

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

*Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de  
Cataluña, dentro del programa de Doctorado “Ingeniería Nuclear”*

**CONTRIBUCIÓN A LA  
CARACTERIZACIÓN DE  
AEROSOL RADIATIVOS  
DERIVADOS DEL RADÓN**

Autor: Arturo Vargas Drechsler  
Director: Xavier Ortega Aramburu

## BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, A. "Untersuchungen zur aerosoldeposition an oberflächen". Dissertation an der Justus-Liebig Universität Giessen, 1979.

Amsden, A. A. y Harlow, T. H. "The SMAC method: a numerical technique for calculating incompressible fluid flows". Los Alamos Scientific Laboratory, report LA-4370, 1970.

Baltzer, P., Görsten, K.G. y Bächlin, A. "A pulse-counting ionization chamber for measuring the radon concentration in air". Nucl. Instr. And Meth. In Physics research Section A317, pp. 357-365, 1992.

Baixeras, C., Enge, W., Freyer, K., Jönsson, G., Monnin, m.M., Schiocchetti, G. y col. "Report on the first phase activity of an EU project concerning coordinated radon measurements in five European countries". Environment International, Vol.22, Suppl. 1, pp. 687-697, 1996.

Birchall, A., James, A.C. "Uncertainty Analysis of the Effective Dose per Unit Exposure from Radon Progeny and Implications for ICRP Risk-Weighting Factors". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 53, Nos 1-4, pp. 133-140, 1994.

Billard, F., Madeleine, G., Chapuis, A., Fontan, J., López, A. "Contribution to the study of air pollution in uranium mines". Radioprotection, Vol. 6, pp. 45, 1981.

Bricard, J. "Physique des Aerosols II. Nucleation. Condensation. Ions. Electrification. Propriétés Optiques". Report CEA-R-4831(2), 1977.

Browne, E. y Firestone, R.B. "Table of isotopes". V.S. Shirley, ed. Wiley-Interscience, New York, 1986.

Busigin, A., Van der Vooren, A.W., y Phillips, C.R. "A technique for calculations of aerosol particle size distribution from indirect measurements". J. Aerosol Sci. Vol. 11, pp 359, 1980.

Busigin, A., Van der Vooren, A. W., Babcock, J.C., y Phillips, C.R. "The nature of unattached RaA ( $^{218}\text{Po}$ ) particles". Health Physics, Vol. 40, pp. 333. 1981.

Busigin, C., Busigin, A., Phillips, C.R. The chemical fate of Po-218 in air. In: Radiation Hazards in Mining: control, Measurements and Medical Aspects. Gómez, M. Ed. New York, pp. 1043, 1982.

Butterweck-Dempewolf, G. "Natürliche radionuklide als tracer zur messung des turbulenten austausches und der trockenen deposition in der umwelt". Dissertation, Gerorg-August-Universität Göttingen, 1991.

Butterack-Dempewolf, G., Schuler, Ch., Vezzú, G. "Determination of bimodal distribution from measurements with diffusional size classification". Aceptado en *J. Aerosol Sci.* (1998).

Butterack-Dempewolf, G., Schuler, Ch., Vezzú, G.; Reineking, A., Huet, C., Tymmen, G., Strong, J.C., Kuntson, E.O. y Vargas, A. "Intercomparison of approximation algorithms for the size distribution of the unattached fraction of radon progeny". Aprobado para publicación en *Aerosol Sci. Tech.* (2000).

Castelman, A.W. Jr. "Consideration of the chemistry of radon-progeny". *Environ. Sci. Technol.* Vol. 25, pp. 730, 1991.

(CEC 97). Commission of the European Communities CEC Contract FI4P-CT-95-0025. Mid-Term Report 1 de Enero 1996 a 31 de Diciembre de 1997.

(CEC 99). Commission of the European Communities CEC Contract FI4P-CT-95-0025. Final Report 1 de Enero 1996 a 31 de Diciembre de 1998. Septiembre 1999.

Clough, W.S. "Transport of particles to surfaces". *J. Aerosol. Sci.* Vol. 4, pp. 227, 1973.

Chamberlain, A. "Aspects of a travel and deposition of aerosols and vapour clouds". A.E.R.E. HP/R 1261, Harwell, 1955.

Chamberlain, A.C. "Transport of gases to and from grass and grass-like surfaces". En: *Proc. of the Royal Society of London, series A*, Vol. 290, pp. 236-265, 1966.

Chen, P.Y. y Campanin, R.A. *J. Aerosol Sci.* Vol. 7, pp. 335, 1976.

Cheng, Y.S. y Yeh, H.C. "Theory of screen type diffusion battery". *J. Aerosol Sci.* Vol. 11, pp. 313, 1980.

Cheng, Y.S., Keating, J.A. y Kanapilly, G.M. "Theory and calibration of a screen-type diffusion battery". *J. Aerosol Sci.* Vol. 11, pp. 549, 1980.

Chu, K.D., Hopke, P.K., Knutson, E.O., Tu, K.W. y Holub R.F. "The induction of an ultrafine aerosol by radon radiolysis". En: "Radon and its decay products: occurrence, properties and health effects". editor: Hopke, P.K., Washington D.C.: American chemical society pp. 365, 1987.

