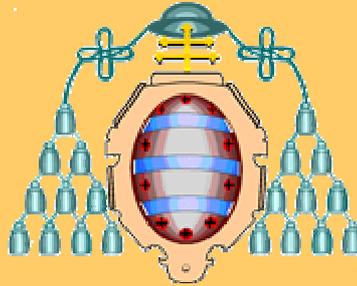
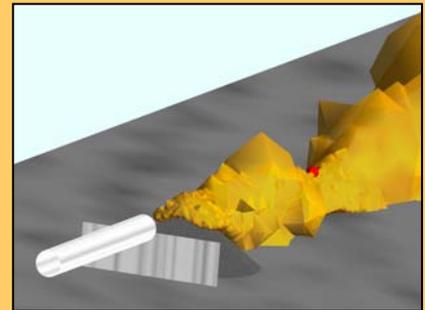


UNIVERSIDAD DE OVIEDO

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS



***EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN
ALMACENAMIENTO DE MINERALES A LA INTEMPERIE***



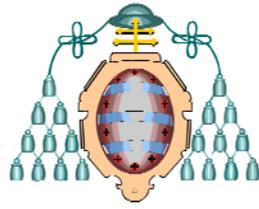
TESIS DOCTORAL

Autora: Susana Torno Lougedo

Director: Javier Toraño Alvarez

Codirector: Isidro Diego Alvarez

Oviedo, Octubre 2008



Reservados todos los derechos
© El autor
Edita: Universidad de Oviedo
Biblioteca Universitaria, 2009
Colección Tesis Doctoral-TDR nº 49
ISBN: 978-84-692-1368-1
D.L.: AS. 05365-2008

INDICES

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR POLVO	1
1.-INTRODUCCIÓN	2
1.1.-PLANTEAMIENTO	4
1.2.-JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	9
2.-LA ATMÓSFERA	20
2.1.-INTRODUCCIÓN	20
2.2.-COMPOSICIÓN DE LA ATMOSFERA	22
2.3.-CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	23
2.3.1.-CONTAMINANTES	23
2.3.2.-UNIDADES	24
2.3.3.-PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN TOTALES (PST)	25
2.3.4.-HUMOS NEGROS (HN)	25
2.3.5.-PARTÍCULAS SEDIMENTABLES	26
2.4.-DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA	26
2.5.-PREVENCIÓN Y CONTROL	28
3.-RIESGOS DEL MATERIAL PULVERULENTO Y MARCO NORMATIVO	30
3.1.-CONCEPTO DE POLVO	30
3.2.-CARACTERÍSTICAS	31
3.3.-TIPOS DE POLVO	31
3.4.-FACTORES QUE FAVORECEN LA PRESENCIA DE POLVO	35
3.5.-PROBLEMAS CAUSADOS POR EL POLVO	35
3.6.-EVALUACIÓN DEL RIESGO PULVÍGENO	37
3.6.1.-INTRODUCCIÓN	37
3.6.2.-LÍMITES LEGALES PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES	40
3.7.-EVALUACIÓN DEL RIESGO PULVÍGENO PARA EL MEDIO AMBIENTE	40
3.7.1.-INTRODUCCIÓN	40
3.7.2.-APARATOS DE MEDIDA	42
3.7.3.-LÍMITES LEGALES RELATIVOS AL MEDIO AMBIENTE	43
4.-ENFERMEDADES PROFESIONALES PRODUCIDAS POR EL POLVO	46
4.1.-INTRODUCCIÓN	46
4.2.-EQUIPOS PRINCIPALES DE EVALUACIÓN DEL POLVO	47
5.-LEGISLACIÓN DE REFERENCIA SOBRE POLVO EN EL AMBIENTE	50
6.-SISTEMAS DE CONTROL DEL POLVO	51
CAPÍTULO 2: CÁLCULOS DE EMISIONES EN PARVAS MEDIANTE LAS FORMULACIONES EPA	53
1.-CÁLCULO DE EMISIONES EN PARVAS. ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA	54

2.-FORMULACIONES INDEPENDIENTES DE LA FORMA DEL APILAMIENTO	54
3.-FORMULACIONES EPA	57
3.1.-INTRODUCCIÓN	57
3.2.-EMISIONES Y PARÁMETROS DE CORRECCIÓN	58
3.3.-PREDICCIÓN DEL FACTOR DE EMISIÓN	60
3.4.-PROCEDIMIENTO DE CAMPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD FRICCIONAL LÍMITE	61
3.5.-PRÁCTICA OPERATIVA	63
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS DE LAS EMISIONES EN PARVAS MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTACIONALES	73
1.-CONCEPTOS GENERALES	74
2.-CFD	75
2.1.-INTRODUCCIÓN	75
2.2.-HISTORIA	75
2.3.-MÉTODOS NUMÉRICOS DESARROLLADOS EN CFD	76
2.4.-APLICACIONES DEL CFD	78
3.-METODOLOGÍA OPERACIONAL	78
4.-ANSYS CFX	86
4.1.-INTRODUCCIÓN	86
4.2.-ESTRUCTURA	87
5.-PRIMERA FASE DE INVESTIGACIÓN. MODELIZACIÓN DEL VIENTO ALREDEDOR DEL OBSTÁCULO	92
5.1.-INTRODUCCIÓN	92
5.2.-EXPLICACIÓN DEL MÉTODO US EPA	94
5.3.-SIMULACIÓN CFD	98
5.4.-FORMULACIÓN MATEMÁTICA	100
6.-GEOMETRIAS DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	103
6.1.-GEOMETRÍA EN FORMA DE CONO	103
6.2.-GEOMETRÍA DE PARVA TRUNCADA	112
6.3.-GEOMETRÍA DE PARVA SEMICIRCULAR O PARVA RIÑÓN	127
6.4.-EJEMPLO DE CASO REAL	133
7.-COMPARACIÓN DE DISEÑOS	137
CAPÍTULO 4: AUTOMATIZACIÓN DE LA EMISIÓN MEDIANTE SOFTWARE (HIEPA v1.0 y CAFM v1.0)	139
1.-INTRODUCCIÓN	140
2.-CÁLCULO APROXIMADO DEL FASTEST MILE: CAFM 1.0	141
2.1.-INTRODUCCIÓN	141
2.2.-OBTENCIÓN DE DATOS	141
2.3.-DESARROLLO	143

2.4.-PROGRAMACIÓN	148
3.-AUTOMATIZACIÓN DE LOS MODELOS DE EMISIONES, HIEPA v1.0	148
3.1.-INTRODUCCIÓN	148
3.2.-DESARROLLO Y PROGRAMACIÓN	149
3.3.-EJEMPLO PARA EL CASO DE LA PILA CÓNICA	152
3.3.1.-DEFINICIÓN GEOMÉTRICA Y MALLADO	152
3.3.2.-SIMULACIÓN	154
3.3.3.- USO DEL PROGRAMA	156
CAPÍTULO 5: EL POLVO EN CFD	161
1.-INYECCIÓN DE POLVO EN ANSYS CFX	162
1.1.-INTRODUCCIÓN	162
1.1.1.-SISTEMA MULTIFASE POLVO-AIRE	163
1.1.2.-ECUACIÓN DE LA TRAYECTORIA	165
1.1.3.-FORMAS DE EMISIÓN	168
1.1.4.-PARTICULARIZACIÓN DE LAS RUTINAS	169
1.2.-METODOLOGÍA	170
2.-ENSAYOS Y SIMULACIONES	175
2.1.-INTRODUCCIÓN	175
2.2.-CAMPAÑA DE MEDIDAS	175
2.3.-ENSAYOS Y SIMULACIONES	181
2.3.1.-INTRODUCCIÓN	181
2.3.2.-MODELIZACIÓN	182
2.3.3.-ANÁLISIS DE MUESTRAS	189
2.3.4.-DATOS DE CONCENTRACIÓN EXPERIMENTAL	191
3.-CALADO DEL MODELO	193
3.1.-INTRODUCCIÓN	193
3.2.-COMPROBACIÓN DE LA SIMULACIÓN	198
3.3.-RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	202
4.-APLICABILIDAD A UN PARQUE DE MINERALES OPERATIVO	211
4.1.-INTRODUCCIÓN	211
4.2.-SIMULACIÓN	215
4.2.1.-GEOMETRÍA Y MALLADO	215
4.2.2.-CFX PRE	216
4.2.3.-CFX SOLVER Y POST	218
4.2.4.-INTRODUCCIÓN DE POLVO	223
4.2.4.1.-ANÁLISIS CON COMPORTAMIENTO INELÁSTICO DE LAS PARTÍCULAS	223
4.2.4.2.-ANÁLISIS CON COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE LAS PARTÍCULAS	225
4.2.5.-CÁLCULO DE LA EMISIÓN	226

CAPÍTULO 6: EMISIÓN DE POLVO EN CFD. PROTECCIÓN MEDIANTE

BARRERAS	229
1.-INTRODUCCIÓN	230
2.-REALIZACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS	233
2.1.-INTRODUCCIÓN	233
2.2.-INSTRUMENTACIÓN	234
2.3.-MEDIDAS DE VELOCIDAD	236
3.-MODELIZACIÓN	238
3.1.-INTRODUCCIÓN	238
3.2.-DEFINICIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO	240
3.3.-CREACIÓN DE LA MALLA	242
3.4.-CÁLCULO (CFX)	244
3.4.1.-PREPARACIÓN DE LA SIMULACIÓN	244
3.4.2.-MODELOS DE TURBULENCIA	245
3.4.3.-CARACTERIZACIÓN FINAL DEL MODELO	246
3.5.-RESOLUCIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS	247
3.5.1.-MODELO A ₁	247
3.5.2.-MODELO A ₂	249
3.5.3.-MODELO B ₁	250
3.5.4.-MODELO B ₂	251
3.5.5.-CONCLUSIONES DE VELOCIDAD	252
4.-ANÁLISIS DE PROTECCIÓN MEDIANTE BARRERAS. MÉTODO POST Ó DE POLVO VIRTUAL	256
4.1.-INTRODUCCIÓN	256
4.2.-SIMULACIONES EN UN PARQUE DE APILAMIENTO REAL	260
4.2.1.-INTRODUCCIÓN	260
4.2.2.-RESULTADOS OBTENIDOS	265
4.2.3.-CONCLUSIONES DEL MÉTODO Post	270
5.-ANÁLISIS DE PROTECCIÓN MEDIANTE BARRERAS. MÉTODO AUTOMÁTICO DE PROGRAMACIÓN MEDIANTE RUTINAS	270
5.1.-INTRODUCCIÓN	270
5.2.-SIMULACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS	272
6.-ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES DE PROTECCIONES. BARRERAS	274
6.1.-CONFIGURACIÓN SÓLIDA PLANA, SÓLIDA CON CURVATURA SUPERIOR Y CON APERTURAS	274
6.2.-BARRERAS DOBLES. CONFIGURACIÓN DE MINIMIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	280
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO	285
BIBLIOGRAFÍA	289
ANEXO I: EJEMPLO DE CAMPAÑAS DE MEDIDAS EN CAMPO	297
1.-INTRODUCCIÓN	298

2.-INSTRUMENTACIÓN	302
3.-ENSAYOS	311
ANEXO II: ESTUDIOS GRANULOMÉTRICOS, MICROSCÓPICOS Y DE DENSIDAD	
EN EL INCAR (CSIC)	351
1.-MUESTRAS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COULTER	352
1.1.-MUESTRAS DE TODO UNO	352
1.1.1.-"TODO UNO" DE CALIZA	352
1.1.2.-"TODO UNO" DE CEMENTO	352
1.1.3.-"TODO UNO" DE CARBÓN	353
1.2.-MATERIAL A DISTINTAS DISTANCIAS	354
1.2.1.-CALIZA	354
1.2.1.1.-CAMPAÑA DE MEDIDAS I	354
1.2.1.2.-CAMPAÑA DE MEDIDAS II	355
1.2.2.-CEMENTO	356
1.3.-CURVA GRANULOMÉTRICA DE LOS TRES MATERIALES	359
2.-DENSIDADES	359
3.-ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE LAS MUESTRAS	359
3.1.-CARBÓN	359
3.2.-CALIZA	364
ANEXO III: BARRERAS POROSAS. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS	369
1.-INTRODUCCIÓN	370
2.-MODELIZACIÓN DE LAS BARRERAS POROSAS	373
2.1.-MODELO MATEMÁTICO	373
2.2.-MODELO FÍSICO	375
3.-CAMPAÑA DE MEDIDAS Y AJUSTES DE LOS MODELOS	379
3.1.-EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN	379
3.2.-MEDIDAS DE VELOCIDAD Y DE POLVO	381

INDICE DE FIGURAS MEMORIA

Figura 1: Voladura en cantera	6
Figura 2: Apilamiento en parque a intemperie mediante apiladora-recogedora	6
Figura 3: Cinta transportadora en parque cubierto de almacenamiento	7
Figura 4: Carga con cinta de roca industrial	7
Figura 5: Apilamiento con mototrailla y mediante camiones	7
Figura 6: Carga y descarga mediante cuchara	8
Figura 7: Cucharas de áridos y mineral de hierro	8
Figura 8: Apilamiento-carga mediante auger	8
Figura 9: Evolución del consumo de áridos de construcción en Mt	11
Figura 10: Desglose del consumo de áridos por porcentajes	11
Figura 11: Formación de polvo en trituración de caliza en cantera de fábrica de cemento	12
Figura 12: Apiladora-recogedora de rodete en Central Térmica	13
Figura 13: Formación de parva mediante apiladora en Central Térmica	13
Figura 14: Apiladora de brazo en una terminal portuaria del norte de España	14
Figura 15: Movimientos anuales marítimos de carbón y de hierro (fuente: B. S. A.)	14
Figura 16: Total movimientos en Mt de materiales granulares en sistemas portuarios	15
Figura 17: Movimientos en Mt de carbón y coque de petróleo en sistemas portuarios	15
Figura 18: Movimientos en Mt de cemento y clinker en sistemas portuarios	16
Figura 19: Movimientos en Mt de fosfatos en sistemas portuarios	16
Figura 20: Movimientos en Mt de mineral de hierro en sistemas portuarios	17
Figura 21: Movimientos en Mt de potasa en sistemas portuarios	17
Figura 22: Carga continua con dique interior marino sobre barco	18
Figura 23: Carga continua de mineral de hierro sobre barco	18
Figura 24: Descarga continua mediante cangilón de material de sílice en barco	19
Figura 25: Descarga discontinua mediante cuchara en puerto interior de Central Térmica	19
Figura 26: Partes de la atmósfera terrestre	20
Figura 27: Rango de tamaños de las partículas transportadas en el aire	32
Figura 28: Polvo inhalable y respirable	32
Figura 29: Concentración de polvo y contenido en sílice por tipo de sustancia	34
Figura 30: Movimiento de las partículas de polvo sobre el suelo	36
Figura 31: Influencia de una pantalla sobre el viento	36
Figura 32: Fracción de polvo respirable según la ITC	38
Figura 33: Aparatos de muestreo personales	39
Figura 34: Esquema de un aparato de toma de muestras personal	39

Figura 35: Valor límite de la concentración de polvo en función del contenido en sílice	40
Figura 36: Captador LVS PM10	42
Figura 37: Captador HVS PM10	43
Figura 38: Colector de materia sedimentable	48
Figura 39: Perfil de exposición	50
Figura 40: Sistema de muestreo por globos	50
Figura 41: Vehículo de riego	52
Figura 42: Perfil logarítmico del viento	59
Figura 43: Contornos superficiales de velocidades de viento: u_s/u_r	65
Figura 44: Régimen correspondiente de la velocidad del viento	69
Figura 45: Ejemplo de millas rápidas de viento para periodos determinados	70
Figura 46: Metodología del CFD	78
Figura 47: Imagen de la pantalla principal del SolidWorks	80
Figura 48: Sistemas reticulares: izquierda estructurado y derecha no estructurado	81
Figura 49: Tetras y prismas	82
Figura 50: Imágenes del Icem con tres mallados: tetras, hexas e híbrido tetras+prismas	83
Figura 51: Imagen de la pantalla principal del IcemCFD	84
Figura 52: Calidad de tetras	84
Figura 53: Organigrama de los módulos constituyentes del CFX	87
Figura 54: CFX-Pre para un túnel de viento con un coche como obstáculo	88
Figura 55: Imágenes del Solver	90
Figura 56: Imágenes del CFX-Post	91
Figura 57: Estudios con termistores de la distribución de flujo alrededor de obstáculos	92
Figura 58: Apilamiento mediante pila semicircular y dos pilas cónicas	95
Figura 59: Apiladoras cónicas	95
Figura 60: Apiladora de parva tipo riñón	96
Figura 61: Residuos para perfil logarítmico (izquierda)	99
Figura 62: W-Max residuals=1E-04 (derecha)	100
Figura 63: Apiladora de carbón	103
Figura 64: Parvas tipo cónicas	104
Figura 65: Modelo de la pila cónica	104
Figura 66: Corte de la malla	105
Figura 67: Superficie de revolución sobre la superficie del cono	105
Figura 68: Viento perpendicular a la parva	106
Figura 69: Gráfico de la EPA	107
Figura 70: Gráfico de Stunder y Arya	107
Figura 71: Viento logarítmico, $k-\varepsilon$ sin rugosidad	107
Figura 72: Viento logarítmico, $k-\varepsilon$ con rugosidad 0.5 para el cono y 0 para el suelo	108

Figura 73: Viento logarítmico, turbulencia SST	108
Figura 74: Viento plano, k-ε con rugosidad 0.5 para la pila y 0 para el cono	108
Figura 75: Viento plano, k-ε con rugosidad 0 para la pila y 0 para el cono	109
Figura 76: Viento plano, Modelo de turbulencia SST	109
Figura 77: Residuos RMS para cono	110
Figura 78: Resultados del cálculo en el caso del cono	111
Figura 79: Parvas truncadas	112
Figura 80: Transferencia de material	112
Figura 81: Apiladoras-recogedoras	112
Figura 82: Detalle de la apiladora	112
Figura 83: Modelo de la parva truncada	113
Figura 84: Corte del mallado utilizado en caso de la parva truncada	114
Figura 85: Corte del mallado utilizado en caso de la parva truncada	115
Figura 86: Estructura de la superficie de control de la parva truncada	115
Figura 87: Variable 1 en la superficie de la parva a 25 cm (rumbo 0°, 20° y 40°)	116
Figura 88: Resultados del cálculo para la parva truncada tipo B1	117
Figura 89: Gráfico de la EPA	118
Figura 90: Figura de Stunder y Arya	118
Figura 91: K-ε con rugosidad y perfil pseudologarítmico del viento	119
Figura 92: K-ε con rugosidad y perfil logarítmico del viento	119
Figura 93: K-ε con rugosidad y perfil plano del viento	119
Figura 94: Turbulencia SST y perfil plano del viento	120
Figura 95: K-ε sin rugosidad y perfil plano del viento	120
Figura 96: Gráfico de la EPA	121
Figura 97: Velocidad según componente X	122
Figura 98: Velocidad según componente Z	122
Figura 99: Velocidad según su módulo	122
Figura 100: Gráfico de la EPA	123
Figura 101: Velocidad según componente X	123
Figura 102: Velocidad según componente Z	124
Figura 103: Velocidad según su módulo	124
Figura 104: Errores RMS para viento a 20°	125
Figura 105: Errores RMS para viento a 40°	125
Figura 106: Comparación de las subáreas para USEPA y CFD (rumbo 0°, 20° y 40°)	126
Figura 107: Descargadora continua de barcos	127
Figura 108: Brazo apilador	127
Figura 109: Formación de parva riñón	128
Figura 110: Modelo de la parva riñón	129
Figura 111: Mallado alrededor de la pila riñón	129

Figura 112: Entrada de viento a 0°	130
Figura 113: Entrada de viento a 45°	130
Figura 114: Entrada de viento a 90°	130
Figura 115: Entrada de viento a 135°	131
Figura 116: Entrada de viento a 180°	131
Figura 117: Líneas de la corriente y concentración de vectores del flujo para el viento de 180°	132
Figura 118: Localización de una estación meteorológica	142
Figura 119: Datos disponibles para viento en el año 2007 en la estación IASTURIAS3	143
Figura 120: Correlación lineal entre Velocidad media diaria y la velocidad de racha	144
Figura 121: Correlación G vs. U	145
Figura 122: Representación gráfica del Gust Factor	146
Figura 123: Representación para los pares U-G	146
Figura 124: Valor de la racha de viento para cada valor de la probabilidad (60-90%)	147
Figura 125: Ecuaciones de ajuste entre G y U	147
Figura 126: Resultados de las ecuaciones de ajuste	148
Figura 127: Valores de la Fastest Mile	148
Figura 128: Superficie de valores de flujo de viento – cono	150
Figura 129: Superficie de valores de flujo de viento – riñón	150
Figura 130: Zonas de emisiones activas – frontend de HIEPA para el cono	151
Figura 131: Zonas de emisiones activas – frontend de HIEPA para el riñón	152
Figura 132: Modelo de la pila cónica	153
Figura 133: Mallado de la pila cónica	154
Figura 134: Distribución de us/ur (Variable 1)	155
Figura 135: Pantalla “cono”	158
Figura 136: Emisiones en parva riñón a 10,12 y 15 m/s	159
Figura 137: Rutinas de inyección	171
Figura 138: Emisión por zonas en el cono	172
Figura 139: Emisión por zonas en la parva troncada	172
Figura 140: Emisión por zonas en la parva riñón	173
Figura 141: Concentración de polvo (mg/m ³ , arriba) y velocidad de aire (m/s, debajo)	174
Figura 142: Emisión automatizada en parva riñón	174
Figura 143: Concentración de polvo tras parva riñón	175
Figura 144: Apilamiento cónico de áridos	176
Figura 145: Apilamientos cónicos de áridos con granulometrías diferentes	176
Figura 146: Apilamiento cónico de caliza en fábrica de cemento	177
Figura 147: Vista general de las instalaciones	177
Figura 148: Disposición de elementos	178
Figura 149: Instalación del ventilador, manga y cono utilizado en los ensayos	178

Figura 150: Captadores de polvo y trayectoria simulada de una partícula de polvo	179
Figura 151: Anemómetro de hilo caliente	179
Figura 152: Medidor TDR	180
Figura 153: Instalación de estación meteorológica y captadores de polvo	180
Figura 154: Pila cónica de carbón sobre el cono metálico	181
Figura 155: Disposición de material e instrumental	182
Figura 156: Geometría del modelo	183
Figura 157: Volumen de mallado	183
Figura 158: Mallado de prismas sobre la pila cónica	184
Figura 159: Tomas de medidas de la velocidad de viento	184
Figura 160: Croquis de caracterización de viento	185
Figura 161: Comparativa de velocidad teórico-experimental	185
Figura 162: Croquis de medida de velocidad de viento	186
Figura 163: Comparativa de velocidad teórico-experimental	187
Figura 164: Comparativa de velocidad teórico-experimental a 0.5 m de altura	187
Figura 165: Comparativa de velocidad teórico-experimental a 1 m de altura	188
Figura 166: Comparativa final resultante de velocidad teórico-experimental	188
Figura 167: Microfotografías con dos tipos de carbón	189
Figura 168: Partícula de carbón de alto rango y bajo rango	190
Figura 169: Curva granulométrica de carbón	191
Figura 170: Concentración partículas totales y para partículas inferiores a 10 micras	192
Figura 171: Concentración partículas 10 micras	192
Figura 172: Implementación en Fortran de la fórmula de emisión	193
Figura 173: Curva PNR	194
Figura 174: División de la pila cónica en Faces	195
Figura 175: Ejemplos de las trayectorias asociadas a Faces	196
Figura 176: Gráfica concentración-tiempo	196
Figura 177: Trayectoria atravesando volumen de malla	197
Figura 178: Medidas experimentales para PM10	199
Figura 179: Báscula electrónica	200
Figura 180: Masa inyectada de partículas de 10 micras	201
Figura 181: Concentración en un plano longitudinal	201
Figura 182: Flujo alrededor del obstáculo	203
Figura 183: Contornos de velocidades sobre la parva	204
Figura 184: Nube de ultrafino de concentración 100 mg/m ³	205
Figura 185: Concentración en plano a 6m y 10 m de la pila respectivamente	205
Figura 186: Nube de polvo	206
Figura 187: Valores de concentración de la nube de polvo	206
Figura 188: Concentración a 5 cm del suelo	207

Figura 189: Concentración a 25 cm del suelo	207
Figura 190: Concentración a 50 cm del suelo	208
Figura 191: Nube de polvo	208
Figura 192: Líneas de flujo y trayectoria de partículas	209
Figura 193: Disposición del captador	210
Figura 194: Concentración a distintas alturas respecto el suelo	210
Figura 195: Localización del Puerto de Koper, Eslovenia	212
Figura 196: Esquema del Puerto de Koper	213
Figura 197: Foto satélite de Terminal	213
Figura 198: Terminal de graneles sólidos de Koper	214
Figura 199: Terminal de graneles sólidos de Koper	214
Figura 200: Modelo Solidworks de las pilas principales	215
Figura 201: Modelo Solidworks de una de las pilas	215
Figura 202: Plano representativo del mallado	216
Figura 203: Detalle del mallado de prismas sobre la parva	217
Figura 204: Definición del dominio	217
Figura 205: Plano a 0.1 m de altura	219
Figura 206: Plano a 1 m de altura	219
Figura 207: Plano a 3 m de altura	219
Figura 208: Plano a 5 m de altura	220
Figura 209: Plano a 7 m de altura	220
Figura 210: Plano a 10 m de altura	220
Figura 211: Plano transversal de velocidades	221
Figura 212: Detalle de la zona de “sombra” de velocidades entre parvas	222
Figura 213: Distribución de las velocidades del viento en su acción sobre dos parvas	222
Figura 214: Evolución del polvo según la distancia a la parva	223
Figura 215: Efecto 3D del viento sobre las partículas	224
Figura 216: Detalle en planta de la figura anterior	224
Figura 217: Evolución del polvo según la distancia a la parva	225
Figura 218: Efecto 3D del viento sobre las partículas	226
Figura 219: Detalle en planta de la figura anterior	226
Figura 220: Zonas de emisión para viento=12m/s y Thresold Friction Veloc=1m/s	227
Figura 221: Zonas de emisión para viento=15m/s y Thresold Friction Veloc=0.5m/s	228
Figura 222: Zonas de emisión para viento=15m/s y Thresold Friction Veloc=1m/s	228
Figura 223: Zonas de emisión para viento=15m/s y Thresold Friction Veloc=1.5m/s	228
Figura 224: Apilamiento cubierto de mineral (apiladora de brazo, recogedora de rastrillo)	231
Figura 225: Idem a la anterior con recogedora de brazo de cangilones	231
Figura 226: Almacenamiento de minerales en estructuras tipo “domo”	232

Figura 227: Minimización del polvo por creación de “costra” mediante riego por aspersión_____	232
Figura 228: Pantallas artificiales en apilamiento portuario a la intemperie_____	233
Figura 229: Cono, barrera y ventilador_____	235
Figura 230: Colocación del material particulado_____	235
Figura 231: Estación meteorológica_____	236
Figura 232: Medidas con anemómetro de hilo caliente_____	236
Figura 233: Medida de velocidad por detrás de la barrera_____	237
Figura 234: Medida de velocidad a la salida del tubo_____	238
Figura 235: Distribución para el modelo A ₂ _____	239
Figura 236: Distribución para el modelo B ₂ _____	239
Figura 237: Distribución para el modelo A ₁ y B ₁ _____	240
Figura 238: Distribución para el modelo A ₁ _____	241
Figura 239: Modelo A ₁ creado en SolidWorks_____	241
Figura 240: Distribución para el modelo B ₁ _____	242
Figura 241: Modelo B ₁ en creado en SolidWorks_____	242
Figura 242: Dimensiones de la barrera del modelo A_____	243
Figura 243: Mallado del modelo A_____	243
Figura 244: Mallado del modelo B_____	244
Figura 245: Valores CFD contra Experimentales_____	246
Figura 246: Modelo A, caracterizado en el CFX-Pre_____	246
Figura 247: Totalidad de puntos de medidas para los 4 modelos_____	247
Figura 248: Medida de velocidad entre el cono y la manga_____	248
Figura 249: Distribución de los puntos de medida en el modelo A ₁ _____	248
Figura 250: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo A ₁ _____	249
Figura 251: Distribución de los puntos alrededor de la barrera para el modelo A ₂ _____	249
Figura 252: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo A ₂ _____	250
Figura 253: Distribución de los puntos alrededor de la barrera para el modelo B ₁ _____	250
Figura 254: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo B ₁ _____	251
Figura 255: Distribución de los puntos para el modelo B ₂ _____	252
Figura 256: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo B ₂ _____	252
Figura 257: Contour de velocidad para el modelo A y B con barrera_____	253
Figura 258: Contour de velocidad para el modelo A y B sin barrera_____	254
Figura 259: Gráfico para la medida de velocidad sobre la parva para los modelos A y B_____	254
Figura 260: Líneas de velocidad para el modelo A y B_____	255
Figura 261: Superficie de revolución y faces_____	256
Figura 262: Ensayo con carbón ultrafino_____	257
Figura 263: Comparación resultados reales con los de las modelizaciones_____	258

Figura 264: Comparación de resultados reales con los de las modelizaciones_____	258
Figura 265: Zonas de emisión o no emisión para simulaciones: a) sin barrera y b) con barrera_____	259
Figura 266: Apilamientos de diversas formas minerales sin barreras_____	260
Figura 267: Apilamientos con apiladoras de rodetes y con barreras_____	261
Figura 268: Apilamientos cerrados en parque de central térmica_____	261
Figura 269: Apilamientos en puerto directamente con máquina y con barreras_____	262
Figura 270: Geometría del modelo_____	262
Figura 271: Mallado tridimensional_____	263
Figura 272: Perfil logarítmico del viento_____	264
Figura 273: Efecto del viento sobre la barrera y la parva_____	265
Figura 274: Emisión en gramos según las barreras_____	265
Figura 275: Velocidad simulación sin barrera_____	267
Figura 276: Velocidad simulación barrera 1_____	268
Figura 277: Velocidad simulación barrera 3_____	269
Figura 278: Velocidad simulación barrera 6_____	269
Figura 279: Curva granulométrica del ensayo con barrera_____	270
Figura 280: Implementación en Fortran de la fórmula de emisión_____	271
Figura 281: Medidas experimentales para PM10_____	272
Figura 282: Ejemplo de evolución del polvo en simulación sin barrera_____	273
Figura 283: Ejemplo de evolución del polvo en simulación con barrera_____	274
Figura 284: Ejemplo de evolución del polvo en barrera plana sólida_____	276
Figura 285: Ejemplo de evolución del polvo en barrera sólida con curvatura superior____	276
Figura 286: Ejemplo de evolución del polvo en barrera sólida plana y apertura inferior de 1 m_____	277
Figura 287: Ejemplo de evolución del polvo en barrera sólida plana y apertura inferior de 2 m_____	277
Figura 288: Ejemplo de evolución del polvo en barrera sólida curva y apertura inferior de 1 m_____	278
Figura 289: Ejemplo de evolución del polvo en barrera sólida curva y apertura inferior de 2 m_____	278
Figura 290: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de menor emisión_____	279
Figura 291: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de mayor emisión_____	279
Figura 292: Ejemplo de evolución del polvo en parva entre dos barreras planas sólidas_____	281
Figura 293: Evolución del polvo en parva entre dos barrera sólida con curvatura superior_____	281

Figura 294: Evolución del polvo entre dos barreras sólidas planas con apertura inferior de 1 m	282
Figura 295: Evolución del polvo entre dos barreras sólidas planas y apertura inferior de 2 m	282
Figura 296: Evolución del polvo en barrera sólida curva y apertura inferior de 1 m	283
Figura 297: Evolución del polvo entre barreras sólidas curvas con apertura inferior de 2 m	283
Figura 298: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de menor emisión	284
Figura 299: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de mayor emisión	284
Figura 300: Configuración doble de barreras en un sistema portuario	285

INDICE DE TABLAS MEMORIA

Tabla 1: Clasificación del polvo en función de su tamaño	33
Tabla 2: Valores límite inmisión de partículas en suspensión vigentes hasta 01/02/05	43
Tabla 3: Valores límites para partículas PM-10 según R.D. 1073/2002	44
Tabla 4: Fases y objetivos	45
Tabla 5: Clasificación médica y legal de la silicosis	47
Tabla 6: Casos de neumoconiosis diagnosticados en España	48
Tabla 7: Factor multiplicador de tamaños	60
Tabla 8: Procedimiento de campo para determinar la velocidad friccional límite	62
Tabla 9: Velocidades friccionales límite	63
Tabla 10: Distribución por zonas del ratio u_s/u_r	64
Tabla 11: Ejemplo 1, cálculo de velocidades friccionales	71
Tabla 12: Ejemplo 1, cálculo de emisiones PM10	71
Tabla 13: Valores RMSE para las distintas simulaciones (Cono)	111
Tabla 14: Comparación de las subáreas de USEPA y CFD – Cono	112
Tabla 15: Valores RMSE, (Parva truncada, B1)	117
Tabla 16: Variable 1 a 25 cm. Comparación entre la Pila Semicircular y la Cónica	134
Tabla 17: Valor global de la fricción para la pila semicircular	134
Tabla 18: Cálculo de las emisiones PM-30 por perturbación	136
Tabla 19: Cálculo de las emisiones PM-30	137
Tabla 20: Comparación EPA vs CFX	155
Tabla 21: Porcentajes de los tamaños de la muestra de carbón	201
Tabla 22: Emisiones en parvas de Koper	227
Tabla 23: Medida de velocidad a la salida del tubo	238
Tabla 24: Emisión en gramos según las barreras	266
Tabla 25: Concentraciones y cotas de medición reales y simuladas mediante CFD	273
Tabla 26: Emisiones de polvo para distintas configuraciones de barreras	275
Tabla 27: Emisiones de polvo para distintas configuraciones de barreras dobles	280

INDICE DE FIGURAS ANEXO I

Figura 1: Pala limpiando el suelo de trabajo	288
Figura 2: Construcción de la parva	359
Figura 3: Montaje del ventilador y la tubería de ventilación	300
Figura 4: Caída del material del filtro	301
Figura 5: a) Anemómetro de hilo caliente, b) Anemómetro de “veleta”	302
Figura 6: a) Captadores de polvo, el de la derecha mide PM-10. b) Multímetro	303
Figura 7: Medidor TDR-100	303
Figura 8: Distintos tamices	304
Figura 9: Ventilador, manga enganchada a tres soportes a lo largo de su recorrido	304
Figura 10: Dimensiones de la parva	305
Figura 11: Un momento del tamizado	306
Figura 12: Criba de 4 mm	306
Figura 13: Criba de 0.5 mm	306
Figura 14: Criba de 2 mm	307
Figura 15: Criba de 0.25 mm	307
Figura 15: Criba de 1 mm	307
Figura 16: Menor de 0.25 mm	307
Figura 17: Resultado del tamizado	307
Figura 18: Instalación de captadores	308
Figura 19: Ubicación de tubería soplante y apilamientos cónicos	308
Figura 20: Instalación completa de los equipos para ensayo de caliza	309
Figura 21: Apilamiento cónico de caliza	309
Figura 22: Ensayos con caliza	310
Figura 23: Ensayo cemento 1. Croquis	311
Figura 24: Ensayo cemento 1. Detalles	311
Figura 25: Ensayo cemento 1. Resultado captadores	312
Figura 26: Ensayo cemento 2. Croquis	312
Figura 27: Ensayo cemento 2. Detalles	313
Figura 28: Ensayo cemento 2. Resultado captadores	314
Figura 29: Ensayo caliza 1. Croquis	314
Figura 30: Ensayo caliza 1. Detalles	314
Figura 31: Ensayo caliza 1. Resultado captadores	316
Figura 32: Ensayo caliza 2. Croquis	316
Figura 33: Ensayo caliza 2. Detalles	316
Figura 34: Ensayo caliza 2. Resultado captadores	317
Figura 35: Ensayo carbón 1. Croquis	318

Figura 36: Ensayo carbón 1. Detalles	318
Figura 37: Ensayo carbón 1. Recogida de muestras	319
Figura 38: Ensayo carbón 1. Resultado captadores	319
Figura 39: Ensayo carbón 2. Croquis	320
Figura 40: Ensayo carbón 2. Detalles	320
Figura 41: Ensayo carbón 2. Resultado captadores	321
Figura 42: Ensayo carbón 3. Croquis	321
Figura 43: Ensayo carbón 3. Detalles	322
Figura 44: Ensayo carbón 3. Resultado captadores	322
Figura 45: Ensayo carbón 4. Croquis	323
Figura 46: Ensayo carbón 4. Detalles	323
Figura 47: Ensayo carbón 4. Resultado captadores	324
Figura 48: Ensayo viento 1. Croquis	324
Figura 49: Ensayo viento 2. Croquis	325
Figura 50: Croquis de puntos de medida 2	326
Figura 51: Ensayo barrera sólida. Croquis	327
Figura 52: Ensayo viento 1. Puntos caracterización aire	328
Figura 53: Croquis de puntos de medida 3	328
Figura 54: Ensayo barrera sólida y polvo 1. Croquis	330
Figura 55: Ensayo barrera sólida y polvo 1. Detalles	330
Figura 56: Croquis de puntos de medida viento y polvo	331
Figura 57: Croquis de ensayo de polvo y viento	332
Figura 58: Ensayo de polvo y viento 1. Resultado captadores	333
Figura 59: Ensayo carbón 5. Croquis	334
Figura 60: Ensayo carbón 5. Detalles	334
Figura 61: Croquis de medidas de viento. Ensayo 5	335
Figura 62: Ensayo carbón 5. Croquis de viento	337
Figura 63: Ensayo carbón 5. Resultado captadores	337
Figura 64: Ensayo barrera porosa y polvo. Croquis a) y ensayo b)	338
Figura 65: Croquis de puntos de medida viento y polvo	339
Figura 66: Croquis de ensayo de polvo y viento	341
Figura 67: Ensayo de polvo y viento. Resultado captadores	341
Figura 68: Ensayo de polvo y viento. Resultado captadores. Repetición	342
Figura 69: Ensayo barrera sólida y polvo 2. Croquis	342
Figura 70: Ensayo barrera sólida y polvo 2. Detalles	343
Figura 71: Ensayo de polvo y viento 2. Resultado captadores	343
Figura 72: Ensayo barrera porosa y polvo 3. a) croquis b) ensayo	344
Figura 73: Ensayo de polvo y viento 3. Resultado captadores	345
Figura 74: Croquis de los puntos de medida de la velocidad de viento	345

Figura 75: Medidas de velocidad de viento en barrera porosa_____	346
Figura 76: Croquis ensayo barrera sólida_____	346
Figura 77: Detalles de ensayo barrera sólida_____	347
Figura 78: Croquis de los puntos de medida de velocidades de viento_____	347
Figura 79: Repetición ensayo anterior con caliza_____	348
Figura 80: Datos de los captadores de las medidas de concentración de polvo de caliza (I)_____	348
Figura 81: Detalles de toma de muestras en barrera_____	349
Figura 82: Datos de los captadores de las medidas de concentración de polvo de caliza (II)_____	349
Figura 83: Croquis de ensayo de polvo y viento con barrera mojada_____	350

INDICE DE TABLAS ANEXO I

Tabla 1: Relación de las distintas medidas realizadas en la parva	305
Tabla 2: Datos de viento 1	325
Tabla 3: Datos de viento 2	327
Tabla 4: Datos de viento 3	330
Tabla 5: Resultados de viento en ensayo polvo y viento	332
Tabla 6: Resultados de viento ensayo 5	337
Tabla 7: Resultados de viento en ensayo polvo y viento	340

INDICE DE FIGURAS ANEXO II

Figura 1: Curva granulométrica de caliza “todo uno”	352
Figura 2: Curva granulométrica del cemento “todo uno”	352
Figura 3: Curva granulométrica del carbón “todo uno”	353
Figura 4: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras con los valores reales	354
Figura 5: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras, con los valores retocados	355
Figura 6: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras con los valores reales	356
Figura 7: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras, con los valores retocados	356
Figura 8: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras con los valores reales	357
Figura 9: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras, con los valores retocados	357
Figura 10: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras con los valores reales	358
Figura 11: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras, con los valores retocados	358
Figura 12: Gráfico donde aparecen las curvas granulométricas de los tres materiales, caliza, cemento y carbón	359
Figura 13: Partícula de vitrinita (V) afectada térmicamente	360
Figura 14: Partículas carbonosas de diferente tamaño	361
Figura 15: Partícula carbonosa del carbón de bajo rango (flecha)	361
Figura 16: Partícula carbonosa del carbón de alto rango conteniendo pirita (P)	362
Figura 17: Partículas de los dos carbones de diferente rango	362
Figura 18: Ídem anterior	363
Figura 19: Partícula carbonosa constituida por vitrinita e inertinita (I)	363
Figura 20: Caliza	364
Figura 21: Caliza	365
Figura 22: Caliza	365
Figura 23: Caliza	366
Figura 24: Partícula carbonosa perteneciente a un carbón de medio-alto rango	366
Figura 25: Partícula carbonosa con nicoles cruzados y con una placa de retardo de 1λ	367
Figura 26: Caliza	367

Figura 27: Caliza	368
Figura 28: Caliza	368

INDICE DE TABLAS ANEXO II

Tabla 1: Datos de densidad proporcionados por el INCAR_____359

INDICE DE FIGURAS ANEXO III

Figura 1: Vórtice de alta velocidad y zona de baja velocidad para la barrera de menor emisión_____	370
Figura 2: Reducción del vórtice por la apertura inferior de 2 m_____	371
Figura 3: Barrera porosa en una planta de tratamiento de carbón_____	372
Figura 4: Mallado del modelo en 3D_____	376
Figura 5: Croquis de la configuración del ensayo con barrera porosa_____	379
Figura 6: Configuración de los equipos con barrera porosa_____	380
Figura 7: Equipos de medida y recogida de muestras_____	380
Figura 8: Puntos de medida de velocidad de viento_____	381
Figura 9: Comparación datos de velocidad de viento: Campo-CFX_____	382

INDICE DE TABLAS ANEXO III

Tabla 1: Relación entre C_{R2} y la porosidad _____ 378

CAPÍTULO 1: CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR POLVO

1.-INTRODUCCIÓN

En esta introducción se describe brevemente cómo se ha desarrollado la modelización que predice las emisiones de polvo en apilamientos de materiales granulares (minerales) a la intemperie.

El trabajo se enmarca dentro de una amplia y activa línea de investigación sobre emisiones de material particulado en diversas prácticas operativas industriales financiada en convocatoria pública (Convocatoria del Plan General I+D del Ministerio de Educación y Ciencia 2006-2007-2008) mediante el proyecto CTM2005-00187/TECNO, “MODELOS DE PREDICCIÓN Y SISTEMAS DE PREVENCIÓN EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA INDUSTRIAL POR PARTÍCULAS” cuyo investigador principal es el Catedrático Javier Toraño Álvarez director del Grupo de Investigación de Ingeniería Minera y de Obra Civil de la Universidad de Oviedo .

El presente Proyecto de Investigación se puede dividir en varias fases diferenciadas, que darán lugar a los distintos Capítulos que engloban la Tesis, la cual se concluirá con un capítulo final de Conclusiones y Perspectivas de Futuro.

Se comenzará con una introducción sobre los conceptos básicos relativos a la atmósfera (medio de propagación) y sobre la naturaleza y características del polvo en suspensión, para posteriormente pasar a las siguientes fases y secuenciación en que se pueden dividir la investigación, estableciéndose los siguientes bloques:

- Mostraremos la metodología de cálculo basada en formulaciones matemáticas de diverso tipo, incluidas de forma fundamental, las de la EPA.
- Procederemos al análisis de las distribuciones de viento producidas en los apilamientos de minerales a la intemperie según la metodología de la EPA, 1998 [1] y de Stunder and Arya, 1988 [2], y a los cálculos de la emisión de polvo mediante las formulaciones matemáticas EPA.

- En una segunda fase los cálculos de la emisión de polvo mediante las formulaciones matemáticas EPA se realizará en base a unas distribuciones de viento sobre los apilamientos obtenidos mediante CFD (Computacional Fluid Dynamic) basándonos en los resultados en túneles de viento obtenidos por la EPA y Stunder. Dichos resultados han sido publicados por nuestro Grupo de Investigación (Diego et al., 2006 [3] y Toraño et al., 2007 [4]).
- Los resultados anteriores obtenidos mediante modelos numéricos computacionales en CFD se automatizarán y harán asequibles a los técnicos y empresas mediante implementación de programas realizados por nuestro grupo de investigación. Dichos programas han sido objeto de patentes (Diego et al., 2007 [5]) y de las correspondientes publicaciones en el IX Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (Diego et al., 2007 [6]).
- Posterior se procederá al estudio multifase de comportamiento de las dos fases, viento y polvo. Los resultados han sido publicados asimismo por nuestro grupo de investigación en dos prestigiosas revistas (Diego et al., 2008 [7] y Diego et al., 2008 [8]).
- De los posibles sistemas de minimización del impacto ambiental minero producido por el polvo, hemos elegido el sistema de barreras artificiales efectuando una modelización “virtual” del polvo (Método Post). En este caso se estudia el efecto de las barreras en la distribución del viento y por tanto en la emisión de polvo. Los resultados también han sido publicados por nosotros en el Congreso Advances in Fluid Mechanics (Diego et al., 2008 [9]) y en dos prestigiosas revistas (Diego et al., 2008 [10] y Torno et al., 2008 [11]).
- Los cálculos anteriores de los efectos de las barreras sobre la emisión de polvo se realizarán nuevamente mediante modelizaciones multifase donde tendremos las dos fases, viento y polvo ([12]).

-Analizaremos el efecto sobre el comportamiento del viento, distribuciones de las velocidades del viento y efectos del vortex, sobre las barreras porosas.

-Finalizaremos con las consecuentes conclusiones y perspectivas de futuro de la investigación.

1.1.-PLANTEAMIENTO

Como hemos comentado el presente proyecto de Investigación “CTM2005-00187/TECNO” pretende el estudio del comportamiento de las emisiones de polvo generadas en determinadas aplicaciones industriales para lograr la modelización del fenómeno de la puesta en suspensión de las partículas sólidas y su propagación, evaluando las variables que en ello interfieren y recomendando las líneas de actuación para minimizar la contaminación producida.

Se trata pues de una investigación orientada a la definición de metodologías, modelos y herramientas con el fin de evaluar, simular y monitorizar las características de las nubes de polvo.

La metodología a desarrollar la podemos resumir en tres fases: determinación y análisis de los factores de emisión de polvo a la atmósfera, simulación de la evolución de la contaminación por polvo en suspensión en la atmósfera y su sensibilidad frente a variables meteorológicas y operacionales, y simulación de la evolución de la contaminación atmosférica y su sensibilidad frente a variables de diseño de los equipos empleados.

Para ello se utilizarán adecuadamente las siguientes herramientas: elementos finitos (MEF), códigos numéricos (CFD), elementos Discretos (PFC), modelos de lógica borrosa (Fuzzy Logic) y representación mediante realidad virtual (creación de entornos tridimensionales interactivos). Se realizarán asimismo campañas de captación de polvo, medidas de variables meteorológicas y caracterización del material a estudiar mediante microscopía electrónica, todo ello con objeto de ajustar los modelos elaborados.

En general la contaminación atmosférica suele ser estudiada sobre el análisis de amplios entornos geográficos y teniendo en cuenta la contaminación producida por muy diversas fuentes.

Además de dichos análisis sobre amplios entornos, tiene una muy especial relevancia los “campos de actividades” industriales tales como las operaciones portuarias de carga y descarga de minerales, las canteras, los parques de almacenamientos, los transportes continuos y/o discontinuos de graneles sólidos, etc y los “subcampos de actividades” industriales por ejemplo arranque, carga y transporte.

En dichos campos y subcampos debe de destacarse la puesta inicial en suspensión del material particulado (origen del problema), sus primeros recorridos en la atmósfera, la relación de dicha contaminación con: las variables meteorológicas, la relación con los parámetros de ingeniería de fabricación y proceso y con los parámetros de diseño de los equipos.

En base a lo anterior es fundamental la posible actuación que haga que el impacto ambiental producido sea mínimo, tanto en las inmediaciones de la actividad como en las proximidades geográficas a la misma.

Existen a su vez algunas “fases operacionales” que son causantes de la mayor parte de emisión de material particulado a la atmósfera. Destacaremos: las voladuras (figura 1), el apilamiento en parques de almacenamiento a la intemperie (figura 2), los transportes continuos mediante cinta transportadora (figura 3), la carga con cinta transportadora (figura 4), los movimiento de materiales mediante medios discontinuos (figura 5) la carga y descarga con cuchara (figura 6 y figura 7), la descarga con auger (figura 8) etc.

La investigación se centrará en materiales que facilitan la contaminación por partículas no solo por sus granulometrías y posibilidades de degradación sino también por su importante presencia en los procesos industriales tales como la industria del cemento, los áridos de construcción, el mineral de hierro y el carbón.

En los estudios se emplearon las más importantes herramientas computacionales específicas (ISC3, Aermol, etc) y las generales adaptadas al

estudio tales como la Modelización-Animación en 3D, los Elementos Finitos (códigos MEF), los códigos numéricos (CFD), los Elementos Discretos (PFC), Fuzzy Logic y la Realidad Virtual.



Figura 1: Voladura en cantera



Figura 2: Apilamiento en parque a intemperie mediante apiladora-recogedora



Figura 3: Cinta transportadora en parque cubierto de almacenamiento



Figura 4: Carga con cinta de roca industrial



a)



b)

Figura 5: Apilamiento con mototrailla y mediante camiones



Figura 6: Carga y descarga mediante cuchara



Figura 7: Cucharas de áridos y mineral de hierro



Figura 8: Apilamiento-carga mediante auger

Las modelizaciones fueron ajustadas mediante las correspondientes campañas de captación de polvo y su caracterización por microscopía electrónica, medida de variables meteorológicas y medida de otros parámetros tales como la humedad del material, su compacidad, etc.

La instrumentación empleada en las campañas de medida en campo y en el laboratorio fueron, estaciones meteorológicas portátiles (Met One, E-Sampler EX034-593), captadores de polvo (Met One), anemómetros de hilo caliente (TSI, VPlus 8386), medidores de humedad (Spectrum TDR 100) y penetrómetros (Eijkelkamp 06.01.SB). Mientras que el análisis granulométrico se efectuó en Instituto Nacional del Carbón del Consejo Superior de Investigaciones Científicas a partir de láser y microscopía electrónica.

1.2.-JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En general la contaminación atmosférica ha sido y es estudiada en base al análisis de amplios entornos geográficos. Además de los análisis globales, tiene especial relevancia la puesta inicial en suspensión del material particulado (origen del problema), sus primeros recorridos en la atmósfera, la relación de dicha contaminación con las variables meteorológicas, los parámetros de ingeniería de fabricación, proceso y de diseño de los equipos y la posible actuación que haga que el impacto ambiental sea mínimo.

Los efectos del polvo, como veremos en el siguiente apartado de esta Tesis, son muy numerosos y variados, es nocivo para las personas, consecuencia de una disminución de la calidad del aire respirable que puede llegar a ser causa de enfermedades, da lugar a un ensuciamiento general del entorno habitado con afección de los edificios, también produce efectos dañinos en la vegetación, por oclusión de las estomas de las plantas, que disminuyen la aspiración del dióxido de carbono y agua necesitada por las mismas y por la menor penetración de la luz, etc.

En la contaminación atmosférica por partículas, hasta fechas recientes, se pensaba que la acción lesiva de dichas partículas sobre las personas se limitaba al aparato respiratorio (INS [13]) dando lugar a una primera clasificación. Esta clasificación se caracteriza por las afecciones sobre las

personas del polvo neumoconiótico, polvo inerte, polvo tóxico y polvo alérgico. Estudios realizados al efecto, han demostrado que en los últimos años han aumentado las evidencias que destacan su acción cancerígena en el caso de partículas que contengan sílice libre (AIIC, 1997 [14]) y la contribución de dichas partículas a las patologías cardiovasculares (Ballester, 2003 [15]). También indicar que las afecciones producidas por dichas contaminaciones tiene una especial importancia en su afección sobre los niños (OMS, 2004 [16]). Es necesario por tanto, replantearse los aspectos relacionados no solamente con los riesgos para los trabajadores próximos a los focos de contaminación, sino también para el resto de personas en un entorno más ó menos próximo a dichos focos (Querol et al., 2002 [17], Artiñano et al., 2001 [18], Hazenkamp-von, 2004 [19] y Sloss et al., 2002 [20]).

Existen entornos geográficos concretos normalmente ligados a ciertos tipos de actividades industriales donde tiene gran importancia la contaminación por material particulado. Teniendo en cuenta su potencialidad como foco generador de emisión de partículas, se puede efectuar en una primera fase, la siguiente clasificación de “campos de actividades” en la industria pesada: minería y obra civil, metalurgia-materiales, energía e importación, exportación y manipulación de materiales.

A continuación pasamos a exponer unos comentarios generales sobre dichos sectores:

Minería y Obra Civil

Dejando a un lado los 7,5 Mt de rocas ornamentales (granito, mármol y pizarra) y los movimientos de las tierras que recubren dichos materiales, la minería en España “mueve” del orden de 500 millones de toneladas (carbones, rocas industriales, minerales metálicos, etc) con granulometrías diversas, aparte de otros 80 millones de toneladas de tierras y rocas diversas de recubrimiento en las explotaciones a cielo abierto (ITC, 2004 [21]).

En la figura 9 se expone la evolución del consumo de áridos de construcción en Mt y en la figura 10 el desglose del consumo de áridos por porcentajes. En obra civil, no se dispone de manera documentada de las cantidades de movimientos

de tierras generados en las cimentaciones y sobre todo en los túneles (Johansson et al., 2002 [22]) pero dada la elevada actividad del sector en España se pueden estimar cifras de varios millones de toneladas.

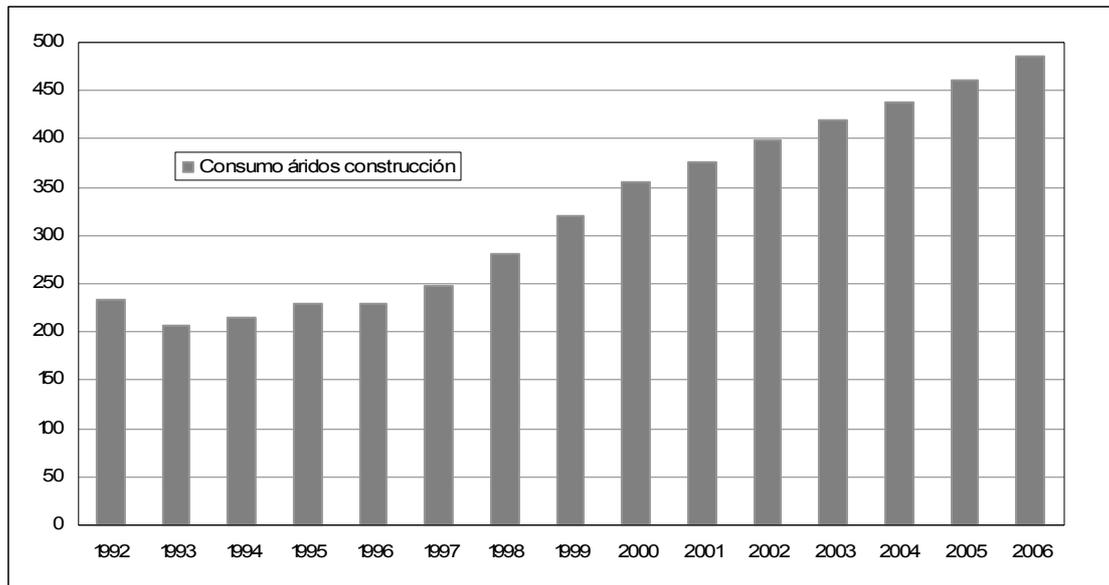


Figura 9: Evolución del consumo de áridos de construcción en Mt

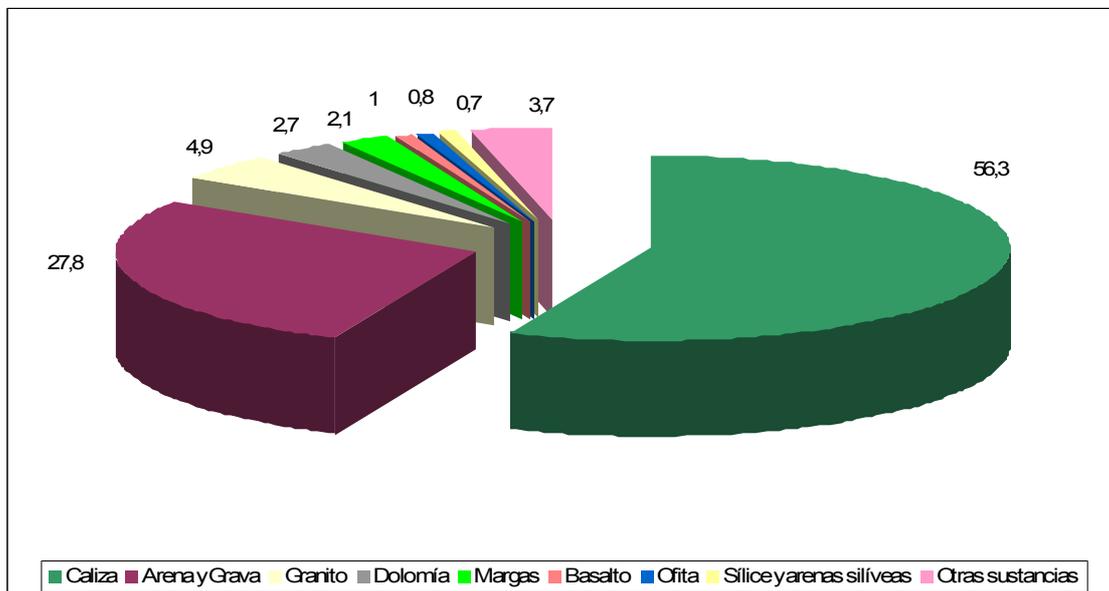


Figura 10: Desglose del consumo de áridos por porcentajes

Metalurgia y Materiales

Los sistemas de producción en sí (Oravisjärvi et al., 2003 [23]) y sus parques y sistemas de almacenamiento de las ferroaleaciones, del cemento y clinker

(material muy significativo dada su granulometría muy fina), etc, mueven cifras muy importantes de materiales (figura 11).

A título ilustrativo podemos indicar que aparte de las cifras mencionadas en el apartado anterior de minería y obra civil, se han movido en parques y sistemas de almacenamiento (y por tanto cargados ó descargados, transportados, apilados y/ó desapilados, transvasados, etc), del orden de 7,5 Mt de mineral de hierro y unos 44,1 Mt de cemento-clinker con destino a consumo propio (Oficemen), etc.



Figura 11: Formación de polvo en trituración de caliza en cantera de fábrica de cemento

Energía

En la generación de energía eléctrica en centrales térmicas tenemos aparte del material particulado proyectado al exterior con los gases de combustión por la chimenea, los sistemas y parques de almacenamiento de minerales con un movimiento de unos 20 Mt de carbón en granulometrías capaces de producir cantidades elevadas de material particulado a la atmósfera.

En la figura 12 se muestra una apiladora-recogedora de rodete en una Central Térmica, en la figura 13 los inicios de la formación de una parva de carbón mediante una apiladora de brazo también en una Central Térmica y en la figura 14 una moderna apiladora de brazo de una capacidad de hasta 4000 t/h en una terminal portuaria del Norte de España.



Figura 12: Apiladora-recogedora de rodete en Central Térmica



Figura 13: Formación de parva mediante apiladora en Central Térmica



Figura 14: Apiladora de brazo en una terminal portuaria del Norte de España

Importación y Manipulación de materiales granulares

Dado el carácter deficitario de España en materiales granulares en general (LIFE-HADA, 2003 [24]) y en particular de materiales de importancia estratégica tales como los minerales, el carbón y el cemento, se está procediendo a su importación en grandes cantidades por mar (en el caso de cemento concurren importaciones con exportaciones), convirtiendo los puertos “mineraleros” en actividades fuertemente contaminantes por un material particulado muy concreto.

En la figura 15 se puede ver la importancia del movimiento de minerales en sistemas portuarios ya que a nivel mundial y solo como ejemplo para el mineral de hierro y el carbón las cifras que se mueven superan los 1600 Mt.

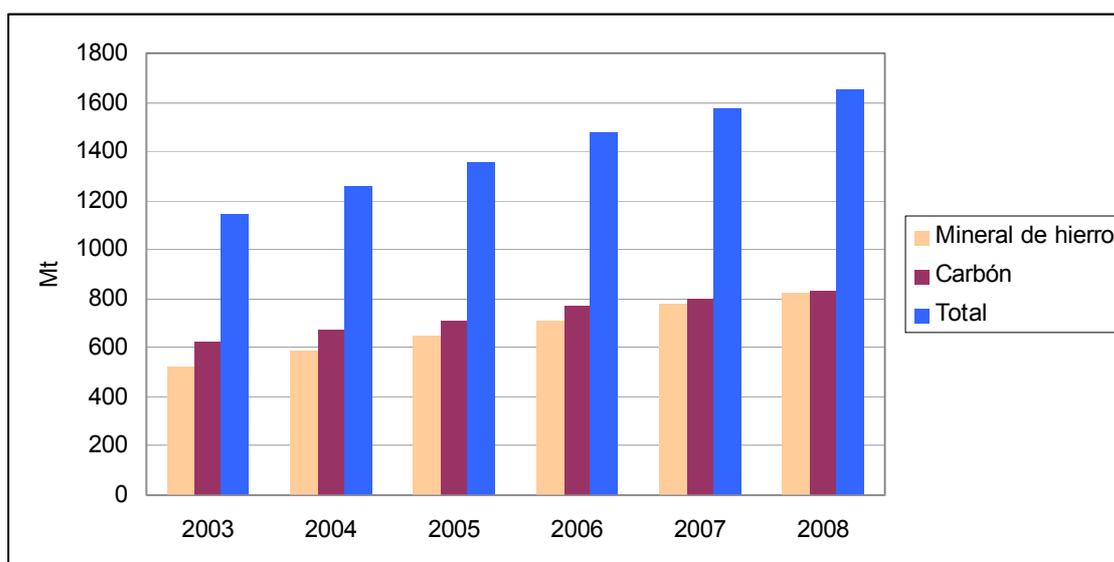


Figura 15: Movimientos anuales marítimos de carbón y de hierro (fuente: B. S. A.)

En las figuras que a continuación se exponen (figuras 16 a 21), podemos ver los movimientos de materiales granulares (minerales) más interesantes a nuestro entender, desde el punto de vista de generación de polvo en España (carbón y coque de petróleo, cemento y clinker, fosfatos, mineral de hierro y potasas), así como la procedencia según la ubicación de los correspondientes sistemas portuarios. Todo ello ha sido extraído de los últimos datos oficiales de la Entidad de Puertos del Estado Español del Ministerio de Fomento.

Posteriormente y en cuanto a la manipulación hemos de destacar que en la mayoría de las ocasiones, la enorme cantidad de material producido y/o importado (y exportados) debe de transportarse hasta el sitio de consumo ó uso (central térmica, planta de hormigonado, puerto, factoría sidero-metalúrgica, etc) y ser manipulados de nuevo en dicho lugar.

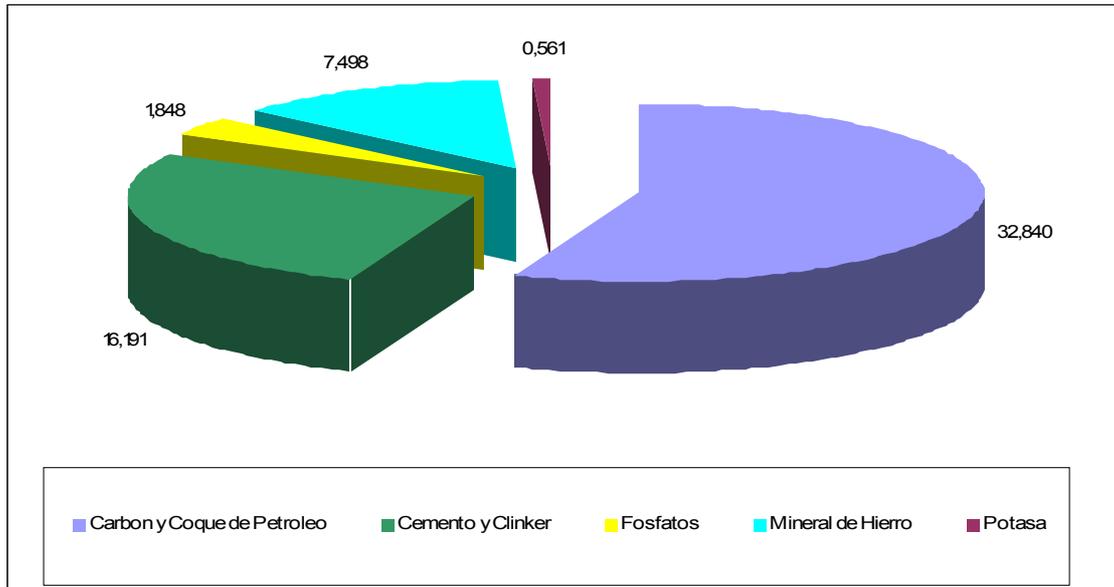


Figura 16: Total movimientos en Mt de materiales granulares en sistemas portuarios

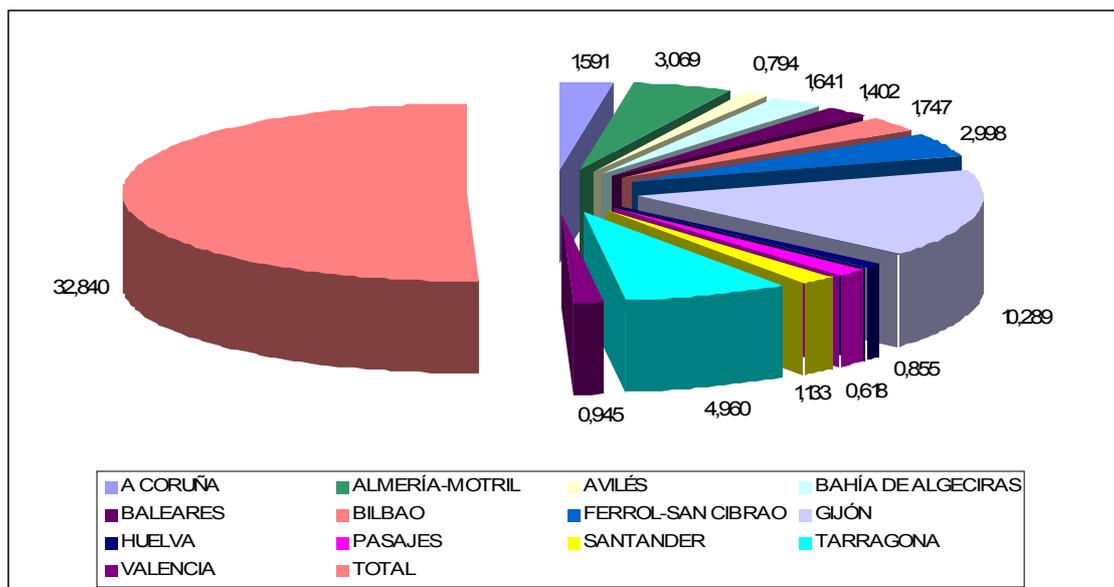


Figura 17: Movimientos en Mt de carbón y coque de petróleo en sistemas portuarios

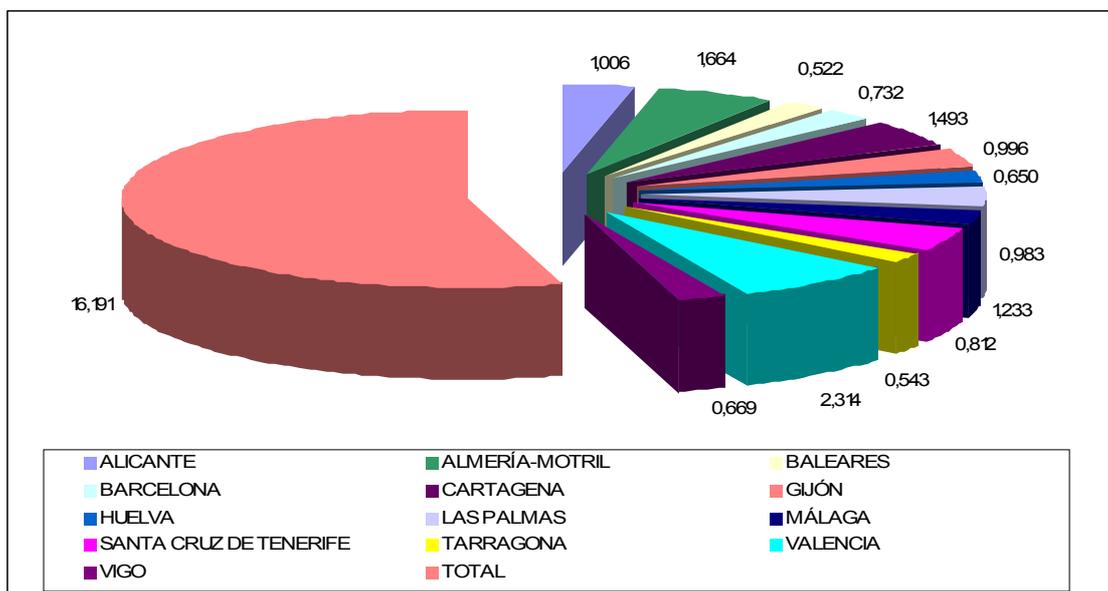


Figura 18: Movimientos en Mt de cemento y clinker en sistemas portuarios

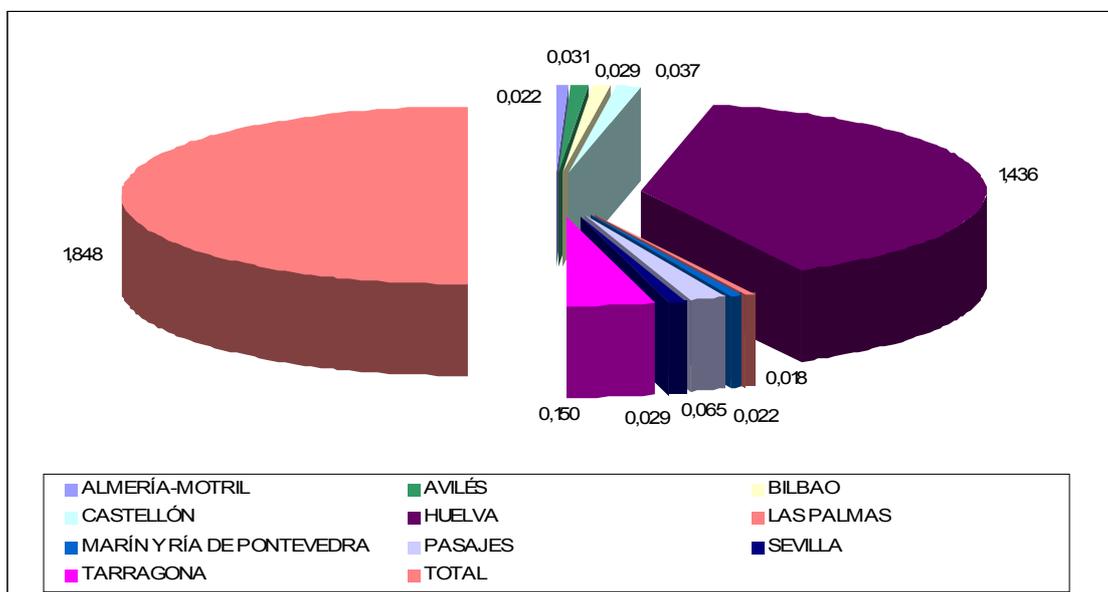


Figura 19: Movimientos en Mt de fosfatos en sistemas portuarios

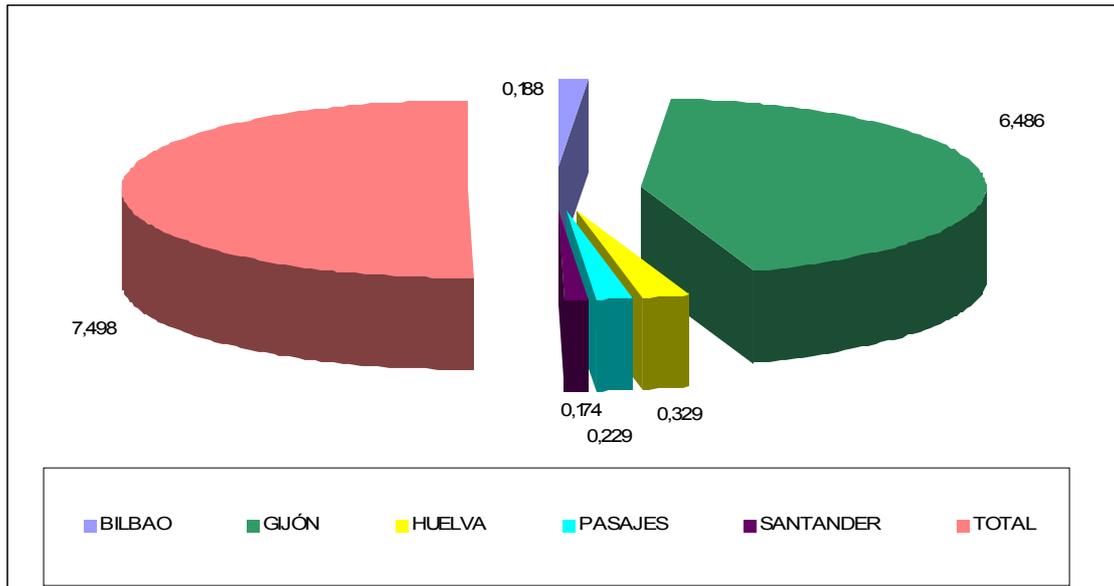


Figura 20: Movimientos en Mt de mineral de hierro en sistemas portuarios

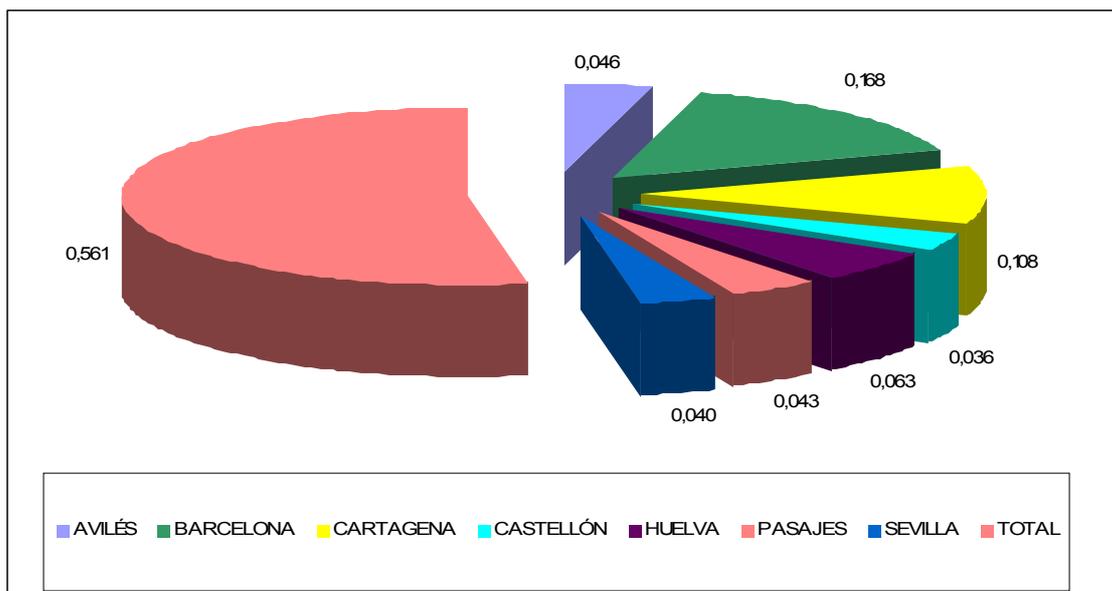


Figura 21: Movimientos en Mt de potasa en sistemas portuarios

En la figura 22 se muestra el transporte sobre barco transoceánico de carbón para exportación, en la figura 23 análogo a la figura anterior pero de mineral de hierro (en ambos casos carga continua con transporte continuo mediante cinta transportadora), en la figura 24 descarga continua en puerto de un barco de cemento y en la figura 25 descarga discontinua mediante cuchara en un puerto de barcos transoceánicos de carbón para una central termoeléctrica.



Figura 22: Carga continua con dique interior marino sobre barco

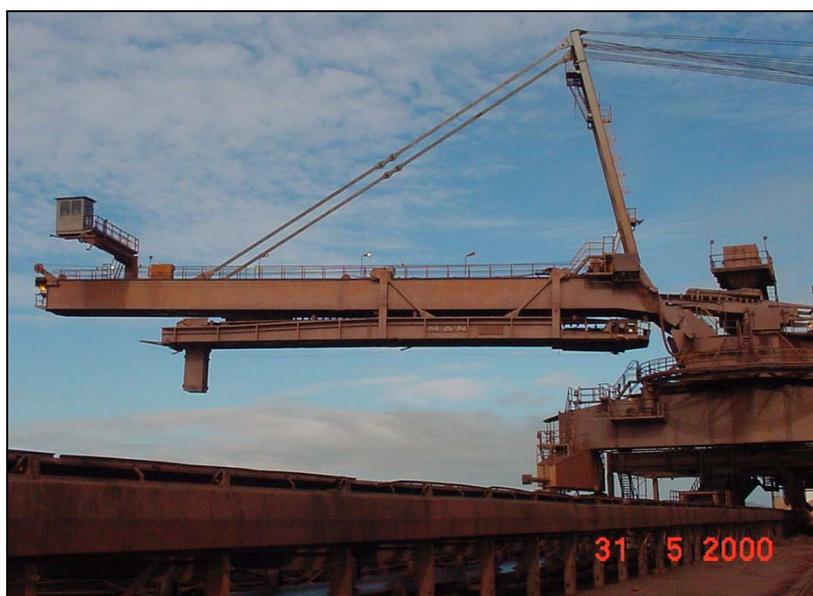


Figura 23: Carga continua de mineral de hierro sobre barco

Las “fases operacionales” que a su vez pueden ser consideradas dentro de los “campos de actividades” indicados, son numerosas, destacando por su importancia como foco generador de la contaminación por partículas:

- En general las excavaciones de roca y en concreto las “voladuras”, realizadas con frecuencia en zonas urbanas, las reparaciones de carreteras

con levantamientos mecánicos del firme por rozadora en ciudades, la acción y/o comportamiento del material particulado en los túneles.

-El transporte continuo y discontinuo.

-Los sistemas de apilamiento en intemperie en “parques de almacenamiento a la intemperie” (campo objeto de mi investigación y por tanto de la Tesis Doctoral) en zonas portuarias, en centrales térmicas, en factorías siderúrgicas, etc y la carga y descarga continua con cinta transportadora ó discontinua con cazo y/o cuchara en parques de almacenamiento, en tolvas, en contenedores, en barcos, en vagones de ferrocarril, en camiones etc.

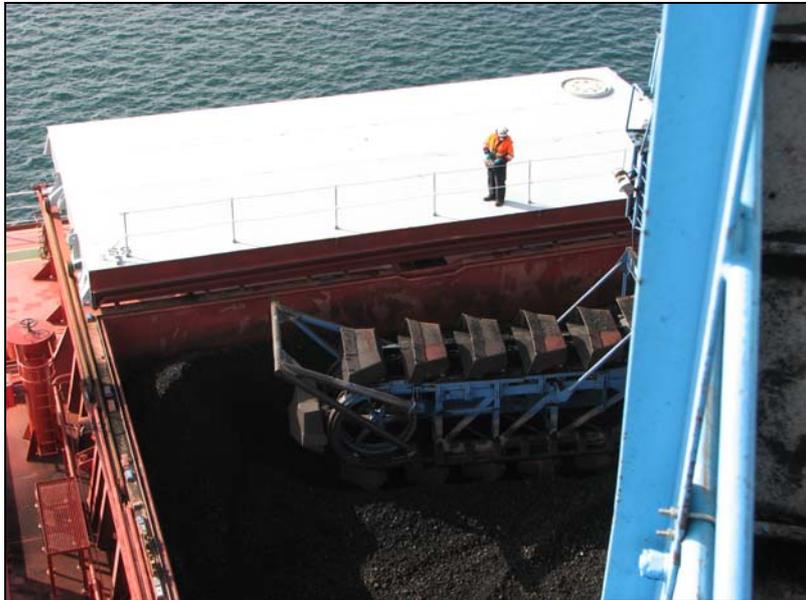


Figura 24: Descarga continua mediante cangilón de material de sílice en barco



Figura 25: Descarga discontinua mediante cuchara en puerto interior de Central Térmica

2.-LA ATMÓSFERA

2.1.-INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta está envuelto por una delgada capa, esencialmente gaseosa, sujeta a su superficie debido a la acción de la fuerza gravitatoria terrestre y que la acompaña en su movimiento de rotación casi en su totalidad.

El espesor de la atmósfera es de unos mil kilómetros y su masa se estima en cerca de 5.300 billones de toneladas. La densidad de los gases desciende rápidamente con la altura, la mitad de la masa de la atmósfera se encuentra en los primeros cinco kilómetros y a los cincuenta kilómetros de altura se puede decir que estamos prácticamente en el vacío.

Es decir, la atmósfera está compuesta por capas gaseosas superpuestas (figura 26), de las cuales, las más bajas soportan el peso de las que tienen encima. Según ascendemos por las capas, este peso por unidad de superficie, al que se denomina presión atmosférica, es cada vez menor.

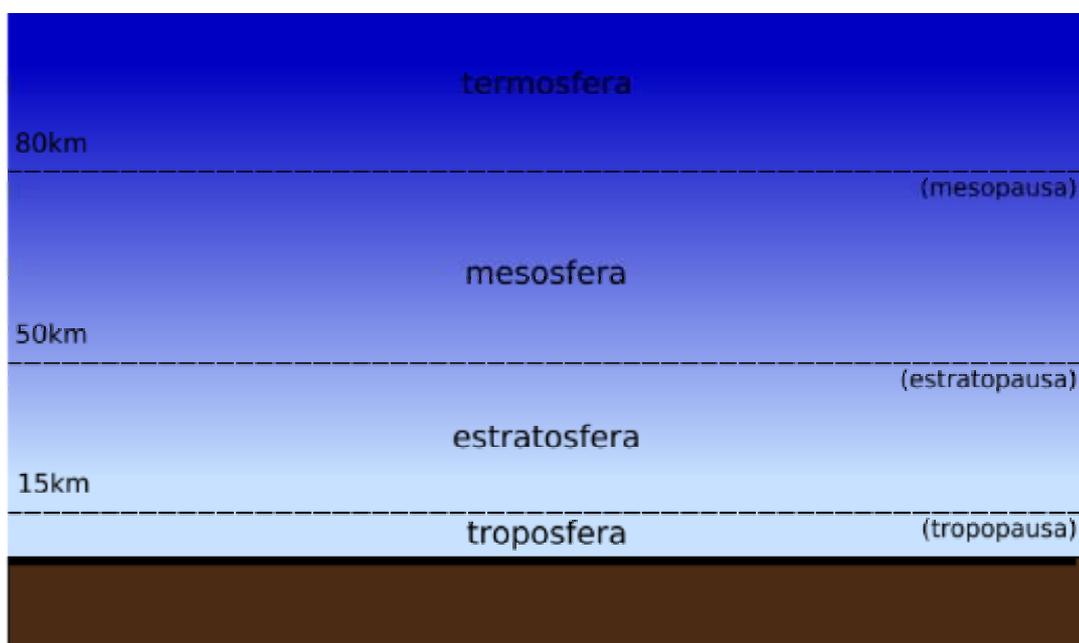


Figura 26: Partes de la atmósfera terrestre

Se puede dividir la atmósfera, según la variación de la temperatura con la altura, en las siguientes capas:

Troposfera: Es la capa de la atmósfera más próxima a la superficie de la Tierra y por ello la más importante, en ella respiramos y en ella se forman los fenómenos meteorológicos que determinan el clima. La troposfera es la capa más dinámica, siempre en movimiento: vientos, lluvias, nubes, etc. Este movimiento mantiene casi constante la composición del aire que respiramos. También es donde se generan la mayoría de los fenómenos de contaminación atmosférica.

Su característica física más importante es que la temperatura va descendiendo con la altura, a razón de $0,6^{\circ}\text{C}$ cada 100 m, hasta unos 12 kilómetros de altitud, donde se estabiliza durante un intervalo de altura, marcando el final de la troposfera y que llamamos tropopausa. La altura a la que podemos encontrar la tropopausa no es constante y varía dependiendo del lugar del planeta en el que nos encontremos, unos 15 kilómetros en el Ecuador y aproximadamente 6 kilómetros en los polos.

Estratosfera: La estratosfera se extiende desde la tropopausa hasta cerca de los 45 Km de altitud. Una característica interesante de esta capa es la desaparición de corrientes verticales y la disminución de la concentración de vapor de agua.

En la estratosfera se genera la mayor parte del ozono atmosférico, detectándose una gran concentración entre los 25 y 30 kilómetros de altitud, en la llamada capa de ozono. La función más importante de la capa de ozono es la de absorber la radiación ultravioleta procedente del espacio exterior, permitiendo así la existencia de vida en la Tierra y siendo la principal responsable del comportamiento térmico de signo contrario al de la troposfera.

Mesosfera: Tras la estratosfera podemos encontrar la estratopausa que da paso a la mesosfera. La mesosfera se extiende, aproximadamente, desde el kilómetro 45 hasta el 80, la temperatura aumenta sensiblemente hasta los 0°C a unos 50 Kilómetros de altura pero según vamos ascendiendo, vuelve a decrecer hasta los -80°C .

Termosfera: Sobre la mesopausa, se encuentra la termosfera. Esta es la capa de la atmósfera más alejada que se conoce. En ella, la temperatura crece con

la altura, de forma que a los 500 Km de altitud la temperatura alcanza los 1500°C, de aquí su nombre. Este aumento de la temperatura es debido al calor que produce la disociación de las moléculas de nitrógeno y oxígeno provocada por la radiación ultravioleta procedente del Sol. Como ya dijimos, la presión atmosférica, disminuye con la altura, por lo que en la termosfera la presión es muy reducida.

Esta capa también recibe el nombre de ionosfera. Esto es debido a la formación de capas ionizadas, llamadas capas de Heaviside, que tienen la capacidad de reflejar las ondas radioeléctricas. Este fenómeno permite que ciertas estaciones emisoras puedan ser recibidas en lugares donde, por causa de la curvatura de la Tierra, no serían directamente perceptibles. En determinadas ocasiones, la incidencia de la radiación solar sobre esta capa produce las espectaculares auroras boreales y australes.

2.2.-COMPOSICIÓN DE LA ATMOSFERA

La atmósfera mantiene una composición química prácticamente constante en los primeros cien kilómetros de altura.

Los componentes esenciales de la atmósfera son, además del aire seco, el agua en cualquiera de sus estados físicos y el aerosol atmosférico, formado por partículas sólidas y líquidas en suspensión. La presencia del vapor de agua en la atmósfera varía entre un uno y un tres por ciento del volumen total y es responsable de los fenómenos naturales, los denominados meteoros, como la lluvia, la niebla, el rocío, la nieve, el granizo, la escarcha, etc.

El aire seco es el componente mayoritario de la atmósfera, casi el 99% de su volumen. Está formado por oxígeno (20,9%) y nitrógeno (78,1%) en una concentración prácticamente constante. También y en mucho menor proporción coexisten dióxido de carbono (CO₂) y componentes menores como helio, neón, metano, ozono, etc. Sin embargo, no debemos menospreciar esta aportación de los componentes menores, pues de una masa total de la atmósfera de 5.300 billones de toneladas, estos gases representan cientos de millones de toneladas.

Por encima de los cien kilómetros de altitud predominan los gases ligeros como el nitrógeno, el hidrógeno y el helio. A partir de los mil kilómetros las partículas más ligeras escapan de la gravedad de la Tierra perdiéndose en el espacio.

2.3.-CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Todos tenemos una idea más o menos clara de lo que significan las palabras contaminación atmosférica. Los habitantes de las grandes ciudades quizás entiendan mejor el término, pues en ciertos días la contaminación se ve, huele, y casi hasta se palpa.

Según la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico, actualmente en vigor:

Se entiende por contaminación atmosférica “la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza”.

2.3.1.-CONTAMINANTES

Cuando algunas sustancias, compuestos o formas de energía se encuentran en el aire en concentraciones o niveles tales que pueden causar daños o molestias a personas, animales, vegetación o materiales se denominan contaminantes atmosféricos.

Los contaminantes atmosféricos primarios son emitidos por diversas fuentes naturales, como incendios forestales o erupciones volcánicas, y además, también son producidos por actividades del hombre (antropogénicas) en los procesos industriales, el tráfico, calefacciones, etc.

Los más representativos son el dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs), CFCs, partículas en suspensión, etc.

Otros contaminantes se forman de la interacción química, entre los contaminantes primarios de los compuestos habituales de la atmósfera, como son el vapor de agua o la radiación solar; dando lugar a los contaminantes secundarios. Los más importantes son el ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3), ozono (O_3), peroxiacetilnitrato (PAN), etc.

Por otra parte, la vida media estimada de los contaminantes puede darnos una idea de lo reactivo o inerte de los mismos, cuanto mayor sea su vida media mayor será el tiempo de permanencia en la atmósfera y más lejos podrán ser transportados. Por ejemplo, la vida media del dióxido de azufre (SO₂) es del orden de días, esto implica que dispone de este tiempo para transportarse a una distancia, que depende de las condiciones meteorológicas de la zona, antes de acabar combinándose con la humedad de la atmósfera y provocar el fenómeno de lluvia ácida.

De la misma manera, los halocarbonos, compuestos contaminantes formados por cloro, bromo, fluor y carbono, tienen una vida media estimada en la atmósfera de más de cien años, según la Organización Meteorológica Mundial. En su largo periodo de vida tienen tiempo suficiente para alcanzar las capas altas de la atmósfera, recorriendo así enormes distancias dentro de los ciclos meteorológicos del planeta, esto hace que sean los principales causantes de la degradación de la capa de ozono.

La mayoría de las actividades humanas llevan asociadas la generación de ruido. El tráfico, las obras y construcciones, alarmas, sirenas, etc., son algunos de los emisores más comunes de ruido en nuestras ciudades. Niveles altos de ruido no sólo generan un malestar generalizado en los habitantes sino que pueden provocar trastornos psicológicos y de salud. El ruido va generalmente acompañado por fenómenos de vibraciones que pueden afectar también a edificios, estructuras y monumentos.

Otros tipos de contaminación atmosférica, que cada vez acaparan mayor atención, son los debidos a los olores y las radiaciones electromagnéticas.

2.3.2.-UNIDADES

La unidad más utilizada en los países europeos para medir contaminantes gaseosos y partículas, es el microgramo por metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que indica la masa del contaminante por unidad de volumen. La unidad que se utiliza para medir la contaminación acústica es el decibelio, dB (A), que expresa la capacidad del oído humano de percibir sonidos. Al tratarse de una unidad logarítmica, no se puede sumar del modo convencional, lo que suele provocar

frecuentes confusiones al tratar de calcular el valor total de sonidos que tienen lugar simultáneamente.

2.3.3.-PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN TOTALES (PST)

Son aquellas partículas sólidas o líquidas presentes en el aire de tamaño suficientemente reducido, menores de veinticinco micras de diámetro, de forma que no se depositen demasiado rápido sobre la superficie. Este tiempo de residencia en la atmósfera depende del tamaño y composición de las partículas, vientos, lluvias, etc.

