3532 | 0.3293 | 2.9184 | 0.1501 | 0.2083 | 1.9919 | 2.7026 |
| 9.83592 | 4.7180 | 0.3421 | 3.1536 | 0.0968 | 0.1829 | 1.6987 | 2.1176 |
| 9.94806 | 4.8663 | 0.2850 | 2.8710 | 0.1453 | 0.1580 | 1.6651 | 2.1323 |
| 10.0615 | 5.9873 | 0.3102 | 2.9658 | 0.1549 | 0.1326 | 1.9102 | 2.5758 |
| 10.1762 | 4.8667 | 0.2278 | 2.0711 | 0.1162 | 0.2082 | 1.4980 | 2.0532 |
| 10.2923 | 4.6060 | 0.2849 | 2.6827 | 0.1065 | 0.1263 | 1.5613 | 2.0207 |
| 10.4096 | 5.2657 | 0.2534 | 2.1180 | 0.1840 | 0.1453 | 1.5933 | 2.2159 |
| 10.5283 | 4.3011 | 0.2466 | 2.5416 | 0.1210 | 0.2084 | 1.4837 | 1.8755 |
| 10.6483 | 5.1137 | 0.2218 | 2.5417 | 0.1646 | 0.2082 | 1.6500 | 2.1862 |
| 10.7698 | 4.8065 | 0.2032 | 1.7885 | 0.0969 | 0.2084 | 1.4207 | 2.0189 |
| 10.8926 | 5.1577 | 0.2847 | 2.1649 | 0.1113 | 0.0884 | 1.5614 | 2.1909 |
| 11.0168 | 4.3989 | 0.2022 | 1.6006 | 0.1161 | 0.1893 | 1.3014 | 1.8394 |
| 11.1424 | 3.5932 | 0.2473 | 2.3536 | 0.1356 | 0.1009 | 1.2861 | 1.6023 |
| 11.2694 | 4.2490 | 0.2150 | 1.4122 | 0.0969 | 0.1641 | 1.2274 | 1.7747 |
| 11.3979 | 3.3774 | 0.1965 | 2.1181 | 0.1307 | 0.1261 | 1.1897 | 1.4906 |
| 11.5279 | 2.9180 | 0.1455 | 1.6944 | 0.1017 | 0.1895 | 1.0098 | 1.2604 |
| 11.6593 | 3.0210 | 0.1709 | 1.5533 | 0.1065 | 0.1452 | 0.9994 | 1.2852 |
| 11.7922 | 2.7170 | 0.1460 | 1.6476 | 0.1356 | 0.1453 | 0.9583 | 1.1796 |
| 11.9267 | 2.0929 | 0.1456 | 1.0825 | 0.0920 | 0.1264 | 0.7079 | 0.8792 |
| 12.0627 | 2.0489 | 0.1332 | 1.8826 | 0.0968 | 0.1263 | 0.8575 | 1.0134 |
| 12.2002 | 1.2270 | 0.1395 | 1.3651 | 0.1016 | 0.1515 | 0.5969 | 0.6403 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 12.3393 | 1.3853 | 0.1205 | 1.1768 | 0.1017 | 0.0757 | 0.5720 | 0.6517 |
| 12.4799 | 1.1261 | 0.1843 | 1.6474 | 0.0823 | 0.0820 | 0.6244 | 0.7211 |
| 12.6222 | 0.5617 | 0.1265 | 1.1297 | 0.0969 | 0.0884 | 0.4006 | 0.4534 |
| 12.7662 | 0.7173 | 0.1200 | 1.3181 | 0.0726 | 0.1390 | 0.4734 | 0.5409 |
| 12.9117 | 0.5129 | 0.1457 | 1.0826 | 0.1016 | 0.1010 | 0.3888 | 0.4246 |
| 13.0589 | 0.5129 | 0.1457 | 1.3180 | 0.0920 | 0.1199 | 0.4377 | 0.5211 |
| 13.2078 | 0.6635 | 0.1583 | 0.8003 | 0.1114 | 0.0758 | 0.3619 | 0.3425 |
| 13.3584 | 0.3067 | 0.1578 | 1.2238 | 0.0823 | 0.1200 | 0.3781 | 0.4803 |
| 13.5108 | 0.6667 | 0.1143 | 1.1296 | 0.0920 | 0.0947 | 0.4195 | 0.4667 |
| 13.6648 | 0.6695 | 0.0693 | 1.4122 | 0.0872 | 0.1011 | 0.4678 | 0.5854 |
| 13.8206 | 0.6676 | 0.1079 | 1.4590 | 0.0484 | 0.0883 | 0.4742 | 0.6066 |
| 13.9782 | 0.3591 | 0.1136 | 1.1296 | 0.0629 | 0.0947 | 0.3520 | 0.4504 |
| 14.1376 | 0.6186 | 0.1523 | 1.3181 | 0.0920 | 0.1324 | 0.4627 | 0.5241 |
| 14.2987 | 0.5610 | 0.0631 | 0.8472 | 0.0678 | 0.0632 | 0.3205 | 0.3646 |
| 14.4618 | 0.4637 | 0.1331 | 1.1768 | 0.0823 | 0.0946 | 0.3901 | 0.4670 |
| 14.6267 | 0.4589 | 0.0633 | 0.8943 | 0.0629 | 0.0631 | 0.3085 | 0.3696 |
| 14.7935 | 0.5614 | 0.1390 | 1.0355 | 0.0484 | 0.0819 | 0.3732 | 0.4241 |
| 14.9622 | 0.5129 | 0.1011 | 1.0823 | 0.0581 | 0.0819 | 0.3673 | 0.4417 |
| 15.1328 | 0.6148 | 0.1454 | 0.8472 | 0.0581 | 0.1263 | 0.3583 | 0.3514 |
| 15.3053 | 0.4088 | 0.0885 | 1.3649 | 0.0629 | 0.1136 | 0.4078 | 0.5530 |
| 15.4798 | 1.0252 | 0.0886 | 1.2238 | 0.0678 | 0.1135 | 0.5038 | 0.5712 |
| 15.6563 | 0.5134 | 0.0948 | 0.9884 | 0.0823 | 0.0757 | 0.3509 | 0.4020 |
| 15.8348 | 1.0780 | 0.0951 | 0.8944 | 0.0678 | 0.1200 | 0.4510 | 0.4932 |
| 16.0153 | 0.6663 | 0.0950 | 1.0354 | 0.0678 | 0.1010 | 0.3931 | 0.4379 |
| 16.1979 | 0.3582 | 0.0633 | 0.8471 | 0.0533 | 0.0885 | 0.2821 | 0.3401 |
| 16.3826 | 0.4086 | 0.1080 | 1.0826 | 0.0678 | 0.0820 | 0.3498 | 0.4331 |
| 16.5694 | 0.5095 | 0.0761 | 0.7060 | 0.0533 | 0.0632 | 0.2816 | 0.3058 |
| 16.7583 | 0.5127 | 0.1080 | 0.4706 | 0.0484 | 0.0819 | 0.2443 | 0.2272 |
| 16.9494 | 0.5614 | 0.0696 | 0.6589 | 0.0387 | 0.0758 | 0.2809 | 0.3029 |
| 17.1427 | 0.7205 | 0.0506 | 1.0824 | 0.0774 | 0.0819 | 0.4026 | 0.4732 |
| 17.3381 | 0.5624 | 0.0631 | 0.6590 | 0.0630 | 0.0821 | 0.2859 | 0.2986 |
| 17.5358 | 0.5097 | 0.0443 | 1.0355 | 0.0726 | 0.0315 | 0.3387 | 0.4378 |
| 17.7358 | 0.4573 | 0.0191 | 0.4707 | 0.0533 | 0.0884 | 0.2178 | 0.2262 |
| 17.938 | 0.6651 | 0.0570 | 1.0356 | 0.0533 | 0.0823 | 0.3787 | 0.4502 |
| 18.1425 | 0.7125 | 0.0823 | 0.7531 | 0.0484 | 0.0633 | 0.3319 | 0.3664 |
| 18.3494 | 0.7670 | 0.0381 | 0.7061 | 0.0677 | 0.0570 | 0.3272 | 0.3745 |
| 18.5586 | 0.4072 | 0.0824 | 0.5648 | 0.0629 | 0.0694 | 0.2373 | 0.2338 |
| 18.7702 | 0.5129 | 0.0507 | 0.7061 | 0.0290 | 0.0883 | 0.2774 | 0.3115 |
| 18.9842 | 0.4086 | 0.0381 | 0.5649 | 0.0194 | 0.0946 | 0.2251 | 0.2467 |
| 19.2006 | 0.2055 | 0.0253 | 0.2823 | 0.0581 | 0.0567 | 0.1256 | 0.1121 |
| 19.4196 | 0.3577 | 0.0253 | 0.1883 | 0.0387 | 0.0506 | 0.1321 | 0.1422 |
| 19.641 | 0.3058 | 0.0444 | 0.6119 | 0.0291 | 0.0505 | 0.2083 | 0.2531 |
| 19.8649 | 0.3561 | 0.0380 | 0.4705 | 0.0581 | 0.0567 | 0.1959 | 0.2027 |
| 20.0914 | 0.3575 | 0.0381 | 0.4236 | 0.0339 | 0.0820 | 0.1870 | 0.1882 |
| 20.3205 | 0.3577 | 0.0381 | 0.4236 | 0.0194 | 0.0315 | 0.1741 | 0.1992 |
| 20.5522 | 0.2579 | 0.0314 | 0.1413 | 0.0484 | 0.0569 | 0.1072 | 0.0944 |
| 20.7865 | 0.2550 | 0.0571 | 0.3766 | 0.0387 | 0.0253 | 0.1505 | 0.1573 |
| 21.0235 | 0.3072 | 0.0317 | 0.2824 | 0.0242 | 0.0379 | 0.1367 | 0.1447 |
| 21.2632 | 0.3101 | 0.0254 | 0.3293 | 0.0097 | 0.0757 | 0.1500 | 0.1570 |
| 21.5057 | 0.3580 | 0.0700 | 0.2824 | 0.0387 | 0.0946 | 0.1688 | 0.1422 |
| 21.7509 | 0.4583 | 0.0381 | 0.3295 | 0.0435 | 0.0819 | 0.1903 | 0.1921 |
| 21.9988 | 0.3564 | 0.0569 | 0.1883 | 0.0436 | 0.0189 | 0.1328 | 0.1412 |
| 22.2497 | 0.3591 | 0.0443 | 0.3296 | 0.0242 | 0.0504 | 0.1615 | 0.1675 |
| 22.5034 | 0.4102 | 0.0504 | 0.4238 | 0.0339 | 0.0442 | 0.1925 | 0.2051 |
| 22.76 | 0.3548 | 0.0379 | 0.2353 | 0.0242 | 0.0378 | 0.1380 | 0.1496 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 23.0195 | 0.4102 | 0.0254 | 0.2354 | 0.0242 | 0.0506 | 0.1491 | 0.1704 |
| 23.2819 | 0.2042 | 0.0191 | 0.2354 | 0.0097 | 0.0442 | 0.1025 | 0.1084 |
| 23.5474 | 0.2044 | 0.0380 | 0.1883 | 0.0290 | 0.0442 | 0.1008 | 0.0876 |
| 23.8159 | 0.2577 | 0.0379 | 0.1882 | 0.0145 | 0.0126 | 0.1022 | 0.1134 |
| 24.0875 | 0.3104 | 0.0192 | 0.0000 | 0.0145 | 0.0316 | 0.0751 | 0.1320 |
| 24.3621 | 0.1552 | 0.0381 | 0.2825 | 0.0291 | 0.0315 | 0.1073 | 0.1114 |
| 24.6399 | 0.3044 | 0.0509 | 0.1412 | 0.0048 | 0.0630 | 0.1129 | 0.1178 |
| 24.9207 | 0.3607 | 0.0442 | 0.0941 | 0.0097 | 0.0252 | 0.1068 | 0.1455 |
| 25.2049 | 0.3580 | 0.0445 | 0.2354 | 0.0145 | 0.0506 | 0.1406 | 0.1496 |
| 25.4923 | 0.2071 | 0.0381 | 0.0941 | 0.0145 | 0.0252 | 0.0758 | 0.0796 |
| 25.7829 | 0.2044 | 0.0443 | 0.1412 | 0.0194 | 0.0189 | 0.0856 | 0.0833 |
| 26.0769 | 0.2563 | 0.0189 | 0.1411 | 0.0194 | 0.0315 | 0.0935 | 0.1045 |
| 26.3743 | 0.3623 | 0.0063 | 0.0941 | 0.0145 | 0.0380 | 0.1030 | 0.1489 |
| 26.675 | 0.1520 | 0.0379 | 0.1411 | 0.0000 | 0.0506 | 0.0763 | 0.0669 |
| 26.9791 | 0.4575 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0194 | 0.0252 | 0.1004 | 0.2000 |
| 27.2868 | 0.1536 | 0.0191 | 0.0471 | 0.0097 | 0.0442 | 0.0547 | 0.0575 |
| 27.5979 | 0.2552 | 0.0127 | 0.0471 | 0.0000 | 0.0316 | 0.0693 | 0.1055 |
| 27.9125 | 0.3088 | 0.0191 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0252 | 0.0706 | 0.1336 |
| 28.2308 | 0.2058 | 0.0063 | 0.0471 | 0.0097 | 0.0063 | 0.0550 | 0.0860 |
| 28.5527 | 0.1044 | 0.0570 | 0.0471 | 0.0000 | 0.0189 | 0.0455 | 0.0399 |
| 28.8782 | 0.3571 | 0.0000 | 0.0942 | 0.0048 | 0.0253 | 0.0963 | 0.1506 |
| 29.2075 | 0.0000 | 0.0127 | 0.1413 | 0.0193 | 0.0190 | 0.0385 | 0.0580 |
| 29.5405 | 0.1522 | 0.0064 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0379 | 0.0412 | 0.0637 |
| 29.8773 | 0.3085 | 0.0254 | 0.0941 | 0.0000 | 0.0253 | 0.0907 | 0.1267 |
| 30.2179 | 0.2042 | 0.0253 | 0.0942 | 0.0048 | 0.0315 | 0.0720 | 0.0811 |
| 30.5625 | 0.3042 | 0.0254 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0126 | 0.0704 | 0.1310 |
| 30.911 | 0.2071 | 0.0127 | 0.0471 | 0.0097 | 0.0252 | 0.0604 | 0.0834 |
| 31.2634 | 0.2060 | 0.0063 | 0.0942 | 0.0242 | 0.0063 | 0.0674 | 0.0855 |
| 31.6198 | 0.3047 | 0.0316 | 0.1412 | 0.0097 | 0.0126 | 0.1000 | 0.1265 |
| 31.9804 | 0.0506 | 0.0127 | 0.0470 | 0.0048 | 0.0190 | 0.0268 | 0.0207 |
| 32.345 | 0.1538 | 0.0443 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0253 | 0.0466 | 0.0622 |
| 32.7138 | 0.3085 | 0.0378 | 0.1412 | 0.0000 | 0.0189 | 0.1013 | 0.1281 |
| 33.0868 | 0.2039 | 0.0127 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0189 | 0.0490 | 0.0869 |
| 33.4641 | 0.3609 | 0.0189 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0785 | 0.1581 |
| 33.8456 | 0.1538 | 0.0189 | 0.0471 | 0.0145 | 0.0000 | 0.0469 | 0.0622 |
| 34.2315 | 0.1520 | 0.0125 | 0.0471 | 0.0048 | 0.0063 | 0.0446 | 0.0625 |
| 34.6218 | 0.2028 | 0.0191 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0063 | 0.0466 | 0.0876 |
| 35.0165 | 0.1012 | 0.0125 | 0.0941 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0441 | 0.0492 |
| 35.4158 | 0.1522 | 0.0189 | 0.0470 | 0.0048 | 0.0126 | 0.0471 | 0.0609 |
| 35.8197 | 0.1014 | 0.0063 | 0.0471 | 0.0097 | 0.0063 | 0.0342 | 0.0413 |
| 36.2281 | 0.1552 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0323 | 0.0687 |
| 36.6411 | 0.1552 | 0.0000 | 0.0471 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0417 | 0.0664 |
| 37.0589 | 0.1014 | 0.0127 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0238 | 0.0437 |
| 37.4814 | 0.0508 | 0.0000 | 0.0942 | 0.0097 | 0.0126 | 0.0335 | 0.0391 |
| 37.9088 | 0.3580 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0738 | 0.1589 |
| 38.341 | 0.0522 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0117 | 0.0228 |
| 38.7782 | 0.1016 | 0.0064 | 0.0470 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0320 | 0.0433 |
| 39.2203 | 0.2042 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0408 | 0.0913 |
| 39.6675 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0013 | 0.0028 |
| 40.1198 | 0.0508 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0126 | 0.0137 | 0.0214 |
| 40.5772 | 0.0508 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0097 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0220 |
| 41.0399 | 0.1044 | 0.0063 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0315 | 0.0452 |
| 41.5078 | 0.0506 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0139 | 0.0212 |
| 41.9811 | 0.0506 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0114 | 0.0221 |
| 42.4597 | 0.0508 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0127 | 0.0220 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 42.9439 | 0.1014 | 0.0063 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0241 | 0.0435 |
| 43.4335 | 0.1014 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0215 | 0.0447 |
| 43.9287 | 0.1014 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0212 | 0.0449 |
| 44.4296 | 0.1014 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0203 | 0.0453 |
| 44.9362 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0013 | 0.0028 |
| 45.4485 | 0.0522 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0117 | 0.0228 |
| 45.9667 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 46.4908 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 47.0209 | 0.0522 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0104 | 0.0233 |
| 47.557 | 0.0506 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0111 | 0.0222 |
| 48.0993 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0471 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0094 | 0.0211 |
| 48.6477 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.2024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.7633 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.3307 | 0.0522 | 0.0000 | 0.0471 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0199 | 0.0272 |
| 50.9046 | 0.0506 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0048 | 0.0000 | 0.0111 | 0.0222 |
| 51.485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.0721 | 0.0506 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0101 | 0.0226 |
| 52.6658 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.2662 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.8735 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 54.4878 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.1091 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.7375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 56.3729 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.0157 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0063 | 0.0013 | 0.0028 |
| 57.6658 | 0.0506 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0101 | 0.0226 |
| 58.3233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.9883 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 59.6608 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