Chu, K.D., Hopke, P.K. "Neutralization kinetics for Polonium-218". *Environ. Sci. Technol.* Vol. 22, pp. 711-717, 1988.

Cohen, B.S. y Asgharian B. "Deposition of ultrafine particles in the upper airways: an empirical analysis". *J. Aerosol Sci.* Vol. 21, pp. 789, 1990.

Cooper, D.W. y Spielman, L.A. "Data inversion using nonlinear programming with physical constraints: aerosol size distribution measurements by impactors". *Atmos. Environ.* Vol. 10, pp. 723, 1976.

Demster, A.P., Laird, N.M. y Rubin, D.B. "Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm". *J. Royal Statistical Society*, Vol. 39, pp. 1, 1977.

Dörschel, B. Y Piesch, E. "a new approach to estimating the equilibrium factor between radon and its daughters". *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 48, pp. 145-151, 1993.

Duport, P. "Radiation Protection in Uranium Mining: Two Challenges". *Invited Paper. Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 53, Nos 1-4, pp. 13-19, 1994.

Durrani, S.A. e Ilic, R. En: "Radon measurements by etched track detectors". Editorial: World scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1997.

Emi, H., Kanaoka, C., y Kuhabara, Y. "The diffusion collection efficiency of fibers for aerosols over a wide range of Reynolds numbers". *J. Aerosol Sci.* Vol. 13, pp. 403, 1982.

Fontan, J., Blanc, D., Huertas, M.L., y Marty, A.M. "Mesure de la mobilité et du coefficient de diffusion des particules radioactives". En: *Planetary Electrodynamics*, S.C. Coronati and J.Huges Ed., Vol. 1, Gordon & Breach, New York, 1969.

Frey, G., Hopke, P.K., y Stukel, J.J. "Effects of trace gases and water vapour on the diffusion coefficient of Po-218". *Science*, Vol. 211, pp. 480, 1981.

Friedlander, S.K., y Johnstone, H.F. "Deposition and suspended particles from turbulent gas streams". *Ind. Engng. Chem.*, Vol. 49, pp. 1151-1156, 1957.

Friedlander, S.K. "Smoke, Dust and Haze". John Wiley & Sons Inc., New York, 1977.

Fuchs, N.A. "On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere". *Geofis. Pura e Appli.* Vol. 56, pp. 185, 1963.

Fuchs, N.A. "The Mechanics of Aerosols". Pergamon Press, Oxford, 1964.

Gardner, R.P. y Verghese, K. "On the solid angle subtended by a circular disc". *Nuclear Instrumentation and methods* 93, pp. 163, 1971.

Glasstone, S., Sesonske, A. "Nuclear Reactor Engineering". van Nostrand Reinhold, New York, pp. 30, 1967.

Goldstein, S.P., Hopke, P. K. "Environmental neutralization of RaA". *Environ. Sci. technol.*, Vol. 19, pp. 146, 1985.

Hind, W.C. "Aerosol Technology. Properties, behavior, and measurement of airborne particles". Ed. John Wiley & Sons. New York 1982.

Hirt, C.W., Nichols, B.D. y Romero, N.C. "SOLA: a numerical solution algorithm for transient fluid flows". Los Alamos Scientific Laboratory. Report LA-5852, 1975.

Hist B.W. y Harrison, G.E. "The diffusion of radon gas mixtures". Proc. Roy. Soc. Lond. A169, pp 573-586, 1939.

Holub, R.F. y Knutson, E.O. "Measuring polonium-218 diffusion-coefficient spectra using multiple wire screens". En: Radon and its Decay Products: Occurrence, Properties and Health Effects. Hopke, P.K. Ed. ACS 331 pp. 341-356, 1987.

Hopke, P.K. Environ. Int. Vol. 15, pp. 299, 1989.

Hopke, P.K. y Paatero, P. "Extreme value estimation applied to aerosol size distribution and related environmental problems". J. Res. Nat. Inst. Stand. Tech. Vol. 99 (4), pp. 361, 1994.

Hopke, P.K. "The initial atmospheric behaviour of radon decay products". J. of Radioanalytical and nuclear chemistry, Vol. 203, pp. 353, 1996.

Horbert, H., Vogt, K.J. y Angletti, L. "Untersuchungen zur Ablagerung von aerosolen auf vegetation and anderen grenzflächen". Berichte der Kernforschungsanlage Jülich JÜL-1288, 1976.

Hubbard, L.M y Hagberg, N. "Time-variation of the soil gas radon concentration under and near a swedish house". Environment International, Vol. 22 Suppl., pp. 477-482, 1996.

Hueper, W. Occupational Tumors and Allied Diseases (Springfield, III: Charles C. Thomas), 1942.

Huet, C. "Etude des caracteritiques physiques - distribution en taille, fraction libre, facteur d'équilibre - des derivies a vie corte du radon-222 en atmosphere domestique". Tesis presentada en la facultat de ciencias y técnicas de la Universidad de la Bretaña Occidental en Julio de 1999.

ICRP 50. Annals of the ICRP (International Commission on Radiological Protection. "Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters ". ICRP Publication 50, Pergamon, 1987.