La composición química depende mucho de su origen. El principal es el polvo del suelo, rico en calcio, aluminio y silicio, también pueden proceder de emisiones debidas a erupciones volcánicas, incendios forestales, la sal marina y las formadas a partir de contaminantes gaseosos.

La principal generación de partículas debida a la actividad del hombre, aunque mucho menos importante, se basa en la utilización de carburantes para motores en general y de aquellas actividades que tienen como consecuencia la fracturación de materiales, canteras, industria del metal, cementeras, etc.

El riesgo de la intrusión de partículas al sistema respiratorio, es función del tamaño de las mismas. En el tracto respiratorio las partículas de más de diez micras de diámetro no son peligrosas. Las comprendidas entre 0,5 y 5,0 micras pueden permanecer en los bronquios pero pocas llegan a los alveolos, ya que son eliminadas por los cilios. Las partículas que permanecen en los pulmones limitan la capacidad respiratoria.

Además interfieren en la fotosíntesis de las plantas, impidiendo la penetración de la luz solar y perturbando el proceso de intercambio de CO₂ en la atmósfera.

2.3.4.-HUMOS NEGROS (HN)

Los humos normalizados o humos negros, una fracción de los PST, son partículas finas de origen carbonoso suspendidas en el medio ambiente atmosférico que absorben la luz y pueden ser medidos después de haber sido recogidos en un filtro.

Dentro de los orígenes importantes están los relacionados con la combustión de combustibles fósiles, como son, los motores Diesel, las centrales térmicas, las refinerías de petróleo y las industrias metalúrgicas.

Sobre el ser humano a bajas concentraciones pueden crear problemas respiratorios y aumentar las crisis asmáticas.

2.3.5.-PARTÍCULAS SEDIMENTABLES

El comportamiento de las partículas como contaminante atmosférico depende de su tamaño. A partir de 20 o 25 micras de diámetro, la velocidad de sedimentación es lo suficientemente alta como para que desaparezcan de la atmósfera y se depositen en el suelo, siempre y cuando no se produzcan situaciones excepcionales de movimientos del aire y turbulencias.

El origen fundamental de las partículas sedimentables proviene, además del aporte de los diferentes suelos por efecto del viento, de los procesos de trituración y pulverización de las rocas, movimiento de tierras y emisiones de industrias cementeras.

En la actualidad las normativas de la Unión Europea no consideran a las partículas sedimentables como contaminantes, al tener en cuenta su rápida deposición en el suelo de los alrededores del foco emisor y no ser perjudiciales para el ser humano.

2.4.-DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA

La capacidad de la atmósfera de diluir las concentraciones de contaminantes viene determinada por las condiciones meteorológicas. Una atmósfera estable, sin movimiento, propiciará la acumulación de contaminantes facilitando así la formación de contaminantes secundarios. Sin embargo, una atmósfera inestable y dinámica difundirá rápidamente los contaminantes debido a la turbulencia atmosférica.

Los parámetros meteorológicos que más directamente se relacionan con la contaminación atmosférica son los siguientes:

Velocidad del viento: La velocidad del viento está asociada con la turbulencia de origen mecánico. En las zonas urbanas siempre se detectan bajos niveles

de contaminación atmosférica con situaciones de viento apreciable, debido al efecto de barrido que ejerce sobre las masas de aire.

Dirección del viento: La dirección del viento, determina el área hacia el cual se puede desplazar la contaminación emitida en un punto. Cuando se estudian focos puntuales de emisión, como grandes chimeneas, debemos considerar las direcciones principales de viento, dado que éstas determinarán la trayectoria del penacho de humo.

Variación de la temperatura con la altura: La variación de la temperatura con la altura es un elemento clave a la hora de entender los fenómenos de dispersión atmosférica así como la elevación o ascenso de los penachos de las chimeneas. Cuando un volumen de aire se encuentra a una temperatura superior a la del aire que lo rodea, tiende a ascender dada su menor densidad. A su vez, este volumen de aire, va sufriendo la consiguiente expansión debido a que en su ascenso va encontrando capas de aire de menor presión.

La energía requerida para expandirse, al no existir un intercambio apreciable de energía con el exterior (proceso adiabático), debe tomarse de la energía interna del volumen de aire. Dado que la energía interna está directamente asociada a la temperatura, esta expansión provoca una disminución de la temperatura del aire ascendente.

Si este aire ascendente contiene contaminantes, éstos ascienden con él y debido a la propia expansión disminuye la concentración de los mismos. Este sencillo mecanismo representa el proceso básico de difusión de contaminantes atmosféricos.

Cuando se hizo la descripción de la troposfera se dijo que la temperatura descendía 0,6°C cada cien metros de altura, esta variación de la temperatura con la altura es el llamado gradiente vertical de temperatura y está directamente relacionado con la turbulencia de origen térmico.

El gradiente vertical de temperatura no es siempre constante, cuando la temperatura, en lugar de disminuir, crece con la altura durante un estrato de la atmósfera, la masa de aire ascendente deja de elevarse para quedar estancada. A este importante fenómeno se le denomina inversión térmica y es

una de las situaciones meteorológicas que mas afectan a los niveles de contaminación. Una inversión térmica puede tener origen en el enfriamiento y calentamiento del suelo o bien por la existencia de situaciones anticlónicas en la atmósfera.

Altura de la capa de mezcla: La presencia de una inversión térmica supone la eliminación de las corrientes verticales del aire. La ausencia de corrientes verticales genera una especie de "tapadera atmosférica" que mantiene confinada la masa de aire desde la superficie hasta la altura donde existe inversión térmica, esta altura define el límite superior de la capa de mezcla.

Puede suceder que un penacho de humo o incluso las emisiones de una gran ciudad queden atrapados en una capa de mezcla, en este caso, se pueden originar altos niveles de contaminación a ras del suelo.

En las últimas décadas se han venido construyendo chimeneas muy altas y con grandes velocidades de salida de los humos para enviarlos por encima de las capas de inversión y con ello evitar su efecto de barrera. Lo que parece una buena medida para evitar la contaminación local se ha convertido en un importante precursor de la lluvia ácida a larga distancia.

2.5.-PREVENCIÓN Y CONTROL

Prevenir y controlar la contaminación atmosférica son dos de los aspectos básicos que se deben contemplar en la gestión de la calidad del aire.

Las políticas preventivas son, sin duda, las más eficaces, las menos conflictivas socialmente y al final las mejores y las más económicas. En este sentido, las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), procedimientos implantados en los países desarrollados, son unos procesos de análisis (relaciones causa-efecto), predicción (cuantificación), valoración (interpretación), prevención (corrección de forma preventiva) y comunicación (participación pública) del impacto ambiental de un plan, programa y actuación.

Cuando las emisiones de contaminantes a la atmósfera tienen su origen en fuentes industriales, éstas pueden provenir de los procesos de producción y de los procesos de combustión.

Unas posibles definiciones de los medios emisor, difusor y receptor son la siguientes:

MEDIO EMISOR: Emisión es la cantidad de contaminante vertido, en un periodo determinado, desde la fuente. Al conjunto de éstas se le denomina medio emisor. Principalmente son industrias, transportes, centros de producción de energía, etc.

MEDIO DIFUSOR: La atmósfera. En ella los contaminantes se transportan, a veces a grandes distancias, diluyen y/o transforman física y químicamente.

MEDIO RECEPTOR: Es el conjunto de elementos afectados por la existencia de la contaminación: personas, vegetación, animales, materiales, etc. Nos referimos a inmisión, como la cantidad de contaminante por unidad de volumen que llega al receptor una vez transportado y difundido por la atmósfera.

Estas chimeneas evacúan los gases producidos y posibilitan una buena dispersión de los contaminantes emitidos. Es conveniente señalar que al elevar la altura de la chimenea de emisión consigue diluir la contaminación, pero la emisión global es la misma. Dado que, cada día más, los problemas de la contaminación atmosférica se analizan de manera global, la tendencia actual consiste en reducir la contaminación en el origen.

Esto se consigue a través de tecnologías más limpias, con medidas de ahorro y eficiencia, con combustibles menos contaminantes y en último caso, instalando equipos depuradores para limpiar los gases emitidos, o por medio de la desulfuración, o por lecho fluido en los procesos de combustión.

En áreas urbanas, suele ser el tráfico el agente que incide más acusadamente en la contaminación atmosférica. La planificación del tráfico, la potenciación de los transportes públicos, la utilización de catalizadores y de combustibles sin plomo e incluso de vehículos eléctricos y los medios de ahorro energético son las líneas de actuación más viables para el control de la contaminación atmosférica en este entorno.

En muchas ciudades, sus habitantes son conscientes del incremento de la contaminación, en aquellas ocasiones en las que las condiciones atmosféricas son poco favorables para la difusión atmosférica, como puede ser la presencia de anticiclones persistentes en invierno que originan alturas reducidas de la capa de mezcla. Para conseguir que estas situaciones no lleguen o producir afecciones significativas para la población, en especial para los sectores más sensibles, es necesaria la implantación de las llamadas Redes de Alerta.

Una Red de Alerta es el conjunto formado por una red de vigilancia de la contaminación atmosférica con la adecuada dotación meteorológica, unos procedimientos corroborados de predicción meteorológica, un adecuado modelo que puede predecir la contaminación potencial para las próximas horas, un programa de medidas para corregir las emisiones de diferentes sectores y los apropiados procedimientos de información al público.

3.-RIESGOS DEL MATERIAL PULVERULENTO Y MARCO NORMATIVO

3.1.-CONCEPTO DE POLVO

Los contaminantes de la atmósfera pueden tener un origen natural o un origen antropogénico, siendo en líneas generales las principales fuentes de contaminación antropogénica por partículas: la producción de aerosoles secundarios a partir de contaminantes gaseosos primarios y las partículas directamente provenientes de actividades industriales.

Las partículas atmosféricas más frecuentes en zonas industriales podemos clasificarlas (Bernabé y Carretero, 2003 [25]) según su origen en:

- partículas de origen antropogénico: fundamentalmente partículas esféricas espongiiformes, esféricas lisas y esféricas rugosas, partículas y compuestos procedentes de la actividad industrial, etc.
- partículas naturales: minerales y biológicas.

No obstante solemos denominar con el término “polvo” a las partículas sólidas, inanimadas y que no son solubles en agua y que se originan a raíz de la disgregación de materiales de diverso tipo o de suelos. Como características destacaremos que tienen un tamaño comprendido entre 1 y 100 μm , no han

experimentado ningún cambio químico, pero sí físico (como fracturación, etc.) y que son susceptibles de ser transportadas de un lugar a otro por las corrientes de aire (Espert y López, 2000 [26], Catalá, 1980 [27] y Pasquill and Smith, 1983 [28])

De su naturaleza y del tamaño de partícula dependen las afecciones que pueda provocar el polvo a las personas. En las actividades industriales en general es muy habitual que aparezca el polvo de diversos tipos y con un rango de tamaños muy amplio y así, mientras que las partículas de tamaño grande sedimentan rápidamente, las más finas pueden permanecer en suspensión indefinidamente. Partículas con tamaños del orden de 0,1 μm pueden presentar tiempos de deposición de 496 días y espacios recorridos para dichos tamaños de partículas con vientos laminares de 10 a 30 km/h, de 1200 km a varias veces la vuelta a la tierra.

3.2.-CARACTERÍSTICAS

Las características más importantes a resaltar del polvo son:

- Tamaño de las partículas de polvo comprendido entre 1 y 100 μm , como se muestra en la figura 27.
- No han experimentado cambio químico y sí físico.
- Susceptibles de ser transportadas por las corrientes de aire: Mientras que las partículas de tamaño grande sedimentan rápidamente, las más finas pueden permanecer en suspensión indefinidamente.
- Naturaleza variable (silíceo, calcáreo, etc): De la naturaleza y de su tamaño dependen las afecciones que puedan provocar a las personas.

3.3.-TIPOS DE POLVO

El polvo “molesto” o polvo “inerte” es el que contiene menos del 1% de cuarzo. Debido al bajo contenido en sílice, es menos dañino para los pulmones, aunque en concentraciones elevadas puede ser perjudicial (figura 28). Por ejemplo, el óxido de hierro provoca molestias en los ojos, oídos y conductos respiratorios, e irritación de la piel y mucosas por acción química ó mecánica.

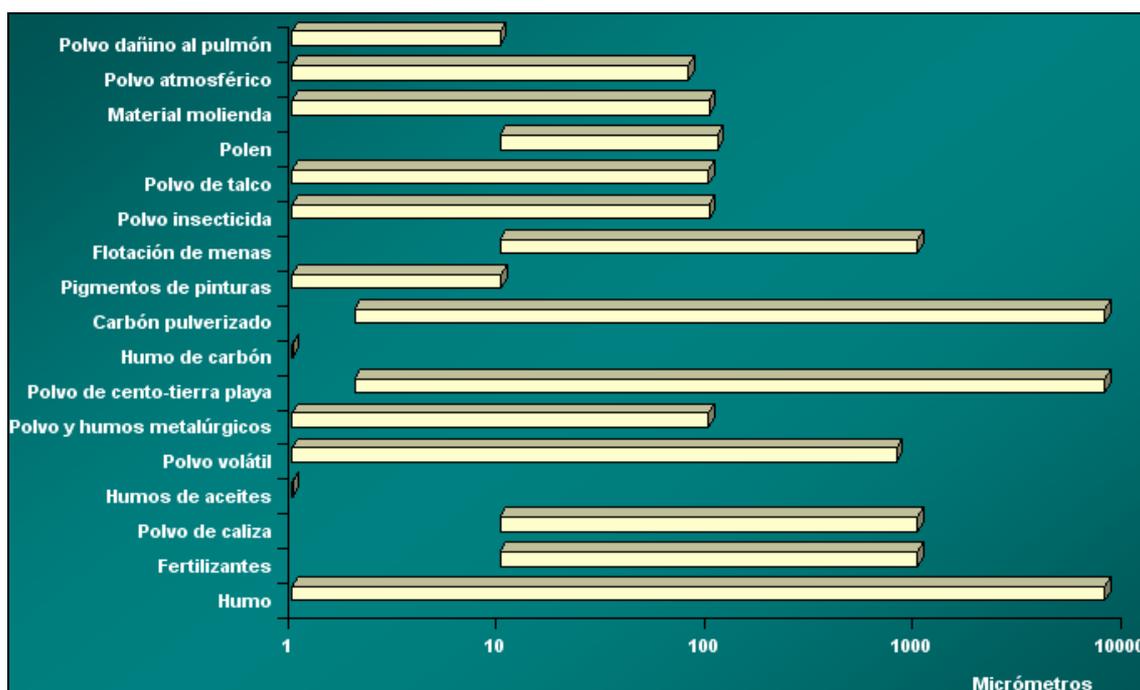


Figura 27: Rango de tamaños de las partículas transportadas en el aire

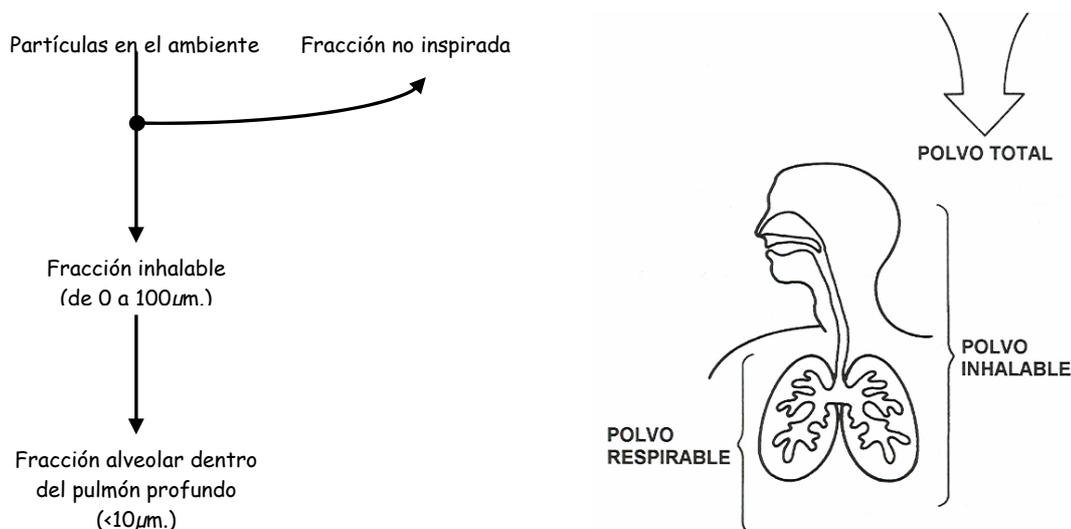


Figura 28: Polvo inhalable y respirable

El polvo “fibrogénico”, como las partículas cristalinas de sílice libre, es biológicamente tóxico y retenido en los pulmones, puede disminuir la capacidad respiratoria y provocar silicosis. Según la salud ocupacional:

- Polvo respirable: Partículas tan pequeñas que penetran en los pulmones, no pudiendo ser retenidas por los mecanismos de limpieza natural del organismo encargados de recogerlas, como son los cilios y el mucus.

-Polvo inhalable: El que se respira. Parte es retenido por los cilios y por la mucosa de la parte superior del aparato respiratorio. Su diámetro ronda las 10 μm .

-Polvo total: El que incluye todo tipo de partículas transportadas por el aire sin tener en cuenta su tamaño y composición.

En la tabla 1 se expone la clasificación del polvo en función del su tamaño.

Tipo		Tamaño	Observaciones	Riesgo para la salud	Riesgo para el medio ambiente
Polvo total	Fino ó en suspensión Polvo respirable	Partículas < 7 μm	Invisibles al ojo humano Permanecen en suspensión en la atmósfera	Partículas alveolares, que pueden alcanzar los alvéolos pulmonares Mayor riesgo para la salud	
	Medio	Partículas entre 1 y 10 μm			
	Grueso o sedimentable Polvo inhalable	Partículas > 10 μm	Visibles al ojo humano Sedimentan rápido y a pequeñas distancias de la fuente Responsables de la contaminación pulvígena del entorno de la explotación	Partículas inhalables (entre 10 y 100 μm) que penetran por la nariz y boca. Poco riesgo para la salud ya que son retenidas por cilios y mucosa y se eliminan por expectoración	

Tabla 1: Clasificación del polvo en función de su tamaño

Según las afecciones que causa a las personas:

Polvo neuromoconiótico: La neuromoconiosis es un conjunto de enfermedades pulmonares causadas por la inhalación prolongada de polvo fino. La variedad producida por el polvo de sílice se denomina silicosis. Para que el polvo llegue a producir silicosis, ha de ser susceptible de ponerse en suspensión por la acción del viento u otros factores, penetrar en los alvéolos pulmonares, y acumularse.

Las circunstancias que más influyen son:

- Concentración de polvo en el ambiente.
- Duración de la exposición.
- Sensibilidad individual.
- Tamaño de partícula.
- Mecanismos de depuración pulmonar (cilios, mucosa..).
- Nocividad intrínseca del mineral (contenido en cuarzo).
- Cantidad de sílice libre.

Existe un grupo de sustancias (dolomía, dunita, fonolita, ofita) en las que el contenido en sílice es inferior al 5% y el valor límite de concentración se fija en 5 mg/m^3 . Existe otro grupo de sustancias (granito, cuarcita, sílice, canto rodado, grauwaca, pórfido) con una gran variabilidad del contenido de sílice (figura 29).

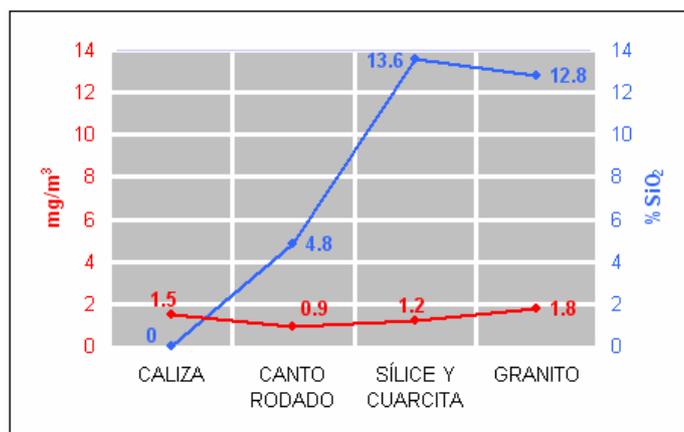


Figura 29: Concentración de polvo y contenido en sílice por tipo de sustancia

En términos generales, el $\%$ de sílice libre es menor en el polvo respirable que en la roca de procedencia disminuye al alejarse de la fuente de producción de polvo y aumenta con el grado de molienda.

Polvo inerte: Es el que tiene un contenido en sílice inferior al 1%. Puede provocar enfermedades leves y reversibles, como irritación de la piel, de las mucosas, de los ojos (conjuntivitis).

Polvo tóxico: Constituido por metales (plomo, mercurio, etc.).

Polvo alérgico: Procede de resinas y de algunas maderas.

3.4.-FACTORES QUE FAVORECEN LA PRESENCIA DE POLVO

La presencia de polvo necesita un foco generador. En la minería y obra civil ese foco lo constituyen las operaciones de arranque, carga, transporte, tratamiento, restauración, etc. El aire es el agente encargado del transporte.

Los factores que influyen en la cantidad de polvo producido son:

-Naturaleza de la roca explotada, estructura y características geotécnicas: Dureza, friabilidad, resistencia al desgaste, resistencia a compresión.

-Humedad de la roca (%): A mayor humedad, menor cantidad de polvo, ya que éste queda fijado en la superficie del terreno.

-Características del proceso seguido en la explotación: Tipo de operaciones y maquinaria empleada durante la explotación: duración, frecuencia y regularidad de los procesos y volumen de producción.

-Climatología de la zona (figura 30): Velocidad y dirección del viento, presencia de turbulencias, cantidad y forma de las precipitaciones (la lluvia fina o la niebla son más efectivas contra el polvo que una tormenta porque provocan la fijación y cohesión del polvo) y humedad atmosférica.

-Características geomorfológicas de la explotación.

-Diseño de la explotación y de la planta de tratamiento (figura 31): Ubicación de los elementos respecto al viento y al relieve y situación respecto a los núcleos habitados.

3.5.-PROBLEMAS CAUSADOS POR EL POLVO

Riesgo para la salud de los trabajadores y conflictos laborales:

-Molestias de carácter respiratorio (picores, estornudos y conjuntivitis).

-Enfermedades respiratorias de carácter irreversible como la neumoconiosis y la silicosis, bajo exposiciones prolongadas.

-Reducción de la visibilidad en la zona de trabajo, aumentando el riesgo de accidentes.

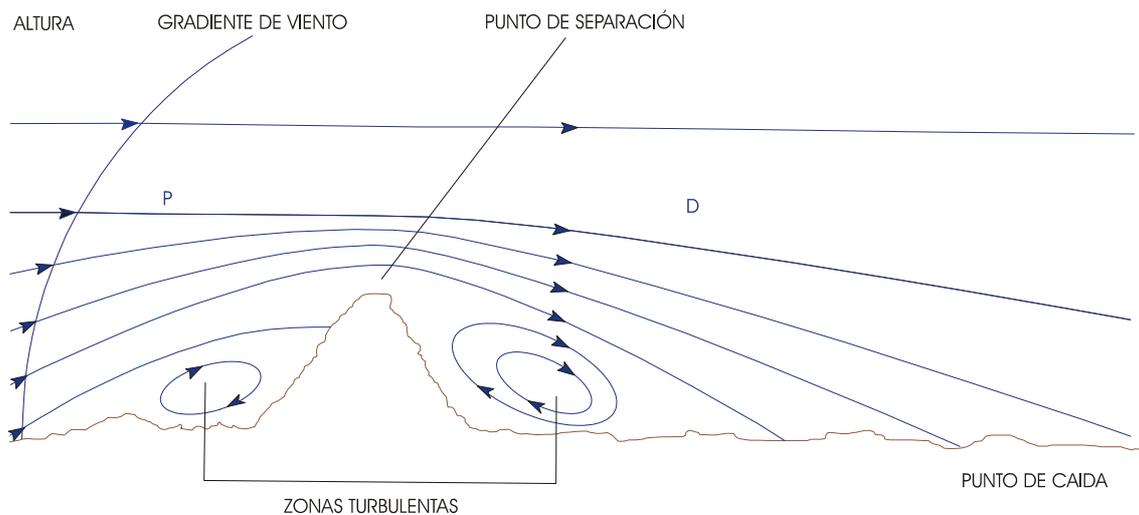


Figura 30: Movimiento de las partículas de polvo sobre el suelo

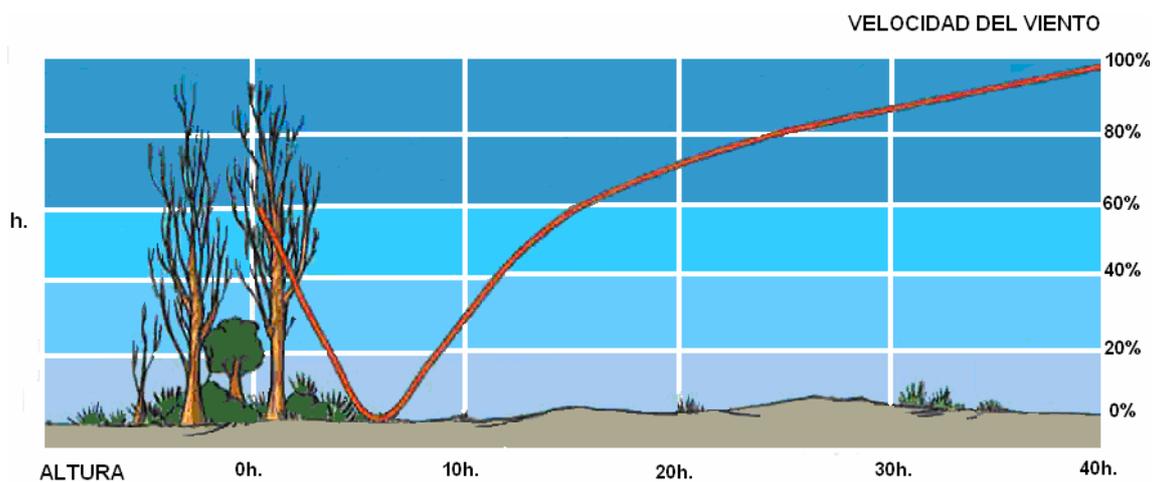


Figura 31: Influencia de una pantalla sobre el viento

Daños al medio ambiente:

- Sedimentación de polvo sobre el suelo, vegetación y edificios afecta negativamente al paisaje.
- Ralentización del crecimiento de las plantas al dificultar su acción fotosintética por oclusión de los estomas, lo que disminuye la aspiración de dióxido de carbono y la captación de agua y luz.
- Merma de la calidad y cantidad de cultivos.
- Daño a la calidad de las aguas superficiales.

Conflictos sociales:

- Reducción de la visibilidad en las carreteras y caminos próximos a la explotación por aparición de brumas, afectando a la visibilidad de los usuarios.
- Ensuciamiento de las vías públicas.
- Problemas respiratorios en las poblaciones cercanas.

Incidencia en la producción:

- Averías y reducción de la vida útil de las máquinas por corrosión y desgaste de elementos móviles, eléctricos y mecánicos (juntas, engranajes...).
- Pérdida de polvo mineral, que no se puede comercializar.
- Poco acorde con la obtención de productos de calidad.

Problemas para la empresa:

- Incumplimiento de la legislación en materia de riesgos laborales y de la legislación medioambiental.
- Imagen sucia, antigua y despreocupada.
- Perjuicio para acciones futuras de la empresa, como obtención de permisos para ampliaciones y nuevas instalaciones o explotaciones.

3.6.-EVALUACIÓN DEL RIESGO PULVÍGENO

3.6.1.-INTRODUCCIÓN

La evaluación del riesgo pulvígeno es de obligado cumplimiento para el empresario según la “Ley de Prevención de Riesgos Laborales” y las leyes de protección del medioambiente.

Para la prevención de riesgos laborales se evalúa:

- El “punto cero” (diseño y apertura de la explotación).
- La fase de explotación (de forma periódica).

Para la protección del medio ambiente se evalúa:

- El estado inicial (antes de la existencia de la explotación).

- El “punto cero” (diseño y apertura de la explotación).
- La fase de explotación (de forma periódica).
- Evaluación del riesgo pulvígeno de los trabajadores.

Los valores que hay que medir para determinar el riesgo pulvígeno son (figura 32):

- La concentración en mg/m^3 de la fracción de polvo respirable.
- El contenido en sílice libre en % de SiO_2 .
- El polvo respirable comprende el 98% de las partículas de $1 \mu\text{m}$, el 92% de las de $2 \mu\text{m}$, el 75% de las de $3.5 \mu\text{m}$, el 50% de las de $5 \mu\text{m}$ y ninguna de las superiores a $7 \mu\text{m}$.

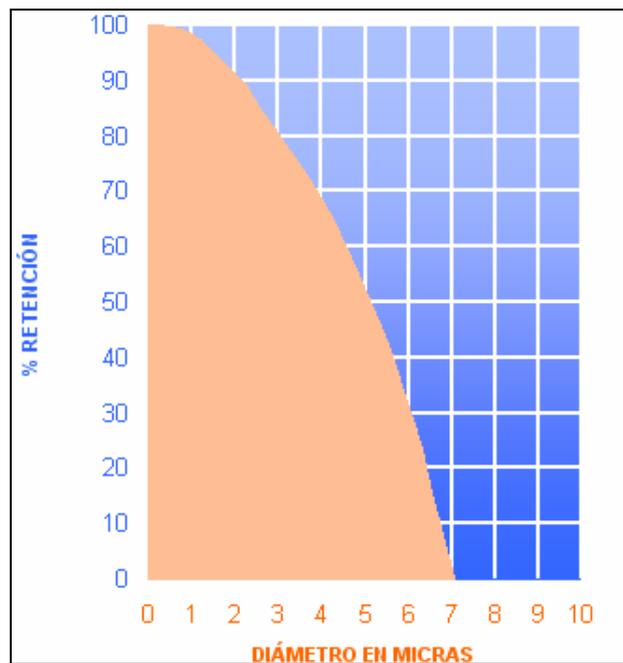


Figura 32: Fracción de polvo respirable según la ITC

Las empresas están obligadas a hacer una toma de muestras cada trimestre por cada puesto de trabajo, aunque se puede reducir a una toma de muestras al año en el caso de que los resultados de las 4 últimas muestras trimestrales, de un puesto, no hayan sobrepasado la mitad de los valores límites, siempre contando con la aprobación de la autoridad minera.

En el caso de que los valores de las muestras estuvieran por debajo del 25% de los valores límites, la autoridad puede eximir de la toma de muestras hasta que se produzca una variación sensible en las condiciones de trabajo.

Las mediciones se realizan de forma individual a un trabajador representativo de cada puesto y durante la totalidad de la jornada de trabajo (figuras 33 y 34).

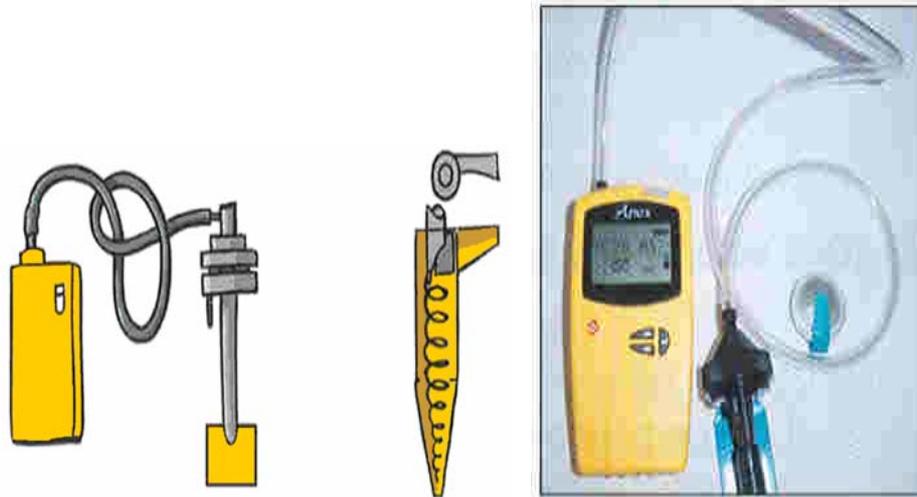


Figura 33: Aparatos de muestreo personales

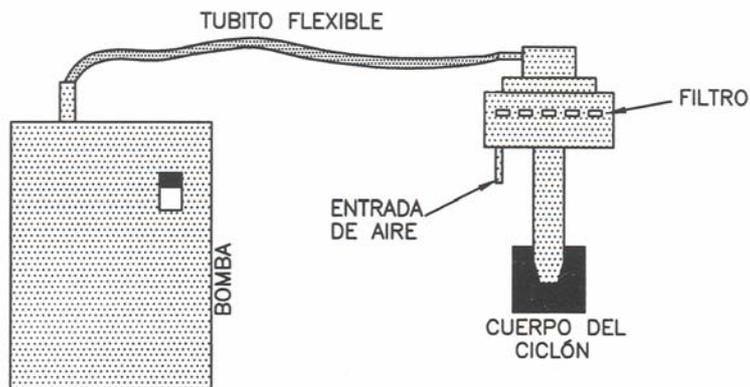


Figura 34: Esquema de un aparato de toma de muestras personal

La determinación de la sílice libre se hace por difracción de rayos X o por espectrofotometría de infrarrojos.

Los aparatos de medición consisten en un dispositivo que consta de un ciclón que separa la fracción respirable del polvo. La parte del aparato que contiene el motor y la bomba de aspiración se sitúa en la cintura del trabajador, y el ciclón lo más cerca posible de las vías respiratorias superiores.

Realizada la toma de muestras, se retira la membrana y se limpia el ciclón. La membrana es analizada por técnicos de laboratorios competentes, como el

caso del Instituto Nacional de Silicosis (INS) que, según la ITC 07.1.04, es el Centro Nacional de Referencia.

3.6.2.-LÍMITES LEGALES PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

Para las concentraciones de la fracción respirable de polvo con un contenido en sílice libre no superior al 5%, el valor límite V_L , medido o calculado para un periodo de referencia de 8 horas, es de 5 mg/m^3 (figura 35).

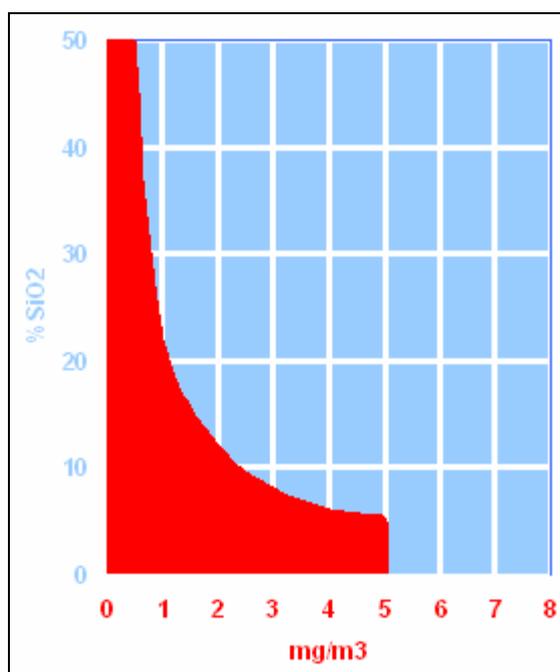


Figura 35: Valor límite de la concentración de polvo en función del contenido en sílice

Para las concentraciones con un contenido en sílice superior al 5%:

$$V_L (\text{mg/m}^3) = (25/Q)$$

donde:

Q = % SiO₂ en el polvo

En ningún caso, la concentración máxima de polvo será superior a 5 mg/m^3 .

3.7.-EVALUACIÓN DEL RIESGO PULVÍGENO PARA EL MEDIO AMBIENTE

3.7.1.-INTRODUCCIÓN

Mediante la medición de las emisiones de polvo a la atmósfera, vemos como afecta a la actividad extractiva en el entorno próximo.

El R.D. 1073/2002, sobre toma de muestras, indica:

- La ubicación de los puntos de muestreo.
- Los criterios de determinación del número mínimo de puntos de muestreo.
- Los objetivos de calidad de los datos y presentación de resultados.
- Los métodos de referencia para la evaluación de las concentraciones.
- Norma UNE-EN 12341 para el muestreo y análisis de PM-10.
- Muestreo por aspiración en filtros seguido de determinación gravimétrica para PM-2.5.

Medición del polvo según la legislación medioambiental:

Para el control de los daños al medio ambiente se realizan las mediciones de manera colectiva y con esta frecuencia de muestreo:

- Una vez cada 3 años si son industrias clasificadas en el grupo B.
- Una vez cada 5 años si son industrias clasificadas en el grupo C.

En el grupo B del catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera, se encuentra:

- Extracción de rocas, piedras, gravas y arenas (canteras).
- Instalaciones de tratamiento de piedras, guijarros y otros productos minerales (machaqueo, desmenuzado, triturado, pulverizado, molienda, tamizado, cribado, mezclado, limpiado, ensacado) cuando la capacidad es superior a 200.000 t anuales, o para cualquier capacidad cuando la instalación se encuentre a menos de 500 m de un núcleo de población.
- Las instalaciones de mantenimiento y transporte de las instalaciones mineras.
- El almacenamiento a la intemperie de productos minerales.

En el grupo C se hallan las instalaciones de tratamiento de piedras, guijarros y otros productos minerales, cuando la capacidad es inferior a 200.000 t anuales.

Los equipos de medida se colocan en el límite de la explotación para determinar el impacto sobre el medio ambiente, y en puntos del exterior de la explotación para estudiar posibles molestias a terceros.

Además, se colocan en función de la dirección de los vientos dominantes, y de la posición de las fuentes de emisión y de las pantallas naturales. Deben estar alejados entre sí y colocados a la misma altura sobre el nivel del suelo (entre 1,5 m y 8 m).

3.7.2.-APARATOS DE MEDIDA

-Captador PM10 LVS de bajo volumen (figura 36): El polvo en suspensión se aspira a través del armazón y la tapa superior. El aire se acelera hacia el portafiltro donde se halla un filtro circular de fibra de vidrio, de entre 47 y 50 mm de diámetro. Bomba de vacío de paletas que proporciona un caudal constante de aspiración en m^3/h . Equipos caros que requiere suministro eléctrico.



Figura 36: Captador LVS PM10

-Captador PM10 HVS de alto volumen (figura 37): Captadores de alto volumen con gasómetro o con caudalímetro. Colector ó receptáculo cilíndrico donde sedimenta la muestra de polvo. En la plaqueta fijadora el polvo se adhiere a la silicona de la plaqueta. Medidor direccional de polvo en suspensión (mg/m^3).

Cabeza colectora de plástico con una serie de aberturas laterales para la entrada de aire.



Figura 37: Captador HVS PM10

3.7.3.-LÍMITES LEGALES RELATIVOS AL MEDIO AMBIENTE

En la tabla 2 se exponen los valores límite de inmisión de partículas en suspensión, vigentes hasta 01/02/05.

	PERIODO	CÁLCULO	CONCENTRACIÓN ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
Valor límite	Anual	Mediana de los valores medios diarios registrados	80
	1 Oct - 31 Marzo	Mediana de los valores medios diarios registrados	130
Método de medición del humo normalizado	Anual (unidades de periodos de 24 horas)	No debe sobrepasarse mas de 30 días consecutivos Percentil 98 de todos los valores medios diarios registrados durante un año	250
Valor guía Método de medición del humo normalizado	Anual	Media aritmética de los valores medios diarios registrados	40 - 60
	24 horas	Medio diario	100 - 150

Tabla 2: Valores Límite inmisión de partículas en suspensión vigentes hasta 01/02/05

Las partículas PM-10 son las que pasan a través de un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros con una eficiencia de corte del 50%.

En la tabla 3 se exponen los valores límites para partículas PM-10 según R.D. 1073/2002.

	PERIODO PROMEDIO	VALOR LÍMITE	TOLERANCIA SOBRE EL VALOR LÍMITE
FASE 1			
Valor límite diario para la protección de la salud humana	24 horas	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 que no podrán superarse en mas de 35 ocasiones por año	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/03 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/04 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/05
Valor límite anual para la protección de la salud humana	1 año	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10	3,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/2003 1,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/2004 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/05
FASE 2			
Valor límite diario para la protección de la salud humana	24 horas	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no podrán superarse mas de 7 veces al año	Se derivará de los datos y será equivalente al valor límite de la fase 1
Valor límite anual para la protección de la salud humana	1 año	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/05 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/06 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/07 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/08 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/09 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 01/01/10

Tabla 3: Valores límites para partículas PM-10 según R.D. 1073/2002

Evaluación preventiva del riesgo para el medio ambiente debido a la emisión de polvo en una explotación:

- Evaluación del estado inicial.
- Caracterización de la explotación.
- Aspectos técnicos de la explotación: Etapas que constituyen el proceso.
- Revisión de los equipos y de los procedimientos.
- Aspectos topográficos: Barreras naturales, depresiones.

-Aspectos geográficos: Proximidad a la explotación de núcleos urbanos. Red de carreteras exteriores. Climatología de la explotación. Sistemas direccionales preferentes de vientos.

-Aspectos medioambientales: Fauna, flora, acuíferos, núcleos de población.

En la tabla 4 se exponen dos fases con sus correspondientes objetivos.

FASE	OBJETIVO	FASE	OBJETIVO
Primera	Evaluar el estado inicial (punto cero)	Segunda	Realizar seguimientos periódicos
	Comprender los fenómenos de emisión de polvo		Contrastar los valores obtenidos con los disponibles en el punto cero
			Evaluar las distintas etapas de la explotación
	Estudiar el impacto ambiental sobre el entorno humano y natural		
	Realizar propuestas de mejora y reducción del nivel pulvígeno		

Tabla 4: Fases y objetivos

Definición de objetivos:

-Campaña de muestreo: Frecuencia de las mediciones mínimas según marque la legislación, identificación de los focos de emisión de polvo, equipos de medición requeridos y debidamente calibrados, o contratación de una entidad especializada, mediciones de control y seguimiento, análisis de los resultados, estudio del caso y conclusiones generales.

-Criterios para la evaluación de los resultados.

-Los valores medidos deben estar por debajo de los límites legales, y deben compararse con los resultados de campañas anteriores para estimar si los niveles de polvo se han estabilizado, aumentado o disminuido. Si anteriormente se han tomado medidas correctoras debe comprobarse si han surtido resultado.

Para poder comparar resultados de campañas sucesivas, éstas han de realizarse siempre de la misma manera:

-Los medidores deben colocarse en los mismos lugares.

-Han de incluirse los parámetros meteorológicos del momento de las medidas para inferir la relación entre emisión y climatología.

-Deben registrarse las actividades de la explotación y las ajenas a la misma que estén relacionadas con las mediciones.

Los aspectos a comparar entre sucesivas campañas son:

-Características del polvo (concentración, % de sílice, etc.).

-Distribución del polvo en la explotación.

-Relación entre los resultados y el tipo de actividad desarrollada.

Tras analizar los resultados, se establecen las conclusiones, y se toman las decisiones oportunas:

-Revisión de las medidas de protección colectiva en una o varias etapas del proceso de producción, o en un determinado equipo.

-Mejora en la utilización de las medidas de protección existentes.

-Modificación de las instrucciones de trabajo.

-Suministro de nuevos equipos de protección (EPIs).

4.-ENFERMEDADES PROFESIONALES PRODUCIDAS POR EL POLVO

4.1.-INTRODUCCIÓN

La inhalación de polvo fino por parte de los trabajadores puede traer como consecuencia la aparición de un tipo de enfermedades pulmonares que se denominan neumoconiosis. El polvo se acumula en los pulmones y reacciona con el tejido pulmonar, provocando lesiones que alteran de manera irreversible las funciones pulmonares.

La variedad de neumoconiosis producida por el polvo de sílice se denomina silicosis. La silicosis es la enfermedad profesional que con mayor frecuencia afecta a los trabajadores de las explotaciones mineras. Se manifiesta a largo plazo, y al principio no provoca ningún síntoma. Por eso, es difícil de detectar. Además es incurable, irreversible y degenerativa.

En la tabla 5 se muestra la clasificación médica y legal de la silicosis y en la tabla 6 los casos encontrados en España de neumoconiosis.

CLASIFICACIÓN	TIPO	EFFECTOS
Médica	Simple	Pequeños nódulos de 1 cm de diámetro Alteraciones pulmonares mínimas La esperanza de vida es similar a la de la población general Puede derivar a lo largo del tiempo en la silicosis complicada
	Complicada	Sombras pulmonares mayores de 1 cm de diámetro Según el tamaño de las sombras se clasifica en tipos A, B y C En los tipos B y C las alteraciones son importantes y disminuyen sustancialmente la esperanza de vida
Legal	Primer grado	No origina disminución en la capacidad de trabajo No es considerada caso de invalidez
	Segundo grado	Inhabilita para desempeñar la profesión Catalogada como incapacidad permanente y total para el trabajo habitual
	Tercer grado	La enfermedad se manifiesta al menor esfuerzo físico y resulta incompatible con cualquier trabajo Se equipara a una incapacidad absoluta y permanente para todo tipo de trabajo

(*) Los tres grados de silicosis se equiparan entre si cuando el trabajador sufre otras enfermedades cardiopulmonares

Tabla 5: Clasificación médica y legal de la silicosis

4.2.-EQUIPOS PRINCIPALES DE EVALUACIÓN DEL POLVO

Equipos para la sedimentación de partículas:

La toma de muestras para el análisis de la materia sedimentable se efectúa aprovechando su deposición por gravedad. La materia depositada se recoge en un colector cilíndrico de área perfectamente definida. La materia sólida y las precipitaciones, pasan a un receptáculo inferior donde se conservan (figura 38).

El tiempo de exposición de un colector es un mes, recogiendo al final el material depositado. La cantidad precisa para que la muestra sea representativa es difícil de determinar, ya que está influenciada por factores como la altura del medidor sobre el suelo, la naturaleza del lugar y las

condiciones meteorológicas. Puede considerarse representativa de un área mayor de la cubierta por el medidor y menor de 1 km².

AÑO	NEUMOCONIOSIS SIMPLE		NEUMOCONIOSIS COMPLICADA	TOTAL
	Función pulmonar sin alterar	Función pulmonar alterada		
1995	88	128	47	263
1996	91	96	33	220
1997	85	88	41	214
1998	123	111	48	282
1999	101	96	49	246
2000	96	86	30	212
2001	89	75	41	205

Tabla 6: Casos de neumoconiosis diagnosticados en España

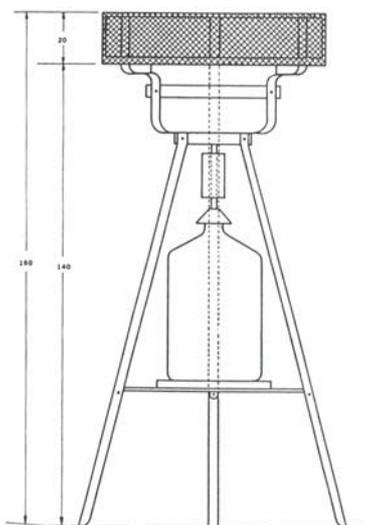


Figura 38: Colector de materia sedimentable

De la materia recogida se determina: pH del agua, materia sedimentable, materia orgánica soluble, elementos o compuestos de interés: Ca, Na, Mg, sulfatos, etc.

Equipos para partículas en suspensión:

La toma de muestras de partículas en suspensión se realiza mediante la absorción de un volumen determinado de aire a través de un filtro donde la materia queda retenida formando una mancha característica.

El “método europeo” mide todas las partículas cuyas dimensiones son tan pequeñas que no tienen una velocidad apreciable de caída y, que por ello, permanecen en la atmósfera por largos periodos de tiempo. Una vez efectuada la toma, se determina la reflexión de la luz sobre la mancha y se transforma este valor en concentración superficial mediante curvas patrones previamente establecidas. Al ser conocidas las dimensiones de la mancha y el volumen de aire, es fácil hallar los ($\mu\text{m}/\text{m}^3$).

Métodos secundarios de evaluación del polvo:

Métodos direccionales: Cabezas colectoras de polvo que se colocan sobre un pie formando ángulos de 90° entre si. Están provistas de aberturas por donde puede entrar el aire, y de unos depósitos interiores donde se recoge el polvo por gravedad. Se colocan durante la vida de la explotación, en diferentes puntos, para valorar los niveles aproximados de polvo en la dirección del viento dominante.

El espacio temporal de medida es de 10 a 30 días, al cabo de los cuales se recogen las muestras y se someten a tratamiento y medida. Este sistema es el más utilizado actualmente en Gran Bretaña en minas a cielo abierto de carbón.

Perfiles de exposición: Se emplea un muestreador múltiple para la determinación directa de la emisión de polvo fugitivo en una sección transversal. Estos equipos tienen la ventaja de que miden el polvo y la velocidad del viento, lo que permite ajustar el perfil de exposición a las condiciones de desmuestre (figura 39).

Sistema de muestreo por globos: Es un sistema de muestreo tridimensional de polvo fugitivo desarrollado para minas a cielo abierto. Consta de globos aerostáticos fijados al suelo por cuerdas en las que a distintas alturas se sitúan recipientes colectores (figura 40). Sólo se usa si las medidas a nivel de suelo son inapropiadas.

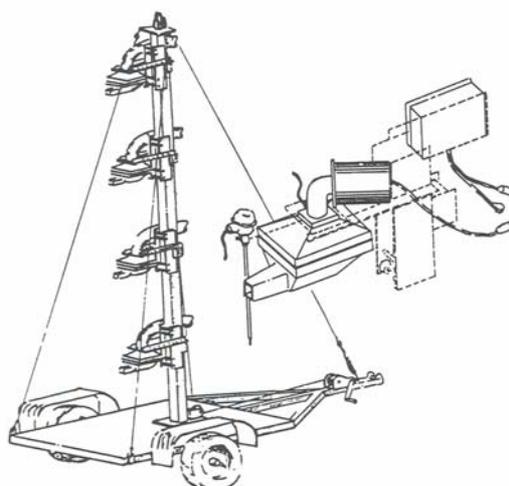


Figura 39: Perfil de exposición

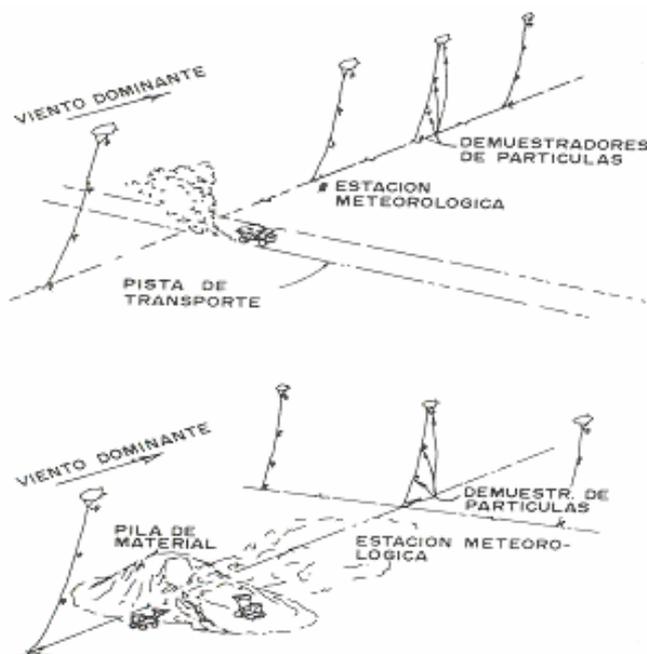


Figura 40: Sistema de muestreo por globos

5.-LEGISLACIÓN DE REFERENCIA SOBRE POLVO EN EL AMBIENTE

Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico.

Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de Diciembre, de protección del ambiente atmosférico.

Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a dióxido de azufre y partículas.

ITC 07.1.04. publicada con fecha 30/01/1991 en el número 260 del BOE, por la que se regulan las condiciones ambientales y de lucha contra el polvo en las industrias extractivas a cielo abierto, instalaciones de tratamiento, procesado, manipulación y almacenamiento de minerales, áridos y rocas industriales.

6.-SISTEMAS DE CONTROL DEL POLVO

Si los sistemas de control de polvo están bien diseñados, mantenidos y operados, pueden reducir las emisiones de polvo y el riesgo al que están expuestos los operarios.

La reducción del polvo necesita de tres fases:

- Prevención
- Control y eliminación
- Dilución

Técnicas de control y eliminación del polvo:

- Sistemas de captación: Usan la fuerza de un ventilador para extraer el aire contaminado y llevarlo a un colector donde, mediante filtros, o el propio diseño del aparato, se limpia.
- Sistemas de eliminación por vía húmeda: Mojan el material inmovilizado con agua y reducen la tendencia a la generación de polvo.
- Pulverizadores de agua: Pulverizado fino de agua sobre la nube de polvo. Las finas partículas de agua se unen a las de polvo formando compuestos demasiado pesados para ser transportados por el aire.

Ninguno de estos sistemas puede emplearse sobre el polvo generado en una voladura. Hipotéticamente, podrían usarse vehículos de riego para fijar el polvo de la cobertera, pero se trabaja con barrenos secos debido a la dificultad de cargar los tiros con agua. Además, hay explosivos como el Anfo que no se pueden usar en presencia de agua.

Técnicas de control y eliminación del polvo en voladuras:

- Retirada de la superficie del detritus procedente de la perforación de los barrenos. Es caro.

- Utilizar como retacado material granular de la perforación, o tacos de arcilla, que no generan polvo.
- Modos operativos que reduzcan la generación de polvo.
- Establecer condiciones de permanencia en zonas de riesgo.
- Mantenimiento de los equipos y sistemas de protección.
- Correcto diseño de la voladura para controlar las proyecciones.

En la figura 41 se muestra un camión de riego contra el polvo en la ejecución de una carretera.



Figura 41: Vehículo de riego

**CAPÍTULO 2: CÁLCULOS DE EMISIONES
EN PARVAS MEDIANTE LAS
FORMULACIONES EPA**

1.-CÁLCULO DE EMISIONES EN PARVAS. ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA

Hay diversos métodos aproximados para calcular los factores de emisión de material particulado en apilamientos (Aparicio, 1999 [29]). Generalmente son fórmulas empíricas en las que intervienen factores como la humedad del material o su granulometría, pero que desprecian factores geométricos o de forma del apilamiento. A continuación expondremos brevemente algunos de ellos.

2.-FORMULACIONES INDEPENDIENTES DE LA FORMA DEL APILAMIENTO

El desarrollo de un factor de emisión empírico para las áreas de apilamiento implica la valoración de tres tipos de actividades que combinadas contribuyen a las emisiones de polvo. Los procesos que contribuyen a las emisiones son:

- Transferencias de materiales, es decir, cuantificar la cantidad de material que entra y que sale del stock.
- La erosión que el viento ejerce sobre áreas abiertas.
- Los movimientos de los vehículos en las proximidades de las pilas de material.

En el caso de los apilamientos, habrá que valorar los factores que influyen en la emisión de polvo, para cada una de las actividades anteriormente citadas, intentando personalizar las variables para cada caso en concreto.

En primer lugar se halla el *factor de emisión de carga y descarga*, mediante la siguiente fórmula.

$$F_{cd} = 0.5 \cdot \frac{0.00224 \cdot \left[\frac{V_m}{8.045} \right]^{1.3}}{\left[\frac{H}{2} \right]^{1.4}}$$

donde:

F_{cd} = Factor de carga y descarga (kg/t).

V_m = Velocidad media del viento (km/h).

H = Contenido de humedad (%).

Una vez calculado este factor, el segundo paso es calcular el *factor de erosión del viento*, mediante la siguiente fórmula:

$$Fe_{\text{viento}} = 0.0125 \cdot \left[\frac{C_{\text{sil}}}{1.5} \right] \cdot \left[\frac{365 - d}{235} \right] \cdot \left[\frac{T}{15} \right] \cdot \left[\frac{Ta}{90} \right]$$

donde:

Fe_{viento} = Factor de erosión debido al viento (kg/t).

C_{sil} = Contenido en tanto por ciento de sílice.

d = Días de lluvia al año.

T = Porcentaje de tiempo en el que la velocidad del viento es superior a los 19 km/h.

Ta = Tiempo de almacenamiento (días).

El último factor característico de los procesos que contribuyen a las emisiones de polvo es el *factor de actividades*, representado por la ecuación:

$$Fe_{\text{act}} = 0.025 \cdot \left[\frac{C_{\text{sil}}}{1.5} \right] \cdot \left[\frac{365 - d}{235} \right] \cdot [T_{\text{act}}]$$

donde:

Fe_{act} = Factor de actividades (kg/t).

C_{sil} = Contenido en tanto por ciento de sílice.

d = Días de lluvia al año.

T_{act} = Factor de actividad del vehículo. Este factor del vehículo se cifra en Estados Unidos como 0.25, siendo aplicable a canteras y graveras.

Una vez calculados los tres factores, el siguiente paso es hallar el factor combinado de emisión de la pila de almacenamiento, para ello se sumarán los factores obtenidos anteriormente:

$$\delta = F_{\text{cd}} + Fe_{\text{viento}} + Fe_{\text{act}}$$

La emisión total de polvo procedente del apilamiento se hallará multiplicando el factor combinado de emisión por la cantidad de material tratado y por el rendimiento que tenga el sistema de eliminación de polvo con el que se trabaje:

$$\text{Emisión} = \delta \cdot Q \cdot \xi$$

Si, por ejemplo, el acopio está formado por dos clases de materiales, un material lavado y otro sin lavar, cada uno sometido a un tipo de control de polvo, para hallar la emisión total se deberá estudiar cada tipo por separado.

Otro factor de emisión es recogido por Cowherd: Acción del viento en pilas de material.

$$e_{cc} = 0.05 \cdot \left(\frac{s}{1.5}\right) \cdot \left(\frac{d}{235}\right) \cdot \left(\frac{F}{15}\right) \cdot \left(\frac{D}{90}\right)$$

donde:

e_{cc} = lb/t de material debido a la acción del viento.

d = Número de días secos por año.

F = Porcentaje de tiempo en el que el viento es superior a 12 millas/h.

D = Duración del apilado (días).

s = Contenido en limo del material (%).

Y por último se dispone de un último factor de emisión para superficies expuestas a la erosión del viento:

$$e_{es} = 3400 \cdot \left[\frac{\left(\frac{e}{50}\right) \cdot \left(\frac{5}{15}\right) \cdot \left(\frac{f}{25}\right)}{\left(\frac{P-E}{50}\right)^2} \right]$$

donde:

e_{es} = lb de partículas/acre.año de terreno expuesto.

e = Índice de erosión superficial (t/acre/año).

s = Contenido de limo del material superficial (%).

f = Porcentaje de tiempo que el viento supera las 12 millas/h a una altura de 1 pie del suelo.

P-E = Índice de Evaporación y Precipitación Thornthwaite de los 12 meses.

El hecho de que el polvo sea desplazado y dirigido por el viento hace que su difusión dependa de un gran número de factores, algunos de difícil cuantificación:

- Estado del suelo y tipo de vehículo sobre la superficie y/o equipo generador de polvo.
- Estación del año y hora del día.
- Velocidad y dirección del viento.
- Turbulencia del aire.
- Humedad y temperatura del aire.
- Relación que se establece entre la dirección del viento y los efectos de la lluvia caída en los días inmediatos precedentes.
- Rugosidad del terreno, existencia de taludes de excavación y terraplenes naturales o artificiales.
- Vegetación y otros obstáculos, en general.
- Formulaciones dependientes del apilamiento.

3.-FORMULACIONES EPA

3.1.-INTRODUCCIÓN

Una norma que sí tiene en cuenta estos factores es la EPA AP42 sección 13.2.5, que a continuación explicaremos por ser fundamental su comprensión para las explicaciones de la investigación desarrollada.

La acción del viento sobre pilas de almacenaje o sobre superficies de material sin un fin industrial determinado da lugar a emisiones de polvo. Las fuentes desde las cuales se produce esta emisión se caracterizan generalmente por tratarse de superficies rugosas impregnadas de material no erosionable

(partículas grandes que se aproximan a 1 cm de diámetro) (Cowherd, 1983 [30]).

Pruebas de campo realizadas sobre pilas de carbón y otros materiales expuestos a la intemperie (Muleski, 1985 [31]), han demostrado que las velocidades de viento umbral a 15 cm (en altura) de la pila son superiores a 5 m/s, y a 7 m en altura sobre la pila son superiores a 10 m/s. También se ha visto que, durante la erosión, los ratios de emisión tienden a decaer muy rápidamente (en unos minutos). Es decir, estas superficies de material agregado se caracterizan por la distribución finita de material erosionable (masa/área) definido como potencial de erosión. Cuando se forma una costra natural de material sobre la superficie de una pila, se reduce el potencial de erosión.

3.2.-EMISIONES Y PARÁMETROS DE CORRECCIÓN

Si los valores típicos de la velocidad de viento umbral a 15 cm son válidos para alturas de sensor de viento determinadas (7 – 10 m), los valores resultantes sobrepasan los valores extremos superiores de la velocidad del viento continua observada en muchas zonas del país. Es decir, la velocidad media atmosférica del viento no es suficiente para detener la erosión del viento producida en superficies planas del tipo probado. Sin embargo, las ráfagas de viento podrían extinguir una porción importante del potencial de erosión. Las emisiones de polvo evaluadas deberían relacionarse con las ráfagas de viento de mayor magnitud ya que el potencial de erosión aumenta rápidamente al aumentar la velocidad del viento.

La variable meteorológica (medida de forma rutinaria) que mejor caracteriza la magnitud de las ráfagas del viento, es la llamada “milla rápida” (fastest mille). Esta cantidad representa la velocidad de viento correspondiente a la milla entera del viento en movimiento que ha pasado por un anemómetro situado a 1 milla del obstáculo en la menor cantidad de tiempo. Se anotan medidas diarias de la “milla rápida” en los Datos Climatológicos Locales (LCD). La duración de la “milla rápida”, aproximadamente 2 minutos (30 millas por hora), se asocia con el proceso erosivo, extendiéndose éste entre 1 y 4 minutos.

Debe considerarse, sin embargo, que el viento máximo puede superar de forma significativa la “fastest mile” o racha de viento mas rápida diaria.

El perfil de velocidad de viento en la capa límite superficial de un obstáculo sigue la siguiente distribución logarítmica:

$$u(z) = \frac{u^*}{0.4} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

donde:

u es la velocidad del viento.

u^* es la velocidad friccional.

z es la altura sobre la superficie.

z_0 es la rugosidad.

0.4 es la constante de von Karman.

Según la ecuación (1), la velocidad friccional (u^*) es una medida del esfuerzo cortante del viento sobre la superficie erosionable. La rugosidad (z_0) es la altura a la cual la velocidad del viento se hace cero. Estos parámetros se ilustran en la figura 42 para una rugosidad de 0.1 cm.

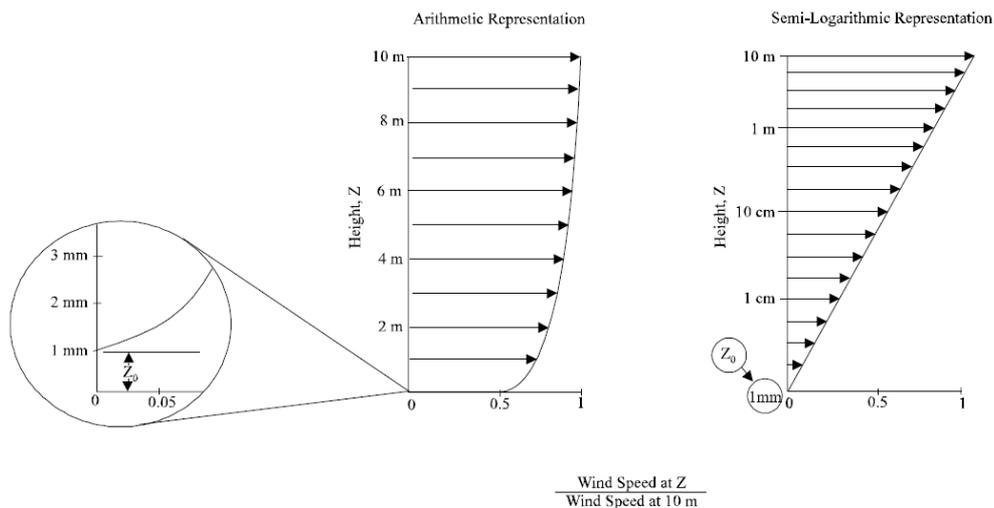


Figura 42: Perfil logarítmico del viento

Las emisiones generadas por la erosión del viento también dependen de la frecuencia de perturbación de la superficie erosionable y es que, cada vez que una superficie se perturba, el potencial de erosión adquiere un nuevo valor.

Se define perturbación como aquella acción que resulta de la exposición a la intemperie de un material superficial. En una pila de almacenaje tendrá lugar una perturbación cada vez que se añada material a la pila o se remueva el material de ésta. Este fenómeno también puede ser resultado de voltear material superficial con un espesor superior al tamaño del material presente.

3.3.-PREDICCIÓN DEL FACTOR DE EMISIÓN

Definición del factor de emisión

El factor de emisión que regula las emisiones de polvo superficial generadas por perturbaciones (AP-42, 1988 [32]) obedece a la siguiente expresión:

$$\text{Factor_emision} = K \sum_{i=1}^N P_i \quad (2)$$

y se puede expresar en unidades de gramo por metro cuadrado (g/m^2) donde:

K es un factor variable en función del tamaño de las partículas de polvo.

N es el número de perturbaciones por año.

P_i es el potencial de erosión correspondiente a la milla rápida del viento (g/m^2).

El factor multiplicador K varía en la ecuación (2) en función del tamaño de la partícula tal como se muestra en la tabla 7.

Factor multiplicador K para la Ecuación (2)			
30 μm	<15 μm	<10 μm	<2.5 μm
1	0.6	0.5	0.2

Tabla 7: Factor multiplicador de tamaños

Esta distribución del tamaño de partícula dentro de una fracción inferior a 30 μm es comparable a las distribuciones proporcionadas por otras fuentes de polvo fugitivo donde la velocidad del viento es un factor.

En el cálculo de los factores de emisión, cada zona superficial asociada a una frecuencia de perturbación diferente, debe ser tratada por separado. En el caso de una superficie perturbada diariamente, $N=365$ por año y para una superficie perturbada cada 6 meses, $N= 2$ por año.

El potencial de erosión para una superficie expuesta a la intemperie, viene dado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} P &= 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \\ P &= 0 \text{ for } u^* \leq u_t^* \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

u^* es la velocidad friccional (m/s).

u_t es la velocidad friccional límite (m/s).

Cada proceso erosivo debe ser tratado por separado debido a la forma no lineal de la función potencial de erosión.

Las ecuaciones (2) y (3) se aplican solamente a materiales secos con un potencial de erosión limitado. El cálculo resultante es válido únicamente durante un periodo de tiempo tan largo como lo sean las perturbaciones. Las emisiones calculadas representan acciones intermitentes y no deben aplicarse directamente a modelos de dispersión que asumen ratios de emisión en estados estacionarios.

Para superficies en las cuales no hay costras, la velocidad de fricción umbral se estima mejor a partir del material seco del suelo. Una simple prueba tamizando la superficie del suelo puede utilizarse para determinar la distribución granulométrica.

3.4.-PROCEDIMIENTO DE CAMPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD FRICCIONAL LÍMITE

El procedimiento para la determinación de la velocidad friccional límite, aparece en la bibliografía a partir de (Chepil, 1952 [33]), que nos determina los pasos a seguir en el laboratorio una vez recogida una muestra representativa en el campo.

- Se preparan una serie de tamices con los siguientes tamaños: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm y 0.25 mm. Se coloca un colector debajo del tamiz inferior (0.25 mm).
- Se recoge la muestra representativa de la capa superficial de las partículas desprendidas apartando aquellas rocas que superen 1 cm de diámetro. La zona que se muestrea debe ser superior a 30 cm².
- Verter la muestra en el tamiz superior (4 mm) y tapanlo.
- Agitar el tamiz con la mano utilizando un movimiento circular en el plano horizontal. Realizar 20 movimientos circulares a una velocidad justa para alcanzar una corriente relativa entre el tamiz y las partículas.
- Examinar las cantidades relativas de partículas dentro de cada tamiz.
- Los resultados del tamizado se pueden interpretar utilizando la tabla 8. Alternativamente, la velocidad friccional umbral por erosión se puede determinar a partir de la distribución por tamaños del material utilizando la relación gráfica descrita por (Gillete, 1985 [34]). Si el material contiene partículas no erosionables demasiado grandes para el tamiz (mayores a 1 cm de diámetro), el efecto de estas partículas aumentará la velocidad friccional umbral (Cowherd et. al., 1988 [35]).
- Determinar la velocidad de fricción umbral a partir de la tabla adjunta (tabla 9).

Tamiz de Tyler	Tamaños	Punto intermedio	u_t^* (cm/s)
5	4		
9	2	3	100
16	1	1.5	76
32	0.5	0.75	58
60	0.25	0.375	43

Tabla 8: Procedimiento de campo para determinar la velocidad friccional límite

Velocidades friccionales límites correspondientes a diversos tipos de superficies, se han determinado utilizando medidas en un túnel de viento. Estos valores se recogen en la tabla 9.

3.5.-PRÁCTICA OPERATIVA

La milla rápida del viento para periodos entre perturbaciones, puede obtenerse a partir de los resúmenes mensuales LCD de la estación meteorológica más cercana al sitio en cuestión (N.C.C., [36]). Estos resúmenes aportan valores efectivos de la milla rápida para cada día de un mes dado. Tomar valores medios para esta variable no es adecuado debido a que el potencial de erosión es una función altamente no lineal de la milla rápida. La altura de los anemómetros en las estaciones meteorológicas se recoge en referencias indicadas (Changery, 1978 [37]) y debería corregirse a 10 m de altura utilizando la ecuación (1).

MATERIAL	VELOCIDAD FRICCIONAL LÍMITE	RUGOSIDAD (CM)	VELOCIDAD DE VIENTO LÍMITE A 10 M (M/S)	
			Z ₀ =Act	Z ₀ =0.5
Material pesado	1.02	0.3	21	19
Capa de balasto	1.33	0.3	27	25
Carbón del suelo (alrededor de la pila)	0.55	0.01	16	10
Pila de carbón sin costra	1.12	0.3	23	21
Restos de material no recogido ^a	0.62	0.06	15	12
Polvo fino de carbón amontonado	0.54	0.2	11	10

^a Ligeramente con costra

Tabla 9: Velocidades friccionales límite

Para transformar el valor de la milla rápida (u^+) de un anemómetro de referencia colocado a 10 m de altura, en su velocidad friccional equivalente (u^*), el perfil logarítmico del viento sigue la siguiente relación:

$$u^* = 0.053 u_{10}^+ \quad (4)$$

donde:

u^* es la velocidad friccional (m/s).

u_{10}^+ es la milla rápida del viento a 10 m de altura.

Esta ecuación asume una rugosidad de 0.5 cm de altura y sólo se aplica a pilas de poca inclinación o zonas superficiales que se vean muy poco afectadas por la acción del viento.

Cuando el cociente entre el radio de la pila y la altura de la misma exceda de 0.2, será necesario dividir el área de la pila en áreas más pequeñas que representen distintos puntos de exposición al viento (tabla 10).

Subzonas de la pila	Porcentaje del área total de la pila			
	Pila A	Pila B1	Pila B2	Pila B3
0.2a	5	5	3	3
0.2b	35	2	28	25
0.2c	NA	29	NA	NA
0.6a	48	26	29	28
0.6b	NA	24	22	26
0.9	12	14	15	14
1	NA	NA	3	4

NA= porcentaje nulo

Tabla 10: Distribución por zonas del ratio u_s/u_r

Para dos formas representativas de pila (pila cónica y parva truncada, 37° ángulo de talud), los cocientes entre la velocidad del viento superficial (u_s) y la

velocidad del viento (u_r) se han derivado de estudios en túneles de viento (Axetell & Cowherd, 1984 [38]). Los resultados que se muestran en la figura 35 se corresponden con unas pilas cuya altura es de 11m, el anemómetro está situado a 10 m de altura y la rugosidad es de 0.5 cm. El viento superficial se toma a 25 cm de la superficie. La fracción de área correspondiente a cada contorno se especifica en la tabla 10.

Los perfiles de u_s/u_r en la figura inferior (figura 43) se pueden utilizar para estimar la distribución de velocidad de fricción superficial entorno a pilas de formas similares siguiendo el siguiente procedimiento:

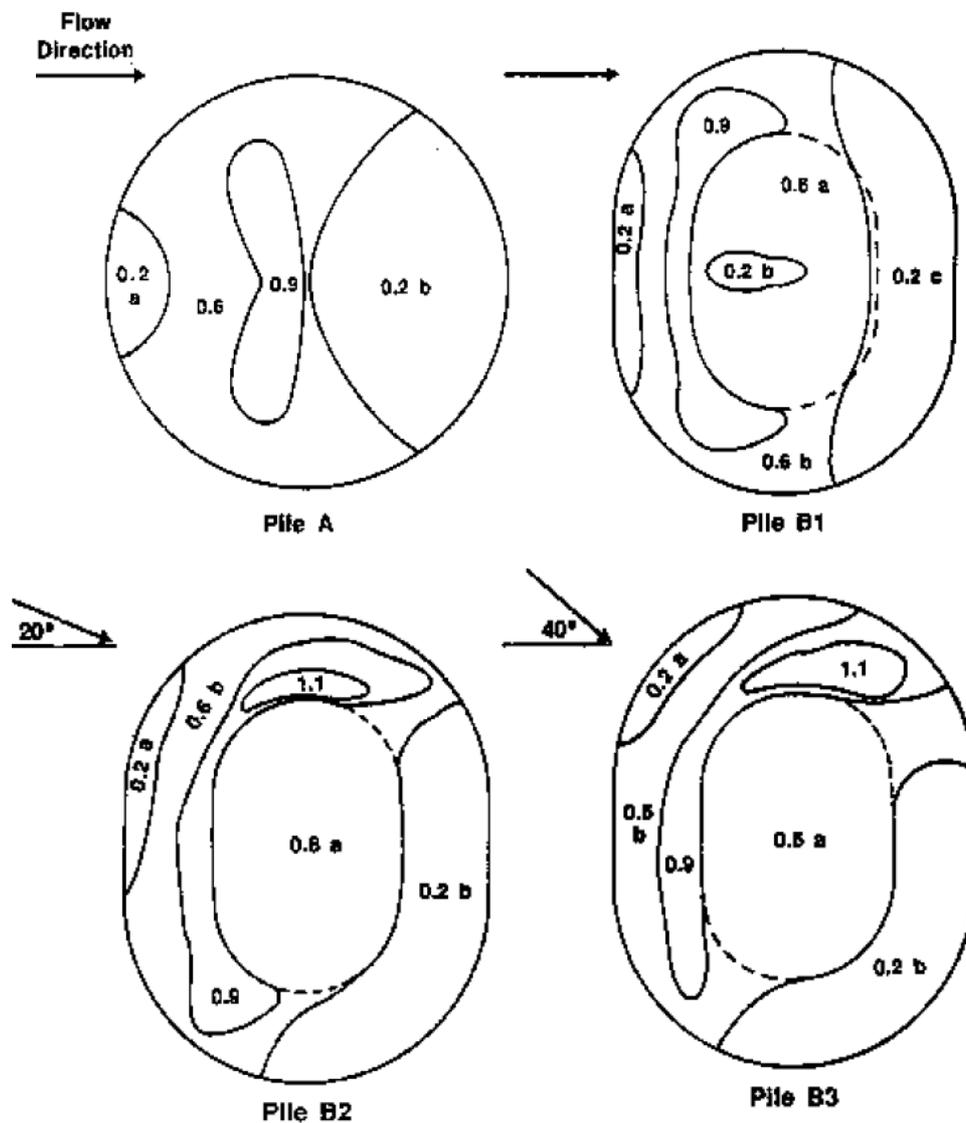


Figura 43: Contornos superficiales de velocidades de viento: u_s/u_r

Convertir el valor de la milla rápida (u^+) del anemómetro de altura z en su equivalente para el anemómetro de 10 m de altura utilizando la ecuación (1).

$$u_{10}^+ = u^+ \frac{\ln(10/0.005)}{\ln(z/0.005)} \quad (5)$$

donde se asume una rugosidad de 0.5 cm (0.005 m). En caso de que la rugosidad adopte otro valor, debería modificarse este parámetro en la ecuación anterior. Utilizar la subfigura más apropiada de las que aparecen en la figura 35, atendiendo a la forma y orientación de la pila en función de la milla rápida del viento, para obtener la distribución de velocidad superficial (u_s).

$$u_s^+ = \frac{(u_s)}{u_r} u_{10}^+ \quad (6)$$

Para cualquier subzona de la superficie de la pila que tiene un rango pequeño de velocidad de viento superficial, la velocidad friccional equivalente se calcula a partir de una variación de la ecuación (1).

$$u^* = \frac{0.4u_s^+}{25 \ln 0.5} = 0.10u_s^+ \quad (7)$$

El procedimiento anterior se pone en práctica de la siguiente forma:

- Determinar la velocidad friccional umbral (límite) para el material erosionable que nos interese (tabla 9 o calcularla a partir de la distribución granulométrica del material).
- Dividir el área de la superficie expuesta al viento en subáreas de frecuencia constante de perturbación (N).
- Calcular los valores de la milla rápida (u^+) para cada frecuencia de perturbación y adaptarlos a una altura de 10 m utilizando la ecuación (5).
- Transformar los valores de la milla rápida (u_{10}) en las velocidades friccionales equivalentes (u^*) considerando la ecuación (4) en el caso de exposiciones al viento de superficies no muy altas y utilizando las ecuaciones (6) y (7) en caso contrario.

Para superficies elevadas (pilas), se subdividen las áreas de constante N en subzonas de constante u^* (es decir, según los valores de u_s/u_r de la figura 35 y la tabla 10) y se determina el tamaño de cada subzona.

Tratando cada subzona (subárea) (con N y u^* constantes) de forma separada se calcula, para cada periodo entre perturbaciones, el potencial de erosión (P_i) utilizando la ecuación (3) y el factor de emisión utilizando la ecuación (2).

Multiplicar el factor de emisión de cada subzona por el área de esta última y añadir las contribuciones de emisión de todas las subzonas. Se elige un solo valor de milla rápida (durante un período anual) para calcular las emisiones máximas.

La ecuación del factor de emisión expuesta anteriormente asume que todo el potencial de erosión correspondiente a la milla rápida del viento se pierde durante el periodo entre perturbaciones. Podría ser discutible que el factor de emisión sobrestima las emisiones de polvo debido a que el proceso de la milla rápida sólo dura cerca de 2 minutos. Sin embargo, hay otros aspectos del proceso erosivo del viento que compensan esta desigualdad:

- La milla rápida contiene los valores máximos del viento que exceden del valor medio.
- Siempre que tiene lugar la medida de la milla rápida, hay generalmente, un número de periodos de velocidades de viento inferiores que contienen ráfagas de viento del mismo orden que la milla rápida.

Un mayor problema radica en la probabilidad de sobre predecir las emisiones erosivas del viento en el caso de superficies perturbadas con poca frecuencia.

Ejemplo 1: Cálculo de las emisiones por erosión del viento para pilas cónicas.

Una pila cónica de carbón de 11 m de altura y 29.2 m de diámetro, contiene 2000 miligramos de carbón con una densidad de 800 kg/m^3 . El área total de la superficie expuesta se calcula de la siguiente manera:

$$S = \pi r \sqrt{r^2 + h^2} = 3.14(14.6) \sqrt{(14.6)^2 + (11.0)^2} = 838 \text{m}^2$$

Se agrega carbón a la pila por medio de un brazo apilador y cada 3 días se añade a la pila 250 mg de carbón (el 12.5 % de la capacidad de la pila) para

restaurar la capacidad de ésta. Se asume que la perturbación que genera esta operación sólo afecta a la porción del área dónde ocurre esta actividad, de tal forma que el resto de la superficie se mantiene intacta. También se acepta que el apilado crea una nueva superficie que recompone al área original.

Para determinar cada contribución o aporte a las emisiones anuales totales, deben realizarse una gran cantidad de cálculos ya que la frecuencia de perturbación de la pila es muy elevada. Se toma un solo mes para ilustrar un ejemplo.

Paso 1: En ausencia de datos de campo que permitan estimar la velocidad friccional límite, se toma el valor 1.12 m/s (tabla 9).

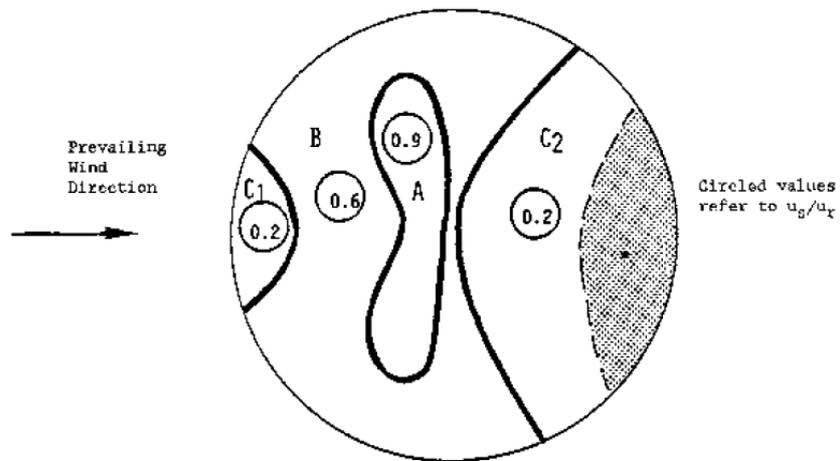
Paso 2: Salvo para áreas muy pequeñas correspondientes a la base de la pila (figura 35) el resto de área del obstáculo se ve perturbado cada 3 días, a lo cual se le asocia un valor de $N=120$ por año. Esto demuestra que la contribución del área que se ve afectada de forma diaria es insignificante y no necesita ser tratada aparte en los cálculos.

Paso 3: El procedimiento de cálculo implica la determinación de la milla rápida para cada periodo de perturbación. La figura 44 muestra un rango de valores representativos (periodo de un mes). Los valores se han separado en periodos de 3 días y se indica el valor máximo de cada periodo. En el ejemplo, la altura del anemómetro es de 7 metros, de forma que se necesita realizar una corrección a 10 m para la milla rápida. De la ecuación (5):

$$u_{10}^+ = u_7^+ \frac{\ln(10/0.005)}{\ln(7/0.005)} \quad u_{10}^+ = 1.05u_7^+$$

Paso 4: El siguiente paso es convertir el valor de la milla rápida para cada periodo de 3 días en las velocidades friccionales equivalentes asociadas a cada régimen del viento (u_s/u_r) utilizando las ecuaciones (6) y (7).

En figura 36 se muestra el patrón de la velocidad de viento superficial. La siguiente figura, (figura 37) se tabulan los porcentajes de las áreas asociadas a cada régimen de la velocidad del aire.



Pile Surface			
Area ID	u_s/u_r	%	Area (m ²)
A	0.9	12	101
B	0.6	48	402
C ₁ + C ₂	0.2	40	335
TOTAL			838

Figura 44: Régimen correspondiente de la velocidad del viento

En la tabla 11 se muestran las velocidades de fricción. Si nos fijamos, sólo 3 periodos tienen una velocidad friccional que excede el valor límite de 1.12 m/s para pilas de carbón con costra. Estos tres valores tienen lugar cuando $u_s/u_r=0.9$.

Paso 5: Este paso no es necesario porque en los cálculos solo se considera una frecuencia de perturbación. Está claro que la zona pequeña de perturbación diaria ($u_s/u_r=0.2$) nunca se corresponde con las velocidades de viento que exceden el valor límite.

Pasos 6 y 7: Se tabulan y se suman las emisiones de cada área (tabla 12). El potencial de erosión se calcula atendiendo a la ecuación (3). Por ejemplo, el cálculo para el segundo periodo de 3 días es:

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*)$$

$$P_2 = 58(1.23 - 1.12)^2 + 25(1.23 - 1.12)$$

$$P_2 = 0.70 + 2.75 = 3.45g/m^2$$

Las emisiones de material particulado mayores de 10 µm (PM-10) se obtienen de multiplicar el factor $k=0.5$ por el potencial de erosión (P) y por el área de la pila afectada (A). Como muestra la tabla 12 los resultados de estos cálculos indican una emisión mensual de PM-10 de 780 gramos.

Local Climatological Data
Monthly Summary



Wind					Date
Resultant Dir.	Resultant Speed M.P.H.	Average Speed M.P.H.	Fastest Mile		
			Speed M.P.H.	Direction	
13	14	15	16	17	22
30	5.3	6.9	9	36	1
01	10.5	10.6	(14)	01	2
10	2.4	6.0	10	02	3
13	11.0	11.4	16	13	4
12	11.3	11.9	15	11	5
20	11.1	19.0	(29)	30	6
29	19.6	19.8	(30)	30	7
29	10.9	11.2	17	30	8
22	3.0	8.1	15	13	9
14	14.6	15.1	23	12	10
29	22.3	23.3	(31)	29	11
17	7.9	13.5	23	17	12
21	7.7	15.5	18	18	13
10	4.5	9.6	(22)	13	14
10	6.7	8.8	13	11	15
01	13.7	13.8	(21)	36	16
33	11.2	11.5	15	34	17
27	4.3	5.8	12	31	18
32	9.3	10.2	14	35	19
24	7.5	7.8	(16)	24	20
22	10.3	10.6	16	20	21
32	17.1	17.3	(25)	32	22
29	2.4	8.5	14	13	23
07	5.9	8.8	15	02	24
34	11.3	11.7	(17)	32	25
31	12.1	12.2	16	32	26
30	8.3	8.5	16	26	27
30	8.2	8.3	(13)	32	28
33	5.0	6.6	10	32	29
34	3.1	5.2	9	31	30
29	4.9	5.5	8	25	31

For the Month:

30	3.3	11.1	31	29
				Date: 11

Figura 45: Ejemplo de millas rápidas de viento para periodos determinados

PERIODO 3 DÍAS	u_7^+		u_{10}^+		$u^* = 0.1 \cdot u_s^+ \text{ m/s}$		
	mph	m/s	mph	m/s	$u_s/u_r : 0.2$	$u_s/u_r : 0.6$	$u_s/u_r : 0.9$
1	14	6.3	15	6.6	0.13	0.4	0.59
2	29	13.0	31	13.7	0.27	0.82	1.23
3	30	13.4	32	14.1	0.28	0.84	1.27
4	31	13.9	33	14.6	0.29	0.88	1.31
5	22	9.8	23	10.3	0.21	0.62	0.93
6	21	9.4	22	9.9	0.2	0.59	0.89
7	16	7.2	17	7.6	0.15	0.46	0.68
8	25	11.2	26	11.8	0.24	0.71	1.06
9	17	7.6	18	8.0	0.16	0.48	0.72
10	13	5.8	14	6.1	0.12	0.37	0.55

Tabla 11: Ejemplo 1, cálculo de velocidades friccionales

3-Day Period	u^*	$u^* - u_t^*$ (m/s)	P (g/m ²)	ID	Pile surface Area (m ²)	kPA (g)
2	1.23	0.11	3.45	A	101	170
3	1.27	0.15	5.06	A	101	260
4	1.31	0.19	6.84	A	101	350
TOTAL						780

Tabla 12: Ejemplo 1, cálculo de emisiones PM10

Ejemplo 2: Superficie plana cubierta de polvo de carbón.

Una área circular plana de 29.2 metros de diámetro se cubre con polvo de carbón recogido de la pila cónica descrita en el ejemplo anterior. El área superficial se calcula de la siguiente manera:

$$s = \frac{\pi}{4} d^2 = 0.785 \cdot (29.2)^2 = 670\text{m}^2$$

Paso 1: En ausencia de datos de campo para estimar la velocidad de fricción límite, se toma el valor de 0.54 m/s.

Paso 2: La totalidad del área superficial se expone a la intemperie durante 1 mes después de quitar la pila y $N=1/\text{yr}$.

Paso 3: El valor más alto de la milla rápida se alcanza, para un periodo de 30 días, en el día 11. La altura del anemómetro de referencia es de 7 metros, de modo que se necesita realizar la conversión para el valor de la milla rápida. Del paso 3 del ejemplo anterior se tiene que:

$$u^+ = 1.05 u^*$$

así que:

$$u^+ = 33\text{mph}$$

Paso 4: La ecuación 4 se utiliza para convertir el valor de la milla rápida de 14.6 m/s (33 mph) a la velocidad friccional equivalente de 0.77 m/s. Este valor es superior al de la velocidad friccional límite del Paso 1 de modo que tiene lugar la erosión.

Paso 5: Este paso no es necesario porque en este caso sólo hay una frecuencia de perturbación para la totalidad del área.

Paso 6 y 7: Las emisiones de PM-10 se calculan multiplicando el factor $k=0.5$ por el potencial de erosión y por el área. El potencial de erosión se calcula a partir de la ecuación (3):

$$\begin{aligned} P &= 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \\ P &= 58(0.77 - 0.54)^2 + 25(0.77 - 0.54) = \\ &= 3.07 + 5.75 = 8.82\text{g/m}^2 \end{aligned}$$

Y las emisiones de PM-10 que se producen durante 1 mes vienen dadas por:

$$E = (0.5)(8.82\text{g/m}^2)(670\text{m}^2) = 3.0\text{hg}$$

CAPÍTULO 3: CÁLCULOS DE LAS EMISIONES EN PARVAS MEDIANTE CFD

1.-CONCEPTOS GENERALES

Para introducirnos en la dinámica de fluidos computacional debemos hablar sobre las ecuaciones que rigen los problemas de flujo de fluidos, éstas son tres (CFX, 2004 [39]):

- *Ecuaciones de continuidad*: es aquella ecuación diferencial que resulta de la conservación de la masa.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot V = 0$$

- *Ecuaciones de energía*: se incluye en aquellos flujos compresibles o incompresibles en los que los gradientes de temperatura son importantes y está íntimamente relacionada con los esfuerzos cortantes que provoca la viscosidad.

$$\rho \frac{D\tilde{u}}{Dt} = K \nabla^2 T - p \nabla \cdot V$$

- *Ecuaciones de Navier-Stokes*: se tratan de tres ecuaciones diferenciales que resultan de la aplicación de la segunda ley de Newton. (A continuación aparecen representadas en forma vectorial).

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V$$

Serán muy importantes para el cálculo de nuestros modelos, ya que la resolución directa de estas ecuaciones de Navier-Stokes, o DNS ('Direct Numerical Simulation') son la manera más evidente y precisa de predecir un flujo turbulento. A demás, hay que tener en cuenta, que sólo permiten soluciones analíticas para geometrías simples.

Y a partir de ellas se conocen los sistemas de ecuaciones que describen los procesos de momento, calor y transferencia total, así como la combustión y los modelos de turbulencia.

Estas ecuaciones forman un sistema de "ecuaciones diferenciales parciales" (PDEs), acopladas casi en forma lineal. A causa de los términos no lineales de estas ecuaciones diferenciales parciales, los métodos analíticos dan muy pocas

soluciones. En general, las soluciones analíticas son factibles sólo si estas ecuaciones diferenciales parciales pueden hacerse lineales, o porque los términos no lineales son eliminados de una manera natural, o porque los términos no lineales son pequeños comparados con otros de modo que pueden ser ignorados.

Si no se pueden ignorar las no linealidades en las ecuaciones diferenciales parciales regentes, situación que se presenta en la mayoría de los flujos de ingeniería, entonces se necesita utilizar los métodos numéricos para llegar a obtener soluciones.

2.-CFD

2.1.-INTRODUCCIÓN

La resolución de estas ecuaciones del flujo fluido (en una forma especial) sobre una región de interés, con condiciones (conocidas) especificadas en el límite de esa región, lo realiza la Dinámica de Fluidos Computacional o simplemente CFD (Computacional Fluid Dynamics) y lo hace a partir de un lenguaje de programación binario regido por ceros y unos, denominados códigos numéricos.

Con la llegada de los ordenadores de alta velocidad y alta capacidad de almacenamiento se consiguió que la CFD resolviera muchos de los problemas de flujo, incluso los que se caracterizan por ser compresibles o incompresibles, laminares o turbulentos, químicamente reactivos o no reactivos, mono y multifásicos.