| Distribución de tamaño de partícula | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Volumen de partículas (mL/m ³) del efluente de filtros rociadores | | | | | | | |
| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
| 2.01137 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0037 | 0.0032 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0004 |
| 2.0343 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0048 | 0.0041 | 0.0005 |
| 2.0575 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0049 | 0.0040 | 0.0005 |
| 2.08096 | 0.0036 | 0.0041 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0046 | 0.0040 | 0.0004 |
| 2.10469 | 0.0036 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0035 | 0.0047 | 0.0040 | 0.0005 |
| 2.12868 | 0.0035 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0047 | 0.0039 | 0.0004 |
| 2.15295 | 0.0036 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0004 |
| 2.1775 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0004 |
| 2.20233 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0003 |
| 2.22744 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0043 | 0.0038 | 0.0003 |
| 2.25283 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0003 |
| 2.27852 | 0.0033 | 0.0041 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0003 |
| 2.3045 | 0.0035 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0038 | 0.0002 |
| 2.33078 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0041 | 0.0038 | 0.0003 |
| 2.35735 | 0.0035 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0002 |
| 2.38423 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0002 |
| 2.41141 | 0.0033 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.43891 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0002 |
| 2.46672 | 0.0032 | 0.0038 | 0.0036 | 0.0035 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0003 |
| 2.49484 | 0.0033 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.52328 | 0.0033 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.55205 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0041 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.58115 | 0.0032 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.61059 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0037 | 0.0002 |
| 2.64035 | 0.0033 | 0.0041 | 0.0038 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.67046 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0038 | 0.0003 |
| 2.70091 | 0.0035 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0002 |
| 2.7317 | 0.0031 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0034 | 0.0003 |
| 2.76285 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0033 | 0.0036 | 0.0034 | 0.0034 | 0.0002 |
| 2.79435 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0035 | 0.0002 |
| 2.8262 | 0.0033 | 0.0041 | 0.0036 | 0.0038 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.85843 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.89102 | 0.0035 | 0.0043 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0003 |
| 2.92399 | 0.0034 | 0.0041 | 0.0036 | 0.0038 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0003 |
| 2.95733 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0035 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0002 |
| 2.99105 | 0.0035 | 0.0040 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0039 | 0.0037 | 0.0002 |
| 3.02515 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0002 |
| 3.05964 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0003 |
| 3.09453 | 0.0034 | 0.0041 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0037 | 0.0003 |
| 3.12981 | 0.0035 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0037 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0003 |
| 3.16549 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0003 |
| 3.20159 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0040 | 0.0038 | 0.0040 | 0.0002 |
| 3.23809 | 0.0034 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0039 | 0.0039 | 0.0003 |
| 3.27501 | 0.0033 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0004 |
| 3.31235 | 0.0036 | 0.0042 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0038 | 0.0039 | 0.0003 |
| 3.35012 | 0.0035 | 0.0043 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0003 |
| 3.38832 | 0.0034 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0004 |
| 3.42695 | 0.0036 | 0.0044 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0039 | 0.0040 | 0.0003 |
| 3.46602 | 0.0036 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0003 |
| 3.50554 | 0.0034 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0039 | 0.0040 | 0.0004 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 3.54551 | 0.0035 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0004 |
| 3.58594 | 0.0037 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0042 | 0.0039 | 0.0039 | 0.0003 |
| 3.62682 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0038 | 0.0002 |
| 3.66818 | 0.0038 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0045 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0004 |
| 3.71 | 0.0036 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0040 | 0.0003 |
| 3.7523 | 0.0040 | 0.0041 | 0.0041 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0002 |
| 3.79508 | 0.0040 | 0.0047 | 0.0040 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0003 |
| 3.83835 | 0.0039 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0002 |
| 3.88212 | 0.0039 | 0.0045 | 0.0042 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0002 |
| 3.92638 | 0.0039 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0002 |
| 3.97115 | 0.0042 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0047 | 0.0038 | 0.0042 | 0.0004 |
| 4.01643 | 0.0041 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0043 | 0.0043 | 0.0001 |
| 4.06222 | 0.0041 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0003 |
| 4.10853 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0039 | 0.0045 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0002 |
| 4.15538 | 0.0038 | 0.0047 | 0.0040 | 0.0048 | 0.0043 | 0.0043 | 0.0004 |
| 4.20276 | 0.0039 | 0.0044 | 0.0039 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0041 | 0.0002 |
| 4.25068 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0043 | 0.0045 | 0.0043 | 0.0043 | 0.0002 |
| 4.29915 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0045 | 0.0048 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0003 |
| 4.34817 | 0.0039 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0049 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0004 |
| 4.39774 | 0.0037 | 0.0043 | 0.0042 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0003 |
| 4.44788 | 0.0038 | 0.0047 | 0.0038 | 0.0049 | 0.0046 | 0.0044 | 0.0005 |
| 4.4986 | 0.0039 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0045 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0002 |
| 4.54989 | 0.0041 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0043 | 0.0003 |
| 4.60177 | 0.0040 | 0.0048 | 0.0039 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0004 |
| 4.65423 | 0.0041 | 0.0046 | 0.0033 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0005 |
| 4.7073 | 0.0041 | 0.0045 | 0.0041 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0002 |
| 4.76097 | 0.0036 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0046 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0004 |
| 4.81526 | 0.0036 | 0.0044 | 0.0040 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0003 |
| 4.87016 | 0.0038 | 0.0048 | 0.0034 | 0.0040 | 0.0047 | 0.0042 | 0.0006 |
| 4.92569 | 0.0037 | 0.0049 | 0.0043 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0004 |
| 4.98185 | 0.0036 | 0.0048 | 0.0040 | 0.0049 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0005 |
| 5.03865 | 0.0041 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0051 | 0.0040 | 0.0043 | 0.0005 |
| 5.0961 | 0.0036 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0042 | 0.0041 | 0.0041 | 0.0004 |
| 5.15421 | 0.0037 | 0.0044 | 0.0044 | 0.0046 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0003 |
| 5.21298 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0003 |
| 5.27242 | 0.0039 | 0.0044 | 0.0037 | 0.0049 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0005 |
| 5.33253 | 0.0039 | 0.0043 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0044 | 0.0040 | 0.0003 |
| 5.39333 | 0.0032 | 0.0042 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0004 |
| 5.45482 | 0.0037 | 0.0042 | 0.0035 | 0.0043 | 0.0044 | 0.0040 | 0.0004 |
| 5.51702 | 0.0041 | 0.0041 | 0.0034 | 0.0046 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0005 |
| 5.57992 | 0.0037 | 0.0042 | 0.0037 | 0.0047 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0005 |
| 5.64354 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0036 | 0.0051 | 0.0038 | 0.0041 | 0.0006 |
| 5.70789 | 0.0029 | 0.0048 | 0.0044 | 0.0038 | 0.0032 | 0.0038 | 0.0008 |
| 5.77297 | 0.0035 | 0.0033 | 0.0034 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0036 | 0.0004 |
| 5.8388 | 0.0030 | 0.0046 | 0.0036 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0038 | 0.0006 |
| 5.90537 | 0.0031 | 0.0040 | 0.0027 | 0.0045 | 0.0039 | 0.0036 | 0.0007 |
| 5.9727 | 0.0036 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0041 | 0.0037 | 0.0040 | 0.0004 |
| 6.0408 | 0.0037 | 0.0041 | 0.0034 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0039 | 0.0004 |
| 6.10968 | 0.0030 | 0.0042 | 0.0038 | 0.0049 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0007 |
| 6.17934 | 0.0031 | 0.0035 | 0.0043 | 0.0051 | 0.0038 | 0.0039 | 0.0008 |
| 6.24979 | 0.0024 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0050 | 0.0038 | 0.0039 | 0.0010 |
| 6.32105 | 0.0031 | 0.0045 | 0.0035 | 0.0049 | 0.0037 | 0.0039 | 0.0008 |
| 6.39313 | 0.0031 | 0.0039 | 0.0033 | 0.0048 | 0.0040 | 0.0038 | 0.0007 |
| 6.46602 | 0.0035 | 0.0048 | 0.0040 | 0.0049 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0006 |
| 6.53974 | 0.0036 | 0.0046 | 0.0046 | 0.0044 | 0.0046 | 0.0044 | 0.0004 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 6.61431 | 0.0030 | 0.0042 | 0.0044 | 0.0050 | 0.0038 | 0.0041 | 0.0007 |
| 6.68972 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0044 | 0.0050 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0007 |
| 6.766 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0046 | 0.0043 | 0.0038 | 0.0007 |
| 6.84314 | 0.0037 | 0.0035 | 0.0045 | 0.0059 | 0.0040 | 0.0043 | 0.0009 |
| 6.92116 | 0.0029 | 0.0041 | 0.0037 | 0.0052 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0008 |
| 7.00008 | 0.0034 | 0.0036 | 0.0050 | 0.0057 | 0.0043 | 0.0044 | 0.0009 |
| 7.07989 | 0.0033 | 0.0039 | 0.0051 | 0.0051 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0008 |
| 7.16061 | 0.0036 | 0.0044 | 0.0050 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0043 | 0.0005 |
| 7.24226 | 0.0045 | 0.0038 | 0.0053 | 0.0039 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0006 |
| 7.32484 | 0.0036 | 0.0041 | 0.0049 | 0.0050 | 0.0052 | 0.0045 | 0.0007 |
| 7.40836 | 0.0037 | 0.0044 | 0.0071 | 0.0046 | 0.0042 | 0.0048 | 0.0013 |
| 7.49282 | 0.0031 | 0.0045 | 0.0063 | 0.0054 | 0.0048 | 0.0048 | 0.0012 |
| 7.57825 | 0.0030 | 0.0049 | 0.0050 | 0.0043 | 0.0045 | 0.0043 | 0.0008 |
| 7.66466 | 0.0039 | 0.0045 | 0.0069 | 0.0039 | 0.0042 | 0.0047 | 0.0013 |
| 7.75205 | 0.0036 | 0.0040 | 0.0059 | 0.0042 | 0.0032 | 0.0042 | 0.0010 |
| 7.84044 | 0.0031 | 0.0047 | 0.0067 | 0.0046 | 0.0034 | 0.0045 | 0.0014 |
| 7.92983 | 0.0033 | 0.0054 | 0.0057 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0010 |
| 8.02025 | 0.0034 | 0.0060 | 0.0080 | 0.0041 | 0.0041 | 0.0051 | 0.0019 |
| 8.11169 | 0.0055 | 0.0050 | 0.0065 | 0.0049 | 0.0051 | 0.0054 | 0.0007 |
| 8.20418 | 0.0034 | 0.0049 | 0.0086 | 0.0046 | 0.0036 | 0.0050 | 0.0021 |
| 8.29773 | 0.0041 | 0.0056 | 0.0087 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0053 | 0.0020 |
| 8.39233 | 0.0052 | 0.0043 | 0.0069 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0051 | 0.0011 |
| 8.48802 | 0.0046 | 0.0047 | 0.0077 | 0.0046 | 0.0046 | 0.0052 | 0.0013 |
| 8.5848 | 0.0061 | 0.0051 | 0.0078 | 0.0049 | 0.0044 | 0.0056 | 0.0014 |
| 8.68268 | 0.0074 | 0.0053 | 0.0066 | 0.0048 | 0.0037 | 0.0056 | 0.0015 |
| 8.78168 | 0.0076 | 0.0056 | 0.0094 | 0.0052 | 0.0034 | 0.0062 | 0.0023 |
| 8.88181 | 0.0091 | 0.0046 | 0.0102 | 0.0038 | 0.0042 | 0.0064 | 0.0030 |
| 8.98308 | 0.0081 | 0.0061 | 0.0091 | 0.0047 | 0.0044 | 0.0065 | 0.0021 |
| 9.0855 | 0.0103 | 0.0058 | 0.0085 | 0.0048 | 0.0036 | 0.0066 | 0.0028 |
| 9.18909 | 0.0096 | 0.0066 | 0.0116 | 0.0044 | 0.0049 | 0.0074 | 0.0031 |
| 9.29387 | 0.0109 | 0.0062 | 0.0101 | 0.0044 | 0.0031 | 0.0069 | 0.0034 |
| 9.39983 | 0.0137 | 0.0069 | 0.0103 | 0.0047 | 0.0059 | 0.0083 | 0.0037 |
| 9.50701 | 0.0143 | 0.0074 | 0.0092 | 0.0061 | 0.0035 | 0.0081 | 0.0041 |
| 9.61541 | 0.0148 | 0.0060 | 0.0106 | 0.0037 | 0.0036 | 0.0077 | 0.0049 |
| 9.72504 | 0.0185 | 0.0077 | 0.0092 | 0.0046 | 0.0049 | 0.0089 | 0.0057 |
| 9.83592 | 0.0142 | 0.0082 | 0.0102 | 0.0031 | 0.0044 | 0.0080 | 0.0045 |
| 9.94806 | 0.0151 | 0.0071 | 0.0096 | 0.0047 | 0.0040 | 0.0081 | 0.0045 |
| 10.0615 | 0.0193 | 0.0080 | 0.0103 | 0.0052 | 0.0034 | 0.0092 | 0.0062 |
| 10.1762 | 0.0162 | 0.0061 | 0.0074 | 0.0041 | 0.0056 | 0.0079 | 0.0048 |
| 10.2923 | 0.0159 | 0.0078 | 0.0100 | 0.0038 | 0.0035 | 0.0082 | 0.0051 |
| 10.4096 | 0.0188 | 0.0072 | 0.0081 | 0.0069 | 0.0042 | 0.0090 | 0.0056 |
| 10.5283 | 0.0159 | 0.0073 | 0.0101 | 0.0047 | 0.0062 | 0.0088 | 0.0044 |
| 10.6483 | 0.0195 | 0.0068 | 0.0105 | 0.0066 | 0.0064 | 0.0099 | 0.0056 |
| 10.7698 | 0.0190 | 0.0064 | 0.0076 | 0.0040 | 0.0066 | 0.0087 | 0.0059 |
| 10.8926 | 0.0211 | 0.0093 | 0.0095 | 0.0048 | 0.0029 | 0.0095 | 0.0071 |
| 11.0168 | 0.0186 | 0.0068 | 0.0073 | 0.0051 | 0.0064 | 0.0089 | 0.0055 |
| 11.1424 | 0.0157 | 0.0086 | 0.0111 | 0.0062 | 0.0036 | 0.0090 | 0.0047 |
| 11.2694 | 0.0192 | 0.0078 | 0.0069 | 0.0046 | 0.0060 | 0.0089 | 0.0059 |
| 11.3979 | 0.0158 | 0.0073 | 0.0107 | 0.0064 | 0.0048 | 0.0090 | 0.0044 |
| 11.5279 | 0.0141 | 0.0056 | 0.0089 | 0.0052 | 0.0074 | 0.0082 | 0.0036 |
| 11.6593 | 0.0151 | 0.0068 | 0.0084 | 0.0056 | 0.0059 | 0.0084 | 0.0039 |
| 11.7922 | 0.0141 | 0.0060 | 0.0092 | 0.0074 | 0.0061 | 0.0086 | 0.0033 |
| 11.9267 | 0.0112 | 0.0062 | 0.0063 | 0.0052 | 0.0055 | 0.0069 | 0.0025 |
| 12.0627 | 0.0114 | 0.0059 | 0.0113 | 0.0056 | 0.0056 | 0.0080 | 0.0031 |
| 12.2002 | 0.0070 | 0.0064 | 0.0085 | 0.0061 | 0.0070 | 0.0070 | 0.0009 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 12.3393 | 0.0082 | 0.0057 | 0.0075 | 0.0063 | 0.0036 | 0.0063 | 0.0018 |
| 12.4799 | 0.0069 | 0.0091 | 0.0109 | 0.0053 | 0.0041 | 0.0072 | 0.0028 |
| 12.6222 | 0.0036 | 0.0064 | 0.0077 | 0.0065 | 0.0045 | 0.0057 | 0.0017 |
| 12.7662 | 0.0047 | 0.0063 | 0.0094 | 0.0050 | 0.0074 | 0.0065 | 0.0019 |
| 12.9117 | 0.0035 | 0.0079 | 0.0079 | 0.0073 | 0.0055 | 0.0064 | 0.0019 |
| 13.0589 | 0.0036 | 0.0082 | 0.0100 | 0.0068 | 0.0068 | 0.0071 | 0.0023 |
| 13.2078 | 0.0048 | 0.0092 | 0.0063 | 0.0085 | 0.0044 | 0.0067 | 0.0021 |
| 13.3584 | 0.0023 | 0.0095 | 0.0099 | 0.0065 | 0.0073 | 0.0071 | 0.0031 |
| 13.5108 | 0.0052 | 0.0071 | 0.0095 | 0.0075 | 0.0059 | 0.0071 | 0.0017 |
| 13.6648 | 0.0054 | 0.0045 | 0.0123 | 0.0074 | 0.0066 | 0.0072 | 0.0030 |
| 13.8206 | 0.0056 | 0.0072 | 0.0131 | 0.0042 | 0.0059 | 0.0072 | 0.0035 |
| 13.9782 | 0.0031 | 0.0078 | 0.0105 | 0.0057 | 0.0066 | 0.0067 | 0.0027 |
| 14.1376 | 0.0055 | 0.0109 | 0.0127 | 0.0086 | 0.0095 | 0.0094 | 0.0027 |
| 14.2987 | 0.0052 | 0.0047 | 0.0084 | 0.0066 | 0.0047 | 0.0059 | 0.0016 |
| 14.4618 | 0.0044 | 0.0102 | 0.0121 | 0.0083 | 0.0073 | 0.0085 | 0.0029 |
| 14.6267 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0095 | 0.0065 | 0.0050 | 0.0061 | 0.0021 |
| 14.7935 | 0.0057 | 0.0114 | 0.0114 | 0.0052 | 0.0067 | 0.0081 | 0.0031 |
| 14.9622 | 0.0054 | 0.0086 | 0.0124 | 0.0064 | 0.0070 | 0.0080 | 0.0027 |
| 15.1328 | 0.0067 | 0.0127 | 0.0100 | 0.0067 | 0.0111 | 0.0095 | 0.0027 |
| 15.3053 | 0.0046 | 0.0080 | 0.0167 | 0.0075 | 0.0104 | 0.0094 | 0.0045 |
| 15.4798 | 0.0120 | 0.0083 | 0.0155 | 0.0083 | 0.0107 | 0.0110 | 0.0030 |
| 15.6563 | 0.0062 | 0.0092 | 0.0129 | 0.0105 | 0.0074 | 0.0092 | 0.0026 |
| 15.8348 | 0.0135 | 0.0095 | 0.0121 | 0.0089 | 0.0121 | 0.0112 | 0.0019 |
| 16.0153 | 0.0086 | 0.0099 | 0.0145 | 0.0092 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0023 |
| 16.1979 | 0.0048 | 0.0068 | 0.0123 | 0.0075 | 0.0096 | 0.0082 | 0.0028 |
| 16.3826 | 0.0057 | 0.0120 | 0.0162 | 0.0099 | 0.0092 | 0.0106 | 0.0039 |
| 16.5694 | 0.0073 | 0.0087 | 0.0110 | 0.0080 | 0.0073 | 0.0085 | 0.0015 |
| 16.7583 | 0.0076 | 0.0128 | 0.0076 | 0.0076 | 0.0098 | 0.0091 | 0.0023 |
| 16.9494 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0109 | 0.0062 | 0.0094 | 0.0088 | 0.0017 |
| 17.1427 | 0.0115 | 0.0064 | 0.0186 | 0.0129 | 0.0105 | 0.0120 | 0.0044 |
| 17.3381 | 0.0093 | 0.0083 | 0.0117 | 0.0109 | 0.0109 | 0.0102 | 0.0014 |
| 17.5358 | 0.0087 | 0.0060 | 0.0190 | 0.0130 | 0.0043 | 0.0102 | 0.0059 |
| 17.7358 | 0.0081 | 0.0027 | 0.0090 | 0.0099 | 0.0126 | 0.0084 | 0.0036 |
| 17.938 | 0.0121 | 0.0083 | 0.0204 | 0.0102 | 0.0121 | 0.0126 | 0.0046 |
| 18.1425 | 0.0134 | 0.0124 | 0.0153 | 0.0096 | 0.0096 | 0.0121 | 0.0025 |
| 18.3494 | 0.0150 | 0.0060 | 0.0149 | 0.0139 | 0.0090 | 0.0117 | 0.0041 |
| 18.5586 | 0.0082 | 0.0133 | 0.0123 | 0.0133 | 0.0113 | 0.0117 | 0.0021 |
| 18.7702 | 0.0107 | 0.0085 | 0.0159 | 0.0064 | 0.0149 | 0.0113 | 0.0041 |
| 18.9842 | 0.0088 | 0.0066 | 0.0132 | 0.0044 | 0.0165 | 0.0099 | 0.0049 |
| 19.2006 | 0.0046 | 0.0045 | 0.0068 | 0.0136 | 0.0102 | 0.0080 | 0.0039 |
| 19.4196 | 0.0083 | 0.0047 | 0.0047 | 0.0094 | 0.0094 | 0.0073 | 0.0024 |
| 19.641 | 0.0073 | 0.0085 | 0.0158 | 0.0073 | 0.0097 | 0.0097 | 0.0035 |
| 19.8649 | 0.0088 | 0.0075 | 0.0126 | 0.0151 | 0.0113 | 0.0111 | 0.0030 |
| 20.0914 | 0.0092 | 0.0078 | 0.0117 | 0.0091 | 0.0169 | 0.0109 | 0.0036 |
| 20.3205 | 0.0095 | 0.0081 | 0.0121 | 0.0054 | 0.0067 | 0.0084 | 0.0026 |
| 20.5522 | 0.0071 | 0.0069 | 0.0042 | 0.0139 | 0.0126 | 0.0089 | 0.0041 |
| 20.7865 | 0.0072 | 0.0130 | 0.0115 | 0.0115 | 0.0058 | 0.0098 | 0.0031 |
| 21.0235 | 0.0090 | 0.0074 | 0.0089 | 0.0075 | 0.0090 | 0.0084 | 0.0008 |
| 21.2632 | 0.0094 | 0.0062 | 0.0108 | 0.0031 | 0.0185 | 0.0096 | 0.0058 |
| 21.5057 | 0.0112 | 0.0176 | 0.0096 | 0.0128 | 0.0240 | 0.0150 | 0.0058 |
| 21.7509 | 0.0149 | 0.0099 | 0.0116 | 0.0149 | 0.0215 | 0.0145 | 0.0044 |
| 21.9988 | 0.0120 | 0.0153 | 0.0068 | 0.0154 | 0.0051 | 0.0109 | 0.0048 |
| 22.2497 | 0.0125 | 0.0123 | 0.0124 | 0.0088 | 0.0141 | 0.0120 | 0.0019 |
| 22.5034 | 0.0148 | 0.0145 | 0.0165 | 0.0128 | 0.0128 | 0.0143 | 0.0015 |
| 22.76 | 0.0132 | 0.0113 | 0.0095 | 0.0095 | 0.0113 | 0.0110 | 0.0016 |

| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 23.0195 | 0.0158 | 0.0078 | 0.0098 | 0.0098 | 0.0157 | 0.0118 | 0.0037 |
| 23.2819 | 0.0081 | 0.0061 | 0.0101 | 0.0040 | 0.0142 | 0.0085 | 0.0039 |
| 23.5474 | 0.0084 | 0.0125 | 0.0084 | 0.0126 | 0.0147 | 0.0113 | 0.0028 |
| 23.8159 | 0.0110 | 0.0129 | 0.0087 | 0.0065 | 0.0043 | 0.0087 | 0.0034 |
| 24.0875 | 0.0137 | 0.0068 | 0.0000 | 0.0067 | 0.0112 | 0.0077 | 0.0052 |
| 24.3621 | 0.0071 | 0.0139 | 0.0139 | 0.0139 | 0.0116 | 0.0121 | 0.0030 |
| 24.6399 | 0.0144 | 0.0192 | 0.0072 | 0.0024 | 0.0240 | 0.0134 | 0.0088 |
| 24.9207 | 0.0176 | 0.0173 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0099 | 0.0110 | 0.0063 |
| 25.2049 | 0.0181 | 0.0180 | 0.0129 | 0.0077 | 0.0206 | 0.0155 | 0.0052 |
| 25.4923 | 0.0108 | 0.0159 | 0.0053 | 0.0080 | 0.0106 | 0.0101 | 0.0039 |
| 25.7829 | 0.0111 | 0.0192 | 0.0083 | 0.0110 | 0.0083 | 0.0116 | 0.0045 |
| 26.0769 | 0.0144 | 0.0085 | 0.0085 | 0.0114 | 0.0142 | 0.0114 | 0.0029 |
| 26.3743 | 0.0210 | 0.0029 | 0.0059 | 0.0088 | 0.0177 | 0.0113 | 0.0078 |
| 26.675 | 0.0091 | 0.0182 | 0.0091 | 0.0000 | 0.0244 | 0.0122 | 0.0094 |
| 26.9791 | 0.0284 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0126 | 0.0107 | 0.0117 |
| 27.2868 | 0.0099 | 0.0098 | 0.0033 | 0.0065 | 0.0228 | 0.0105 | 0.0074 |
| 27.5979 | 0.0169 | 0.0067 | 0.0034 | 0.0000 | 0.0169 | 0.0088 | 0.0078 |
| 27.9125 | 0.0212 | 0.0105 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0139 | 0.0091 | 0.0092 |
| 28.2308 | 0.0146 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0072 | 0.0036 | 0.0065 | 0.0048 |
| 28.5527 | 0.0077 | 0.0335 | 0.0037 | 0.0000 | 0.0112 | 0.0112 | 0.0132 |
| 28.8782 | 0.0272 | 0.0000 | 0.0077 | 0.0039 | 0.0155 | 0.0109 | 0.0108 |
| 29.2075 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0120 | 0.0160 | 0.0120 | 0.0096 | 0.0061 |
| 29.5405 | 0.0124 | 0.0042 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0249 | 0.0099 | 0.0095 |
| 29.8773 | 0.0260 | 0.0171 | 0.0086 | 0.0000 | 0.0171 | 0.0138 | 0.0099 |
| 30.2179 | 0.0178 | 0.0177 | 0.0089 | 0.0044 | 0.0221 | 0.0142 | 0.0073 |
| 30.5625 | 0.0274 | 0.0183 | 0.0000 | 0.0092 | 0.0092 | 0.0128 | 0.0104 |
| 30.911 | 0.0193 | 0.0095 | 0.0047 | 0.0095 | 0.0190 | 0.0124 | 0.0065 |
| 31.2634 | 0.0199 | 0.0049 | 0.0098 | 0.0245 | 0.0049 | 0.0128 | 0.0090 |
| 31.6198 | 0.0304 | 0.0252 | 0.0152 | 0.0101 | 0.0102 | 0.0182 | 0.0092 |
| 31.9804 | 0.0052 | 0.0105 | 0.0052 | 0.0053 | 0.0158 | 0.0084 | 0.0047 |
| 32.345 | 0.0164 | 0.0378 | 0.0000 | 0.0109 | 0.0218 | 0.0174 | 0.0140 |
| 32.7138 | 0.0341 | 0.0335 | 0.0169 | 0.0000 | 0.0168 | 0.0203 | 0.0141 |
| 33.0868 | 0.0233 | 0.0116 | 0.0000 | 0.0116 | 0.0174 | 0.0128 | 0.0086 |
| 33.4641 | 0.0427 | 0.0179 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0121 | 0.0145 | 0.0176 |
| 33.8456 | 0.0188 | 0.0185 | 0.0062 | 0.0187 | 0.0000 | 0.0124 | 0.0088 |
| 34.2315 | 0.0193 | 0.0127 | 0.0064 | 0.0064 | 0.0065 | 0.0103 | 0.0057 |
| 34.6218 | 0.0266 | 0.0200 | 0.0000 | 0.0066 | 0.0066 | 0.0120 | 0.0109 |
| 35.0165 | 0.0137 | 0.0136 | 0.0138 | 0.0000 | 0.0138 | 0.0110 | 0.0061 |
| 35.4158 | 0.0214 | 0.0212 | 0.0071 | 0.0071 | 0.0143 | 0.0142 | 0.0071 |
| 35.8197 | 0.0147 | 0.0074 | 0.0074 | 0.0147 | 0.0074 | 0.0103 | 0.0040 |
| 36.2281 | 0.0233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0076 | 0.0062 | 0.0101 |
| 36.6411 | 0.0241 | 0.0000 | 0.0079 | 0.0000 | 0.0079 | 0.0080 | 0.0098 |
| 37.0589 | 0.0163 | 0.0163 | 0.0000 | 0.0082 | 0.0000 | 0.0081 | 0.0081 |
| 37.4814 | 0.0085 | 0.0000 | 0.0169 | 0.0169 | 0.0170 | 0.0118 | 0.0076 |
| 37.9088 | 0.0616 | 0.0086 | 0.0000 | 0.0088 | 0.0000 | 0.0158 | 0.0260 |
| 38.341 | 0.0093 | 0.0089 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0036 | 0.0050 |
| 38.7782 | 0.0187 | 0.0094 | 0.0094 | 0.0093 | 0.0000 | 0.0094 | 0.0066 |
| 39.2203 | 0.0389 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0078 | 0.0174 |
| 39.6675 | 0.0000 | 0.0099 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0044 |
| 40.1198 | 0.0104 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0104 | 0.0208 | 0.0083 | 0.0087 |
| 40.5772 | 0.0107 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0214 | 0.0000 | 0.0064 | 0.0096 |
| 41.0399 | 0.0228 | 0.0111 | 0.0111 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0095 |
| 41.5078 | 0.0114 | 0.0113 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0229 | 0.0091 | 0.0096 |
| 41.9811 | 0.0118 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0119 | 0.0047 | 0.0065 |
| 42.4597 | 0.0123 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0246 | 0.0074 | 0.0110 |