ICRP 60. Annals of the ICRP (International Commission on Radiological Protection. "1990 Recomendations of the International Commission on Radiological Protection". ICRP Publication 60, Pergamon, 1990.

ICRP 66. Annals of the ICRP (International Commission on Radiological Protection. "Human Respiratory Tract Model For Radiological Protection". ICRP Publication 66, Pergamon, 1994.

Ingham, D.B. " Diffusion of aerosols from a stream flowing through a cylindrical tube". J. Aerosol Sci. Vol. 6, pp. 125, 1975.

Ingham, D.B. "Diffusion of desintegration products of radioactive gases in circular and flat channels". J. Aerosol Sci. 6, pp. 395, 1975b.

Ingham, D.B. "Diffusion of aerosols from a stream flowing through a short cylindrical pipe". *J. Aerosol Sci.* Vol. 15, pp. 637, 1984.

Ikebe, Y., Shimo, M. y Kawano, M. "Measurements of the effective attachment coefficient between RaA ions and condensation nuclei". *Pure appl. Geophys.* Vol. 83, pp. 131, 1970.

James, A.C., Birchall, A., Cross, F.T., Cuddihy, R.g. y Johnson, J.R. "Modelling doses to Regions of the respiratory tract at risk: the ICRP task group's approach". In proceedings of the 26<sup>th</sup> Hanford life sciences symposium; modelling for scaling to man, biology, dosimetry, and response. Octubre 1988 a.

James. A.C., Strong. J.C., Cliff, K.D. y Strandén, E. "The significance of equilibrium factor and attachment in radon daughters dosimetry". *Radiat. Prot. Dosim.* 24: 451-455. 1988 b.

James,A.C. "Lung dosimetry". En: "Radon and its Decay products in indoor air". Editor: Nazarov,W., Nero,A. John Wiley&Sons, Inc. New York 1988.

Kawano, M., Ikabe, Y., Nakayama, T. y Shimizu, K. "The interaction between radioactive ions and condensation nuclei". *J. Mat. Soc. Japan* 48, pp. 69, 1970

Kerouanton, D., Tymen, G. y Boulad, D. "Small particle diffusion penetration of an annular duct compared to other geometries". *J. Aerosol Sci.*, vol. 27, pp. 345-349, 1996

Kirsch, A.A. y Fuchs N.A. "Studies of fibrous aerosol filters". *II Ann. Occup. Hyg.* 10, pp. 22, 1967

Kirsch, A.A. y Stechkina, I.B. En : "Fundamentals of aerosol science". Shaw, D.T., Ed. Wiley, New York, Cap. 4, pp. 165, 1978.

Knoll, G.F. "Radiation detection and measurements", Wiley&Sons, Inc. New York 1979.

Knutson, E. O. "Modelling indoor concentrations of radon decay products". En: "Radon and its Decay products in indoor air". Editor: Nazarov,W., Nero,A. John Wiley&Sons, Inc. New York 1988.

Knutson, E.O. "Random and systematic errors in the graded screen technique for measuring the diffusion coefficient of radon decay products". *Aerosol Sci. Tech.* 23, pp. 301, 1995.

Kotrappa, P., Bhanto, D.P. y raghunath, B. "Difussion coefficients for unattached decay products of thoron-dependence on ventilation and relative humidity". *Health Physics*, Vol.31, pp. 378, 1976.

Lao, M., Karpen-Hayes, K., Hopke, P.K. "Modelling radon progeny size distribution in an aerosol chamber". American Chemical Society: Twentieth Northeast regional meeting. Program and Abstracts, Washington D.C., Vol.64, pp. 33, 1990.

Lassen, L. y Rau, G. "Die anlagerung radioactiver atome an aerosole (Schwebstoffe)". Zeitschrift für physik, Vol. 160, pp. 504, 1960.

Lederer, C.M. y Shirley, V.S. "Table of Isotopes". 7<sup>th</sup> edition, Wiley-Interscience, New York, 1978.

Lemos, C.M. "Numerical modelling of shallow water waves: application of the VOF technique and the k-ε turbulence model". Tesis presentada en el Departamento de Ingeniería hidráulica, marítima y medio ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña en Octubre de 1990.

Lind, S.C. "Radiation chemistry of gases". Reinhold, New York 1961.

Lippman, M. "The industrial environment - its evaluation and control". U.S. department of Health, Education and Welfare, NIOSH, Ch 11 pp 101, 1973.

Little, P., Wiffen, R.D. "Emission and deposition of petrol engine exhaust pb-1. Deposition of exhaust Pb to plant and soil surfaces. Atmos". Envir, Vol. 11, pp. 437, 1977.

Loeb, L.B. "The kinetic Theory of Gases". 3<sup>a</sup> edición, Dover Publications, New York 1961.

Luhr, O. Phys. Rev. Vol 2 n° 3, pp. 1394, 1930.

Lloyd, J.J., Taylor, C.J., Lawson, R.S. y Shields, R.A. "The use of the L-curve method in the inversion of diffusion battery data". J. Aerosol Sci. 28, pp 1251, 1997.

Maher, E.F. y Laird, N.M. "EM algorithm reconstruction of particle size distribution from diffusion battery data". J. Aerosol Sci. Vol. 16, pp. 557, 1985.