2.2.-HISTORIA

A partir de mediados de los años setenta, se consigue un avance en el entendimiento de las matemáticas complejas, lo que repercutirá a su vez en los algoritmos de solución usados en los cálculos del CFD.

En los ochenta, ya se disponía de ordenadores potentes y de un conocimiento mas profundo sobre la dinámica fluida, pero no era suficiente, y las simulaciones se dilataban mucho en el tiempo, por lo que el CFD era una herramienta usada casi exclusivamente en investigación. Se tuvo que esperar

hasta los avances mas recientes (como son los nuevos ordenadores junto con gráficos de gran alcance y la manipulación interactiva de los modelos 3-D) para que el cálculo avanzado de estos algoritmos se realizara en un tiempo razonable.

Como resultado de estos factores, la Dinámica de Fluido Computacional es una herramienta de diseño industrial establecida, ayudando a reducir escalas de tiempo y a mejorar procesos a través del mundo de la ingeniería. La CFD proporciona una alternativa rentable y exacta para el modelo a escala testificado, pudiendo realizar variaciones en la simulación del modelo siendo resueltas rápidamente, ofreciendo así ventajas obvias.

2.3.-MÉTODOS NUMÉRICOS DESARROLLADOS EN CFD

Los métodos numéricos desarrollados que se ocupan de las ecuaciones que rigen los problemas de flujo de fluidos mas utilizados son dos:

Métodos de diferencia finita (FDMs): en este caso, la técnica para discretizar el dominio, es considerar dos dominios distintos, el dominio espacial que se considera como un segmento y el dominio temporal considerado como un radio que emana cuando el tiempo es igual a 0 (es de extensión finita). Discretizamos el dominio espacial, reemplazándolo por puntos de retícula que pueden ser estacionarios o no, igualmente distribuidos o no. Mientras que el dominio temporal se discretiza cuando es reemplazado por niveles de tiempo igualmente incrementados.

Métodos de volumen finito (FVMs): es en el que se basa el CFX-5. En esta técnica la región de interés se divide en pequeñas sub-regiones, denominadas *Volúmenes de Control*. Estos volúmenes de control son celdas, que se construyen a partir de dos opciones, la primera de ellas es conocida como *método de vértice centrado*, (como límite de la celda elige la bisectriz entre una línea que une puntos de retícula adyacentes), y la otra opción se conoce como *método de celda centrada*, (como límite de celda elige puntos de retícula para 1D, líneas que conectan puntos en 2D y planos formados por líneas en 3D).

Para cada uno de estos volúmenes de control se particularizan y solucionan iterativamente las ecuaciones. Consecuentemente podemos obtener una

aproximación del valor de cada variable en los puntos específicos del dominio. De esta manera, se consigue una descripción completa del comportamiento del fluido.

Son tres los pasos principales mediante los cuales los métodos de volumen finito y diferencia finita generan soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales:

Discretizar el dominio: el dominio temporal y espacial continuo del problema debe ser sustituido por uno discreto, compuesto de puntos en una retícula o celdas y niveles de tiempo. La discretización utiliza el menor número de puntos/celdas y niveles de tiempo para obtener soluciones con la precisión deseada.

Discretizar las ecuaciones diferenciales parciales: las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el problema deben ser reemplazadas por un conjunto de ecuaciones algebraicas con los puntos/celdas de retícula y los niveles de tiempo como su dominio.

Especificar el algoritmo: el procedimiento paso a paso mediante el cual se obtienen soluciones en cada punto/celda de la retícula se deriva de las ecuaciones de diferencia finita o volumen finito cuando se pasa de un nivel de tiempo al siguiente debe ser descrito en detalle.

La diferencia principal entre los métodos de diferencia finita y volumen finito radica en la interpretación de las soluciones, ya que el primero considera la solución como una función de punto, por lo que la interpola entre distintos puntos de retícula y niveles de tiempo, mientras que el método de volumen finito promedia esta solución en cada una de las celdas o volúmenes de control.

Por otro lado hay que tener en cuenta, que estos dos métodos pueden dar lugar a ecuaciones algebraicas idénticas. Pero los métodos de volumen finito ofrecen varias ventajas. La primera es que la interpretación de la solución y el método de discretizar la ecuación diferencial parcial garantiza el valor correcto de la integral en cada celda y en todo el dominio espacial (es decir, las ecuaciones de volumen finito mantienen la conservación). La segunda es que

la celda no tiene que ser rectangular, de hecho puede tener cualquier forma, y que dicha forma puede variar de celda en celda mientras que no existan traslapes o espacios huecos entre ellas.

2.4.-APLICACIONES DEL CFD

El CFD es utilizado por los ingenieros y los científicos en una amplia gama de campos tales como:

- Procesos industriales: Vasos mezcladores, reactores químicos.
- Servicios: Ventilación de edificios.
- Salud y seguridad: Investigaciones sobre los efectos del fuego y del humo.
- Industria del motor: Modelos de combustión, aerodinámica del automóvil.
- Electrónica: Traspase térmico dentro y alrededor de circuitos.
- Ambiental: Dispersión de agentes contaminantes en aire o agua.
- Fuerza y energía: Optimización de los procesos de la combustión.
- Medicina: La sangre en su camino por los vasos sanguíneos.

3.-METODOLOGÍA OPERACIONAL

La metodología del CFD, se puede dividir en tres pasos o etapas, Geometría, Mallado y Resolución de los resultados, según el esquema que aparece en la figura 46.

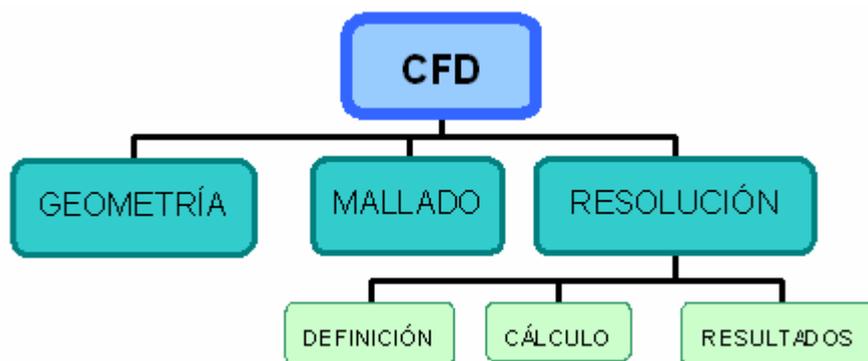


Figura 46: Metodología del CFD

En el organigrama anterior podemos ver que consta de tres fases, geometría, mallado y resolución de los resultados, y a su vez éste último se subdivide en otros tres, la definición del problema físico, el cálculo y la representación de estos resultados.

Geometría

En la primera etapa, se trata de generar la geometría del modelo que vamos a simular. Por lo que necesitamos un sólido geométrico cerrado. Este se puede conseguir a partir de varios programas informáticos, como son Autocad, Microstation, Catia, Ansys Workstation y *SolidWorks*, siendo este último el que usaremos para realizar la geometría de nuestro modelo.

Los pasos básicos implicados son:

- Definir la geometría de la región de interés.
- Crear regiones del flujo fluido, regiones sólidas y los nombres de aquellas superficies que serán las futuras condiciones de contorno, al llegar a la definición del problema físico.
- Fijar las características para el mallado.

El software a utilizar será el SolidWorks. Se trata de un programa que diseña modelos de forma rápida y precisa, en 3D (a partir de los cuales se pueden sacar diseños en 2D y dibujos) basados en componentes (y así poder reflejar cualquier cambio en una pieza, en todos los dibujos o ensamblajes asociados a dicha pieza).

El proceso de diseño se basa en:

- Identificar las necesidades del modelo.
- Generar los conceptos adecuados.
- Crear el modelo.

La creación de los modelos comienza con la creación de un *croquis*, a partir del cual se crean *operaciones*, de las que combinándolas podemos crear una pieza. Si después necesitamos crear relaciones entre piezas, crearemos un *ensamblaje*.

Un croquis es un perfil o sección transversal en 2D o en 3D. Comenzamos creando el croquis y se decide como se desea acotar, dónde se aplicaran relaciones de posición, etc. Ya finalizado, pasamos el perfil a 3D empleando las operaciones de extrusión o revolución. Las operaciones: se seleccionan y se decide el orden de su aplicación, etc. Por último si queremos varias piezas que se acoplen, usaremos los ensamblajes (figura 47).

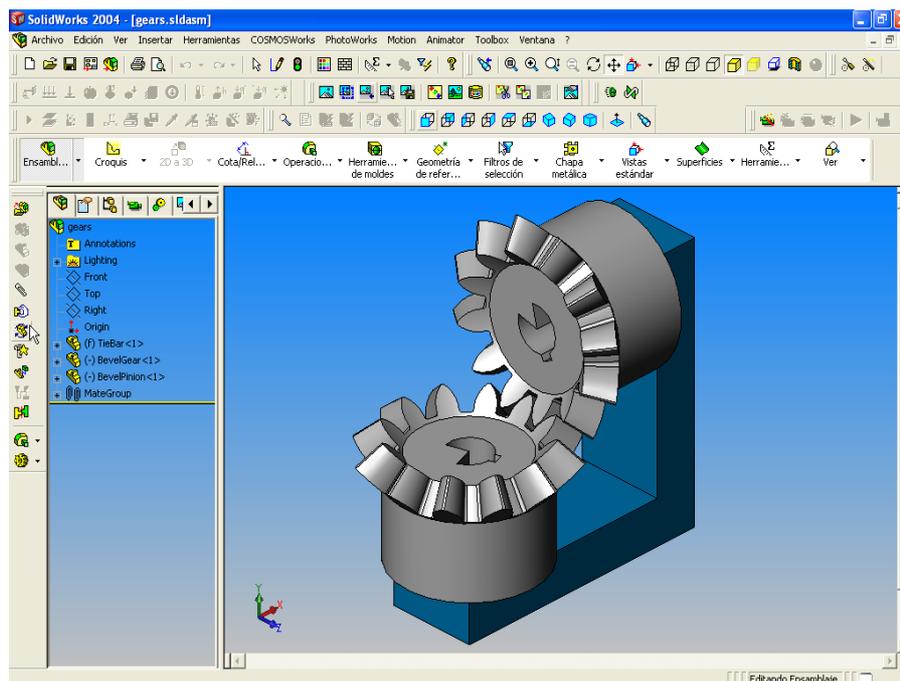


Figura 47: Imagen de la pantalla principal del SolidWorks

La figura anterior muestra una pieza diseñada por SolidWorks, en la pantalla del programa podemos ver que está subdividida en distintas regiones, a la derecha vemos la zona de dibujo con la pieza terminada, a la izquierda se muestra la memoria del trabajo, (todas las operaciones y croquis que se realizaron). Ya por arriba, todas las opciones de dibujo.

Mallado

La segunda etapa se compone de un conjunto de herramientas que generan un mallado óptimo para cada geometría creada previamente. Donde el dominio del problema debe caracterizarse por un conjunto de puntos o celdas de retículo (el mallado).

Este mallado puede ser generado en el mismo programa informático o exportarlo a otro específico para este fin. Alguno de estos programas son: Gambit, Gridgen, Modulos de Autocad, Catia, Solid, Houdini e *IcemCFD*, siendo éste el que usaremos para generar nuestro mallado.

Hay varios sistemas reticulares o de mallas y se clasifican (figura 48) como:

Estructurados: están formadas por líneas que forman un sistema de coordenadas curvilíneas, por lo que las celdas son rectangulares en 2D y hexaédricas en 3D.

No estructurado: se componen de líneas que no forman un sistema de coordenadas curvilíneas, por lo que sus celdas pueden ser triangulares o tetraédricas o una combinación de varias formas.

Híbridos: combinación de retículas estructuradas y no estructuradas en cualquier otro lugar.

Ya sea que se utilicen retículas estructuradas, no estructuradas o híbridas, el sistema reticular ideal es el que resuelve toda la física pertinente en el flujo, que reduce al mínimo los errores que las retículas puedan inducir, y que utiliza los menos puntos o celdas posibles para un cálculo eficiente. Desafortunadamente, el sistema ideal y no el tan ideal puede ser extremadamente difícil de generar en problemas con flujos y en geometrías complicadas, sobretodo en tres dimensiones.

En la actualidad, la generación de retículas es la parte más tediosa y larga de un análisis de dinámica de fluidos computacional. A demás, requiere conocimientos considerables, no sólo de la dinámica de fluidos computacional y de la generación de retículas, sino un profundo conocimiento de la física del problema que se está estudiando.

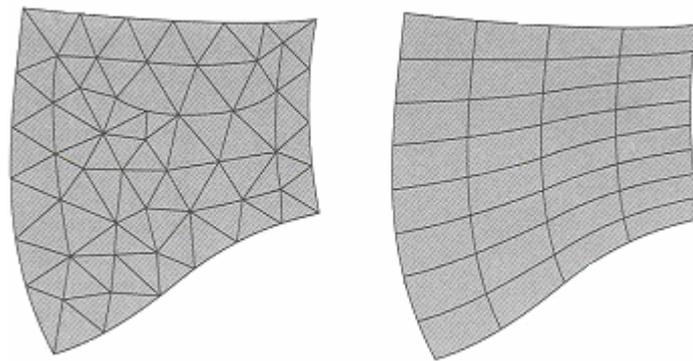


Figura 48: Sistemas reticulares: izquierda estructurado y derecha no estructurado

El IcemCFD 10.0 es el programa de mallado escogido para nuestro modelo. Consta de un conjunto de herramientas que generan un mallado óptimo para cada geometría. El dominio del problema debe caracterizarse por un conjunto de puntos o celdas de retículo que será el mallado.

Hay varios tipos de módulos de mallado, siendo el *tetraedro*, el *hexaedro* y los *prismas* los principales. Puede darse el caso del mallado *híbrido*, el cual es la mezcla del mallado de hexaedros y tetraedros. Por último existen los mallados de superficie, *cuadrangular* y *triangular*. En la figura 49, se muestran los elementos mas utilizados en las simulaciones, tetraedros para el volumen aire y prismas en las paredes. Estos últimos son pirámides con una de las dimensiones mucho mas largas que las otras dos.

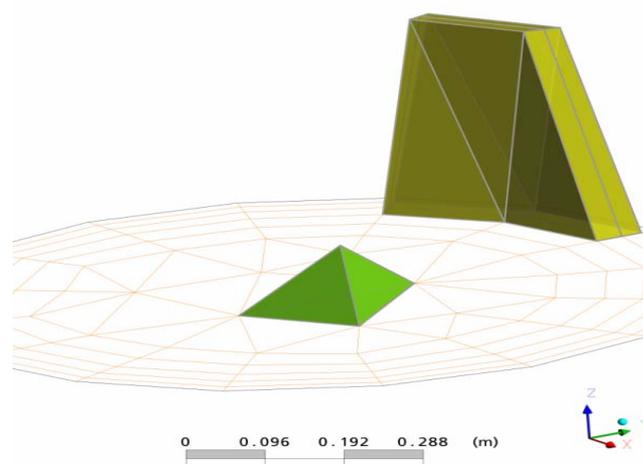


Figura 49: Tetras y prismas

En este caso, las imágenes de la figura que vemos a continuación (figura 50), son ya geometrías malladas, la de la a) se trata de un mallado de tetraedros, la

de la b) de hexaedros y la c) de tetras y prismas en las paredes de la geometría.

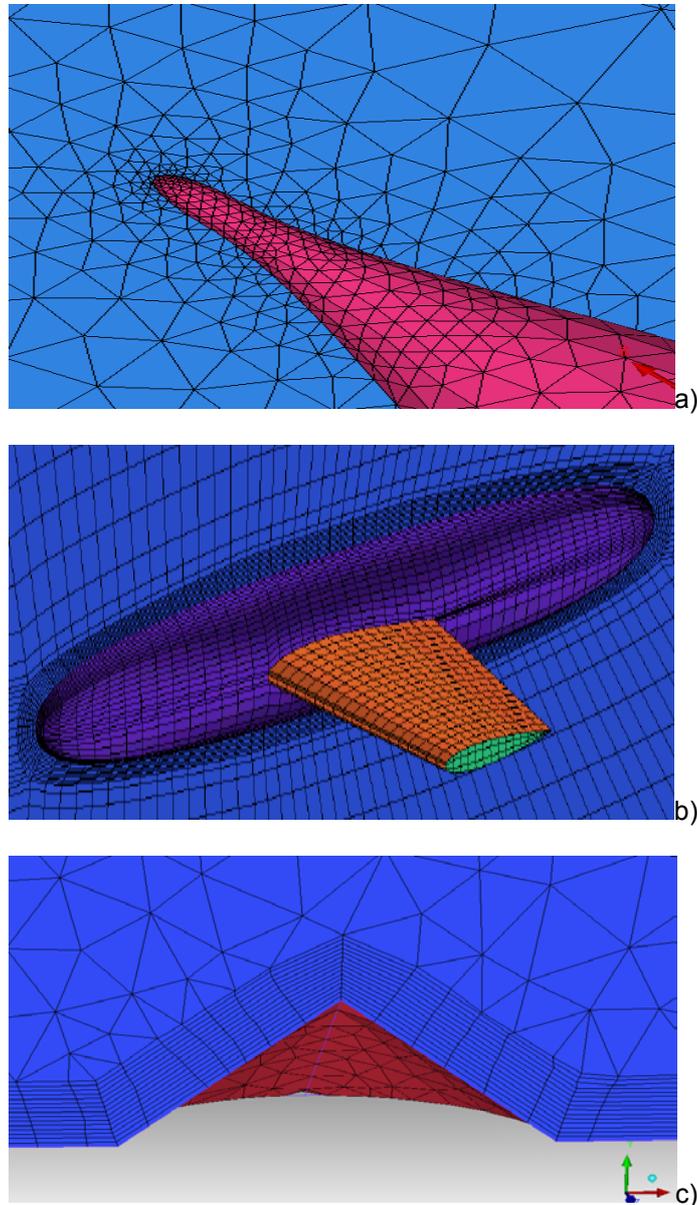


Figura 50: Imágenes del Icem con tres mallados: tetras, hexas e híbrido tetras+prismas

En la figura 51 vemos la pantalla del programa IcemCFD, en la que se distingue en la parte superior las opciones que oferta el programa y por debajo la tres zonas, la de la derecha destinada al modelo, y la de la izquierda abajo un diagrama en árbol con la información del modelo y encima de la anterior donde colocamos los datos precisos para el mallado.

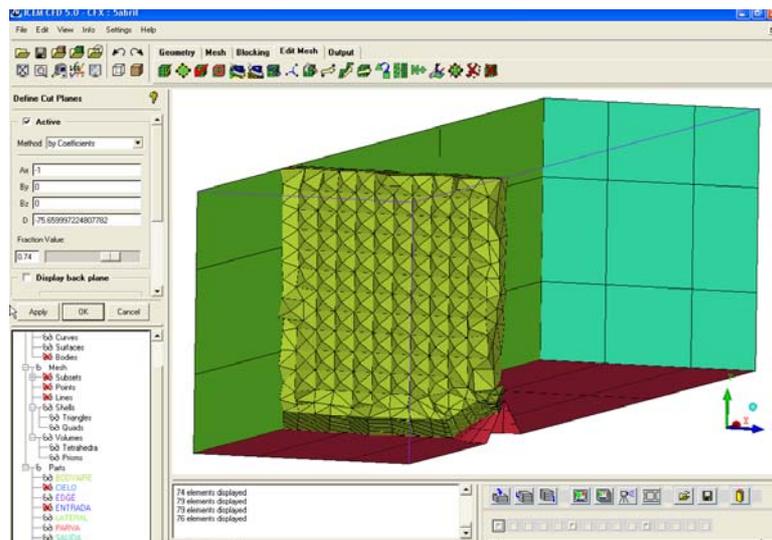


Figura 51: Imagen de la pantalla principal del IcemCFD

La dificultad principal a la hora de realizar el mallado, es obtener una mallado homogéneo en forma. Y esta homogeneidad de los elementos se visualiza con un parámetro denominado *calidad de mallado* (Mesh Quality). Éste, se representa en nuestro modelo con colores, es decir, cada elemento del mallado presenta un color según su calidad. Siendo de color rojo, aquel con peor calidad, el que más difiere de la forma ideal del elemento. De color amarillo estarán los que tienen una calidad intermedia y por último aquellos de color verde con buena calidad. Por lo que en nuestros modelos intentaremos que aparezcan la mayor cantidad de elementos verdes. En la figura 52 se muestran los elementos de malla coloreados en función de su calidad, buena, mala o regular.

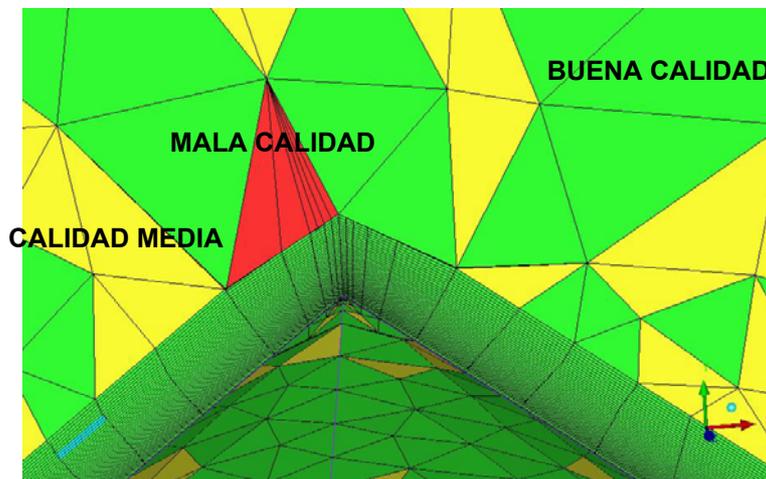


Figura 52: Calidad de tetras

Resolución

En esta última etapa, que a su vez se subdivide en otras tres, es donde describiremos la física de problema, su cálculo y la representación de los resultados para su mejor manipulación.

Comenzaremos con el *pre-procesador*, se trata de un programa al cual importamos el mallado, y sobre el que introduciremos todas las características físicas para describir todo el problema físico. Los pasos a seguir serían:

- Se seleccionan los modelos físicos que serán incluidos en la simulación.
- Se especifican las características del fluido.
- Se especifican las condiciones de contorno, como actuarán cada una de las partes del modelo seleccionado.

El paso siguiente sería pasar todos estos datos al *programa de cálculo*, el cual soluciona los problemas del CFD, produciendo los resultados requeridos, y lo realiza de la siguiente manera:

- Primero, las ecuaciones diferenciales parciales se integran sobre todos los volúmenes de control de la región de interés. Esto es equivalente a aplicar una ley de conservación para cada volumen de control.
- Estas ecuaciones integrales se convierten a un sistema de ecuaciones algebraicas, que generan un conjunto de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.
- Estas ecuaciones algebraicas se calculan mediante iteraciones debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones. A cada iteración va asociado un error o residuo que anotará una medida de la conservación total de las propiedades del flujo.
- La aproximación a la solución exacta se obtiene cuando se llega a la convergencia. Esta solución depende de un número de factores, incluyendo el tamaño y la forma de los volúmenes del control y del tamaño de las residuales finales.

Los procesos físicos complejos, tales como combustión y turbulencia se modelan a menudo usando relaciones empíricas, y las aproximaciones inherentes en estos modelos también contribuyen a las diferencias entre la solución del CFD y el flujo verdadero.

El proceso de la solución no requiere ninguna interacción del usuario.

Este programa produce un archivo de resultados que se pasan al post-procesador.

Por último, el *post-procesador* es el componente usado para analizar, visualizar y presentar los resultados e incluye cualquier opción para obtener valores puntuales para las secuencias complejas.

Los ejemplos de algunas características importantes de post-procesador son:

- Visualización de la geometría y los volúmenes de control.
- Mapas de vectores para visualizar la dirección y la magnitud del flujo.
- Visualización de la variación de las variables escalares (variables que tienen solamente magnitud, no dirección, tales como temperatura, presión y velocidad) por el dominio.
- Cálculos numéricos cuantitativos.
- Animación.
- Gráficas que muestran las variables.

4.-ANSYS CFX

4.1.-INTRODUCCIÓN

Estos tres últimos pasos, dentro de la resolución del problema físico, los llevaremos a cabo con el Amsys CFX-10.0, se trata de una resolución general del código CFD llevado a cabo por la combinación de tres módulos ligados por un flujo de información, se trata de un pre-procesado llamado CFX-Pre, un programa de cálculo llamado Solver y un pos-procesador denominado CFX-Post. CFX-10.0 incluye las características siguientes:

- Un programa de cálculo avanzado.

- Integración completa de la definición de problema, del análisis y de la presentación de los resultados.
- Un proceso intuitivo e interactivo de la disposición, usando menús y gráficos avanzados.
- Ayuda en línea detallada.

Este programa es capaz de modelar:

- Flujos de estado estacionario y transitorio.
- Flujos laminares y turbulentos.
- Flujos subsónicos, transónicos y supersónicos.
- Transferencia de calor y radiación termal.
- Flotabilidad.
- Flujos no-Newtonianos.
- Transporte de componentes escalares no reactivos.
- Flujos multifase.
- Combustión.
- Flujos en múltiples marcos de referencia.
- “Particle tracking” (simulaciones donde se incluyen partículas).

4.2.-ESTRUCTURA

CFX-5 consiste en los cinco módulos que aparecen en la figura 53.

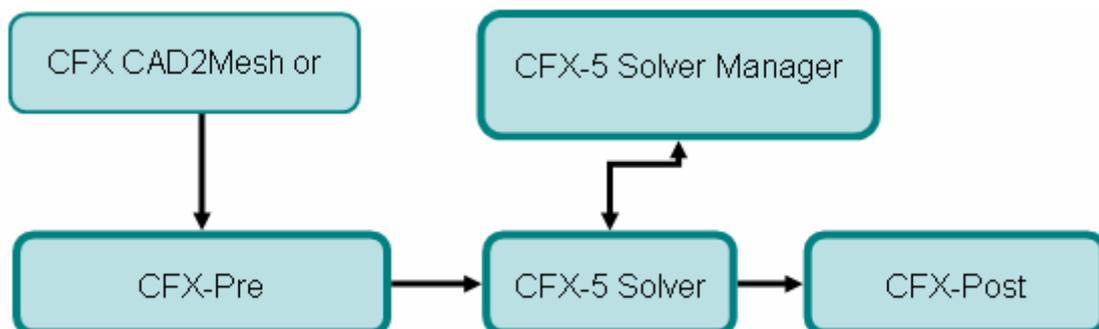


Figura 53: Organigrama de los módulos constituyentes del CFX

De los cuales, sólo usaremos tres, ya que tanto la geometría como el mallado se realizarán con programas distintos, (SolidWorks y Amsys IcemCFD).

CFX-Pre

Una vez que tenemos la geometría y la malla, exportamos el modelo al CFX-Pre. En el que se definen las características que determinarán físicamente el modelo como son las *propiedades físicas del flujo*, si se trata de un problema transitorio o permanente, la turbulencia y la temperatura del flujo, si aparecen o no partículas, etc. Las *condiciones de contorno*, son partes del modelo a las que les incluimos una condición física como entradas (inlets), salidas (outlets), aberturas (openings), paredes (walls) y simetrías (symmetries), junto con las condiciones de contorno para los modelos de transferencia de calor y de periodicidad. Y por último los *parámetros de cálculo*, que necesita el módulo siguiente para realizar los cálculos.

CFX-Pre tiene diversos modos para realizar las operaciones, el modo general (sirve para todos los casos), el turbo (simplifica algunas simulaciones) y el rápido (proporciona pocas opciones al modelo y es conveniente para casos simples).

En la figura 54, podemos ver un modelo en el CFX-Pre, y distinguir las distintas condiciones de contorno que presenta el modelo.

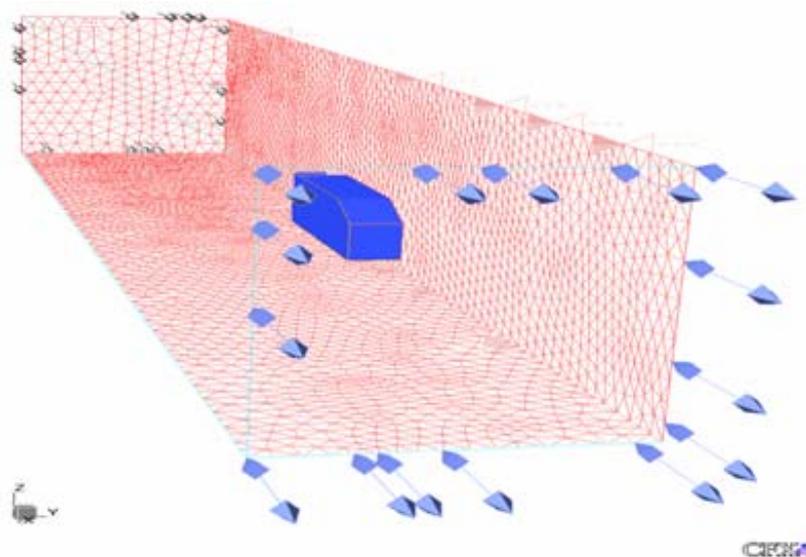


Figura 54: CFX-Pre para un túnel de viento con un coche como obstáculo

Las flechas negras de una sola dirección en la pared del fondo del dibujo, representan un “inlet” o entrada del fluido.

En la pared de delante, con flechas en dos direcciones de color azul, se trata de un “opening” o abertura por donde entra y sale el fluido al modelo. En la pared lateral las flechas enfrentadas de color rojizo representan una “symmetry” que nos indica que a ambos lados de la pared hay las mismas condiciones, que es el plano de simetría del modelo. Vemos también el mallado restante y el obstáculo como “wall” o paredes.

Solver

Una vez que determinamos perfectamente la simulación, lo pasamos al módulo de cálculo, llamado SOLVER. Este modulo de cálculo, calcula mediante pasos, llamados iteraciones o timesteps. En el final de cada iteración, habrá calculado una solución aproximada al problema del CFD. Cada iteración debe producir una solución más exacta, (la convergencia).

En el final de cada iteración, aparece una tabla donde están las ecuaciones que se están calculando con un valor de RMS (residuos) para cada ecuación. Esta variable indica como se ha solucionado cada ecuación exactamente. Si la solución es convergente el valor residual del RMS será cada vez menor en las tablas sucesivas (iteraciones sucesivas).

Esto se representa en los diagramas residuales por como van bajando las líneas. Estos diagramas se van dibujando con cada iteración, pero aparecen cuando ha pasado la iteración siguiente. Estos gráficos de residuos son los que se muestran en la figura 55.

La importancia de la convergencia es muy grande, ya que la buena resolución del modelo depende de ella. Si retomamos la figura 55 podemos observar dos imágenes distintas a) y b) en las que por sus gráficos apreciamos que sólo el de la arriba llega a la convergencia mientras que el segundo oscila de manera horizontal sin llegar a alcanzarla.

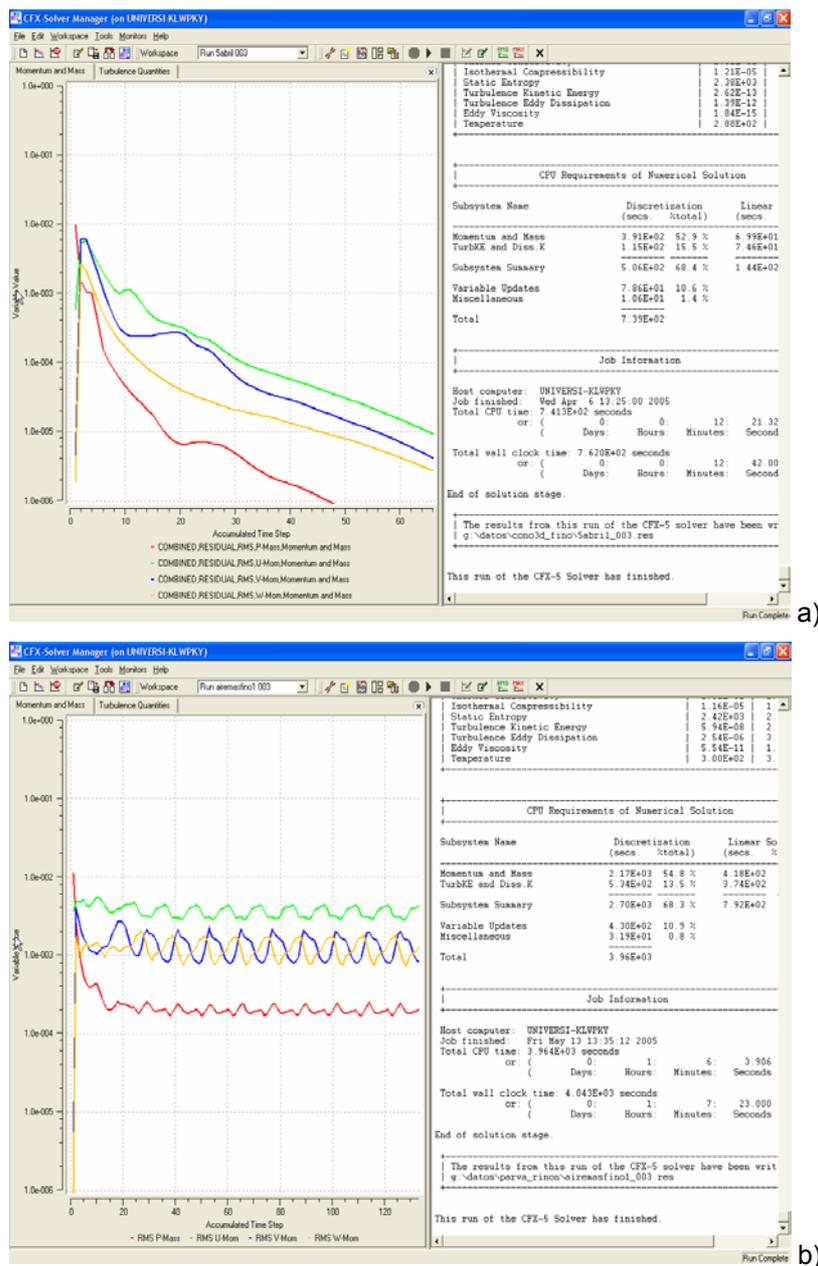


Figura 55: Imágenes del Solver

CFX-Post

Cuando nuestro modelo terminó el cálculo, lo pasamos al CFX-POST, para analizar y presentar los resultados de la simulación, ya que podemos visualizar los resultados, definir variables escalares y vectoriales que permiten otro tipo de operaciones con los resultados, tipos de objetos gráficos, (planos, vectores, isosuperficies, etc), animaciones, medidas de concentraciones, gráficas, exportación de datos a otros programas numéricos, etc.

Todo esto nos permite realizar una presentación de los resultados mucho mas precisa, dinámica y profesional, ya que no solo se pueden representar los planos, líneas, isosuperficies, etc individualmente, sino que puedes combinarlos para realizar una gran presentación.

En la figura 56 a) y b) podemos ver a la izquierda dos “streamline” de temperatura, y a la derecha un plano “contour” de la mezcla del agua a distintas temperaturas en un mezclador.

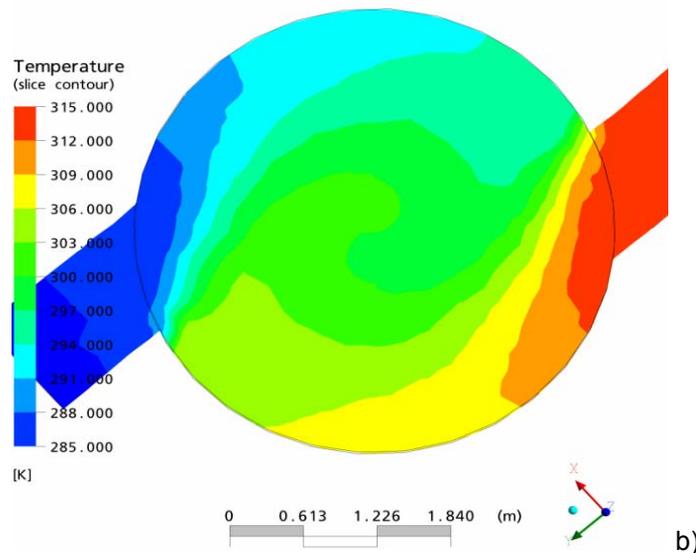
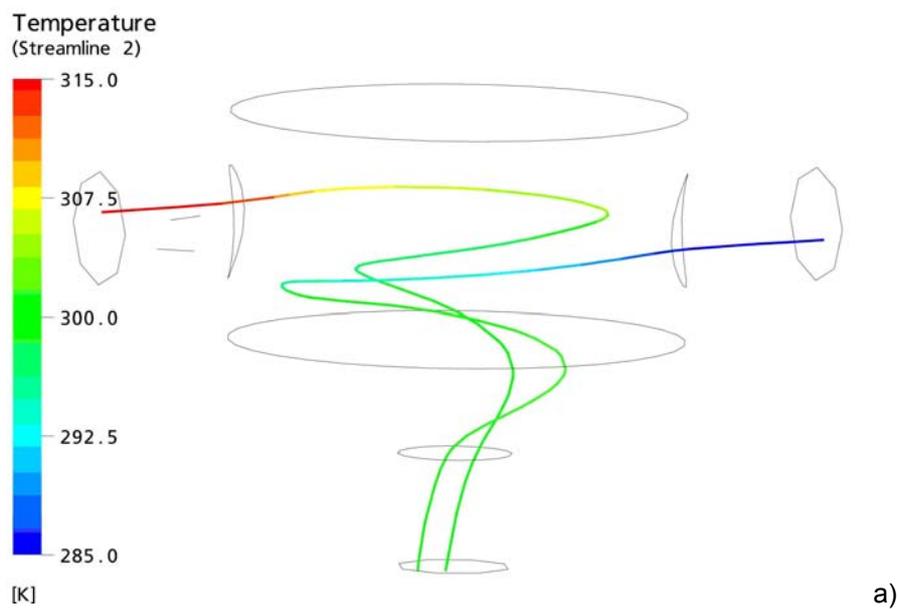


Figura 56: Imágenes del CFX-Post

5.-PRIMERA FASE DE INVESTIGACIÓN. MODELIZACIÓN DEL VIENTO ALREDEDOR DEL OBSTÁCULO.

5.1.-INTRODUCCIÓN

En esta primera fase se pretende implementar el método EPA en una aplicación práctica, la comparación entre las emisiones de una parva cónica y una parva de tipo riñón.

Las parvas con forma de riñón son muy habituales en parques de almacenamiento de minerales, ya que se generan fácilmente a partir de sistemas rotativos de apilado. Como ya comentamos anteriormente, la EPA sólo contempla dos formas de apilamiento, la cónica y la truncada, por lo que tendremos que aproximar la parva riñón a esta última.

En esta primera etapa de investigación se calcularán por medio de códigos numéricos los mapas de velocidades superficiales para la parva riñón. Para tener confianza en los resultados de los modelos se comprobarán previamente con el cálculo de las formas de la parva tipo cono y tipo parva truncada de los estudios en túneles de viento de (Stunder & Arya, 1988 [2]), que dieron lugar a la normativa EPA, como se puede ver en la figura 57, donde aparecen las directrices de dibujo para la parva truncada y los puntos de medida donde se recogieron los datos de medida de velocidad de viento a través de sondas de hilo caliente sobre la superficie de la parva tipo cono.

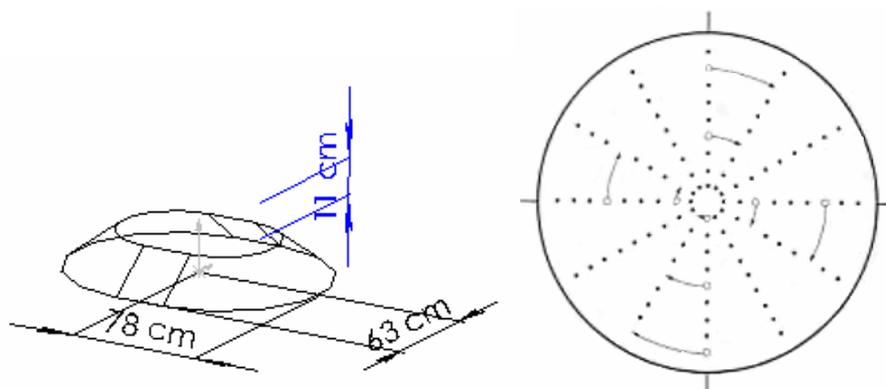


Figura 57: Estudios con termistores de la distribución de flujo alrededor de obstáculos

Estos estudios realizaron diversas observaciones de la distribución de flujo de aire en túneles de viento atmosféricos alrededor de obstáculos de tipo cono y de tipo parva truncada.

Para ello montaron un sistema de sondas (termistors) alineados que rotaban sobre la superficie del cono para lograr las medidas alrededor del mismo.

Habitualmente los apilamientos de materiales granulares se realizan a la intemperie, por lo que las emisiones de polvo provenientes de estas auténticas montañas de mineral se deben considerar como un problema medioambiental y operacional (Page and Organiscak, 2004 [40]). Diversos factores afectan a la cuantificación de polvo emitido (Xuan, 2004 [41]), entre los que se pueden citar:

- Características del viento como dirección, velocidad, racheado, etc.
- Acceso del viento.
- Altura de la superficie expuesta al viento.
- Parámetros de partícula: diámetro, densidad, forma, humedad, etc.
- Presencia de materiales no erosionables y formación de costras.
- Disturbancia de la superficie.

El estudio de este fenómeno es altamente complicado debido al gran número de variables a considerar, por lo que cualquier aproximación teórica de tipo numérico será el resultado de varias simplificaciones (Witt et al., 2002 [42]) pero, por otra parte, una evaluación puramente empírica cubriría solamente un rango limitado de las condiciones de trabajo, e incluso más, para una localización concreta se sabe que las condiciones son realmente cambiantes (Muleski, 1991 [43] y Anon, 1979 [44]).

Cuando se intenta calcular un nivel de polvo aerotransportado generado por una pila a la intemperie, una de las metodologías establecidas es la de la US EPA, ésta no sólo cubre este tipo de emisiones sino que además incluye otras como las emisiones en detonación de explosivos o las que se crean en el tránsito de vehículos por carreteras no pavimentadas.

En el caso de las pilas, US EPA tiene varios parámetros y formulaciones para dos configuraciones, la cónica y la truncada, lo que resulta poco útil a la hora de escoger un tipo de apilamiento, ya que resulta una elección muy restringida. En la actualidad uno de los más utilizados en la industria es el tipo riñón, y un ejemplo es el que se muestra a continuación para una empresa ubicada en el norte de España.

En un momento determinado, esta empresa necesitó almacenar minerales (principalmente carbón) en un almacén a la intemperie, la empresa consideró que la forma más competitiva para minimizar la inversión era realizar un apilamiento semicircular construido a partir de un revamping de una torre de transferencia ya existente.

Esto nos llevaría a la construcción de un brazo apilador de 45 m de longitud que diera lugar a una parva semicircular de 110° tal como se muestra esquemáticamente en la figura 58 a).

Al no ser posible desarrollar medidas experimentales que evaluaran el nivel de exposición y la emisión de polvo para esta distribución comparándolo con lo establecido por la US EPA, se decidió utilizar el software CFD para predecir el impacto ambiental de esta pila en comparación con un par de pilas cónicas con la misma capacidad total de almacenaje, alrededor de la torre de transferencia tal como se muestra en la figura 58 b).

Podemos así decidir cual de los dos diseños de apilamiento es el más eficaz frente a la pérdida de polvo, lo que puede ser considerado como una solución factible desde el punto de vista técnico.

En la figura 59 se muestra diversos apilamientos de áridos y en la figura 60 una instalación en el exterior de una mina subterránea para un apilamiento en forma de parva de riñón.

5.2.-EXPLICACIÓN DEL MÉTODO US EPA

Las emisiones de polvo que se producen desde pilas de almacenaje, pueden estimarse usando la información que proporciona las secciones 13.2.4 y 13.2.5 de la norma AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors.

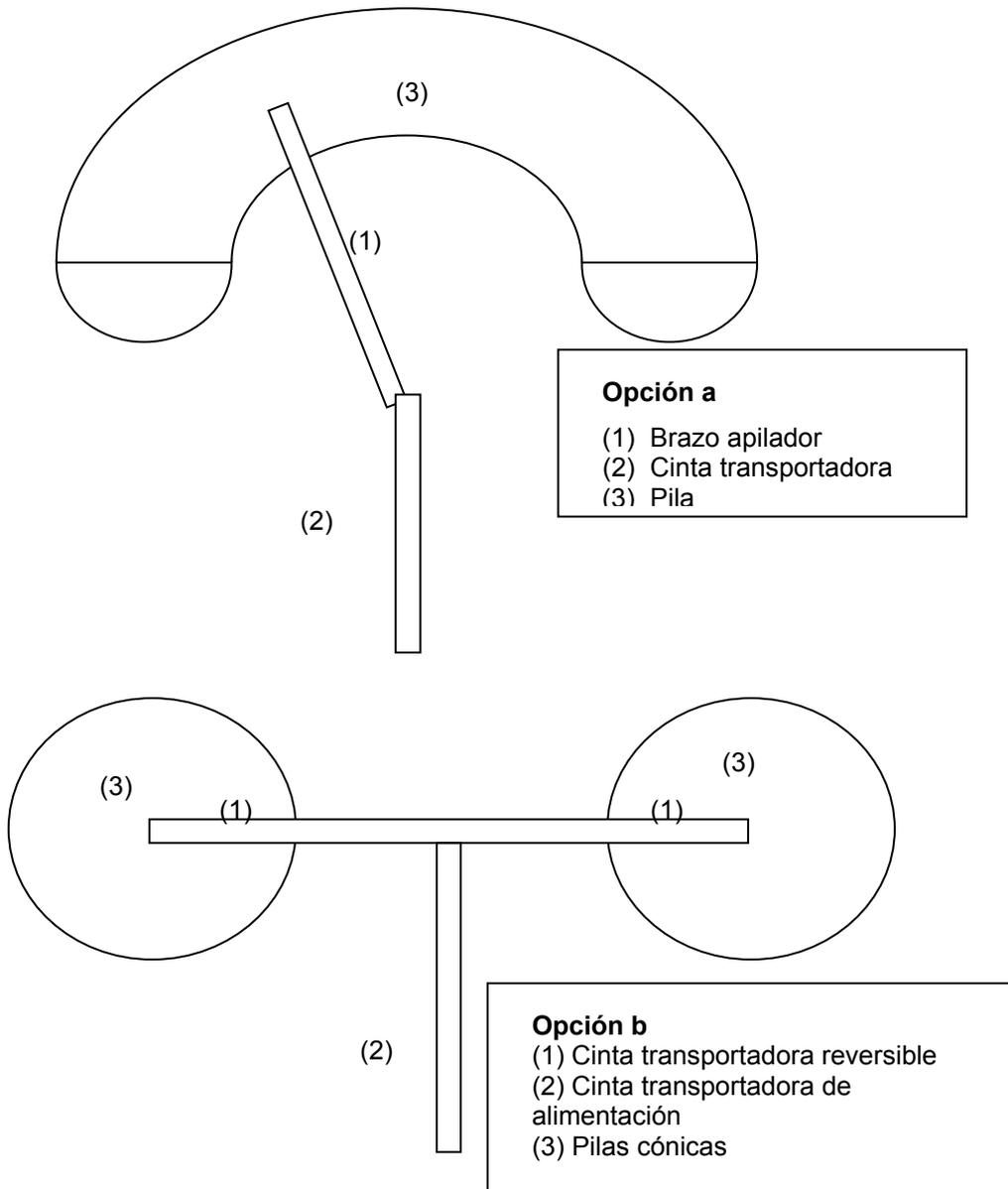


Figura 58: Apilamiento mediante pila semicircular y dos pilas cónicas



Figura 59: Apiladoras cónicas

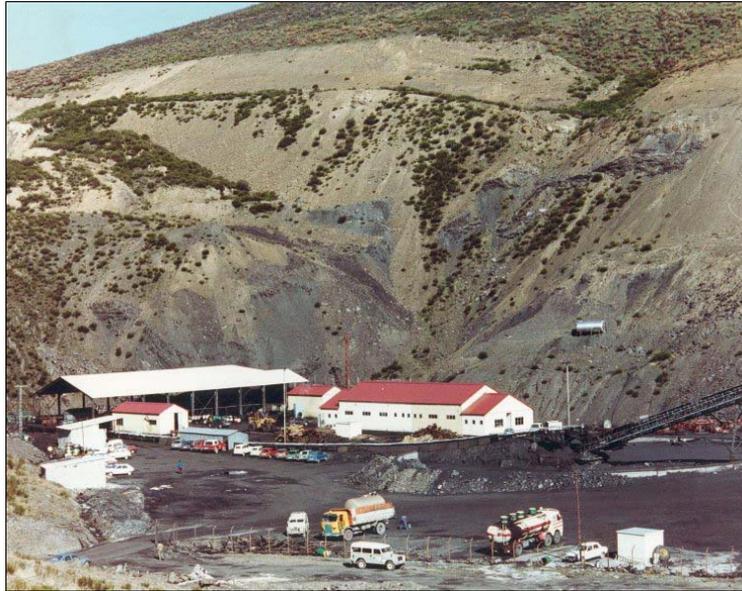


Figura 60: Apiladora de parva tipo riñón

La metodología aplicada en la sección 13.2.5 (Industrial Wind Erosion) requiere, en primer lugar, establecer unos parámetros de viento que conviertan los valores obtenidos con el anemómetro, en la velocidad friccional equivalente (para ello se utiliza la denominada milla rápida):

$$u^* = 0.053 u_{10}^+ \quad (4)$$

donde:

u^* es la velocidad friccional equivalente.

u_{10}^+ es la milla rápida del viento a 10 m de altura.

La ecuación anterior solo se aplica a pilas planas o aquellas cuya penetración del viento en la capa superficial sea insignificante. Con el uso de u^* se asume un viento ascendente estacionario.

El factor de emisión para el polvo aerotransportado superficial producido por perturbaciones, se puede expresar en unidades de gramos por metro cuadrado (g/m^2) por año, como indica la siguiente expresión:

$$\text{Factor_emision} = K \sum_{i=1}^N P_i \quad (2)$$

donde:

K el multiplicador del tamaño de partícula.

N es el número de perturbaciones por año.

P_i es el potencial de erosión correspondiente a la milla más rápida observada del viento. Este potencial se calcula como se indica en la expresión (3).

$$\begin{aligned} P &= 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \\ P &= 0 \text{ for } u^* \leq u_t^* \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

u^* es la velocidad friccional (m/s).

u_t^* es la velocidad friccional límite (m/s).

Por lo tanto, la erosión se ve afectada directamente por la distribución granulométrica de partículas así como por la frecuencia de perturbación (Parker and Kinnersley, 2004 [45]). Debido a la forma no lineal de la erosión, cada perturbación debe ser tratada por separado.

La ecuación (1) asume un tamaño de rugosidad típico de 0.5 cm de altura y un cociente entre la base del cono y la altura del mismo no superior a 0.2. Si la pila excede este valor anterior, sería necesario dividir la pila en zonas más pequeñas con diferentes orientaciones al viento. Cuando se habla de cocientes más altos, es necesario utilizar las siguientes expresiones:

$$u^* = 0.10 u_s^+ \quad (8)$$

$$u_s^+ = \frac{u_s}{u_r} u_{10}^+ \quad (6)$$

Atendiendo a resultados de la sección 13.2.5 de EPA para conos y parvas truncadas, los cocientes de la velocidad de viento superficial (u_s) se acercan a los del viento (u_r) derivados de los estudios en túneles de viento. De ahí que la superficie total de la pila se subdivide en zonas de u^* constante donde las ecuaciones (2) y (3) puedan ser utilizadas.

5.3.-SIMULACIÓN CFD

El procedimiento de USEPA para una pila semicircular requiere subdivisión de las superficies y ratios de fricción para cada subdivisión. El software comercial CFD de Ansys CFX 5.7 fue seleccionado para evaluar una simulación numérica de una pila semicircular la cual se utilizó para obtener las áreas de la constante u^* de la ecuación (3) donde podría ser calculada.

Anteriormente, aplicando el cálculo CFD para la pila semicircular, se comprobó la validación del proceso comparando los resultados del modelo CFD para el cono y la parva truncada con el estudio experimental de referencia de la USEPA. En la sección 13.2.5 de la USEPA, los parámetros de entrada para la rugosidad del terreno y el perfil del viento, se fijan a 0.5 cm y perfil logarítmico de hasta 40 km/h. Y para cuantificar la turbulencia en las Entradas, seleccionamos la opción turbulencia Media, la cual fija la intensidad de turbulencia en 0.05 y el cociente de viscosidad turbulenta en 10.

Ansys CFX 10.0 utiliza un método de volúmenes finitos para calcular las ecuaciones de Navier-Stokes para la masa y el momento en una malla no estructurada. Además, Ansys CFX tiene una amplia variedad de modelos de turbulencia disponibles desde los mas complejos, LES o DES, con la necesidad de ordenadores superpotentes, a los mas sencillos como el Zero Equation que no incorpora mas ecuaciones al cálculo, pasando por los intermedios como el K-épsilon y el SST, que son los modelos mas usados en ingeniería.

Inicialmente la simulación fue creada usando estos modelos, el modelo SST y el K-épsilon con función logarítmica de entrada del viento al modelo y sin rugosidad en las paredes. Ambos modelos se rechazaron, debido a sus pobres resultados (cuando los comparamos con los experimentos de la US EPA realizados un túnel de viento) pero si se encontraron buenos resultados con el modelo K-épsilon con rugosidad en las paredes de 0.5 cm.

En este trabajo la convergencia se considera aceptable cuando el valor normalizado de los residuos (RMS) es menor de 10^{-5} . Según el manual del CFX-5.7 Solver (CFX, 2004 [39]), los valores para este nivel son indicativos de

una convergencia aceptable. Para todos los modelos se necesitaron ente 100 y 200 iteraciones para alcanzar este nivel de convergencia.

En la figura 61 se muestra un ejemplo de la salida del Solver donde el modelo llega a la convergencia en los niveles antes citados, 10^{-5} .

Para la figura 62 se muestra otra imagen en la que se indica la zona en la que se generan los residuos de mayor valor. También podemos ver el mallado de prismas, mas fino, en la superficie de la parva y en el suelo.

En todos los casos o todas las simulaciones presentadas, se creó una malla de prismas que englobaba toda la superficie de la parva y el suelo, alcanzando los 3 metros aproximadamente (capa límite) sobre el suelo y la pila, mientras que el resto del dominio se dividió en elementos tetraédricos. Esta malla híbrida entre prismas y tetras nos llevó a una muy buena convergencia, ayudando en el cálculo en esta zona tan problemática de la capa límite.

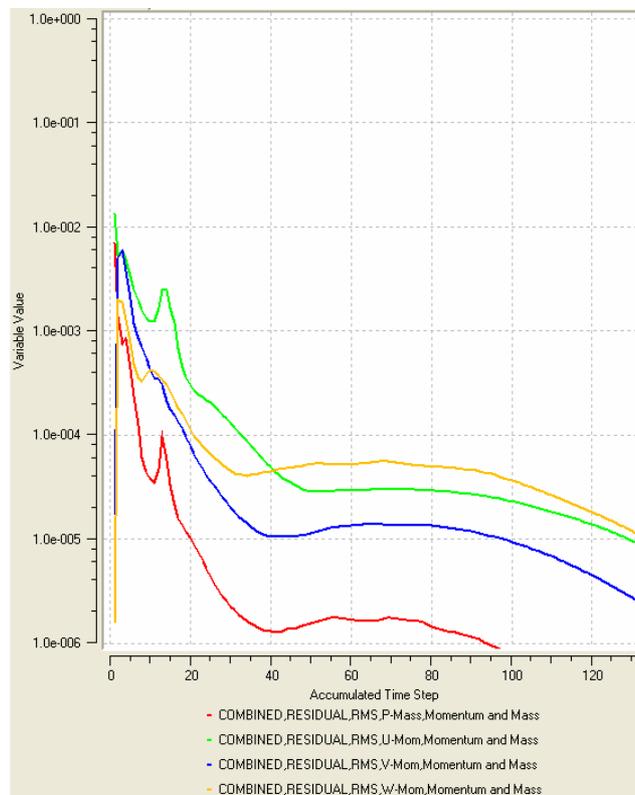


Figura 61: Residuos para perfil logarítmico (izquierda)

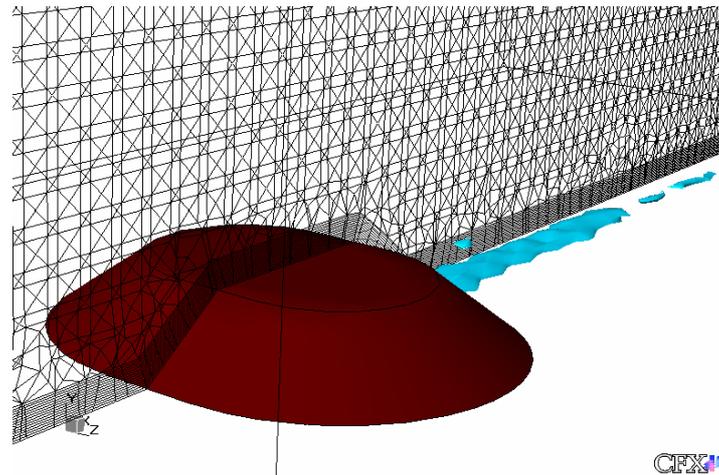


Figura 62: W-Max residuals=1E-04 (derecha)

5.4.-FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En esta investigación todas las simulaciones utilizan el software comercial ANSYS CFX 10.0. Este software es un Solver de segundo orden en el que se utiliza el método de volúmenes de control basado en elementos finitos. En el Manual de usuario del CFX 10.0 se puede encontrar una descripción detallada de la parte más importante de la teoría de cálculo.

Las asunciones principales y la hipótesis consideradas en el desarrollo de este documento serán descritas más adelante.

El sistema de ecuaciones que describe los procesos de momento, calor y masa transferida de un fluido en movimiento, se conoce como ecuaciones de Navier-Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales derivadas a comienzos del siglo diecinueve y de las que, en general, no es factible obtener su solución analítica pero se pueden discretizar y resolver numéricamente. Estas ecuaciones son tres:

La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (9)$$

Las ecuaciones del momento:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (10)$$

donde el esfuerzo cortante, $\boldsymbol{\tau}$ se relaciona con la tensión por:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (11)$$

La ecuación de la energía total:

$$\frac{\partial(\rho h_{\text{tot}})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{\text{tot}}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + S_E \quad (12)$$

donde h_{tot} es la entalpía total, relacionada con la entalpía estática $h(T,p)$ de la siguiente forma:

$$h_{\text{tot}} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (13)$$

El término $\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau})$ representa el trabajo debido a fuerzas viscosas y recibe el nombre de término de trabajo viscoso. La expresión $\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$ representa el trabajo debido a las fuentes externas del momento y no se consideran.

La notación utilizada para los distintos términos es la siguiente:

ρ : densidad	μ : viscosidad molecular (dinámica)
∇ : gradiente	δ : función delta de Kronecker
$\nabla \cdot$: operador divergencia	h_{tot} : entalpía total
\mathbf{U} : vector velocidad	λ : conductividad térmica
\otimes : tensor producto	T : temperatura
p : presión	S_E : fuente de energía
$\boldsymbol{\tau}$: esfuerzo cortante	H : entalpía estática
S_M : Fuente de momento	

En nuestro caso se pueden realizar varias simplificaciones ya que consideraremos fluido incompresible y newtoniano así como diferencias de temperatura pequeñas.

En principio, las ecuaciones de Navier-Stokes describen flujos laminares y turbulentos sin necesidad de información adicional. Sin embargo, flujos

turbulentos con números de Reynolds reales abarcan un gran rango de longitudes de turbulencia y escalas de tiempo, y deberían generar escalas de longitud mucho más pequeñas que los elementos más pequeños de volumen del mallado. La simulación numérica directa (DNS) de estos flujos requeriría potencia de procesamiento en algunos órdenes de magnitud mayor que la previsible en un futuro próximo.

Para predecir los efectos de la turbulencia, una parte importante de la investigación en CFD se ha centrado en los distintos modelos de turbulencia. Estos modelos han sido desarrollados específicamente para explicar los efectos de la turbulencia independientemente del mallado y de la Simulación Numérica Directa.

Son varios los métodos que se pueden utilizar y la mayoría de ellos han sido incluidos en CFX, desde los más simples como "Zero Equation Models" hasta los más complejos como LES o DES.

Los métodos RANS (Reynold Averaged Navier-Stokes) muestran un buen compromiso entre exactitud y esfuerzo de cálculo, siendo mayoritariamente utilizados en aplicaciones de ingeniería. Se basan en describir los vórtices o remolinos que forman la turbulencia por sus efectos en el flujo a través de las tensiones de Reynolds.

Se seleccionaron modelos de complejidad media para obtener tiempos de resolución razonables, (Temmerman et. al., 2004 [46]), (Silvester et. al., 2004 [47]) y (Castro et. al., 1997 [21]). Estos modelos eran:

- K-épsilon (con y sin rugosidad superficial).
- k-w basado en "Shear-Stress-Transport".
- SST (Shear-Stress-Transport) combinado con diversos perfiles logarítmicos y semi-logarítmicos del viento.

Los resultados fueron comparados con los datos experimentales incluidos dentro de EPA. El mejor ajuste fue el obtenido a través de un modelo K-épsilon con rugosidad utilizando un perfil logarítmico de viento.

Las mallas usadas en estos estudios son no estructuradas, se componen de elementos tetraédricos y prismáticos. Se consideraron tres mallas diferentes (fina, media y gruesa), así como se compararon sus resultados contra los datos experimentales contenidos en EPA. Se seleccionó una malla media para conseguir una concordancia con los datos experimentales. Pero sin comprometer futuros modelos de geometría compleja que poseen una densidad de malla superior dónde será esencial utilizar ordenadores multiprocesadores y procesos paralelos para abarcar la cantidad de memoria necesaria en cálculos de dominios enormes.

6.-GEOMETRIAS DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

6.1.-GEOMETRÍA EN FORMA DE CONO

El primer caso simulado corresponde a un apilamiento de tipo cónico, ya que es uno de los tipos de parvas mas usados en la industria. En la figura 63 se muestra un apilamiento de carbón de gran capacidad con sistema de homogenización en un conjunto explotación minera a cielo abierto-central térmica.



Figura 63: Apiladora de carbón

En la figura 64 se muestran diversos tipos de apilamientos cónicos de áridos.



Figura 64: Parvas tipo cónicas

Como explicamos en los apartados anteriores, antes de comenzar con la simulación propiamente dicha, tenemos que crear la geometría en 3D (figura 65) y mallar todo el dominio del modelo (figura 66).

El modelo será mallado con aproximadamente 105.000 elementos y aplicando un plano de simetría, con lo que sólo nos hace falta caracterizar una parte del dominio lo que permite que los cálculos sean mucho mas rápidos. Se usarán mallas híbridas con tetraedros y prismas en las cercanías de la superficie del cono para captar los amplios gradientes de velocidad que se generan en estas zonas. Se construye una superficie de revolución (figura 67) a 25 cm sobre el cono, definida para medir el cociente u_s/u_r llamado Variable 1. Sobre esta superficie se sitúan aproximadamente 13,500 puntos de medida.

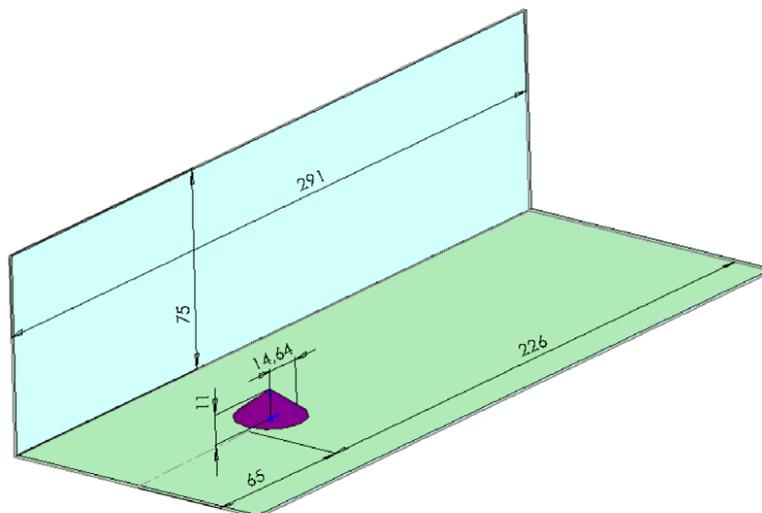


Figura 65: Modelo de la pila cónica

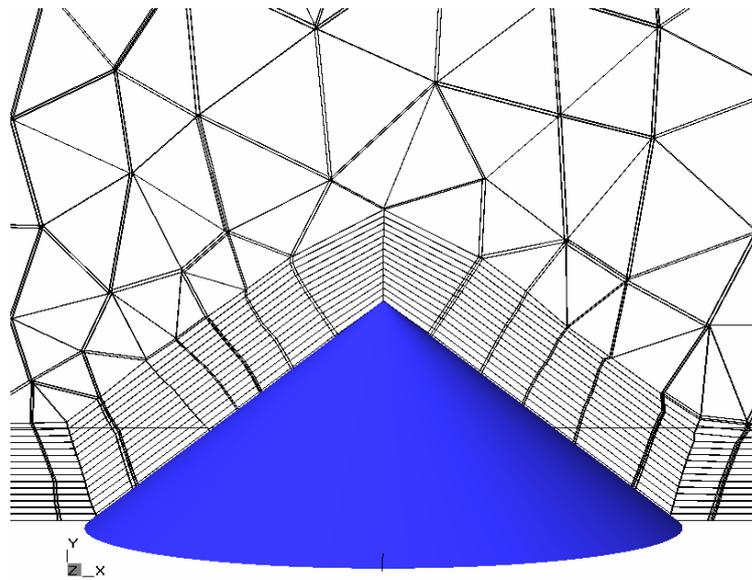


Figura 66: Corte de la malla

En la figura 68 se muestra la predicción de la distribución de la Variable 1 para una pila cónica afectada por el perfil logarítmico del viento soplando de izquierda a derecha en dirección perpendicular a la parva.

Una vez mallado el dominio lo caracterizamos físicamente el modelo, uno de los puntos mas importantes es determinar el modelo de turbulencia que mejor resuelva el problema. Para ello se realizaron múltiples simulaciones variando el modelo de turbulencia entre el K-épsilon y el SST. Otros dos puntos a tener en cuenta, es si se presenta o no rugosidad sobre el obstáculo y si la entrada del viento al modelo lo hace de manera plana o con un perfil logarítmico.

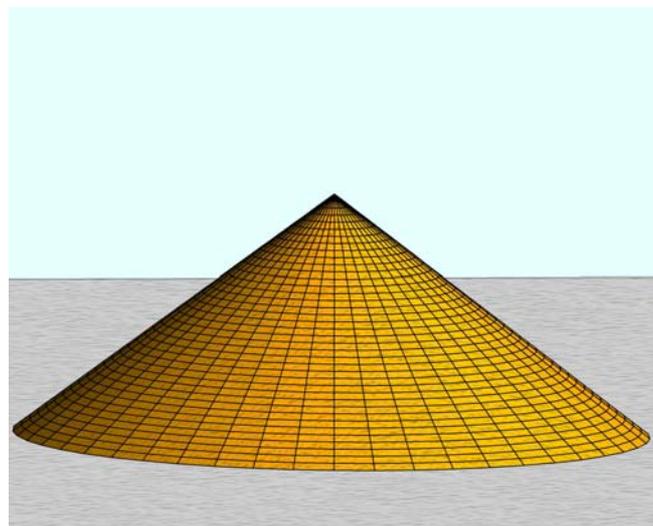


Figura 67: Superficie de revolución sobre la superficie del cono

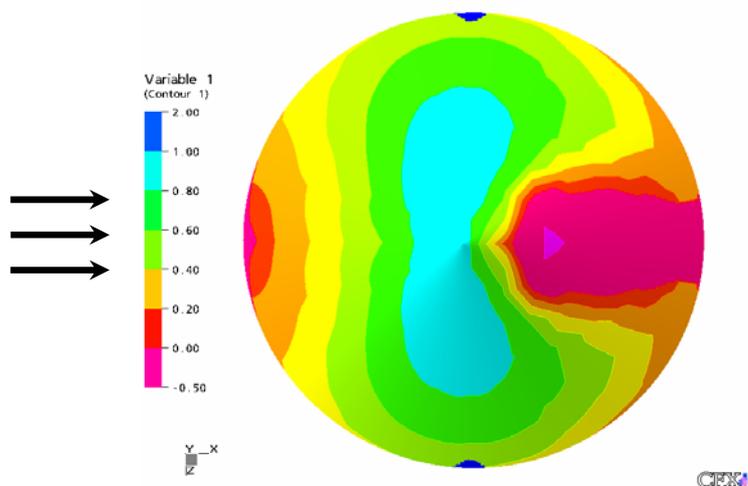


Figura 68: Viento perpendicular a la parva

Las simulaciones realizadas son las que se presentan a continuación:

- Turbulencia $k-\varepsilon$, rugosidad 0, perfil de viento logarítmico.
- Turbulencia $k-\varepsilon$, rugosidad presente, perfil de viento logarítmico.
- Turbulencia SST, rugosidad 0, perfil de viento logarítmico.
- Turbulencia $k-\varepsilon$, rugosidad presente, perfil de viento plano.
- Turbulencia $k-\varepsilon$, rugosidad 0, perfil de viento plano.
- Turbulencia SST, rugosidad 0, perfil de viento plano.

En gráficos de las figuras 69 a 76 donde se muestran los modelos de viento obtenidos mediante las modelizaciones y su comparación con los resultados obtenidos por la EPA y por los de Stunder y Arya, se puede observar como el modelo que más se ajusta a las medidas reales es el K-épsilon con rugosidad y viento logarítmico.

De los gráficos anteriores podemos observar que:

- La influencia del perfil del viento es muy alta en los resultados. Esto indica que sería necesario intentar otros perfiles de viento de tipo potencial o en un futuro estudio incluso relacionarlo con las condiciones de estabilidad atmosférica.

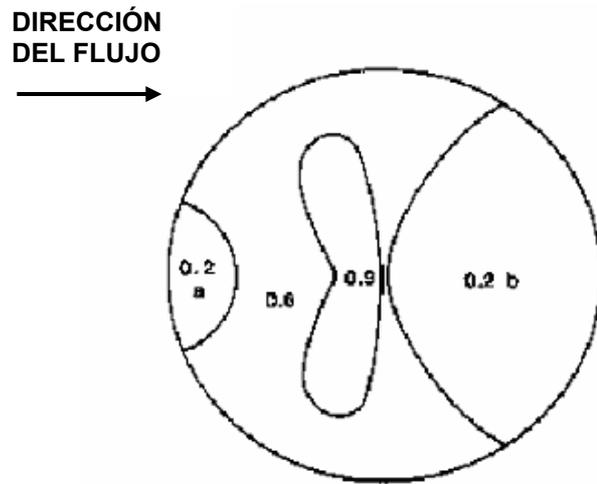


Figura 69: Gráfico de la EPA

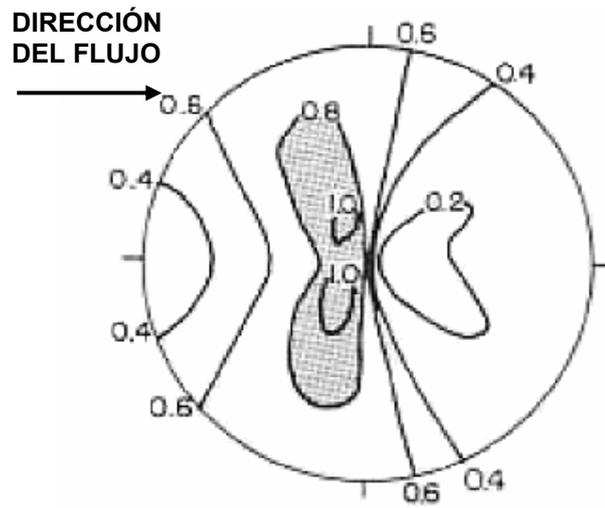


Figura 70: Gráfico de Stunder y Arya

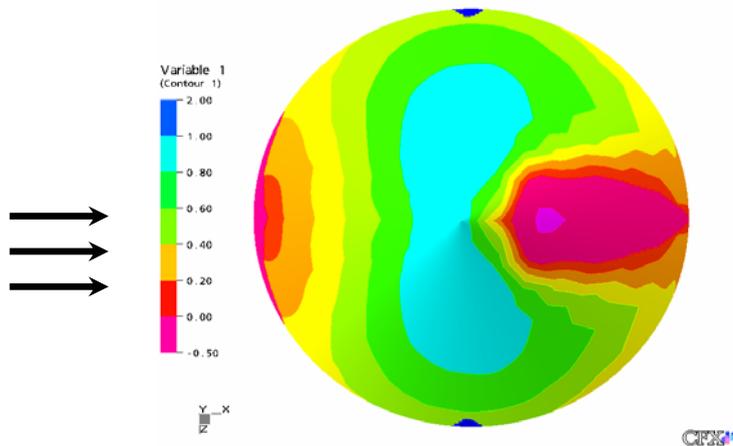


Figura 71: Viento logarítmico, $k-\epsilon$ sin rugosidad

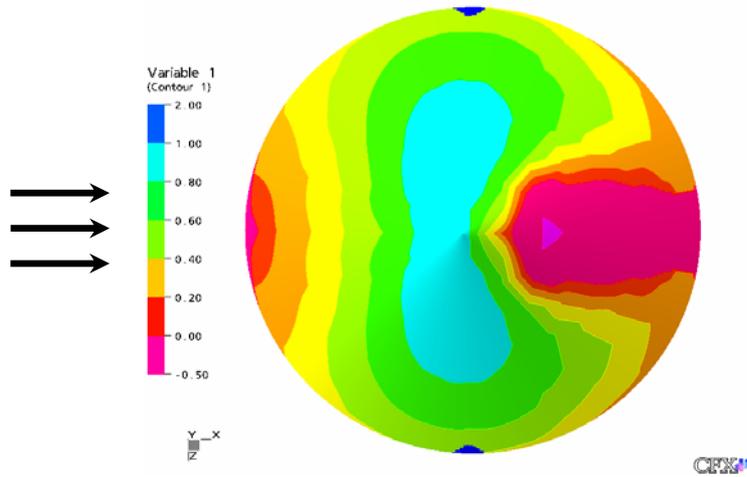


Figura 72: Viento logarítmico, $k-\epsilon$ con rugosidad 0.5 para el cono y 0 para el suelo

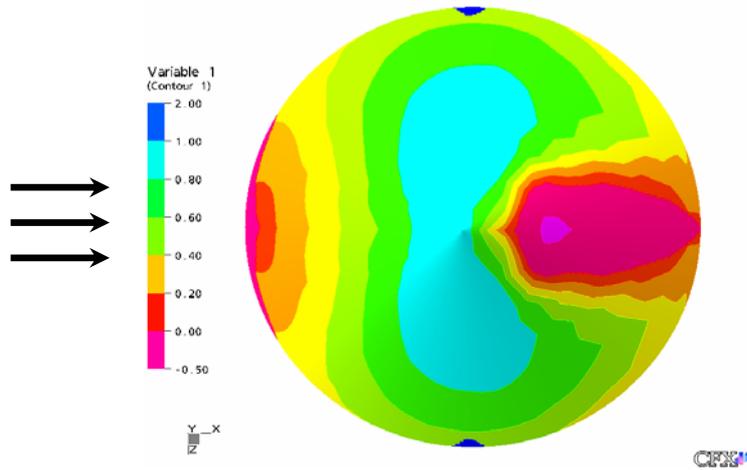


Figura 73: Viento logarítmico, turbulencia SST

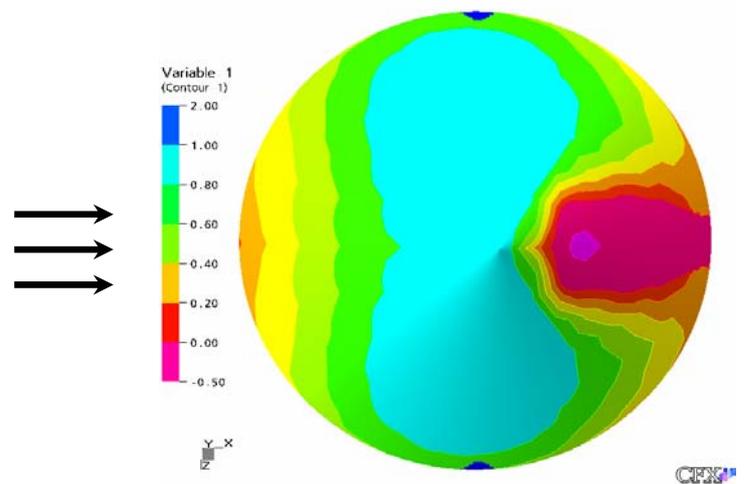


Figura 74: Viento plano, $k-\epsilon$ con rugosidad 0.5 para la pila y 0 para el cono

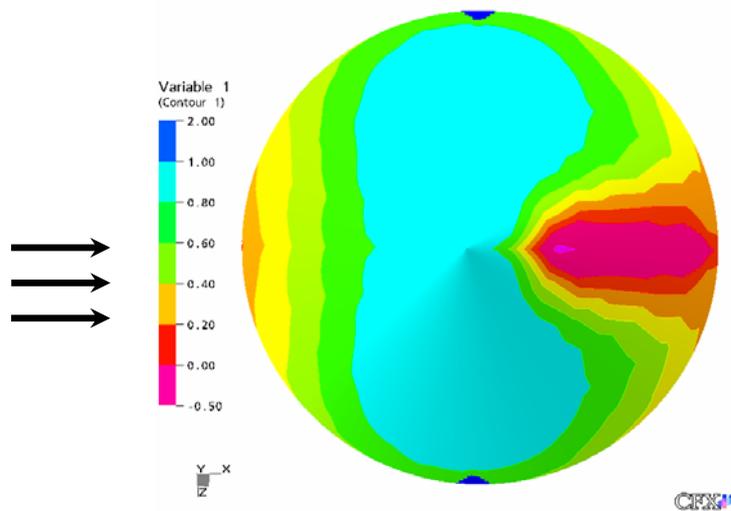


Figura 75: Viento plano, $k-\epsilon$ con rugosidad 0 para la pila y 0 para el cono

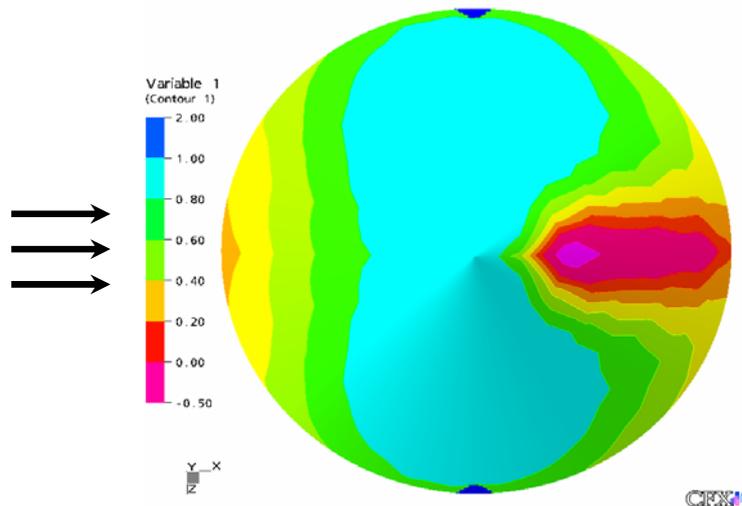


Figura 76: Viento plano, Modelo de turbulencia SST

-El modelo de turbulencia tiene una influencia menor, y la tiene sobre todo en la zona de sotavento.

-La rugosidad de la parva tiene también una influencia menor en términos globales pero de nuevo si se nota su efecto en la zona de sotavento.

-El modelo SST no tiene la opción de rugosidad. Se supone que el modelo SST está más evolucionado e implica un mayor número de ecuaciones calculadas. Tal vez fuera conveniente no incluirlo en la publicación.

Estamos comparando los resultados CFD contra dos fuentes de datos: la EPA y los valores de Stunder. Ambas fuentes tienen mapas de viento de formas parecidas, aunque se refieren a relaciones de viento distintas.

Por ejemplo $u_s/u_r=0.2$ en la EPA es $u_s/u_r=0.4$ o incluso 0.6 en el caso de la figura tomada de los estudios de Stunder.

La convergencia del cálculo es rápida y estable y se mantiene en los valores deseados, RMS de $1E-05$, como vemos en figura adjunta (figura 77), para el caso del modelo de turbulencia K-épsilon con rugosidad.

Los cálculos se reflejan y resumen en la figura 78, donde se presenta un gráfico de barras donde se comparan las áreas de cada una de las subzonas en las que se divide la parva (0.2a, 0.2b, 0.6 y 0.9) según la EPA.

Cada barra corresponde a cada una de las simulaciones estudiadas. Y también se constata, como el modelo de turbulencia K-épsilon con rugosidad y perfil logarítmico del viento, es el que mas se parece a los resultados de la EPA, que corresponde a la barra de color rojo.

Para poder comparar de forma global los valores de CFX y los datos de la EPA realizaremos el cálculo de los valores RMSE (Toraño et al., 2006 [49]):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (14)$$

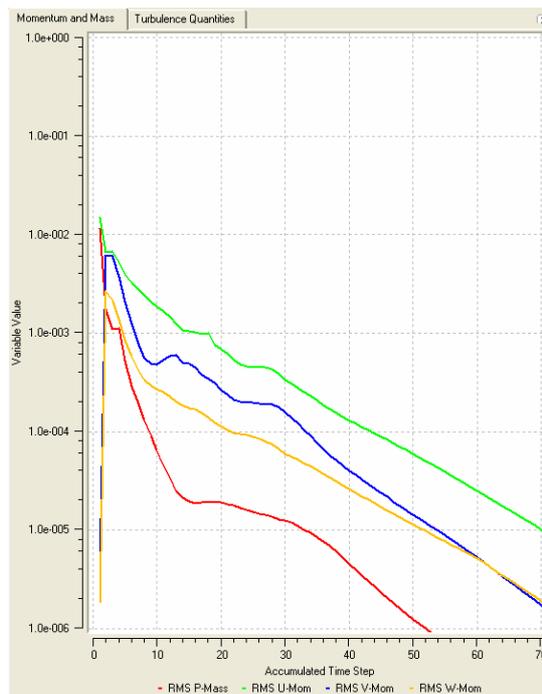


Figura 77: Residuos RMS para cono

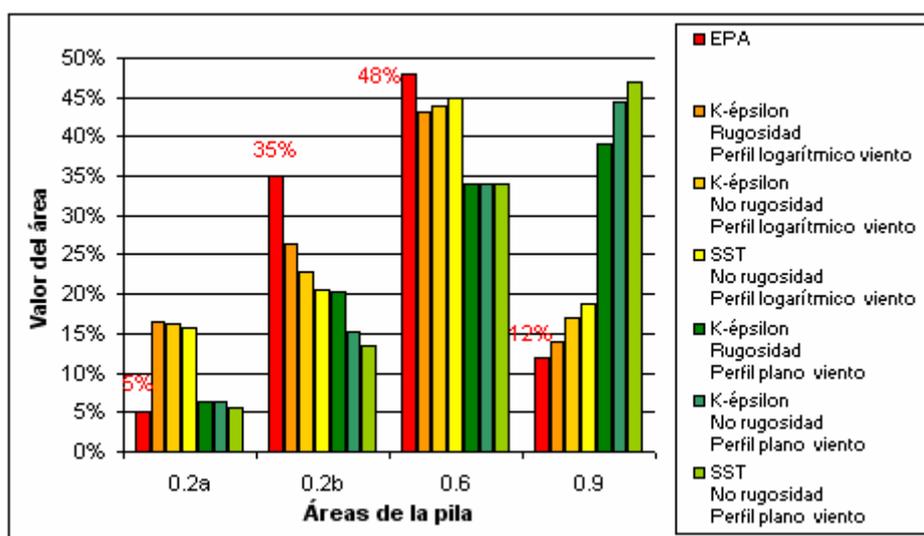


Figura 78: Resultados del cálculo en el caso del cono

donde:

N es el número de ensayos (en este caso el número de subáreas).

y_i es el valor obtenido (columna EPA Pila A en la siguiente tabla).

\hat{y}_i son los valores predichos del CFX para la pila cónica, la desviación es sólo del 3.75%, indicando que la simulación es válida.

Este valor RMSE es una media estadística que nos determina que simulación o conjunto de modelo de turbulencia, rugosidad o perfil logarítmico del viento es el mas indicado para resolver nuestro problema. En la tabla 13 se muestran los valores RMSE para cada una de las simulaciones efectuadas.

k-ε Rug. V log	k-ε NO Rug. V log	SST NO Rug. V log	k-ε Rug. V plano	k-ε NO Rug. V plano	SST NO Rug. V plano
5,74%	6,70%	7,34%	12,82%	15,28%	16,33%

Tabla 13: Valores RMSE para las distintas simulaciones (Cono)

En la siguiente tabla se detallan los valores de la simulación con mejores resultados (tabla 14), las del modelo K-epsilon con rugosidad y perfil logarítmico del viento. Los valores para las subáreas con porcentajes altos, se simulan mejor que los que tienen un área menor. Además se destaca como en

las zonas donde no se produce emisión, CFX calcula una mínima cantidad de material emitido.

	EPA Pila A	CFX
0.2a	5%	11.80%
0.2b	35%	27.83%
0.2c	0%	0.01%
0.6a	48%	47.55%
0.6b	0%	0.01%
0.9	12%	12.79
1.1	0%	0.01%
Total	100.00%	100.00%

Tabla 14: Comparación de las subáreas de USEPA y CFD – Cono

6.2.-GEOMETRÍA DE PARVA TRUNCADA

En las figuras 79, 80, 81 y 82 se muestran tanto las simulaciones como las fotografías del parque en operación perteneciente al proyecto de ampliación de un almacenamiento portuario, previo a la alimentación de una planta siderúrgica, una central termoeléctrica y una fábrica de cemento.

Se consideró un ensayo sobre la parva truncada con diferentes direcciones de viento. En la figura 83 vemos las dimensiones del dominio de la pila en el programa de cálculo. Para este modelo se utilizaron 569.000 elementos para obtener una suave convergencia con residuos de 10^{-5} . Y en la figura 84, podemos ver dos imágenes del mallado en las inmediaciones de la parva. Para la figura a) se muestra la capa de prismas que recubren el suelo y la superficie de la parva, para la imagen b) se muestra un detalle de la anterior.

Si seguimos la misma estructuración que para el caso de la pila cónica, compararemos los resultados de CFD con los de la USEPA, que muestra una serie de figuras de distribución de las velocidades sobre la parva que varían con la dirección del viento que incide sobre ella. Así en la figura 85, se muestran los tres tipos de distribuciones de viento según la EPA (0°, 20° y 40°) siendo, la Pila B1 una pila oval con direcciones de viento de 0°, la Pila B2 sería oval también y con dirección de viento a 20° y la Pila B3 es cuando el viento

forma un ángulo de 40° con respecto a la perpendicular al eje longitudinal de la pila.

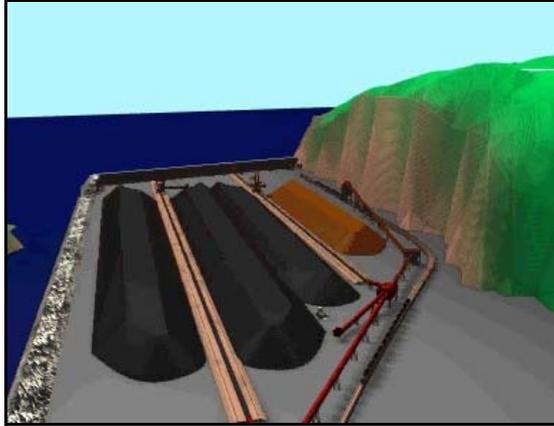


Figura 79: Diseño del parque



Figura 80: Vista del parque en operación

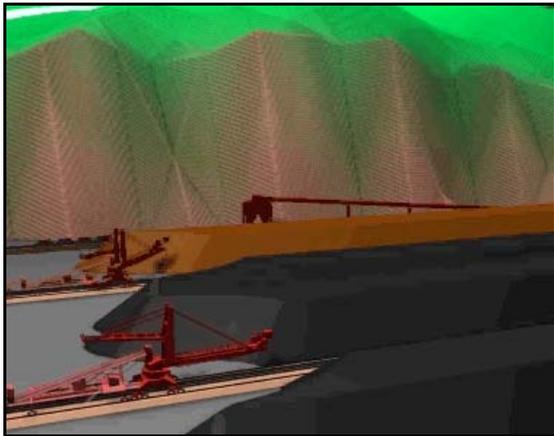


Figura 81: Apiladoras-recogedoras



Figura 82: Detalle de parvas: cónica y truncada

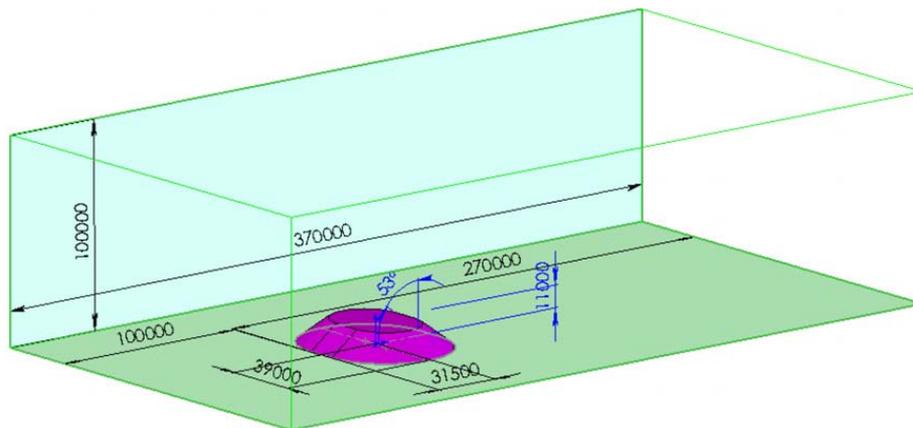


Figura 83: Modelo de la parva truncada

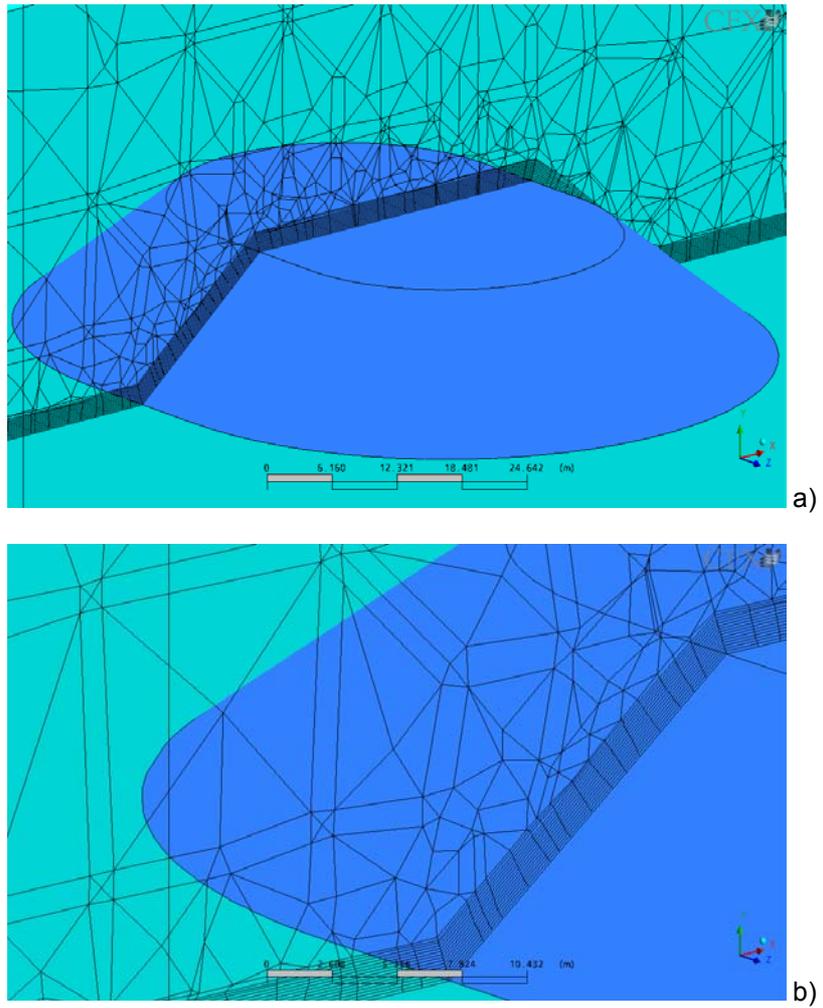
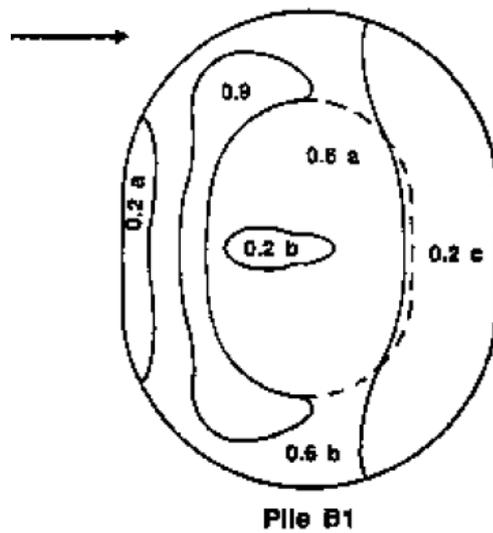


Figura 84: Corte del mallado utilizado en caso de la parva truncada



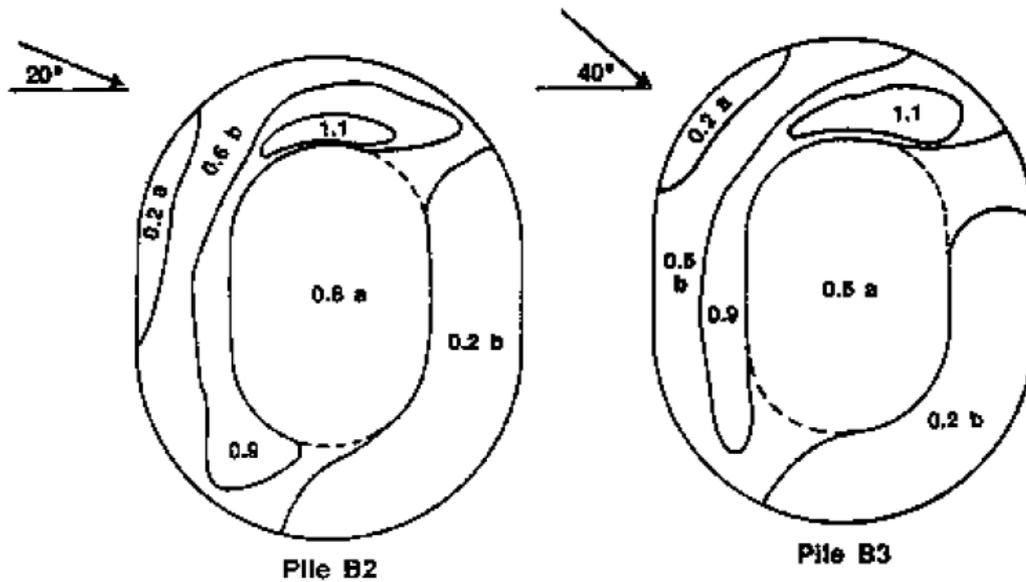


Figura 85: Corte del mallado utilizado en caso de la parva truncada

Para crear la superficie de control a 25 cm de distancia y perpendicular a toda la superficie de la pila, se crearon varias superficies en MATLAB (figura 86) Dentro de cada subárea se crearon 2000 puntos, en los cuales se toman los valores de la Variable 1.