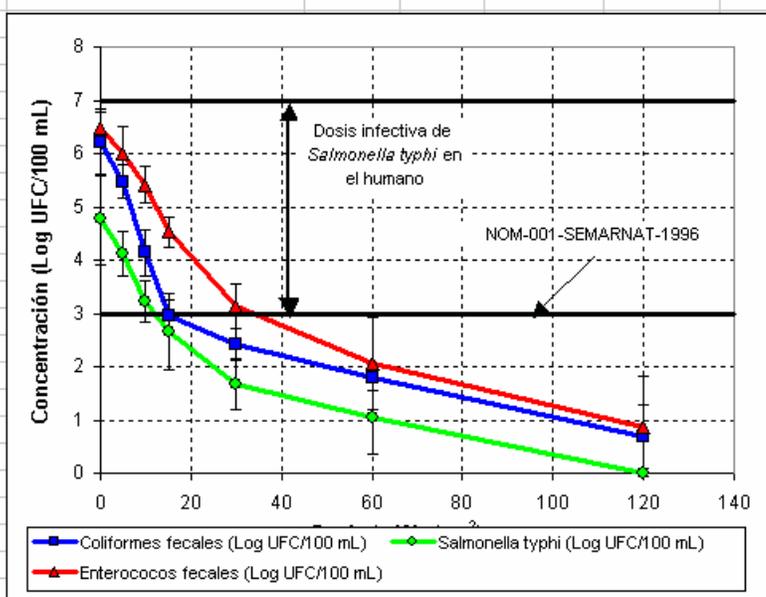
| Diámetro µm | 19-Abr-02 | 26-Abr-02 | 03-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | Promedio | Desv. Std. |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 42.9439 | 0.0254 | 0.0127 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0255 | 0.0127 | 0.0127 |
| 43.4335 | 0.0262 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0131 | 0.0079 | 0.0117 |
| 43.9287 | 0.0272 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0136 | 0.0000 | 0.0082 | 0.0121 |
| 44.4296 | 0.0281 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0056 | 0.0126 |
| 44.9362 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0146 | 0.0029 | 0.0065 |
| 45.4485 | 0.0155 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0061 | 0.0084 |
| 45.9667 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 46.4908 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 47.0209 | 0.0171 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0034 | 0.0077 |
| 47.557 | 0.0172 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0172 | 0.0000 | 0.0069 | 0.0094 |
| 48.0993 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0179 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0036 | 0.0080 |
| 48.6477 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.2024 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 49.7633 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 50.3307 | 0.0210 | 0.0000 | 0.0205 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0083 | 0.0114 |
| 50.9046 | 0.0211 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0212 | 0.0000 | 0.0084 | 0.0116 |
| 51.485 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 52.0721 | 0.0226 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0101 |
| 52.6658 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.2662 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.8735 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 54.4878 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.1091 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 55.7375 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 56.3729 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 57.0157 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0297 | 0.0059 | 0.0133 |
| 57.6658 | 0.0306 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0061 | 0.0137 |
| 58.3233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 58.9883 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 59.6608 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