Malet, J., Montassuir, N. Boulod, D. y Renoux, A. "Diffusion of radon daughters in laminar tube flow". J. Aerosol sci. Vol. 26 Suppl. 1, pp. 325, 1995.

Malet, J., Montassuir, N. Boulod, D. y Renoux, A. "Diffusion of aerosols with in-flight formation in laminar tube flow". J. Aerosol sci. Vol. 27 Suppl. 1, pp. 261, 1996.

Malet, J. "Transport et depot des aerosols nanometriques. Application a la fraction libre des descendants a vie corte du radon". Tesis doctoral presentada en la facultad des Sciences de Creteil UFR de Sciences et de Technologie. Universite Paris XII -Val-de-Marte. En Octubre de 1997.

Martonen, T., Zongqin, Z. y Yand, Y. "Particle diffusion with entrance effects in a smooth-walled cylinder". J. Aerosol Sci. Vol. 27, pp 139, 1996.

Mercer T.T. "the effect of particule size on the escape of cooling RaB atoms from particulate surfaces". Health Physics, Vol. 31, pp.173, 1976.

Mails, J.C.H. y col. "Results of the 1998 European Commission of passive radon detectors". En publicación NRPB.

Mohnen, V. "Die radioactive markierung von aerosolen". Z. Physik Vol . 229, pp. 109, 1969.

Möller, U. y Schumann, G. "Mechanism of transport from the atmosphere to the earth's surface". J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 3013-3019, 1970.

NCRPM, National Council on Radiation Protection and Measurements. "A handbook of Radoactivity Measurement Procedures". 2<sup>nd</sup> edition, Report No. 58. Bethesda, MD 1985.

Nelder, J.A. y Mead, R. "A simple method for function minimization". Comput. J. Vol. 7, pp. 308, 1965.

Nichols, B. D., Hirt, C. W. y Hotchkiss, R. S. "SOLA-VOF: a solution algorithm for transient fluid flow with multiple free-boundaries". Los Alamos Scintific Laboratory, report LA-8355, 1980.

Ortega, X., Vargas, A. "Desarrollo de una cámara para ensayos y calibración de sistemas de detección de radón y descendientes". Resúmenes de la XXI Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Reus-Tarragona. Octubre de 1995.

Ortega, X., Vargas, A. "Characteristics and temporal variation of airborne radon decay progeny in the indoor environment in Catalonia (Spain)". Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. 149-159, 1996.

Olawoyim, O.O. y Hopke, P.K. " Effects of volatile organic compounds (VOC) and water vapor on the  $^{218}\text{Po}^+$  clusters aerodynamic size distribution". Book of abstracts of th VI International Symposium on the Natural radiation Environment, pp. 178, Junio 5-9, Montreal (Canadá) 1995.

Patankar, S.V. En: "Numerical heat transfer and fluid flow". Series in Computacional and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences. Editores: Mary A. phillyis y Edward m.Millman, 1980.

Phillips, C.R., Khan, A., Leung, H.M.Y. "The nature of determination of the unattached fraction of radon and thoron progeny". En: Radon and its Decay Products in Indoor Air. Nazarov, W.W. y Nero, A.V. Ed. John Wiley&Sons, New York, pp. 203, 1988.

Phillips, D.L. "A technique for the numerical solution of certain integral equation of the first kind". J. ACM, Vol. 9, pp. 84, 1962.

Porstendörfer, J. " The diffusion coefficient and mean free paths of the natural and charged radon deay products in air. Zeitschrift für physik". Vol. 213, pp. 384-396, 1968a.

Porstendörfer, J. "Die experimentelle bestimmung der koeffizienten der anlagerung der neutralen und elektrisch geladenen radon-folgeprodukten an aerosole". Zeitschrift für Physik, Vol. 217, pp. 175, 1968b.

Porstendörfer, J. "Die alagerungsgewindigkeit der elektrisch geladenen und neutralen emanationfolgeprodukte an das atmosphärische aerosol". Pure Appl. Geophys., Vol. 77, pp. 175, 1969.

Porstendörfer, J. y Mercer, T.T. "Adsorption probability of atoms and ions on particle surfaces in submicrometer size". J. Aerosol Sci., Vol. 9, pp. 469, 1978a.

Porstendörfer, J. y Mercer, T.T. "Influence of nuclei concentration and humidity upon the attachment rate of atoms in the atmosphere". Atmos. Envir., Vol.12, pp. 2223, 1978b.

Porstendörfer, J. y Mercer, T.T. "Influence of electric charge and humidity upon the diffusion coefficient of radon decay products". Health Physics, Vol. 37, pp. 191, 1979.

Porstendörfer, J., Rößig, G. y Ahmed, A. "Experimental determination of the attachment coefficients of atoms and ions on monodisperse aerosols". J. Aerosol Sci. Vol.10, pp. 21, 1979.

Porstendörfer, J., Wicke, A. y Straub, A. "Methods for continuous registration of radon, thoron and their decay products indoors and outdoors". En: Natural Radiation in the environment III, pp. 1293-1307. Technical Information Center, U.S, Department of Energy, New York 1980.

Porstendörfer, J. "Behaviour of radon daughters products in indoor air". Rad.Prot.Dosim., Vol. 7, pp. 107-113, 1984.