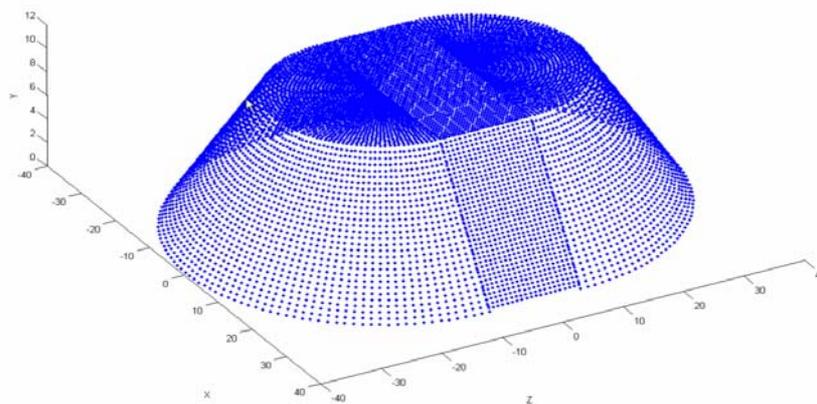


Figura 86: Estructura de la superficie de control de la parva truncada

Usando otra vez esta superficie de control, se predijo que los valores de la Variable 1 sobre dicha superficie son los que se ilustran en la figura 87, para distintas direcciones de viento.

Estos valores son los que se comparan posteriormente con los de US EPA (figura 88) y para las que se encuentra una muy buena correlación.

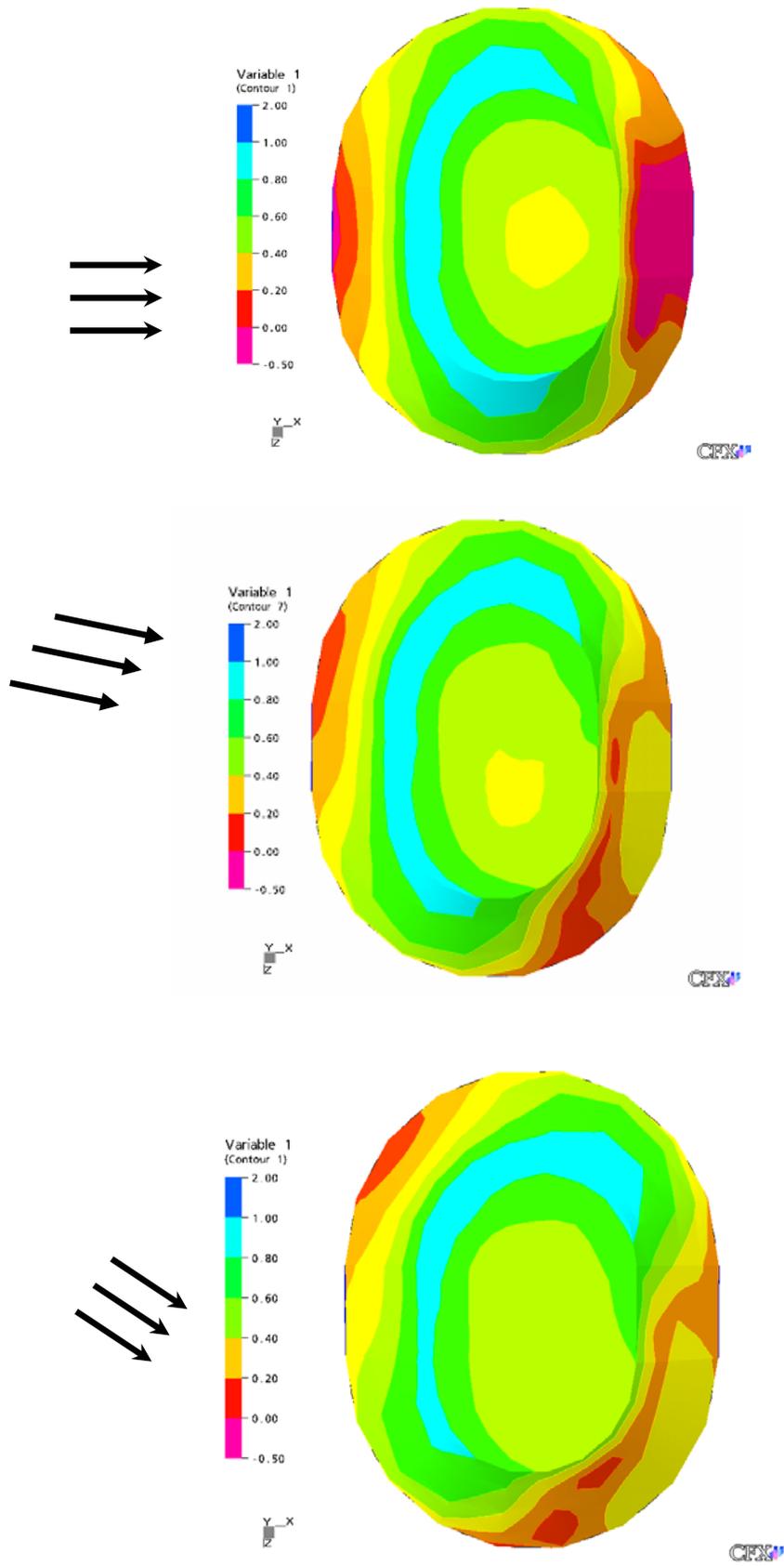


Figura 87: Variable 1 en la superficie de la parva a 25 cm (rumbo 0°, 20° y 40°)

En la figura 88 se indican los resultados del cálculo de forma análoga a como se hizo para la parva tipo cono, para la pila B1, donde se representan los porcentajes de cada simulación para cada una de las subáreas en las que se divide la parva. Teniendo en cuenta las 6 simulaciones para los distintos modelos de turbulencia usados. Se puede ver como existe una muy buena correlación con los datos de la US EPA para el caso del modelo K-épsilon con rugosidad sobre la parva y perfil logarítmico del viento.

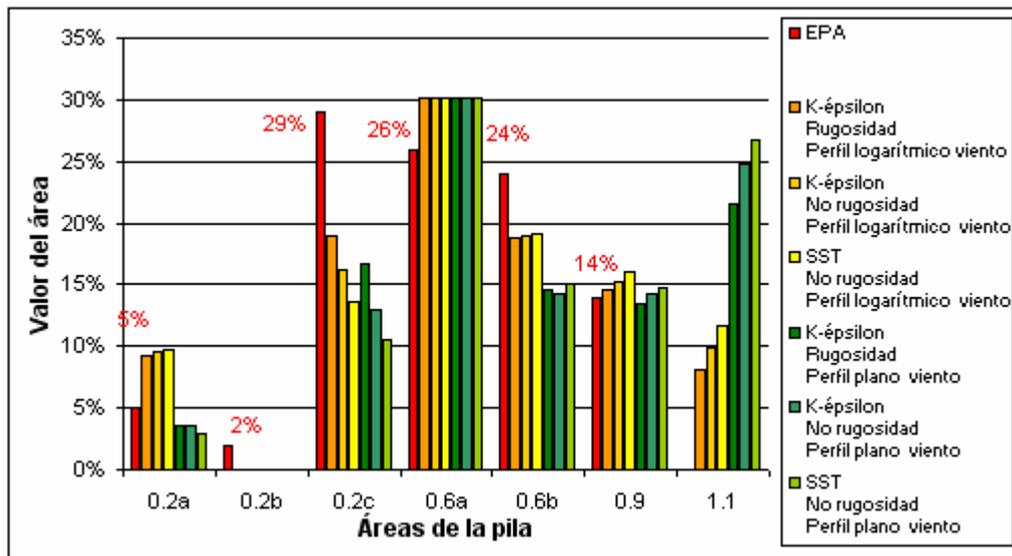


Figura 88: Resultados del cálculo para la parva truncada tipo B1

Se puede observar en la tabla 15 los valores para RMSE y también, cómo de nuevo, el mejor ajuste se logra con el perfil logarítmico de viento y el modelo de turbulencia K-épsilon con rugosidad sobre la superficie de la parva.

Como ejemplo, la tabla 15 muestra los valores para un solo tipo de pila, la B1.

k-ε Rug. V log	k-ε NO Rug. V log	SST NO Rug. V log	k-ε Rug. V plano	k-ε NO Rug. V plano	SST NO Rug. V plano
4.61%	6,84%	7,98%	10.18%	11.90%	12.87%

Tabla 15: Valores RMSE, (Parva truncada B1)

Centrándonos ya en las simulaciones con perfil logarítmico y K-épsilon con rugosidad probados con los valores de RMSE, se realizan también para los otros modelos de pilas de la EPA (B2 y B3) para viento incidente a 20° y 40°.

Los resultados obtenidos son: 4.61% para rumbo 0°, 3.50% para rumbo 20° y 3.09% para rumbo 40°. Al igual que en el caso de la geometría cono, el modelo computacional con CFX se puede considerar que análogo a los experimentos USEPA para poder determinar los valores de la velocidad friccional. A continuación se presentan las simulaciones para cada uno de los modelos de pilas, B1, B2 y B3.

VIENTO A 0°

Se presentan las figuras de la pila B1 con viento a 0° (figuras 89 a la 95).

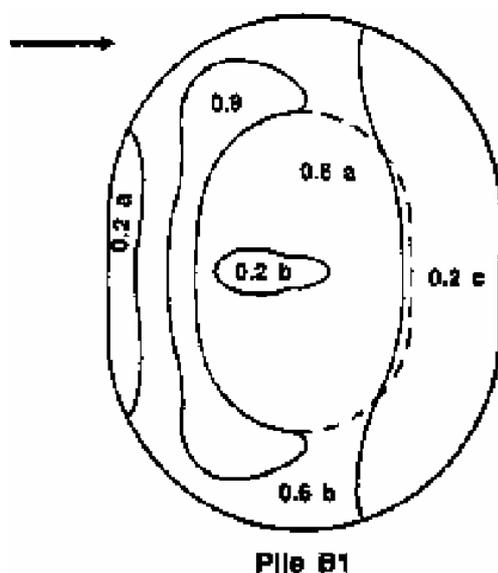


Figura 89: Gráfico de la EPA

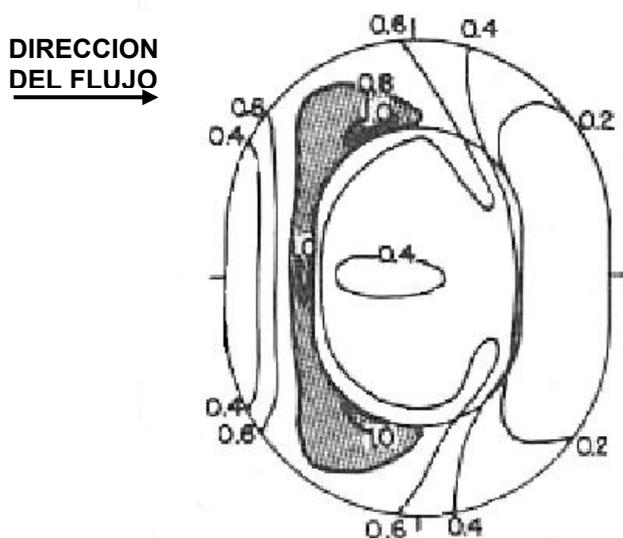


Figura 90: Figura de Stunder y Arya

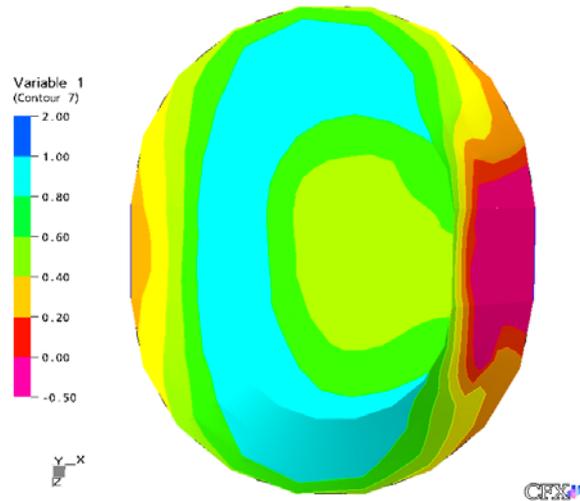


Figura 91: K- ϵ con rugosidad y perfil pseudologarítmico del viento

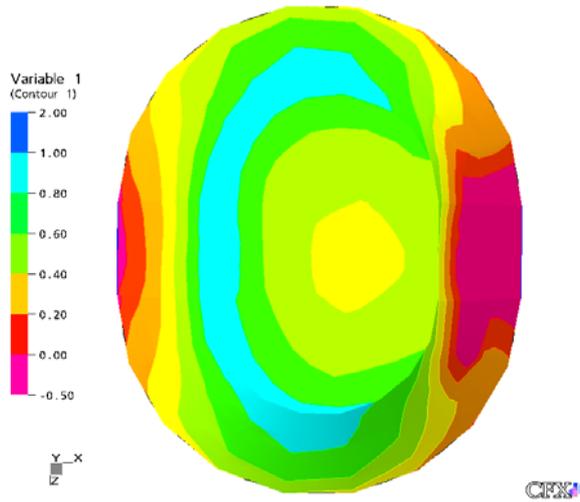


Figura 92: K- ϵ con rugosidad y perfil logarítmico del viento

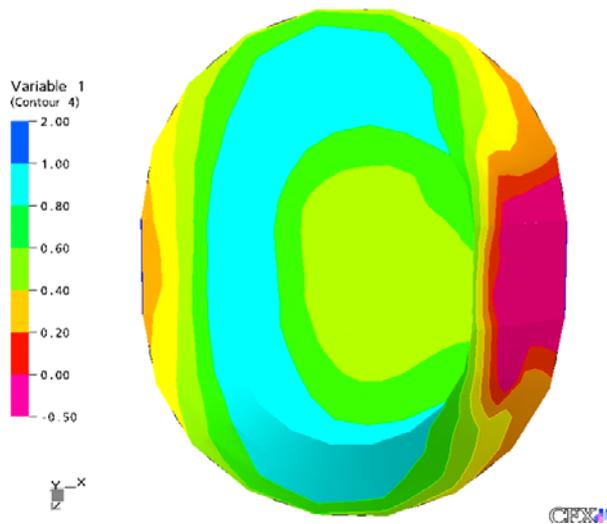


Figura 93: K- ϵ con rugosidad y perfil plano del viento

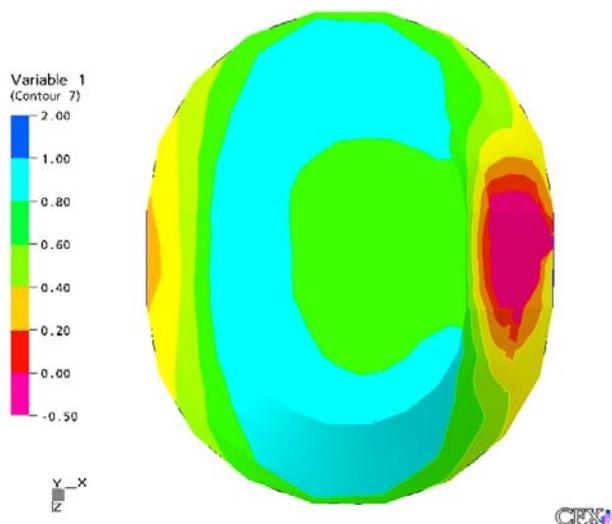


Figura 94: Turbulencia SST y perfil plano del viento

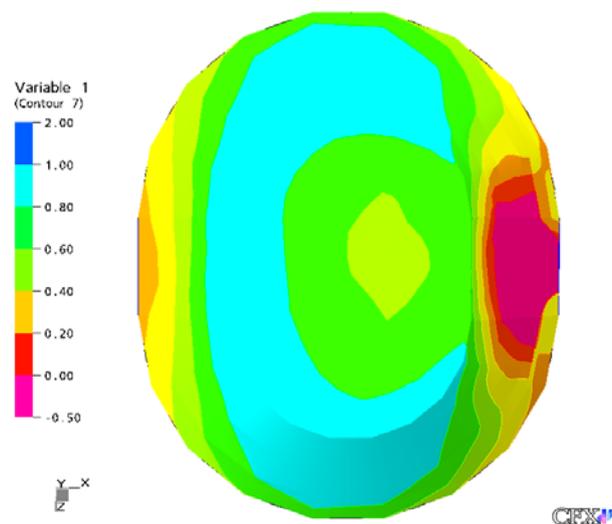


Figura 95: K-ε sin rugosidad y perfil plano del viento

En todos los casos el viento sopla de izquierda a derecha. Los dos primeros gráficos de las figuras 81 y 82 corresponden a los obtenidos respectivamente por la EPA y por Stunder y Arya respectivamente.

En la EPA no se dan detalles de cómo se calculan los mapas de viento para el caso del viento soplando en rumbo 20° y 40°. Se ha tenido que tantear en tres distintos casos cuáles han sido las componentes del viento estudiadas:

- En el primero de los casos representamos en el gráfico la razón de las velocidades afectadas de un signo calculado a partir de las componentes de la velocidad en la dirección X.

- Idem en el segundo de los casos para la componente en la dirección Z.
- En el tercero de los casos se estudia la razón de ambas velocidades para el módulo del vector velocidad.

En los dos primeros casos se está teniendo en cuenta la orientación del vector velocidad. Por ejemplo en el primer caso estamos dando valor negativo a aquellos valores de "Variable 1" cuyas componentes en la dirección X sean negativas. Con esto somos capaces de ver en el gráfico zonas de color rosa (rango de "Variable 1" menor que 0) que nos indican existencia de flujo hacia la izquierda del apilamiento. En el segundo caso (el signo viene determinado por la componente "Y") podemos ver en color rosa zonas donde el flujo tiene componente negativa en la dirección Z. En el tercer caso estamos obviando la orientación del vector velocidad, ya que tan sólo estudiamos su módulo ("Velocity" indica el módulo del vector velocidad).

VIENTO A 20°

En este caso ya sólo hemos trabajado con K-épsilon, viento logarítmico y rugosidades en la pila y no en el suelo. Se han desarrollado tres casos, según definamos "Variable 1" (figuras 96 a 99).

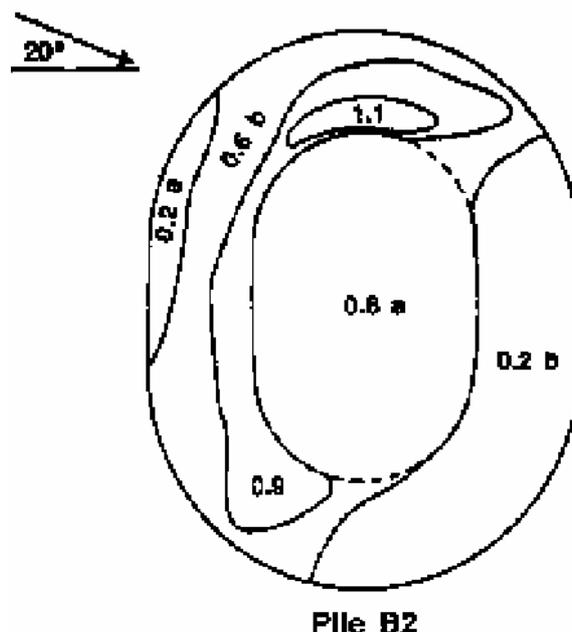


Figura 96: Gráfico de la EPA

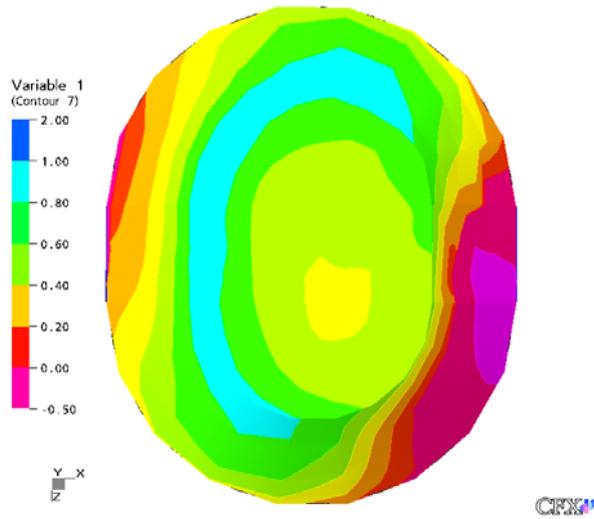


Figura 97: Velocidad según componente X

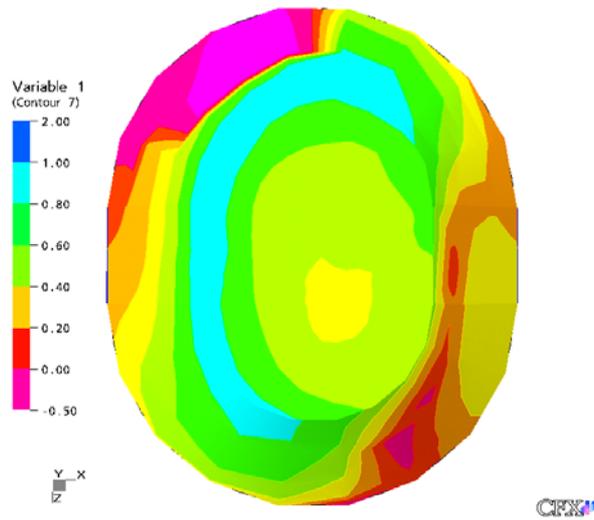


Figura 98: Velocidad según componente Z

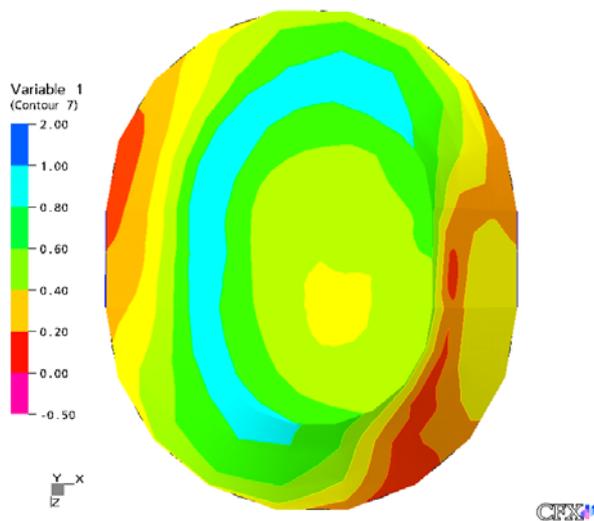


Figura 99: Velocidad según su módulo

VIENTO A 40°

Para el caso de dirección del viento a 40° de la horizontal, tenemos las mismas restricciones y problemas que para las simulaciones del el modelo a 20°.

Por lo tanto, el modelo de turbulencia utilizado es el mismo que en el anterior, k-épsilon con viento logarítmico y rugosidades en la pila y no en el suelo (figuras 100 a 103).

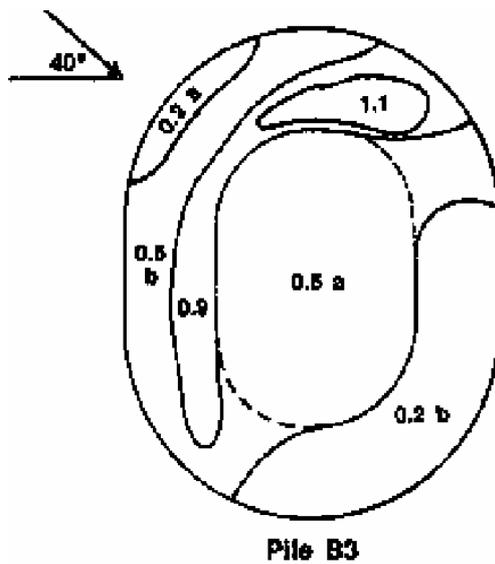


Figura 100: Gráfico de la EPA

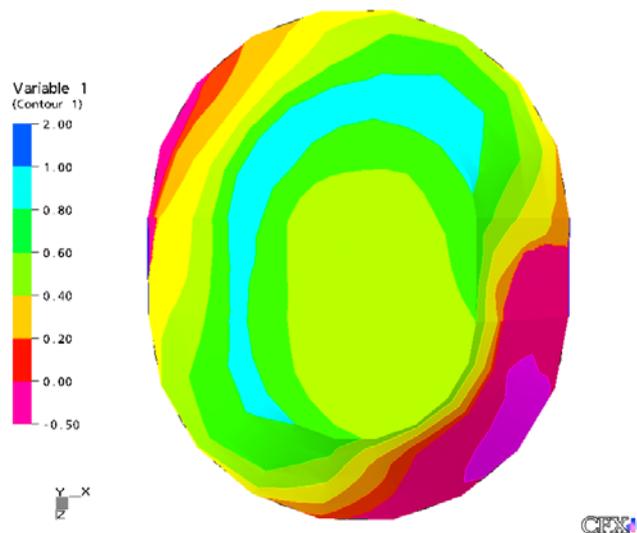


Figura 101: Velocidad según componente X

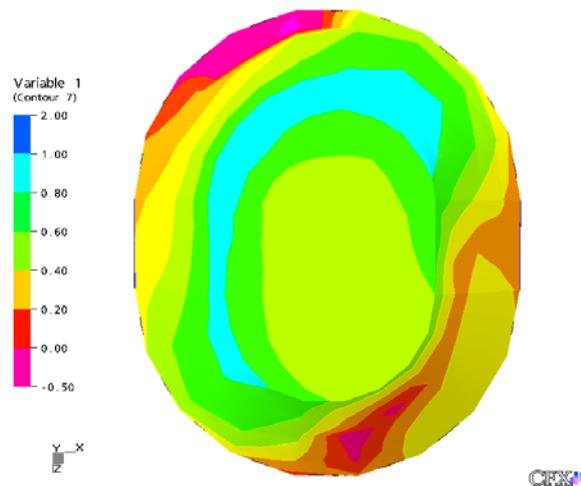


Figura 102: Velocidad según componente Z

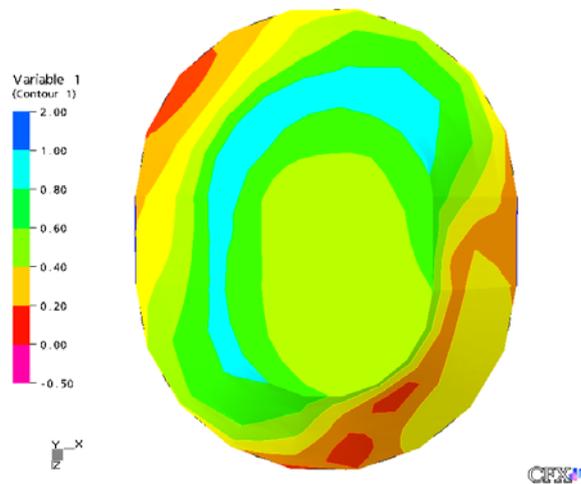


Figura 103: Velocidad según su módulo

Como ya explicamos anteriormente, para ambos casos de 20 y 40 grados nos decantamos con trabajar con el último gráfico. Razones:

- La zona a barlovento del primer caso es demasiado negativa al compararla con EPA. Además invade claramente la zona de 0.6a.
- La zona sotavento del segundo caso es de nuevo demasiado negativa.
- Tal y como se ha medido, con anemómetros de hilo caliente, es lógico pensar que el parámetro que se ha medido sea la componente de la velocidad en el sentido adventional, que es lo que nos da el tercer caso.

De nuevo, en ambas simulaciones, estamos trabajando con niveles de error RMS en la resolución CFD de 1E-05, lo que podemos considerar aceptable a efectos de investigación. Se adjuntan las figuras 104 y 105 que muestran la

convergencia de ambos modelos, algo más tardía en el caso de viento a 40° que en el caso de viento a 20° (160 contra 123 iteraciones respectivamente).

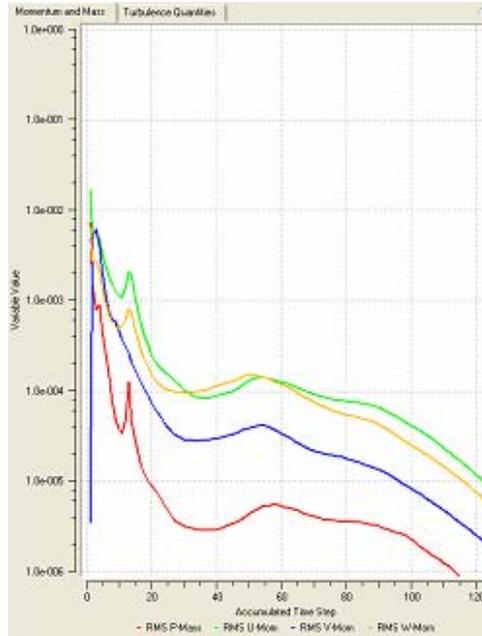


Figura 104: Errores RMS para viento a 20°

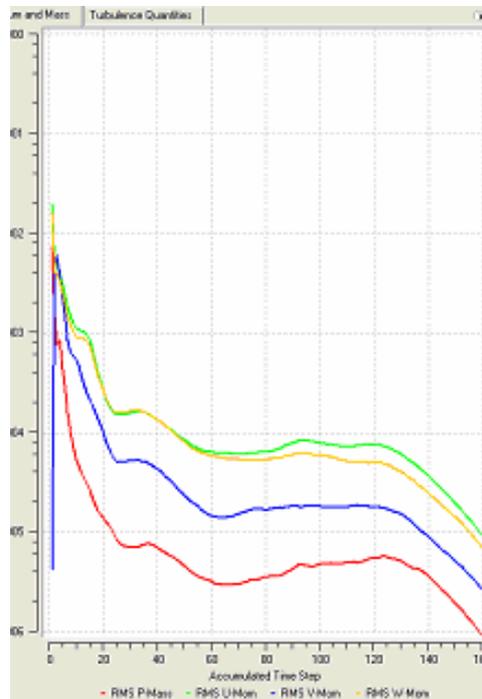


Figura 105: Errores RMS para viento a 40°

En la figura siguiente, se muestran tres gráficos que corresponden a cada una de las simulaciones para las tipos de Pila B1, B2 y B3, comparándola con EPA.

En los tres casos, el porcentaje del área de cada subzona es muy parecida, lo que nos determina una muy buena correlación entre los dos métodos de cálculo. En la mayoría de los caso, es el valor de EPA mayor que el de CFX, mientras que donde la EPA no tiene valor (por ejemplo 1.1 para B1) CFX presenta un pequeño porcentaje.

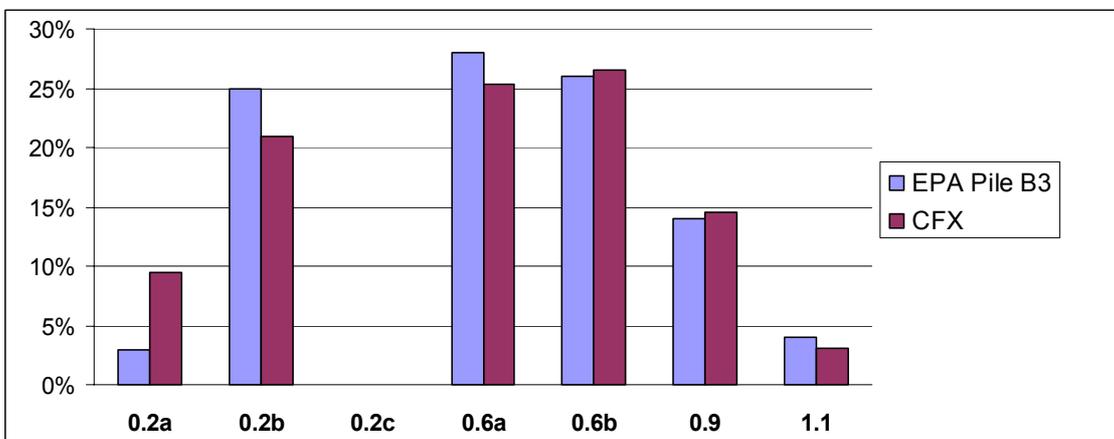
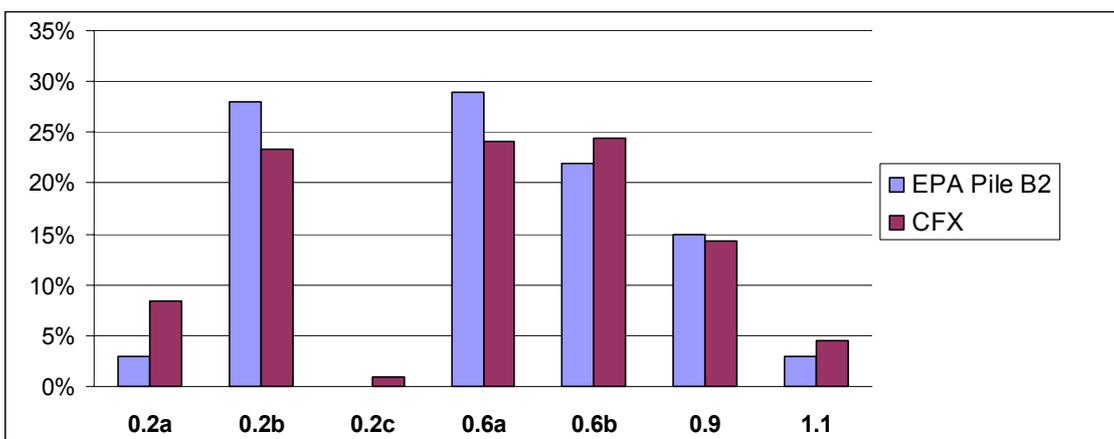
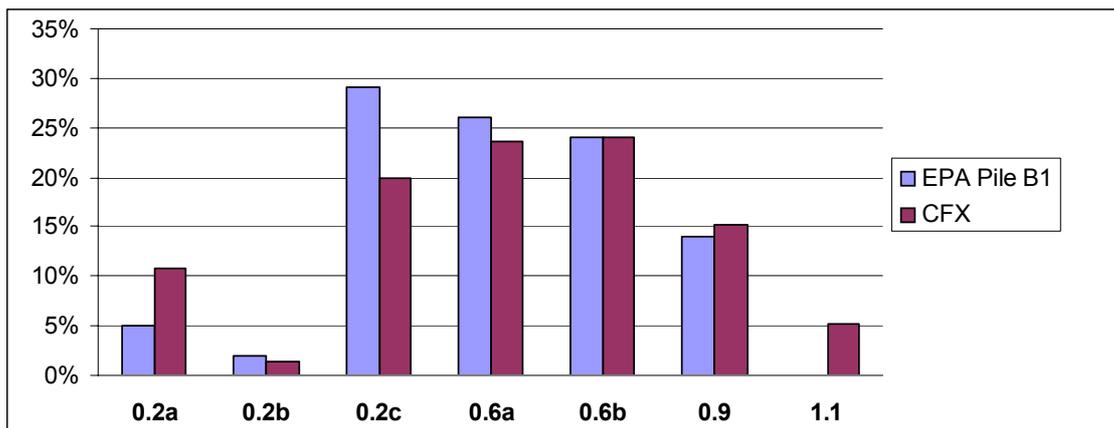


Figura 106: Comparación de las subáreas para USEPA y CFD (rumbo 0°, 20° y 40°)

6.3.-GEOMETRÍA DE PARVA SEMICIRCULAR O PARVA RIÑÓN

En las figuras 107, 108 y 109 se muestra una descargadora contigua de barcos con brazo apilador de parva riñón con la máquina sin traslación, ó trabajando sobre una bodega.



Figura 107: Descargadora continua de barcos

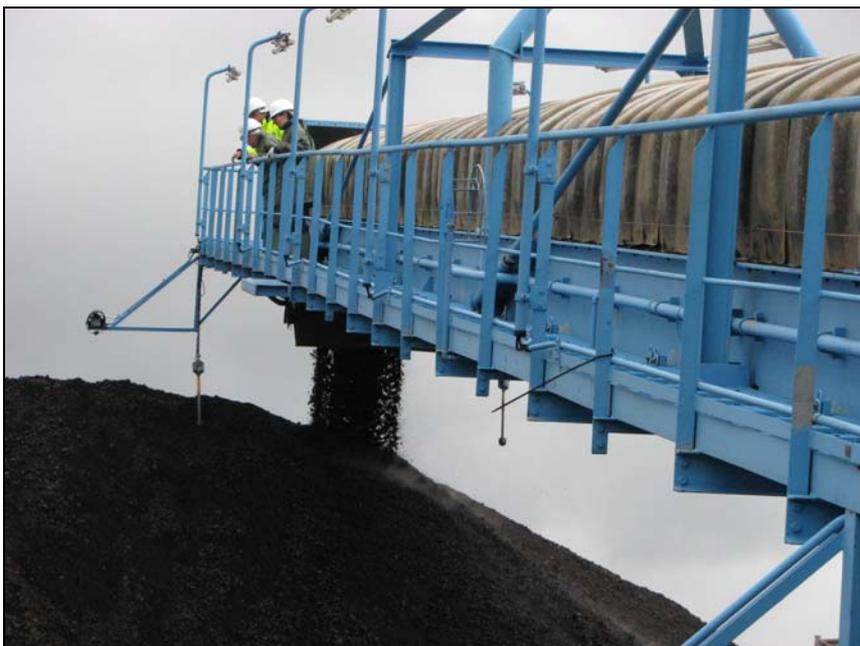


Figura 108: Brazo apilador

A partir de los dos casos analizados previamente, podemos inferir que el software CFD es capaz de reproducir los perfiles de la EPA. La pila de forma semicircular se analiza a continuación de forma análoga para determinar la contribución potencial de la emisión de polvo. En la ilustración inferior vemos (figura 110) el dominio computacional para este caso.



Figura 109: Formación de parva riñón

Se utilizaron cerca de 300,000 elementos para representar la pila y asegurar una alta resolución de los cálculos (figura 111). En dicha ilustración vemos las superficies de mallado usadas para el cálculo de la pila semicircular.

Para conseguir de nuevo valores de la velocidad friccional para utilizar en el cálculo de la USEPA (AP-42), hay que insertar una Superficie de Control para calcular la Variable 1 alrededor de la pila a una altura sobre ella de 25 cm. Para ello se utilizaron cerca de 8,000 puntos sobre esta superficie.

Debido a la característica asimétrica de la pila, se estudian direcciones de viento distintas a: 0°, 45°, 90°, 135° y 180° (figura 112 a 116). Se dibujan subáreas con iguales valores de u_s/u_r (Variable 1) en el modelo y se divide la superficie de control en aproximadamente 8,000 puntos, por lo que la forma total de la superficie se distribuye entre estas subzonas (tabla 10).

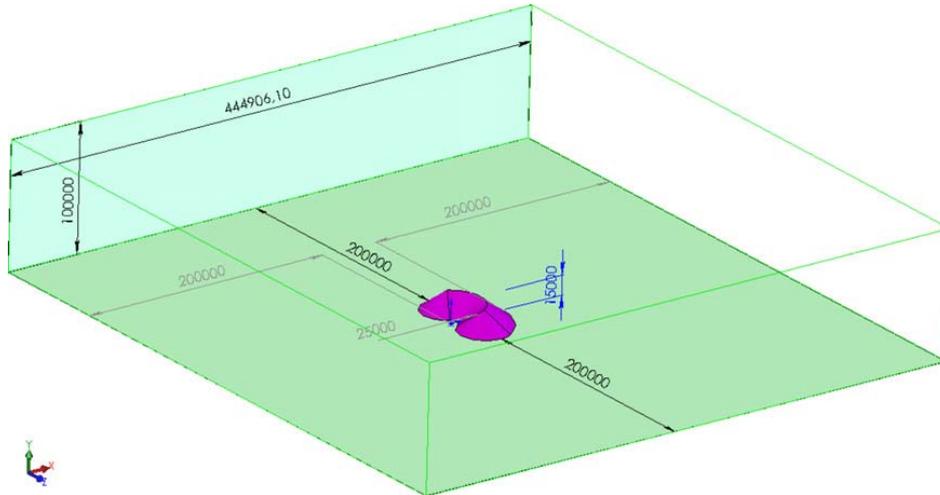


Figura 110: Modelo de la parva riñón

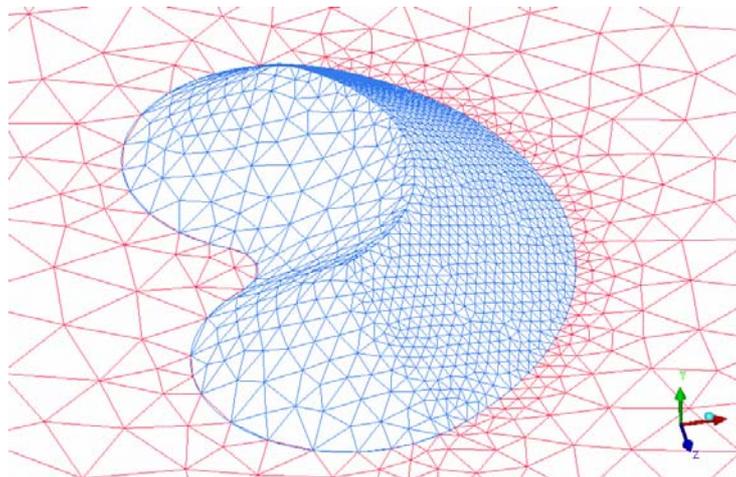


Figura 111: Mallado alrededor de la pila riñón

La Variable 1 que dibuja estas áreas en el módulo de cálculo del CFX-Post, responde a la ecuación siguiente:

$$\text{Variable1} = (\text{Velocity} / 40 \text{ [km h}^{-1}\text{)})$$

Siendo Velocity, el valor de la velocidad en cada una de las subárea calculada por el programa.

US EPA y Axetell & Cowherd proporcionan una metodología para una comparación teórica de dos pilas diferentes localizadas en el mismo lugar y perturbadas por un mismo número de eventos (trabajos en las pilas) bajo las mismas condiciones de viento (Castro et al., 1988 [50]).

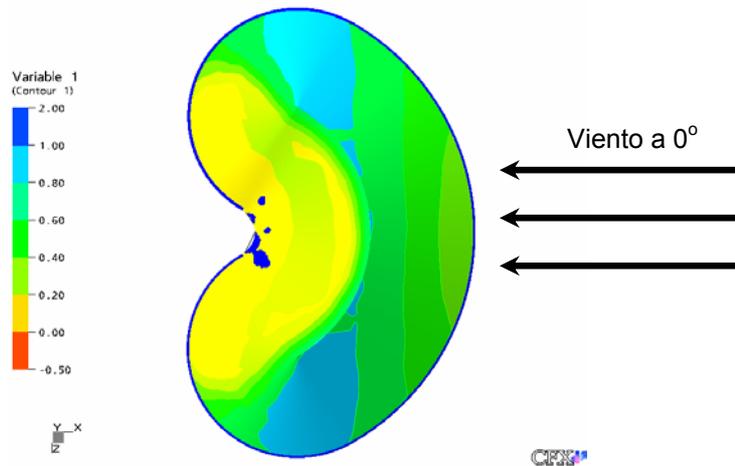


Figura 112: Entrada de viento a 0°

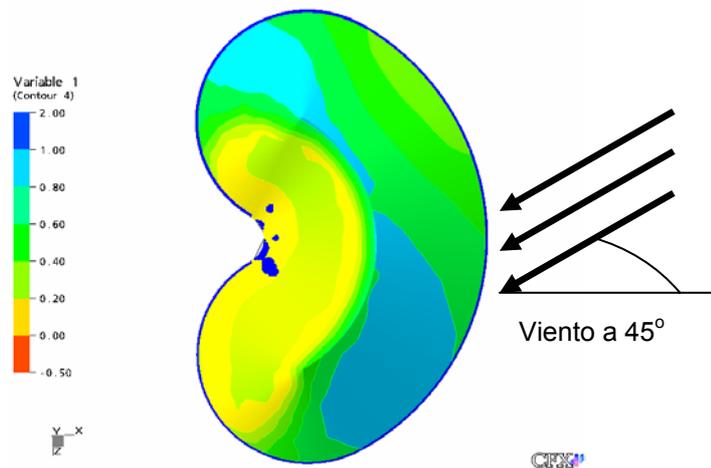


Figura 113: Entrada de viento a 45°

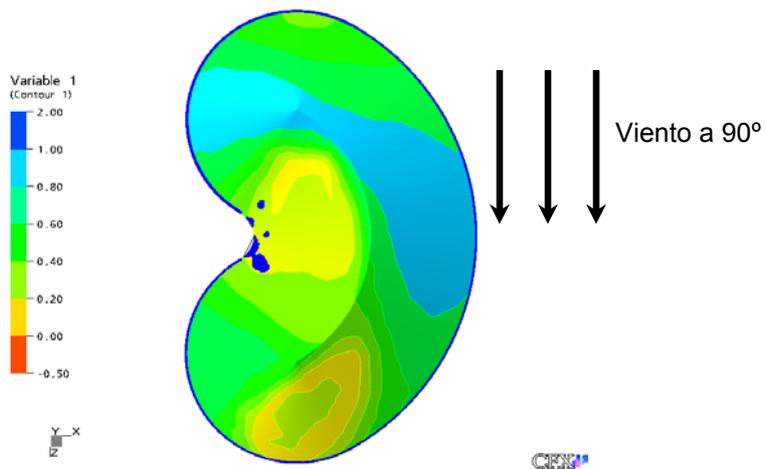


Figura 114: Entrada de viento a 90°

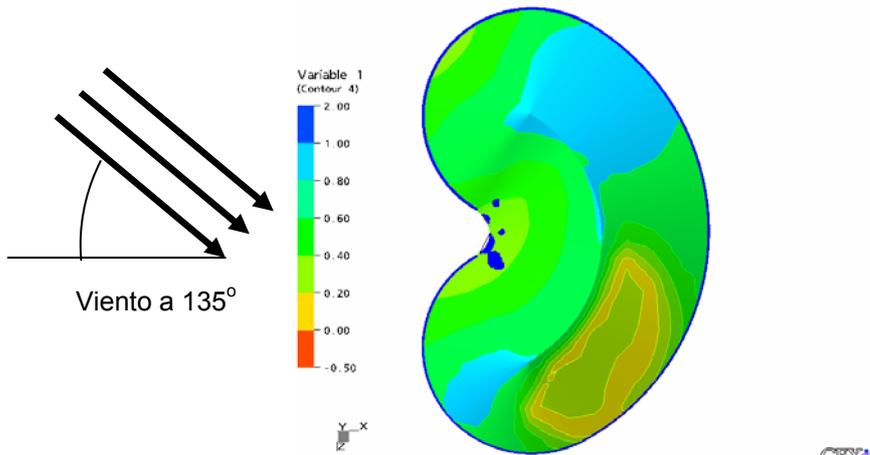


Figura 115: Entrada de viento a 135°

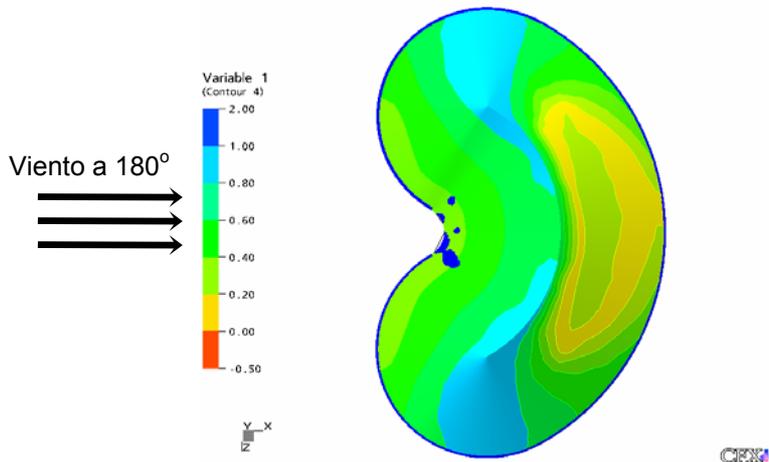


Figura 116: Entrada viento a 180°

Esta metodología nos dice que la única desviación posible para uno u otro será la distribución de las subáreas para las variaciones de u_s/u_r . Comparando los resultados para una pila cónica y una semicircular, predeciremos cual de las soluciones se considera la mas conservativa o la menos contaminante.

Cuando analizamos el grupo de dos pilas cónicas, asumimos que el viento incide de la misma manera en ambas, debido a que tienen una geometría simétrica. No se consideran las posibles interferencias de la torre de transferencia y las cintas transportadoras ya que sus dimensiones no son significativas y la distancia a las pilas es larga. También se puede adoptar para la pila semicircular.

Los análisis de los valores de la pila semicircular y la cónica muestran que el valor friccional global (valor absoluto del rango multiplicado por la parte de la superficie total) es alto para la semicircular cuando la dirección del viento es de 135° o 180°. La explicación se encuentra en el hecho de que las caras expuestas al viento tienen una geometría cóncava, lo que acelera la fuerza del viento creando una chimenea de salida de las partículas aguas debajo de la pila. Esto se podría comparar con un efecto Venturi (figura 117).

Por otra parte, cuando el viento incide con un ángulo de 0°, las caras convexas cambian las líneas de flujo suavizándolas. Por lo tanto el viento no se acelera tanto como con los casos a 135° y 180° dando lugar a una menor emisión de polvo.

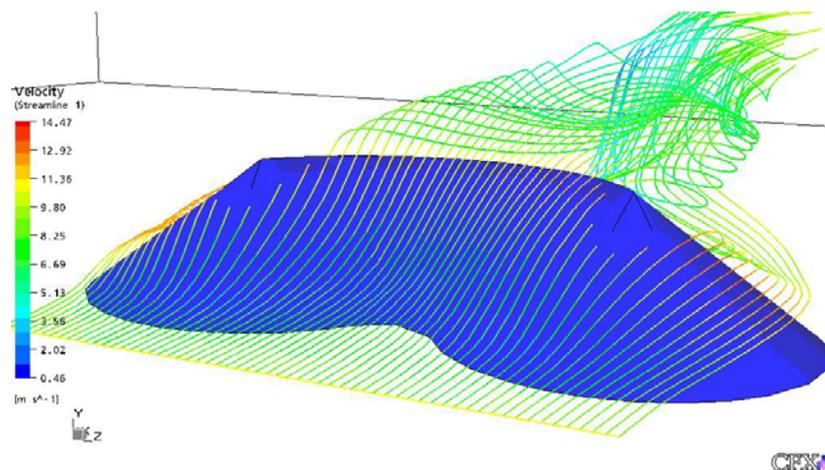


Figura 117: Líneas de la corriente y concentración de vectores del flujo para el viento de 180°

Para direcciones de viento a 0°, 45° y 90° tanto las pilas cónicas como las semicirculares presentan una forma convexa contra el flujo de viento, pero se predicen valores mas bajos de erosión para el caso de la pila semicircular. Una posible explicación para este fenómeno puede ser el hecho de que la corriente contraria bajo la pila cónica crea un subárea de alta fricción sobre la superficie que desempeña un papel determinante en el factor total de la emisión.

Aplicando la forma de las subáreas sobre el área total de la superficie, se obtiene un valor friccional global. No se consideró el valor mínimo de la velocidad friccional límite, y esta simplificación puede afectar a los resultados

en ciertos casos, porque no consideramos los valores más bajos de las áreas de erosión de la Variable 1.

Este “Valor Friccional Global” es el resultado de multiplicar cada rango de la Variable 1 por las partes del área total, dando una valoración cuantitativa de las fluctuaciones de la velocidad friccional que afecta a la superficie. Un valor mas grande significa una mayor emisión de polvo cuando se considera la misma velocidad de viento.

En la tabla 16 se muestran los valores de la pila cónica y los de la pila semicircular o parva riñón, para cada una de las direcciones de viento incidente estudiado. Estos valores corresponden a más subzonas de las que estudiamos para la comparación con los de la EPA. Lo que nos indica, que a partir de CFX, somos capaces de dividir la superficie de la parva en muchas mas subzonas y así comparar la parva cónica y la riñón completamente.

Para la pila semicircular, el peor caso se considera para un viento que incida sobre la parva con las direcciones 135° o 180°. Estos casos mas desfavorables, son los que se utilizarán para la comparación con las pilas cónicas (tabla 17).

Los resultados de esta tabla demuestran que la pila cónica tiene valores similares a la pila riñón cuando el ángulo del viento es 135° o 180°.

6.4.-EJEMPLO DE CASO REAL

Sería necesario aplicar estos resultados a un caso particular para ver el impacto de otras variables como velocidades friccionales límite, la milla más rápida, etc. en el caso del cono se ha considerado la siguiente simplificación: Si tenemos dos conos cuando el viento incide con una dirección a 90° desde la izquierda, la primera pila cónica crea una sombra sobre la otra pila.

Esta influencia podría reducir las velocidades hasta un 50%. En este caso particular, los valores obtenidos para una pila son más altos que cualquiera de los casos semicirculares.

		CONO	PILA RIÑÓN				
Rango	Variable1 (Us/Ur)	% de superf. total	% de superf. total (0°)	% de superf. (45°)	% de superf. (90°)	% de superf. (135°)	% de superf. (180°)
-0.5	<-0.5	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.4	-0.4<x<-0.3	2.56	0.13	0.00	1.00	0.00	0.35
-0.3	-0.3<x<-0.2	2.53	12.35	0.00	5.29	0.00	3.59
-0.2	-0.2<x<-0.1	2.38	17.09	0.00	3.13	0.00	4.15
-0.1	-0.1<x<0	0.91	3.25	0.00	0.64	0.00	0.33
0	0<x<0.1	0.99	0.41	4.50	0.48	0.57	0.14
0.1	0.1<x<0.2	2.24	1.62	12.60	2.20	4.49	1.34
0.2	0.2<x<0.3	3.90	3.50	14.35	4.90	4.57	1.57
0.3	0.3<x<0.4	4.47	2.12	10.74	7.39	1.63	1.49
0.4	0.4<x<0.5	5.36	2.88	2.65	6.79	2.80	1.38
0.5	0.5<x<0.6	6.37	3.83	3.86	5.90	8.01	9.95
0.6	0.6<x<0.7	7.71	4.69	4.94	6.42	9.79	10.40
0.7	0.7<x<0.8	9.00	6.08	6.48	10.57	12.37	10.98
0.8	0.8<x<0.9	9.92	8.29	7.48	9.99	15.02	11.00
0.9	0.9<x<1	11.16	12.80	11.33	11.25	20.13	13.00
1	1<x<1.1	13.11	13.59	19.32	14.87	20.16	14.74
1.1	> 1.1	15.88	7.37	1.75	9.18	0.46	15.59
	TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 16: Variable 1 a 25 cm. Comparación entre la pila riñón y la cónica

	Cono	Viento a 0°	Viento a 45°	Viento a 90°	Viento a 135°	Viento a 180°
Factor Global de Fricción	70.26	58.98	55.27	60.09	72.31	74.81

Tabla 17: Valor global de la fricción para la pila riñón

Nuestro caso de estudio se basó en un volumen total de carbón de 18.100 m³ (aproximadamente 15.400 t con densidad 0.85 t/m³) y ángulo del reposo de 32°. Para almacenar tal tonelaje, se requirieron los dos diseños de apilamientos diferentes, dos pilas cónicas de altura 15 m o una pila semicircular de 110° y una altura de 10.45 m. La superficie total para los dos conos y los diseños semicirculares será aproximadamente de 4.300 m² y 1450 m², respectivamente.

El fin de esta pila como almacenaje de emergencia en caso de producción excesiva no permite que estimemos cuántas veces podría ser utilizado por año. Para desarrollar el actual estudio, se consideró un cociente de perturbación de 12 por año. Esto supone que después de almacenar el material no sufrirá ninguna variación durante varios días hasta que se remueva por las labores de carga y descarga sobre su superficie.

Analizando la estadística del viento de un anemómetro localizado a 8 m sobre el nivel del suelo se encontró que 12 m/s se podrían tomar como promedio del viento más rápido de la milla rápida en la zona, desde el oeste y el norte (180° y 90°) como direcciones más significativas.

Considerando que la emisión de polvo disminuye rápidamente (minutos) (si la superficie de la pila no se perturbaba) y que cada pila sería expuesta al viento por un período del tiempo largo (días), asumimos que tomando los valores medios para esta comparación no se invalida el método. Corrigiendo estos valores del viento a altura de 10 m tomando la rugosidad superficial como 0.005 m, tenemos:

$$u_{10}^+ = u_8^+ \left(\frac{\ln(10/0.005)}{\ln(8/0.005)} \right) \quad u_{10}^+ = 12.36 \text{ m/s}$$

Aplicando las fórmulas (1) y (3) y una velocidad límite de 1 m/s para (4) y (5) los valores de la emisión de PM-30 (K = 1) se obtienen según la tabla 18, que se muestra a continuación.

Es evidente que hay una gran diferencia cuantitativa de emisiones entre el cono y la pila semicircular, incluso cuando se compara el cono con el caso semicircular a 90° que se podría considerar absolutamente similar debido a su forma convexa expuesta a la dirección ascendente del viento.

En la tabla 19, vemos como la parva cónica tiene valores mayores, que los dos casos de la parva semicircular a 90° y 180°, para la Emisión por perturbación, Emisión por año y Ratio de emisión por tonelada, mientras que es la parva semicircular con dirección de viento a 180 grados, la que mayor Ratio de emisión por metro cuadrado. Ratios de emisión obtenidos durante un año tomando un número de perturbaciones N=12 (tabla 18) muestra claramente que las motivaciones ambientales recomendarían el uso de la pila semicircular.

Si consideramos los valores para la velocidad del viento cerca de la superficie de la pila (tabla 19), se aprecia una diferencia inesperada. Pero es necesario recordar que la superficie expuesta al viento por dos conos es casi tres veces el área de la semicircular, así que los ratios de la emisión por metro cuadrado son absolutamente similares.

Variable 1 u_s / u_r	U*	P (g/m ²)	Emisión PM-30 (g) por periodo entre perturbaciones		
			Cono	Semicircular	
				90°	180°
0.1	0.12	0.00	0	0	0
0.2	0.25	0.00	0	0	0
0.3	0.37	0.00	0	0	0
0.4	0.49	0.00	0	0	0
0.5	0.62	0.00	0	0	0
0.6	0.74	0.00	0	0	0
0.7	0.87	0.00	0	0	0
0.8	0.99	0.00	0	0	0
0.9	1.11	3.55	1692.18	580.29	670.56
1.0	1.24	9.15	5117.19	1974.48	1957.21
1.1	1.36	16.51	11190.52	2200.67	3737.3
TOTAL			17999.9	4755.44	6365.07

Tabla 18: Cálculo de las emisiones PM-30 por perturbación

Por lo tanto está claro, que la pila semicircular tiene una gran ventaja frente a la pila cónica, y es una superficie más pequeña para contener la misma cantidad

de material. Pero esta ventaja no es la única, sino que puede compensar el mayor valor del viento sobre su superficie, dando una emisión más alta por metro cuadrado.

	Emisión Por Perturbación (kg)	Emisión por año (kg)	Ratio de Emisión por m²	Ratio de emisión por tonelada
Cono	18	216	0.051	0.014
Riñón				
90°	4.76	57.07	0.039	0.004
180°	6.37	76.38	0.053	0.005

Tabla 19: Cálculo de las emisiones PM-30

7.-COMPARACIÓN DE DISEÑOS

La facilidad de acceso al software CFD por medio de pequeñas y medianas empresas, así como la sencillez de los estándares de USEPA para obtener relaciones empíricas entre la velocidad del viento y la cuantificación del polvo emitido desde superficies expuestas permite a los ingenieros desarrollar modelos para predecir con bastante exactitud impactos ambientales de instalaciones futuras.

El interés de estos métodos de cálculo está claro si consideramos que las simulaciones realizadas anteriormente en el caso del cono, cientos de kilos de carbón se pierden a lo largo de un año, y tan sólo tomando 12 perturbaciones por año, cuando la operación diaria de instalaciones industriales implica varios centenares de episodios de la emisión.

Gracias al estudio presentado en este documento, se ha obtenido una comprensión clara de cómo la forma y la localización de las pilas pueden influenciar la viabilidad de los sistemas de almacenaje al hablar de restricciones de la emisión, y de cómo combinar el análisis económico y ambiental para obtener el diseño más ventajoso.

Cuando se está en estados iniciales de diseño y todavía se puede seleccionar la posición de pilas sería interesante orientar las pilas semicirculares de tal

forma que los regímenes importantes del viento ataquen el lado convexo para reducir la fricción sobre las pilas. Al mismo tiempo, si se requieren barreras, la protección debería centrarse en el lado cóncavo de la pila.

Aun más, los valores de la tabla de cálculo para la parva riñón son válidos para predecir el polvo de formas semicirculares ajustando sólo parámetros locales y tomando velocidades límite de estudios empíricos de los materiales o de la bibliografía disponible.

**CAPÍTULO 4: AUTOMATIZACIÓN DE LA
EMISIÓN MEDIANTE SOFTWARE
(HIEPA v1.0 y CAFM v1.0)**

1.-INTRODUCCIÓN

Los apilamientos de material particulado se realizan habitualmente a la intemperie. El efecto de las condiciones atmosféricas sobre dichos apilamientos provoca que el polvo se ponga en suspensión dando lugar a emisiones consideradas como un problema medioambiental y operacional, Page and Organiscak, 2004 [51]. La cuantificación de polvo emitido se ve afectada por diversos factores, (Xuan, 2004 [52]; EPA, 1998 [53]), tales como, variables características del viento (dirección o velocidad), altura del apilamiento, parámetros derivados de las partículas que conforman el material (diámetro, densidad, humedad o forma), presencia de materiales no erosionables, formación de costras y frecuencia de perturbación de la capa superficial. En definitiva, el estudio de este fenómeno es muy complejo debido al gran número de variables que se han de considerar, tanto teóricas como derivadas de aproximaciones numéricas resultantes en la simulación, (Witt et al., 2002 [53]). A pesar de ello, una evaluación exclusivamente empírica del fenómeno se vería limitada por condiciones de trabajo, así como por fluctuaciones importantes obtenidas para un mismo ensayo, (Muleski, 1991 [54]; Anon, 1979 [55]).

Como ya comentamos en los capítulos anteriores, una de las mejores metodologías establecidas para determinar la cantidad de polvo emitido en un almacenamiento de material a la intemperie es la norma EPA AP-42 13.2.5. Esta norma no solo cuantifica la emisión, sino que predice el factor de emisión que regula dicho fenómeno, recoge los procedimientos para determinar las emisiones totales y ejemplifica los mecanismos de control de polvo.

Para poder estimar la emisión de polvo, la norma EPA se basa en el reparto aerodinámico del viento alrededor de la parva, siendo realizado para estos estudios a partir de un software específico de códigos numéricos, el ANSYS CFX, basado en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

A partir de la adaptación e implementación de esta metodología, se ha desarrollado el software HIEPA (v1.0). Se trata de un modelo de predicción de la contaminación atmosférica por material particulado con múltiples

aplicaciones en ingeniería. Este software no sólo cuantifica el nivel de polvo aerotransportado sino que aporta los datos cualitativos vinculados a la emisión.

No obstante, antes de proceder a los cálculos de la emisión de polvo a partir del software HIEPA v1.0 (Diego et al., 2007 [5] y [6]), hay que tener en cuenta un nuevo software que lo complementa, el CAFM v1.0, cálculo aproximado del Fastest Mile (Diego et al., 2008 [56]). La Fastest Mile, como ya comentamos en anteriores capítulos, es la racha de viento más rápida entre perturbaciones, siendo por tanto la que origina la saltación de las partículas. Es por ello que la estimación automatizada de dicho valor y su volcado ó unión con otros programas, como los que estamos comentando, sea de gran importancia.

2.-CÁLCULO APROXIMADO DEL FASTEST MILE: CAFM v1.0

2.1.-INTRODUCCIÓN

El viento es una magnitud con una gran variabilidad, sobre todo si se tienen en cuenta largos periodos de tiempo como pueden ser rangos del tipo anual.

Sin embargo, hay gran cantidad de cálculos en la ingeniería que requieren como entrada de un dato de viento fijo. Un ejemplo puede ser la emisión de polvo en apilamientos a la intemperie, en el que la emisión es altamente dependiente, entre otros factores, del valor “fastest mile” que define las rachas de viento. Este método se ha programado en el software HIEPA v1.0, que explicaremos posteriormente.

En este apartado se trata de establecer una metodología que relacione datos prácticos de viento disponibles, o fácilmente medibles en estación meteorológica, con ese valor “fastest mile” de forma que se puedan realizar estimaciones de emisiones máximas previstas en parvas.

2.2.-OBTENCIÓN DE DATOS

Hay diferentes direcciones web que recogen información meteorológica más o menos detallada.

Como es el Instituto Nacional de Meteorología [57] que recoge, de forma diaria, valores medios y valores máximos de viento, pero no proporciona listados con datos históricos. NOA [58], es el servicio norteamericano de meteorología y

funciona de forma similar. Pero se necesita que la información esté disponible, y para ello tenemos que irnos a otras web, por ejemplo las contenidas en los Yahoo Widgets, que disponen de información meteorológica actualizada en tiempo real.

Otra web de la que se pueden obtener datos actualizados en tiempo real, así como archivos históricos es la de Weather Underground [59]. En ella se recogen datos de multitud de estaciones meteorológicas repartidas por todo el mundo. En el caso de España hay más de 40 estaciones recogiendo datos, pero para este estudio se elige la estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2 Plus, con código IASTURIAS5, localizada en la zona de Somió, en Gijón.

En la figura 118 se muestra la localización de la estación meteorológica situada en Gijón. Se han escogido esta estación al estar cercana a un Puerto Industrial con alto volumen de tráfico, el Musel.

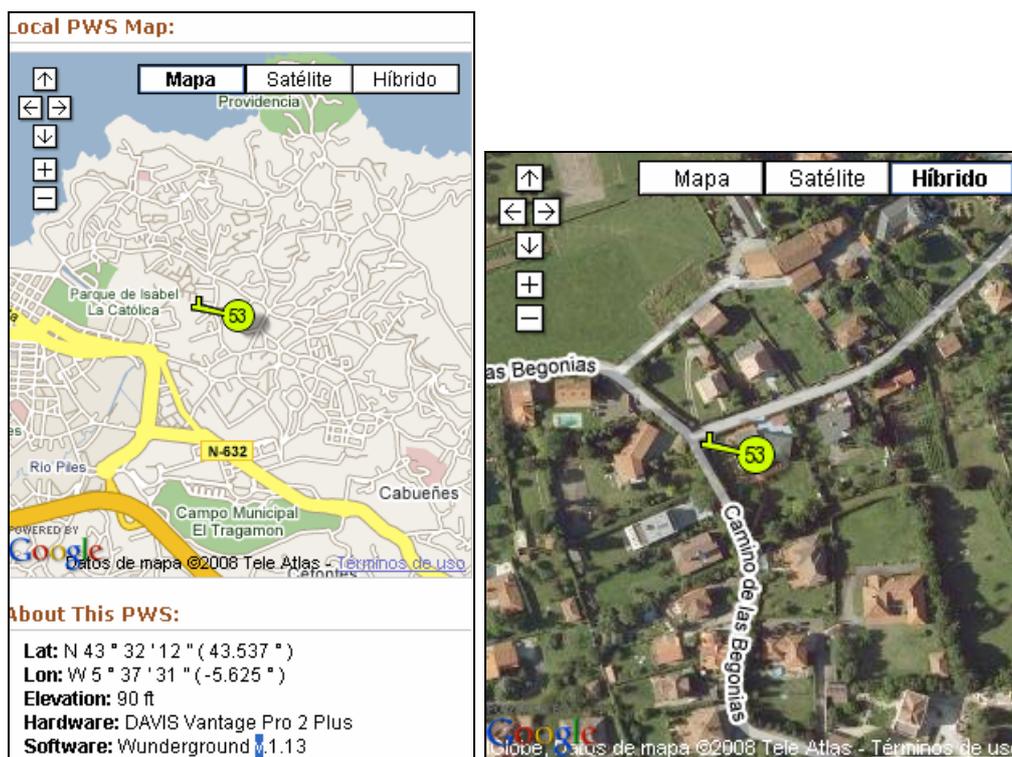


Figura 118: Localización de la estación meteorológica de estudio

Entre la multitud de datos meteorológicos, que se pueden obtener, se encuentran los valores "Average Wind Speed" y "Maximum Wind Gust", es decir, viento medio y racha máxima de viento, que son las que mas nos

interesan. En la figura 119, se muestran los datos disponibles para el año 2007 en esta estación de Gijón.

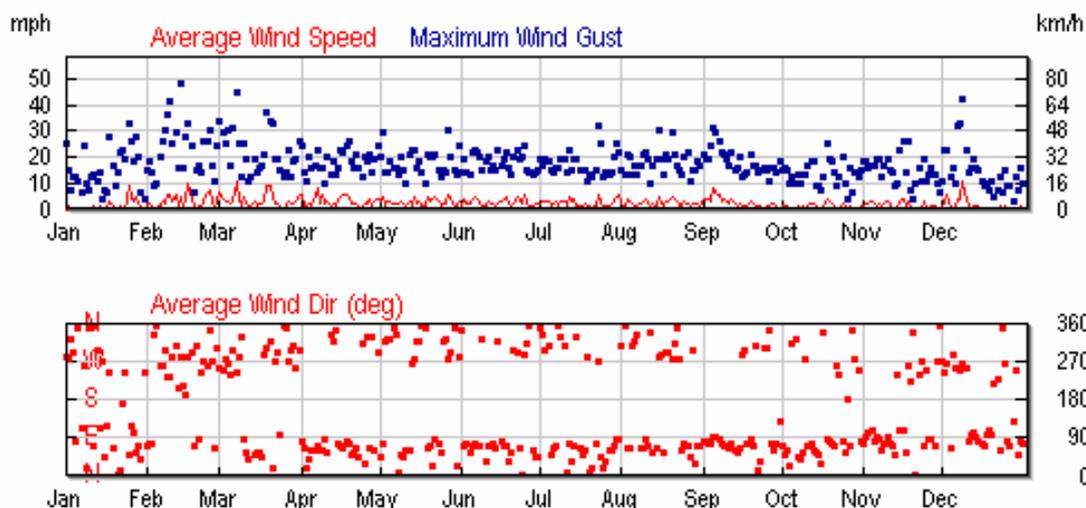


Figura 119: Datos disponibles para viento en el año 2007 en la estación IASTURIAS3

Estos datos se pueden obtener en formato CSV, es decir ficheros ANSI con datos delimitados por comas. Estos datos se pueden importar en hojas de cálculo o bien trabajar con ellos directamente para obtener los datos de interés.

Se han obtenido datos para 3 años y medio de escala temporal (datos de unos 1200 días).

2.3.-DESARROLLO

El objetivo de esta investigación, que es básica para el programa HIEPA, es conseguir, a partir de los datos medios diarios de viento que se recogen habitualmente en las estadísticas de las estaciones meteorológicas oficiales, un valor “fastest mile” aplicable a los estudios de emisión de polvo en parvas de minerales de la EPA.

La operatoria en una instalación sería, tomar una velocidad media de viento en un determinado período, que puede ser la del día anterior o la de ese día en tiempo real y aplicar el método que a partir de ahora expondremos para calcular la racha máxima de viento esperada, suponiendo que las condiciones meteorológicas se mantienen.

De distintas estaciones meteorológicas de mayor o menor entidad, instaladas en la explotación, en sus cercanías, o bien con estaciones meteorológicas temporales instaladas durante el período de tiempo que dure el estudio. Así, podemos obtener los listados de datos como la velocidad media diaria y la velocidad de racha máxima. Tomaremos como ejemplo los datos correspondientes a todo el año 2007 en la estación medidora de Gijón. De los 365 datos originales, tras un filtrado de los mismos para eliminar datos nulos o erróneos (valores menores que 0), nos quedamos con un total de 320 pares de datos.

En principio parece intuitivo el decir que la velocidad media diaria y la velocidad máxima de racha están relacionadas. Podríamos en primer lugar intentar obtener una correlación lineal entre ellos, figura 120.

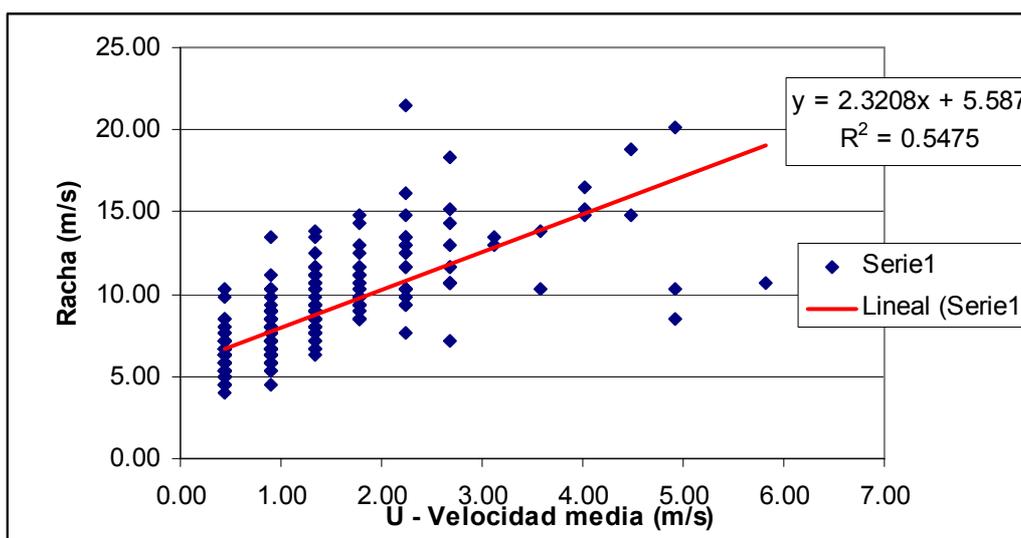


Figura 120: Correlación lineal entre velocidad media diaria y la velocidad de racha

Pero la correlación lineal que se obtiene es bastante mala (regresión cuadrática de 0.54). No parece admisible el relacionar ambas variables.

Sin embargo, Weggel, 1999 [60] ha realizado un estudio que liga estadísticamente la velocidad media diaria de viento con la velocidad de racha máxima diaria y define el parámetro Gust Factor como:

$$G = \frac{u_g}{U} - 1 \quad (15)$$
$$G > 0$$

donde:

u_g es el pico diario de la racha de viento.

U es la media diaria de la velocidad del viento.

u_g/U es considerado como la velocidad de la racha máxima normalizada.

Asume distribución normal del Gust Factor y propone un estudio de la probabilidad de que se alcance un cierto valor de racha en función de la velocidad media del viento de ese día en concreto.

Si visualizamos ahora G contra U , tenemos la figura 121, donde se muestra una correlación (EstimG, curva en rojo) ciertamente buena (regresión de 0.80).

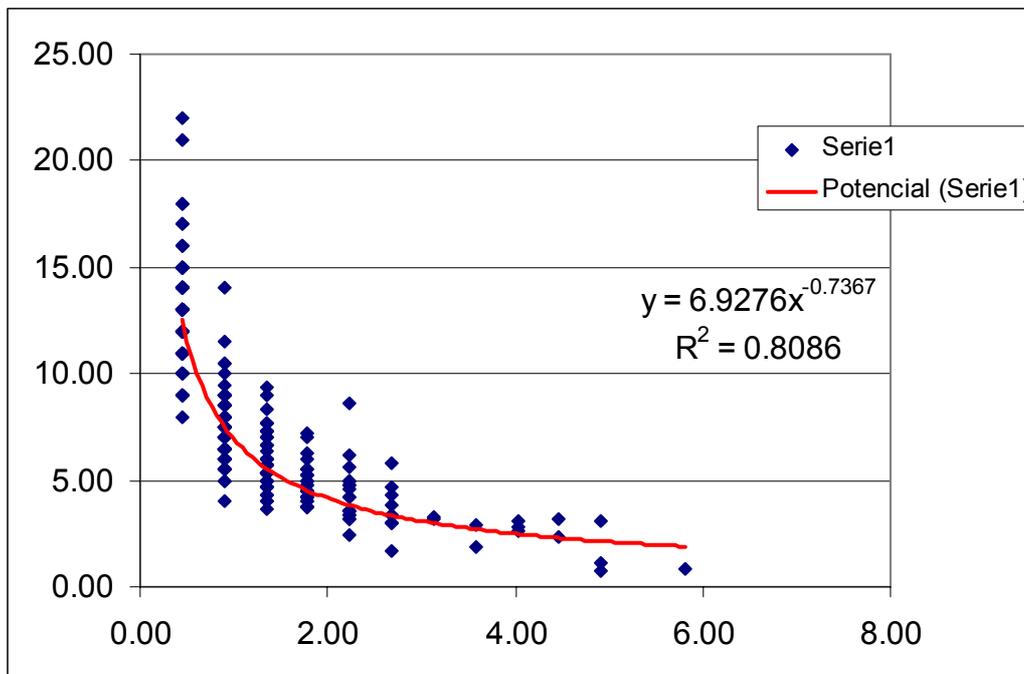


Figura 121: Correlación G vs U

Weggel, determinó que G vs. U (velocidad media) sigue una distribución log-normal.

Por lo tanto, determinando que $G=y \cdot A \cdot U^B = \text{EXP}(x) \cdot A \cdot U^B$ y aplicando “ x ” como una normal cuya media es cero y cuya desviación típica es 0.2238, calculando para una probabilidad del 99%, sería igual a $G=11.66 \cdot U^{(-0.7367)}$. Que representado gráficamente, sería el gráfico que aparece en la figura 122.

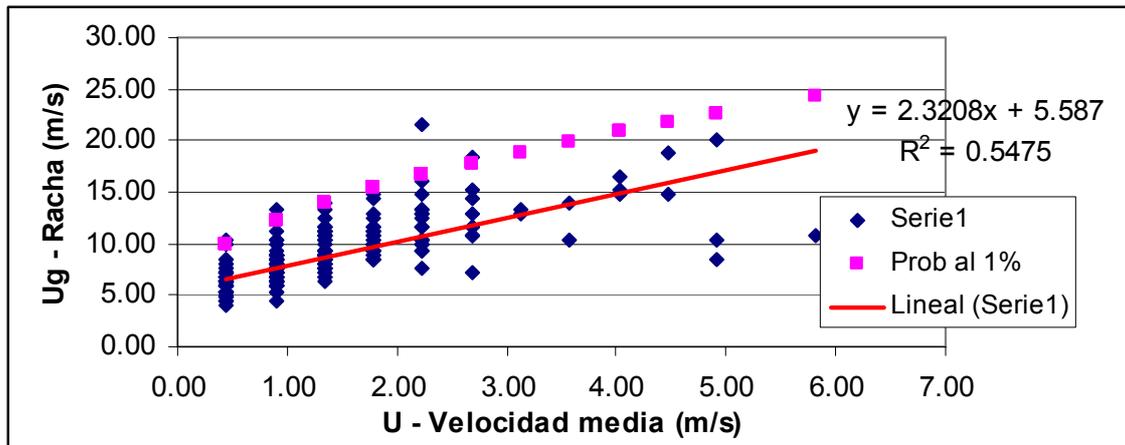


Figura 122: Representación gráfica del Gust Factor

En la figura 122, vemos como los valores de u_g estimados (puntos de color rosa) envuelven por la parte superior a la nube de puntos. Excepto en un caso, estaremos asegurando que la velocidad de racha calculada se mantiene por encima de la real.

Para la figura 123, observamos en el gráfico, el mismo fenómeno pero calculado sobre los pares U-G.

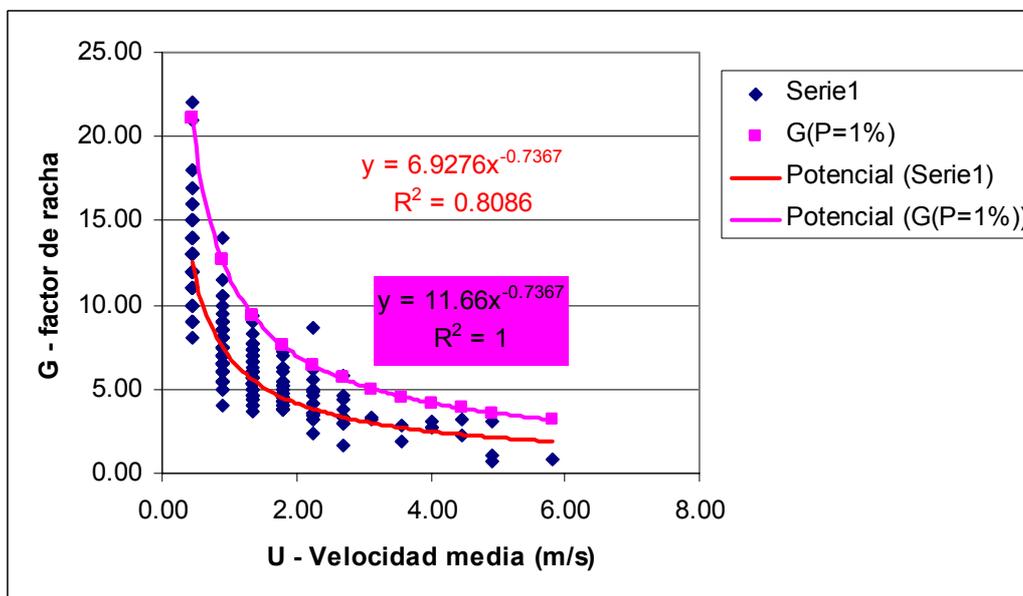


Figura 123: Representación para los pares U-G

Si ahora, para cada valor de viento medio y para cada valor de probabilidad entre el 60% y el 99%, calculamos un valor de racha de viento, obtenemos el siguiente gráfico de la figura 124.

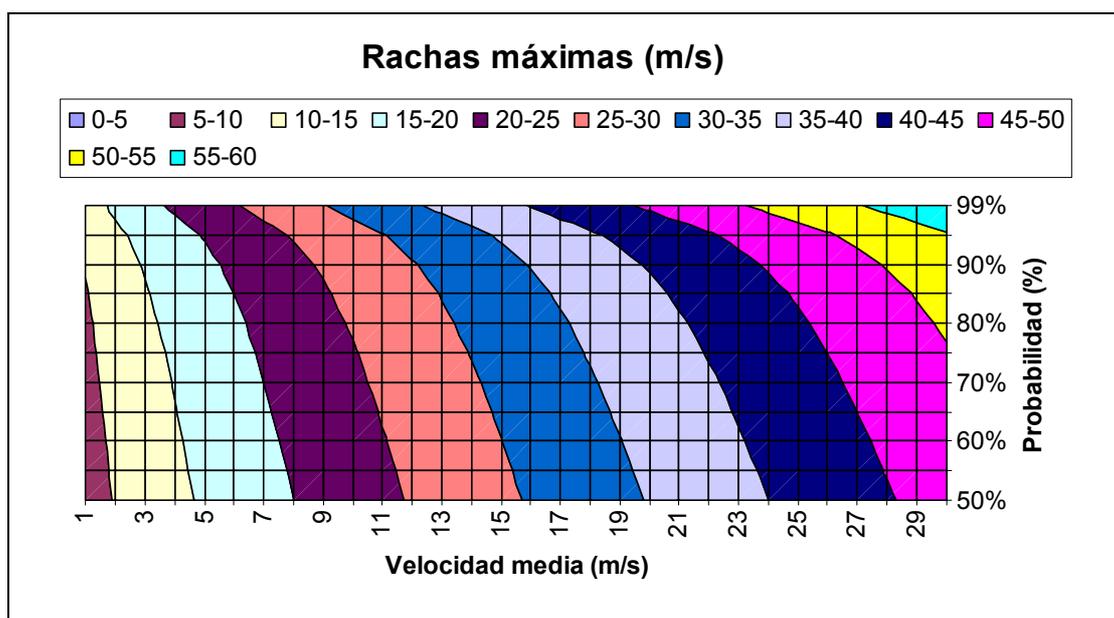


Figura 124: Valor de la racha de viento para cada valor de la probabilidad (60-90%)

Para interpretar el gráfico anterior hagamos un ejemplo. Si la velocidad media diaria es de 15 m/s hay un 40% de probabilidades de que la racha de viento supere los 30 m/s y un 5% de probabilidades de que supere los 35 m/s.

Si ahora nos limitamos a estudiar las colas de la distribución, es decir, aquellos rangos de probabilidad menores, repitiendo el estudio anterior para 3 casos de 75%, 95% y 99% de probabilidad, obtenemos las ecuaciones de ajuste entre G y U, en primer lugar, y entre Racha y U en segundo lugar, figura 125.

Factor de racha = $8.05514468807 * \text{viento medio (m/s)}^{-0.736728889748}$ (con el 75% de probabilidad)
 Factor de racha = $10.0090415366 * \text{viento medio (m/s)}^{-0.736728889748}$ (con el 95% de probabilidad)
 Factor de racha = $11.6582556901 * \text{viento medio (m/s)}^{-0.736728889748}$ (con el 99% de probabilidad)
 Racha (m/s) = $\text{viento medio (m/s)} + 8.05514468807 * \text{viento medio (m/s)}^{0.263271110252}$ (con el 75% de probabilidad)
 Racha (m/s) = $\text{viento medio (m/s)} + 10.0090415366 * \text{viento medio (m/s)}^{0.263271110252}$ (con el 95% de probabilidad)
 Racha (m/s) = $\text{viento medio (m/s)} + 11.6582556901 * \text{viento medio (m/s)}^{0.263271110252}$ (con el 99% de probabilidad)

Figura 125: Ecuaciones de ajuste entre G y U

Si ahora asumimos que la velocidad media sigue una distribución normal con una media de U igual a 1.21 y una desviación típica de U igual a 0.87 y aplicando distribución normal, obtenemos que en el 99% de los casos podemos asumir que la media diaria será menor de 3.25 m/s.

Si ahora introducimos este dato en las ecuaciones anteriores de ajuste, se obtiene los resultados de la figura 126.

media U=1.20988145789 desviacion tipica U=0.874780393865
Velocidad media anual maxima con 99% de probabilidades: 3.24492496771 m/s
Racha (m/s) = 14.2263515874 (con el 75% de probabilidad)
Racha (m/s) = 16.8900622587 (con el 95% de probabilidad)
Racha (m/s) = 19.1384047663 (con el 99% de probabilidad)

Figura 126: Resultados de las ecuaciones de ajuste

Haciendo ahora análoga la racha máxima diaria y la “3-sec gust”, y a partir de los datos contenidos en la Tabla 1609.3.1 (ASCE/SEI, [61]) o en la ecuación 16-34 del mismo documento, obtenemos:

$$V_m = (V_{3s} - 10.5) / 1.05 \text{ (mph)}$$

Siendo 1 mph=0.44m/s, tendremos los valores de la Fastes Mile que aparecen en la figura 127, para los porcentajes de probabilidad del 75%, 95% y del 99%.

Fastest Mile (m/s) = 9.14890627373 (con el 75% de probabilidad)
Fastest Mile (m/s) = 11.6857735797 (con el 95% de probabilidad)
Fastest Mile (m/s) = 13.8270521584 (con el 99% de probabilidad)

Figura 127: Valores de la Fastes Mile

Para el rango de datos con el que estamos tratando podríamos definir un fastest mile de 13.82 m/s.

2.4.-PROGRAMACIÓN

El software se ha desarrollado en Python 2.5 utilizando las librerías matemáticas ScyPy y las librerías gráficas Matplotlib.

3.-AUTOMATIZACIÓN DE LOS MODELOS DE EMISIONES: HIEPA v1.0

3.1.-INTRODUCCIÓN

Hasta ahora se han presentado en este documento resultados que permiten aplicar la metodología EPA AP42 a cualquier geometría de parvas. Es decir, a partir de software CFD comercial se calcula la distribución del flujo de velocidades alrededor de una geometría cualquiera y el reparto porcentual de dichas velocidades en lo relativo a ocupación de superficie.