AII.3 Inactivación de los microorganismos en los tres efluentes secundarios

| LODOS ACTIVADOS | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Concentración de coliformes fecales (UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 27-Jun-01 | 01-Jul-01 | 04-Jul-01 | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA GEOMÉTRICA |
| 0 | 4.5E+05 | 1.0E+05 | 9.1E+05 | 6.0E+06 | 2.10E+06 | 2.50E+06 | 5.70E+06 | 5.60E+06 | 1.6E+06 |
| 5 | 1.3E+05 | 1.0E+05 | 1.9E+05 | 6.5E+05 | 2.70E+05 | 3.50E+05 | 6.80E+05 | 5.70E+05 | 3.0E+05 |
| 10 | 7.3E+03 | 2.9E+03 | 1.4E+04 | 7.3E+03 | 1.50E+04 | 1.70E+04 | 2.70E+04 | 8.60E+04 | 1.4E+04 |
| 15 | 1300 | 757 | 198 | 1.6E+03 | 1.10E+03 | 573 | 1.00E+03 | 1.70E+03 | 8.7E+02 |
| 30 | 450 | 250 | 345 | 509 | 118 | 173 | 91 | 600 | 2.6E+02 |
| 60 | 75 | 60 | 100 | 80 | 64 | 20 | 40 | 110 | 6.1E+01 |
| 120 | 1 | 1 | 10 | 10 | 10 | 1 | 30 | 10 | 4.8E+00 |
| Concentración de enterococos fecales (UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 27-Jun-01 | 01-Jul-01 | 04-Jul-01 | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA GEOMÉTRICA |
| 0 | 2.7E+06 | 2.0E+06 | 7.0E+06 | 4.8E+06 | 8.00E+05 | 4.10E+06 | 2.20E+06 | 5.00E+06 | 3.0E+06 |
| 5 | 5.9E+05 | 1.0E+05 | 6.3E+05 | 2.7E+06 | 7.90E+05 | 1.60E+06 | 2.10E+06 | 4.30E+06 | 1.0E+06 |
| 10 | 2.0E+05 | 1.0E+05 | 5.9E+05 | 1.4E+05 | 1.60E+05 | 2.80E+05 | 2.30E+05 | 1.20E+06 | 2.6E+05 |
| 15 | 63800 | 45000 | 81000 | 1.1E+04 | 2.60E+04 | 20000 | 2.50E+04 | 4.60E+04 | 3.3E+04 |
| 30 | 901 | 3800 | 2700 | 1300 | 400 | 676 | 546 | 5800 | 1.3E+03 |
| 60 | 1 | 182 | 200 | 350 | 400 | 80 | 160 | 409 | 1.1E+02 |
| 120 | 1 | 1 | 1 | 91 | 50 | 1 | 30 | 70 | 7.5E+00 |
| Concentración de <i>Salmonella typhi</i> (UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 27-Jun-01 | 01-Jul-01 | 04-Jul-01 | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA GEOMÉTRICA |
| 0 | 3.1E+05 | 1.2E+06 | 4.7E+05 | 9.9E+03 | 8.20E+03 | 2.80E+04 | 1.10E+04 | 3.10E+04 | 5.8E+04 |
| 5 | 2.1E+04 | 2.0E+04 | 4.6E+04 | 9.8E+03 | 8.10E+03 | 2.70E+04 | 1.00E+04 | 2.10E+03 | 1.3E+04 |
| 10 | 5.1E+02 | 1.5E+03 | 1.0E+04 | 1.0E+03 | 1.00E+03 | 3.40E+03 | 1.80E+03 | 1.50E+03 | 1.7E+03 |
| 15 | 333 | 1140 | 5400 | 1.0E+02 | 4.00E+03 | 100 | 1.91E+02 | 1.00E+02 | 4.5E+02 |
| 30 | 20 | 345 | 40 | 40 | 50 | 10 | 127 | 30 | 4.6E+01 |
| 60 | 1 | 30 | 36 | 30 | 18 | 1 | 50 | 10 | 1.1E+01 |
| 120 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.0E+00 |