Porstendörfer, J., Renking, A., Becker, K.H. "Free fraction, attachment rates and plate-out rates of radon daughters in houses". En: Radon and its Decay Products: Occurrence, Properties and Health Effects. Hopke, P.K. Ed. ACS 331 pp. 285-300, 1987.

Porstendörfer, J. "Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air". J. Aerosol Sci., Tutorial/Review Paper, Vol.25 n° 2, pp. 219-263, 1994.

Porstendörfer, J. "Characteristics of Airborne Radon and Thoron Decay Products". CEC Contract FI3P-CT920034, 1995.

Raabe, O.G. "Concerning the interactions that occur between radon decay products and aerosols". Health Physic, Vol. 17, pp. 177-186, 1969.

Raes, F. "description of the properties of unattached  $^{218}\text{Po}$  and  $^{212}\text{Pb}$  particles by means of the classical theory of cluster formation". Health Physics, Vol. 49, n° 6 pp. 1177-1187, 1985.

Raes, F., Janssens, A. "Ion induced nucleation in a  $H_2O-H_2SO_4$  system: extension of the classical theory and search for experimental evidence". *J. Aerosol Sci.*, Vol. 16, n° 3, pp. 217, 1985

Raghunat, B. y Kotrappa, P. Diffusion coefficients of decay products of radon and thoron". *J. Aerosol Sci.* Vol. 10, pp. 133, 1979.

Ramamurthi, M. Hopke, P.K. "On improving the validity of wire screen unattached fraction radon daughter measurements". *Health Physics*, Vol. 56, pp. 189-194, 1989.

Ramamurthi, M. "The detection and measurement of the activity size distribution ( $d_p > 0,5$  nm) associated with radon decay products in indoor air". Tesis doctoral University of Illinois, Urbana-Champaign, 1989.

Ramamurthi, M., Hopke, P.K. "Simulation studies of reconstruction algorithms for the determination of optimum operating parameters and resolution of graded screen array systems (non conventional diffusion batteries). *Aerosol Sci. Tech.* 12, pp. 700, 1990.

Ramamurthi, M.; Hopke, P.K. "An automated, Semicontinuous System for Measuring Indoor Radon Progeny Activity-Weighted Size Distribution  $d_p$  0.5-500 nm". *Aerosol Sci. technol.* Vol. 14, pp. 82-92, 1991.

Ramamurthi, M., Strydom, R., Hopke, P.K. and Holub, R.F. "Nanometer and ultrafine aerosols from radon radiolysis". *J. Aerosol Sci.*, Vol. 24 pp. 393, 1993.

Reineking, A. y Porstendörfer, J. "High-volume screen diffusion batteries and  $\alpha$ -spectroscopy for measurements of the radon daughters activity size distribution in the environment". *J. Aerosol Sci.* Vol. 17, pp. 873, 1986.

Reineking, A. y Porstendörfer, J. "Size distribution of unattached short lived radon decay products in homes and in working places". Book of abstracts of the VI International Symposium on the Natural radiation Environment, pp. 200, Junio 5-9, Montreal (Canadá) 1995.

Sasse, A.G.B.M., Gadgil, A.J. y Nazaroff, W.W. "On the measurement of Po-218 diffusivity using the two filter method". *J. Aerosol Sci.* Vol. 25 (4), pp. 689, 1994.

Scheibel, H.G., Porstendörfer, J. y Wicke, A. "A device for the determination of low natural  $^{222}Rn$  and  $^{226}Ra$  concentrations". *Nucl. Instr. and Meth.* 165, pp. 345-348, 1979.

Scheibel, H.G. y Porstendörfer, J. "Penetration measurements in the ultrafine particle size range". *J. Aerosol Sci.* Vol. 15 pp. 549, 1986.

Sehmel, G.A. "Particle eddy diffusivities and deposition velocities for isothermal flow and smooth surfaces". *J. Aerosol Sci.*, Vol. 4, pp. 125, 1973.

Sehmel, G.A., Hodgson, W.H. y Sutter, S. "Dry deposition of particles". En: Pacific Northwest Laboratory, Annual Report for 1973 to the USA EC, Division of biomedical and environmental research, BNWL-1850, Part. 3, 157174, 1974.

Solomon S.B. et al. " Application of the ICRP's new Respiratory Tract Model to an Underground Uranium Mine". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 53, Nos 1-4, pp. 119-125, 1994.

Stidley,C.A., Samet, J.M. "A Review of Ecologic Studies of Lung Cancer and Indoor Radon". Health Physics, Review Paper, Vol. 65(3), pp. 234-251, 1993.

Stranden, E. y Strand, T.A. "A dosimetric discussion based on measurements of radon daughter equilibrium factor and unattached fraction in different atmospheres". Radiat.Prot. Dosim. 16, pp. 313-318. 1986.

Tan, c.W. y Hsu, C.G. J. Aerosol Sci. Vol. 2, pp. 117, 1971.

Thomas, J.W. y LeClare, P.C. "A study of the two filter method for radon-222". Health Physics, Vol.18, pp.113, 1970.