Este reparto porcentual se obtiene a partir de rutinas específicas desarrolladas en Matlab, o a partir del uso avanzado de las posibilidades de la última versión

del CFX-Post, la 10.0. A partir del reparto porcentual se opera en Hoja de cálculo para llegar a obtener las cantidades de polvo emitidas.

El software HIEPA (v1.0) estima la cantidad de material pulverulento que se pone en suspensión por efecto del viento en apilamientos a la intemperie.

Las formas de los apilamientos que simula son las parvas cónicas y riñón, pero en futuras versiones se recogerán otros perfiles de apilamiento.

3.2.-DESARROLLO Y PROGRAMACIÓN

La estimación del cálculo de las emisiones se realiza a partir del método expuesto en la norma EPA AP-42 13.2.5, es decir, las partículas se ponen en suspensión cuando $u^* \geq u_t^*$, esto es, cuando la velocidad friccional sea superior a la velocidad friccional límite. Y lo harán en una cantidad que depende de lo superior que sea la velocidad friccional a la velocidad friccional límite, en función de la ya explicada fórmula cuadrática (3).

$$\begin{aligned} P &= 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \\ P &= 0 \text{ for } u^* \leq u_t^* \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

u^* es la velocidad friccional (m/s).

u_t^* es la velocidad friccional límite (m/s).

Siguiendo este método, la EPA divide la superficie de las parvas por zonas de igual velocidad (es decir, divide por contornos según el ratio u_s/u_r) y en cada zona obtiene el valor del Potencial de Erosión (P) en función del u^* calculado. Por lo que se obtienen los mapas de velocidad en la superficie de las parvas, tanto de la cónica como de la riñón (recordar que la EPA solo contemplaba las parvas cónicas y troncada), utilizando códigos numéricos y así poder compararlos con los resultados experimentales, de tal forma que podamos aplicarlos a cualquier otro tipo de geometría.

Los datos de geometría y de velocidades se exportan del programa CFX-Post en formato CSV, de donde son recogidos y representados desde el entorno de programación de Ms Excel. Y el resultado lo podemos ver en las figuras 128 y

129, donde se muestran las superficies del cono y la parva riñón, con los datos de velocidad de viento en sus superficies. Estas zonas, serán en las que calcularemos los valores de emisión.

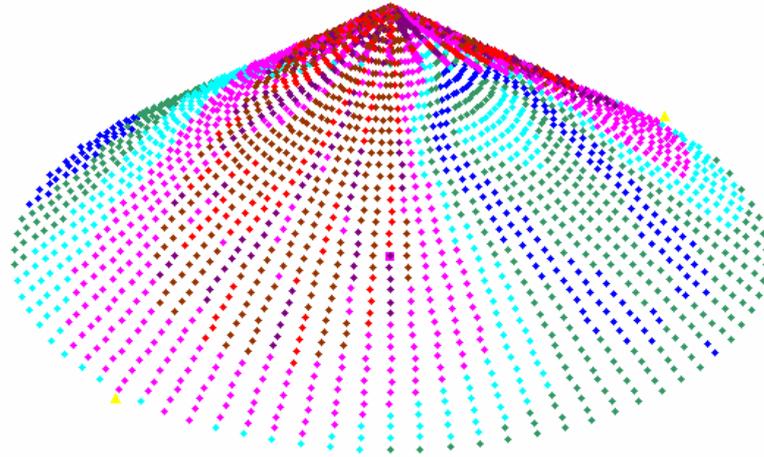


Figura 128: Superficie de valores de flujo de viento – cono

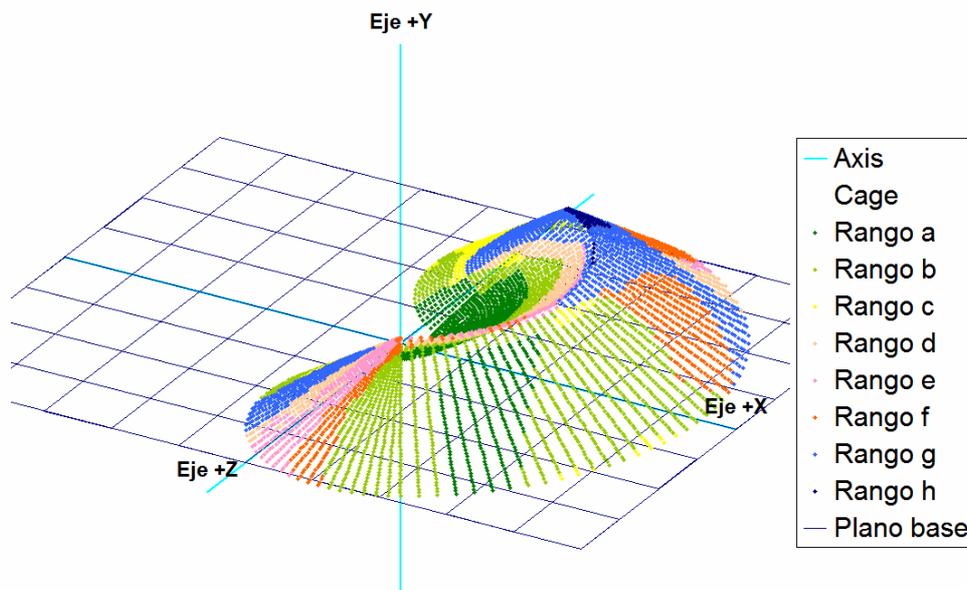


Figura 129: Superficie de valores de flujo de viento – riñón

Esta herramienta permite simular la curva logarítmica de viento que incide sobre un obstáculo y calcular el flujo de viento alrededor del mismo, pudiendo alcanzar dicho obstáculo cualquier altura superior a 1 metro.

Esto se consigue, introduciendo en el programa el valor de la velocidad del viento según el anemómetro de referencia y a la altura a la que se sitúa éste, o introduciendo los valores obtenidos en el programa anterior para la fastest mile.

Al ser el cono una forma geométrica simétrica habrá independencia de la emisión de polvo respecto del rumbo de viento incidente, lo que no ocurre con el caso de la parva riñón, que si influye la dirección del viento incidente. Siguiendo la metodología de la EPA la única limitación en cuanto a geometría del cono, es que tenga un ángulo de talud superior a los 20 grados.

Con los cálculos anteriores y caracterizando el material, (su densidad y su velocidad friccional límite), se calcula en cada zona de la superficie, la emisión de polvo estimada en kilogramos. El programa es capaz de totalizar y mostrar el resultado para toda la parva de manera tridimensional.

Así, en las figuras 130 y 131, vemos los puntos que forman la superficie de revolución de las parvas, coloreados en dos tonos diferentes, de color rojo donde se produce emisión, y de color azul donde no se produce emisión, tanto para la parva riñón como para la cónica.

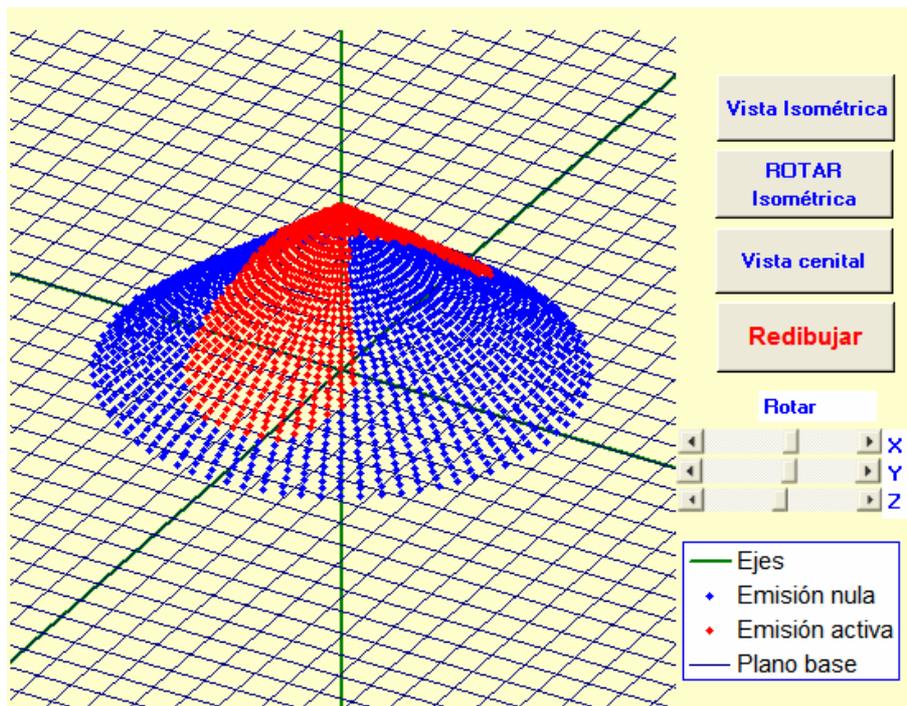


Figura 130: Zonas de emisiones activas – frontend de HIEPA para el cono

La metodología de programación se fundamenta en los estudios con software específico de códigos numéricos a partir de los cuales se han calculado tablas de velocidades de viento en la superficie de la parva. Estas tablas se programan con la formulación de emisión de polvo de la norma EPA y

posteriormente el programa realiza un filtrado de zonas con emisión y totaliza las mismas para toda la superficie de la parva. Con los resultados se realiza una representación tridimensional punto a punto de emisión mediante transformaciones algebraicas de pares de coordenadas de puntos de visualización.

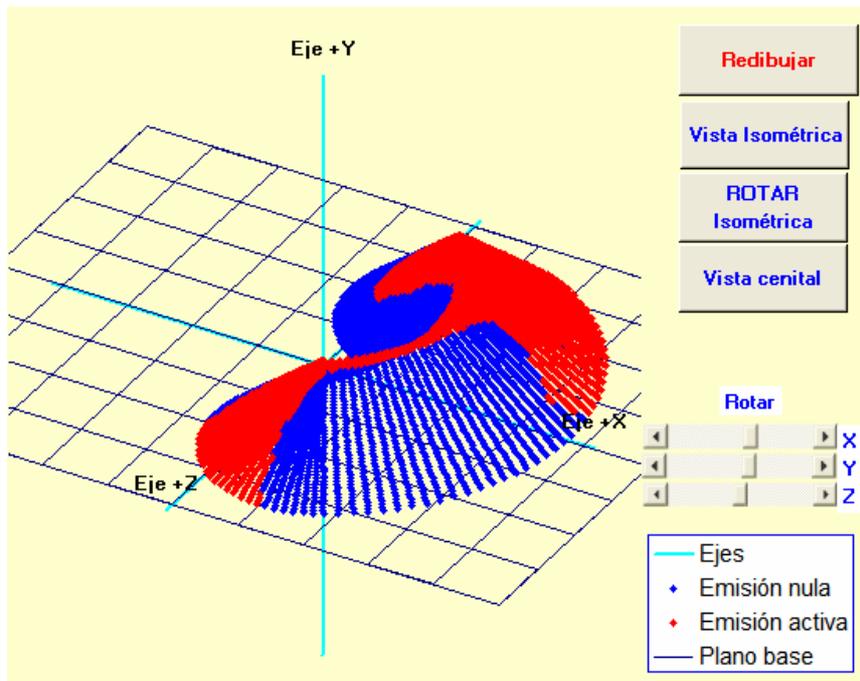


Figura 131: Zonas de emisiones activas – frontend de HIEPA para el riñón

3.3.-EJEMPLO PARA EL CASO DE LA PILA CÓNICA

En este apartado se presenta un ejemplo de cómo serían todos los pasos a realizar para calcular la emisión de un apilamiento, desde crear su geometría y su mallado, hasta el resultado final de los kilos de polvo emitido.

Para ello, elegimos la parva cónica, aunque serían los mismos pasos para la parva riñón y las nuevas geometrías que se irán incorporando en nuevas versiones.

3.3.1.-DEFINICIÓN GEOMÉTRICA Y MALLADO

Se dibuja la geometría del modelo en tres dimensiones con el software de automatización de diseño mecánico SolidWorks. El dominio del modelo es un paralelepípedo que envuelve la pila cónica y cuyas cotas se pueden visualizar

en la figura 132, donde la pila tiene una altura de 11 m y un ángulo de talud de 37°.

Para simplificar el tiempo de cálculo de la simulación, se croquiza solamente la mitad del modelo, al que posteriormente le aplicaremos una simetría.

Una vez definida la geometría se procede al mallado. El programa con el cual realizamos la creación de la malla es el ANSYS ICEM CFD 5.0.

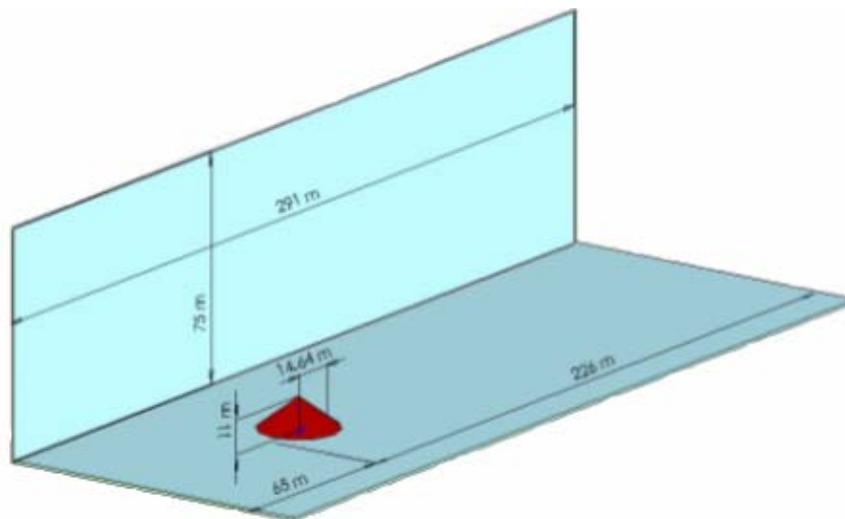


Figura 132: Modelo de la pila cónica

En esta simulación se ha utilizado un mallado híbrido de celdas estructuradas (prismas) sobre el suelo y el apilamiento tipo cónico, y no estructuradas (tetraedros) en el resto del dominio. En la siguiente figura 133 se aprecia el sistema reticular híbrido utilizado en el ejemplo. Este modelo posee una calidad mínima de 0.36, siendo una calidad lo suficientemente alta para asegurar unos buenos cálculos. El dominio consta de un total de 112533 elementos (entre prismas y tetraedros) y 26574 nodos.

Esta opción de simetría nos facilita mucho el problema del número de elementos de mallado, es decir, al sólo tener la mitad del modelo, podemos crear una malla mas fina, con una calidad mucho mas alta, que si tuviéramos todo el modelo.

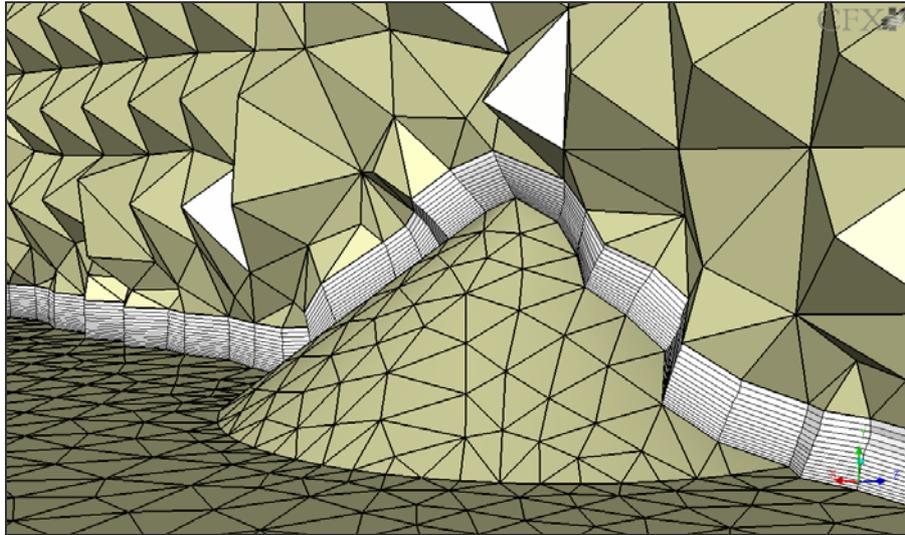


Figura 133: Mallado de la pila cónica

3.3.2.-SIMULACIÓN

Se seleccionó el software comercial CFD de Ansys CFX 5.7 para evaluar la simulación numérica de la pila cónica y validar este proceso comparando los resultados con el estudio experimental de referencia de EPA. Se obtuvieron las áreas en las cuales se podía calcular u^* .

De acuerdo con la sección 13.2.5 de EPA, se fijan como condiciones de entrada en el modelo que nos ocupa, una rugosidad del terreno de 0.5 cm y un perfil logarítmico de viento de 40 km/h. Se seleccionó una turbulencia media para caracterizar el flujo, determinada por modelo de turbulencia k-epsilon.

Se construyó una superficie de revolución a 25 cm de la pila cónica y aproximadamente, 13500 puntos de medida, con el fin de medir el cociente u_s/u_r (Variable 1) según el procedimiento de Stunder y Arya, 1988 [2], es decir, se divide la superficie de la parva en subzonas de igual u_s/u_r .

En la figura 134 se aprecia la distribución de la Variable 1 para una pila cónica afectada por el perfil logarítmico de viento soplando de izquierda a derecha. Estas subzonas aparecen coloreadas en función del color de la velocidad que las caracteriza según la leyenda de la izquierda.

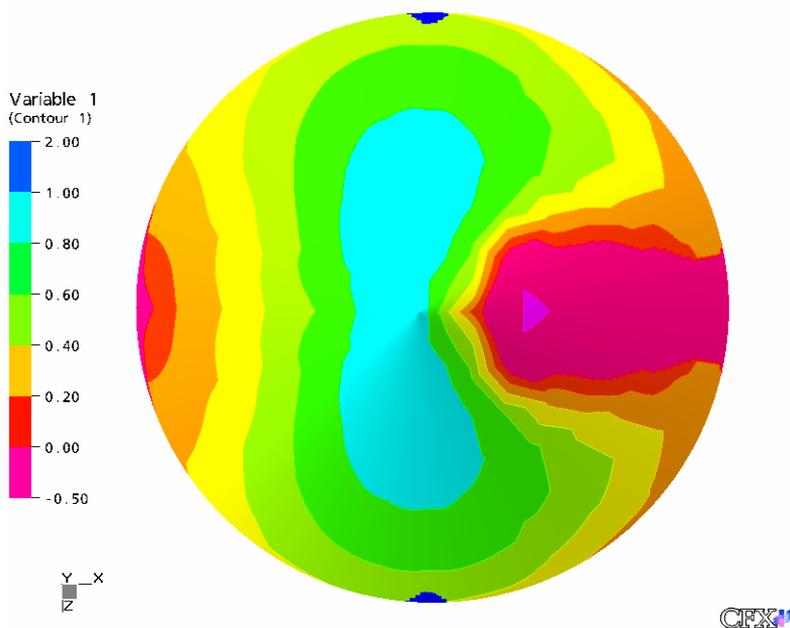


Figura 134: Distribución de us/ur (Variable 1)

Los valores de Variable 1 obtenidos con el CFX se trataron en una hoja de cálculo con el programa Excel y se utilizaron para calcular el porcentaje de área de cada subzona en función del área total de la pila, correspondiente a cada valor y agruparlos en las mismas subzonas que la EPA, para pasar a compararlas, tal y como se recoge en la tabla 20.

	EPA Pila A	CFX
0.2a	5%	11.80%
0.2b	35%	27.83%
0.2c	0%	0.01%
0.6a	48%	47.55%
0.6b	0%	0.01%
0.9	12%	12.79
1.1	0%	0.01%
Total	100.00%	100.00%

Tabla 20: Comparación EPA vs CFX

Si comparamos los datos de la tabla 20, se observa una buena coincidencia entre los resultados de la EPA y los obtenidos en la simulación CFX. Sin embargo, para una mejor comparación entre ambos, se calcula la desviación media atendiendo a la siguiente expresión:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (14)$$

donde:

N es el número de medidas (en este caso se asocia al número de subáreas).

y_i son los valores correspondientes a la columna EPA Pila A de la tabla 20.

\hat{y}_i son los valores predichos por CFD.

Una vez desarrollado este cálculo, se obtiene una desviación del 3.75%, lo cual es indicativo de una simulación exacta y válida.

Todos estos datos realizados a partir de códigos numéricos y calados con los datos experimentales de la EPA, se tratan en Visual Basic, dando lugar al software HIEPA, que se presenta en una hoja Excel para hacer más fácil su presentación y utilización.

A continuación se muestra la operatoria del programa, y por lo tanto el último paso para calcular la emisión total en kilos de la parva cónica.

Destacar que todos los cálculos anteriores, nos permitirán en el “uso del programa”, utilizar distintas geometrías de apilamientos, formados por distintos materiales y caracterizados por distintas velocidades y direcciones de viento.

3.3.3.-USO DEL PROGRAMA

El programa dispone de una pantalla, una hoja “Cono” para el cálculo de emisiones en apilamientos tipo cono.

La operatoria es la siguiente, para este tipo de parva podremos calcular el polvo emitido para un cono con unas características que nosotros podremos definir.

En primer lugar será definir en el programa la geometría del apilamiento, y se consigue cambiando el ángulo de talud y la altura de apilamiento en las pantallas del programa.

Luego tendremos que definir el material que lo constituye, y para ello, incluiremos la densidad y la velocidad friccional límite de ese material en las casillas del programa.

Para las condiciones de viento, utilizaremos el valor del viento racheado máximo previsto, así como la altura del anemómetro desde el que se midió el dato anterior.

Una vez introducido todos los datos que caracterizan nuestro apilamiento, y pulsando el botón “Redibujar”, se muestra una vista en planta de las zonas de la parva en las que se produce emisión y su totalización. Además podemos visualizar la parva desde distintas orientaciones, y siempre en tres dimensiones, girándola de manera automática o manual, siendo el usuario el que gira la parva en función de los tres ejes, figura 135.

En la figura 135 podemos ver la parva con una vista en planta, dibujada a partir de los puntos de medida, coloreados en función de dos colores, rojo y azul, que nos diferencian las zonas donde se produce emisión (rojo) de las que no (azul). Además podemos ver las pantallas principales donde introducimos todos los datos del apilamiento, en color azul, y en color rojo la emisión estimada en kilogramos. Para este ejemplo se emite un total de 3.95 kg, por disturbancia total.

Como ya dijimos anteriormente, se trata de una herramienta muy fácil de manejar que nos da resultados fiables de una manera muy rápida.

La gran ventaja de este método es que se pueden obtener de forma rápida resultados para distintos valores de velocidad friccional o velocidad de viento, e incluso permite variar con rapidez la fórmula de emisión.

Realizar esto en códigos numéricos, lo que es posible tal y como veremos en el siguiente capítulo, llevaría un cierto tiempo de programación, horas, y además

un valioso y prolongado tiempo de cálculo. Lo que acentúa la importancia de esta herramienta.

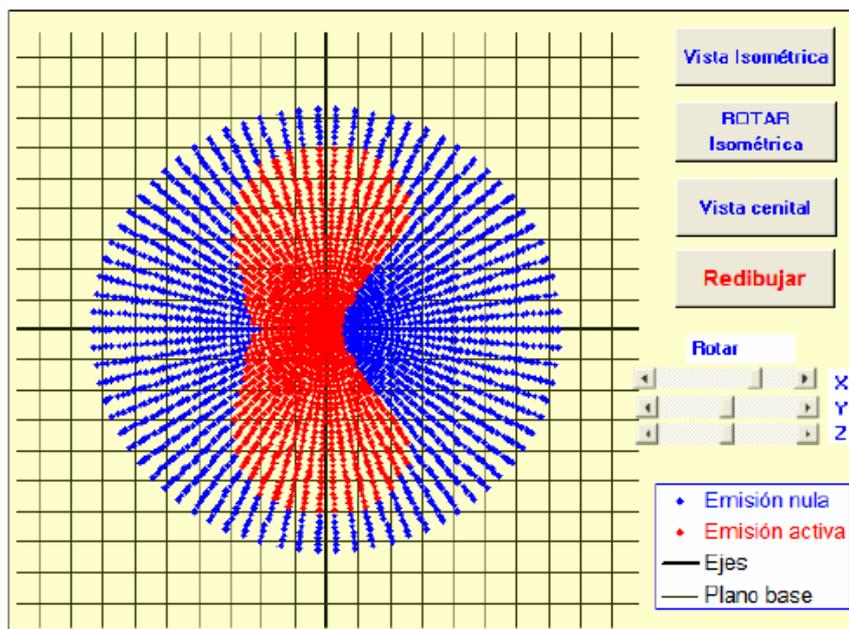


Figura 135: Pantalla “cono”

Como ya explicamos anteriormente, este programa se diseñó también para otro tipo de apilamiento, la parva riñón. Para este caso, se realizaron los mismos pasos que para la parva cónica, ampliando para este modelo las direcciones de viento, ya que en este caso la emisión varía considerablemente si el aire incide con una dirección u otra.

En la figura 136 podemos observar distintos resultados gráficos para las emisiones en parva riñón con viento a 45° para velocidades de viento diferentes, de 10, 12 y 15 m/s.

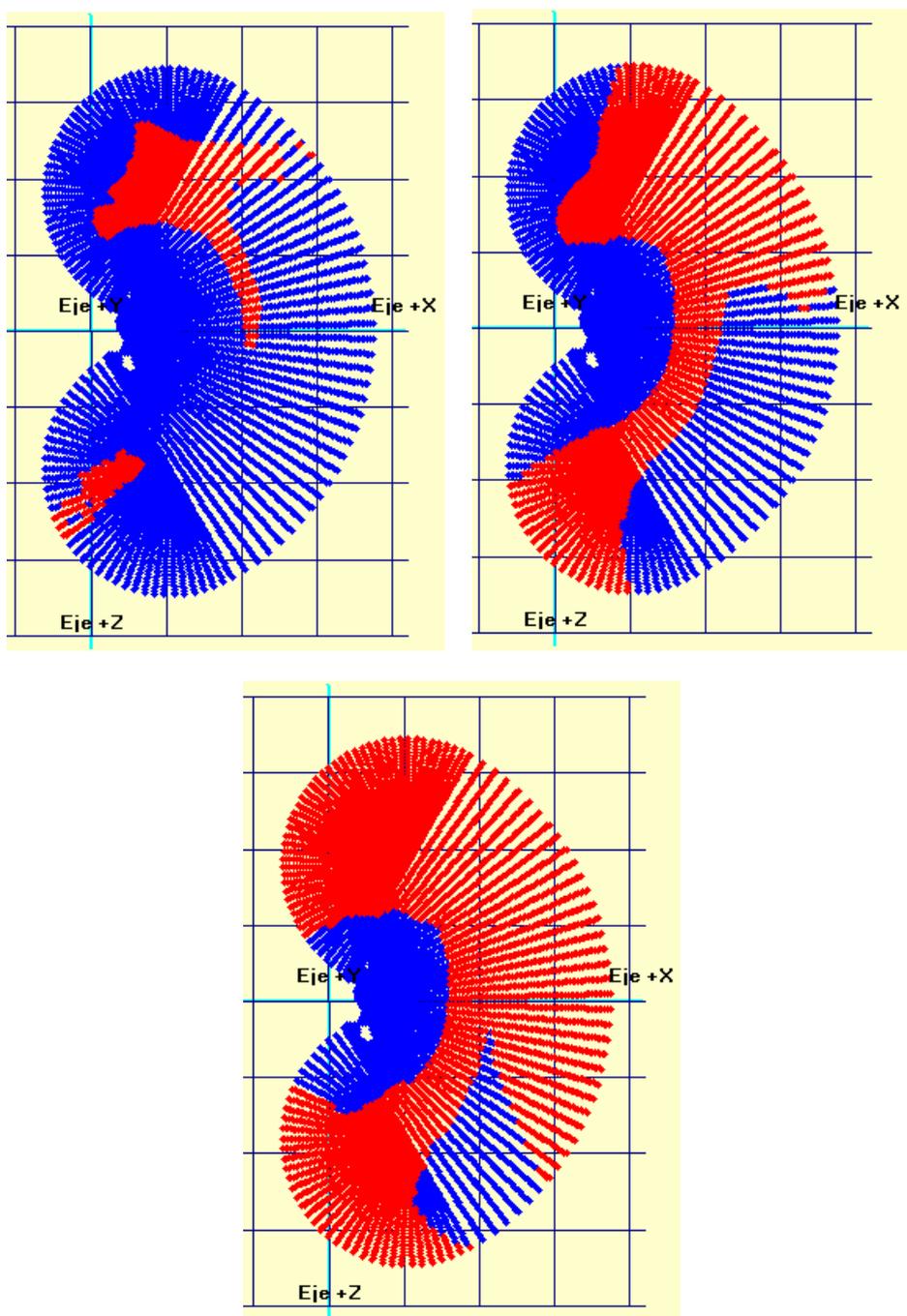


Figura 136: Emisiones en parva riñón a 10,12 y 15 m/s

CAPÍTULO 5: EL POLVO EN CFD

1.-INYECCIÓN DE POLVO EN ANSYS CFX

1.1.-INTRODUCCIÓN

Como se ha comprobado en los capítulos anteriores, se puede cuantificar la cantidad de polvo que saldrá de un apilamiento de mineral, así como su distribución sobre la superficie de la parva. Esta metodología es muy útil, ya que permite mejorar los diseños de parques de almacenamiento y aplicar diversas formas para remediar las emisiones perjudiciales, como por ejemplo, aplicación de barreras en las inmediaciones del apilamiento.

Ahora bien, sería de muchísima utilidad simular efectivamente la presencia de polvo en puntos de emisión y determinar las cantidades controladas, puesto que abriría las puertas a simulaciones que permitan disminuir las emisiones.

Para ello se hará uso del módulo “Particle Tracking” del software CFX. Este módulo es un Solver de tipo Lagrangiano que permite simular trayectorias de partículas a lo largo de un campo de velocidades previamente calculado.

Sin entrar en detalles decir que los campos de velocidades de la fase continua, aire en nuestro caso, sirven como datos de entrada para el cálculo de una fase dispersa, el polvo, que se moverá de acuerdo a fuerzas de tipo gravitatoria, dependientes del peso de la partícula, y otras de arrastre, dependientes del flujo del aire que las rodea y de la forma de la partícula.

Pese a que el software permite combinaciones muy potentes, con inclusión de partículas de tipo sólido, líquido (simulaciones de mezclas aire-gas) o incluso gaseoso (simulaciones de todo tipo de burbujas) se ve limitado por la forma en la que la fase dispersa se introduce en el modelo. Únicamente permite inyecciones de tipo esfera o tobera, cualquier otro desarrollo implica programación en código CCL, lo que complicaría un poco más las simulaciones.

Además, si como en nuestro caso pretendemos variar las cantidades inyectadas en función de la zona en la que nos encontremos será necesario recurrir a programar directamente en Fortran y a crear librerías que posteriormente engancharemos con la ejecución principal de código.

1.1.1.-SISTEMA MULTIFASE POLVO-AIRE

Existen dos formas de implementar en ANSYS CFX un problema de mecánica de fluidos donde más de un flujo está presente: modelo Euleriano o multifase y modelo Lagrangiano o Particle Tracking.

Un ejemplo de flujo euleriano es líquido-sólido (agua y arena), el agua será el fluido continuo y la arena el flujo disperso. En estos problemas debe asignarse a la fase sólida (flujo disperso) una pequeña viscosidad molecular insignificante (pues la física del problema viene determinada por arrastre de interfase y efectos de turbulencia) así como una condición de contorno sin rozamiento en las paredes. Si la viscosidad no se define, el sólido no estará disponible en la lista de fluidos del CFX-PRE. En el método euleriano o multifase, cada partícula interacciona con el fluido y con otras partículas.

El método Lagrangiano es el que utilizamos frecuentemente para tratar problemas de varios fluidos, de ahí que se desarrolle, en el siguiente apartado, su metodología.

Se define como “Descripción Lagrangiana” aquella descripción del movimiento donde partículas individuales son observadas como una función del tiempo.

Se considera para cada partícula:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{s}(x_0, y_0, z_0, t) \\ \dot{v}(x_0, y_0, z_0, t) \\ \dot{a}(x_0, y_0, z_0, t) \end{array} \right\}$$

Cada partícula representa una muestra de partículas que siguen la misma trayectoria. El comportamiento de estas partículas se usa para describir el comportamiento (en promedio) de la fase dispersa. Este método se llama “análisis de flujo desprendido”. El “análisis de flujo desprendido” se ha implementado en CFX como un modelo de trayectoria Lagrangiano para caracterizar el comportamiento del flujo de una fase dispersa. El término “partícula” se usa para describir un elemento discreto e individual de la fase dispersa. La partícula podría representar un sólido, burbuja, gota,... En casos donde el flujo contiene partículas pequeñas, sabemos que millones de éstas

son inyectadas por segundo. Para evitar lo costoso de modelar cada partícula individualmente, lo que se hace es inyectar una muestra representativa del número actual de partículas. Esta muestra representativa de partículas se “visualiza” cualitativa y cuantitativamente (tras el cálculo) en el POST, a través del parámetro Particle Number Rate (PNR) que, en el caso estacionario, vendrá definido por la siguiente expresión:

$$\text{PNR}(\text{par}) = \frac{\text{masa (kg)}}{\text{n}^\circ \text{ de trayectorias} \times \text{masa de la partícula (kg)}} \quad (16)$$

En términos del CFX, la expresión anterior puede expresarse de la siguiente manera (tanto para modelos estacionarios como transitorios):

$$\text{PNR}(\text{par/s}) = \frac{\text{mass flow rate (kg/s)}}{\text{number of positions} \times \text{mass of the particle (kg)}} \quad (17)$$

Los parámetros “mass flow rate” y “number of positions” se introducen directamente en el PRE, la masa de la partícula la tendremos que calcular en función de su densidad y de su volumen (considerando las partículas esféricas con un diámetro que nosotros definimos).

El modelo Lagrangiano o Particle Tracking implementado en la Dinámica de Fluidos Computacional, se basa en calcular la ecuación de la trayectoria de una partícula. Variables tales como viscosidad, velocidad o densidad; se obtienen siempre calculando el elemento en el cual la partícula está viajando.

Antes de exponer la ecuación de la trayectoria para las partículas, debe mencionarse el término “acoplamiento entre las fases” (*coupling between the phases*). El fluido afecta el movimiento de la partícula debido al arrastre y a una diferencia de velocidad entre la partícula y el fluido. Inversamente se produce una influencia contraria de la partícula sobre el fluido debido a este coeficiente de arrastre. Si el fluido afecta las trayectorias de las partículas pero éstas no afectan al fluido, entonces la interacción se llama acople unidireccional (*one-way coupling*). Si las partículas también afectan el comportamiento fluido, la interacción se llama acoplador de dos vías (*two-way coupling*). Si consideráramos conveniente utilizar el acoplador de dos vías, se requiere que el término “fuente de partícula” (“particle source”):

$$\frac{dS_P}{dt} = C_S \phi_P + R_S \quad (18)$$

aparezca en las ecuaciones del momento (ANSYS CFX-Solver, 2004 [62]).

1.1.2.-ECUACIÓN DE LA TRAYECTORIA

A continuación se muestra la metodología utilizada para estudiar la trayectoria de las partículas (ANSYS CFX-Solver, 2004 [63]).

El desplazamiento de la partícula viene dado por:

$$x_i^\pi = x_i^0 + v_{pi}^0 \delta t \quad (19)$$

donde:

x_i^0 es el desplazamiento inicial.

v_{pi}^0 es la velocidad de la partícula.

δt es el paso temporal.

La velocidad de la partícula calculada al comienzo del paso temporal se asume que prevalece sobre el todo el paso. La nueva velocidad de la partícula al final del paso temporal se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$v_p = v_f + (v_p^0 - v_f) \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right) + \tau F_{all} \left(1 - \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right)\right) \quad (20)$$

donde :

$$\tau = \frac{4d\rho_p}{3\rho_f C_D} |v_f - v_p| \quad (21)$$

Consideramos una partícula discreta que viaja en un medio fluido continuo. Las fuerzas que actúan sobre la partícula y que afectan la aceleración de la partícula son debidas a la diferencia en velocidad entre la partícula y el líquido, así como al desplazamiento del fluido por la partícula. La ecuación del movimiento para tal partícula fue derivada por Basset, Boussinesq y Oseen para un marco de referencia rotacional:

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{dv_p}{dt} = & \frac{1}{8} \pi \rho_f d^2 C_D |v_f - v_p| (v_f - v_p) + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \frac{dv_f}{dt} + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left(\frac{dv_f}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) + F_{IV} \\
 & \sqrt{\pi \rho_f \mu} \int_{t_0}^t \left(\frac{dv_f}{dt'} - \frac{dv_p}{dt'} \right) (t - t')^{-0.5} dt' - \frac{\pi d^3}{16} (\rho_p - \rho_f) \omega \times (\omega \times R) - \frac{\pi d^3 \rho_p}{24} \omega \times v_p + F_{VIII}
 \end{aligned}$$

(22)

donde:

m_p es la masa de la partícula.

d es el diámetro de la partícula.

v es la velocidad.

ρ es la densidad.

μ es la viscosidad dinámica del fluido.

C_D es el coeficiente de arrastre.

F_b es la fuerza de flotabilidad debida a la gravedad.

ω es la velocidad rotacional.

F_U son el resto de fuerzas que el usuario considere definir.

t_0 se usa para denotar el tiempo inicial.

f se refiere al fluido.

p se refiere a la partícula.

-El término en el lado izquierdo es la suma de todas las fuerzas que actúan en la partícula expresada en términos de la aceleración de la partícula.

-El término I es la fuerza de fricción que actúa en la partícula.

-El término II es la fuerza aplicada en la partícula debido al gradiente de la presión en el fluido que rodea la partícula causada por la aceleración del fluido. Es solamente significativo cuando la densidad del fluido es comparable o mayor que a la densidad de la partícula.

-El término III es la fuerza de aceleración de la masa virtual del líquido en el volumen ocupado por la partícula. Este término es importante cuando la masa fluida desplazada excede la masa de la partícula, por ejemplo en el movimiento de burbujas.

-El término IV es la fuerza de la flotabilidad debido a la gravedad, que para una partícula esférica es:

$$F_b = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_p - \rho_f) g \quad (23)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

-El término V es la fuerza “Basset” que considera la desviación en patrón del flujo del estado estacionario. Este término no se modela en ANSYS CFX.

-El término VI es la fuerza centrípeta, presente sólo en un sistema de referencia rotacional.

-El término VII es la fuerza de Coriolis, presente sólo en un sistema de referencia rotacional.

-El término VIII representa las fuerzas definidas por el usuario.

La ecuación del movimiento (Ecuación de momento de cantidad de movimiento) para una partícula, en flujos donde la densidad de la partícula es mucho mayor que la densidad del fluido, se simplifica en:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \underbrace{\frac{1}{8} \pi \rho_f d^2 C_D |v_f - v_p| (v_f - v_p)}_{\text{Fuerza de Arrastre sobre la partícula}} + \underbrace{F_b - \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \omega \times (\omega \times R)}_{\text{Fuerza Centrípeta}} - \underbrace{\frac{\pi d^3 \rho_p}{3} \omega \times v_p}_{\text{Fuerza de Coriolis}} \quad (24)$$

donde:

d es el diámetro de la partícula.

C_D es el coeficiente de arrastre. El coeficiente de arrastre se calcula como el modelo multifase o euleriano dependiendo del número de Reynolds (ANSYS CFX-Solver, 2004 [64]).

ρ_p es la densidad de la partícula.

ρ_f es la densidad del fluido.

v_p es la velocidad de la partícula.

v_f es la velocidad del fluido.

$F_b = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_p - \rho_f) g$ es la *Fuerza de Flotabilidad* debida a la gravedad para partículas esféricas.

ω es la velocidad rotacional.

\vec{R} es el vector radio de giro.

Las partículas se asumen esféricas por defecto. ANSYS CFX siempre calcula el diámetro de la partícula a partir de la masa de la misma dividida por su densidad, asumiendo ésta esférica. Para modificar la forma esférica de la partícula, se puede incluir un factor de área representativo.

1.1.3.-FORMAS DE EMISIÓN

Al igual que para el modelo Euleriano, el modelo Lagrangiano permite realizar emisiones de partículas de tres formas diferentes:

-Emisión a través de paredes: sólo son posibles a través de contornos definidos como "Walls". Dentro de esta emisión existe una gama muy amplia de opciones de posiciones de inyección de las partículas (ANSYS CFX-Solver, 2004 [65]). Nosotros siempre trabajamos con inyección uniforme. Esta opción produce una inyección aleatoria sobre toda la pared pero pueden ser de tres tipos: conos, esferas y mediante subrutinas definidas por el usuario (programación en Fortran).

Para definir estas regiones en el caso de conos y esferas, se requieren las coordenadas (X, Y, Z) del centro de inyección que será, en el caso del cono, el vértice del mismo y, en el caso de la esfera, el centro de la misma.

-Fuente puntual (Source Point): se trata de fuentes de emisión sobre un determinado elemento. Se requieren las coordenadas del punto desde el cual se inyecta la fase dispersa. Este método será el utilizado para el modelo multifase. La ayuda soporte del CFX explica que el flujo de masa total que se inyecta en un Source Point para un flujo multifase se divide entre los vértices de un elemento de malla (ANSYS CFX-Solver, 2004 [66]). No realizamos ninguna prueba para el modelo Lagrangiano puesto que, al igual que para el modelo Euleriano, esta opción nos restringe siempre la emisión a un nodo del mallado.

1.1.4.-PARTICULARIZACIÓN DE LAS RUTINAS

Otra manera de definir la superficie de inyección, es introduciendo rutinas en nuestro programa, a partir de los siguientes parámetros:

- Posición de la partícula (X, Y, Z).
- Particle Mass Flow Rate.
- Diámetro Medio de la Partícula o Mean Particle Diameter.
- Velocidad (u, v, w).
- Temperatura.

Cuando mallamos nuestro modelo, la superficie de la pila se divide en cientos o miles de faces, localizados perfectamente con todas sus características. Y es del centro de cada faces por donde saldrá cada partícula representativa. La cantidad de polvo que caracteriza esa trayectoria de partícula viene definido por el Mass Flow Rate, y se determina a partir de una ecuación obtenida para cada material en el laboratorio, de otras experiencias y/o en la bibliografía (Gillette et al., 1980 [67]; Witt et al., 2002 [68]; Parker and Kinnersley, 2004 [69]). En otros casos nosotros utilizamos las ecuaciones de la EPA.

Las nuevas rutinas se crean en el Fortran introduciéndose en el Ansys CFX a partir de lenguaje CCL, modificando su estructura de la siguiente manera:

- Definición de las rutinas: se crea un nuevo directorio donde se incorporan las rutinas.
- Geometría: se localiza la superficie de emisión del polvo.

- Eliminar las formas de inyección preseleccionadas.
- Definición de la emisión de polvo a partir de las rutinas.
- Creamos una superficie de revolución separada de la superficie de la parva a una distancia predeterminada por la EPA, dividida por un número de faces conocidos, y cada uno de ellos, con un valor de la velocidad friccional límite (Toraño et al., 2006 [49]).
- La emisión se determina por las ecuaciones de las rutinas, basadas en la EPA, determinando en que face se produce emisión y en cual no (Hayden et al., 2003 [70]; Gillette, 1978 [71]).

1.2.-METODOLOGÍA

El proceso explicado anteriormente, se desarrolla en las etapas siguientes.

- Emitiremos en función de faces, partes en las que el proceso de mallado tridimensional divide la superficie de la parva. A través del centro de cada face el CFX-Solver emitirá una partícula representativa de una cierta cantidad de masa. La suma de todas las trayectorias nos dará la emisión total.
- Si ahora nos preguntamos, ¿qué cantidad representa cada una de las partículas representativas? Para conseguir la respuesta, tendremos que aplicar la formulatoria de la EPA (EPA, [72]) y así asignar a cada partícula una cantidad de masa que dependerá de la zona desde la que se emita. Para ello recordamos la ecuación cuadrática de la EPA, donde:

$$\begin{aligned} P &= 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \\ P &= 0 \text{ for } u^* \leq u_t^* \end{aligned} \tag{3}$$

En lugar de usar el valor u_s/u_r de los gráficos experimentales de la EPA, dejaremos que el software calcule este valor. Si estamos simulando las emisiones de una parva de 15 metros de altura u_s (Muleski, 1985 [73]) significará la velocidad del aire a una altura de referencia de 25 cm sobre la superficie de la parva. Como nuestro apilamiento mide 11 m, tendremos que determinar que altura de referencia le corresponde, por lo tanto:

$$0.25 \times 11/15 \text{ m} = 0.18 \text{ m} = 18 \text{ cm}$$

Para tratar de mantener las proporciones a partir de las que se realizaron los experimentos en túnel de viento. Por lo tanto tendremos:

$$P \text{ (g/m}^2\text{)} = 58(0.1u_s - u_t^*)^2 + 25(0.1u_s - u_t^*)$$

Precisando que u_s se calcula en cada parva a una distancia distinta de la superficie en función de la altura de la misma.

-El software emitirá por cada face una partícula representativa de todas las partículas que salen del área de ese face. Es decir, le asignaremos a esa partícula una masa de $[P \times A]$, donde A es el área del face y P el Potencial de erosión.

Por lo tanto en el CFX hay que programar:

$$\text{EMISION} = A \times P \text{ (gramos por face)}$$

-Se ejecutaría el programa y en el módulo Post se sumaría toda la masa emitida, siendo la suma de cada uno de los faces.

En figura 137 se muestra un fragmento del código Fortran empleado para implementar esta metodología. Las rutinas se tratan en el Fortran para luego incluirlas en el software Ansys CFX a partir del código CFX-CCL en la pantalla de MS-Dos.

```
VELMAG = SQRT(VELSTU(1)**2 + VELSTU(2)**2 + VELSTU(3)**2)

IF (VELMAG .GE. 0.6) THEN
  PNUM(IPART) =0.5*(ArFc(ISEL) *(58*(VELMAG-0.6)**2+25*(VELMAG-0.6)
& ))/1.42e-09
END IF

IF (VELMAG .LT. 0.6) THEN
  PNUM(IPART)=0
ENDIF

END DO
```

Figura 137: Rutinas de inyección

En las figuras 138, 139 y 140 podemos observar la implementación de las rutinas para tres geometrías de apilamiento diferentes, el cono, la parva

truncada y la parva riñón. En estas figuras, la velocidad vertical de inyección de las partículas, se ha exagerado para que se puedan observar mucho mejor las trayectorias de las partículas. Además, se ve como las trayectorias con menor masa asociada salen de las zonas con menor velocidad superficial (colores azules) y como las de mayor masa salen de las zonas de mayor velocidad (colores rojos y naranjas). Por lo tanto, ambas escalas de colores están relacionadas.

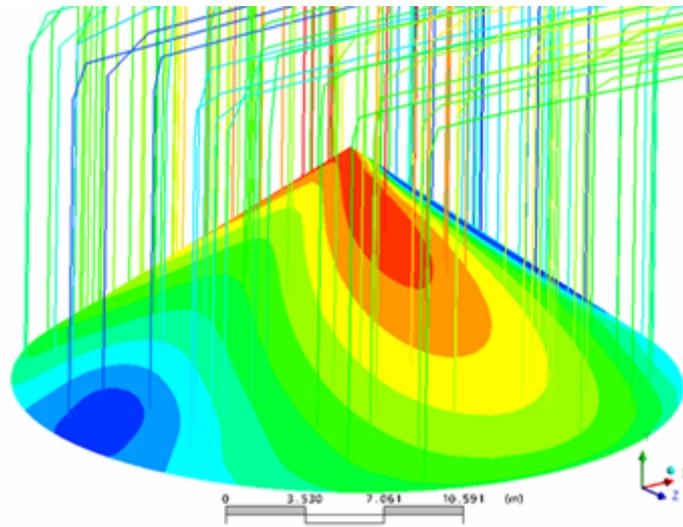


Figura 138: Emisión por zonas en el cono

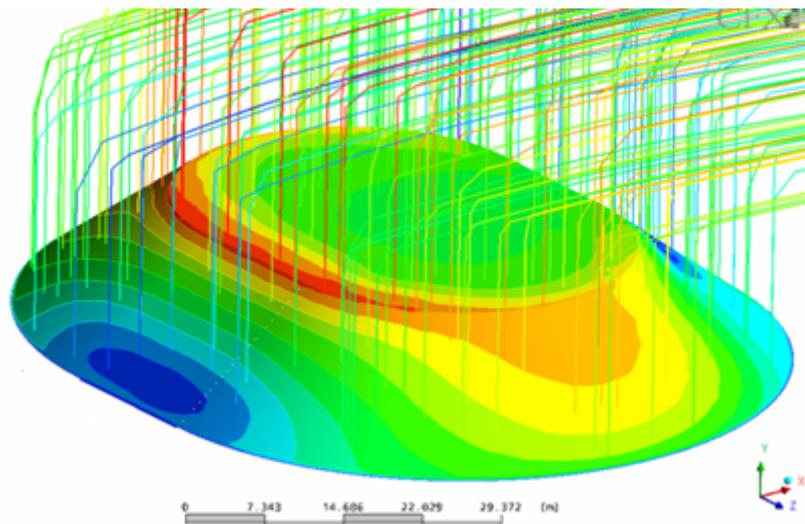


Figura 139: Emisión por zonas en la parva truncada

En la figura 141, se muestran dos figuras diferentes para el caso de la parva truncada, una vista de la concentración de las partículas y la otra de la velocidad en su superficie. Si las comparamos, podemos ver evidentes similitudes entre las zonas de alta velocidad y las de alta concentración, es decir, la concentración mas alta se sitúa en las zonas rojas, donde aparecen los valores de velocidad más altos.

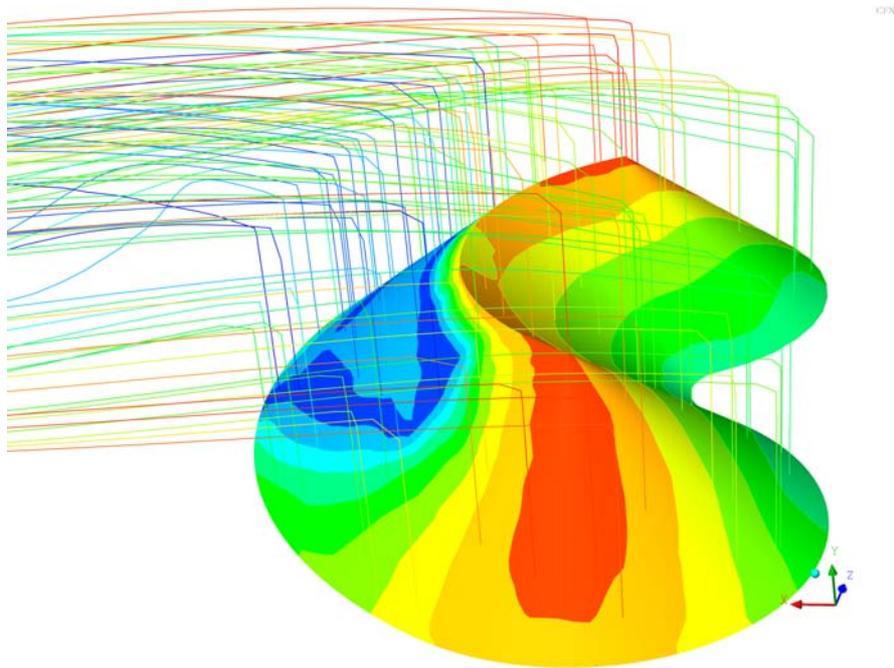
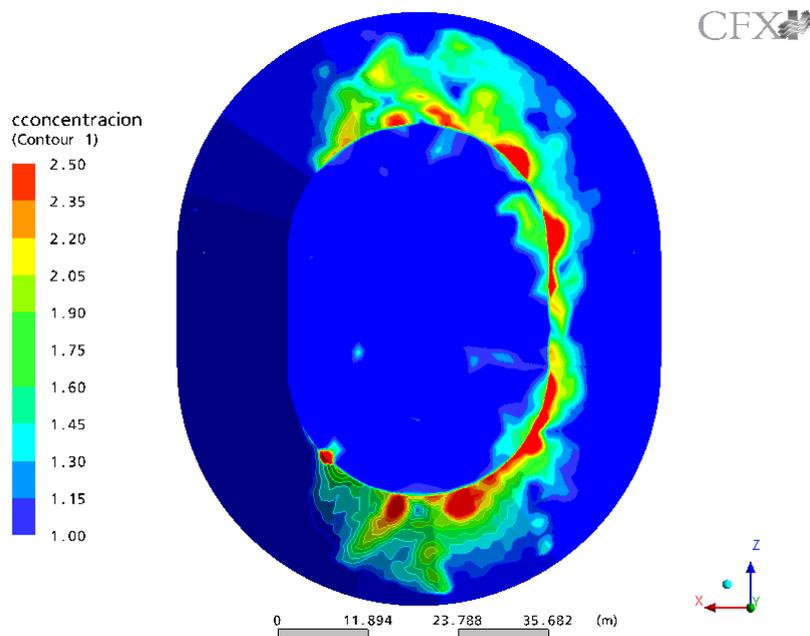


Figura 140: Emisión por zonas en la parva riñón



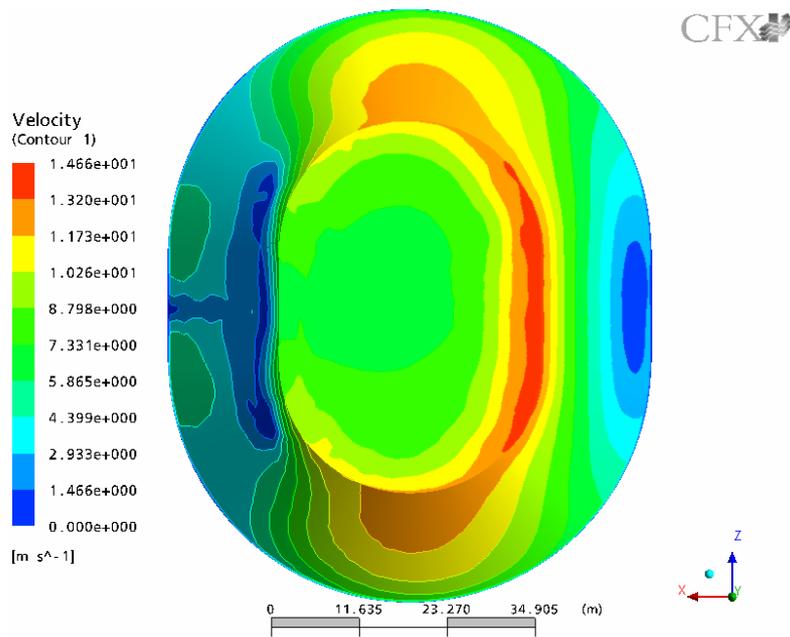


Figura 141: Concentración de polvo (mg/m^3 , arriba) y velocidad de aire (m/s , debajo)

Para simular la realidad con más precisión, se eligió una velocidad de inyección mas baja, y el resultado se puede ver en la figura 142, para el caso de la parva riñón.

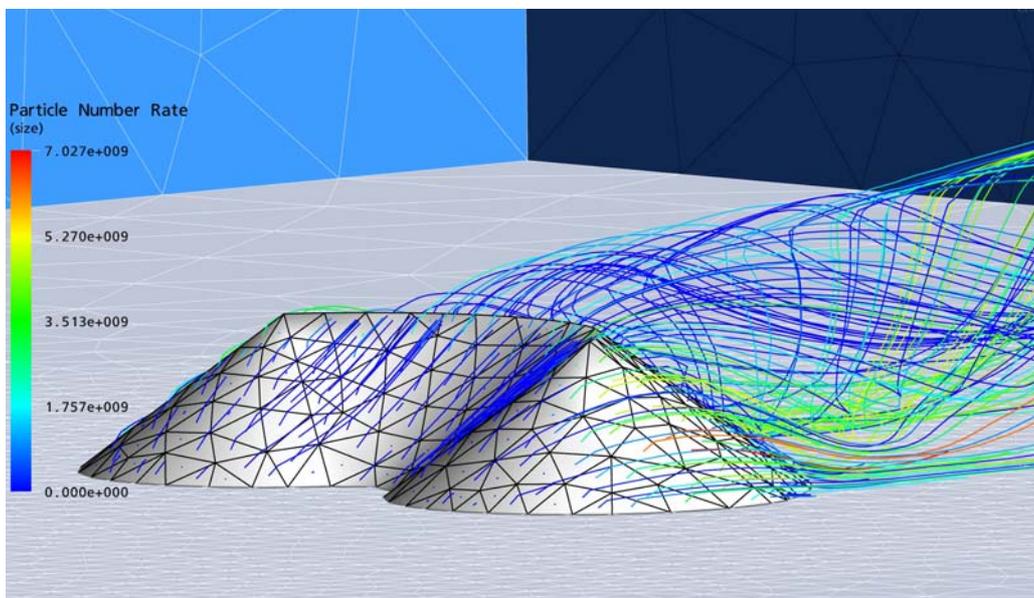


Figura 142: Emisión automatizada en parva riñón

La potencia del método se demuestra en la figura 143, en la que se visualiza la concentración de polvo en el ambiente tras la pila de mineral, a partir de dos planos perpendiculares.

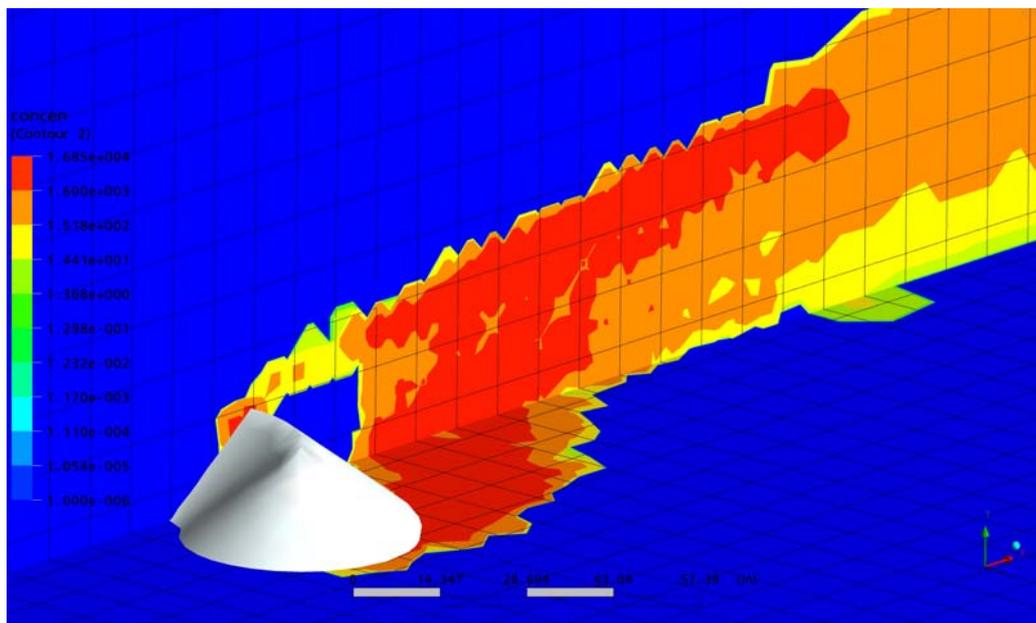


Figura 143: Concentración de polvo tras parva riñón

2.-ENSAYOS Y SIMULACIONES

2.1-INTRODUCCIÓN

En este apartado se van a exponer los ensayos que se ha llevado a cabo para medir las concentraciones de polvo que se han producido en una pila cónica de un material determinado, realizados en una empresa minera. Igualmente se comparará este resultado con el obtenido en una simulación numérica calando el mismo modelo geoméricamente.

En las figuras 144, 145 y 146 se exponen unos ejemplos ilustrativos de tres apilamientos cónicos en canteras y en una fábrica de cementos.

2.2.-CAMPAÑA DE MEDIDAS

La Campaña de Medidas tuvo lugar en la mina de carbón Carbonar S.A., en Cangas de Narcea. Para la realización de los ensayos, tuvimos a nuestra disposición las instalaciones del lavadero, donde además, distribuimos todos los elementos implicados en los ensayos, tal como se muestra en la figura 147.



Figura 144: Apilamiento cónico de áridos



Figura 145: Apilamientos cónicos de áridos con granulometrías diferentes

Se realizaron 4 ensayos de viento y varios de emisión de polvo, a partir de una pila cónica variando la naturaleza del material considerado (caliza, cemento y carbón). Tras un exhaustivo análisis de los ensayos acometidos, así como la evaluación del polvo puesto en suspensión de cada uno de ellos (para los

distintos materiales), se seleccionó el ensayo en el que el carbón era el material evaluado. Para estos ensayos se utilizó un cono metálico y un ventilador canalizado por una manga de tres metros de longitud.



Figura 146: Apilamientos cónicos en sistemas cerrados



Figura 147: Vista general de las instalaciones

La figura 148 recoge la disposición de los elementos que intervinieron en el experimento.

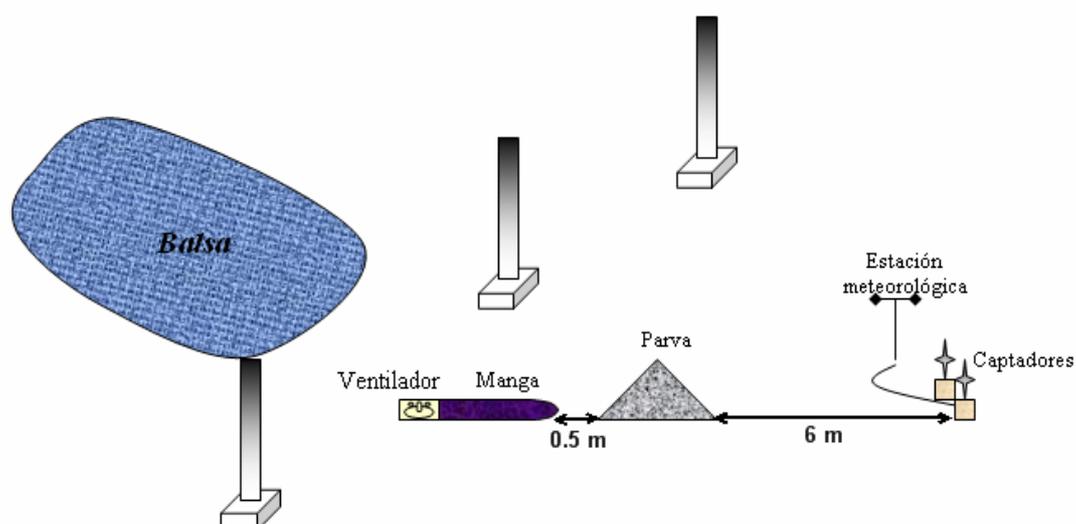


Figura 148: Disposición de elementos

El ventilador con tubería acoplada, funcionaba a razón de 12 m/s. A 0,5 metros de distancia respecto a la manga, se situó una pila cónica metálica de 0,52 m de altura y 0.69 m de radio (figura 149).



Figura 149: Instalación del ventilador, manga y cono utilizado en los ensayos

Se colocaron dos captadores que realizaban dos tipos de medidas, uno de ellos midiendo partículas totales (PM50) y el otro, al que se le incorporó un ciclón, medía partículas inferiores a 10 micras (PM10). Estos captadores estaban colocados a una distancia de 6 metros de la parva, además, uno de ellos, estaba conectado a una estación meteorológica (figura 150), que recogía los datos de humedad, velocidad y dirección del viento.



Figura 150: Captadores de polvo y trayectoria simulada de una partícula de polvo

La instrumentación utilizada para la realización de las medidas experimentales fueron, un anemómetro de hilo caliente, un medidor de humedad en suelos, una estación meteorológica, un multímetro y dos captadores de polvo.

El anemómetro de hilo caliente (figura 151) es del tipo Velocicalc Plus de la casa TSI y consta de una sonda que contiene los sensores de velocidad, temperatura y humedad ambiente. Si se coloca adecuadamente, también se puede medir la dirección de velocidad.



Figura 151: Anemómetro de hilo caliente

La humedad de la superficie de la parva la medimos a partir de TDR-100 de Field Scout (Soil Moisture System). Este instrumentó recogió datos de distintas

medidas a los 3cm superficiales de la pila cónica en distintos puntos de su superficie (figura 152).



Figura 152: Medidor TDR

Una estación meteorológica conectada a los captadores de polvo confirmaba las condiciones climatológicas en cada momento. Los captadores de polvo, E-Sampler de la casa Met One Instruments Inc, midiendo partículas totales y aquellas inferiores a 10 micras al colocarle a una de ellos un ciclón para estos tamaños. Las medidas se guardan en la memoria del captador siendo transferidas al ordenador una vez finalizado el ensayo. En la figura 153 se muestra la instalación de la estación meteorológica y captadores de polvo.



Figura 153: Instalación de estación meteorológica y captadores de polvo

Las medidas se cotejan con las conseguidas a partir del multímetro conectado al captador que mide las partículas totales. Los captadores establecen una relación de conversión directa entre milivoltios y microgramos, de ahí que nos interese recoger las medidas instantáneas del multímetro para relacionarlas a posteriori en el laboratorio.

2.3.-ENSAYOS Y SIMULACIONES

2.3.1.-INTRODUCCIÓN

Ejecutada la instalación, se procedió a la realización de los ensayos. En primer lugar se cubrió la parva metálica con carbón todo uno (200 kilogramos aproximadamente) tal como se muestra en las figuras 154 a), b) y c).



Figura 154: Pila cónica de carbón sobre el cono metálico

Una vez cubierta la pila metálica por completo se estima la temperatura ambiente, medida con el anemómetro de hilo caliente, en 25.7° y la humedad

en 51.5%. También se determinó la humedad del material utilizando el medidor TDR directamente sobre el cono, siendo ésta del 10%.

Se accionó el ventilador durante 9 minutos y 51 segundos. En este tiempo se realizaron medidas de caracterización de viento en las inmediaciones de la parva. Posteriormente (con el ventilador apagado como es lógico) se repartieron sobre ésta 1.5 kg de ultrafinos. Se accionó el ventilador durante 10 minutos y 25 segundos, tiempo durante el cual los captadores, situados a 6 metros de la parva, registraron datos de concentración.

En la figura 155 se aprecian todos los dispositivos citados anteriormente así como una estera de plástico colocada en línea recta entre pila y captadores; la cual servirá para recoger muestras de material depositado.



Figura 155: Disposición de material e instrumental

2.3.2.-MODELIZACIÓN

Con el SolidWorks dibujamos la geometría del modelo en tres dimensiones. Un paralelepípedo determina el dominio de la simulación, en él se encuentra la manguera y el cono, con las dimensiones que se muestran en la figura 156, siendo la distancia entre la manga y el cono de 0.5 metros.

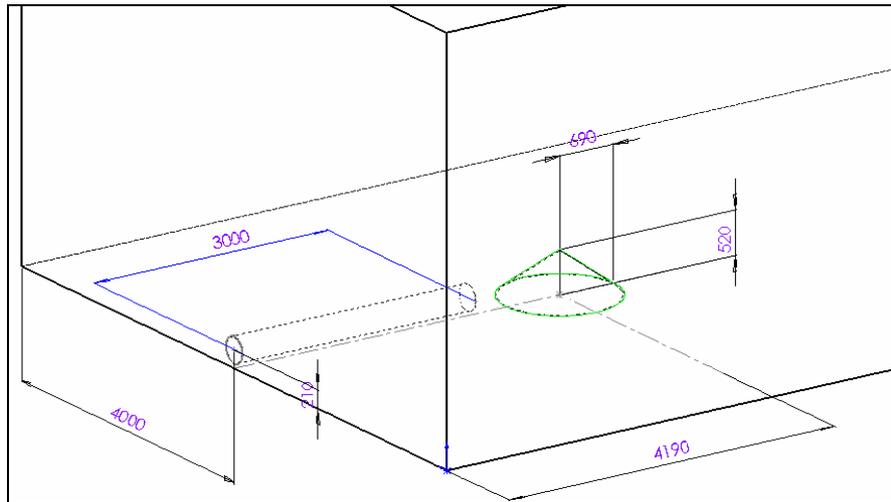


Figura 156: Geometría del modelo

Una vez croquizada la geometría del modelo, pasamos a mallarlo. Como veremos, para el programa es necesaria una malla homogénea en aquellas zonas en las cuales se midan datos de concentración. De ahí que a 6 y a 12 metros del cono se haya considerado un mallado más fino de tetraedros tal como se muestra en la figura 157.

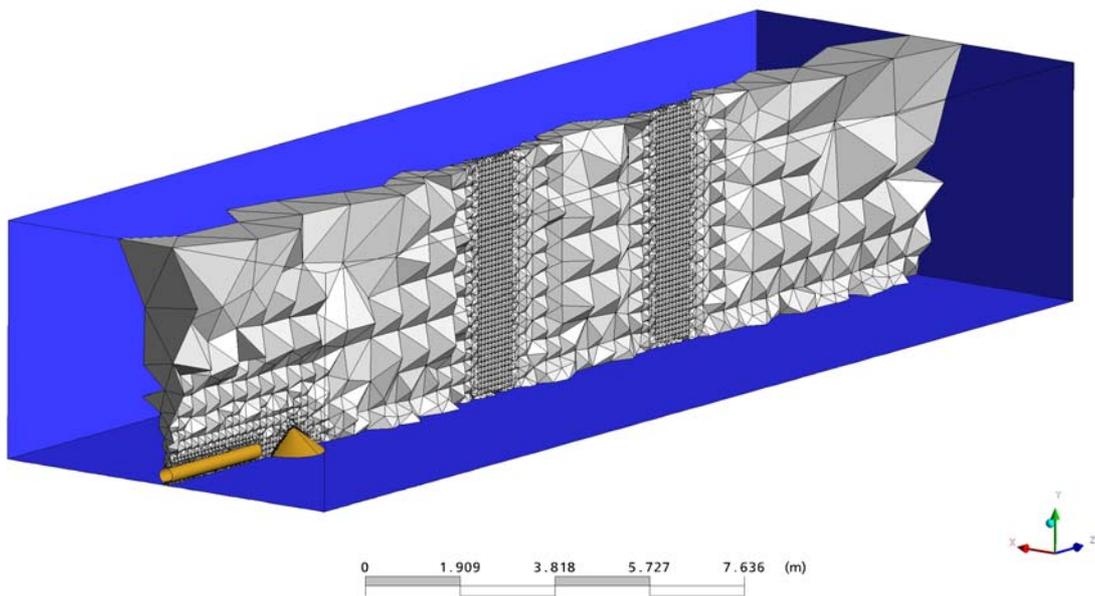


Figura 157: Volumen de mallado

Para caracterizar el viento sobre la superficie de la pila cónica, se ha realizado un crecimiento exponencial de prismas sobre ésta, hasta una altura de 5 cm. La figura 158 refleja este mallado prismático.

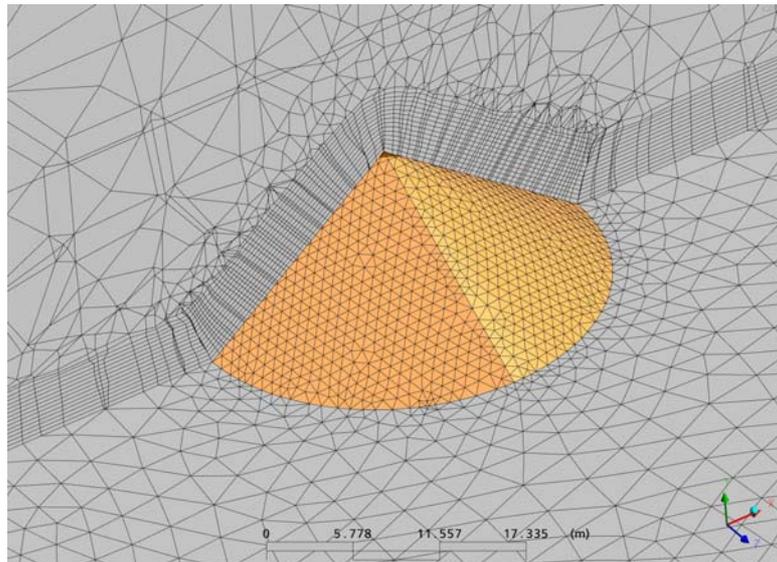


Figura 158: Mallado de prismas sobre la pila cónica

El dominio consta en total de 1099055 elementos con una calidad mínima de 0.35 y máxima de 1, de los cuales 1071359 son tetraedros y 27696 son prismas. Una vez creada la geometría y el mallado, el siguiente paso sería realizar las simulaciones CFD. Antes de evaluar los resultados obtenidos de concentración, analizamos los datos de velocidades en distintos puntos del dominio así como en las zonas más cercanas a la pila. En la figura 159 se muestra la operatoria de la toma de medidas de la velocidad del viento.



Figura 159: Tomas de medidas de la velocidad de viento

Ahora ya se pueden comparar los resultados experimentales y los obtenidos con el programa de simulación CFX. Estos datos se llevaron a cabo a partir del modelo de turbulencia K-épsilon, determinado como el mejor en las primeras etapas de esta investigación. En los capítulos siguientes, se realizará un nuevo estudio de los modelos de turbulencia, ya que pasamos a utilizar barreras, lo que interfiere bruscamente en el flujo de aire dando lugar a grandes vórtices que necesitan ser estudiados de nuevo. Atendiendo a la disposición de los puntos del croquis anterior sobre la parva cónica a diferentes alturas (figura 160), obtenemos un primer resultado de comparación entre la velocidad medida de forma experimental y la resultante de la simulación CFX (figura 161).

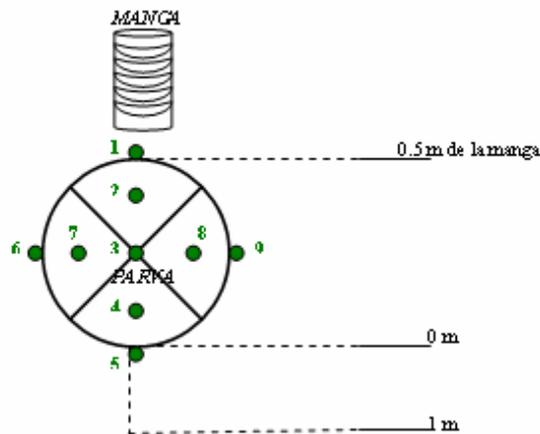


Figura 160: Croquis de caracterización de viento

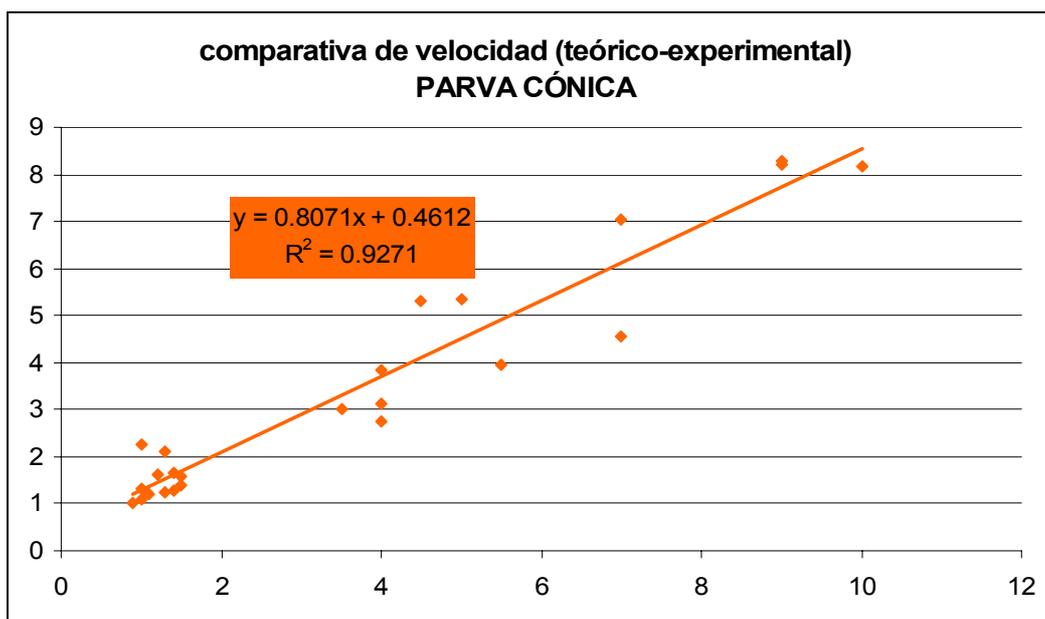


Figura 161: Comparativa de velocidad teórico-experimental

El resultado obtenido puede considerarse positivo, eliminando aquellos puntos no válidos debido a las condiciones meteorológicas adversas en el momento de la medida o simplemente datos no tenidos en cuenta debido a errores en la toma de muestras. Otra caracterización del viento fue la que se realizó a lo largo de los 6 primeros metros (desde la pila cónica) de recorrido del aire. La figura 162 a) y b) recogen los puntos (azules) en los que se tomaron las medidas tanto teóricas como experimentales.

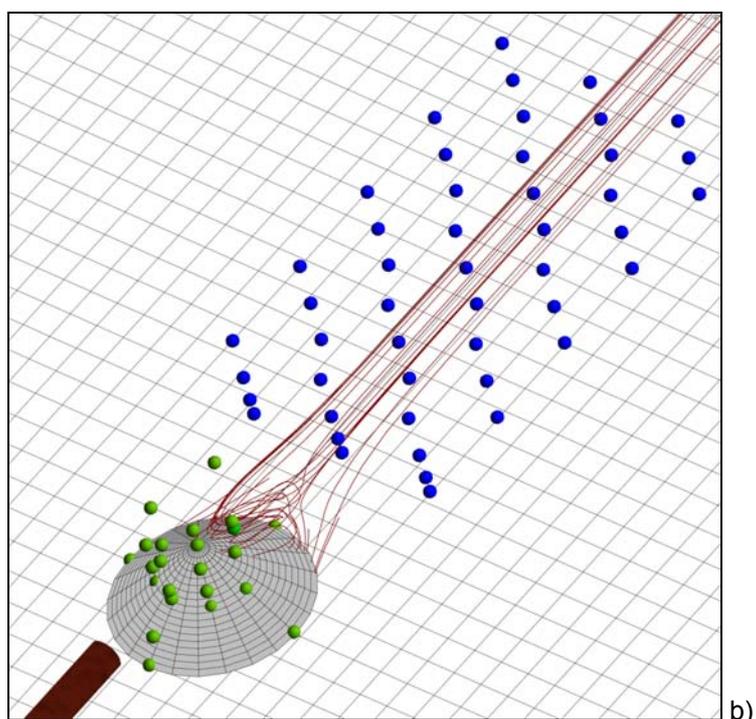
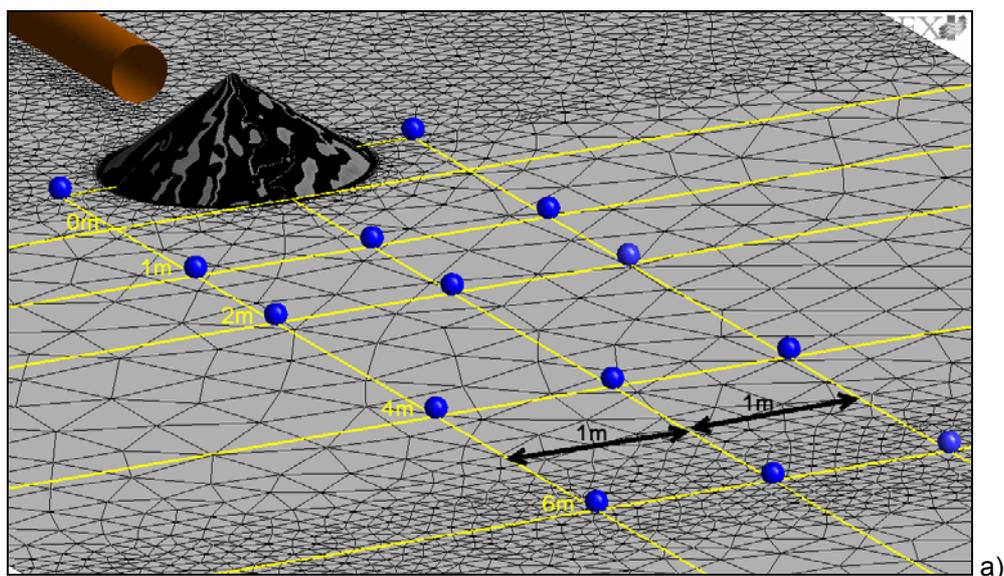


Figura 162: Croquis de medida de velocidad de viento

Además de caracterizar la velocidad a ras de suelo, estos puntos también se tomaron a distintas alturas respecto a la vertical.

Las figuras 163, 164 y 165 que a continuación se muestran, recogen la relación de velocidades en función de la altura a la que estas fueron tomadas. Como vemos en las gráficas, el ajuste entre velocidades teóricas y experimentales es bastante bueno.

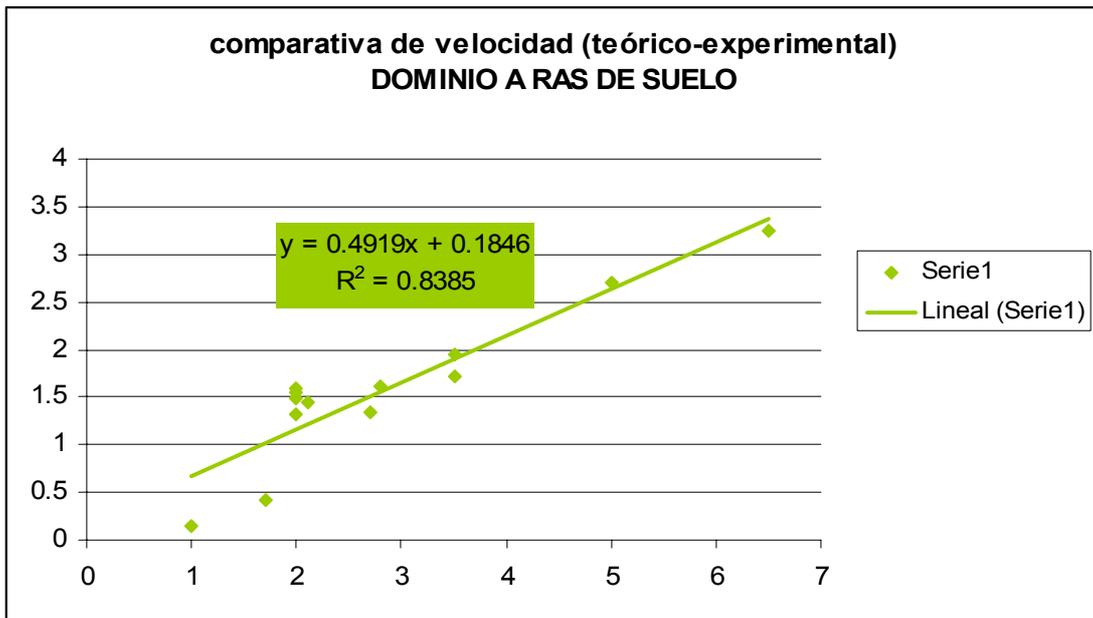


Figura 163: Comparativa de velocidad teórico-experimental

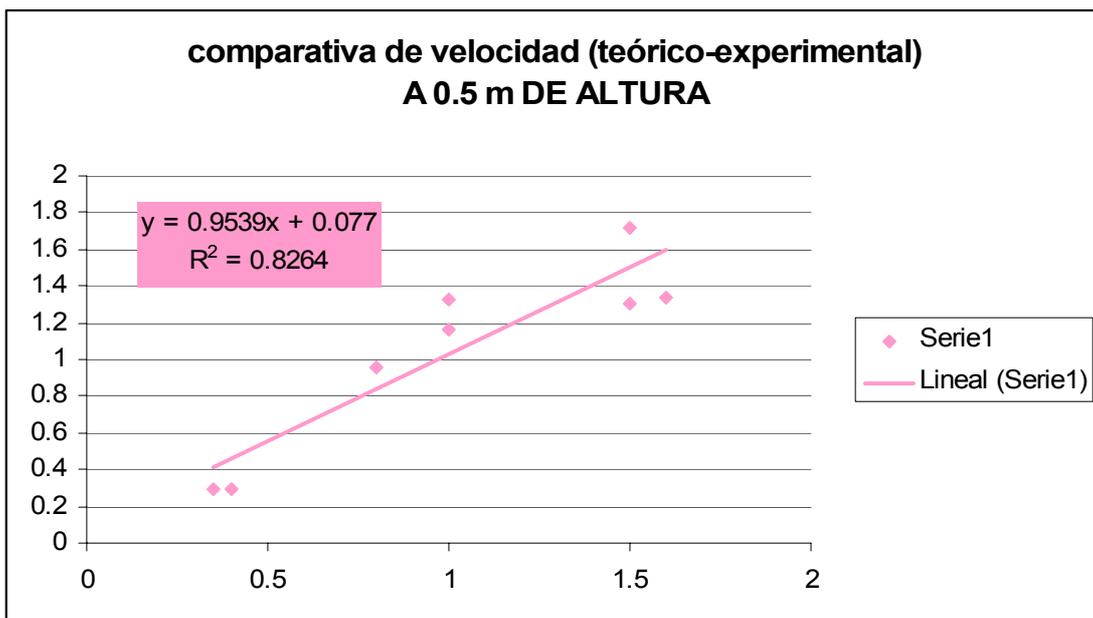


Figura 164: Comparativa de velocidad teórico-experimental a 0.5 m de altura

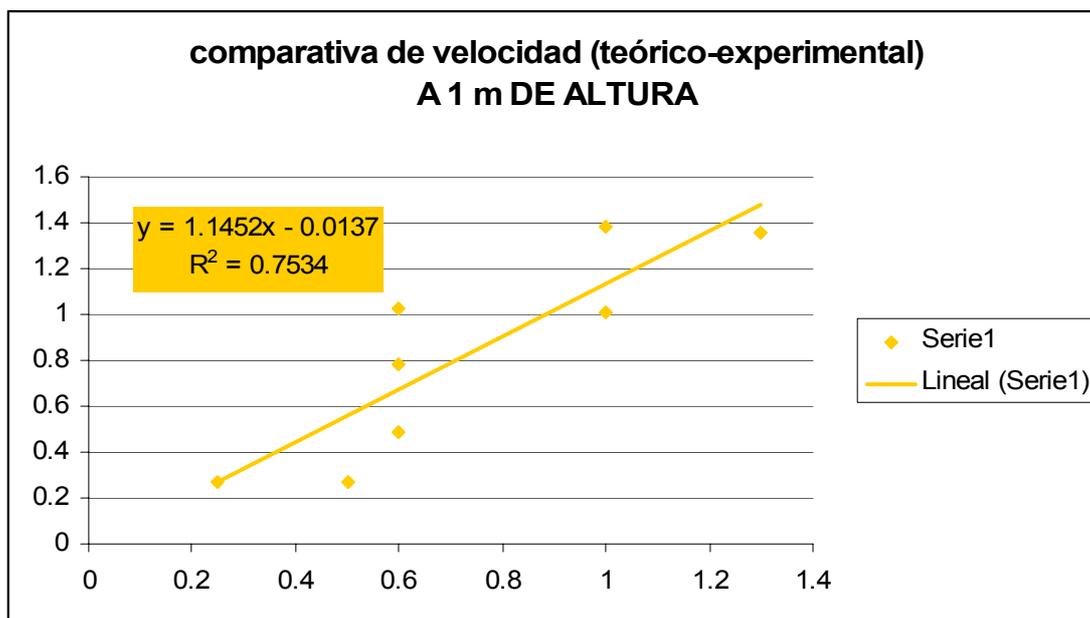


Figura 165: Comparativa de velocidad teórico-experimental a 1 m de altura

Los datos se ajustan a una recta con un coeficiente de regresión muy próximo a la unidad. Sin embargo, se observa cómo a medida que eran menores los valores de la velocidad, mayor error de medida se comete.

En la figura 166 se muestra las tres gráficas anteriores englobadas en una sola.

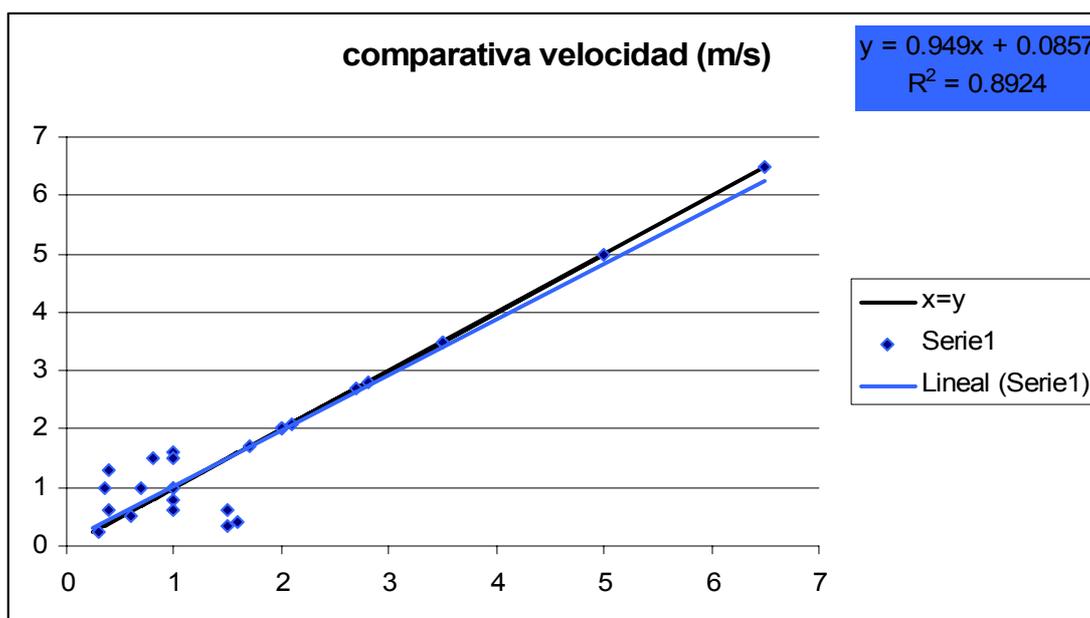


Figura 166: Comparativa final resultante de velocidad teórico-experimental

La línea azul representa la línea de tendencia de los valores de velocidad frente a la línea de regresión lineal $x=y$ (en negro). Vemos que ambas rectas están casi superpuestas lo cual hace pensar que los resultados obtenidos son muy buenos, especialmente los correspondientes a velocidades altas tal y como cabía esperar. Hemos de reseñar que filtramos sólo aquellas medidas para las cuales las condiciones meteorológicas eran muy aceptables, además siempre era la misma persona la que medía lo cual hace que las medidas mantengan siempre la misma fluctuación de error.

2.3.3.-ANÁLISIS DE MUESTRAS

Antes de evaluar los resultados de concentración se ha realizado una caracterización de la muestra de carbón utilizada (forma, densidad y distribución granulométrica). Para llevar a cabo esta descripción, se ha recurrido a un análisis por microscopía óptica (Zeiss Axioplan) de luz blanca reflejada en conexión con un software (Leica) para la captura de imágenes. Algunas de las microfotografías tomadas que permiten distinguir la composición de la muestra, se exponen a continuación. Conviene tener en cuenta que el lado horizontal de la foto mide 200 micras.

En la figura 167 se aprecian dos tipos de carbón (alto rango y bajo rango). Se trata de dos fragmentos de vitrinita afectados térmicamente (presentan una porosidad muy desarrollada). Son carbones de forma angulosa rodeados de fragmentos más pequeños. El color oscuro que rodea los pedazos es la resina necesaria para la preparación de la muestra.