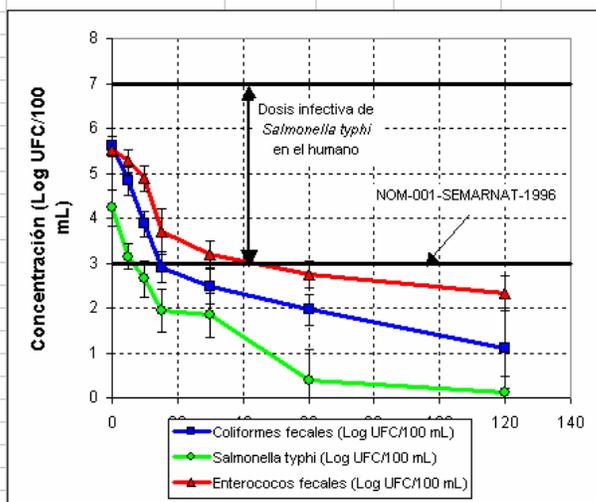
LODOS ACTIVADOS

| iformes fecales (Log UFC/100 mL) | | <i>Salmonella typhi</i> (Log UFC/100 mL) | | | | Enterococos fecales (Log UFC/100 mL) | |
|----------------------------------|-----------------------|--|-----|---------------------|-------|--------------------------------------|-----|
| SD | NOM-001-SEMARNAT-1996 | MEDIA | SD | RIESGO DE INFECCIÓN | MEDIA | SD | |
| 0.6 | 3.0 | 4.8 | 0.9 | 3 | 7 | 6.5 | 0.3 |
| 0.3 | 3.0 | 4.1 | 0.4 | 3 | 7 | 6.0 | 0.5 |
| 0.4 | 3.0 | 3.2 | 0.4 | 3 | 7 | 5.4 | 0.4 |
| 0.3 | 3.0 | 2.6 | 0.7 | 3 | 7 | 4.5 | 0.3 |
| 0.3 | 3.0 | 1.7 | 0.5 | 3 | 7 | 3.1 | 0.4 |
| 0.2 | 3.0 | 1.1 | 0.7 | 3 | 7 | 2.1 | 0.9 |
| 0.6 | 3.0 | 0.0 | 0.0 | 3 | 7 | 0.9 | 0.9 |
| | 3.0 | | | | 7 | | |



EFLUENTE DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS

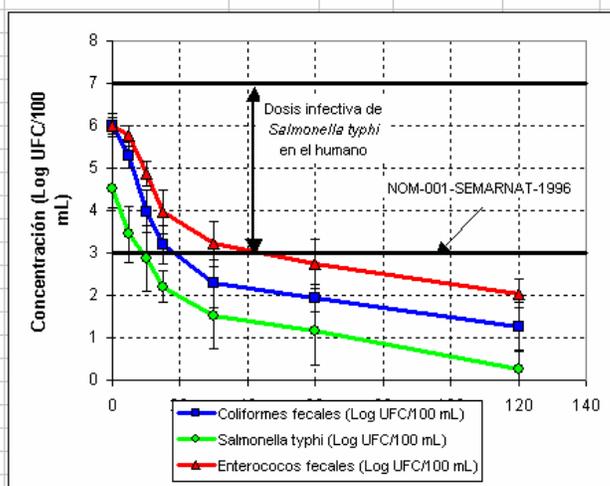
| Dosis mW·s/cm ² | Coliformes fecales (Log UFC/100 mL) | | <i>Salmonella typhi</i> (Log UFC/100 mL) | | | | Enterococos fecales (Log UFC/100 mL) | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----|--|-------|-----|---------------------|--------------------------------------|-----|-----|
| | MEDIA | SD | NOM-001-SEMARNAT-1996 | MEDIA | SD | RIESGO DE INFECCIÓN | MEDIA | SD | |
| 0 | 5.6 | 0.2 | 3.0 | 4.2 | 0.4 | 3 | 7 | 5.5 | 0.1 |
| 5 | 4.8 | 0.3 | 3.0 | 3.1 | 0.3 | 3 | 7 | 5.3 | 0.3 |
| 10 | 3.9 | 0.3 | 3.0 | 2.6 | 0.4 | 3 | 7 | 4.9 | 0.3 |
| 15 | 2.9 | 0.3 | 3.0 | 1.9 | 0.5 | 3 | 7 | 3.7 | 0.5 |
| 30 | 2.5 | 0.4 | 3.0 | 1.8 | 0.5 | 3 | 7 | 3.2 | 0.3 |
| 60 | 2.0 | 0.3 | 3.0 | 0.4 | 0.7 | 3 | 7 | 2.7 | 0.3 |
| 120 | 1.1 | 0.9 | 3.0 | 0.1 | 0.4 | 3 | 7 | 2.3 | 0.4 |
| 140 | | | 3.0 | | | | 7 | | |



| FILTROS ROCIADORES | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Concentración de coliformes fecales (UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 18-Jun-01 | 19-Jun-01 | 07-Feb-02 | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA GEOMÉTRICA |
| 0 | 1.4E+06 | 2.8E+06 | 5.5E+05 | 4.9E+05 | 1.0E+06 | 6.1E+05 | 9.8E+05 | 2.0E+06 | 1.0E+06 |
| 5 | 2.1E+05 | 3.4E+05 | 2.5E+05 | 9.2E+04 | 2.3E+05 | 5.5E+04 | 2.4E+05 | 5.6E+05 | 2.0E+05 |
| 10 | 2.5E+03 | 7.6E+04 | 1.7E+04 | 7.1E+03 | 9.5E+03 | 2.2E+03 | 1.0E+04 | 1.5E+04 | 9.6E+03 |
| 15 | 5.6E+02 | 1.4E+03 | 640 | 4.9E+03 | 3.5E+03 | 482 | 1.5E+03 | 6.9E+03 | 1.6E+03 |
| 30 | 127 | 80 | 181 | 210 | 150 | 27 | 491 | 2.2E+03 | 1.9E+02 |
| 60 | 75 | 70 | 95 | 172 | 80 | 30 | 50 | 318 | 87 |
| 120 | 20 | 10 | 30 | 28 | 18 | 1 | 100 | 40 | 18 |
| Concentración de enterococos fecales (UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 18-Jun-01 | 19-Jun-01 | 07-Feb-02 | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA GEOMÉTRICA |
| 0 | 5.4E+05 | 1.4E+06 | 5.4E+05 | 1.3E+06 | 1.5E+06 | 8.2E+05 | 1.0E+06 | 1.8E+06 | 1.0E+06 |
| 5 | 1.9E+05 | 7.2E+05 | 4.5E+05 | 9.0E+05 | 5.9E+05 | 5.4E+05 | 6.0E+05 | 1.2E+06 | 5.8E+05 |
| 10 | 6.6E+04 | 1.5E+05 | 1.7E+05 | 8.1E+04 | 5.0E+04 | 2.0E+04 | 6.9E+04 | 9.0E+04 | 7.3E+04 |
| 15 | 1.6E+03 | 8.0E+03 | 3.7E+03 | 4.4E+03 | 3.8E+04 | 1.0E+04 | 1.4E+04 | 5.2E+04 | 9.3E+03 |
| 30 | 355 | 273 | 2.2E+03 | 3.4E+03 | 2.6E+03 | 1.3E+03 | 1.6E+03 | 1.3E+04 | 1.6E+03 |
| 60 | 250 | 175 | 340 | 4.7E+03 | 964 | 136 | 273 | 3.1E+03 | 5.4E+02 |
| 120 | 165 | 60 | 85 | 273 | 155 | 30 | 70 | 309 | 1.1E+02 |
| Concentración de <i>Salmonella typhi</i> (UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 27-Jun-01 | 01-Jul-01 | 04-Jul-01 | 18-Abr-02 | 25-Abr-02 | 02-May-02 | 16-May-02 | 23-May-02 | MEDIA GEOMÉTRICA |
| 0 | 5.9E+04 | 2.9E+04 | 9.1E+04 | 2.6E+04 | 8.2E+03 | 8.2E+03 | 3.1E+04 | 1.9E+05 | 3.4E+04 |
| 5 | 4.5E+04 | 3.8E+03 | 4.0E+02 | 1.0E+03 | 1.2E+03 | 1.4E+03 | 1.3E+04 | 2.3E+03 | 2.8E+03 |
| 10 | 3.6E+04 | 3.2E+02 | 8.3E+02 | 8.2E+02 | 5.5E+02 | 2.0E+02 | 1.0E+03 | 1.0E+02 | 7.3E+02 |
| 15 | 6.4E+02 | 1.5E+02 | 140 | 3.0E+02 | 4.5E+01 | 100 | 3.6E+02 | 72 | 1.6E+02 |
| 30 | 100 | 18 | 381 | 18 | 1 | 36 | 100 | 30 | 33 |
| 60 | 45 | 17 | 200 | 20 | 1 | 1 | 27 | 20 | 14 |
| 120 | 1 | 1 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |

FILTROS ROCIADORES

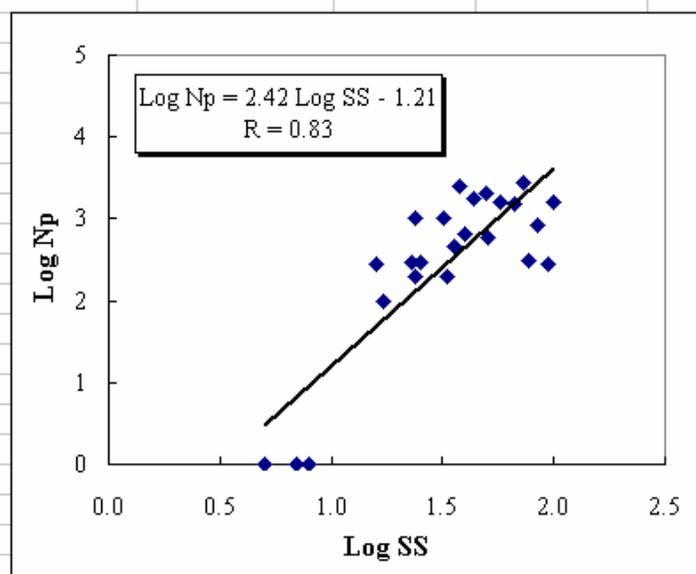
| Dosis mW·s/cm ² | Coliformes fecales (Log UFC/100 mL) | | <i>Salmonella typhi</i> (Log UFC/100 mL) | | | | Enterococos fecales (Log UFC/100 mL) | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----|--|-------|-----|---------------------|--------------------------------------|-----|-----|
| | MEDIA | SD | NOM-001-SEMARNAT-1996 | MEDIA | SD | RIESGO DE INFECCIÓN | MEDIA | SD | |
| 0 | 6.0 | 0.3 | 3.0 | 4.5 | 0.5 | 3 | 7 | 6.0 | 0.2 |
| 5 | 5.3 | 0.3 | 3.0 | 3.4 | 0.7 | 3 | 7 | 5.8 | 0.2 |
| 10 | 4.0 | 0.5 | 3.0 | 2.9 | 0.8 | 3 | 7 | 4.9 | 0.3 |
| 15 | 3.2 | 0.4 | 3.0 | 2.2 | 0.4 | 3 | 7 | 4.0 | 0.5 |
| 30 | 2.3 | 0.6 | 3.0 | 1.5 | 0.8 | 3 | 7 | 3.2 | 0.5 |
| 60 | 1.9 | 0.3 | 3.0 | 1.2 | 0.8 | 3 | 7 | 2.7 | 0.6 |
| 120 | 1.3 | 0.6 | 3.0 | 0.3 | 0.5 | 3 | 7 | 2.0 | 0.3 |
| 140 | | | 3.0 | | | | 7 | | |