Tokamani, S., Limoto, T. Y Kurosawa, R. "Continuous measurement of the equilibrium factor and the unattached fraction  $f_p$  of radon progeny in the environment". Env. International 22 (suppl.1), pp. 611-616, 1996.

Twomey, S. "Comparison of constrained linear inversion and an iterative nonlinear algorithm applied to the indirect estimation of particle size distribution". J. Comput. Phys. Vol. 7, pp. 308, 1965.

Tymen, G., Kerouanton, D., Huet, C. y Boulad, D. "An annular diffusion channel equipped with a track detector film for long-term measurements of activity concentration and size distribution of  $^{218}\text{Po}$  particles". J. Aerosol Sci., vol. 30, pp. 205-216, 1999.

Vargas A. "Proyecto de un sistema para la medida de gas radón y sus descendientes en el aire. Evaluación de las dosis internas producidas en las personas". Proyecto final de carrera presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña. Septiembre 1992.

Vargas, A., Ortega, X. y López, P. "Puesta en marcha de un laboratorio para los estudios de radón". Radioprotección N° Extraordinario de Septiembre 1996.

Vargas, A., Ortega, X. y Porta, M. "Dose conversion factor for radon concentration in indoor environments using a new equation for the F- $f_p$  correlation". Health Phys. 78 (1), pp. 80-85, 2000.

Welch, J. E., Harlow, F., Shannon, J. P. y Daly, B.J. "The MAC method: a computing technique for solving viscous, incompressible, transient fluid flow problems involving free-surfaces". Los Alamos Scientific Laboratory, report LA-324, 1966.

White, F.M. "Fluid Mechanics". McGraw-Hill 1979.

Yamada, Y., Cheng, Y.S. y Yeh, H.C. "Evaluation of coarse screens as diffusion cell material for ultrifine aerosols beloww 0,02  $\mu\text{m}$ ". J. Aerosol Sci. Vol. 18, pp. 733, 1988.

Yeh, H.C., Cheng, Y.S. y Orman M.M. "Evaluation of various types of wires screens in diffusion battery cells". J. Colloid Interface Sci. Vol. 86, pp. 12, 1982.

Yoon, S.C., Marlow, W.H., y Hopke, P.K. "Measurements of  $\text{SO}_2$  effects on the Po-218 ion mobility spectrum by alpha track detection". Health Physics, Vol. 62, pp. 51, 1992.

Yue, G.K. " On the characteristics of sulfate aerosols formed in the presence of ion sources". J. Aerosol. Sci., Vol. 10, pp. 387, 1979.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. II.1. Cadena de desintegración natural del  $^{238}\text{U}$ . Los periodos de semidesintegración y energías de las partículas  $\alpha$  obtenidos de Browne y Firestone 1986. Las energías beta máximas obtenidas de NCRPM 86 (excepto para  $^{234}\text{Th}$  y  $^{234}\text{Pa}^m$  obtenidas de Lederer y Shirley 1978).

Fig. II.2. Representación esquemática de la energía de formación para clusters cargados y neutros en función de su radio. Los clusters cargados pueden ser estables alrededor del radio  $r^+$  (Raes 1985).

Figura II.3. Coeficiente de difusión para partículas de tamaño comprendido entre 0.5 nm y 2 nm. (Ramamurthi 1989).

Fig. II.4. Dosis medias absorbidas sobre células epiteliales en las regiones bronquial y alveolar (James 1988).

Fig. IV.1. Esquema de un tubo de difusión donde se muestra el desarrollo del perfil de velocidades, así como el transporte de una partícula por su interior debido a la convección ( $u$ ,  $v$ ) y a la difusión ( $D$ ).

Fig. IV.2. Representación de un nodo de la malla utilizada para la solución numérica del perfil de velocidades por la técnica SOLA-VOF implementada en este trabajo.

Fig. IV.3. Discretización del dominio donde se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes numéricamente por el método SOLA-VOF.

Fig. IV.4. Comparación entre el perfil de velocidad axial obtenido mediante elementos finitos (A) (Malet 1997) y el código SOLA-VOF desarrollado en este trabajo (B). Radio del tubo = 4 cm y  $Re = 500$ .

Fig. IV.5. Comparación entre el perfil de velocidad radial obtenido mediante elementos finitos (A) (Malet 1997) y el código SOLA-VOF desarrollado en este trabajo (B). Radio del tubo = 4 cm y  $Re = 500$ .

Fig. IV.6. Comparación entre la solución analítica y la simulación numérica por técnica de Monte-Carlo de la difusión en una dimensión.

Figura IV.7. Comparación entre la solución analítica y la simulación numérica por técnica de Monte-Carlo de la difusión de una partícula de 0.4 nm, en un tiempo de 10 s con un paso de tiempo de 0.01 s y  $10^6$  simulaciones, para dos dimensiones.

Fig. IV.8. Valores de penetración obtenidos mediante simulación de Monte-Carlo para distintos pasos de tiempo y valores de  $\Delta$  para un perfil de velocidades de tipo parabólico. En línea continua se presenta el valor de penetración para perfil parabólico de velocidades obtenido con la expresión III.18.