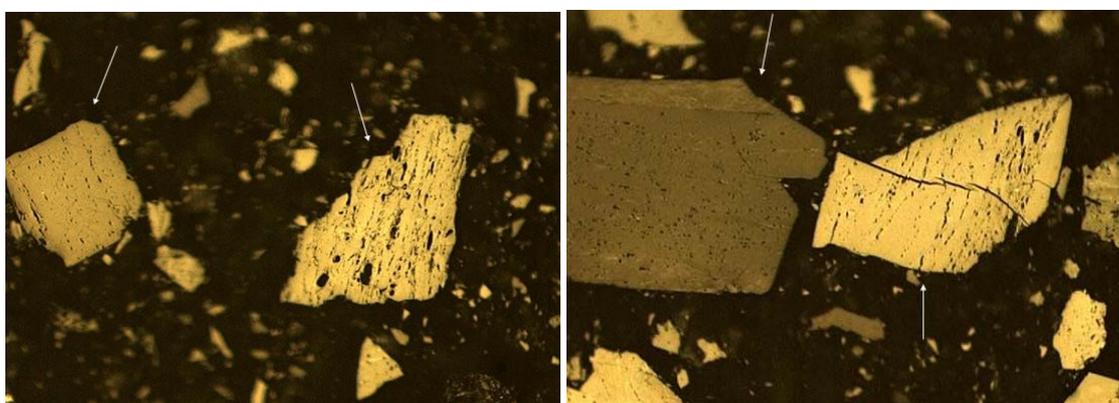


Figura 167: Microfotografías con dos tipos de carbón

Un ejemplo de partícula carbonosa de alto rango se muestra en la figura 168 izquierda. Este fragmento contiene pirita (señalado con una P en la microfotografía). En ésta misma figura se muestra en la microfotografía de la derecha un carbón de bajo rango señalado con una flecha.

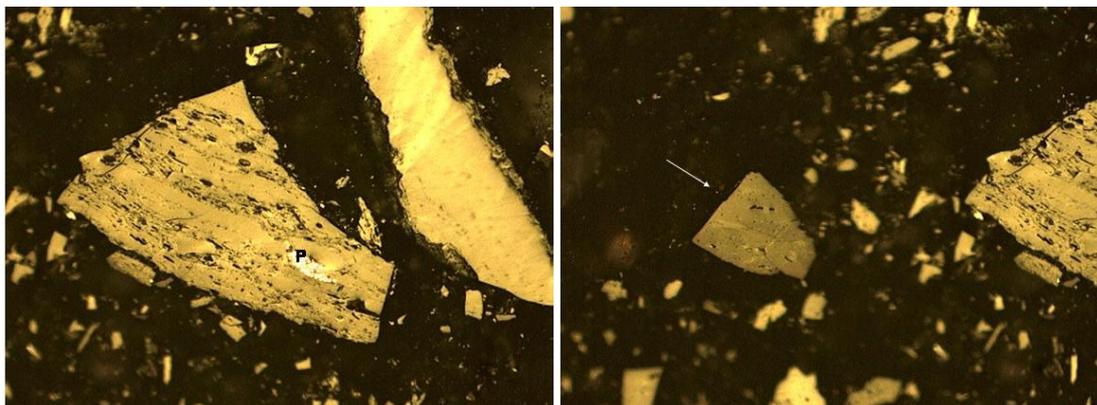


Figura 168: Partícula de carbón de alto rango y bajo rango

Después de observar las microfotografías obtenidas con microscopio óptico, se puede afirmar que se tienen al menos dos tipos de carbón, de rango alto y rango bajo. Estos carbones presentan formas angulosas y cuyo tamaño es fácilmente predecible si se tiene en cuenta la longitud del lado horizontal de la microfotografía (citado anteriormente).

Para confirmar si sólo son dos los tipos de carbón de los que consta la muestra haría falta un análisis de reflectancia, pero en este caso no sería necesario, ya que lo importante es el análisis de tamaños y formas de las partículas, no la composición mineralógica. El análisis granulométrico de la muestra se ha llevado a cabo mediante el método Coulter. La proporción de tamaños de partículas se muestra en la figura 169.

El eje de abscisas muestra el tamaño de las partículas y el eje de ordenadas representa el porcentaje en volumen. El porcentaje correspondiente a cada tamaño se indica en la tabla 21.

Nos detenemos a evaluar el porcentaje de partículas de 10 micras porque será el tamaño que consideremos para llevar a cabo la simulación numérica. Las partículas inferiores a 10 micras, representan aproximadamente el 50 % de la composición total. Lo cual significa aplicar el factor $k=0.5$ en la fórmula del

potencial de erosión de la EPA, que nos determinará la cantidad de polvo emitida por nuestro apilamiento.

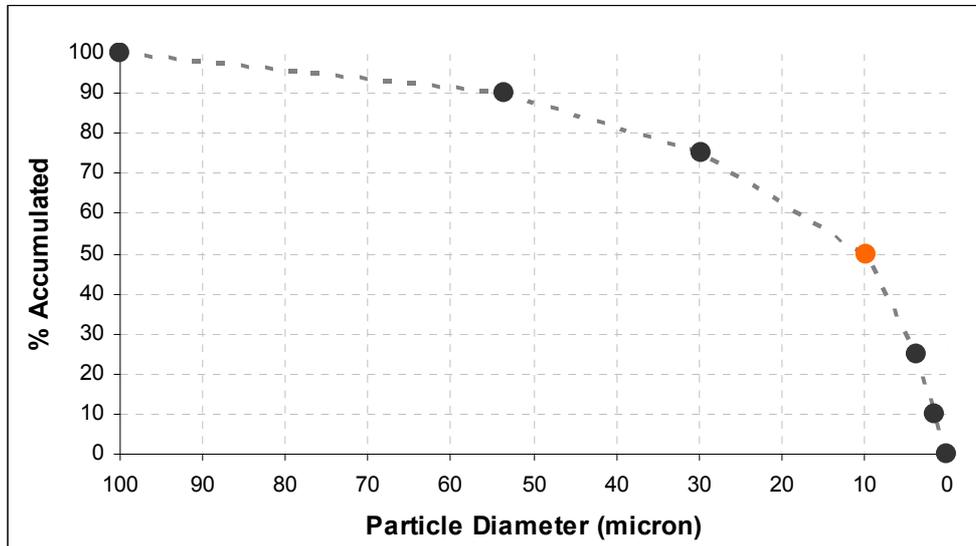


Figura 169: Curva granulométrica de carbón

< 10%	<25%	<50%	<75%	<90%
1568 μm	3.585 μm	9.746 μm	29.78 μm	53.61 μm

Tabla 21: Porcentajes de los tamaños de la muestra de carbón

2.3.4.-DATOS DE CONCENTRACIÓN EXPERIMENTAL

Vamos a evaluar ahora los resultados de concentración obtenidos de forma experimental para el caso de una pila cónica de carbón. A partir de estos datos de concentración podremos calar nuestras simulaciones CFD realizadas en CFX.

Estos resultados se muestran en las figuras 170 y 171.

Al comenzar a soplar el ventilador, surgió una nube muy grande de polvo, que llegó a alcanzar más de 20 m de distancia al cono. Esta nube fue disminuyendo hasta alcanzar unos 4 m, hay una pequeña ráfaga que llega hasta los 6m donde están los captadores. A la mitad del ensayo, salen nuevas nubes pero ya más pequeñas, y solo alguna llega a los captadores, siendo visible la nube hasta unos 2 m del cono. A los 8-9 minutos las emisiones son discontinuas, ya

que las partículas gruesas caen y al rodar levantan las partículas mas finas. En éste caso, la nube visible ya no alcanza el metro de distancia al cono.

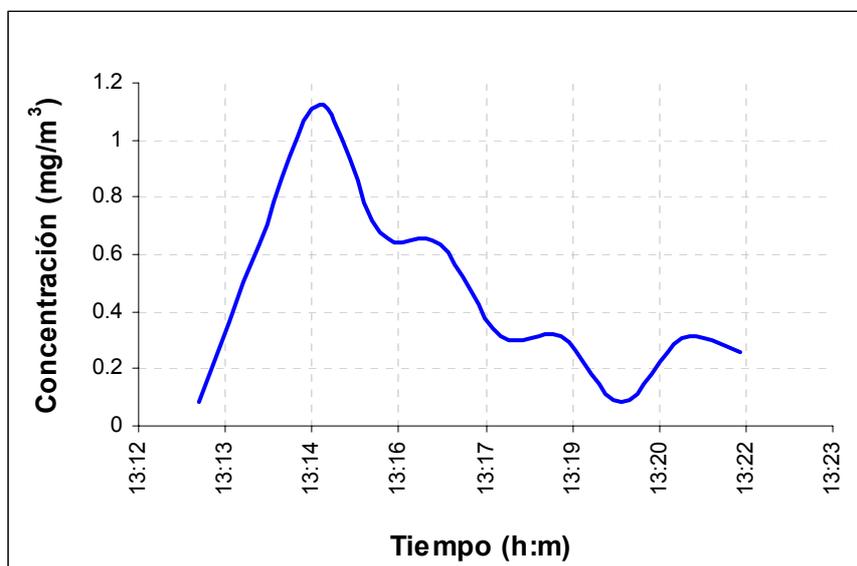


Figura 170: Concentración partículas totales

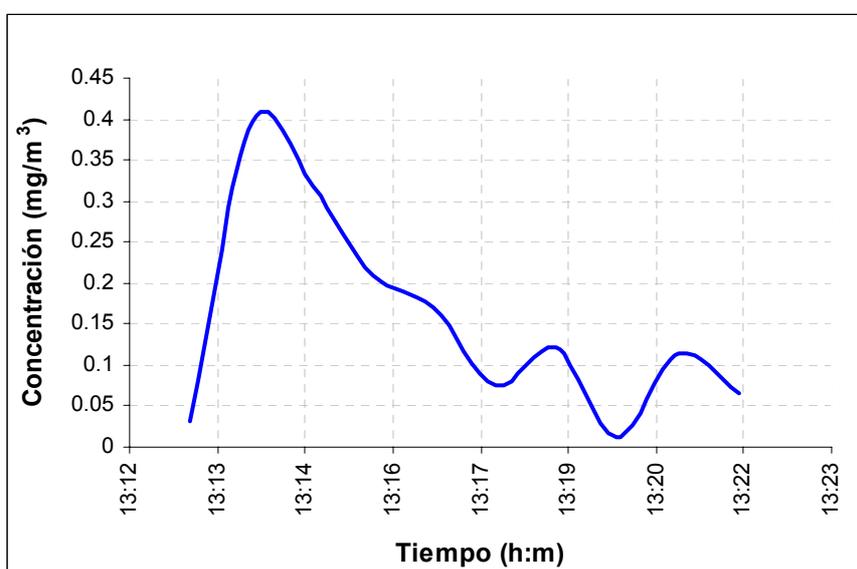


Figura 171: Concentración partículas 10 micras

El área bajo la curva en cada una de las gráficas aportará el valor de concentración total (mg/m³). En el caso de partículas totales, la concentración es de 257.46 (mg/m³) y en el caso de partículas de 10 micras, la concentración cuantificada es 94.02 (mg/m³). En este caso hemos tenido que calcular el área bajo la curva para tener concentraciones totales, puesto que los instrumentos

de medida aportan datos instantáneos. El programa que utilizaremos para llevar a cabo la simulación, aportará resultados en régimen permanente y el dato que resulte de medir concentraciones será por unidad de tiempo.

3.-CALADO DEL MODELO

3.1.-INTRODUCCIÓN

Una vez realizados anteriormente los ajustes relacionados con la velocidad del viento, lo que hacemos es evaluar los resultados de emisión y concentración obtenidos en la simulación y relacionarlos con los obtenidos de forma experimental. En la simulación CFD se ponen en suspensión un total de 1.65 kg de partículas de carbón de 10 micras de tamaño, este polvo se inyecta de acuerdo a la fórmula de emisión de la EPA, la cual se implementa en Fortran.

Las rutinas de inyección se programan en Fortran, aproximadamente unas 1500 líneas de código, con una posterior compilación para obtener ejecutables en forma de librerías DLL. Estas librerías se linkan manualmente mediante código propietario CFX-CCL al resto de condiciones del preprocesado. Como ejemplo se muestra a continuación la parte de la rutina correspondiente a la inyección de masa según EPA (figura 172).

```
C---- Set particle number rate as a function of the monitor velocity
C
      VELMAG = SQRT(VELSTU(1)**2 + VELSTU(2)**2 + VELSTU(3)**2)
      IF (VELMAG .GE. 1) THEN
        PNUM(IPART) =0.5*(ArFc(ISEL)*(58*(VELMAG-1)**2+25*(VELMAG-1)
&    ))/1.42e-09
      END IF
      IF (VELMAG .LT. 1) THEN
        PNUM(IPART)=0
      ENDIF
    END DO
```

Figura 172: Implementación en Fortran de la fórmula de emisión

Donde 0.5 es el factor K correspondiente a partículas inferiores a 10 micras y 1,42 e-09 es la masa (en gramos) de una partícula de 10 micras.

Como hemos visto en apartados anteriores, la estimación de concentración por parte de la EPA proporciona valores de emisión independientes del tiempo. Se están calculando valores totales emitidos por disturbancia, es decir, cada vez

que se produce un movimiento de material en la pila, como el que podría causar el apilado del material ó la retirada del mismo por palas. El fenómeno real, en cambio, viene caracterizado por una curva de agotamiento del material en la que las emisiones desde la parva son inicialmente altas para ir decreciendo gradualmente a medida que las partículas son removidas por el viento y se va creando una costra sobre la superficie de la parva.

Este fenómeno ha sido simulado con Ansys CFX Particle Tracking, que sustituye los millones de partículas que se mueven en la corriente de aire por unas miles de partículas representativas cada una de las cuales hará las veces de un determinado número de partículas reales. El número de partículas que cada una de las representativas simula, se denomina en el método “PNR”, Particle Number Rate.

De esta forma y llamando PNR_i^t a la masa inyectada por cada una de las partes en las que se divide la superficie de emisión, la masa total inyectada viene dada por la siguiente expresión:

$$M_{EPA} = (\sum_i PNR_i^t) \times m_p \quad (25)$$

Esta emisión depende de la masa de la partícula (m_p), del parámetro PNR^t y del número de “Faces” en los cuales se divide la superficie de inyección (parva cónica).

La variable PNR^t es independiente del tiempo y viene definida por una curva de agotamiento asociada a cada FACE, figura 173.

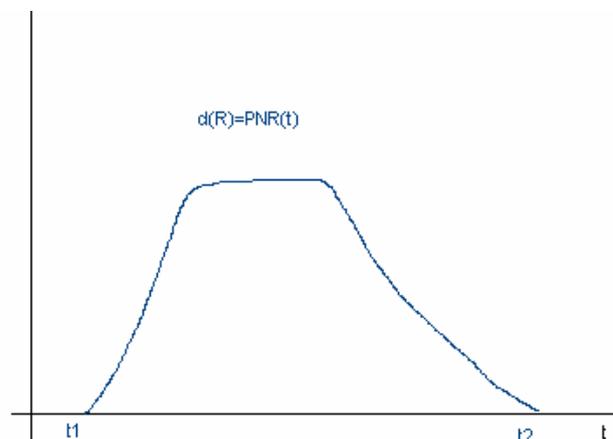


Figura 173: Curva PNR

$$\text{PNR}^t = \int_{t_1}^{t_2} \text{PNR}(t) dt \quad (26)$$

Donde PNR^t define la inyección de polvo sobre la superficie de la parva atendiendo a las ecuaciones de la EPA y que nosotros hemos implementado en Fortram según la figura 169. Es decir, la fórmula de la EPA proporciona valores resultantes independientes del tiempo que nosotros hemos de ajustar a nuestros ensayos.

Esta emisión se produce en función del número de “Faces” de los que consta la pila cónica. Se define como Face cada uno de los elementos superficiales de los que se compone la pila cónica o, dicho de otro modo, se trata de cada punto de medida en el que se divide la parva. En la figura 174 (pila cónica vista en planta) se muestra la división de Faces que tiene nuestra simulación consta en total de 1731 Faces.

Cada “Face” tiene asociado un PNR constante a lo largo de todo el dominio tal y como vemos en la figura 175.

Sin embargo, nuestros ensayos se basan en datos de concentración para cada instante de tiempo que, conjuntamente, representan una curva de concentración $C(t)$ tal y como muestra la figura 176.

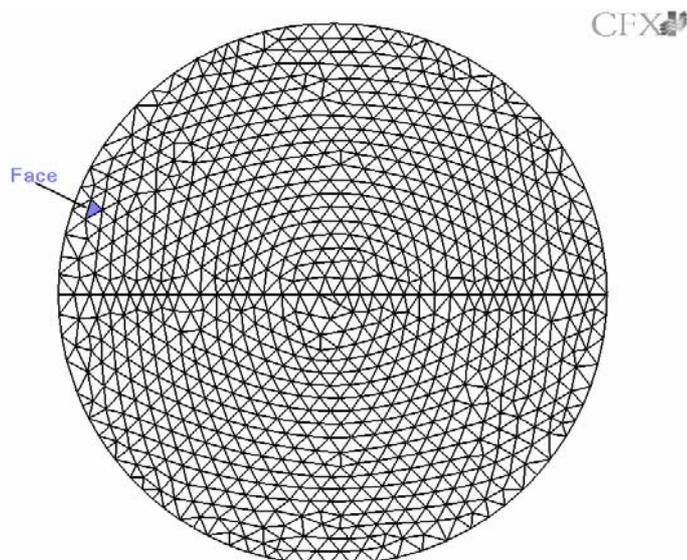


Figura 174: División de la pila cónica en Faces

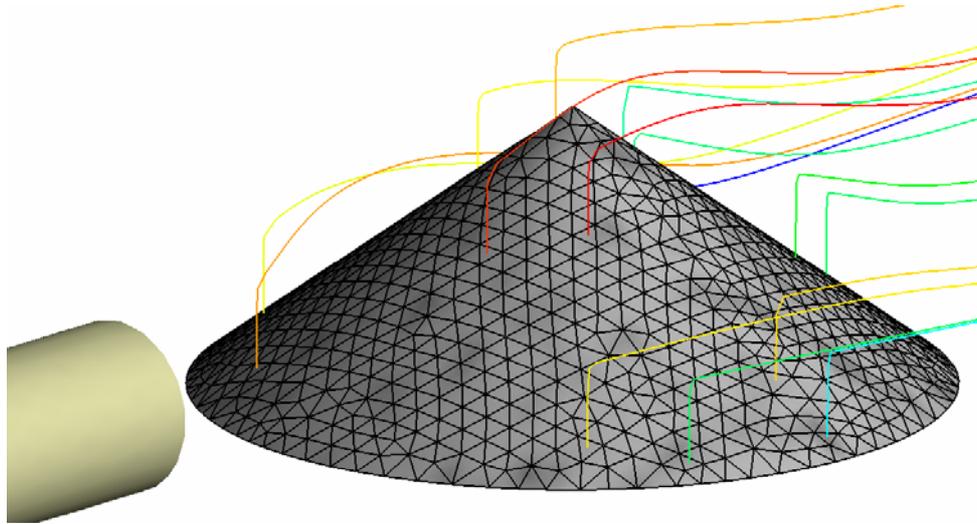


Figura 175: Ejemplos de las trayectorias asociadas a Faces

El nivel más alto de la curva proporciona la concentración máxima (C_m) y la concentración total vendrá definida por la siguiente expresión:

$$C_{\text{experimental}} = A = \int_{t_1}^{t_2} (C(t) - C_0) dt \quad (27)$$

Donde C_0 es la concentración mínima a partir de la cual se considera contaminación de polvo emitido. Como vemos, el resultado de concentración total para un ensayo de campo, es un efecto transitorio.

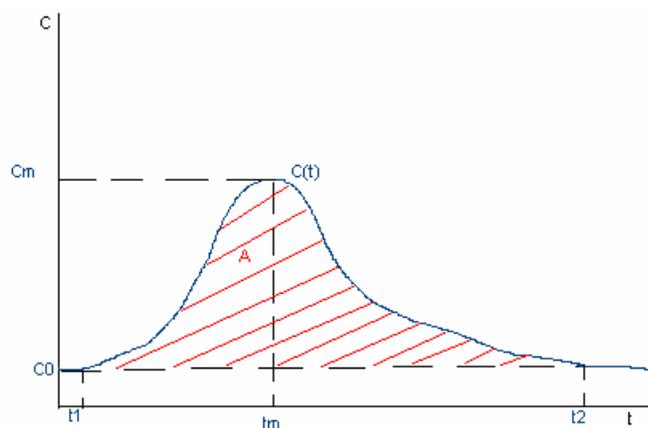


Figura 176: Gráfica concentración-tiempo

El dato de concentración total en el caso de la simulación por métodos numéricos (CFX), y de que un total de N trayectorias atraviesen el mismo elemento de control (figura 177) viene definido por la siguiente expresión:

$$C_{CFX}^t = \frac{\sum_{i=1}^N (PNR_i^t) \times m_p}{V} \quad (28)$$

donde:

$$PNR^t \text{ (partículas)} = \frac{\text{masa inyectada (kg)}}{n^\circ \text{ de trayectorias} \times \text{masa de una partícula (kg)}} \quad (16)$$

I es el número de trayectorias ó número de Faces.

m_p es la masa de la partícula (kg).

V es el volumen del elemento de mallado en el cual se realiza la medida (punto del captador).

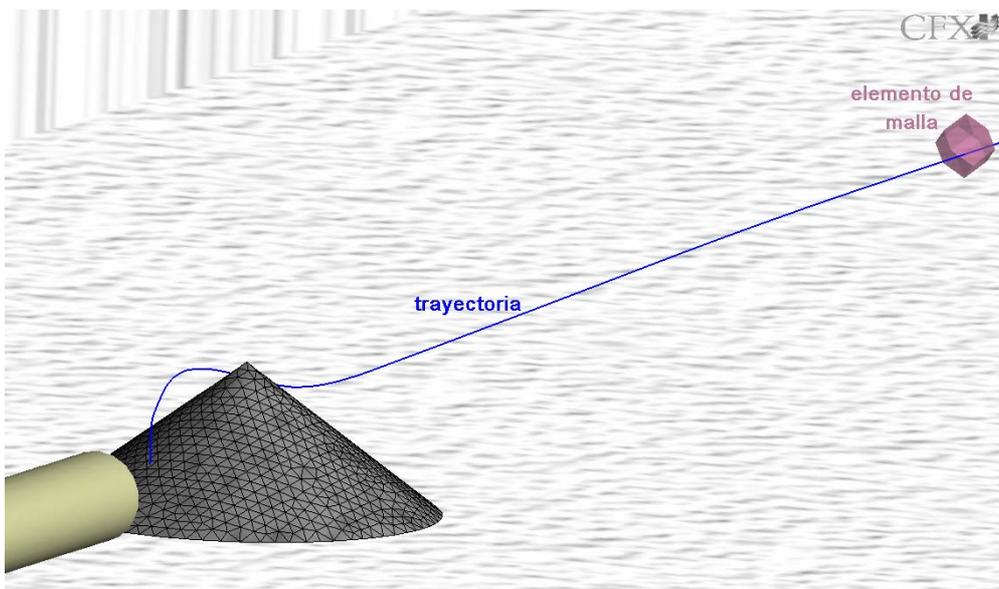


Figura 177: Trayectoria atravesando volumen de malla

Como vemos, la simulación implementada en CFX se basa en la norma EPA que hemos adoptado para obtener resultados de concentración, sin embargo, frente a la transitoriedad de los datos de campo, nos encontramos ante una expresión estacionaria de la EPA. Para solventar tal problema hemos pasado de una simulación CFX permanente a una simulación transitoria, esto es posible dado que:

$$\begin{aligned}
 C_{CFX}^t &= \frac{\sum_{i=1}^N \text{PNR}_i^t}{v} m_p = m_p \frac{\int_{t_1}^{t_2} \text{PNR}_1(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \text{PNR}_2(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \text{PNR}_3(t) dt + \dots + \int_{t_1}^{t_2} \text{PNR}_N(t) dt}{v} = \\
 &= \int_{t_1}^{t_2} m_p \frac{\text{PNR}_1(t) + \text{PNR}_2(t) + \text{PNR}_3(t) + \dots + \text{PNR}_N(t)}{v} dt = \int_{t_1}^{t_2} C_{CFX}(t) dt
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Para calar el modelo tiene que darse la igualdad $C(t) = C_{CFX}(t)$, lo cual implica:

$$\int_{t_1}^{t_2} C(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} C_{CFX}(t) dt \tag{30}$$

Una vez demostrado que es posible simular un fenómeno transitorio con una simulación estacionaria, ecuación (29), y teniendo en cuenta la necesidad de ajustar la curva de concentración experimental a la simulación, ecuación (30), se puede afirmar que el modelo estará perfectamente calado si y sólo si:

$$C_{CFX}^t = \int_{t_1}^{t_2} C(t) dt = A \tag{31}$$

3.2.-COMPROBACIÓN DE LA SIMULACIÓN

A partir de las conclusiones obtenidas en el apartado anterior, hemos elaborado una comparación entre los datos experimentales y los obtenidos en la simulación (fundamentada en la EPA), es decir, vamos a estudiar si en nuestro caso se cumple la igualdad (31). En el ensayo nos basamos en los resultados de concentración obtenidos para partículas de 10 micras en el ensayo explicado a lo largo de este documento. Se accionó el ventilador durante 600 segundos y una nube de partículas se originó. Los captadores colocados a 6 m del obstáculo registraron los datos de la figura 178.

Según la ecuación (27) calculamos el área bajo la curva para obtener la concentración total a 6 m del obstáculo. El resultado obtenido es:

$$C_{\text{experimental}} = A = \int_{t_1}^{t_2} (C(t) - C_0) dt = 94.02 \text{mg} / \text{m}^3$$

Como apuntamos anteriormente, el dato de concentración total en el caso de la simulación por métodos numéricos (CFX), viene definido por la ecuación (28). El valor resultante es:

$$C(t)_{CFX} = \frac{\sum_{i=1}^N (PNR_i(t) \times m_p)}{v} = 96.94 \text{ mg/m}^3$$

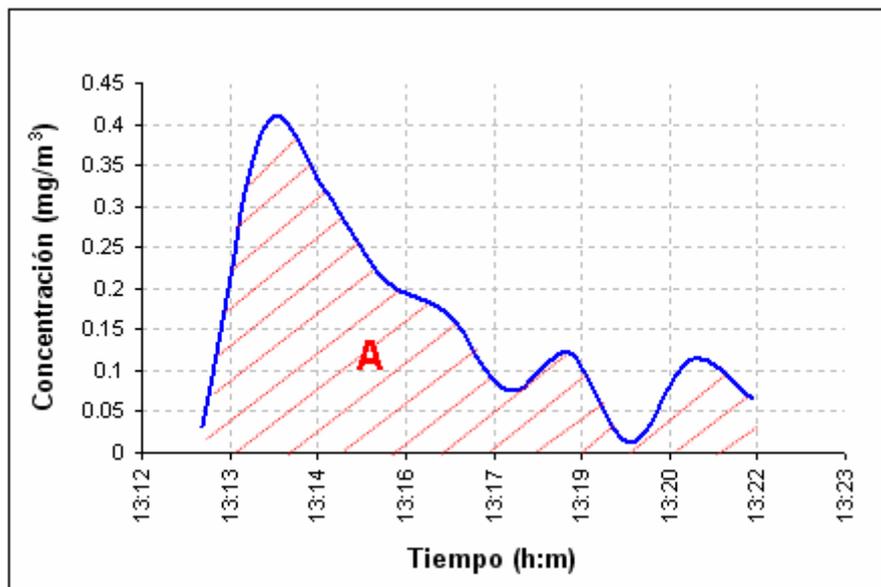


Figura 178: Medidas experimentales para PM10

Vemos que efectivamente estamos ante un buen calado. Pero para comprobar que el resultado es el adecuado, vamos a analizar uno a uno los datos de campo y de la simulación y sopesar cualitativa y cuantitativamente los datos obtenidos.

En los ensayos de campo se repartieron 1.65 kg de carbón ultrafinos sobre la superficie de la parva y se activó un ventilador durante 600 segundos. En este ensayo nos centramos exclusivamente en partículas de 10 micras. Según los análisis granulométricos que se hicieron de la muestra (figura 161) el 50% de la misma se correspondía con partículas de 10 micras de diámetro, es decir, del total de carbón repartido sobre la pila cónica, 0.75 kg, eran partículas de 10 micras. Basándonos en resultados de otro ensayo (ultrafinos sobre pila metálica) en el que se realizó el pesaje del carbón mediante una báscula electrónica (figura 179) antes de la medida y después (recogiendo el material

que quedó depositado sobre el cono), se obtuvo que sólo el 29.81 % del material repartido sobre la superficie cónica fue arrastrado por el viento.



Figura 179: Báscula electrónica

Aplicado al ensayo que nos ocupa, de los 0.75 kg de ultrafinos de 10 micras que se repartieron sobre la parva metálica, menos del 29.81% fueron arrastrados por el viento. Decimos menos porque el experimento que tratamos se ha realizado sobre parva de carbón y éste posee una rugosidad más elevada que la parva metálica, lo cual hace que menos partículas sean arrancadas de la superficie. Es decir, del orden de 0.20 kg (aproximadamente) fueron arrastrados por el viento.

Pasando ya a la simulación, basándonos en la fórmula de emisión de la EPA hemos implementado la inyección de partículas de carbón donde 0.5 es el factor K correspondiente a partículas de 10 micras, figura 180. La cantidad de masa total inyectada para partículas del tamaño citado se calcula en la simulación según la ecuación (25):

$$M_{EPA} = (\sum_i PNR_i^t) \times m_p = 1.65\text{kg}$$

Frente a los 0.20 kg (aproximadamente) de partículas de carbón de 10 micras que se repartieron sobre la superficie de la parva en el caso experimental (y considerando que no todo ese material fue arrastrado por el viento), 1.65 kg han sido los que se inyectaron en la simulación (según EPA). En cuanto a la altura del captador en la simulación el resultado de concentraciones para la

simulación varía notoriamente en función de la altura a la cual tomemos el captador. El captador real posee una altura de 76 cm, de los cuales 5 cm se corresponden al capuchón que absorbe la muestra de polvo. En la figura 181, se muestra la altura de la nube en las zonas de medida de los captadores.

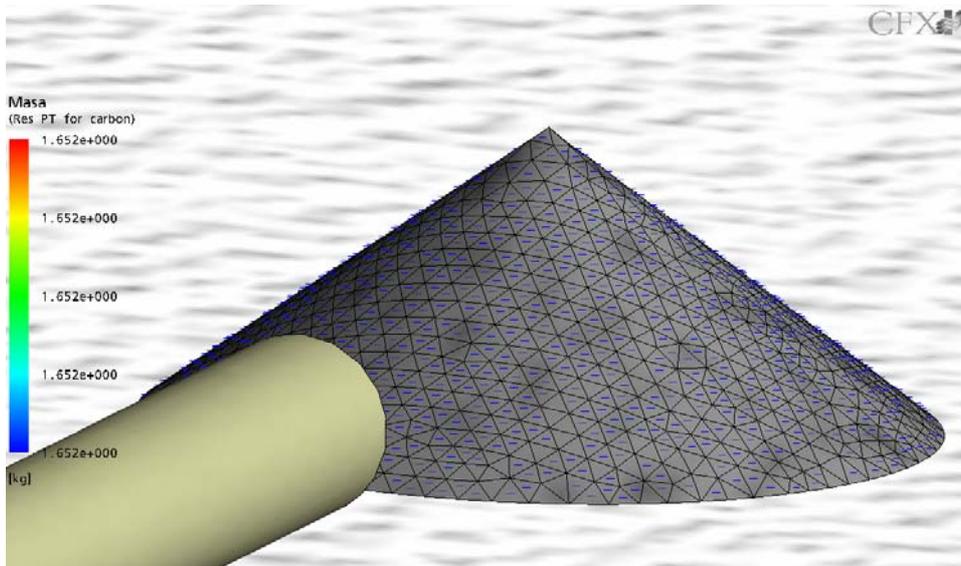


Figura 180: Masa inyectada de partículas de 10 micras

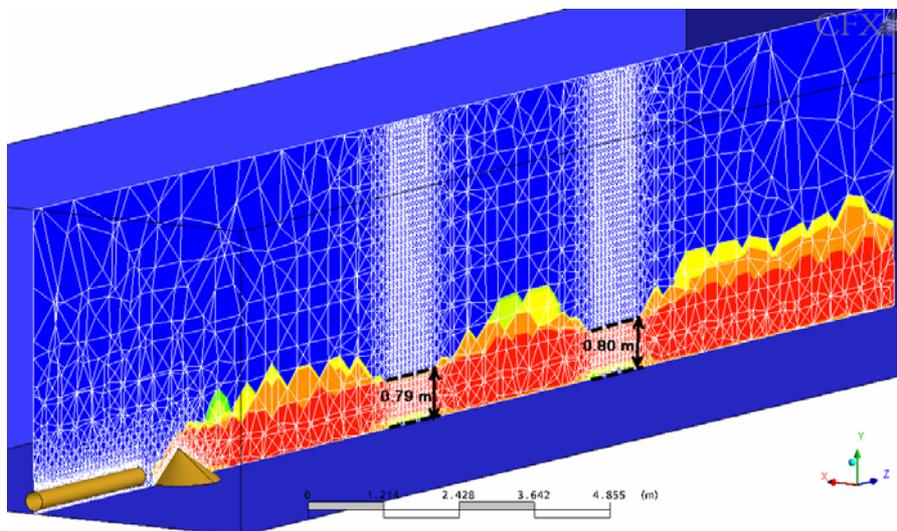


Figura 181: Concentración en un plano longitudinal

En este modelo las partículas se han inyectado con una velocidad ascensional de 5000 m/s y se han aplicado unos coeficientes de restitución nulos (tanto para el suelo como para la pila). El flujo de partículas a lo largo del dominio

representa contornos inexactos debidos a los elementos gruesos de malla. Debemos fijarnos en la silueta de malla en la cual realizaremos las medidas de concentración, en estos puntos, los elementos de malla son finos y homogéneos lo cual proporciona un contorno muy fiable de partículas de carbón. Como vemos en la figura 177, la altura de la masa de polvo a 6 m del obstáculo es de 0.79 m y, a 12 m, es de 0.8 m de altura.

3.3.-RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos para la simulación, partiendo de los datos de viento y posteriormente como evoluciona la nube de polvo en el dominio del modelo.

En los contornos de velocidades horizontales, tomados a una altura igual al eje del tubo de soplado se observa como el flujo rodea el obstáculo que representa el cono a escala. El chorro se ensancha hasta una distancia que podemos tomar como de 2 veces su altura, y la superficie del cono se ve bañada por vientos que rondan los 7 metros por segundo.

En el corte vertical se observa como el cono deflecta el chorro hacia la parte superior, pudiendo observarse una aceleración del flujo al llegar al vértice del cono, figura 182. La superficie se ve bañada por valores que pueden llegar a tomar los 9 m/s de velocidad.

El mismo efecto se puede apreciar en una toma cenital que se recoge en la figura 183. Esta última figura nos muestra cómo las velocidades son mayores en el vértice del cono. La cantidad de polvo emitida debería ser mayor en esas zonas, lo que concuerda con la normativa EPA empleada y también con las observaciones realizadas en campo.

El carbón ultrafino empleado no se ve arrastrado por el viento en zonas en las que la velocidad se encuentra comprendida por debajo de valores que el CFD nos muestra comprendidos entre 2-3 m/s.

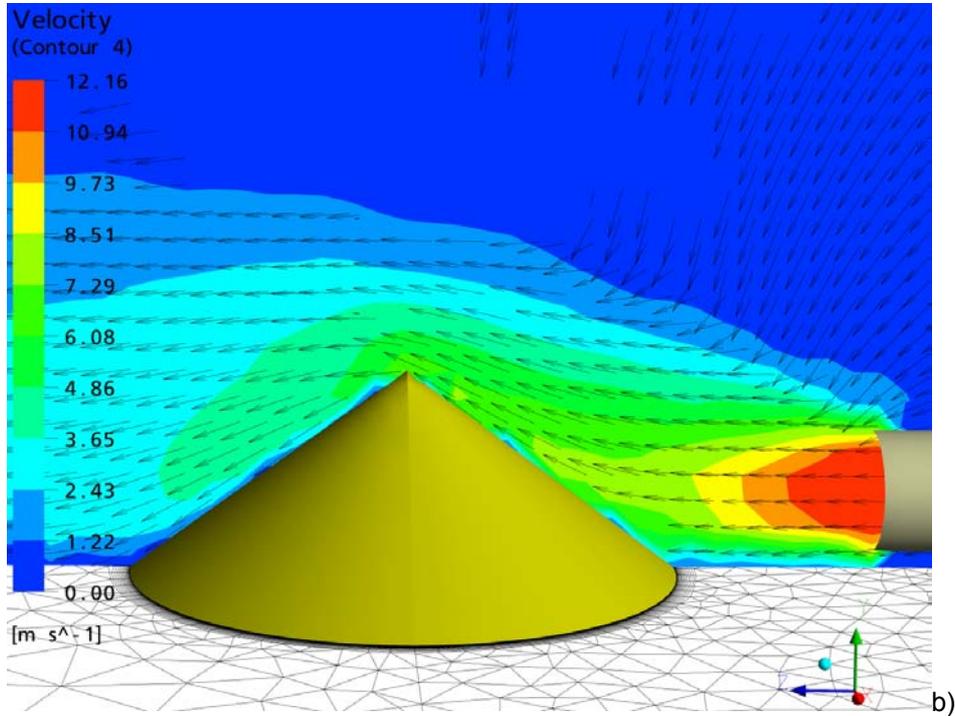
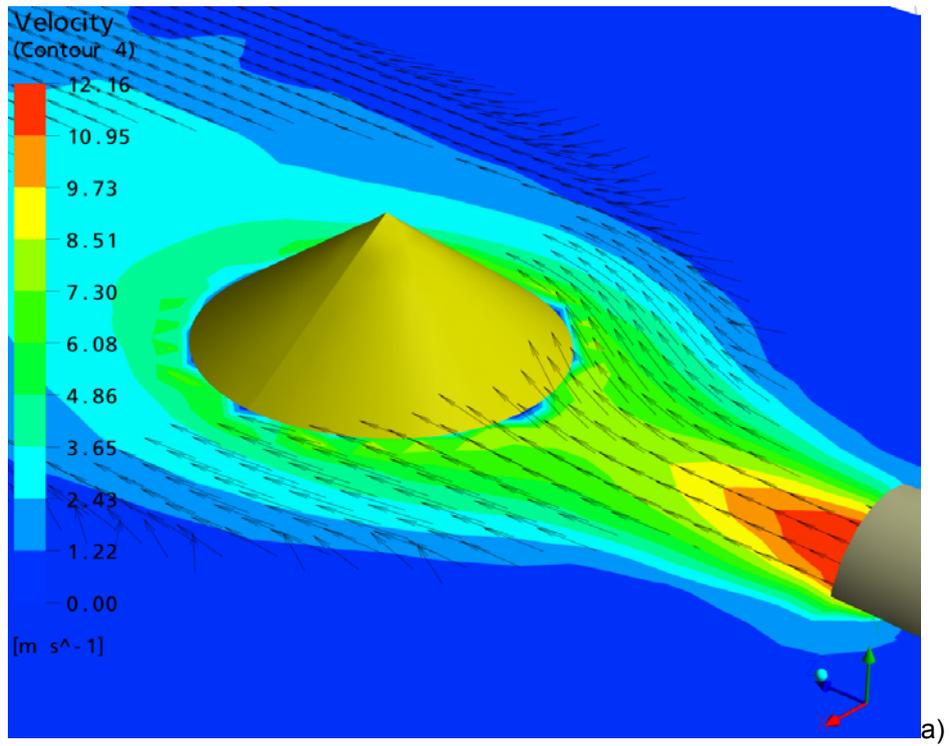


Figura 182: Flujo alrededor del obstáculo

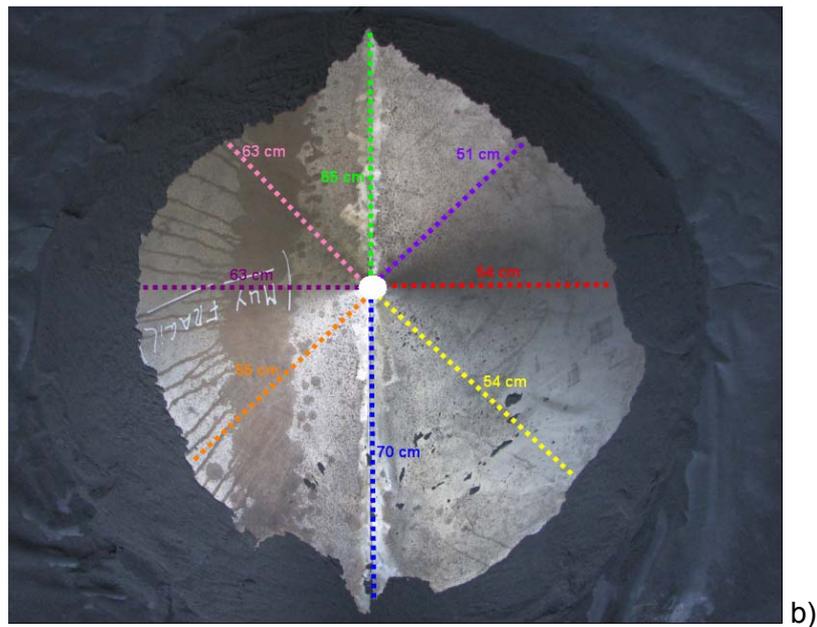
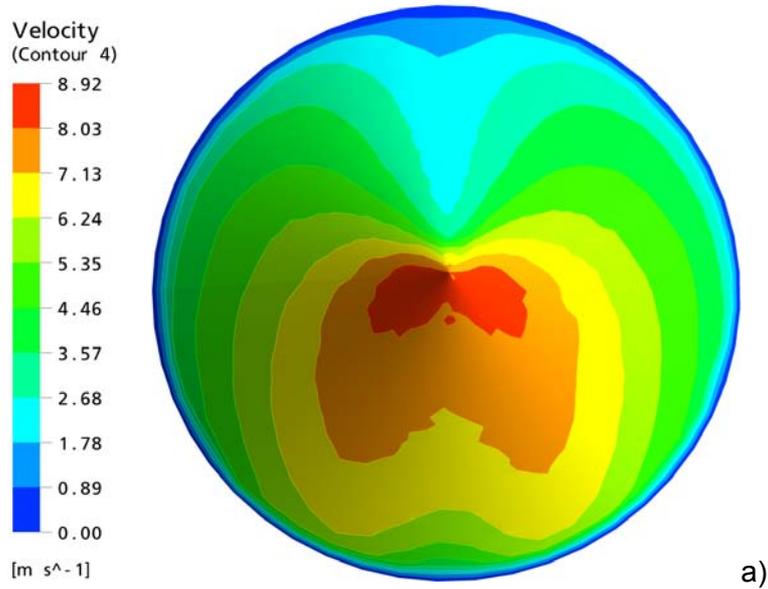


Figura 183: Contornos de velocidades sobre la parva

En la figura 184 se aprecia la nube de polvo a razón de los elementos de mallado. Se forma a partir de una isosuperficie de concentración de polvo de valor $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A las distancias a las cuales hemos situado los captadores de polvo, los elementos de malla son mucho más pequeños y por tanto, la precisión de resultados es mayor. No ocurre lo mismo en el resto de dominio, mallado con elementos de mayor tamaño, puesto que en estas zonas no

vamos a evaluar la concentración de polvo y por lo tanto, no necesitamos tanta precisión en el cálculo.

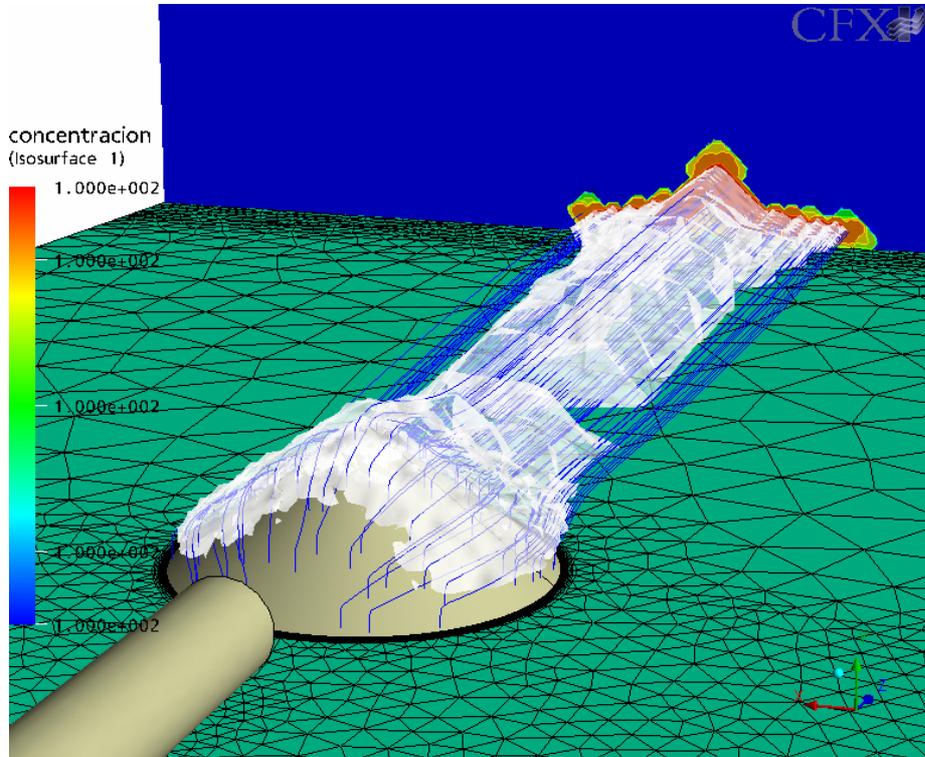


Figura 184: Nube de carbón ultrafino con concentración de 100 mg/m^3

Observamos en la figura 185 y 186 cómo la nube de polvo se ensancha a medida que se aleja de la fuente, manteniendo en todo caso una cierta forma piramidal.

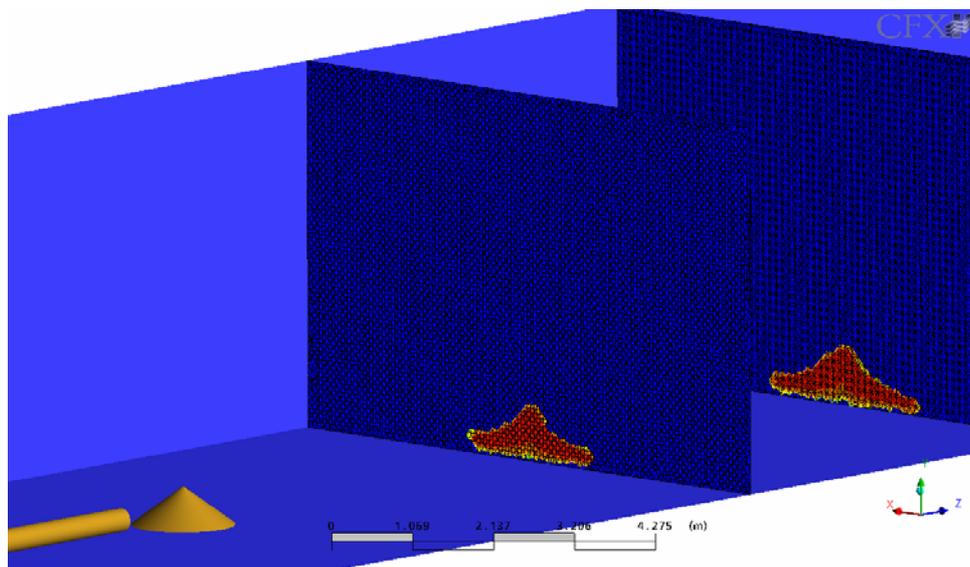


Figura 185: Concentración en plano a 6m y en plano a 10 m de la pila respectivamente

Es en la figura 187 donde se muestra la concentración de la nube de polvo a lo largo de su recorrido por el modelo, viéndose como los valores mas altos se sitúan en la parte central de la nube. Para ello se utilizan dos planos perpendiculares dotados de transparencia.

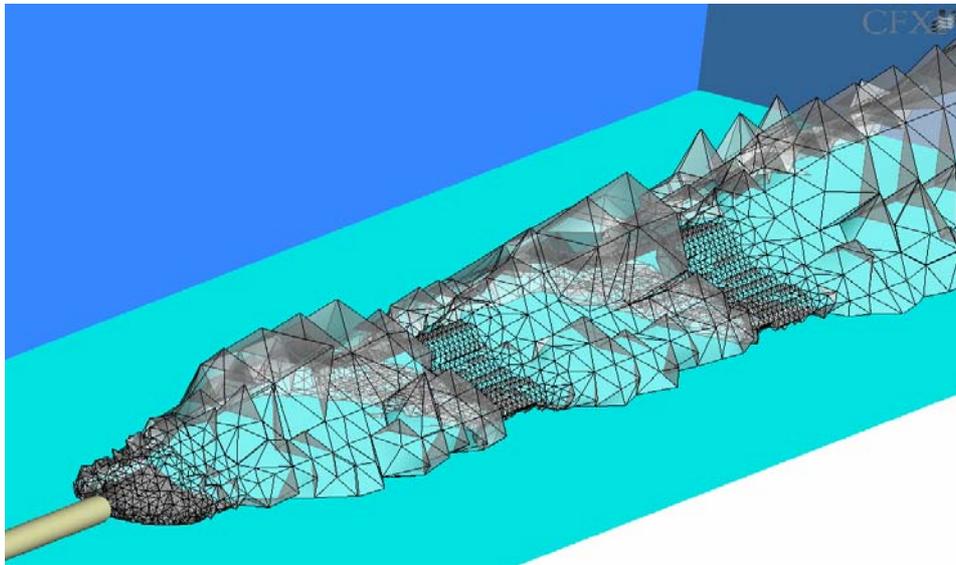


Figura 186: Nube de polvo

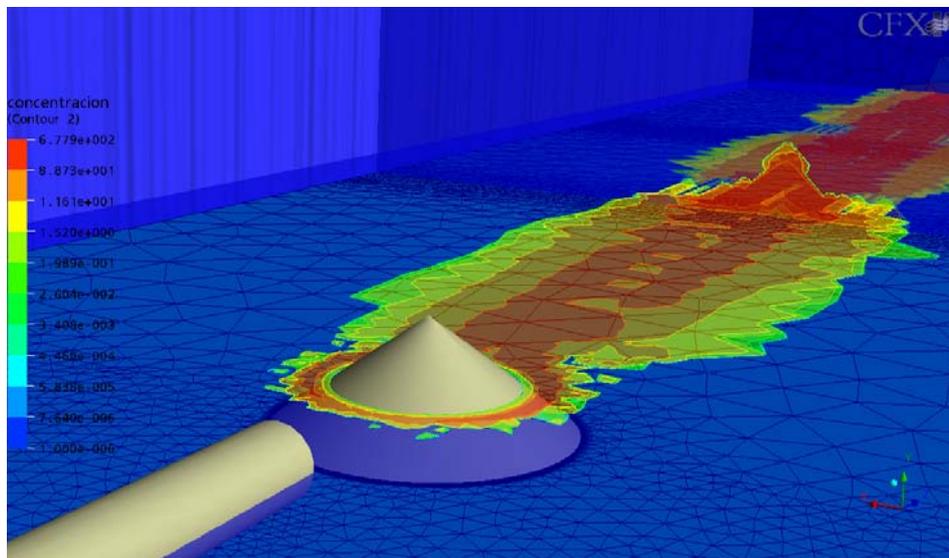


Figura 187: Valores de concentración de la nube de polvo

En la siguiente secuencia de figuras hemos realizado varios planos de concentración a distintas alturas (la cuadrícula representa 1 m² de superficie y ayuda a hacernos una composición de las extensión que ocupa esta nube de polvo). Debemos fijarnos en las zonas en las cuales tenemos un mayado fino, es decir, en las zonas de medida de los captadores, 6 y 12 metros.

A 5 cm del suelo, figura 188, se observa como la nube se ensancha a medida que se aleja de la pila cónica. Lo mismo ocurre en la figura 189 con altura del plano a 25 cm del suelo.

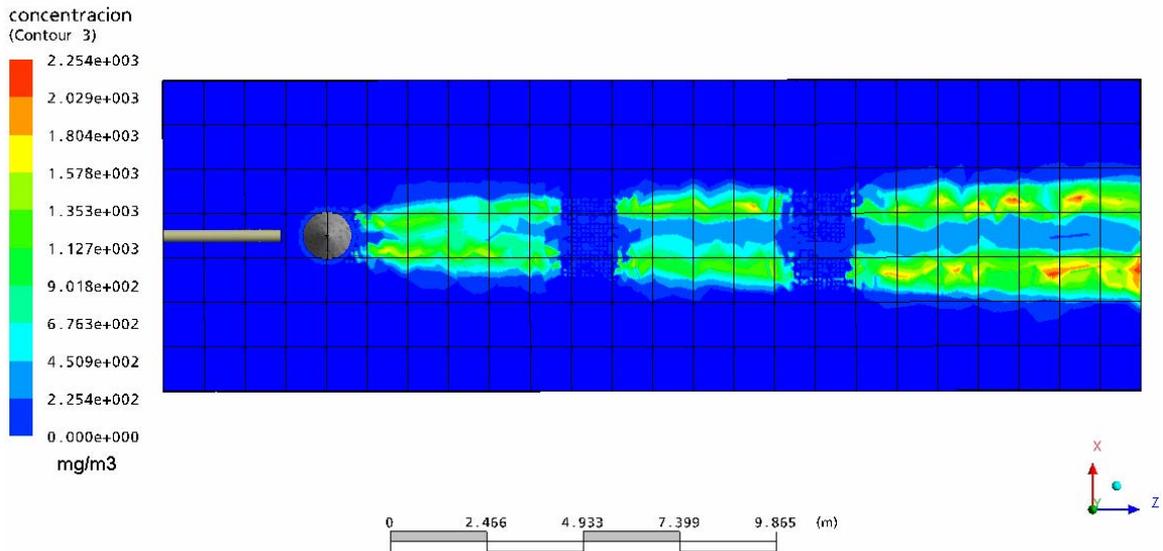


Figura 188: Concentración a 5 cm del suelo

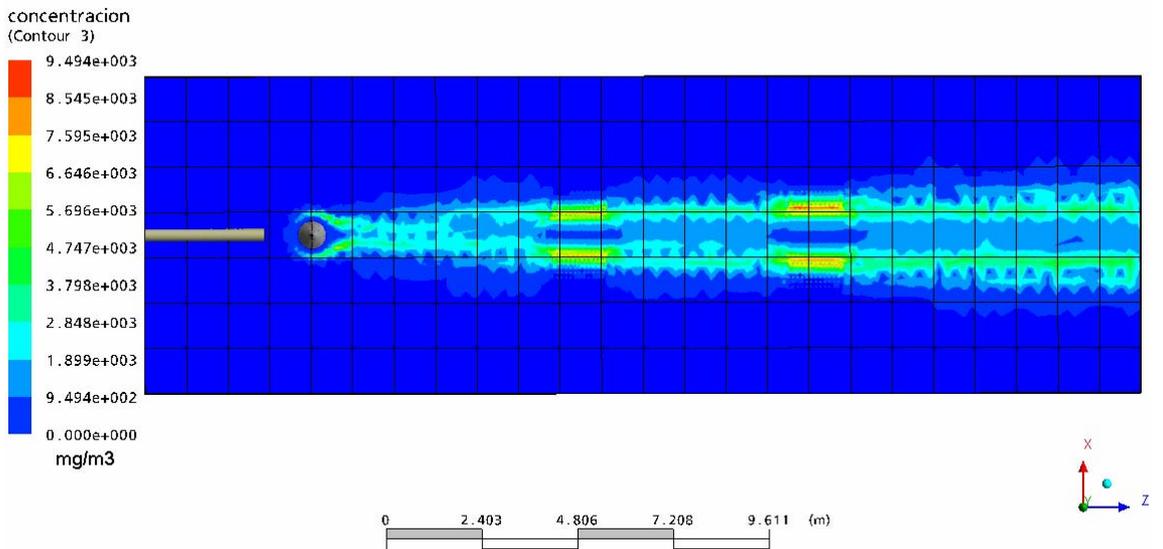


Figura 189: Concentración a 25 cm del suelo

A 50 cm del suelo vemos cómo la nube ya es más estrecha en las zonas de malla fina (zona de medida), figura 190.

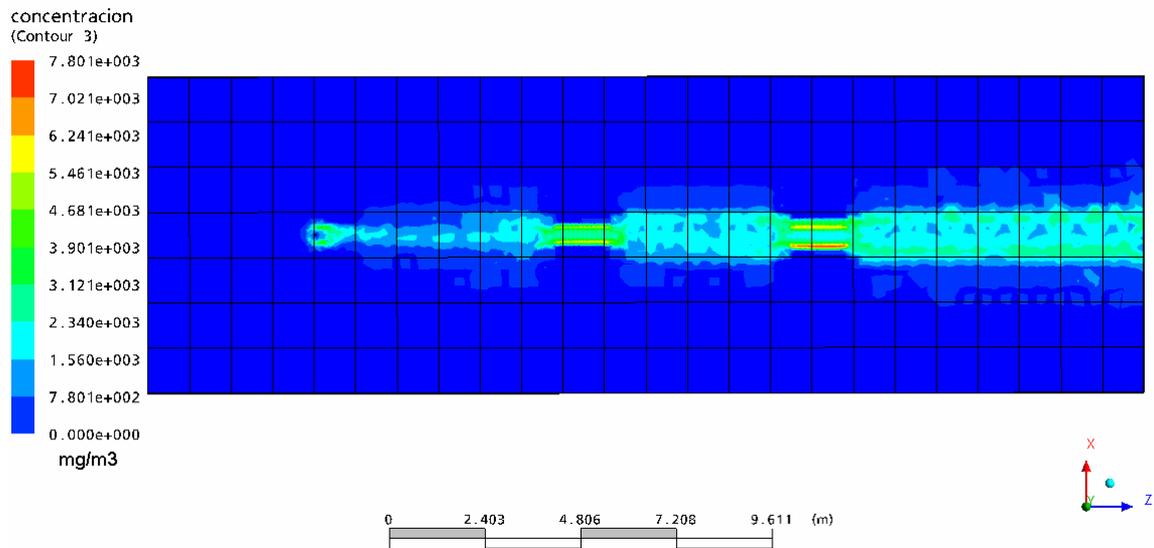


Figura 190: Concentración a 50 cm del suelo

En la figura 191 se muestra la nube de polvo a razón de los elementos de mallado.

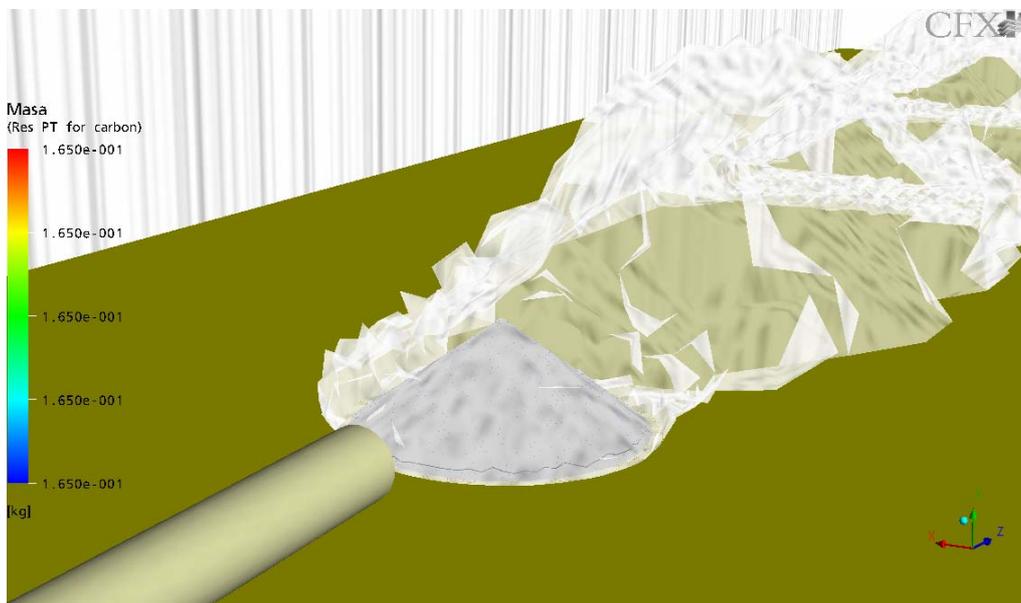


Figura 191: Nube de polvo

Si comparamos la trayectoria de las partículas de carbón con la del flujo, vemos la similitud lógica que hay entre ambas, puesto que las partículas son arrastradas por el viento. En la figura 192, distinguimos entre líneas de flujo y trayectorias de partículas.

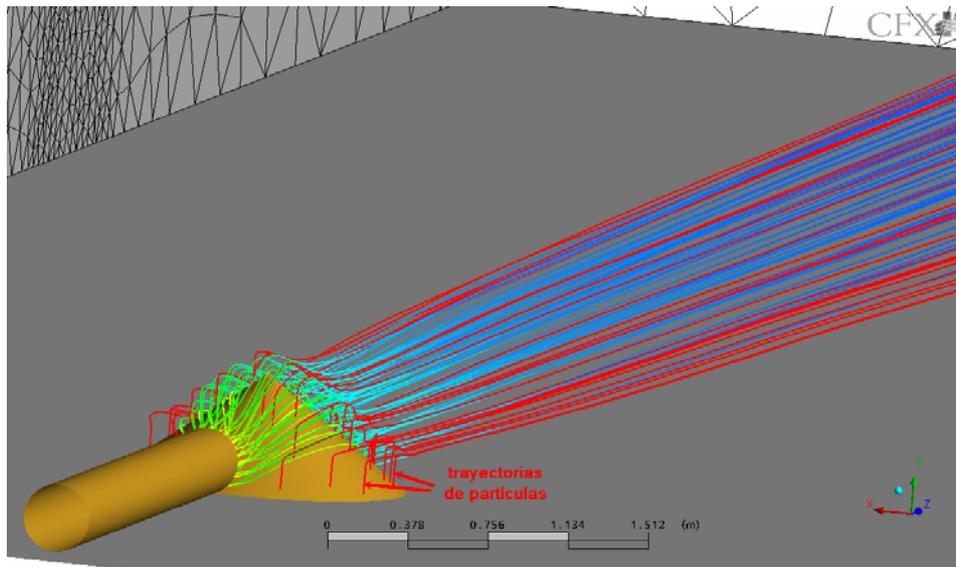


Figura 192: Líneas de flujo y trayectoria de partículas

Aunque no están todas, las trayectorias de las partículas de polvo que se recogen en la figura anterior (líneas rojas), siguen el mismo recorrido que las líneas de flujo (coloreadas en función de la magnitud velocidad). Para alcanzar este fenómeno en la simulación hemos tenido que elevar la velocidad de inyección de las partículas a 5000 m/s porque de lo contrario las partículas depositarían muy rápidamente y apenas se verían afectadas por la corriente de flujo. Hemos realizado simulaciones con velocidades de emisión uno, dos y hasta tres órdenes de magnitud inferior a la considerada en esta simulación, pero todas proporcionaban una nube de polvo que no se veía arrastrada por el viento. Considerar velocidades de inyección de partículas superiores a 5000 m/s supone “lanzar” las partículas al exterior de forma irreal, así que se ha descartado esta opción.

Como se había comentado, el resultado experimental de concentración para partículas de 10 micras es de 94.02 mg/m^3 , el captador se sitúa a una distancia de 6 m de la pila cónica y tiene una altura de 75.5 cm. En la simulación, colocamos un punto a la distancia y altura determinada y obtenemos el valor de 96.94 mg/m^3 . En la figura 193 se recoge la disposición del captador.

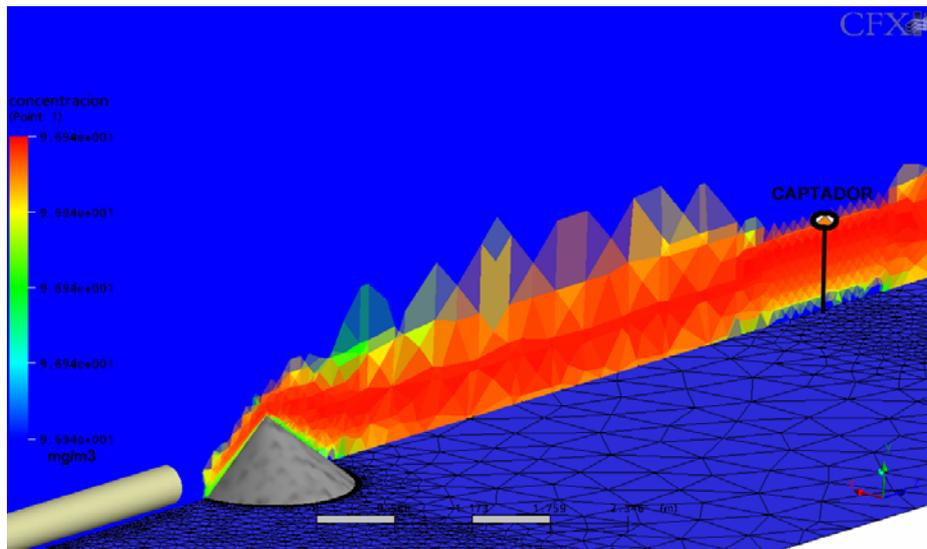


Figura 193: Disposición del captador

Además de todos las figuras anteriores, caracterizadas por distintos planos en el modelo, para conocer con mas precisión como varía la concentración total (mg/m^3) en altura (m) a 6 m de la pila cónica, realizamos una gráfica concentración-altura, figura 194.



Figura 194: Concentración a distintas alturas respecto el suelo

La concentración total oscila en un rango de valores que abarca hasta los 3 g/m^3 para una nube cuya altura oscila ente los 10 y los 80 cm aproximadamente. El captador desde el cual se tomaban las medidas se situó

(en altura) justo en el límite de la nube de polvo, de ahí que los resultados de concentración fueran tan bajos.

Desde 72 cm hasta 76 cm, el valor de la concentración en la simulación varía hasta un orden de magnitud. Será necesario ajustar esta altura y estandarizarla para futuras simulaciones.

Estos resultados de concentración son muy elevados, frente a los 100-200 mg/m³ que resultaba la medida experimental de concentración, en la simulación se obtienen resultados del orden de $9 \cdot 10^6$ mg/m³.

Se intenta de varias formas reducir en el CFX esta diferencia de magnitudes (igualando a 0.5 los coeficientes de restitución para el suelo y la pila cónica, inyectando el polvo con una velocidad vertical significativa) pero todas las pruebas han dado resultados muy parecidos de concentración (del orden de 10^6).

El error cometido radica en que los datos de concentración que aporta el CFX son mg*s/m³, datos que debemos dividir por los 600 segundos que dura la toma de medidas de los captadores y así poder comparar resultados.

Bajo las mismas condiciones hemos repetido el experimento dos veces y para la segunda medida se han obtenido resultados de concentración de partículas PM-10 de 123.3 mg/m³.

4.-APLICABILIDAD A UN PARQUE DE MINERALES OPERATIVO

4.1.-INTRODUCCIÓN

El método expuesto parece prometedor, pero es sin ninguna duda exigente tanto en tiempo de cálculo como en requerimientos de hardware. Para probar la aplicabilidad de esta metodología se aplicará al caso de un parque de almacenamiento con el que el Grupo de Investigación está colaborando activamente, el Puerto de Koper en Eslovenia. Las dos fotografías de la figura 195 muestran su localización.



Figura 195: Localización del Puerto de Koper, Eslovenia

En las figuras 196 y 197 se muestran fotografías satélite y esquemas del Puerto de Koper. La Terminal de graneles sólidos se sitúa en el muelle III, compuesta por dos descargadoras de cuchara que alimentan a un sistema de cintas transportadoras que descargan a trippers de apilado.

En las figuras 198 y 199 se muestran imágenes de la terminal con las fases operacionales de apilamiento.

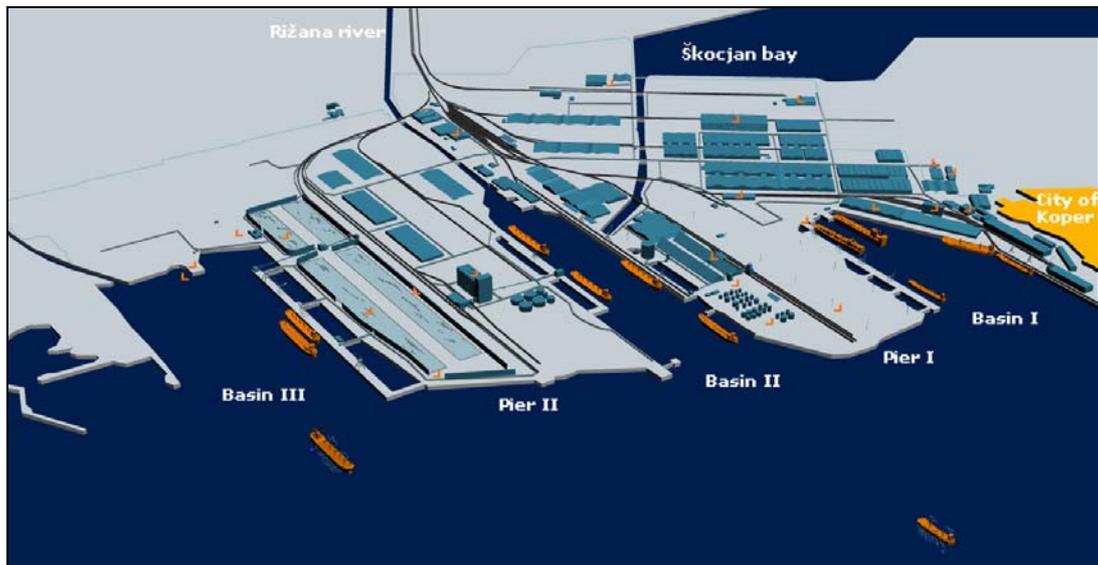


Figura 196: Esquema del Puerto de Koper



Figura 197: Foto satélite de la terminal



Figura 198: Terminal de graneles sólidos de Koper



Figura 199: Terminal de graneles sólidos de Koper

4.2.-SIMULACIÓN

4.2.1.-GEOMETRÍA Y MALLADO

Dibujamos ahora una geometría compuesta por dos parvas truncadas de 632 m de longitud cada una y un volumen rectangular que las envuelve cuyas dimensiones se recogen en la figura 200.

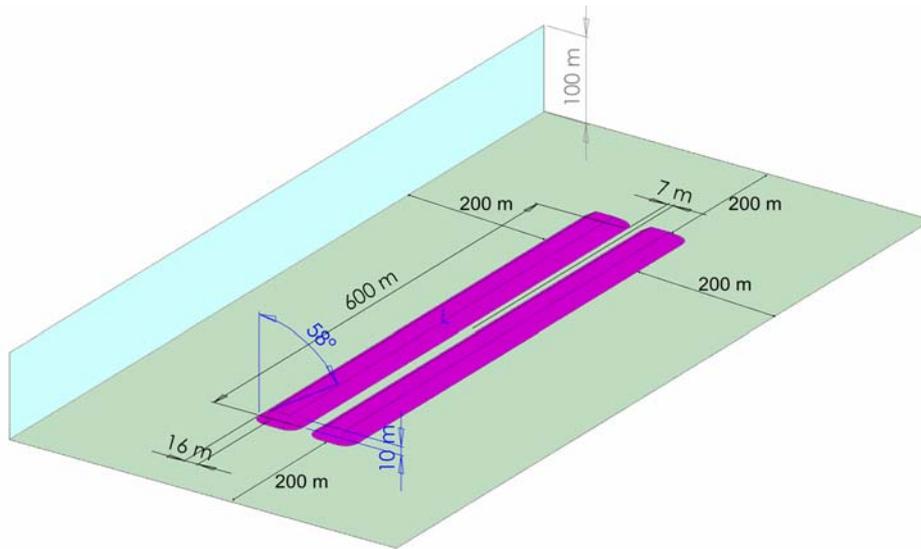


Figura 200: Modelo Solidworks de las pilas principales

Las parvas, como se aprecia en la figura 200, tienen una altura de 10 m. El resto de cotas correspondientes a dicho obstáculo se recogen en la figura 201, donde se muestra la vista en planta de una de las parvas (ambas parvas tienen las mismas dimensiones).

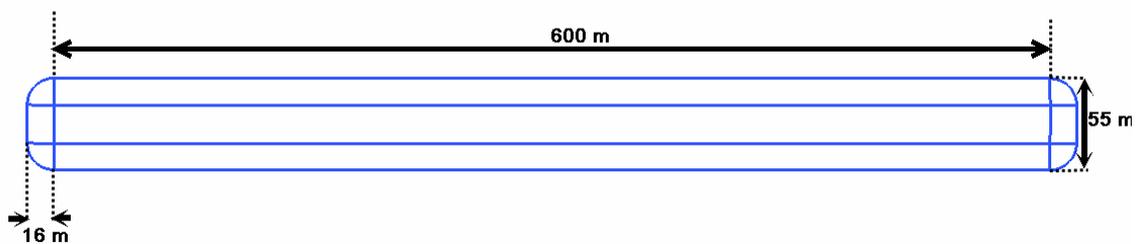


Figura 201: Modelo Solidworks de una de las pilas

La superficie total de cada parva es de 38254.54 m². Una vez definida la geometría se procede al mallado. Se realiza un mallado ajustando los

parámetros en la misma proporción que se utilizaron para el caso de la parva riñón. En esta simulación, se prescinde del factor “density box”, y el crecimiento de los elementos (tetraedros) varía de 1 m hasta 16 m, ajustando las curvas por el parámetro Natural Size.

Para el caso de mallado con prismas, se aplica un crecimiento exponencial desde el suelo y parvas de 2 metros totales de altitud con un tamaño inicial de prisma de 0.02 m y 20 capas totales.

El modelo tiene un total de 775423 elementos, de los cuales 479283 son tetraedros y el resto prismas. En la figura 202 se muestra un corte transversal de la malla así como la calidad del mallado en función de los colores patrón que definen dicha calidad (verde= buena, amarillo= media y rojo= mala).

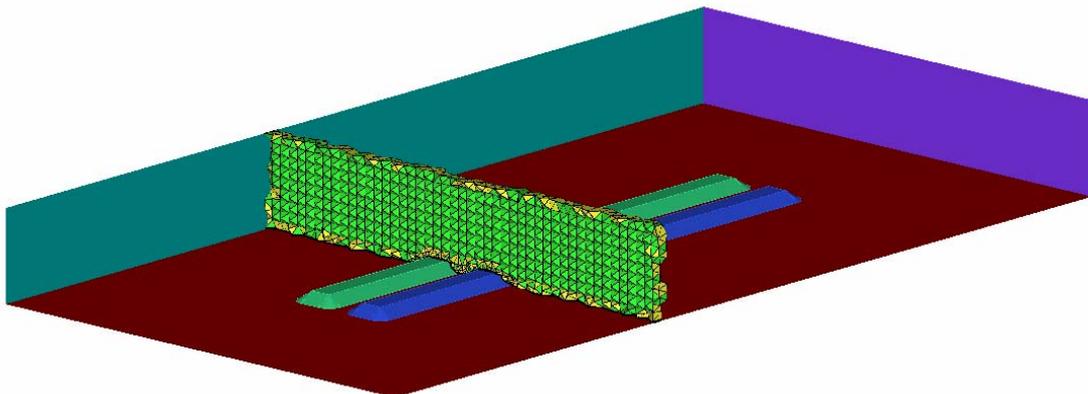


Figura 202: Plano representativo del mallado

En la figura 203 se visualiza una ampliación de la zona más cercana a una de las parvas donde se aprecia el crecimiento de prismas.

De la misma manera que para el resto de los estudios, se realizó una geometría de dos parvas paralelas a partir de SolidWorks, simulando los apilamientos en este parque, como se muestra en la figura 204.

4.2.2.-CFX PRE

En este apartado definiremos el dominio del modelo y cada una de las partes que lo componen. Como hay más de una fase presente (aire y partículas) con

viento a 25° , se utiliza el modelo Lagrangiano para caracterizar el movimiento de las partículas considerando unidireccional el acoplamiento entre las fases.

Cuando definimos el dominio, se tiene en cuenta la aceleración de la gravedad en sentido vertical y se descarta transferencia de calor.

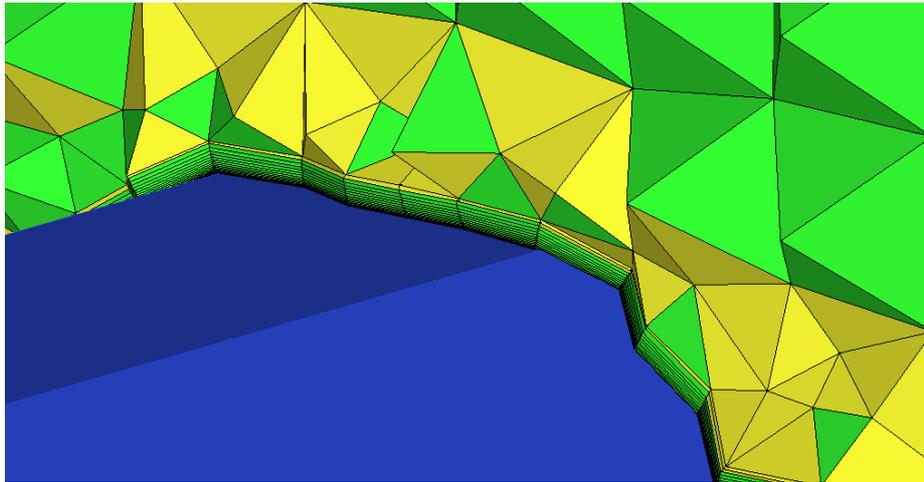


Figura 203: Detalle del mallado de prismas sobre la parva

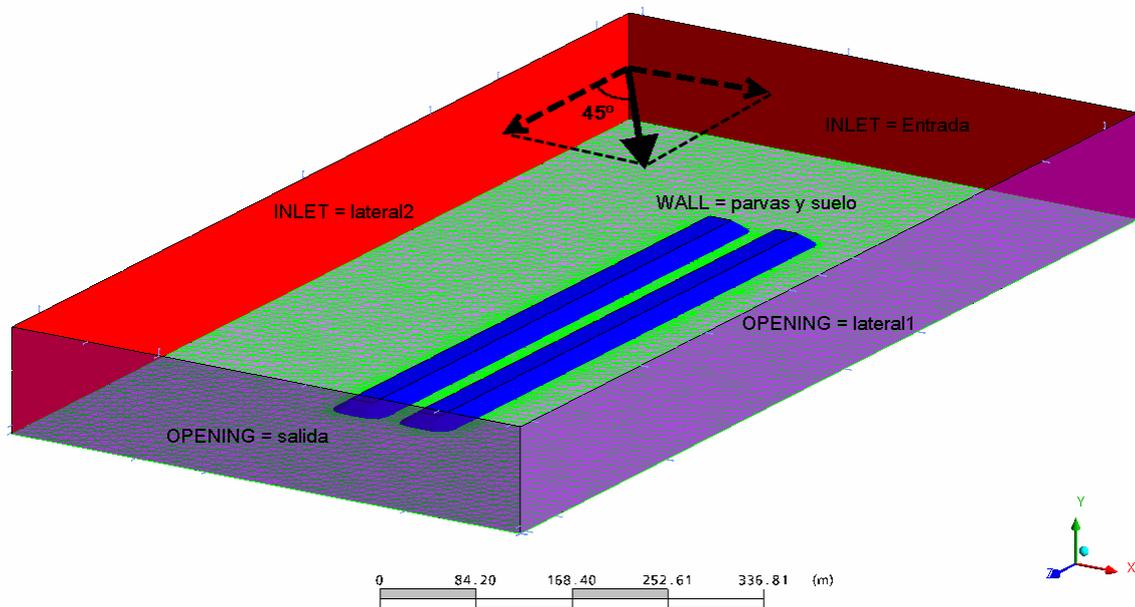


Figura 204: Definición del dominio

Puesto que la dirección del viento forma 45° tanto con la vertical como con la horizontal, caracterizamos dos superficies como entrada de viento y la velocidad vendrá definida por las componentes vertical y horizontal de la

misma. La velocidad es una función logarítmica cuya condición inicial es que, para una altura de 10 metros, la velocidad sea igual a 15 m/s. Dicha función viene dada por la ecuación (1) de la EPA:

$$V = \frac{u}{0.4} \ln \frac{y}{y_0} \quad (1)$$

La flecha de color negro de la figura 196, indica la dirección del viento. Uno de los laterales, la parte superior y la salida, se les asigna la condición de contorno "Opening" puesto que se trata de regiones abiertas del dominio donde la presión se considera estática. Para el suelo y la parva se supone una rugosidad de 0.5 cm, considerando para los mismos unos coeficientes de restitución (perpendicular y paralelo) igual a cero, puesto que suponemos las partículas perfectamente inelásticas.

Asimismo, se considera una inyección automática y perpendicular de partículas sobre las parvas, cuyo parámetro de emisión será función de la velocidad del viento a 22.73 cm de la parva con un tamaño de las mismas de 30 micras de diámetro. Sólo se considera la componente vertical de la velocidad de emisión de partículas y esta es igual a 0.1 m/s.

4.2.3.-CFX SOLVER Y POST

Antes de inyectar partículas se realizó una primera simulación sólo con viento caracterizado por una función logarítmica cuya condición inicial es que para 10 m de altura, la velocidad adquiere un valor de 15 m/s.

A partir de los resultados obtenidos con el viento, se estudió la influencia de su velocidad sobre distintas partes del dominio, tal y como muestran las figuras siguientes.

Para las figuras 205, 206, 207, 208, 209 y 210, se muestra la variación de la velocidad a distintas alturas para un plano paralelo al suelo, comprobando el efecto que generan las dos parvas como obstáculos frente al viento. La flecha de color negro, indica la dirección del viento (que es la misma para todas las figuras).

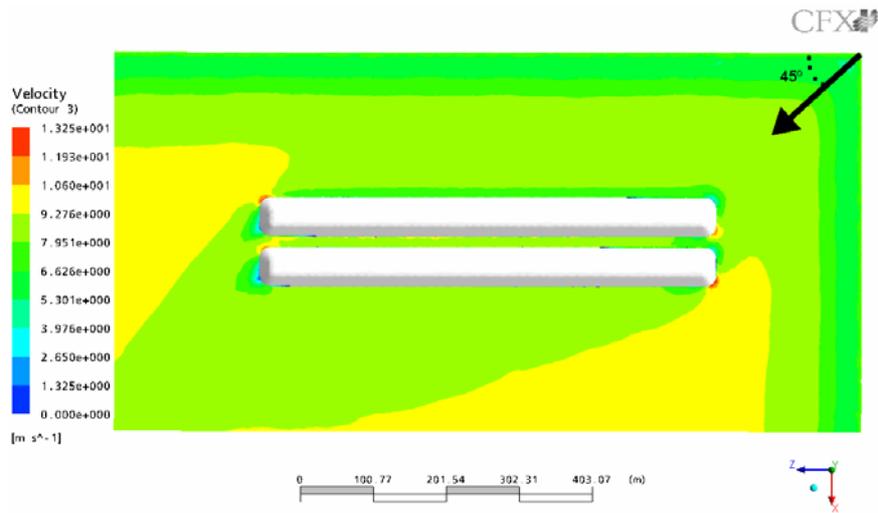


Figura 205: Plano a 0.1 m de altura

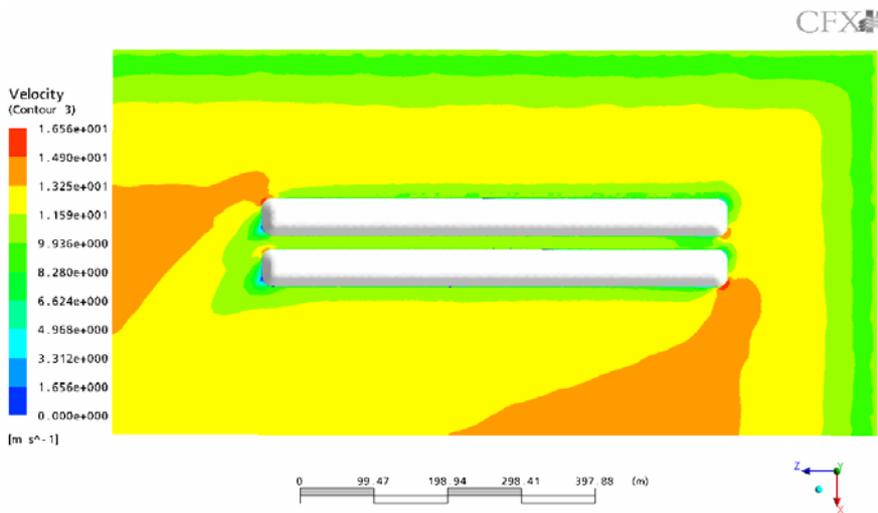


Figura 206: Plano a 1 m de altura

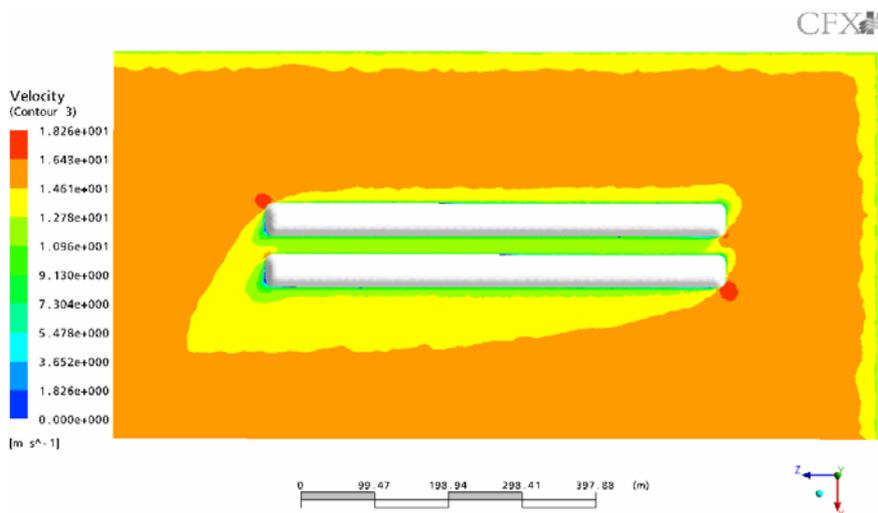


Figura 207: Plano a 3 m de altura

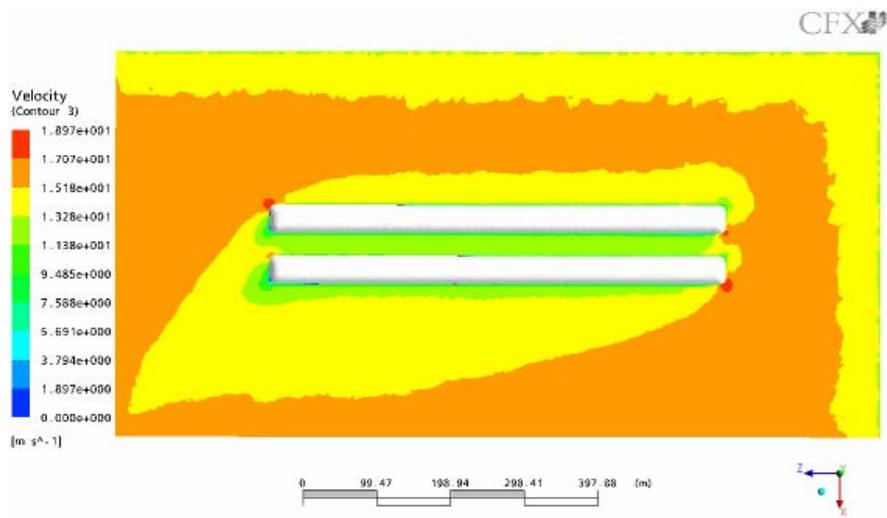


Figura 208: Plano a 5 m de altura

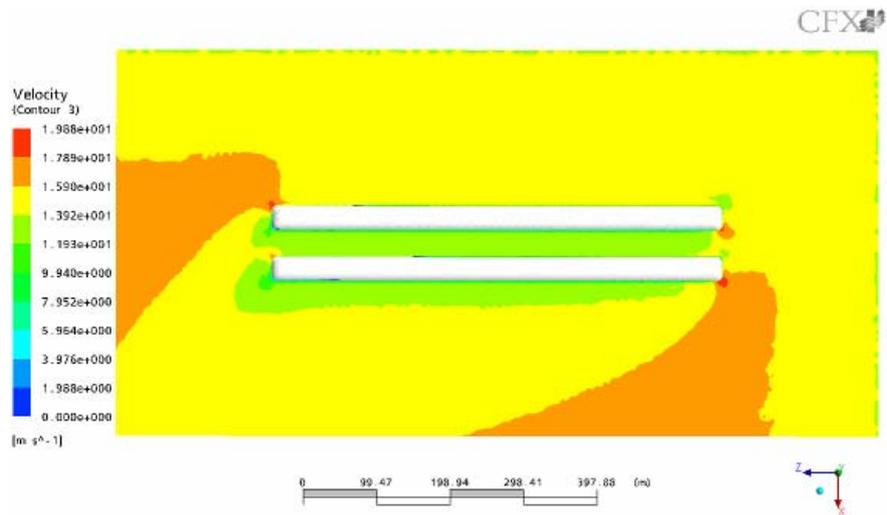


Figura 209: Plano a 7 m de altura

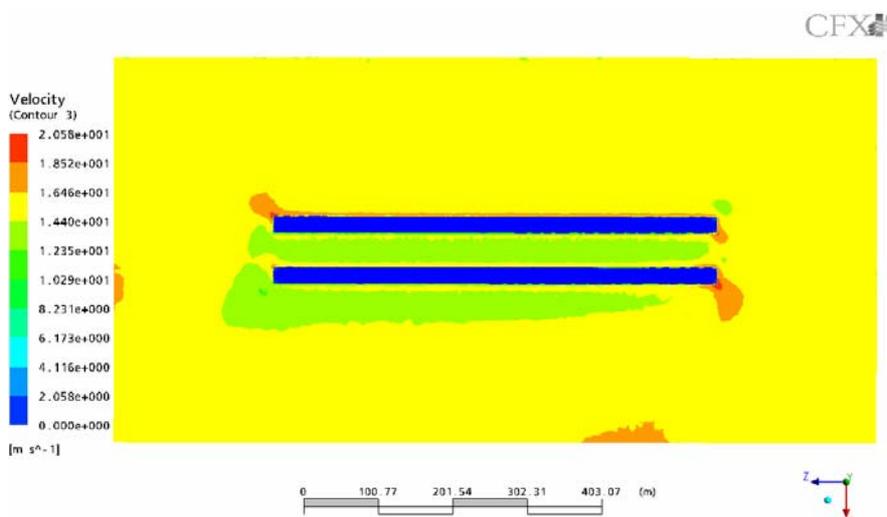


Figura 210: Plano a 10 m de altura

A medida que los planos de las figuras anteriores, ganaban en altitud, el efecto de la primera parva sobre la segunda, se volvía mas acusado, es decir, la primera da lugar a una zona de sombra sobre la segunda y por lo tanto la velocidad sobre la última disminuirá, lo que dará lugar a una menor emisión de partículas.

En la figura 211, se muestra un plano transversal a las parvas en el centro del dominio de la simulación, mostrando los valores del modulo de la velocidad. La flecha de color negro, sigue marcando la dirección y el sentido del viento incidente.