| AII.4 Reactivación de coliformes fecales y <i>Salmonella typhi</i> en condiciones de luz y oscuridad | | | | | | | | |
|--|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|------------------|------------------|
| REACTIVACION DE COLIFORMES FECALES EN CONDICIONES DE LUZ | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 09-Mar-04 | | 17-Mar-04 | | 24-Mar-04 | | MEDIA GEOMÉTRICA | |
| | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | Sin reactivación | Con reactivación |
| 0 | 1.9E+07 | 1.6E+07 | 1.6E+07 | 1.1E+07 | 3.1E+06 | 9.0E+05 | 1.3E+07 | 9.3E+06 |
| 5 | 3.7E+05 | 3.8E+06 | 3.9E+05 | 3.5E+06 | 7.0E+04 | 5.3E+05 | 2.8E+05 | 2.6E+06 |
| 10 | 182 | 4.5E+05 | 2.2E+03 | 8.2E+05 | 455 | 2.2E+05 | 946 | 5.0E+05 |
| 15 | 60 | 5.0E+03 | 990 | 1.3E+05 | 300 | 5.0E+04 | 450 | 6.2E+04 |
| 30 | 30 | 636 | 99 | 1.4E+03 | 10 | 545 | 46 | 860 |
| 60 | 10 | 10 | 30 | 120 | 10 | 40 | 17 | 57 |
| 120 | 10 | 10 | 1 | 30 | 1 | 1 | 4 | 14 |
| REACTIVACION DE COLIFORMES FECALES EN CONDICIONES DE OSCURIDAD | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 09-Mar-04 | | 17-Mar-04 | | 24-Mar-04 | | MEDIA | |
| | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | Sin reactivación | Con reactivación |
| 0 | 1.9E+07 | 7.9E+06 | 1.6E+07 | 7.3E+06 | 3.1E+06 | 7.3E+05 | 1.3E+07 | 5.3E+06 |
| 5 | 3.7E+05 | 4.6E+05 | 3.9E+05 | 7.0E+05 | 7.0E+04 | 1.3E+05 | 2.8E+05 | 4.3E+05 |
| 10 | 182 | 427 | 2.2E+03 | 2.1E+03 | 455 | 901 | 946 | 1.1E+03 |
| 15 | 60 | 117 | 990 | 1.2E+03 | 300 | 364 | 450 | 560 |
| 30 | 30 | 45 | 99 | 180 | 10 | 18 | 46 | 81 |
| 60 | 10 | 40 | 30 | 30 | 10 | 27 | 17 | 32 |
| 120 | 10 | 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 7 |
| REACTIVACION DE <i>Salmonella typhi</i> EN CONDICIONES DE LUZ | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 09-Mar-04 | | 17-Mar-04 | | 24-Mar-04 | | MEDIA | |
| | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | Sin reactivación | Con reactivación |
| 0 | 1.4E+04 | 1.4E+04 | 1.1E+04 | 1.1E+04 | 8.0E+03 | 8.0E+03 | 1.1E+04 | 1.1E+04 |
| 5 | 636 | 1.3E+03 | 182 | 1.7E+03 | 250 | 2.0E+03 | 307 | 1.6E+03 |
| 10 | 150 | 1700 | 1 | 1.4E+03 | 50 | 1500 | 20 | 1.5E+03 |
| 15 | 73 | 127 | 1 | 144 | 15 | 400 | 10 | 194 |
| 30 | 1 | 64 | 1 | 220 | 1 | 35 | 1 | 79 |
| 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 120 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| REACTIVACION DE <i>Salmonella typhi</i> EN CONDICIONES DE OSCURIDAD | | | | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 09-Mar-04 | | 17-Mar-04 | | 24-Mar-04 | | MEDIA | |
| | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | t=0 | t=2 h | Sin reactivación | Con reactivación |
| 0 | 1.4E+04 | 1.4E+04 | 1.1E+04 | 1.1E+04 | 8.0E+03 | 8.0E+03 | 1.1E+04 | 1.1E+04 |
| 5 | 636 | 273 | 182 | 541 | 250 | 600 | 307 | 446 |
| 10 | 150 | 160 | 1 | 1 | 50 | 60 | 20 | 21 |
| 15 | 73 | 80 | 1 | 1 | 15 | 20 | 10 | 12 |
| 30 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 120 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| AII.5 Concentración de microorganismos inmersos en partículas | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------------|---------|----------|---------|---------|---------|-------|------|
| Concentración de coliformes fecales (Log UFC/100 mL) | | | | | | | | | |
| Dosis | Clase de: | 0 -15 mg/L SS | | | | | | | |
| (mW·s/cm ³) | 5 mg/L | 7 mg/L | 8 mg/L | MEDIA | SD | | | | |
| 0 | 7.00 | 7.08 | 6.88 | 6.98 | 0.10 | | | | |
| 5 | 6.20 | 6.36 | 5.95 | 6.17 | 0.21 | | | | |
| 10 | 4.08 | 4.26 | 5.60 | 4.65 | 0.83 | | | | |
| 15 | 2.80 | 3.34 | 2.80 | 2.98 | 0.31 | | | | |
| 30 | 2.30 | 2.60 | 2.48 | 2.46 | 0.15 | | | | |
| 60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 120 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Dosis | Clase de: | 15-30 mg/L SS | | | | | | | |
| (mW·s/cm ³) | 17 mg/L | 23 mg/L | 24 mg/L | 24 mg/L | 25 mg/L | 16 mg/L | MEDIA | SD | |
| 0 | 7.54 | 6.73 | 7.45 | 6.79 | 7.04 | 6.76 | 7.05 | 0.36 | |
| 5 | 6.54 | 5.83 | 6.49 | 6.04 | 6.00 | 5.93 | 6.14 | 0.30 | |
| 10 | 4.61 | 4.18 | 4.62 | 4.38 | 4.40 | 4.15 | 4.39 | 0.20 | |
| 15 | 3.79 | 3.28 | 3.58 | 3.46 | 3.51 | 3.28 | 3.48 | 0.19 | |
| 30 | 2.30 | 2.77 | 3.11 | 2.86 | 2.91 | 2.90 | 2.81 | 0.27 | |
| 60 | 2.00 | 2.48 | 3.00 | 2.30 | 2.47 | 2.44 | 2.45 | 0.33 | |
| 120 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 1.50 | 2.00 | 1.00 | 1.50 | 0.45 | |
| Dosis | Clase de: | 30-45 mg/L SS | | | | | | | |
| (mW·s/cm ³) | 32 mg/L | 33 mg/L | 36 mg/L | 38 mg/L | 40 mg/L | 44 mg/L | 40 mg/L | MEDIA | SD |
| 0 | 7.48 | 6.78 | 6.83 | 7.08 | 6.96 | 7.53 | 8.45 | 7.30 | 0.59 |
| 5 | 6.57 | 6.11 | 5.95 | 4.91 | 5.74 | 6.73 | 6.96 | 6.14 | 0.70 |
| 10 | 4.76 | 4.59 | 4.48 | 4.56 | 4.69 | 5.86 | 5.76 | 4.96 | 0.59 |
| 15 | 3.79 | 3.72 | 3.69 | 4.00 | 3.69 | 4.30 | 4.73 | 3.99 | 0.40 |
| 30 | 3.32 | 2.91 | 3.28 | 3.48 | 3.11 | 3.81 | 4.11 | 3.43 | 0.41 |
| 60 | 3.00 | 2.48 | 2.65 | 3.40 | 2.80 | 3.26 | 3.08 | 2.95 | 0.33 |
| 120 | 2.30 | 2.30 | 2.44 | 3.30 | 2.60 | 3.00 | 3.59 | 2.79 | 0.51 |
| Dosis | Clase de: | 45-60 mg/L SS | | | | | | | |
| (mW·s/cm ³) | 50 mg/L | 51 mg/L | 58 mg/L | 47 mg/L | 52 mg/L | MEDIA | SD | | |
| 0 | 7.41 | 6.90 | 7.04 | 8.00 | 8.18 | 7.51 | 0.57 | | |
| 5 | 6.67 | 6.23 | 6.23 | 7.08 | 7.11 | 6.67 | 0.43 | | |
| 10 | 5.00 | 4.72 | 5.57 | 5.71 | 5.90 | 5.38 | 0.50 | | |
| 15 | 4.57 | 4.00 | 4.38 | 4.59 | 4.74 | 4.46 | 0.29 | | |
| 30 | 3.43 | 3.38 | 3.43 | 3.80 | 4.23 | 3.65 | 0.36 | | |
| 60 | 3.30 | 2.78 | 3.20 | 3.28 | 3.15 | 3.14 | 0.21 | | |
| 120 | 3.00 | 2.00 | 3.00 | 3.18 | 2.96 | 2.83 | 0.47 | | |
| Dosis | Clase de: | 60-100 mg/L SS | | | | | | | |
| (mW·s/cm ³) | 67 mg/L | 73 mg/L | 77 mg/L | 100 mg/L | 85 mg/L | 94 mg/L | MEDIA | SD | |
| 0 | 6.98 | 7.04 | 7.38 | 7.00 | 7.23 | 7.15 | 7.13 | 0.16 | |
| 5 | 6.36 | 6.54 | 6.32 | 6.20 | 6.15 | 6.18 | 6.29 | 0.15 | |
| 10 | 5.18 | 5.96 | 5.45 | 5.15 | 5.08 | 4.90 | 5.29 | 0.38 | |
| 15 | 4.65 | 4.66 | 4.63 | 4.79 | 3.63 | 3.81 | 4.36 | 0.50 | |
| 30 | 3.59 | 4.23 | 2.46 | 3.54 | 3.28 | 3.48 | 3.43 | 0.57 | |
| 60 | 3.18 | 3.43 | 2.49 | 3.20 | 2.93 | 2.44 | 2.94 | 0.41 | |
| 120 | 2.44 | 3.08 | 2.42 | 2.90 | 2.50 | 2.16 | 2.58 | 0.34 | |