Fig. IV.9. Comparación entre las distribuciones de penetraciones calculadas suponiendo perfiles de velocidades plano, parabólico, en desarrollo con tubo liso y en desarrollo con un tubo de pared rugosa. Los valores de  $\Delta$  corresponden a un tubo de 30 cm de longitud, 1 cm de radio y partículas de tamaño comprendido entre 0.1 nm y 10 nm.

Fig. IV.10. Evolución axial de la densidad superficial de partículas en el interior de un tubo de difusión de 1 cm de radio, perfil plano de velocidades de  $22.3 \text{ cm s}^{-1}$  y diámetro de la partícula de 0.5 nm. Solución mediante  $10^5$  simulaciones y la aplicación de técnicas de Monte-Carlo.

Fig. IV.11. Evolución axial de la densidad superficial de partículas en el interior de un tubo de difusión de 1 cm de radio, perfil plano de velocidades de  $22.3 \text{ cm s}^{-1}$  y diámetro de la partícula de 0.9 nm. Solución mediante  $10^5$  simulaciones y la aplicación de técnicas de Monte-Carlo.

Fig. V.1. Esquema del equipo de medida de la concentración de radón.

Fig. V.2. Esquema básico de funcionamiento de una unidad de medida de la concentración de los descendientes de vida corta de radón en el aire por espectrometría alfa.

Fig. V.3. Verificación de funcionamiento del equipo de medida del factor de equilibrio y la fracción mediante una intercomparación con el equipo de la Universidad de Brest en la cámara de radón del INTE.

Fig. V.4. Esquema del principio básico de funcionamiento de un módulo de medida del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre provisto de un tubo de difusión.

Fig. V.5. Distribuciones de penetraciones de partículas para tubos de 10,30 y 50 cm y caudales de  $75$  y  $125 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  suponiendo un perfil de velocidades de tipo parabólico.

Fig. V.6. Diámetro de hilo máximo del tamiz en función del caudal de circulación.

Fig. V.7. Distribuciones de penetraciones de los módulos de medida utilizados para la determinación del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre.

Fig. V.8. Fotografía del sistema de medida del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre en el interior de la cámara de radón del INTE.

Fig. V.9. Clasificación de las distribuciones seleccionadas según una agrupación de 10000 celdas utilizada en el algoritmo Randomwalk.

Fig. V.10. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en  $\chi^2$  con y sin introducción de ruido.

Fig. V.11. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en WLS con y sin introducción de ruido.

Fig. V.12. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en la diferencia de área con y sin introducción de ruido.

Fig. V.13. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en RMSE con y sin introducción de ruido.

Fig. V.14. Esquema de la cámara de radón del INTE.

Fig. V.15. Concentración de radón teórica que se alcanza en la cámara de radón sin ventilación en función del tiempo de acumulación de radón en la fuente generadora.

Fig. VI.1. Situación de los cuatro recintos de la costa catalana donde se llevaron a cabo las medidas del factor de equilibrio, la fracción libre y el espectro dimensional de la fracción adherida.

Fig. VI.2. Evolución temporal de las concentraciones de radón y sus descendientes en Calella durante un periodo de 11 días.

Fig. VI.3. Medidas en continuo del factor de equilibrio y de la fracción libre en Calella durante un periodo de 11 días donde se aprecian los efectos de la "Tramontana".

Fig. VI.4. Gráficos de probabilidad y de probabilidad logarítmica de  $F$  y  $f_p$  en cuatro recintos del litoral mediterráneo.

Figura VI.5. Factor de equilibrio ( $F$ ) y fracción libre ( $f_p$ ) con las medidas realizadas en cuatro recintos de la costa mediterránea de Cataluña.

Fig. VI.6. Correlaciones entre  $F$  y  $f_p$  obtenidas con los valores representados en la figura VI.5.

Fig. VI.7. Número (líneas finas) y actividad (líneas gruesas) del espectro dimensional en Barcelona con una relación superficie volumen muy baja y en Calella con viento procedente de mar.

Fig. VI.8. Distribuciones de penetraciones de partículas del sistema de medida desarrollado por la Universidad de Brest.

Fig. VI.9. Fotografía de los equipos de medida de la Universidad de Brest y el desarrollado en este trabajo en el interior de la cámara de radón del INTE durante la experiencia de intercomparación.

Fig. VI.10. Factor de conversión a dosis por unidad de exposición de radón en función del factor de equilibrio utilizando las correlaciones potencial y log-potencial, y con el modelo dosimétrico de James y col. 1988 a.

Fig. VI.11. Factor de conversión a dosis por unidad de exposición de radón en función del factor de equilibrio utilizando las correlaciones potencial y log-potencial, y con el modelo dosimétrico de la ICRP 66.

## LISTA DE TABLAS

Tabla II.I. Energía potencial alfa por átomo y por bequerelio de los descendientes de vida corta del radón (ICRP 50).

Tabla II.II. Tasa de neutralización del  $Po^+$  en una atmósfera de nitrógeno humidificado con y sin etanol (Chu y Hopke 1988).

Tabla II.3. Correlación entre la fracción libre y factor de equilibrio obtenida de diferentes resultados experimentales.

Tabla IV.1. Comparación entre la solución analítica de la penetración en tubos para flujo plano y la simulación numérica por Monte-Carlo para distintos valores del paso de tiempo. 10000 simulaciones para cada tamaño de partícula representado por el parámetro  $\Delta = \pi DL / (4Q)$ .