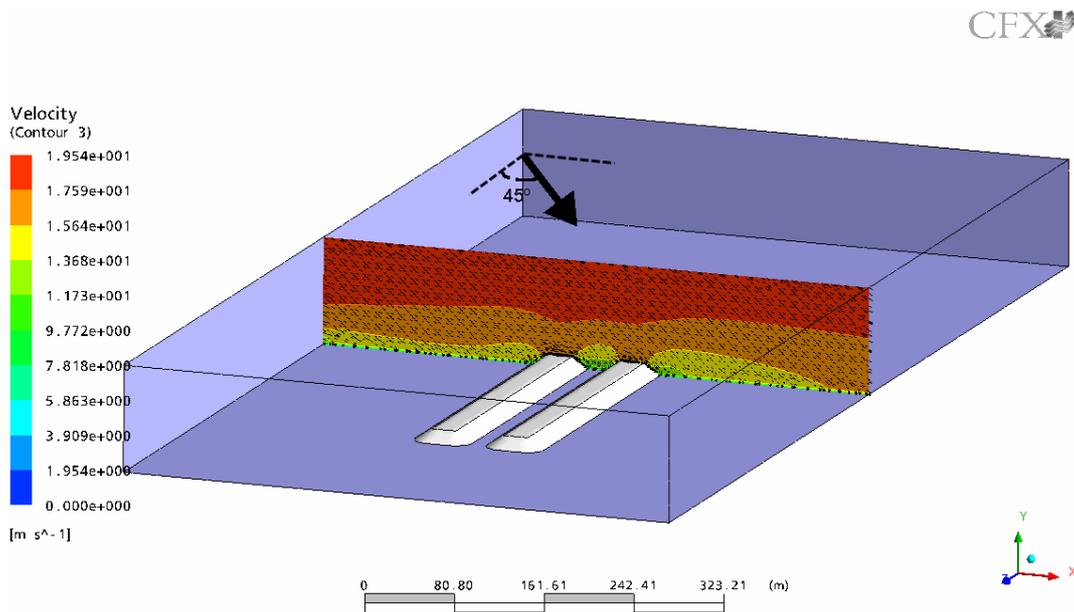


Figura 211: Plano transversal de velocidades

Si ampliamos la figura anterior en la zona más cercana a una de las parvas para observar la dirección y sentido del campo de velocidades, tenemos la figura 212.

En ella se muestran la recirculación de velocidad sobre el ángulo de talud de la primera parva. Lo que hace pensar la influencia que este fenómeno podría tener sobre las trayectorias de las partículas de polvo.

Por último, para terminar de caracterizar el viento, definimos en el POST, una nueva variable que se caracteriza por el cociente entre la velocidad y el valor de ésta a 10 m de altura (15 m/s).

Al representar dicha variable a 22.73 cm sobre la superficie de las parvas, figura 213, se puede constatar como en la distribución de las velocidades del viento sobre las parvas, en la primera de ellas, dichas velocidades son mayores, con una distribución de los valores elevados repartidos bastante uniformemente sobre la totalidad de la cara ó superficie de incidencia inicial del viento. En los bordes de la 1ª parva también se presentan valores superiores de velocidad.

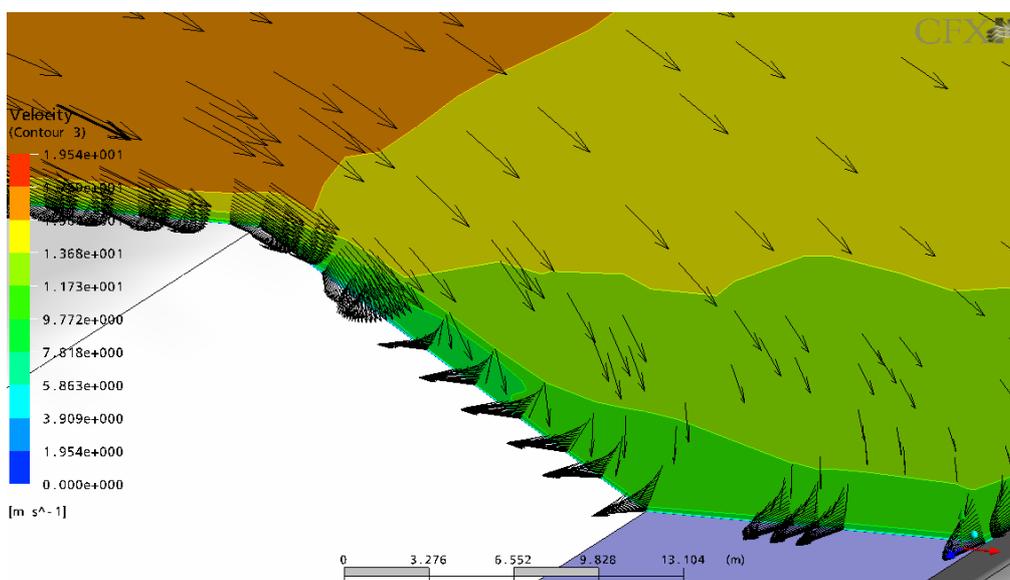


Figura 212: Detalle de la zona de “sombra” de velocidades entre parvas

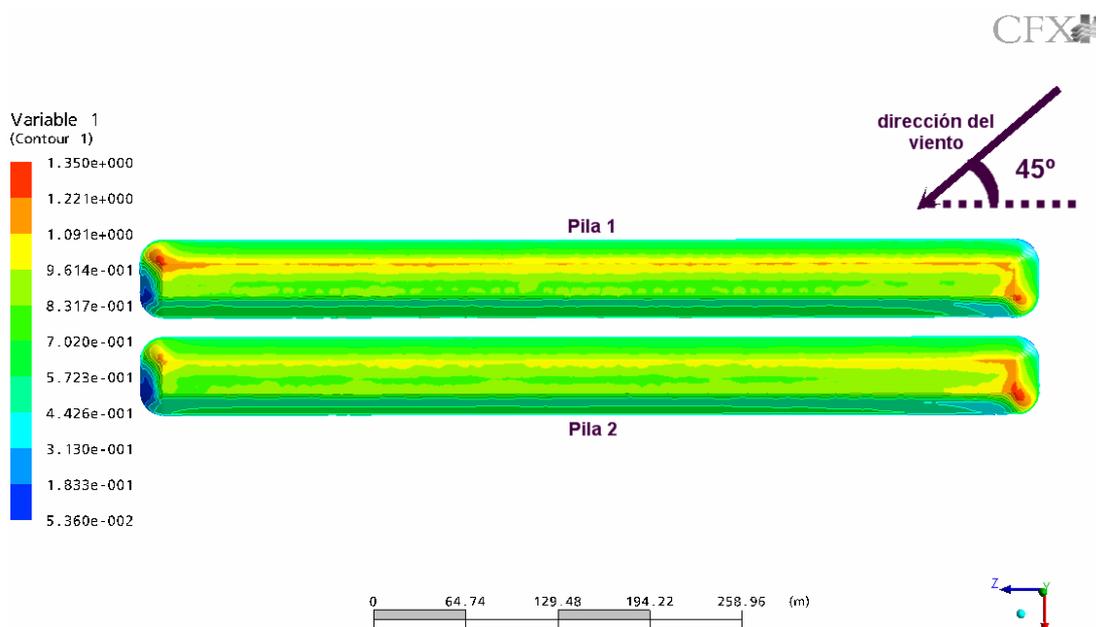


Figura 213: Distribución de las velocidades del viento en su acción sobre dos parvas

Asimismo se observa que sobre la primera pila en la que incide el viento, la velocidad alcanza valores más elevados en la zona superficial de la parva. En la 2ª pila no se registran valores (para Variable 1) superiores a 10 en la parte superior de la misma.

4.2.4.-INTRODUCCIÓN DE POLVO

4.2.4.1.-ANÁLISIS CON COMPORTAMIENTO INELÁSTICO DE LAS PARTÍCULAS

Una vez observado el campo de velocidades sobre todo el dominio, pasamos a inyectar polvo tal y como habíamos expuesto con anterioridad. La convergencia de esa simulación en el Solver tiene una duración de aproximadamente de una hora y 50 minutos alcanzando residuos de 10^{-5} al cabo de 75 iteraciones. En el Post se totaliza la cantidad de polvo inyectado tal y como lo habíamos hecho en capítulos anteriores. La cantidad total de polvo inyectada ha sido de 693576,4 gramos. La figura 214 muestra la evolución del polvo en función de la distancia a la parva.

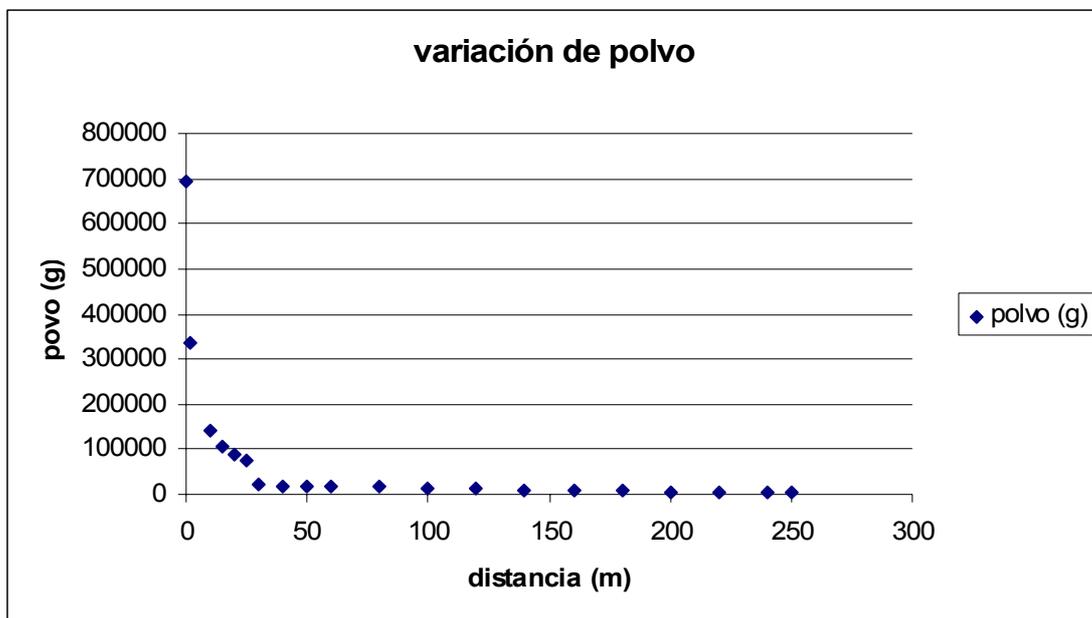


Figura 214: Evolución del polvo según la distancia a la parva

Podemos observar como a los 2 m de la parva, la masa total de polvo se reduce a la mitad. Asimismo y ayudados por las figuras 215 y 216, y en línea con los comentarios realizados anteriormente con el viento, como no podía ser de otra manera, las partículas y en concreto sus trayectorias escapan en los

bordes de las parvas (más acusadamente en la 1ª) en la dirección del viento y una parte importante de las partículas arrastradas de la 1ª parva evolucionan hacia el suelo y quedan retenidas en el espacio entre dicha parva y la 2ª, cosa que no ocurre con las desplazadas en ésta última.

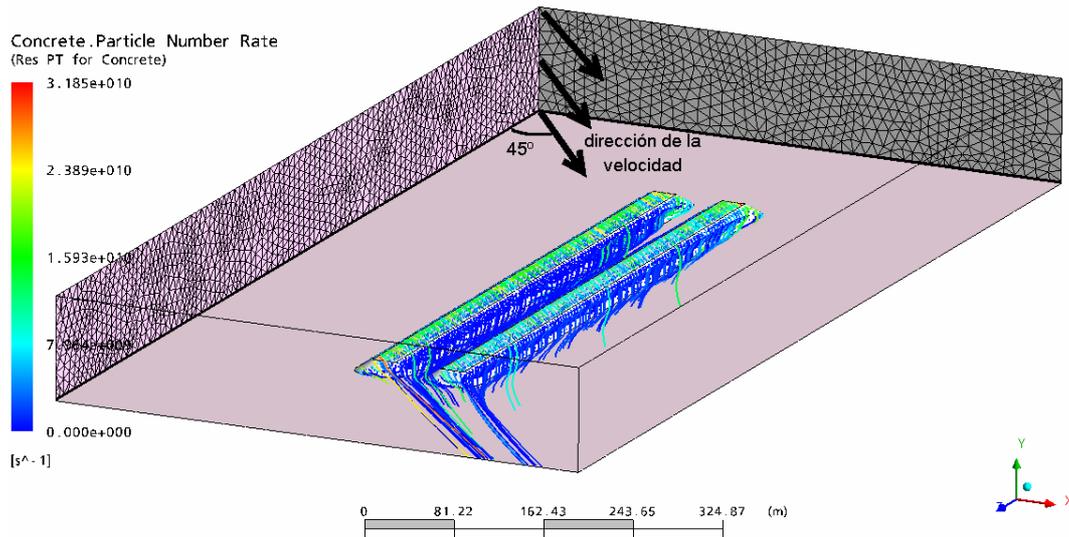


Figura 215: Efecto 3D del viento sobre las partículas

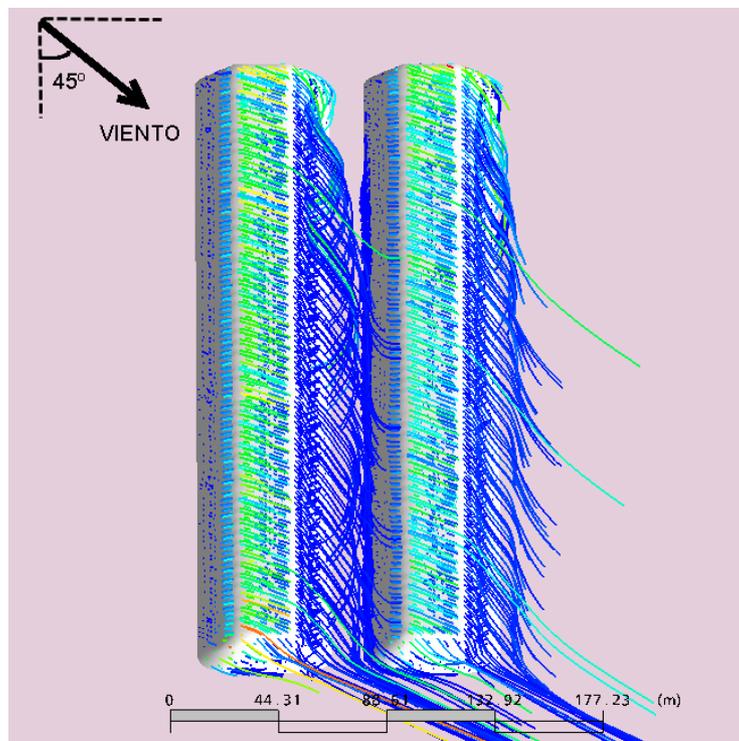


Figura 216: Detalle en planta de la figura anterior

Debido a lo apuntado, los valores de concentración a lo largo el dominio son pequeños. En este caso los coeficientes de restitución para las parvas y el suelo son, como se había expuesto con anterioridad, iguales a cero puesto que suponemos partículas de polvo perfectamente inelásticas.

4.2.4.2.-ANÁLISIS CON COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE LAS PARTÍCULAS

Con el fin de que las partículas inyectadas no se queden en la parva, asignamos, posteriormente, coeficientes de restitución iguales a la unidad en las paredes de las parvas. En éste caso se trata de mantener las mismas condiciones que para la simulación anterior pero igualando a la unidad los coeficientes de restitución (paralelo y perpendicular) en el caso de las parvas, visualizamos los resultados obtenidos en el caso de las trayectorias de las partículas de polvo. La cantidad de polvo total inyectada sobre las superficies de las mismas se corresponde con la obtenida en el modelo anterior, sin embargo, veamos la variación de polvo a lo largo del dominio (figura 217).

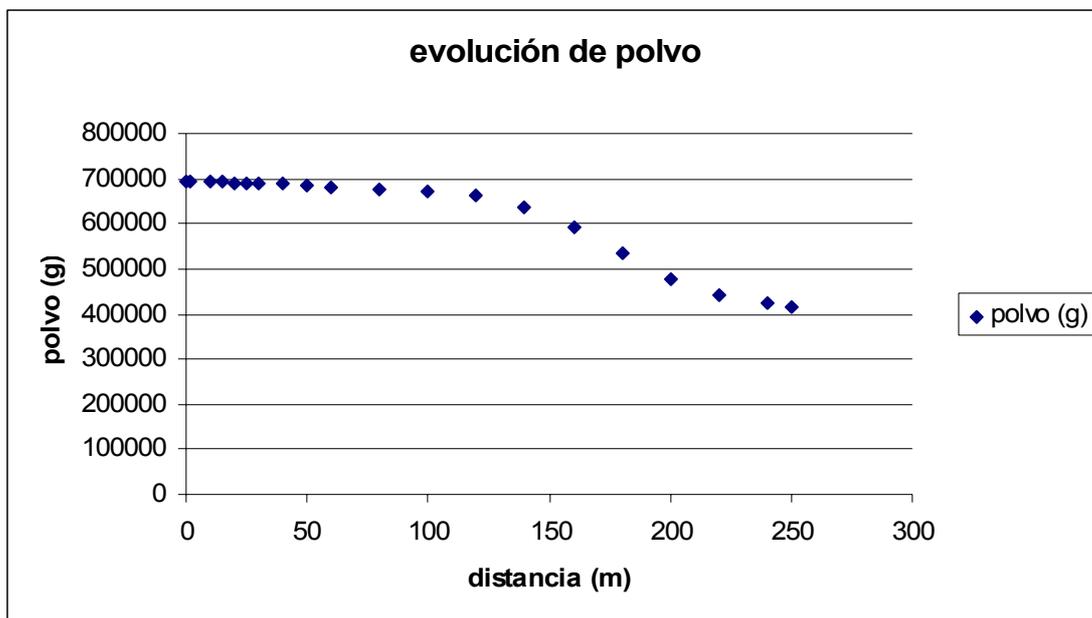


Figura 217: Evolución del polvo según la distancia a la parva

La diferencia entre ambas gráficas es notable ya que mientras que en el primer caso la mayoría de polvo inyectado se quedaba en las parvas con los matices apuntados, en este caso, la curva no sufre una caída brusca de material y, al cabo de 250 m de recorrido, más de la mitad del polvo total emitido es polvo en

inmisión. Para apreciar cualitativamente la caracterización de los resultados obtenidos en la gráfica anterior, representamos las trayectorias de las partículas en el Post (figuras 218 y 219).

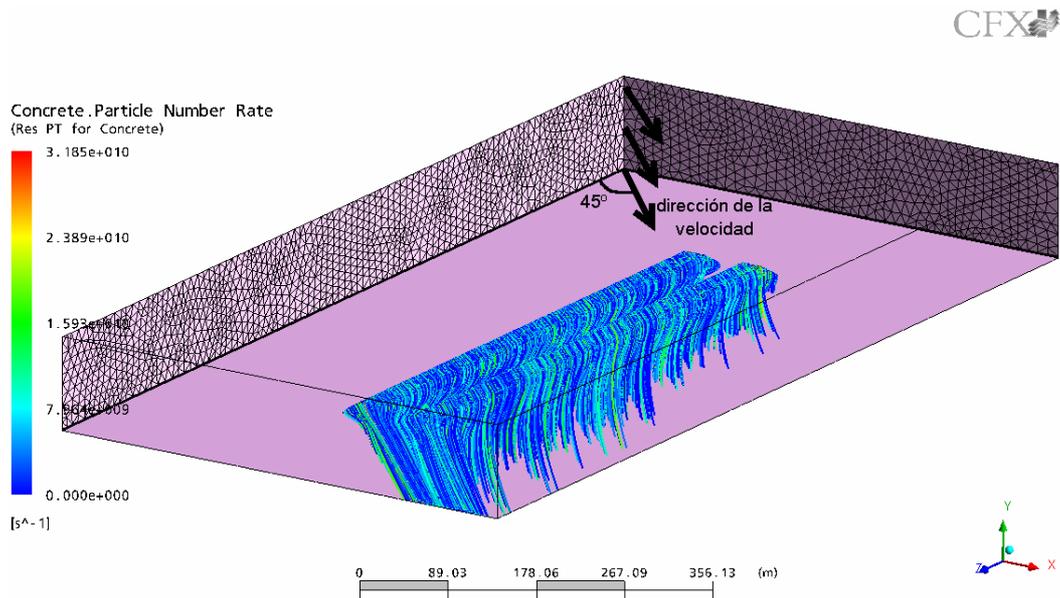


Figura 218: Efecto 3D del viento sobre las partículas

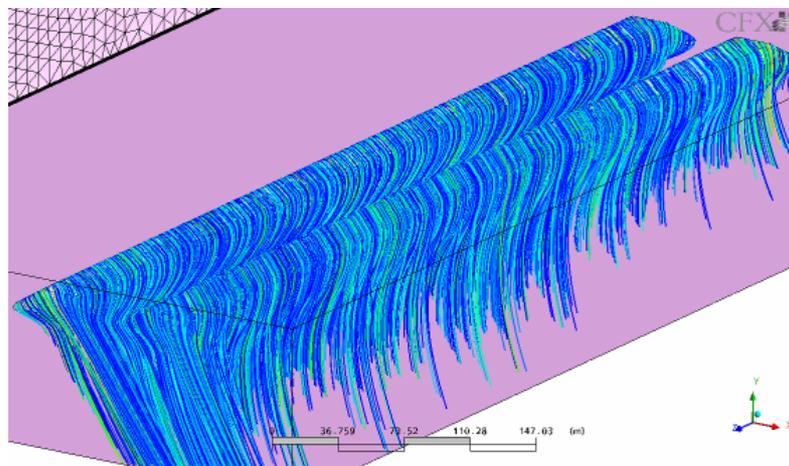


Figura 219: Detalle en planta de la figura anterior

4.2.5.-CÁLCULO DE LA EMISIÓN

Una vez realizada la modelización, lo que nos interesa es conocer cual es la emisión de estos apilamientos. Estas emisiones varían de manera muy clara con valores diferentes de la velocidad fictional límite (Threshold Friction Velocity) o la velocidad del aire a 10 m de altura. Esta comparación se muestra en la tabla 22 y en las figuras 220, 221, 222 y 223.

	Velocidad Friccional Límite		
Viento a 10m	0.5	1	1.5
5	9.22	0	0
10	860.06	21	0
15	2995.3	693.57	35.34
20	6332.77	2545.53	628.86
	Suma de kPA (Kg)		

Tabla 22: Emisiones en parvas de Koper

En el capítulo anterior, donde nos centrábamos en el software propio HIEPA v1.0, podríamos calcular rápidamente los datos de emisión en apilamientos tipo cono y tipo riñón. En versiones siguientes, hemos incluido los datos obtenidos en las simulaciones anteriores para esta geometría, lo que nos permite calcular de forma muy rápida las emisiones en este parque, cuando variamos las condiciones que determinan la emisión, como pueden ser la velocidad y dirección del viento o el tipo de material.

Las figuras siguientes, muestran un adelanto de la nueva versión del HIEPA v1.0 para este tipo de apilamientos, mostrando las zonas donde se producirá emisión y en las que no, para 4 casos diferentes.

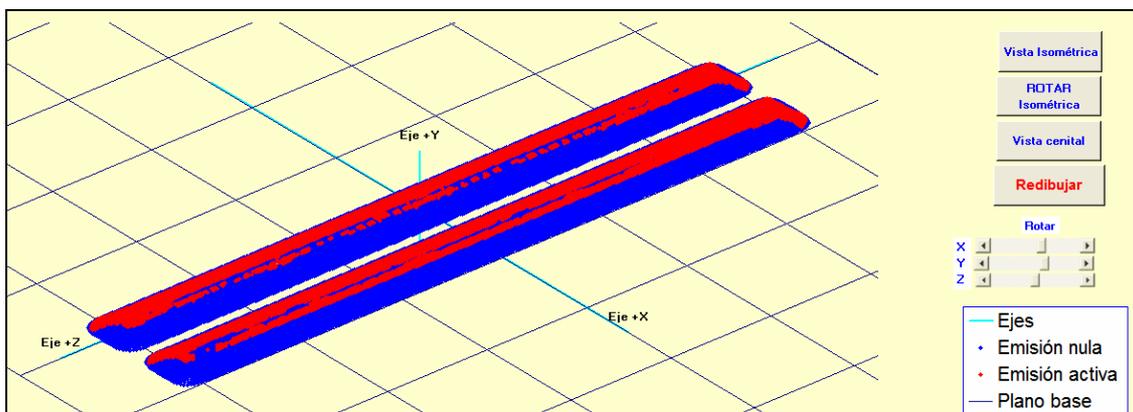


Figura 220: Zonas de emisión para viento=12m/s y Thresold Friction Veloc=1m/s

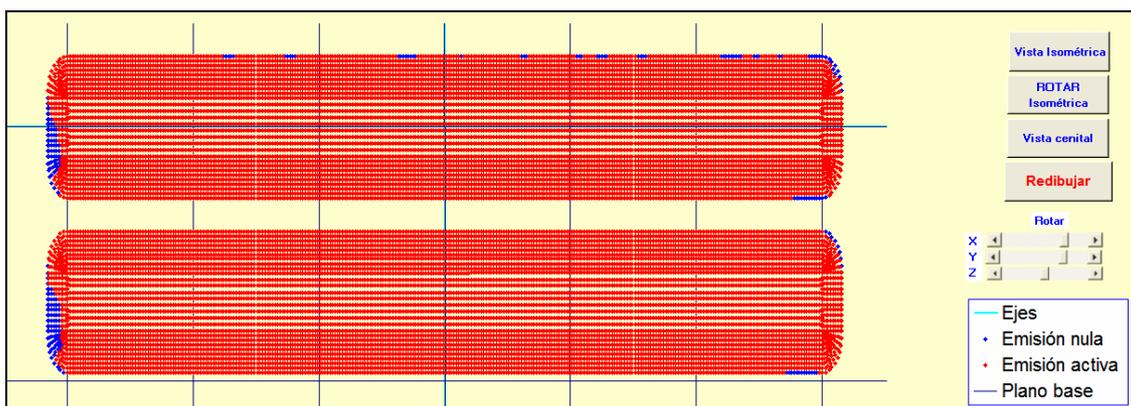


Figura 221: Zonas de emisión para viento=15m/s y Thresold Friction Veloc=0.5m/s

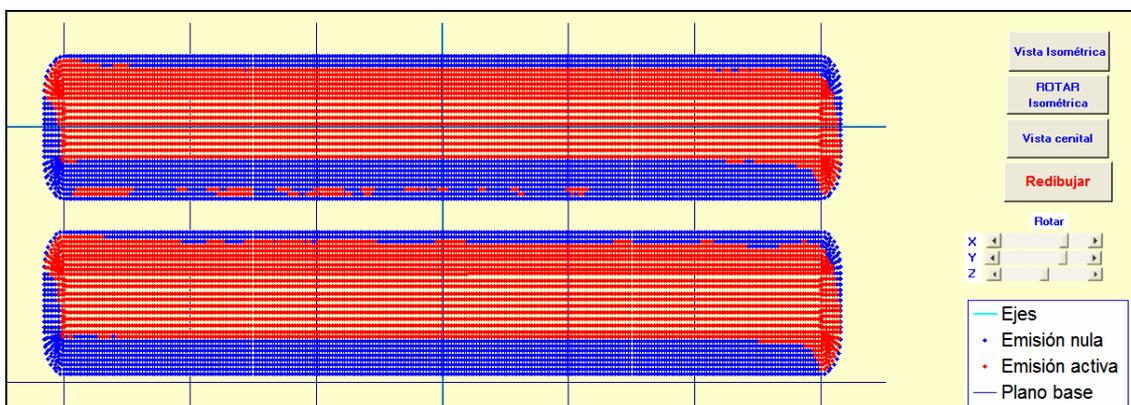


Figura 222: Zonas de emisión para viento=15m/s y Thresold Friction Veloc=1m/s

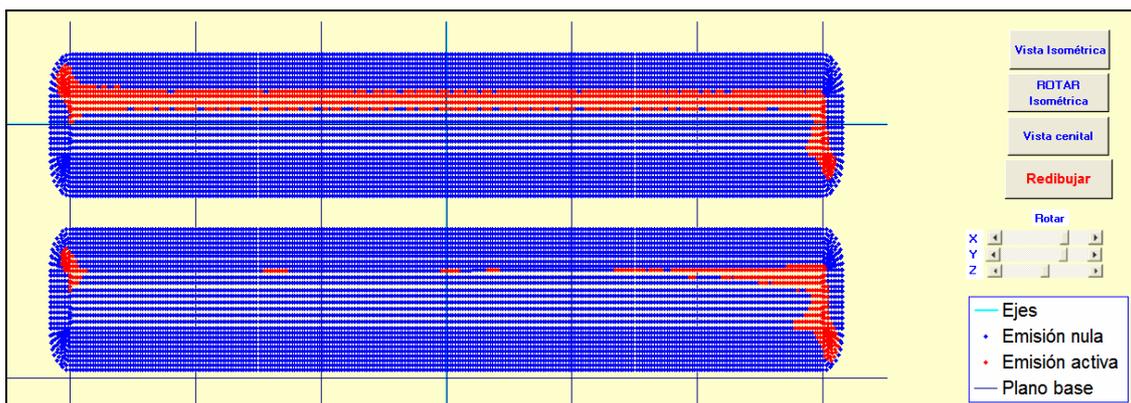


Figura 223: Zonas de emisión para viento=15m/s y Thresold Friction Veloc=1.5m/s

**CAPÍTULO 6: EMISIÓN DE POLVO EN CFD.
PROTECCIÓN MEDIANTE BARRERAS**

1.-INTRODUCCIÓN

En este capítulo estudiamos la emisión de polvo en un apilamiento de minerales a la intemperie enfocando dicho estudio mediante el empleo de una “novedosa herramienta” que calcula la emisión de polvo sin necesidad de implementarlo en el programa. Se llama Método Post, y se explicará ampliamente a lo largo del capítulo. Además incluiremos la acción mitigadora de las barreras frente a la emisión de polvo y por tanto la importancia de las mismas desde el punto de vista de la minimización del impacto ambiental.

Este estudio lo podemos dividir en dos partes claramente diferenciadas. En la primera, se modeliza el flujo de viento alrededor de los obstáculos cónicos, a partir de ensayos a escala, donde se midieron distintos puntos de velocidad del viento para escenarios con y sin barreras.

En la segunda parte se extrapolan estos ensayos a simulaciones sobre casos reales para una parva tipo cono de 11 m de altura, determinándose la cantidad de polvo que emitirá la superficie de dicha parva en función de la velocidad del aire afectado por las barreras.

Las distintas simulaciones están validadas por CFD a partir del modelo de turbulencia K-épsilon que como veremos es el que mejor se ajusta a los datos de campo, y aparece implementado en el software Ansys CFX, 2004 [39], determinando el flujo en las inmediaciones de la parva. Para llegar a esta elección, se tubo que realizar un nuevo estudio de los modelos de turbulencia, ya que al incorporar una barrera el flujo de viento se ve fuertemente interrumpido y modificado, lo que da lugar a una serie de vórtices que precisan ser estudiados en detalle. Para ello se realizan una serie de simulaciones con distintos modelos de turbulencia, Zero Equation, Spalart Allmaras, K-épsilon y el SST, comparando los datos reales de campo con los obtenidos en las distintas simulaciones efectuadas.

La mayor emisión de polvo sobre los apilamientos a la intemperie es debida a la erosión producida por la acción del viento, fundamentalmente a las “rachas” del mismo, sobre la superficie de dichos apilamientos, que son las que dan lugar a la saltación de las partículas.

Hay varias formas de minimizar esta erosión: cubriendo la totalidad del apilamiento (figuras 224, 225 y 226), empleando riegos mediante agua y agentes químicos que crean costras superficiales (figura 227) y disponiendo barreras naturales o pantallas artificiales (figura 228).

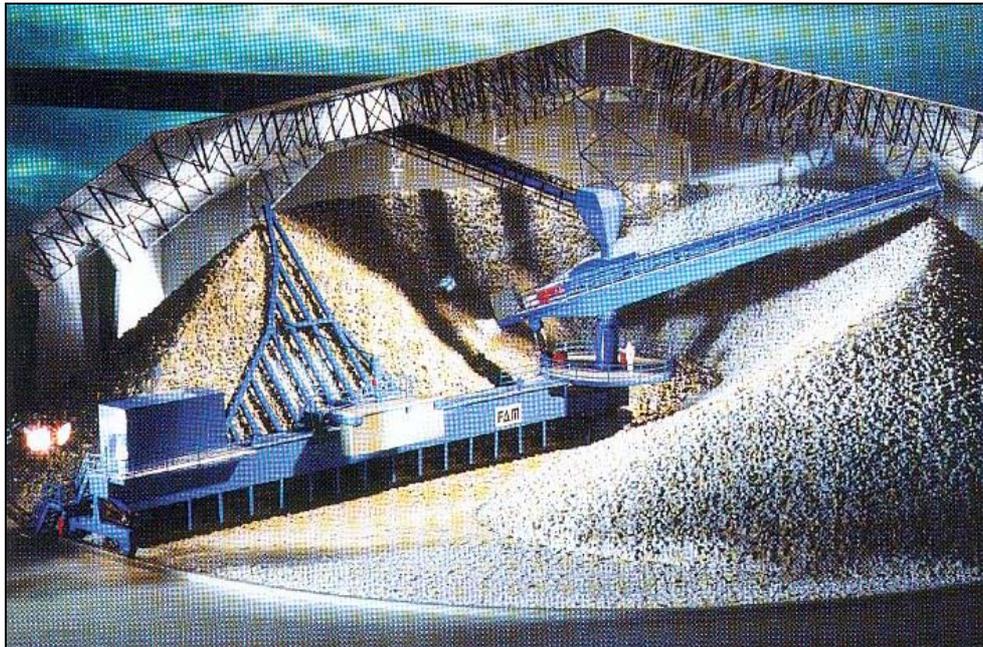


Figura 224: Apilamiento cubierto de mineral (apiladora de brazo, recogedora de rastrillo)



Figura 225: Idem a la anterior con recogedora de brazo de cangilones

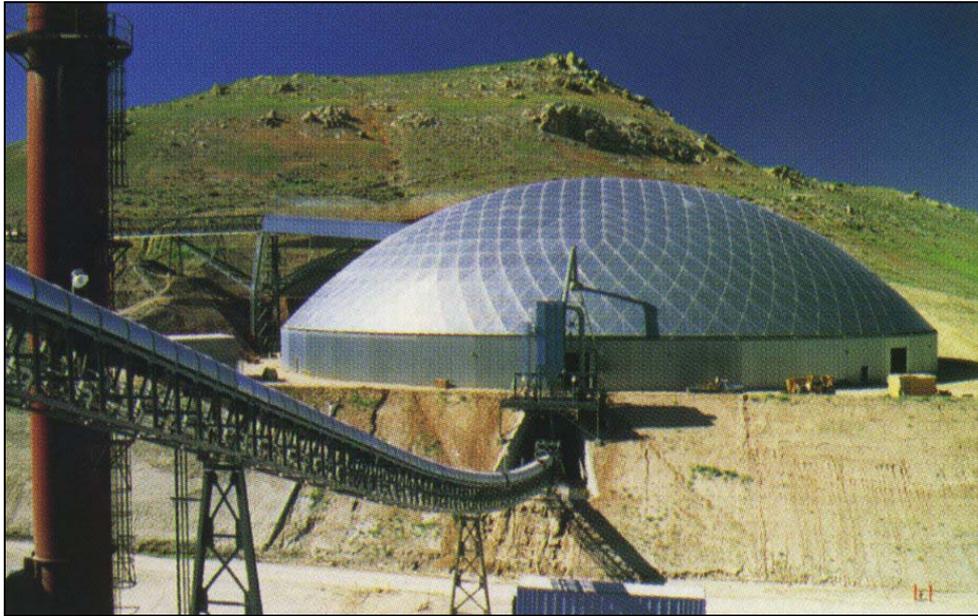


Figura 226: Almacenamiento de minerales en estructuras tipo “domo”

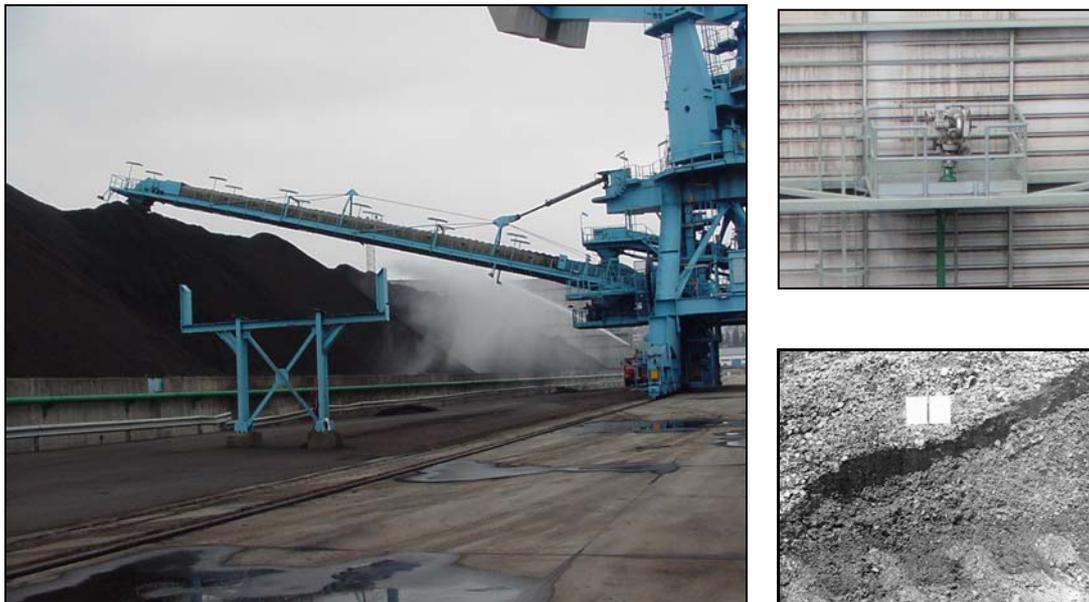


Figura 227: Minimización del polvo por creación de “costra” mediante riego por aspersión

Para nuestro estudio hemos elegido la solución de las barreras artificiales por ser una de las técnicas mas utilizadas en la industria. Y para ello hemos realizado 25 simulaciones.

La primera simulación se efectuó sin barrera para la comparación del ratio de emisión y conocer posteriormente el efecto de las mismas. Las otras 24 simulaciones han correspondido a 6 barreras con 4 alturas (0.5H, 0.7H, 1.0H,

1.2H) para 6 distancias (0H, 0.5H, 2H, 3H, 4H, 8H) siendo H = 11 m la altura del cono ó parva de almacenamiento al apilamiento.



Figura 228: Pantallas artificiales en apilamiento portuario a la intemperie

Se estudian barreras sólidas con su porosidad nula, para en estudios posteriores tener en cuenta la porosidad (Lee et al. 2002 [74]; Lee and Kim 1999 [75]), minimizando el efecto del vórtice de alta velocidad que se produce por detrás de las barreras, dando lugar a una mayor emisión del polvo a barlovento de la parva.

2.-REALIZACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS

2.1.-INTRODUCCIÓN

La tercera campaña de medidas también se llevó a cabo en las instalaciones de la mina Carbonar S.A. Se realizaron una serie de ensayos destinados a caracterizar viento sobre una parva cónica y una barrera interceptando el paso del soplo del aire del ventilador y las medidas de concentración.

Para la evaluación de la velocidad del aire y del polvo, se realizaron distintas distribuciones de los componentes ensayados, midiendo las variaciones en uno y otro caso. Se trata de comparar resultados midiendo directamente sobre el cono o bien colocando una barrera sólida que intercepte el paso del viento.

Una vez que representamos en 3D las distintas geometrías ensayadas, se intentan simular lo más fielmente posible a partir del software Ansys CFX 10.0, para acabar comparando los resultados y validando así nuestra simulación.

Se realizaron 4 ensayos de viento, divisibles en dos grupos bien diferenciados a partir de la malla y la geometría. Pero iguales en los componentes, ya que se trata de un cono metálico, una barrera con una porosidad del 0% y un ventilador canalizado por una manga de tres metros de longitud. El primero de ellos se caracteriza porque la altura de la barrera coincide con la altura del cono y con el eje de la manga. El segundo grupo, se diferencia del anterior en que tanto el cono como la manga están elevados con respecto a la barrera.

2.2.-INSTRUMENTACIÓN

En esta Campaña de Medidas los equipos y elementos empleados constan de un cono metálico, una barrera y un ventilador de 12 kW unido a un tubo de 30 cm de diámetro y 3 m de longitud (figura 229), por donde sale el aire impulsado a una velocidad media de 12.9 m/s, suficiente para poner en suspensión las partículas de carbón ultrafino que previamente espolvoreamos por la superficie del cono (figura 230). En la figura 231 se muestra la estación meteorológica empleada del tipo Met One, E-Sampler EX034-593 y en la figura 232 el proceso de mediciones con anemómetros de hilo caliente TSI, VPlus 8386.

Se realizaron 76 medidas de viento para escenarios con y sin barrera, que posteriormente sirvieron para el calado de las simulaciones CFD.

Todos los modelos fueron realizados con la misma geometría y la misma malla tetraédrica, de más de un millón de elementos, caracterizada dicha malla por ser mas fina en la zona de la barrera y la superficie del cono alcanzando una calidad de 0.39.



Figura 229: Cono, barrera y ventilador



Figura 230: Colocación del material particulado



Figura 231: Estación meteorológica



Figura 232: Medidas con anemómetro de hilo caliente

2.3.-MEDIDAS DE VELOCIDAD

Las medidas de velocidad, se realizaron para cuatro escenarios diferentes, siendo las distintas distribuciones de los elementos, los que determinan este número, es decir, tendremos dos grupos con distinta altura del cono y a su vez dos subgrupos determinados por la colocación o no de la barrera.

Destacar que las medidas de velocidad se comparan para distribuciones con y sin barrera, que nos determinarán las zonas de mayor o menor velocidad, para poder determinar posteriormente, si se produce menos polvo fugitivo en el caso de la colocación de una barrera antes del cono, figura 233.

Estas medidas, se realizan a partir de una malla de muestreo de puntos a lo largo de toda la zona de estudio, (zona del cono, de la barrera y aguas debajo del cono), que varían un poco de un escenario a otro. Se representarán posteriormente para cada uno de los casos.

Antes de comenzar con las medidas individuales para cada uno de los ensayos, se realizó la caracterización del viento a la salida del tubo de ventilación, y los datos son los que se obtuvieron en la figura 234 y la tabla 23.



Figura 233: Medida de velocidad por detrás de la barrera

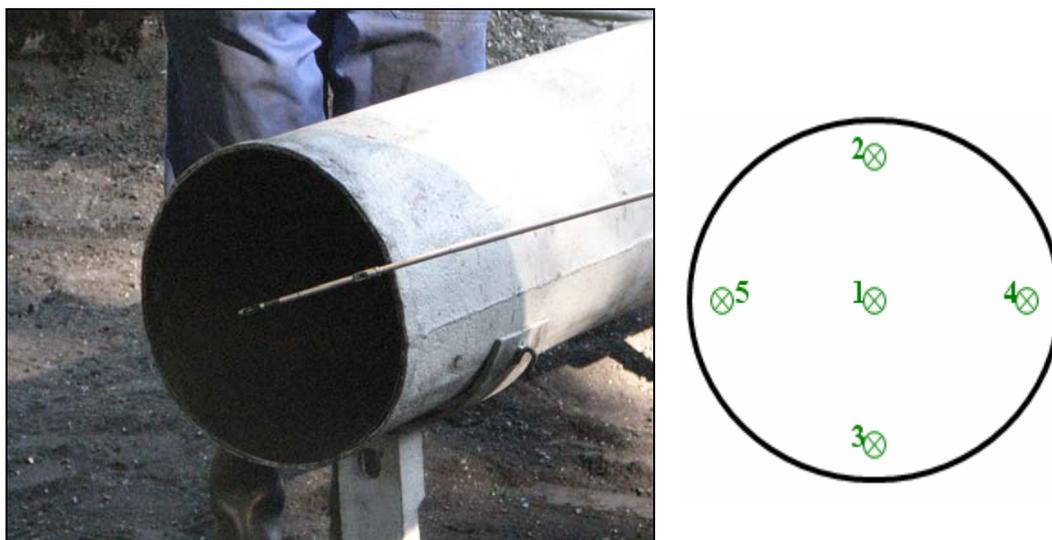


Figura 234: Medida de velocidad a la salida del tubo

SALIDA DE LA MANGUERA				
UBICACIÓN				
1	2	3	4	5
12.2 m/s	10.8 m/s	15.7 m/s	12.3 m/s	13.5 m/s

Tabla 23: Medida de velocidad a la salida del tubo

3.-MODELIZACIÓN

3.1.-INTRODUCCIÓN

Las distintas distribuciones de los ensayos nos obligan a hacer 4 simulaciones diferentes, ya que dependen de la distribución de los elementos así como de la colocación o no de la barrera. Dentro de estas 4 simulaciones, se destacan dos grupos (A y B), los cuales se diferencian por la altura del cono y de la manga, por lo que se necesita realizar una malla diferente para cada uno. Pero su creación, en las distintas fases de modelización, desde su definición geométrica a su resolución, se realiza de la misma manera. Además, la malla en las cercanías del cono y en su superficie, tiene unos elementos de mallado con el mismo tamaño, por lo tanto, podemos determinar, que las mallas son iguales, y por lo tanto que tendremos independencia de la malla. Estos grupos, A y B, a su vez se subdividen en A₁, A₂, B₁ y B₂. Uno de estos modelos, el A₂,

responde al croquis de la figura 235, en el que tanto la altura de la barrera como del cono así como la del eje de la manga es la misma, y sería de 0.52 m.



Figura 235: Distribución para el modelo A₂

El modelo B₂, se caracteriza porque tanto el cono como la manga y el ventilador se encuentran elevados con respecto a la barrera, alcanzando el cono una altura de 0.7m, figura 236.



Figura 236: Distribución para el modelo B₂

Los otros dos modelos, el A₁ y el B₁, son los mismos que los anteriores pero sin la barrera. Lo que nos permite comparar el efecto de la velocidad sobre el cono, en uno y otro caso. Podemos verlo en las fotografías de la figura 237 a) y b).



Figura 237: Distribución para el modelo A₁ y B₁

3.2.-DEFINICIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

Los modelos se realizan en el SolidWorks, a partir de una serie de croquis y operaciones de extrusión, que nos dan como resultado los diferentes modelos.

En primer lugar se intenta reconstruir el croquis del grupo A (figura 238) en el SolidWorks, a partir de una manga de 3 m de longitud y 0.32 m de diámetro, así como de un cono de 0.52 m de altura por 0.69 m de radio. Separados entre sí una distancia de 50 cm.

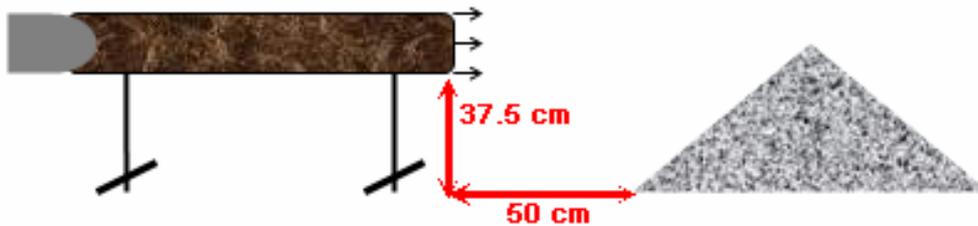


Figura 238: Distribución para el modelo A₁

En el programa se intenta simular lo más fielmente posible la realidad, pero asumiendo una serie de asunciones que no varían en nada el resultado final, podemos verlo en la figura 239, donde representamos el croquis anterior.

Para el modelo B, el croquis es similar, pero tanto la altura del cono como de la manga es mayor con relación a la barrera. El cono pasa a ser de 0.7 m de altura y con un radio de 0.928 m, y el eje del ventilador se encuentra a 0.61 m.

La separación entre ambas estructuras en este caso, es de 0.43 m, donde se colocará la barrera en su punto medio, figura 240.

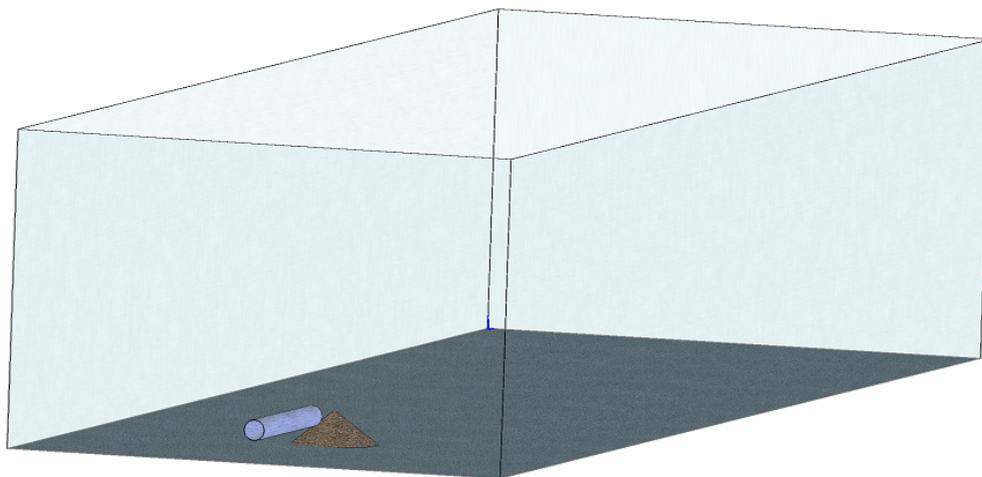


Figura 239: Modelo A₁ creado en SolidWorks



Figura 240: Distribución para el modelo B₁

Como vemos en las figuras, el cono se encuentra elevado del suelo mediante una calza que lo eleva 18 cm. Este hecho podría representarse en el modelo geométrico, pero asumimos que se trata de un cono con más altura y por lo tanto con más radio, para así conservar su ángulo de inclinación. Se muestra en la figura 241.

Tanto en una figura como en la otra, correspondientes a los dos grupos A y B, no aparece la barrera representada, y esto se debe a que la creamos desde el Ansys Icem CFD, donde a demás de dibujar la barrera, crearemos el mayado tetraédrico que rellena todo el volumen de aire.

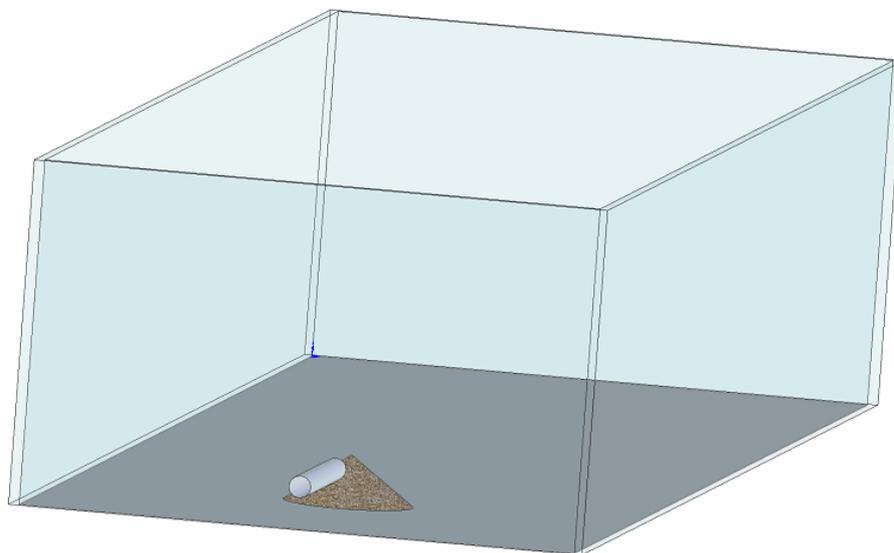


Figura 241: Modelo B₁ en creado en SolidWorks

3.3.-CREACIÓN DE LA MALLA

El programa elegido para realizar el mallado, es el Ansys Icem CFD, el cual genera un mallado tetraédrico en tres dimensiones.

Pero antes de describir el proceso del mallado, crearemos la barrera situándola entre el cono y la manga en el punto medio. Las dimensiones propias de la barrera la podemos ver en la figura 242, respondiendo a unas dimensiones de 0.52x1.78x0.0025 m.

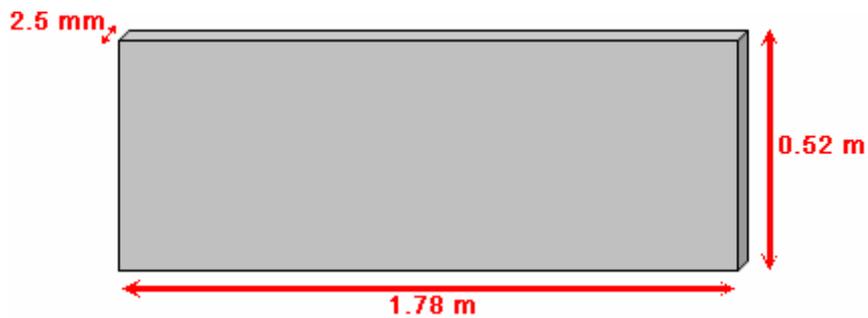


Figura 242: Dimensiones de la barrera del modelo A

El mallado se caracteriza por rellenar todo el espacio del cubo imaginario que delimita todo el espacio del ensayo, siendo mas fino en las paredes del cono, manga y barrera.

En la figura 243, vemos un plano longitudinal del mallado del grupo A, y su intersección con las estructuras, que aparecen en blanco, ya que en su interior no hay mallado. También podemos ver con el mallado se hace mas fino cuanto mas se acerca a las superficies antes mencionadas. En este caso el número total de elementos es de 1017386 y 168822 nodos. La calidad es de 0.40, se trata de un número muy alto, lo que nos indica que la malla es muy buena.

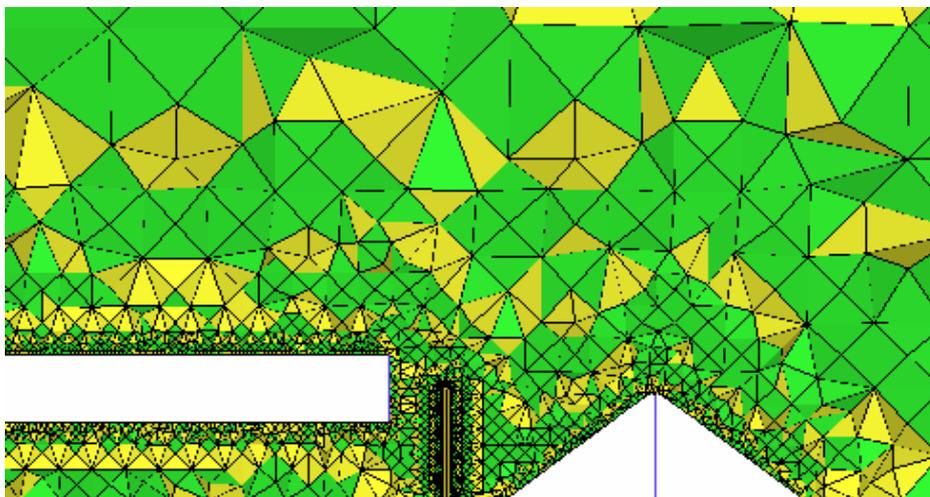


Figura 243: Mallado del modelo A

El mallado del grupo B, también tiene un número muy alto de elementos y de nodos, 1008961 y 166862 respectivamente, y una calidad de 0.39. En la figura 244, vemos la diferencia tan clara entre el mallado de las superficies finas y el del resto del volumen aire.

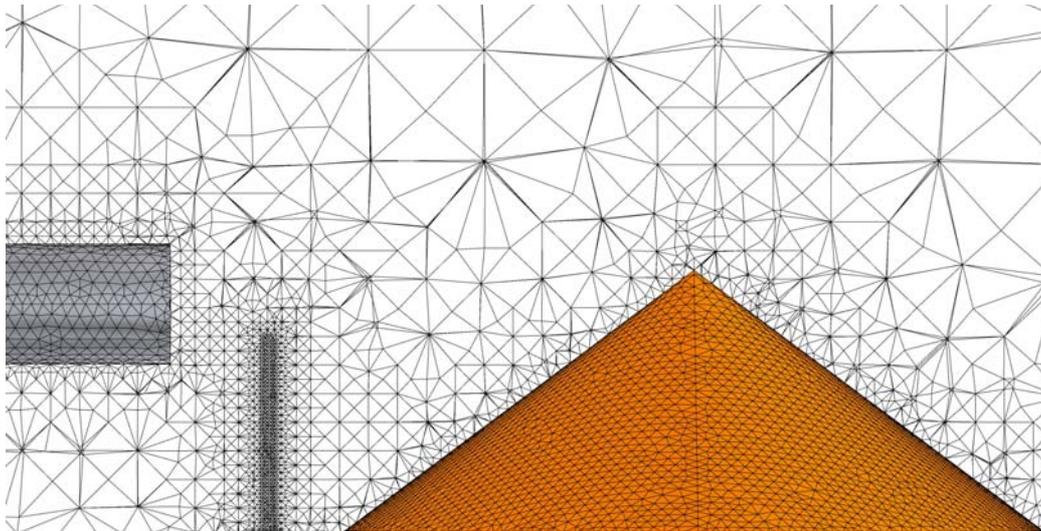


Figura 244: Mallado del modelo B

En la figura 243 y en la 244, vemos la altura de la barrera en relación con los otros elementos, siendo mas baja en la última.

3.4.-CÁLCULO (CFX)

3.4.1.-PREPARACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Los cuatro escenarios poseen las mismas características físicas, ya que se trata de conseguir validarlos con los datos reales, así, todas las condiciones atmosféricas de presión, temperatura, humedad, y velocidad del aire se incluyen en la simulación con los valores recogimos en el campo cuando se realizaron las medidas.

Se trata pues, de una simulación permanente, no dependiente del tiempo, ya que el aire del ventilador se supone constante tanto en módulo como en sentido y dirección con respecto al tiempo. El dominio que caracteriza el modelo, se representa por aire a 25 °C, a 1 atmósfera de presión y afectado por la acción de la gravedad.

Una vez definido el dominio, se procede a caracterizar las distintas superficies como condiciones de contorno. Entre todas las ofertadas por el programa como Inlet, Outlet, Opening y Wall.

Nosotros tendremos un Inlet que corresponden a la entrada de aire en el modelo que sería de 12 m/s para la salida de la manga, que corresponde a la velocidad del aire del ventilador después de recorrer el tubo de ventilación.

Para el resto de superficies delimitantes del dominio se les caracteriza como Opening, ya que el aire puede entrar y salir por esas superficies, tal y como ocurre en la realidad.

Tanto el cono como la barrera y el suelo, así como la manga, se definen como Wall o paredes a las que les aplicamos una rugosidad, excepto a la manga, característica de cada caso. Serían de 1 cm para las dos primeras y de 0.5 cm para el suelo.

3.4.2.-MODELOS DE TURBULENCIA

Una primera parte de la investigación se centró en los modelos de turbulencia elegidos para el nuevo calado de los modelos, ensayándose desde modelos sencillos como el Zero Equation, hasta el más complejo, el SST, pasando por el Spalart Allmaras y el K-épsilon. La elección de estos 4 modelos de turbulencia se basan en las experiencias de Moleney et al., 1999 [76]; Moleney et al., 2004 [77] y Wala et al., 2003 [78].

De todos los modelos, es el K-épsilon el que mejor se ajusta a los valores medidos en campo, siendo mejor dicho ajuste en los escenarios sin barreras, lo cual coincide con nuestras investigaciones, Toraño, J. et al. 2007 [79] y con las de otros autores Silvester et al., 2004 [80] y Parsons et al., 2004 [81].

En la figura 245 se exponen los coeficientes de correlación de los distintos modelos de turbulencia aplicados en las distintas modelizaciones realizadas.

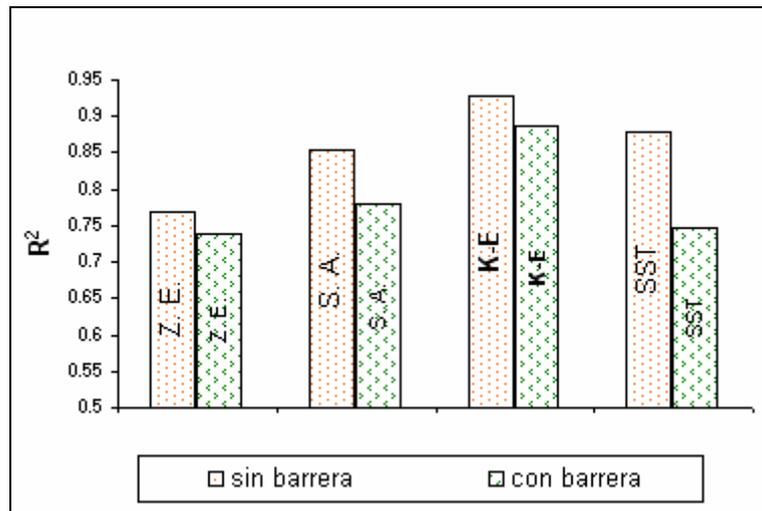


Figura 245: Valores CFD contra Experimentales

3.4.3.-CARACTERIZACIÓN FINAL DEL MODELO

El resultado de la caracterización del modelo lo podemos ver en la figura 246, en la que se presenta el modelo A resultante. Las condiciones de contorno se representan por unas flechas que indican la dirección del viento, siendo las azules con doble sentido las correspondientes a los Opening y las blancas las que indican el Inlet (ver detalle de la figura).

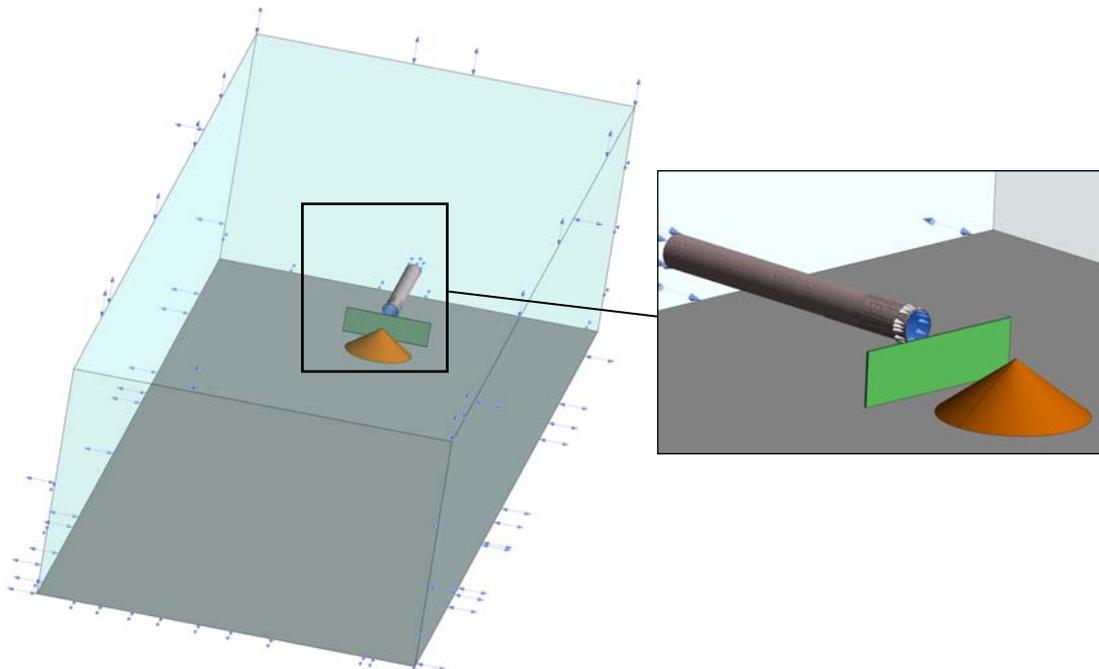


Figura 246: Modelo A, caracterizado en el CFX-Pre

Para el modelo B serían exactamente iguales todas las condiciones, por lo tanto el resultado sería también el mismo.

Los cálculos en el Solver fueron rápidos, los modelos del grupo A tardaron una hora y 25 minutos y 1 hora y 6 minutos para los modelos con y sin barreras. Para los modelos B, tardaron 1 hora y 30 minutos y 1 hora y 46 minutos para los mismos casos. Y además el número de iteraciones no llegaron a 100 en ningún escenario, otro factor que nos indica la buena convergencia de la simulación.

3.5.-RESOLUCIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS

Para que los distintos resultados aparezcan mucho más claros, dividiremos este apartado en función de los modelos realizados.

En la figura 247, aparece una representación de todos los puntos de medida que se realizaron en el campo, distinguiendo con el color verde los que medidos en la zona del cono y la barrera, mientras que en azul estarían los de aguas abajo.

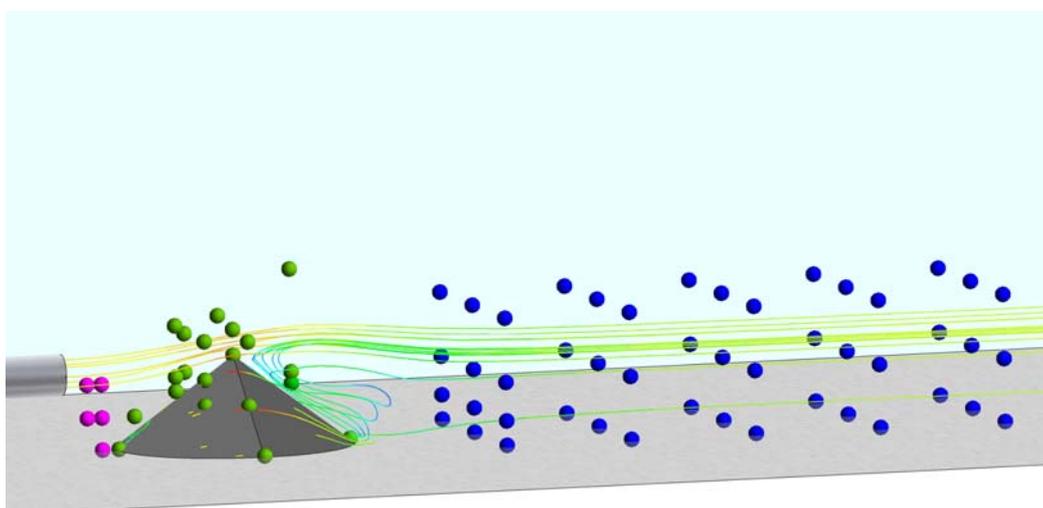


Figura 247: Totalidad de puntos de medidas para los 4 modelos

3.5.1.-MODELO A₁

Este modelo se caracteriza porque no aparece la barrera y la altura tanto del cono como del eje del ventilador se encuentra a 0.52 m, tal y como se muestra en la figura 248.



Figura 248: Medida de velocidad entre el cono y la manga

El estudio de aire, se realiza a partir de una serie de puntos distribuidos en tres zonas del modelo, pueden verse en la figura 249, donde aparecen con colores diferentes en función de la zona en la que se encuentren.

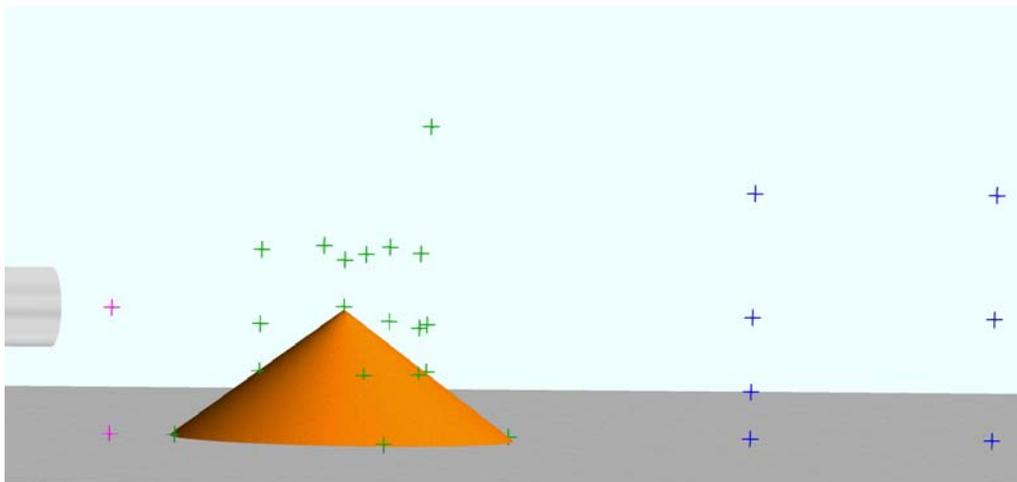


Figura 249: Distribución de los puntos de medida en el modelo A₁

Una vez exportado los valores de estos puntos al programa Excel, los enfrentamos con los datos de campo, obteniendo los resultados que continuación se presentan en la figura 250.

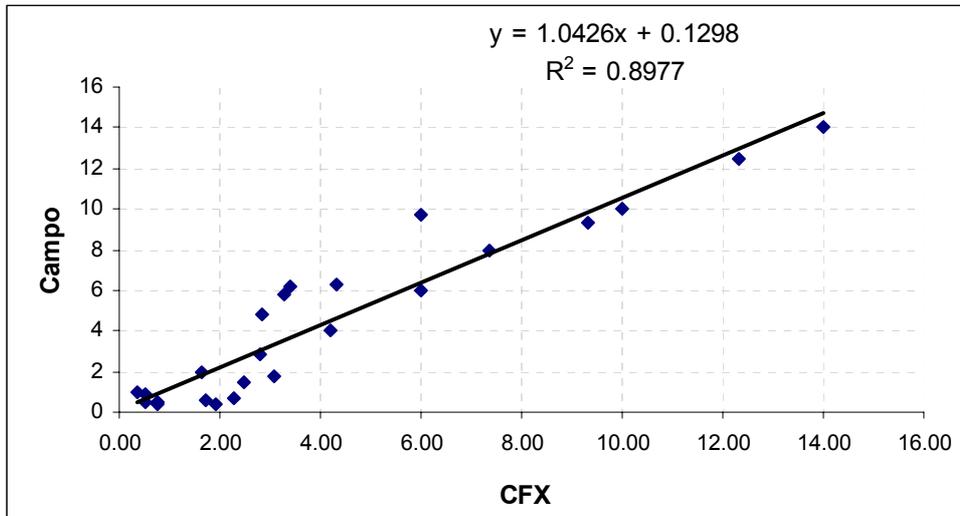


Figura 250: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo A₁

3.5.2.-MODELO A₂

El modelo A₂, es el complementario del anterior, sería el mismo, pero colocando una barrera que intercepte el paso del aire del ventilador antes de alcanzar el cono, en este caso en el punto medio.

Los puntos de medida de viento, coinciden con el modelo anterior, en la zona del cono y aguas abajo, pero tendremos mas puntos rodeando la barrera. Podemos ver la distribución de estos puntos en la figura 251.

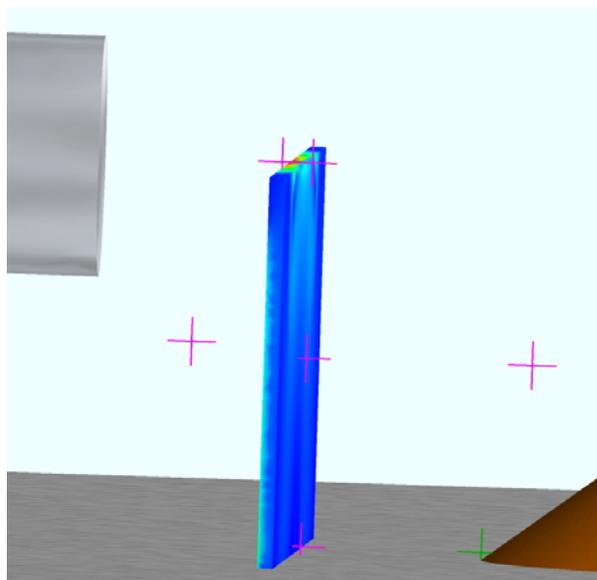


Figura 251: Distribución de los puntos alrededor de la barrera para el modelo A₂

Para este escenario, la correlación entre los puntos de medida en el campo y en CFX, es de 0.89, siendo peor en la zona de aguas debajo del cono. Lo podemos ver en el gráfico de dispersión de Excel que aparece en la figura 252.

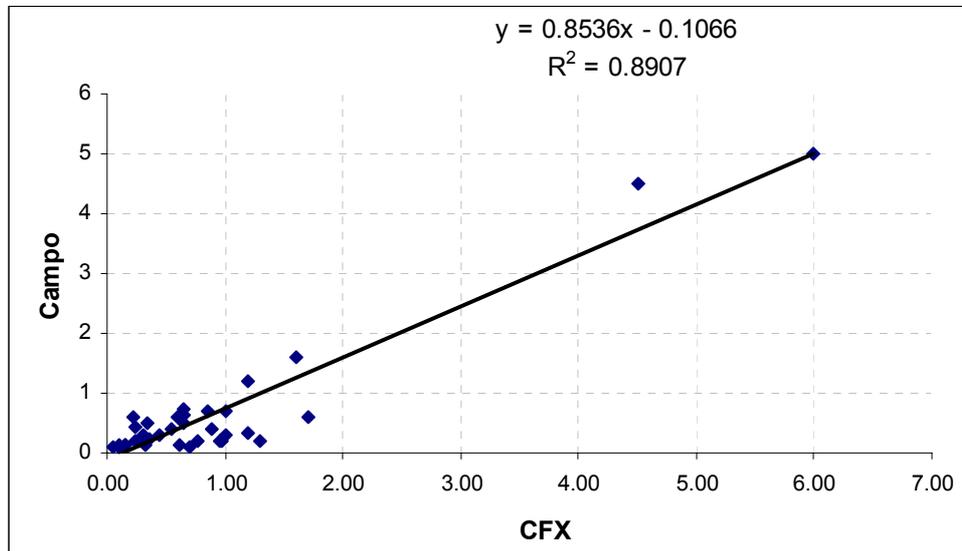


Figura 252: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo A₂

3.5.3.-MODELO B₁

La distribución de los distintos elementos utilizados en este ensayo, varían en función de la altura con relación a los escenarios anteriores. El cono pasa a tener una mayor altura y está situado 5 cm más cerca de la manga y ésta, también se encuentra elevada con respecto a la barrera. Pero la distribución de los puntos sobre el cono y aguas debajo de él, se mantienen, aunque se amplían en esta última zona, llegando hasta 5 m, figura 253.

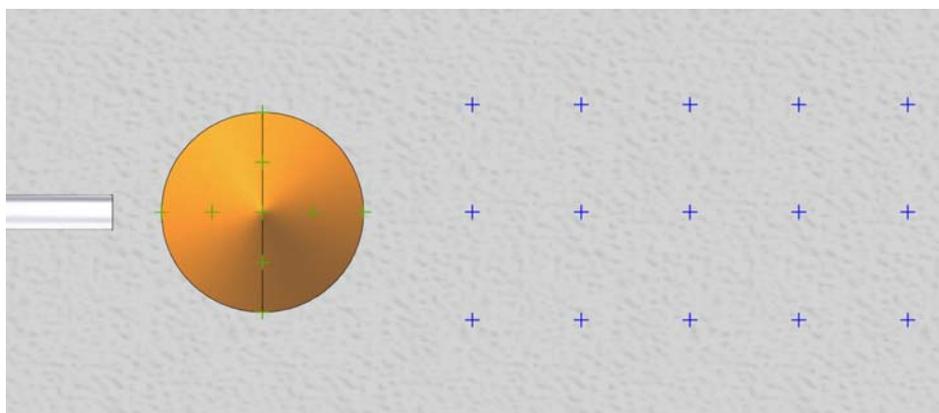


Figura 253: Distribución de los puntos alrededor de la barrera para el modelo B₁

La correlación de los valores reales y los obtenidos por CFX, es alta, pero se tuvo que recurrir a una serie de correcciones para llegar a tener un valor de 0.93. En la figura 254, vemos los resultados para este escenario B₁.

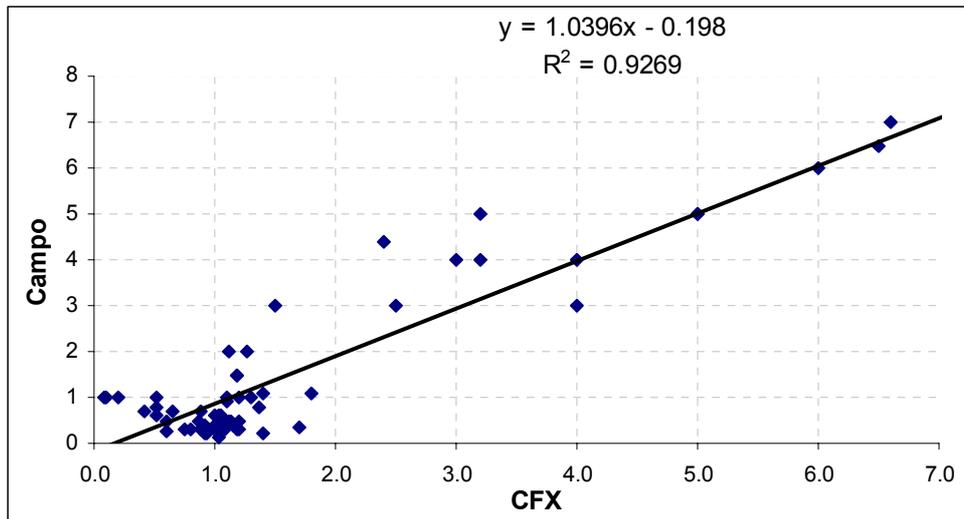


Figura 254: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo B₁

Una de las principales diferencias entre los dos escenarios anteriores, es que el segundo, realizó los cálculos en el Solver mucho más rápido, en 15 minutos se ya había terminado con una convergencia muy buena. Lo que nos proporciona una mejor resolución.

3.5.4.-MODELO B₂

Para este escenario, la barrera se encuentra a 22.5 cm de las dos estructuras, la manga y el cono. La colocación de los puntos es la misma que en los otros casos y podemos verla en la figura 255, donde además se muestra la barrera y el cono coloreados en función del módulo de la velocidad, siendo la leyenda la que aparece a la izquierda de la figura.

En la figura 256, se muestran los resultados de la correlación de los puntos de velocidad para el CFX y los datos de campo, que en este caso tiene una correlación de aproximadamente 0.89.

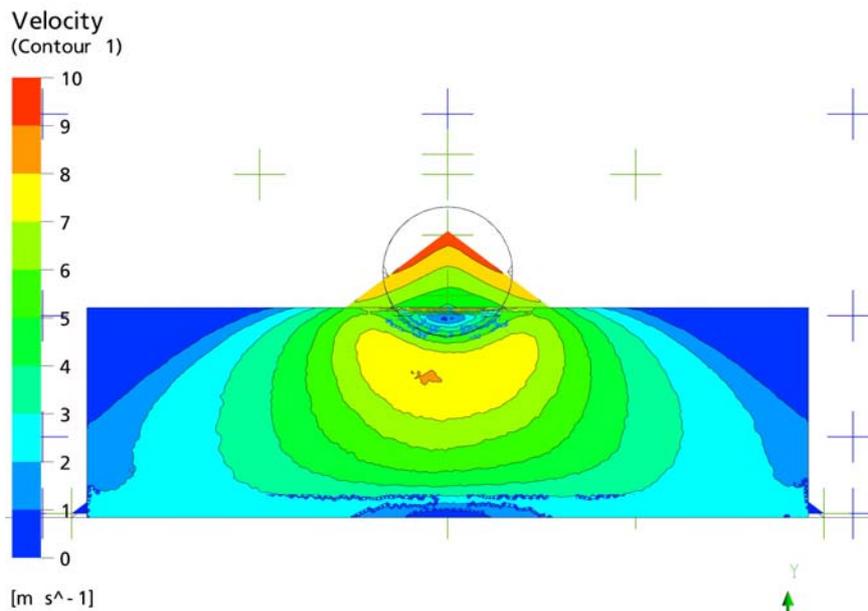


Figura 255: Distribución de los puntos para el modelo B₂

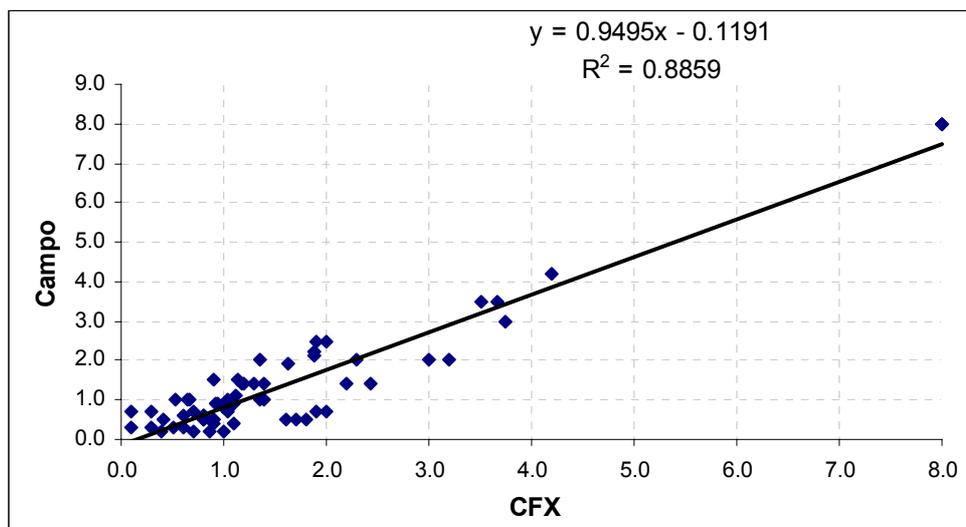


Figura 256: Gráfico de Excel para la medida de velocidad en el modelo B₂

3.5.5-CONCLUSIONES DE VELOCIDAD

En estudios anteriores, ya se describió la influencia del aire sobre una parva, y en esta campaña de medidas se incluyó una barrera situada entre el cono y la manga. El efecto de esta barrera, se hace notar muy claramente tanto en el modelo A como en el B, pero mucho más en el primero de los dos.

Si visualizamos los contornos de velocidad para los dos modelos, figura 257, podemos comprobar como en la parva con la barrera mas baja (modelo B) se

alcanzan velocidades mucho más altas, centrándose los valores máximos en la zona del ápice. Mientras que la distribución de la velocidad en el modelo A es totalmente diferente del anterior, centrándose la mayor velocidad en dos franjas que recorren los laterales del cono sin llegar al vértice.

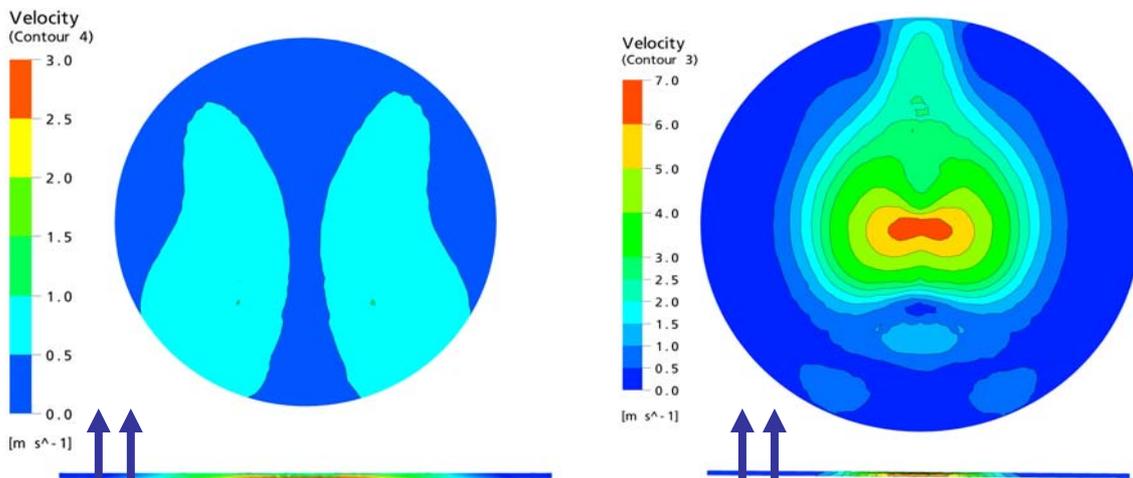


Figura 257: Contour de velocidad para el modelo A y B con barrera

Para el modelo B, la velocidad es muy baja, hasta 1.5 m/s en dos puntos laterales de la parva, pero tanto el módulo como la distribución de la velocidad es muy diferente con el modelo anterior.

Pero si ahora, comparamos los modelos con y sin barrera, podemos ver el gran efecto que produce sobre la velocidad en el cono. Si nos fijamos en la figura 257, en las que aparece un contour de velocidad sobre la parva, podemos distinguir como la barrera disminuye mucho la velocidad sobre el cono, además la distribución de la velocidad es totalmente diferente. No ocurre lo mismo para el modelo B, ya que la distribución de las velocidades es prácticamente igual, pero disminuye su valor en 2 m/s en la zona del ápice. En la figura 258, aparecen los contornos de velocidad para los modelos sin barreras, de ahí que los dos modelos sean muy parecidos, ya que el aire que sale del ventilador incide sobre la parva sin sortear ningún obstáculo. En los dos casos, la mayor velocidad se encuentra en la zona del ápice del cono para ir disminuyendo progresivamente en anillos casi concéntricos hasta el final del cono.

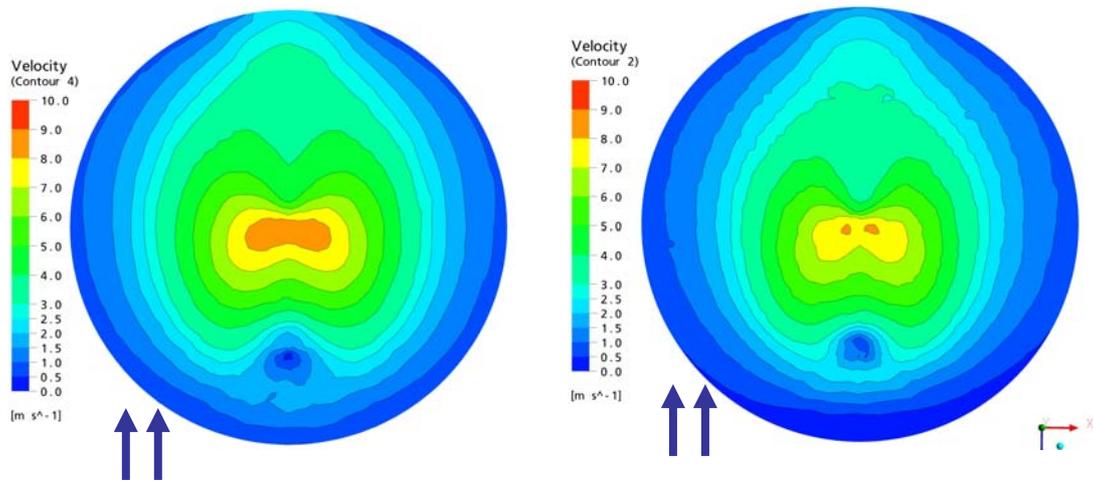


Figura 258: Contour de velocidad para el modelo A y B sin barrera

En el gráfico de Excel que se muestra a continuación (figura 259), se representan tres líneas, dos de las cuales nos describen los valores para los mismos puntos del modelo A y del modelo B, siendo el último, el que mayor velocidad tiene para esos puntos estudiados. La otra línea que aparece de manera discontinua, corresponde a la diferencia entre los valores de los dos modelos.

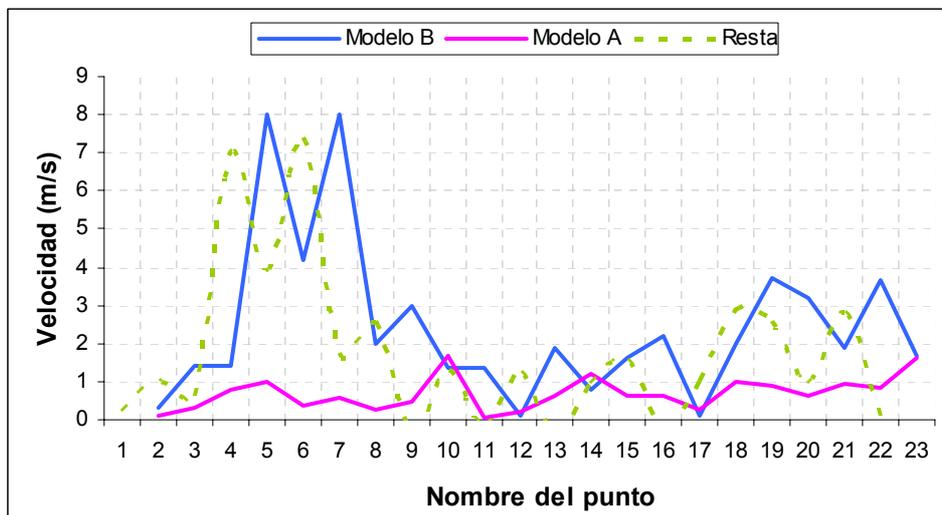


Figura 259: Gráfico para la medida de velocidad sobre la parva para los modelos A y B

Por lo tanto, la altura de la barrera influye fuertemente con la distribución de la velocidad sobre la parva, por lo que si queremos evitar velocidades altas que consigan poner en movimiento partículas finas, recurriremos a barreras con una altura, de al menos, la del apilamiento.

Sería la barrera mas baja, la que más velocidad tendría que soportar, podemos verlo en la figura 260 a), donde el flujo que sale del tubo de ventilación incide sobre la barrera dispersando mucho más las líneas de flujo. Podemos ver también en la misma figura 260 b), el modelo B, donde las líneas prácticamente no se ven afectadas por la barrera, lo que implica que incidan directamente sobre la zona del ápice, alcanzándose velocidades mucho más altas. Además, son muchas las líneas que cambian su dirección al chocar con la barrera en el modelo A en comparación con el B.

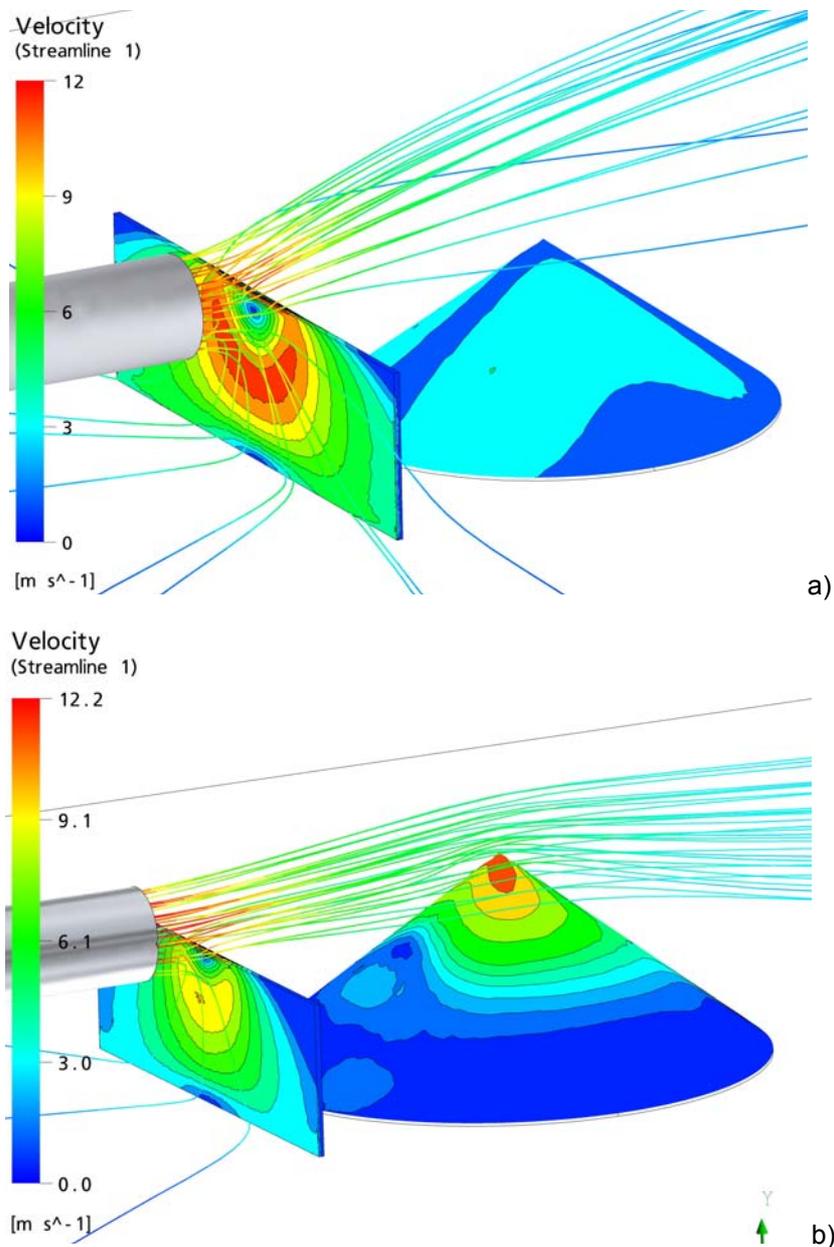


Figura 260: Líneas de velocidad para el modelo A y B.