| Determinación de coliformes fecales inmersos en partículas | | | | |
|--|----------|-----------------|---------------|---------------------|
| | SS(mg/L) | Np (UFC/100 mL) | log SS (mg/L) | log Np (UFC/100 mL) |
| 17/06/2003 | 17 | 100 | 1.23 | 2.00 |
| | 24 | 1.0E+03 | 1.38 | 3.00 |
| | 32 | 1.0E+03 | 1.51 | 3.00 |
| | 44 | 1.8E+03 | 1.64 | 3.26 |
| | 50 | 2.0E+03 | 1.70 | 3.30 |
| 24/06/2003 | 8 | 1 | 0.90 | 0.00 |
| | 16 | 273 | 1.20 | 2.44 |
| | 23 | 300 | 1.36 | 2.48 |
| | 33 | 200 | 1.52 | 2.30 |
| | 38 | 2.5E+03 | 1.58 | 3.40 |
| 26/06/2003 | 7 | 1 | 0.85 | 0.00 |
| | 25 | 297 | 1.40 | 2.47 |
| | 40 | 636 | 1.60 | 2.80 |
| | 58 | 1.6E+03 | 1.76 | 3.20 |
| | 73 | 2.7E+03 | 1.86 | 3.43 |
| 01/07/2003 | 5 | 1 | 0.70 | 0.00 |
| | 24 | 200 | 1.38 | 2.30 |
| | 36 | 450 | 1.56 | 2.65 |
| | 51 | 6.0E+02 | 1.71 | 2.78 |
| | 67 | 1.5E+03 | 1.83 | 3.18 |
| 08/03/2004 | 77 | 306 | 1.89 | 2.49 |
| | 100 | 1.6E+03 | 2.00 | 3.20 |
| 09/03/2004 | 85 | 8.5E+02 | 1.93 | 2.93 |
| | 94 | 2.7E+02 | 1.97 | 2.44 |



| AII.6 Inactivación de amibas | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-------|-----|
| Concentración de <i>Acanthamoeba</i> spp. (Log org/mL) | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 13-Jun-02 | 27-Jun-02 | 11-Jul-02 | MEDIA | SD |
| 0 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 7.4 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 14.9 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 22.3 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 28.8 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 29.8 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 43.2 | 2.4 | 3 | 2.8 | 2.73 | 0.3 |
| 57.6 | 2.5 | 2.2 | 2.5 | 2.40 | 0.2 |
| 86.4 | 2.1 | 2 | 2.2 | 2.10 | 0.1 |
| 115.2 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 1.80 | 0.1 |
| 144 | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 0.50 | 0.2 |
| 172.8 | 0 | 0.2 | 0 | 0.07 | 0.1 |
| Concentración de <i>Acanthamoeba culbertsoni</i> (Log org/mL) | | | | | |
| Dosis mW·s/cm ² | 13-Jun-02 | 27-Jun-02 | 11-Jul-02 | MEDIA | SD |
| 0 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 7.4 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 14.9 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 22.3 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 28.8 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 29.8 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 4.40 | 0.0 |
| 43.2 | 2.3 | 2.9 | 3.4 | 2.87 | 0.6 |
| 57.6 | 2.2 | 2.5 | 3.2 | 2.63 | 0.5 |
| 86.4 | 2.1 | 2.3 | 2.1 | 2.17 | 0.1 |
| 115.2 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | 1.90 | 0.2 |
| 144 | 1.2 | 1.1 | 0.6 | 0.97 | 0.3 |
| 172.8 | 0 | 0.5 | 0 | 0.17 | 0.3 |

ANEXO III

Propuesta de un sistema de desinfección

Fecha: septiembre 10, 2002N° de Cotización: PPR1421Región: MEX

PROPUESTA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO COMPACTA (PTP) SISTEMA UV3000

Nos complace ofrecer nuestra última tecnología de desinfección. Esta propuesta está basada en el uso del Modelo **PTP UV3600-1** de Trojan Technologies, Inc. Un total de 1 unidad es incluida en esta propuesta.

~~NOMBRE DEL PROYECTO: Ciudad Universitaria, MX~~

SECCION DE LA ESPECIFICACIÓN:

1.0 CRITERIO DE DISEÑO:

Caudal Hidráulico Máximo: 30 LpsTransmisión UV@ 253.7 nm: 55 % *mínimo*Sólidos Suspendidos Totales: 30 mg/l *promedio de 30 días*Descarga de Coliformes Garantizada: 1000 /100 ml *coliformes fecales en un promedio de 30 días*

2.0 Sistema Estándar

2.1 MODULOS DE LAMPARAS UV

Un total de 6 módulos UV (24 lámparas UV) serán suministrados. Cada módulo consistirá de 4 lámparas UV con su balastro electrónico correspondiente en un compartimiento de aluminio montado en un marco de acero inoxidable del tipo 316. Los alambres eléctricos que conectan las lámparas y los balastros estarán encerrados en el marco de acero inoxidable y no expuestos al efluente.

Cada módulo UV estará provisto de un enchufe estándar de 120 voltios y un cable impermeable para su conexión a un receptáculo. El cable no será más largo de 3 M. La condición de cada lámpara será indicada por medio de luces LED colocadas en la parte superior de cada módulo.

Los módulos serán aproximadamente 1727 mm en longitud, 508 mm en altura y 70 mm en ancho, pesando aproximadamente 17 kg. Los materiales de construcción serán acero inoxidable tipo 316, aluminio anodizado, cuarzo 214 y teflón.

2.2 CANAL DEL EFLUENTE

Cada unidad será provista de un soporte para módulo UV y un vertedero corriente-abajo, tipo serpentín.

Un canal en concreto será proporcionado por Otros y tendrá las siguientes dimensiones internas:

Longitud 3810 mm, ancho 457 mm, altura 533 mm.

2.3 KIT DEL OPERARIO

Cada sistema será suministrado con:

1 par de guantes de caucho

1 escudo facial

3.0 EQUIPO OPCIONAL

3.1 SISTEMA DE SUPERVISION (1)

La intensidad producida en cada bancada de módulos de lámparas UV será percibida continuamente por un sensor UV sumergible. La intensidad UV en $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ será indicada en una pantalla con 3 caracteres. El tiempo transcurrido en horas será indicado en una pantalla de 5 caracteres.

Ambas ventanas usarán LEDs de 7 segmentos y serán visibles a través de la puerta del panel.

El Sistema de Supervisión será encerrado en un panel NEMA 4X montado en la pared.

Nota: Se requerirá para el Sistema de Supervisión un suministro eléctrico separado de 120 V monofásico, de 60 Hz y 5 amperios.

Incluído [] **No Incluido** []

3.2 RECEPTACULO DE DISTRIBUCION DE ENERGIA (PDR) (3)

Receptáculos dobles con interruptores de falla a tierra montados en cajas de unión de aluminio fundido pintado, completo con escudo para la lluvia para proveer energía a cada módulo.

Note: El contratista debe proveer un circuito apropiado de 120 V, monofásico, 60 Hz para conectar PDRs los cuales tienen una capacidad aproximada máxima de 20 amperios. El contratista será responsable por la distribución de la energía del alimentador principal de 120 V a los receptáculos individuales. La responsabilidad será integral y de acuerdo con los códigos eléctricos locales.

Incluído [] No Incluído []

3.3 TRANSFORMADOR - 3kVa, 240-120V, 50HZ

Incluído [] **No Incluído** [] Costo Unitario: \$1470USD

3.4 FOTOMETRO UV - Modelo P254-C UV

De requerirse, se incluye un fotómetro altamente preciso y portátil. Este instrumento ofrece a los operarios de planta un medio simple, preciso y altamente confiable de supervisar la tramitancia UV del efluente - un parámetro de agua residual importante.

Incluído [] **No Incluído** [] Costo Unitario: \$1380USD

3.5 ARMAZON PARA LIMPIEZA

Si se indica, se podrá incluir un armazón para limpieza de acero inoxidable tipo 304. El armazón está diseñado para facilitar la operación de servicio de los módulos UV.

Incluído [] No Incluído []

3.6 PARTES DE REPUESTO

| | <u>Cantidad</u> | <u>Incluído</u> | <u>No Inc.</u> |
|---------------------|-----------------|---|------------------------------|
| Lámparas UV | <u>2</u> | [<input checked="" type="checkbox"/>] | [<input type="checkbox"/>] |
| Camisas de Cuarzo | <u>2</u> | [<input checked="" type="checkbox"/>] | [<input type="checkbox"/>] |
| Sello de Terminales | <u>2</u> | [<input checked="" type="checkbox"/>] | [<input type="checkbox"/>] |

3.7 PUESTA EN MARCHA Y SERVICIO

Por: Trojan [] Rep. Trojan Local [] **No Incluído** []

GARANTIA: Trojan Technologies, Inc. garantiza todos los componentes del sistema contra mano de obra y materiales defectuosos por un período de un año a partir de la fecha de puesta en marcha o 18 meses de la fecha de embarque, la que sea menos.

Precio Por Sistema UV Básico más Opciones: \$16,481US.
Ex - works Fabrica -
London, Ontario, CANADA

4.0 ENTREGA

El sistema entrará en fabricación luego del recibo de la Orden de Compra. Tiempo de fabricación es aproximadamente entre 5 y 8 semanas. Tiempo de transporte vía marítima es aproximadamente 4 – 6 semanas

5.0 TERMINOS

- Todo precio es Ex -works Fabrica en dólares Americanos
- Precios excluyen todos los derechos, impuestos, transporte, seguro, documentación y tarifas de agente que puedan aplicarse.
- Pago 100% por giro bancario antes de fecha de embarque del sistema UV desde bodegas Trojan, London, Ontario CANADA.

Presentada respetuosamente,

TROJAN TECHNOLOGIES INC.



Patricia Rashmawi
Departamento de Ventas Internacionales

Fecha: enero 27, 2003
 N° de Cotización: PPR1421
 Región: MEX

NOMBRE DEL PROYECTO: Ciudad Universitaria, MX – PTP UV3600-1

COSTOS DE OPERACION PARA SISTEMA TROJAN PTP™

Criterio de Diseño

| | |
|---------------------|--------------|
| Caudal Máximo: | 30 L/S |
| Caudal Promedio: | 22 L/S |
| Horas de garantía: | 12.000 horas |
| Horas de operación: | 8760 horas |
| Transmisión UV: | 55%, mínimo |

Requerimientos de Potencia

| | |
|---|------------------------|
| Potencia por lámpara: | 87,5watts |
| Potencia Total: | 2,1kW |
| Potencia Promedia: | 1,5kW |
| Horas de Operación: | 8760 horas |
| Costo por Hora kW: | \$0,05USD |
| <i>Costo de Potencia Total Anual:</i> | <i>\$920USD</i> |
| <i>Costo de Potencia Promedia Anual:</i> | <i>\$657USD</i> |

Costo de Reemplazo de Lámparas a fin de vida útil (12.000horas)

| | |
|------------------------------------|--------------------------|
| Cantidad de lámparas a reemplazar: | 24 |
| Precio por lámpara: | \$44USD |
| <i>Costo de Reemplazo:</i> | <i>\$1.056USD</i> |

Costos de otros componentes

| | |
|--------------------|----------|
| Camisas de cuarzo: | \$31USD |
| Balastos: | \$103USD |

Solución ácida fosfórica (Ej. Lime-Away por EcoLab) deberá ser proporcionada por Otros.

De misma manera Trojan recomienda el uso de cualquiera solución anti-incrustante con un pH de 1,0-1,5.

NOTAS

1. Costos de O&M son basados utilizando medidor de caudal (suministrado por Otros) con señal de 4-20 mA.
2. Costos basados operando el sistema a *caudal promedio y caudal máximo*.
3. Requerimientos de potencia son basados únicamente sobre potencia de las lámparas.