Tabla IV.2. Comparación entre la solución analítica de la penetración en tubos para flujo parabólico y la simulación numérica por Monte-Carlo para distintos valores del paso de tiempo. 10000 simulaciones para cada tamaño.

Tabla IV.3. Influencia en el parámetro de penetración de la desintegración de  $^{218}Po$  en el interior de un tubo mediante técnicas de Monte-Carlo para distintos valores de  $\Delta$  que corresponden a un tubo de 50 cm de longitud, velocidad a la entrada de  $22.3 \text{ cm s}^{-1}$  y partículas con diámetros comprendidos entre 0.2 nm y 0.12 nm.

Tabla VI.4. Influencia en el factor de penetración de la formación de  $^{218}Po$  en tránsito en el interior de un tubo de 50 cm mediante técnicas de Monte-Carlo.

Tabla IV.5. Influencia en la actividad recogida por el filtro de los tubos de difusión debida a la formación de  $^{218}Po$  en tránsito por su interior. El parámetro R se refiere a la contribución de esta actividad respecto a la total recogida por el filtro.

Tabla IV.6. Comparación entre las eficiencias obtenidas de forma analítica por Gardner y Verghese (1971) y la solución numérica por técnicas de Monte-Carlo desarrollada en este trabajo.

Tabla IV.7. Comparación entre las eficiencias de detección que se obtienen mediante la técnica de Monte-Carlo considerando la perturbación del filtro a la salida o considerando que no produce ningún tipo de perturbación para partículas de tamaño de 0.5 nm, 0.67 nm y 0.9 nm, y longitudes de tubo de 10 cm, 30 cm y 50 cm. En las dos últimas columnas se muestra la diferencia en % respecto a una deposición de partículas homogénea en el filtro ( $\epsilon_{\text{homogénea}} = 0.277$ ).

Tabla V.1. Resultado de la intercomparación a un nivel de concentración de radón de  $1500 \text{ Bq m}^{-3}$  con 21 medidas de una hora de duración.

Tabla V.2. Resultado de la intercomparación a un nivel de concentración de radón de  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  con 16 medidas de una hora de duración.

Tabla V.3. Resultado de la intercomparación a un nivel de concentración de radón de 50 Bq m<sup>-3</sup> con 18 medidas de una hora de duración.

Tabla V.4. Ajuste de los coeficientes de la expresión V.11 con los datos de penetración obtenidos con la solución numérica considerando la perturbación del filtro a la salida de los tubos de 10 cm, 30 cm y 50 cm.

Tabla V.5. Ajuste de los coeficientes de la expresión V.11 con los datos de penetración obtenidos con la solución numérica sin considerar la perturbación del filtro a la salida de los tubos de 10 cm, 30 cm y 50 cm.

Tabla V.6. Diámetros de corte al 50 % de los módulos de medida utilizados en este trabajo.

Tabla V.7. Porcentaje considerado en la corrección de la eficiencia de los tubos de difusión por la deposición heterogénea en el filtro. Se tiene en cuenta así mismo la perturbación que produce en el perfil de velocidades el filtro de salida.

Tabla V.8. Corrección de la eficiencia de detección de las unidades de medida como consecuencia de la heterogeneidad de la concentración en el aire y de la heterogeneidad de la deposición superficial de partículas en el filtro.

Tabla V.9. Identificación de los distintos códigos de cálculo para la reconstrucción del espectro dimensional participantes en la intercomparación en el marco del Proyecto Europeo RARAD.

Tabla V.10. Características de la unidades de medida calculadas teóricamente para los ejercicios de intercomparación del 1 al 4. El caudal es de 1.5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Tabla V.11. Características de los módulos de medida calculadas teóricamente en el quinto ejercicio de intercomparación. El caudal es de 1.5 m<sup>3</sup>/h.

Tabla V.12. Características principales de la cámara de radón del INTE.

Tabla VI.1. Media, desviación estándar, media geométrica y desviación geométrica del factor de equilibrio y de la fracción libre para los cuatro recintos del litoral mediterráneo.

Tabla VI.2. Valores de la fracción de penetración para las distintas unidades de medida en la intercomparación realizada en la cámara de radón del INTE con el grupo de la Universidad de Brest.

Tabla VI.3. Resumen de los resultados de la distribución dimensional de la fracción libre obtenidos en la intercomparación utilizando distintos métodos de deconvolución.

Tabla VI.4. resultados obtenidos con los métodos EMAX y Randomwalk con el sistema de medida de la U.Brest.

Tabla VI.5. resultados obtenidos con los métodos EMAX y randomwalk con el sistema de medida desarrollado en este trabajo suponiendo que el filtro de salida no perturba el campo de velocidades.

Tabla VI.6. resultados obtenidos con los métodos EMAX y randomwalk con el sistema de medida desarrollado en este trabajo suponiendo que el filtro de salida perturba el campo de velocidades.

Tabla VI.7. estimación del factor de conversión a dosis efectiva por unidad de exposición a concentración de radón para cuatro recintos de la costa catalana utilizando los modelos dosimétricos del pulmón desarrollados por James y col. 1988 a y la ICRP 66.