4.-MÉTODO POST (POLVO VIRTUAL)

4.1.-INTRODUCCIÓN

Con la metodología denominada por nosotros Método Post, calculamos la emisión total de polvo que se pone en suspensión para un apilamiento a la intemperie, en las condiciones más desfavorables.

Para ello se crea una superficie de revolución situada una distancia fija de la superficie del cono fijada por la EPA en 25 cm para una parva de 11 m. Dicha superficie se divide en pequeños faces tal como se muestra en la figura 261 mediante cuadrículas de 40*50 (2000 faces) y que serán las áreas donde se calculará la emisión.

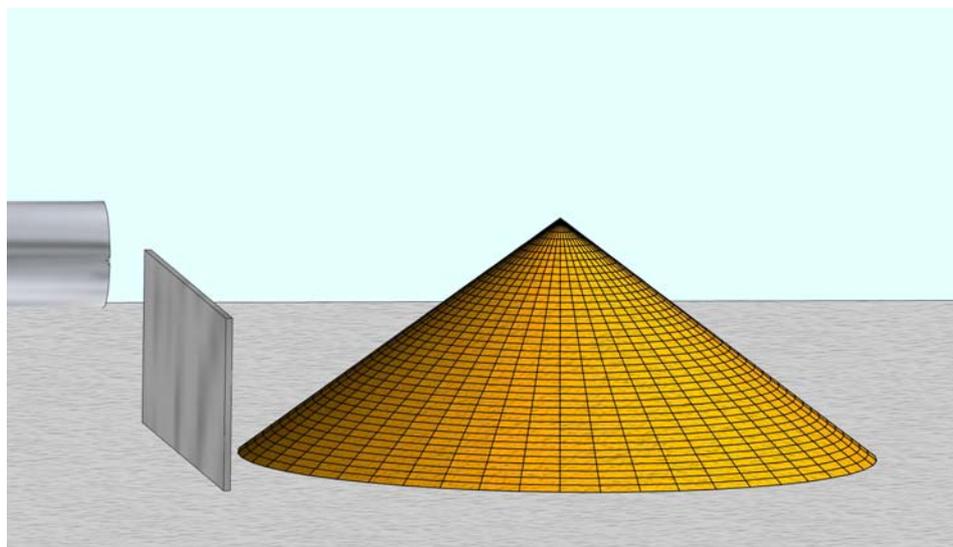


Figura 261: Superficie de revolución y faces

Según la distribución de la velocidad del viento sobre la superficie de la parva, se puede estimar cualitativa y cuantitativamente en que zonas ó áreas de la parva se producirá la emisión de material ya que dicha emisión depende directamente de la velocidad del viento en cada uno de los faces en los que está dividida la superficie de la parva. Esta velocidad necesaria para que las partículas se pongan en suspensión, viene determinada por las formulaciones de la EPA, la cual nos dice que una partícula se pondrá en suspensión cuando la velocidad en el face, donde se encuentra la partícula, es superior a 1 m/s y además se cumple la ecuación cuadrática (3) de la EPA anteriormente expuesta.

Esta emisión se implementa en el programa a partir de unas expresiones basadas en las ecuaciones (3) y (2), para darnos la variable Emisión:

$$\text{Emision} = K \times (P \times \text{Condicional}) \quad (32)$$

donde:

P es el potencial de erosión

Condicional sería las características propias para que una partícula se ponga en suspensión, según EPA.

K depende del mayor porcentaje de tamaño de partícula existente en el material utilizado en el ensayo Hayden, 2003 [82]. En nuestro caso $K = 0,5$ ya que un 66% del material total utilizado en el ensayo es igual o inferior a 10 micras, tal como se ha determinado en el análisis Coulter (Particle Size Analyzer) en el INCAR del CSIC del Estado Español.

Una vez implementada la variable “Emisión” en el programa, los kilogramos de material emitido, se calculan a partir de la integración de ésta variable en cada face de la superficie de revolución de la parva a 25 cm. El resultado obtenido, se compara con los valores medidos en campo que provienen de la diferencia entre el material espolvoreado sobre la superficie del cono antes y después de realizar el ensayo, figura 262.



Figura 262: Ensayo con carbón ultrafino

Se realizaron para cada configuración sin barrera y con barrera 3 grupos de ensayos respectivamente, con 5 ensayos por grupo, lo que totalizan un total de 30 ensayos. En las figuras 263 y 264 se muestran los resultados obtenidos y su comparación con los procedentes de las modelizaciones mediante códigos numéricos, siendo la línea de color rojo la que corresponde al valor de la simulación, y los azules son los valores de los distintos ensayos de campo.

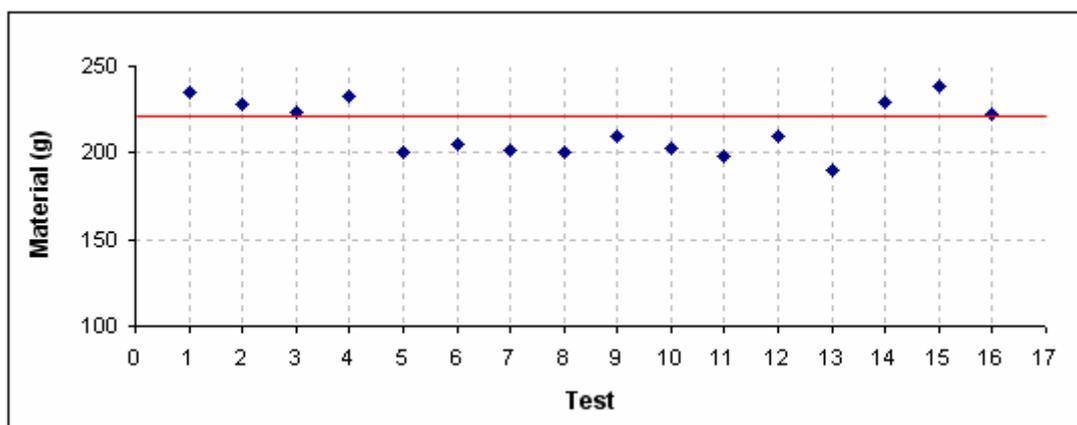


Figura 263: Comparación resultados reales con los de las modelizaciones sin barreras

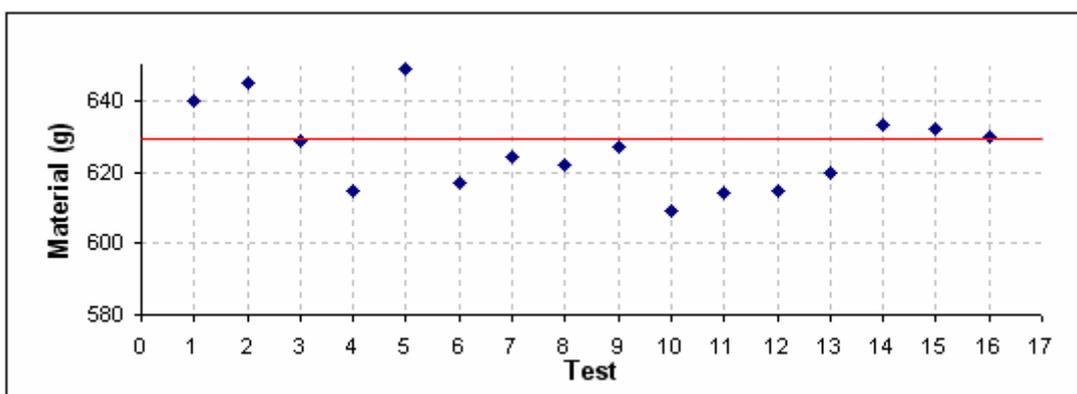


Figura 264: Comparación de resultados reales con los de las modelizaciones con barreras

Como se puede ver en dichas figuras, las diferencias entre los resultados de las simulaciones y los valores de campo, se debe fundamentalmente a las variaciones en la intensidad y dirección del viento ambiental que influía sobre el generado para el ensayo por el ventilador industrial. En ocasiones daba lugar a una disminución del polvo emitido y medido y en otros casos a una mayor emisión.

Asimismo, es interesante destacar que en ocasiones la emisión de polvo disminuye cuando el apilamiento se encuentra a la intemperie pues por ejemplo

cuando en los ensayos se producen ráfagas de viento naturales se ponen en suspensión las partículas más finas quedando las mas gruesas (mayores de 1 cm) formando una costra sobre la superficie de la parva que disminuye el potencial de erosión.

Se recuperaría el factor de emisión cuando se añade más material o cuando se remueve el existente como suele ocurrir en el manejo de los materiales granulares en la industria.

En la figuras 265 a) y b), vistas en planta del tubo y el cono sin y con barrera respectivamente, se muestra en las modelizaciones efectuadas, un contour en el que podemos diferenciar las zonas con y sin emisión.

Así por ejemplo, se podría determinar que en el caso con barrera para un área de 1.35 m^2 habría una emisión de 0.225 kg de polvo, mientras que en el caso sin barrera la emisión es mucho mayor de 0.630 kg para un área de 2.87 m^2 .

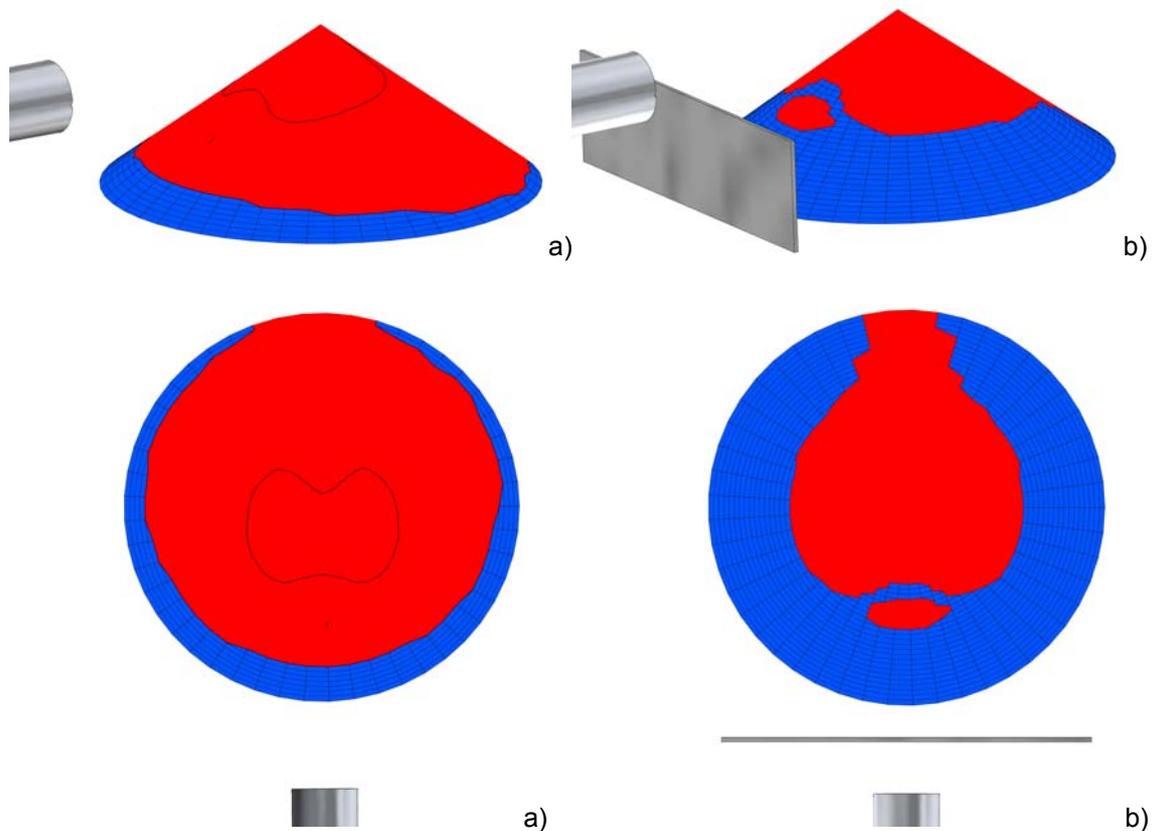


Figura 265: Zonas de emisión o no emisión para simulaciones: a) sin barrera y b) con barrera

4.2.-SIMULACIONES EN UN PARQUE DE APILAMIENTO REAL

4.2.1.-INTRODUCCIÓN

En los puertos de descarga de barcos, donde se mueven millones de toneladas de minerales (hierro, carbón y cemento, etc), se suelen emplear, entre otros sistemas, la forma cónica como sistema de apilamiento a la intemperie, motivo por el cual la emisión de polvo producida es frecuentemente estudiada e investigada, Stunder and Arya, 1988 [83].

En la figuras 266, 267, 268 y 269 se muestran apilamientos de diversos minerales y de distintas formas en centrales termoeléctricas y sistemas portuarios equipadas con diversos tipos de barreras.



Figura 266: Apilamientos de diversas formas minerales sin barreras

Para la aplicación de los resultados obtenidos en las campañas de medidas a los casos reales, se creó una nueva modelización para una parva cónica de 11 m de altura y 29 m de diámetro. Asimismo, para evaluar el efecto del viento sobre el apilamiento, se amplió el estudio con la incorporación de 4 barreras de alturas 0.5H, 0.7H, 1.0H y 1.2H respectivamente, siendo H la altura de la parva, situadas a 6 distancias distintas de dicha parva 0H, 0.5H, 2H, 3H, 4H y 8H.

Se realizaron por tanto un total de 24 simulaciones, consiguiéndose determinar que escenario es el mas indicado para la menor fuga de polvo a zonas ajenas a la instalación, minimizando los problemas de sanidad y ambientales.



Figura 267: Apilamientos con apiladoras de rodetes y con barreras



Figura 268: Apilamientos cerrados en parque de central térmica



Figura 269: Apilamientos en puerto directamente con máquina y con barreras

A diferencia de los ensayos a escala, tanto la geometría como el mallado de las simulaciones se crearon a partir del software Ansys Icem CFD.

En la figura 270, se representa la geometría del modelo, donde aparecen las 6 barreras con sus cuatro alturas cada una y el cono, así como el paralelepípedo que limita todo el dominio del aire (110x100x350).

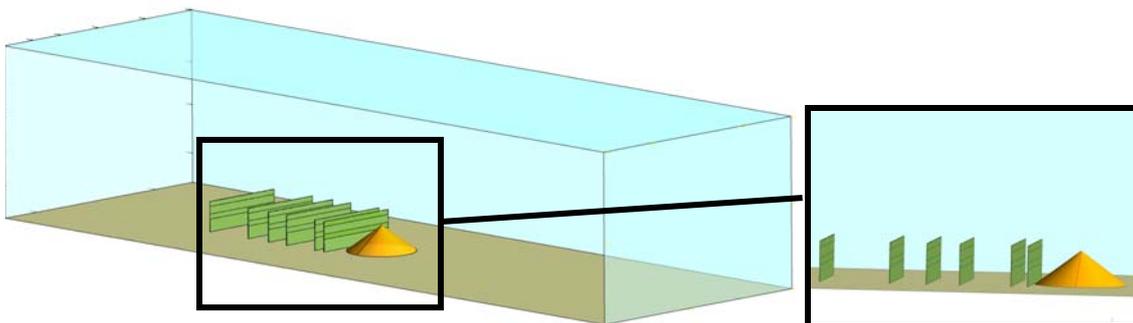


Figura 270: Geometría del modelo

La geometría consta de 140 superficies reunidas en 60 partes, 232 curvas, 137 puntos y un total de 25 bodies, 24 de ellos, correspondientes a cada una de las barreras y el último al dominio aire. Así, en el CFX-Pre, podemos diferenciar

una simulación para cada uno de los escenarios, sin tener que cambiar de geometría ni de malla.

Para que el método del cálculo de la emisión se pueda utilizar en este modelo, tenemos que conservar el tamaño de los tetras que rodean a la parva de los modelos a escala. Esto deriva en un mallado con mas de 2 millones de elementos, caracterizado por 7 zonas de mallado mas fino, que coinciden con las seis barreras y la parva (figura 271), con una calidad de 0.38.

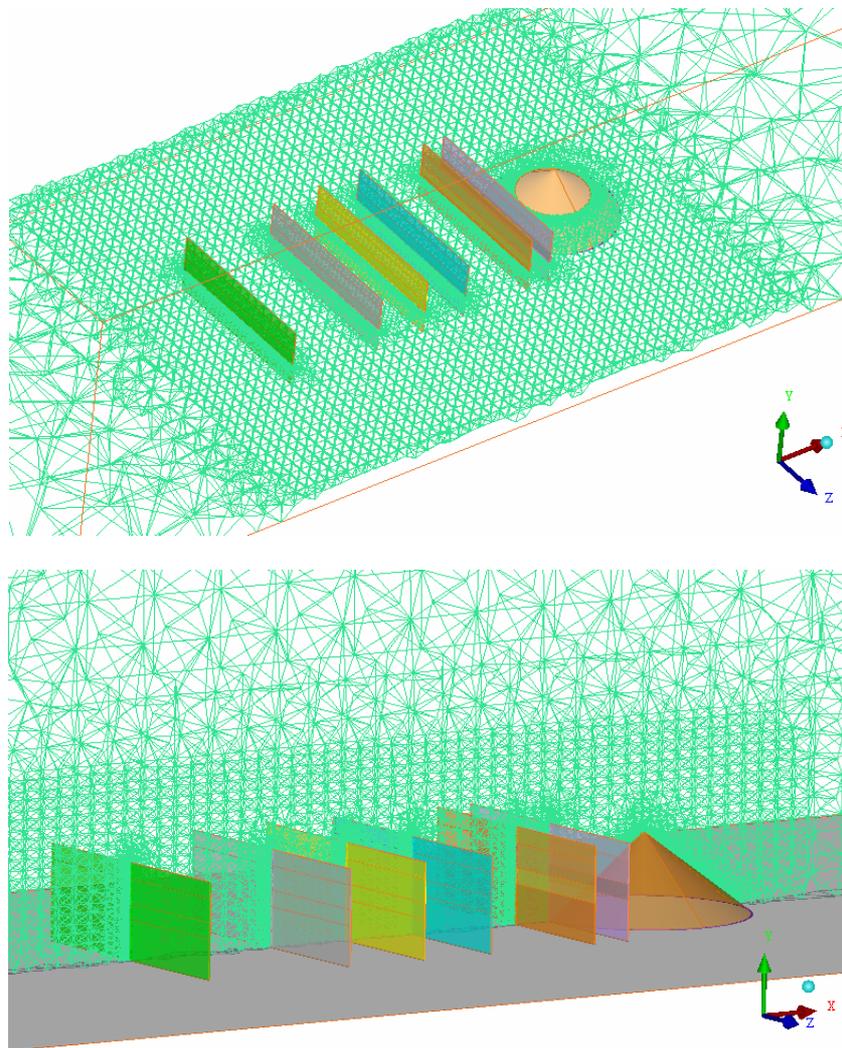


Figura 271: Mallado tridimensional

Para garantizar una buena convergencia, se simplificará el modelo lo más posible, por lo que tendremos un Inlet con un perfil logarítmico del viento de entrada, un Outlet como salida del aire del modelo y el resto aparecen como Wall.

Una gran diferencia con los modelos a escala, es que la velocidad de entrada del viento al modelo viene determinada por la EPA a partir de un perfil logarítmico, que implica para una altura de 10 m una velocidad del aire de 11.11 m/s. Esto se consigue implementando una serie de ecuaciones que relacionan la velocidad del viento, la velocidad friccional, la rugosidad de la parva y la altura sobre su superficie:

$$u(z) = \frac{u^*}{0.4} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

donde:

u es la velocidad del viento.

u^* es la velocidad friccional.

z es la altura sobre la superficie.

z_0 es la rugosidad.

0.4 es la constante de von Karman.

El resultado de la implementación de estas fórmulas en el modelo, lo podemos ver en la figura 272, en la cual, se presentan el perfil logarítmico del viento en la entrada del modelo, donde se constata que para una altura aproximada de 10 m el valor de la velocidad del viento es de 11 m/s.

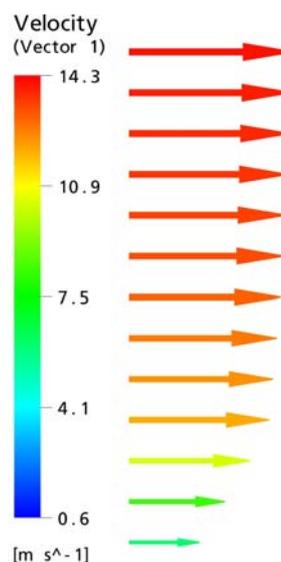


Figura 272: Perfil logarítmico del viento

4.2.2.-RESULTADOS OBTENIDOS

La emisión de polvo en apilamientos a la intemperie, se ve fuertemente afectada por la evolución del flujo de viento tras incidir sobre una barrera (figura 273). En la figura 274 se muestran los valores de la emisión del polvo (agrupados para las barreras con las 4 alturas distintas) en función de la distancia de los grupos de dichas barreras a la parva.

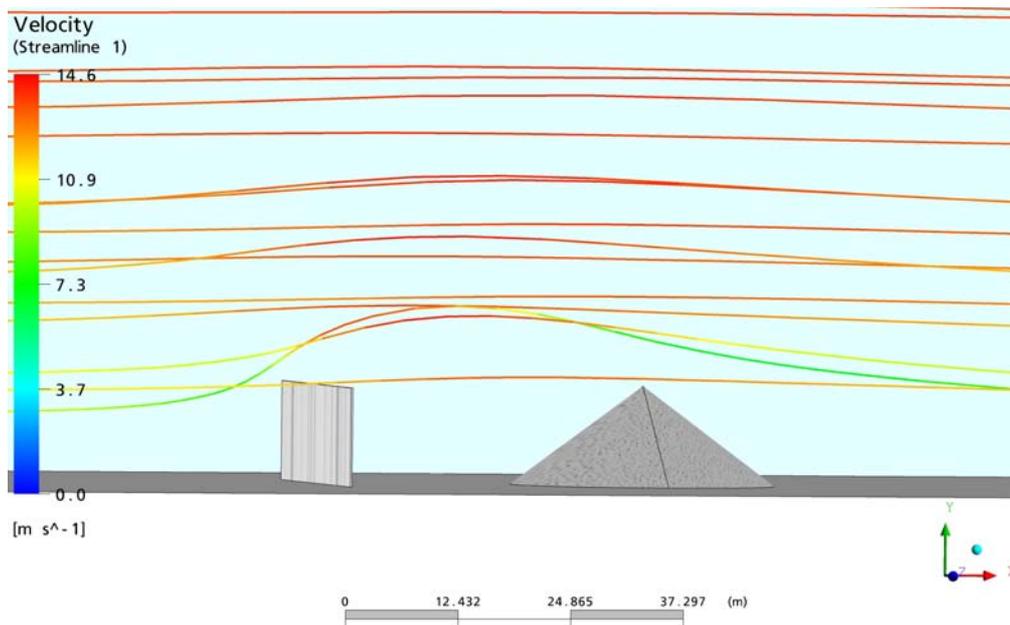


Figura 273: Efecto del viento sobre la barrera y la parva

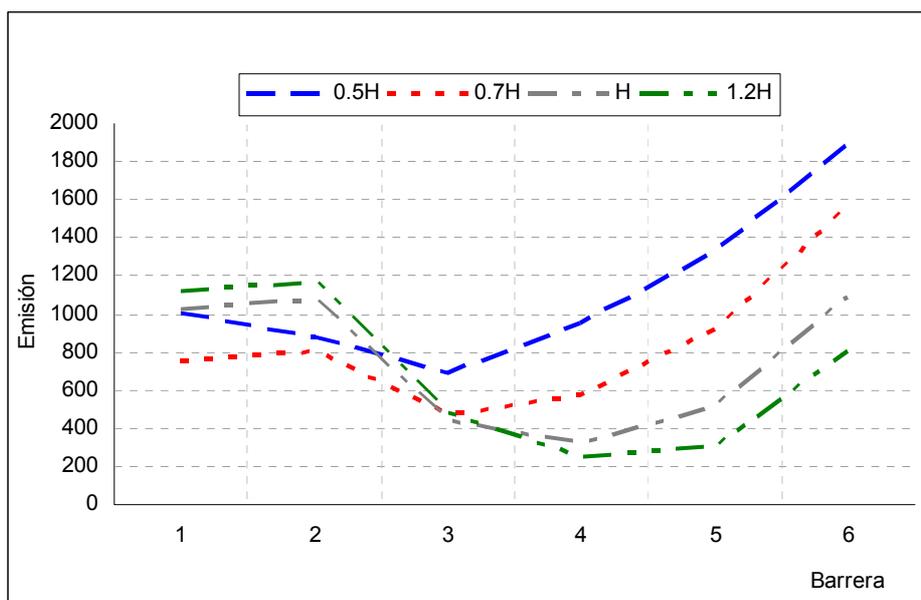


Figura 274: Emisión en gramos según las barreras

Se puede ver que los mínimos de emisión de polvo para las barreras de una altura inferior a la altura de la parva (0,5H y 0,7H), tiene lugar en la barrera 3 a una distancia de la parva de 2H. Para las barreras de mayor altura (1.0H y 1,2 H) dicho mínimo de emisión se desplaza a una distancia mayor, 3H. Es decir el mínimo de emisión de polvo disminuye y se aleja de la parva conforme la altura de la barrera crece.

Tenemos dos grupos de mínimos para dos distancias distintas, uno para la barrera 3, donde la emisión es independiente de la altura y los mínimos de la barrera 4, que son los mas bajos del conjunto de las simulaciones, dados por las barreras de mayor altura.

En la tabla 24, se muestran los valores de las emisiones obtenidas en cada una de las simulaciones.

	DISTANCIA					
ALTURA	Barrera 1 (Ras)	Barrera 2 (0.5H)	Barrera 3 (2H)	Barrera 4 (3H)	Barrera 5 (4H)	Barrera 6 (5H)
0.5H	1000.94	878.221	695.658	955.519	1333.81	1899.66
0.7H	753.116	803.332	466.182	574.657	919.279	1563.54
H	1031	1080.49	441.45	321.602	510.429	1088.58
1.2H	1121.86	1173.83	482.802	246.434	308.225	802.138
Sin Barrera	5217.58					

Tabla 24: Emisión en gramos según las barreras

Las variaciones de los valores de la emisión de polvo son producidos por las distintas combinaciones entre las alturas de las barreras y sus distancias a la parva, lo que da lugar a distintas modificaciones del flujo del viento que incide

sobre la parva, sobre todo de su velocidad y de la magnitud y ubicación del vórtice que hace aumentar la velocidad por detrás de la barrera.

El estudio de la evolución de estos dos efectos, velocidad y vórtice, se mostrarán para los tres grupos de barreras. Veamos primero que ocurre en las simulaciones sin barrera tal como se muestra en la figura 275.

Se observa, como la zona del vértice del cono es la de mayor velocidad y por lo tanto donde se produce la mayor emisión de polvo con valores de 5218 g mientras que en presencia de barreras dichos valores bajan y por ejemplo en el caso de la barrera 6 el valor de la emisión de polvo es un 64% inferior (1899,66 g).

Asimismo optamos por una barrera de 1.2 H (13.2 m) y la colocamos a una distancia de 3 H (33 m), conseguimos eliminar la emisión en más de un 95%, lo que evitaría prácticamente la totalidad de la contaminación fuera de las instalaciones del parque de almacenamiento.

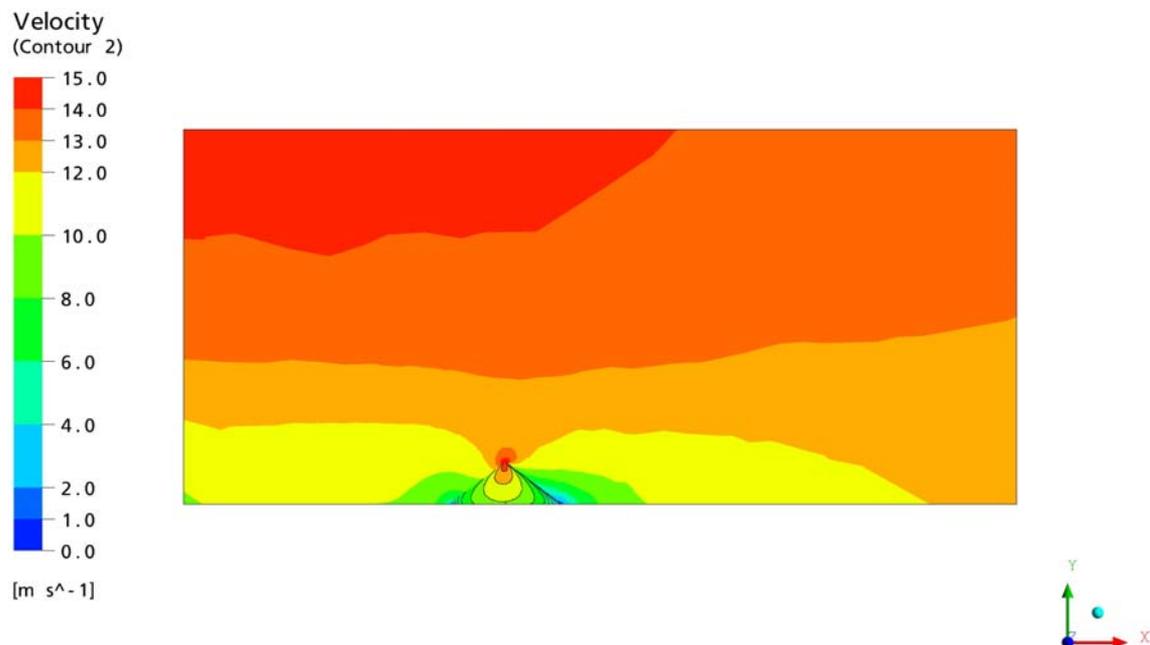


Figura 275: Velocidad simulación sin barrera

Si analizamos los apilamientos con barreras, se observa en la figura 276 para el caso de la barrera 1 (análogamente ocurre con la barrera 2) ubicada a 0 m de la parva, para las menores alturas de las barreras se produce una menor emisión (por ejemplo un % menos), consecuencia de que el vórtice de viento

de alta velocidad aumenta a medida que lo hace la altura de la barrera, por lo que afectará a una superficie mucho mayor de la parva.

Asimismo comprobamos que la zona de bajas velocidades está por detrás de la parva, dejando el vértice del cono con altas velocidades.

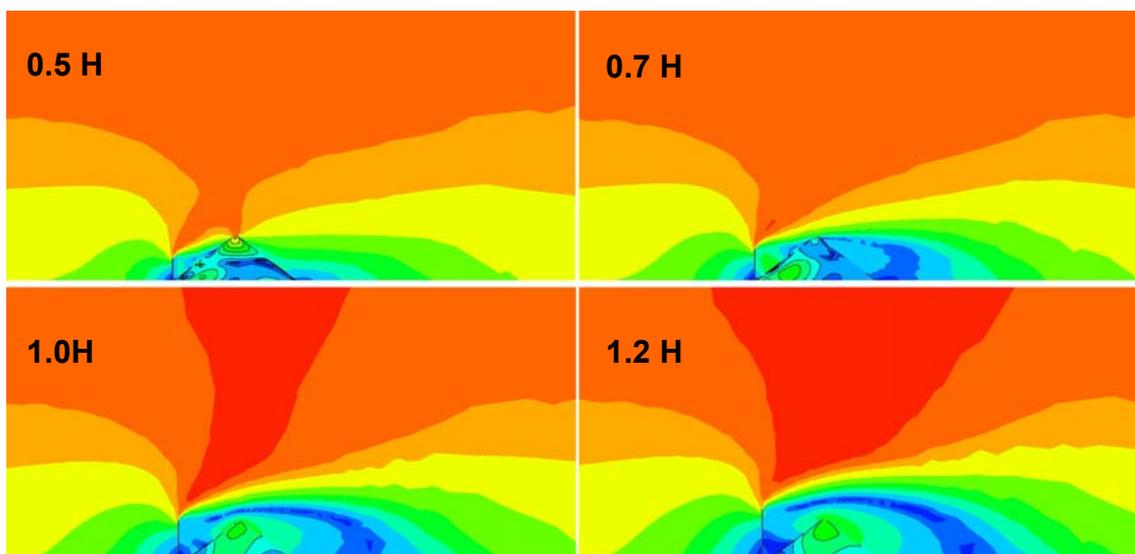


Figura 276: Velocidad simulación barrera 1

Para las barreras intermedias, la emisión es prácticamente la misma para las 4 alturas. En la figura 277 (se expone como ejemplo los resultados para la barrera 3) la distribución de las velocidades es prácticamente igual, estando el vórtice situado en la zona de barlovento de la parva y la zona de bajas velocidades envolviendo el resto de la parva.

Para la imagen de la barrera de 0.5H o de 5.5m de altura, vemos una superficie más amplia del cono con mayor velocidad, y es en este caso, donde la emisión aumenta en 45.30% sobre los otros tres escenarios con emisiones prácticamente iguales.

En la figura 278, se representa al último grupo de barreras, la 5 y la 6, escogiéndose ésta última como ejemplo. En este caso ocurre lo contrario de lo expuesto para el primer grupo, ya que son las barreras más bajas las que producen una mayor emisión.

Esto es debido, a que el apilamiento se encuentra fuera del alcance del vórtice, y además, la zona de baja velocidad ya no alcanza la parva como lo hacía para las distancias más corta, sino que su efecto se va amortiguando, llegando a la

parva velocidades mucho mas altas, lo que se traduce en mayor emisión de polvo.

En este caso vuelve a ser la barrera más baja (0.5 H) la que emite hasta aproximadamnete 2 kg de material que es el valor mas alto de todas las simulaciones.

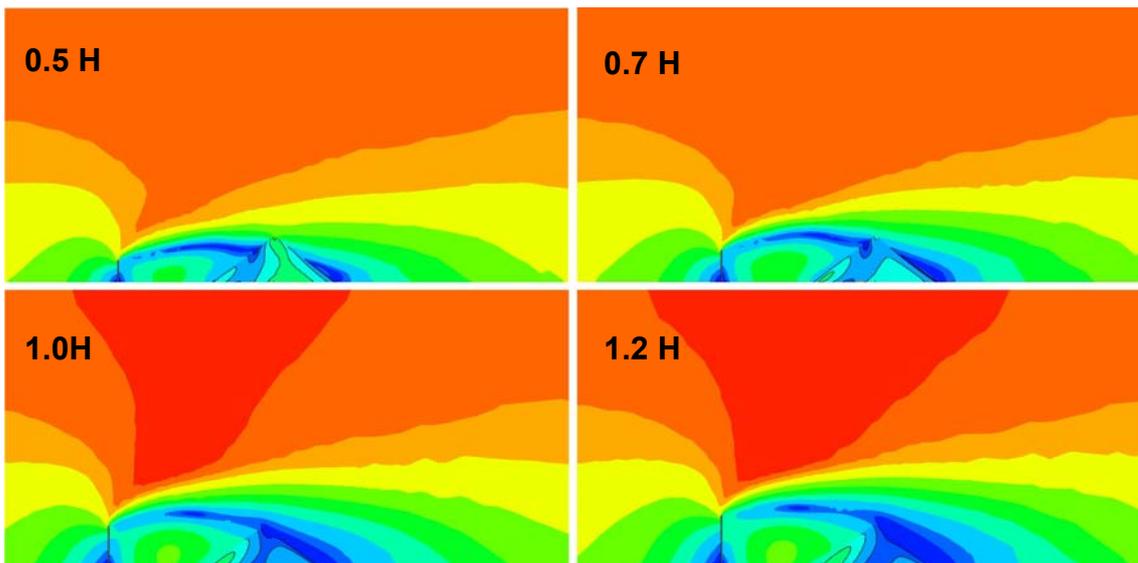


Figura 277: Velocidad simulación barrera 3

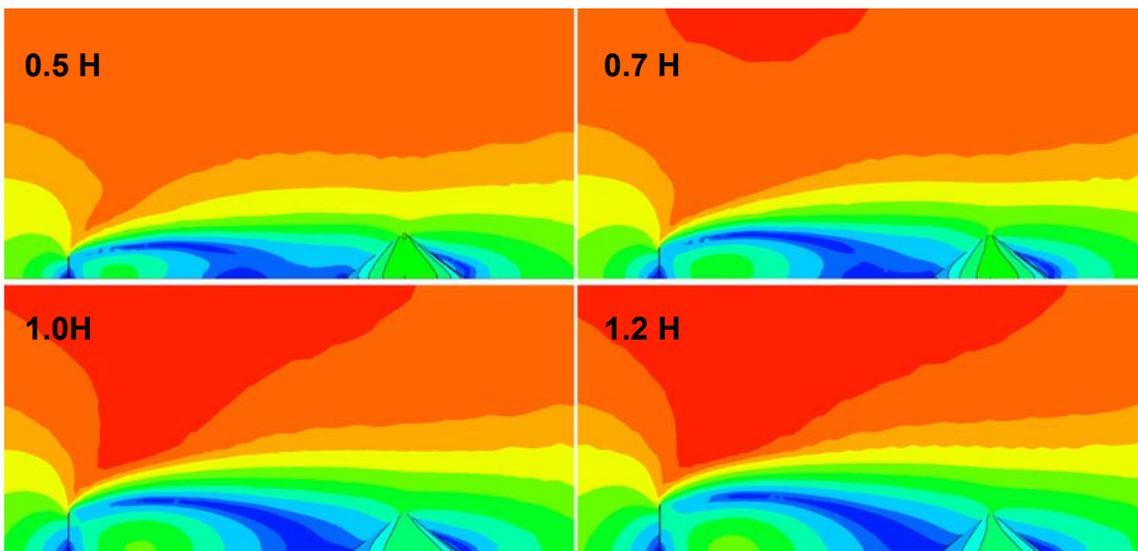


Figura 278: Velocidad simulación barrera 6

4.2.3.-CONCLUSIONES DEL MÉTODO POST

La emisión de polvo que se produce en apilamientos a la intemperie, se puede calcular a partir de CFD, hallando la cantidad de polvo emitida sin utilizar simulaciones multifase.

En las instalaciones industriales existentes, proyectos en fase de diseño o proyectos en ejecución y a efectos de minimizar el efecto de la emisión del polvo a la atmósfera y sus consecuencias nocivas para las personas y el medio ambiente, las modelizaciones en 3D mediante códigos numéricos computacionales se han mostrado como unas herramientas eficaces de cálculo.

El empleo de barreras para la protección de las parvas, puede llegar a reducir la emisión hasta en un 95% para las peores condiciones ambientales y operacionales. La eficacia de las barreras depende de su ubicación en cuanto a distancia a la base del apilamiento. Asimismo la eficacia de las barreras depende de la relación de su altura con la de la parva cónica de almacenamiento.

Ambos parámetros de diseño, altura de la barrera y distancia a la base de la parva están directamente relacionadas entre si y con la cantidad de polvo emitido a la atmósfera.

5.-ANÁLISIS DE PROTECCIÓN MEDIANTE BARRERAS. MÉTODO AUTOMÁTICO DE PROGRAMACIÓN MEDIANTE RUTINAS

5.1.-INTRODUCCIÓN

Independientemente de lo expuesto en el capítulo anterior y en el anexo correspondiente a las campañas de medidas, pasamos a evaluar los resultados de concentración obtenidos de forma experimental para el caso de una pila cónica de carbón. Estos datos de concentración los podremos comparar con los resultados de la simulación, que posteriormente se realizará en CFX.

Estos datos se muestran en la figura 279 para las partículas totales (PT) y para partículas inferiores a 10 micras (PM10), centrándonos en los resultados

obtenidos para partículas de 10 micras en el ensayo con sistema de protección con barrera.

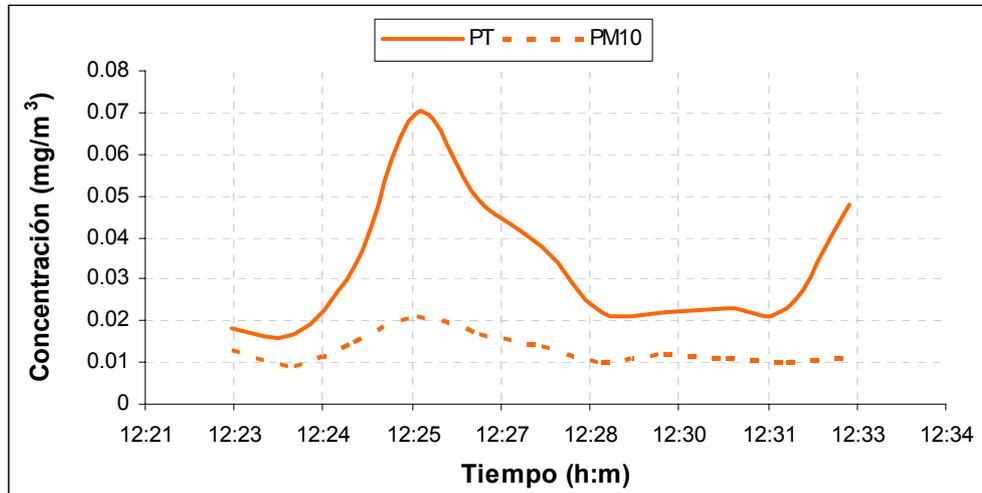


Figura 279: Curva granulométrica del ensayo con barrera

Una vez realizados los ajustes relacionados con la velocidad del viento, lo que hacemos es evaluar los resultados de emisión y concentración obtenidos en la simulación y relacionarlos con los obtenidos de forma experimental.

En la simulación CFD se ponen en suspensión un total de 1 kg de partículas totales de carbón, inyectando dicho polvo de acuerdo a la fórmula de emisión de la EPA (sección 13.2.5), implementada en lenguaje Fortran tal como se muestra en la figura 280. Para ello hemos elegido las partículas PM10.

```
VELMAG = SQRT(VELSTU(1)**2 + VELSTU(2)**2 + VELSTU(3)**2)

IF (VELMAG .GE. 0.6) THEN
  PNUM(IPART) =0.5*(ArFc(ISEL) *(58*(VELMAG-0.6)**2+25*(VELMAG-0.6)
& ))/1.42e-09
END IF

IF (VELMAG .LT. 0.6) THEN
  PNUM(IPART)=0
ENDIF

END DO
```

Figura 280: Implementación en Fortran de la fórmula de emisión

En dicha figura, 0.5 es el factor K correspondiente a partículas inferiores a 10 micras y $1.42e-09$ es la masa (en gramos) de una partícula de 10 micras de carbón, según la densidad dada por los ensayos realizados en el INCAR (ver correspondiente Anexo).

5.2.-SIMULACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Los captadores colocados a 3 m del obstáculo registraron los datos de la figura 281. Si como ya hemos visto, calculamos el área bajo la curva para obtener la concentración total a 3 m del obstáculo, tendremos:

$$C_{\text{experimental}} = A = \int_{t_1}^{t_2} (C(t) - C_0) dt = 7,86 \text{ mg/m}^3$$

Como apuntamos anteriormente, el dato de concentración total en el caso de la simulación por métodos numéricos (CFX), viene definido por la ecuación (28). El valor resultante es:

$$C(t)_{\text{CFX}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{PNR}_i(t) \times m_p)}{v} = 8,124 \text{ mg/m}^3$$

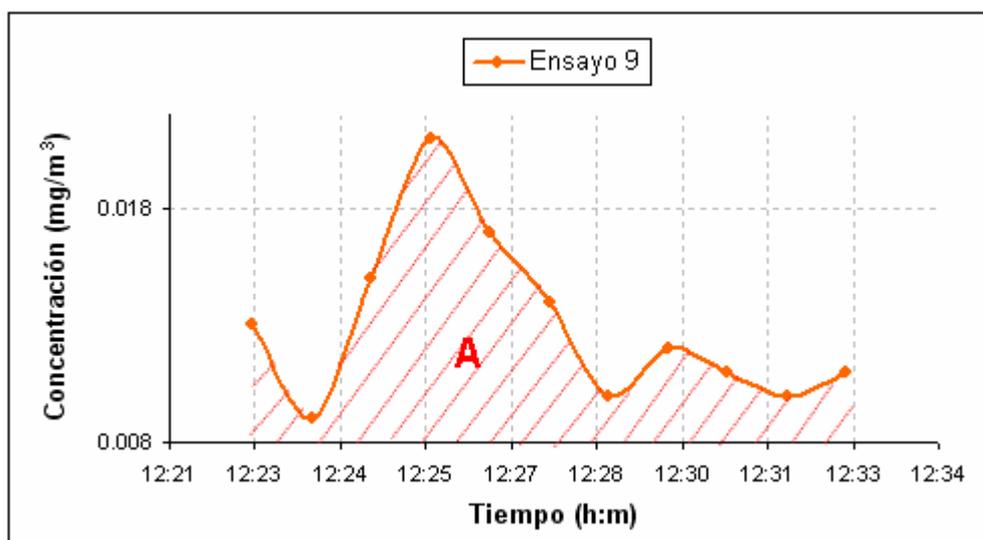


Figura 281: Medidas experimentales para PM10

Que nos indica que estamos ante un calado correcto para una velocidad friccional límite de 1. A dicha conclusión hemos llegado después de realizar 5 simulaciones con los valores que se indican en la tabla 25 y su comparación con los valores medidos en campo, que a su vez corresponde a la media de 5 valores correspondientes a 5 campañas de medidas respectivamente.

	Veloc. friccional límite U_t^*	mg/m ³	Cota Y
CAMPO		7,86	0,583
CFX	0,1	8,682	0,523
	0,5	7,572	0,523
	0,6	7,428	0,523
	1	8,124	0,523
	0,22-0,6	8,562	0,523

Tabla 25: Concentraciones y cotas de medición reales y simuladas mediante CFD

En la figura 282 se muestra, como ejemplo, la evolución que sufre la nube de polvo en la simulación, efectuado a partir de CFD para el caso de la no existencia de barrera. Análogamente para la figura 283, pero en este caso, si se dispone de un sistema de protección con barrera sólida sin porosidad.

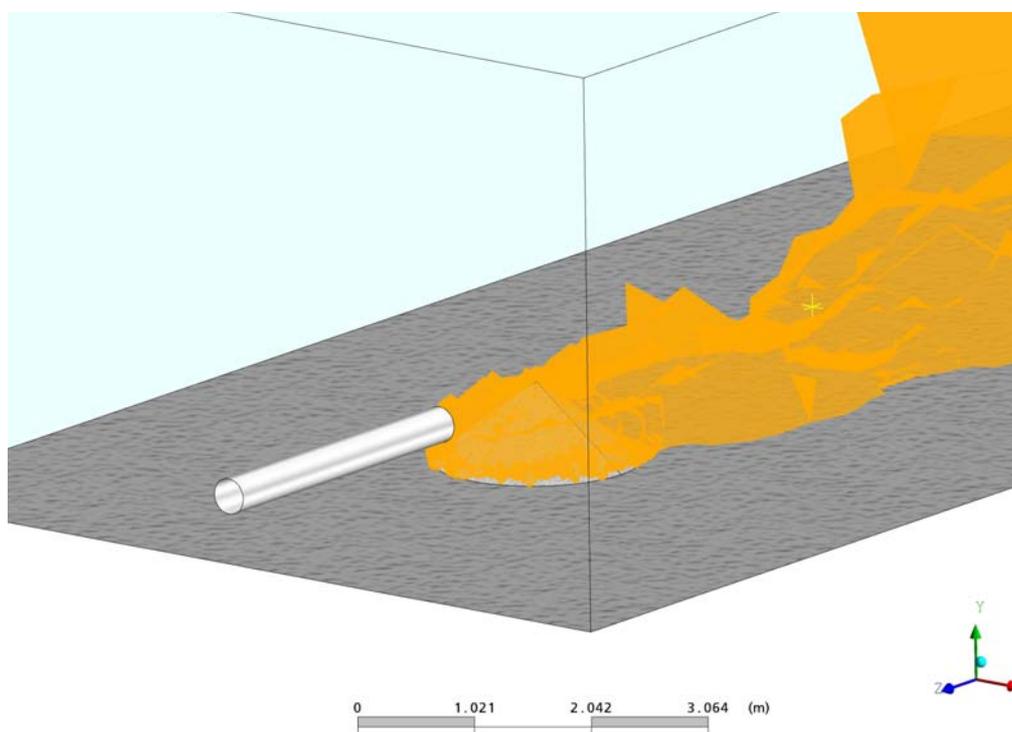


Figura 282: Ejemplo de evolución del polvo en simulación sin barrera

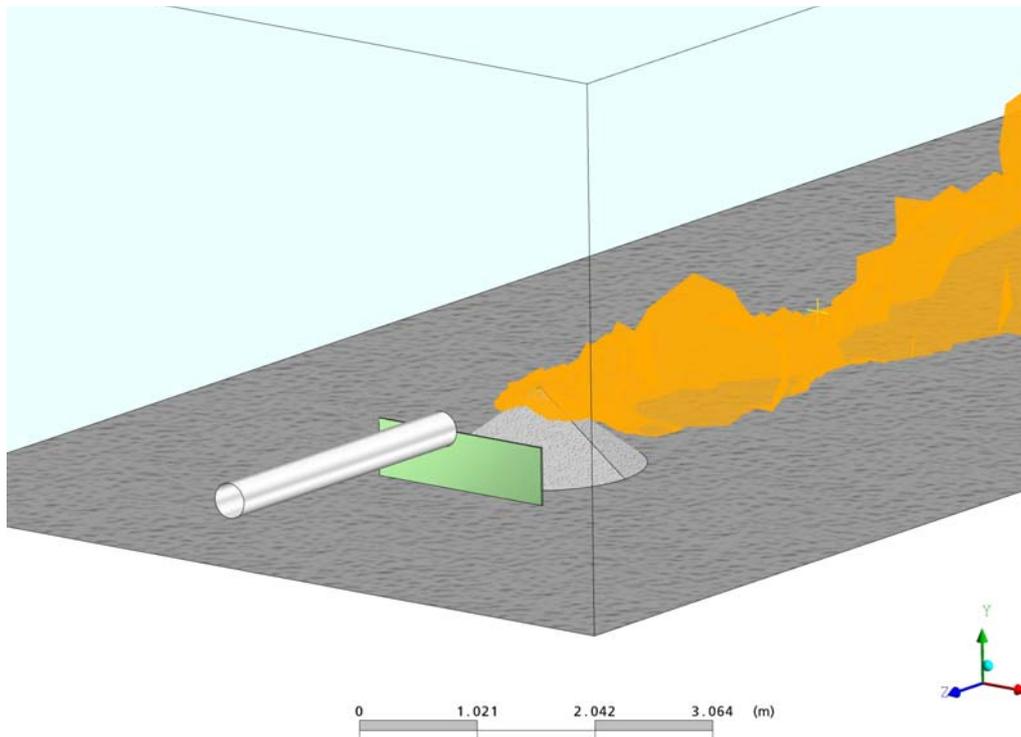


Figura 283: Ejemplo de evolución del polvo en simulación con barrera

La comparación de los valores obtenidos en las simulaciones y los medidos en campo que hemos expuesto en éste apartado, están en línea con los resultados descritos en apartados anteriores del presente capítulo correspondientes a las simulaciones efectuadas mediante el que hemos denominado método Post.

6.-ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES DE PROTECCIONES. BARRERAS

6.1.-CONFIGURACIÓN SÓLIDA PLANA, SÓLIDA CON CURVATURA SUPERIOR Y CON APERTURAS

En éste apartado se ha tomado como referente las barreras de altura $1,2 H$ (13,2 m) situadas a $3 H$ (33 m) que son las que tal como hemos visto en apartados anteriores, minimizan el impacto ambiental producido, esto es, dan lugar a la mínima emisión del polvo en suspensión, figura 284. En esta figura también se muestra esta distribución de barrera, distancia y altura, en un puesto operativo.

Se realizaron y estudiaron 6 modelos mediante CFD:

- 1 con una barrera plana sólida vertical sin apertura inferior.
- 2 modelos con barreras planas sólidas y aperturas inferiores de 1 y 2 m.
- 1 modelo a barrera sólida curva sin apertura inferior.
- 2 modelos a barreras curvas con aperturas inferiores de 1 y 2 m.

Los resultados obtenidos para las emisiones de polvo en kg en cada una de las simulaciones se exponen en la tabla 26, donde destaca para el caso estudiado que la emisión mínima de polvo corresponde a la barrera con una apertura en la parte inferior de 2 m. La justificación e interpretación de los resultados obtenidos se exponen en las figuras 285 a 289.

Emisiones kg		
	Barrera plana	Barrera curva
Barrera sólida	246	275
Con apertura inferior de 1 m	222	262
Con apertura inferior de 2 m	152	216

Tabla 26: Emisiones de polvo para distintas configuraciones de barreras simples

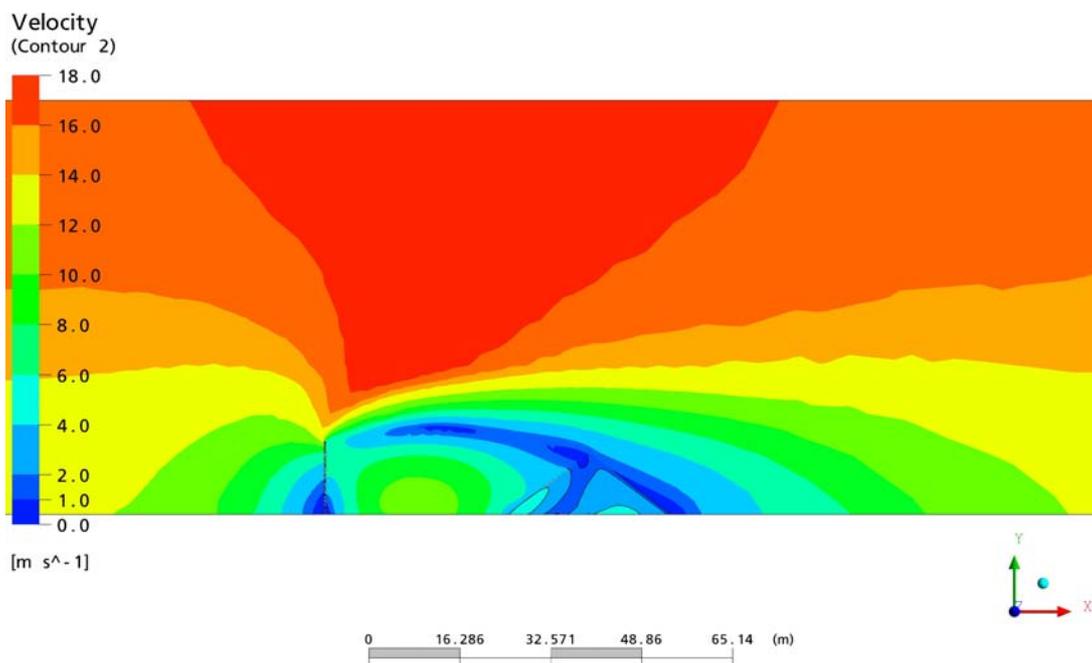




Figura 284: Evolución del polvo en barrera plana sólida

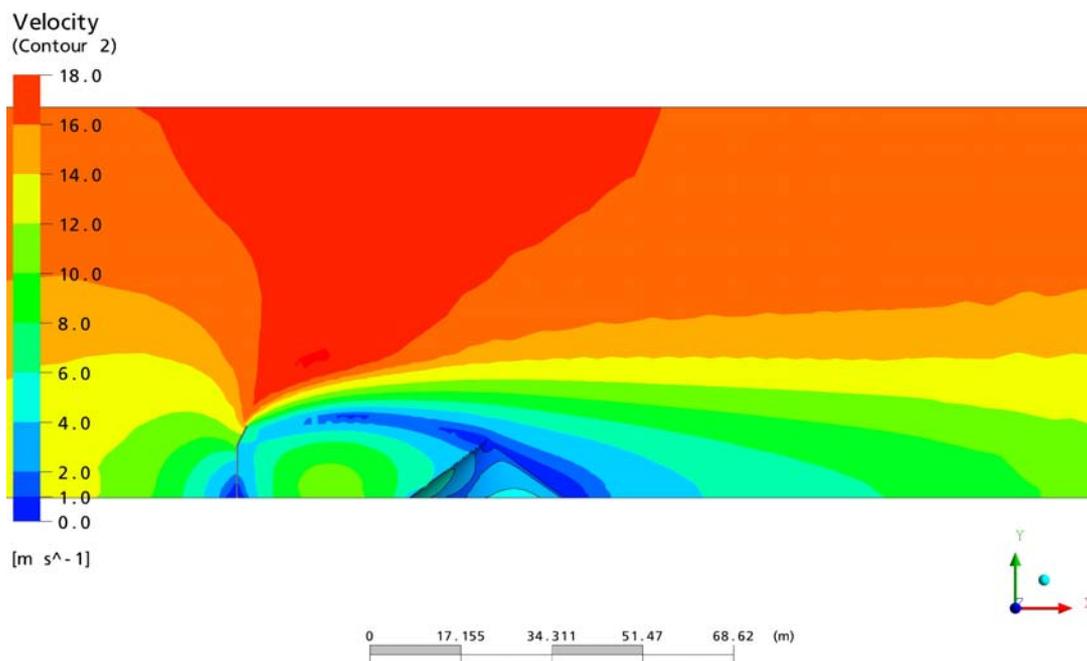


Figura 285: Evolución del polvo en barrera sólida con curvatura superior

Como se ve en la tabla 26 la cantidad de polvo emitido es inferior en las barreras sólidas planas que en las curvas. Esto se puede constatar observando las figuras 284 y 285 correspondientes respectivamente a dichas barreras. Esta última presenta en la parte de la parva a barlovento, para las mismas velocidades, zonas más pequeñas. También el vórtice de flujo de viento comprendido entre la parva y la barrera da lugar a una zona mayor de más

velocidad en la superficie del apilamiento. Por el contrario, en las barreras curvas, a sotavento de la parva resulta favorecida la distribución de los flujos de viento con menores velocidades, lo cual puede implicar, en éste caso, unas deposiciones de polvo a distancias más alejadas de la parva lo cual puede ser interesante.

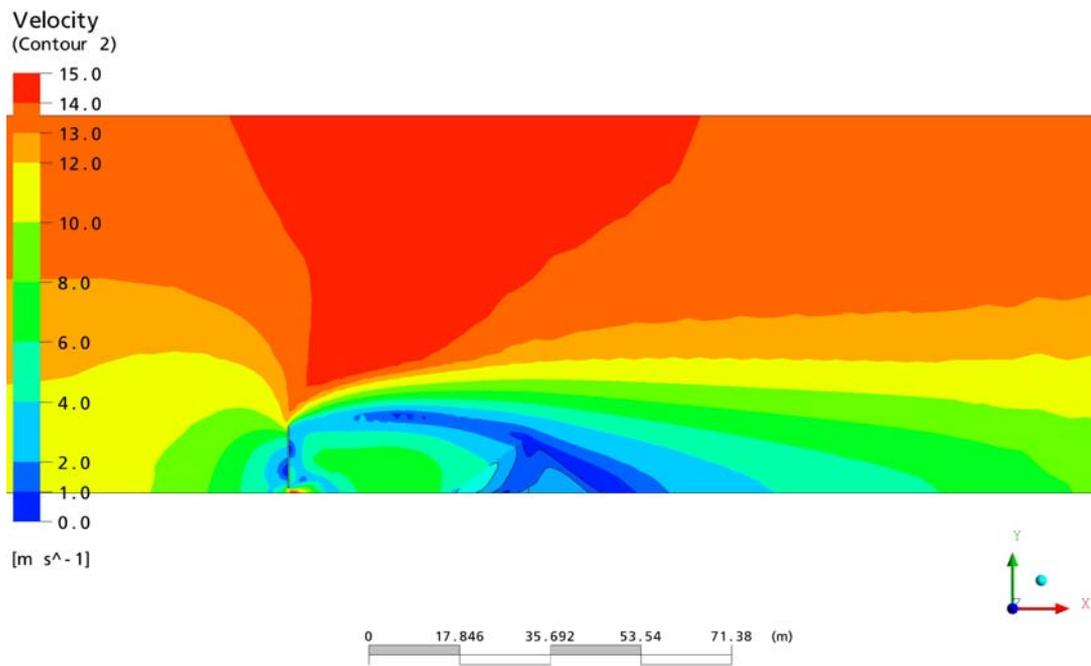


Figura 286: Evolución del polvo en barrera sólida plana y apertura inferior de 1 m

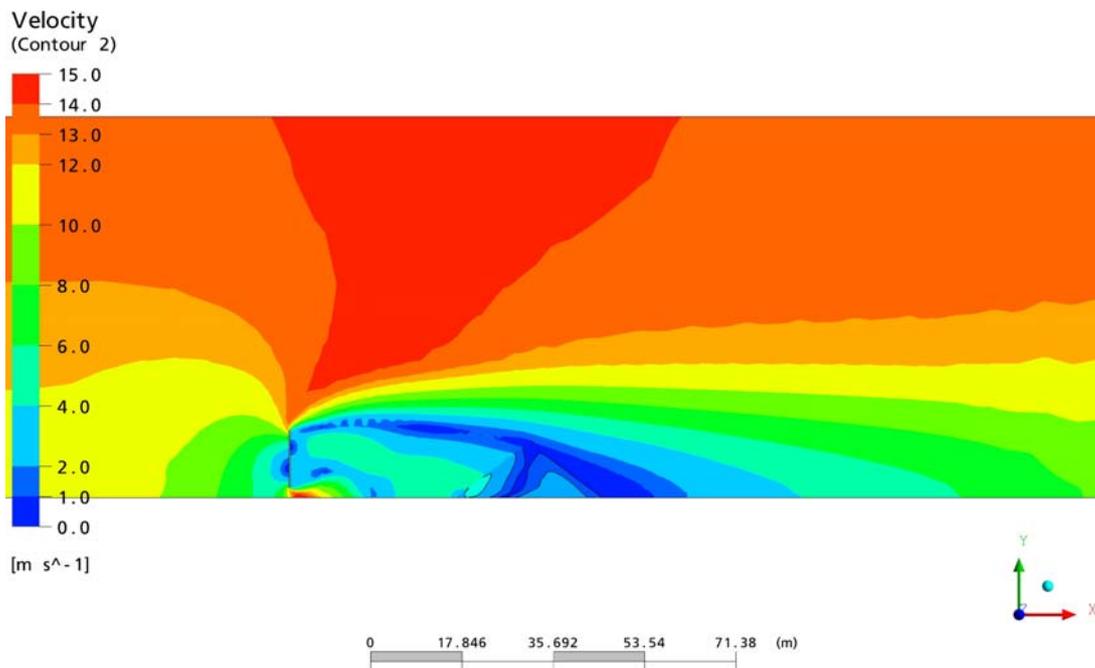


Figura 287: Evolución del polvo en barrera sólida plana y apertura inferior de 2 m

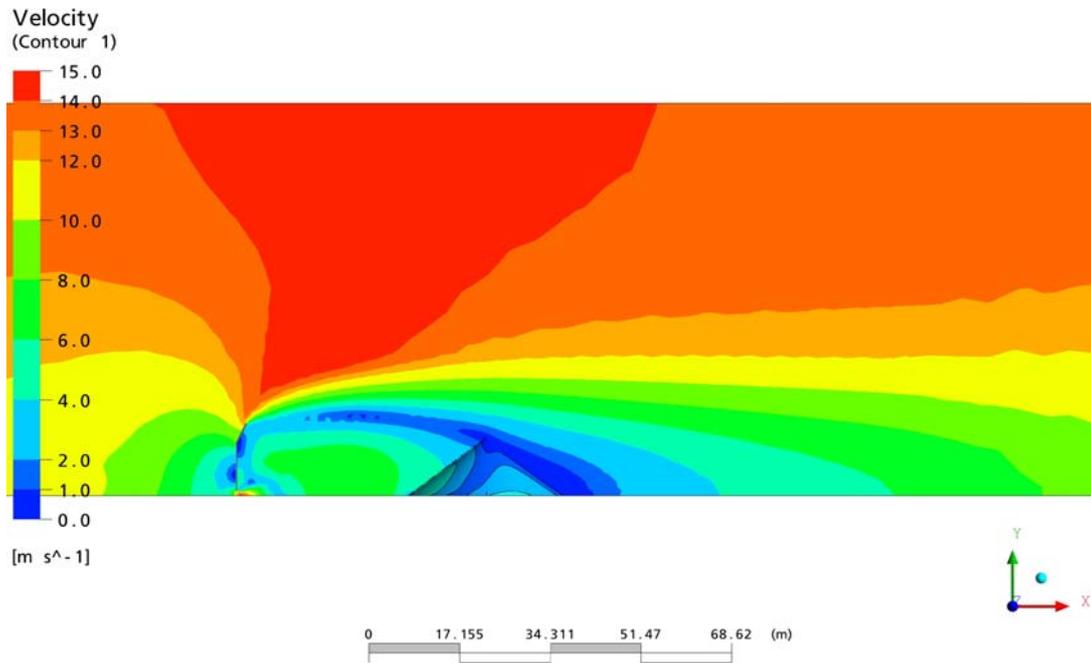


Figura 288: Evolución del polvo en barrera sólida curva y apertura inferior de 1 m

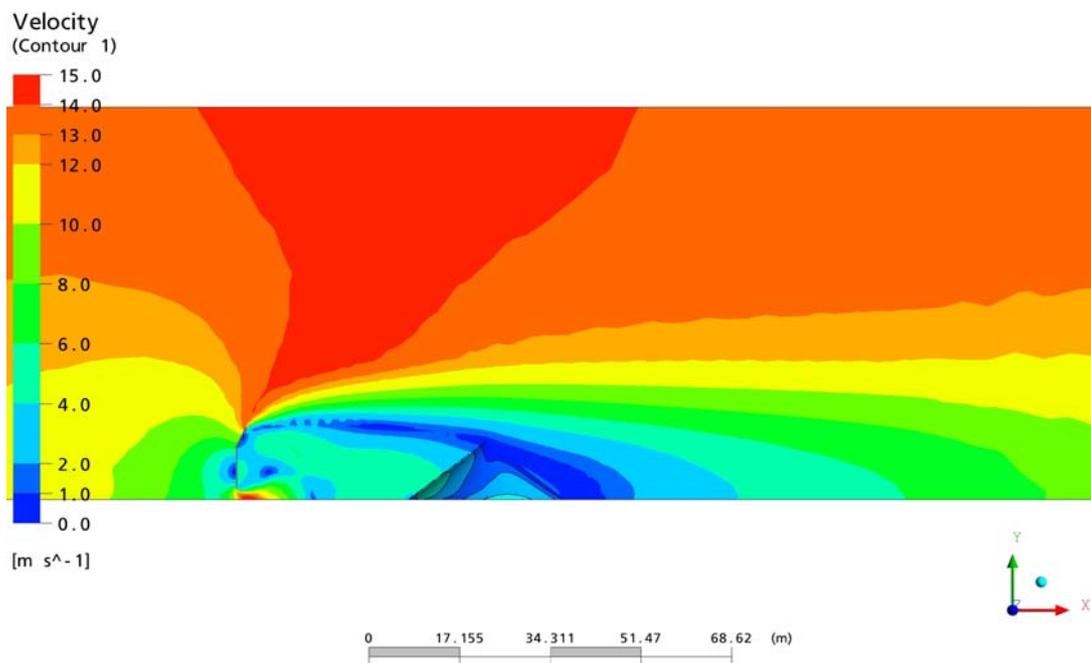


Figura 289: Ejemplo de evolución del polvo en barrera sólida curva y apertura inferior de 2 m

Lo comentado en el párrafo anterior es aplicable al caso de las barreras con apertura en la parte inferior. Destacaremos en éste caso las siguientes particularidades que dan lugar a las emisiones inferiores de polvo. A barlovento

de la parva y en su superficie, la zona de menores velocidades es sensiblemente mayor en el caso de de la barrera plana con apertura de 2 m, que en el caso de la barrera curva con la misma apertura. Asimismo, el vórtice del flujo de viento, la distribución de velocidades y la amplitud de las zonas de igual velocidad es también menor. Las aperturas inferiores son prácticamente iguales en ambos casos pero en comparación con las barreras sin apertura, el vórtice del flujo de viento entre la parva y la barrera presenta zonas de menor velocidad. Lo anteriormente explicado se ilustra en las figuras 290 y 291 correspondientes a la vista en planta de los modelos con menor y mayor emisión.

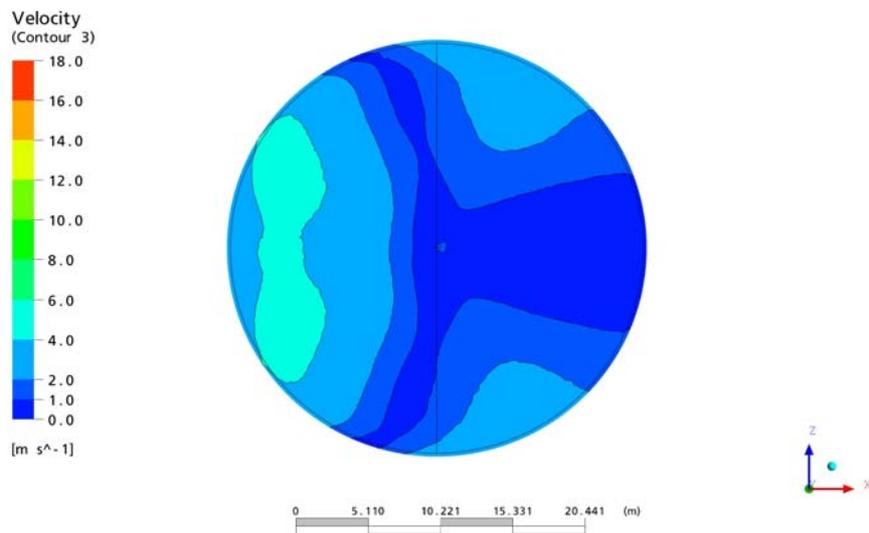


Figura 290: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de menor emisión

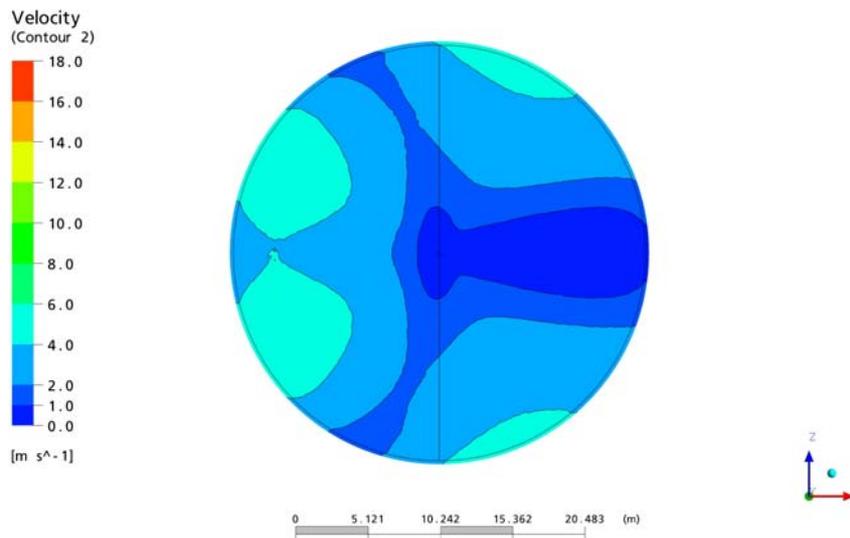


Figura 291: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de mayor emisión

6.2.-BARRERAS DOBLES. CONFIGURACIÓN DE MINIMIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

En éste apartado se ha tomado como referente las barreras de altura 1,2 H (13,2 m) situadas a 3 H (33 m) a barlovento y a sotavento de la parva.

Se realizaron y estudiaron 6 modelos mediante CFD: 2 barreras planas y curvas sólidas verticales sin apertura inferior, 2 barreras planas sólidas y aperturas inferiores de 1 y 2 m y 2 barreras curvas con aperturas inferiores de 1 y 2 m.

Los resultados obtenidos para las emisiones de polvo en kg en cada una de las simulaciones se expone en la tabla 27, donde destaca para el caso estudiado que la emisión mínima de polvo corresponde a las parvas entre barreras sólidas planas, presentando en contra de los resultados vistos en el apartado anterior, para el caso de parvas comprendidas entre barreras planas y curvas con aperturas inferiores, valores de emisión de polvo superiores al caso anterior. Asimismo los valores de emisión mínimos de la tabla 27, parva entre dos barreras, son inferiores a los de la tabla 26, parva protegida con una sola barrera. Por el contrario dichos valores de emisión en el caso de parvas protegidas por dos barreras con aperturas son inferiores a las parvas protegidas por una simple barrera también con apertura.

La justificación e interpretación de los resultados obtenidos, en línea con los razonamientos expuestos de las evoluciones de las distribuciones de los flujos de viento sobre las parvas (magnitudes de las velocidades y zonas de máximas y mínimas velocidades) se exponen en las figuras 292 a 297.

Emisiones kg		
	Barrera plana	Barrera curva
Barrera sólida	217	227
Con apertura inferior de 1 m	242	254
Con apertura inferior de 2 m	181	212

Tabla 27: Emisiones de polvo para distintas configuraciones de barreras dobles

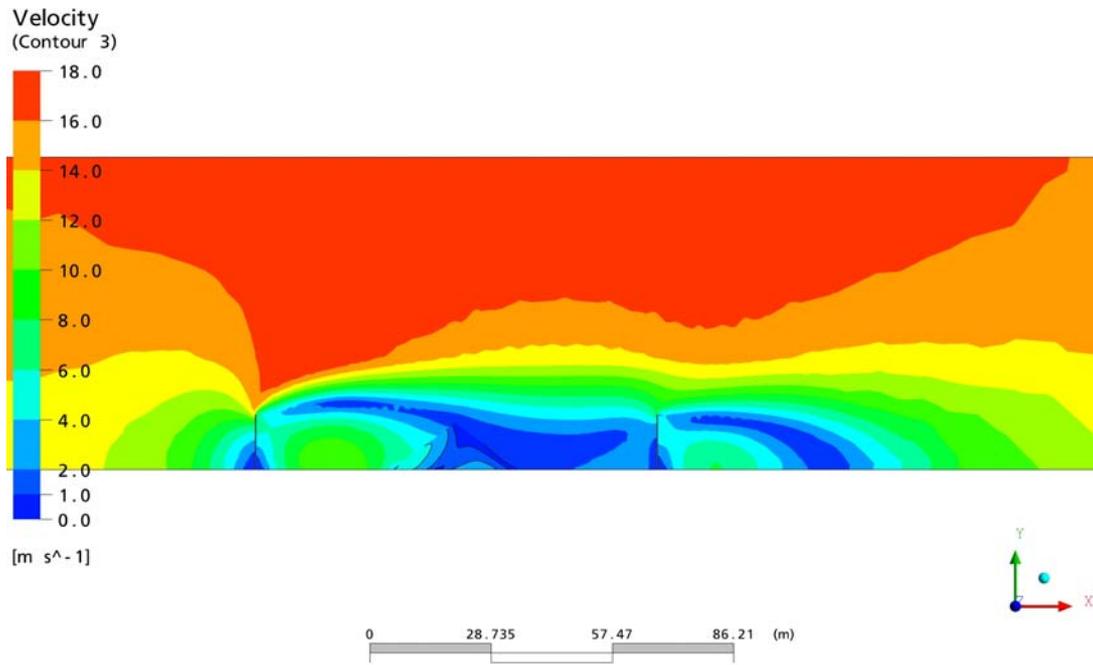


Figura 292: Ejemplo de evolución del polvo en parva entre dos barreras planas sólidas

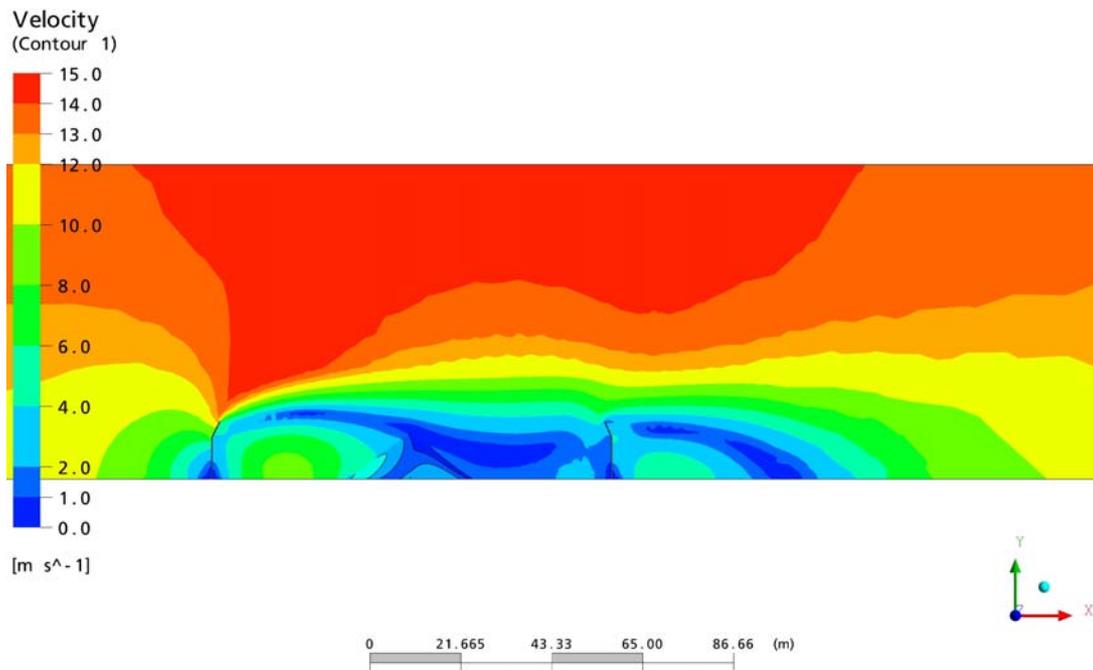


Figura 293: Evolución del polvo en parva entre dos barrera sólida con curvatura superior

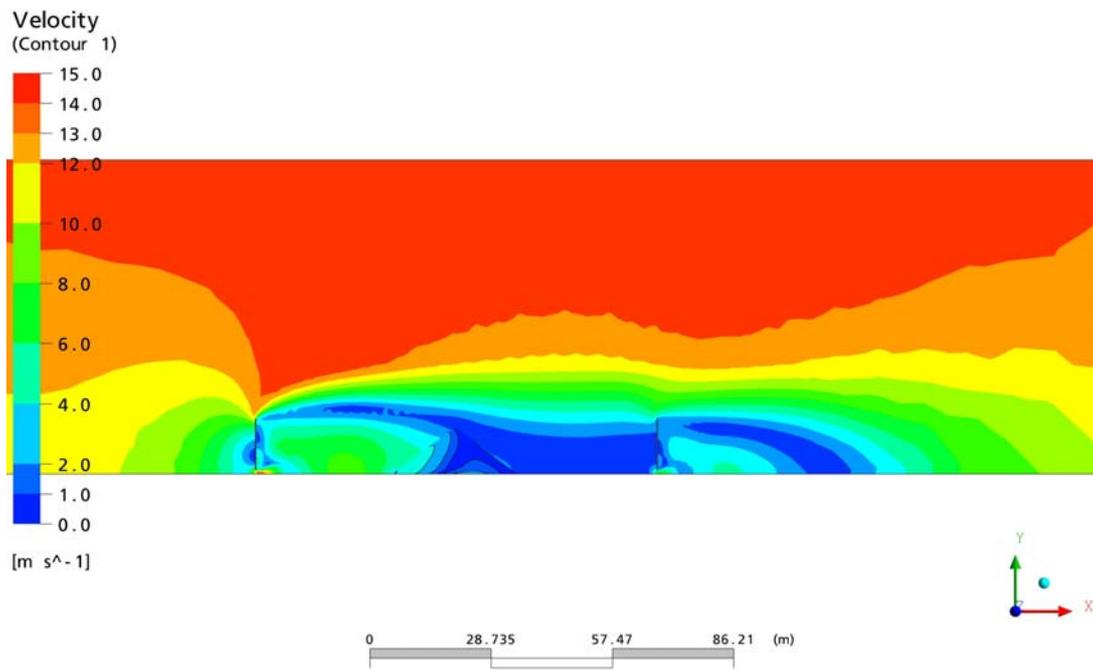


Figura 294: Evolución del polvo entre dos barreras sólidas planas con apertura inferior de 1 m

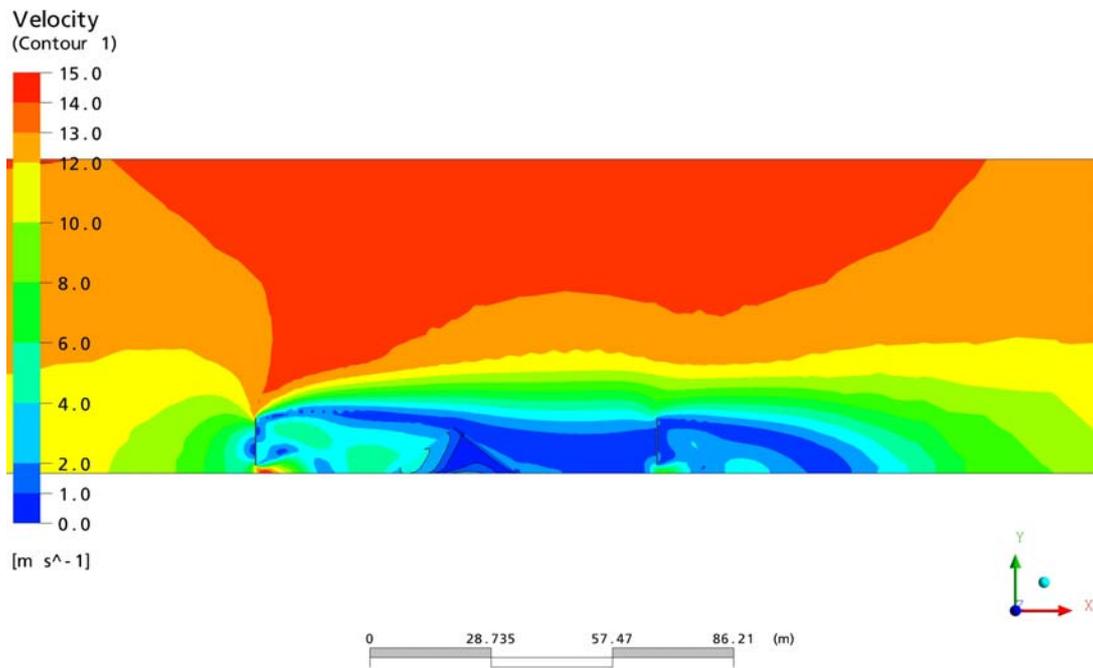


Figura 295: Evolución del polvo entre dos barreras sólidas planas y apertura inferior de 2 m

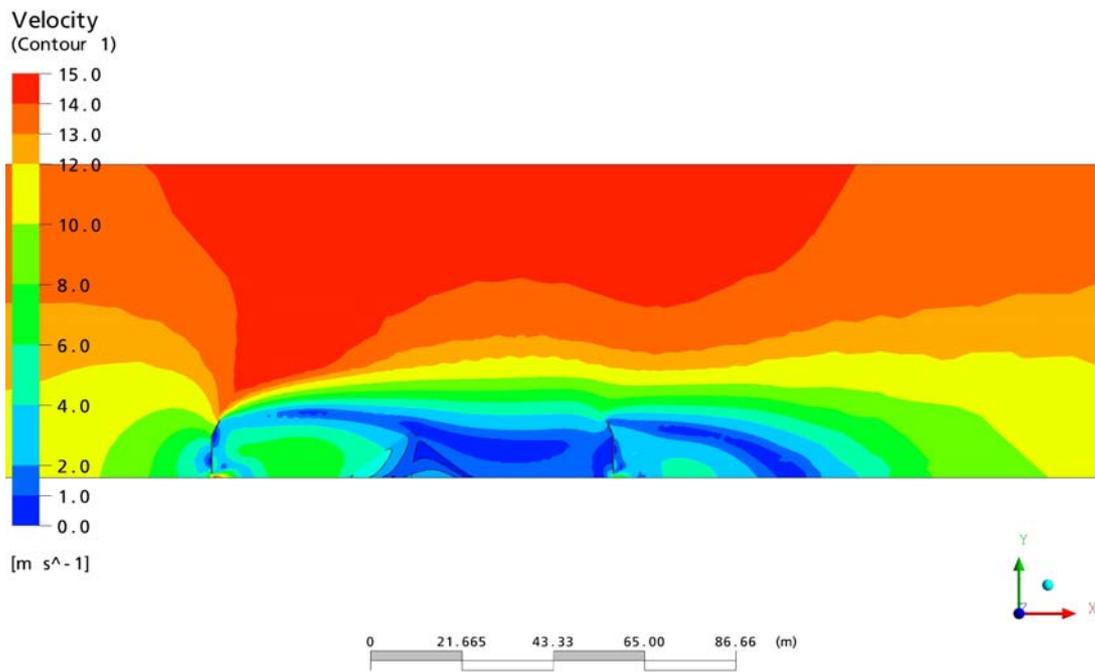


Figura 296: Evolución del polvo en barrera sólida curva y apertura inferior de 1 m

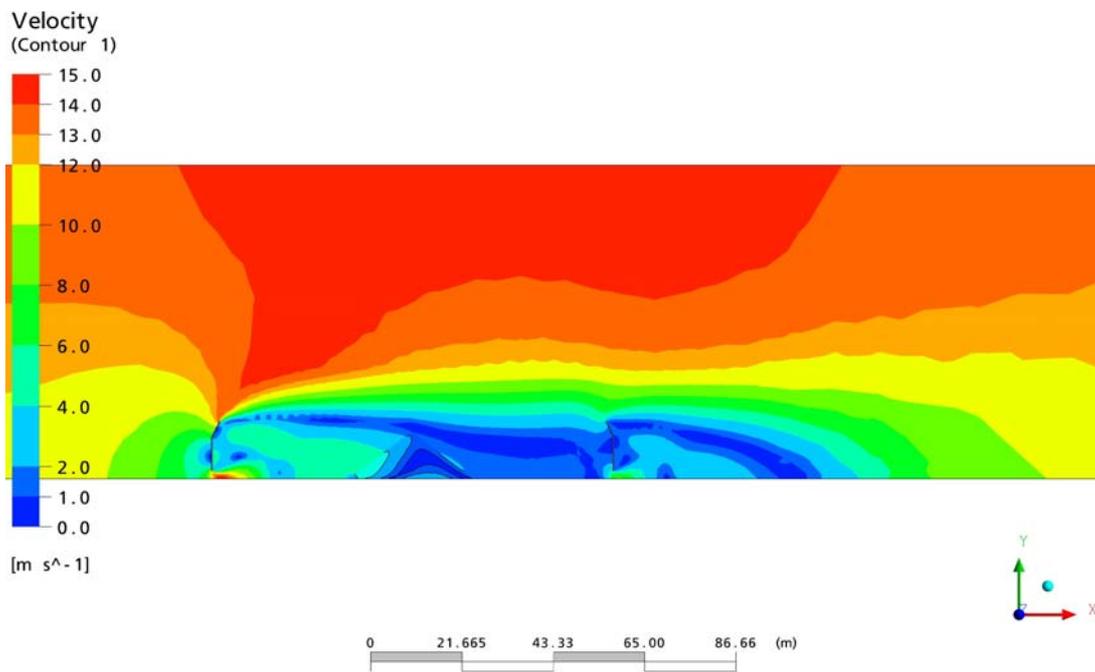


Figura 297: Evolución del polvo entre barreras sólidas curvas con apertura inferior de 2 m

Lo anteriormente explicado se ilustra en las figuras 298 y 299 correspondientes a la vista en planta de los modelos con menor y mayor emisión.

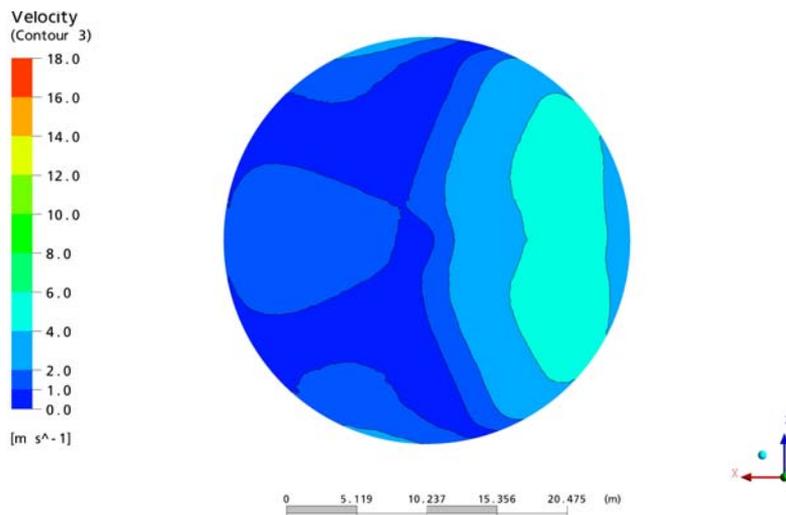


Figura 298: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de menor emisión

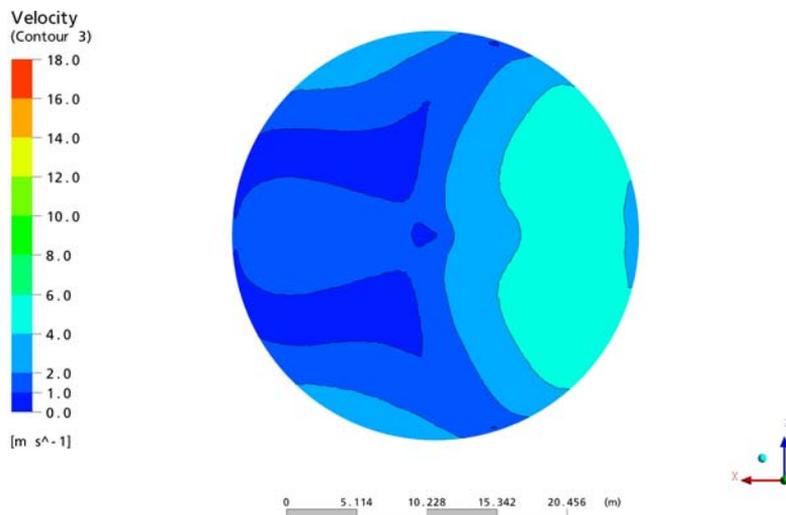


Figura 299: Velocidades de viento sobre la superficie de la parva en caso de mayor emisión



Figura 300: Configuración doble de barreras en un sistema portuario

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

CONCLUSIONES

- Aún siendo válidas, hemos visto las limitaciones en las metodologías de los criterios convencionales y de los de la EPA en la evaluación de la cantidad de material particulado que se pone en suspensión por la acción del viento. Asimismo, dichas metodologías no tienen en cuenta la propagación en el espacio (aunque sea limitado) del polvo emitido.
- También hemos visto el papel fundamental que tiene la distribución del viento en la puesta en suspensión y la propagación del material particulado constatando la validez del software CFD empleado. El CFD es una herramienta potente de cálculo que permite no sólo calcular flujos multifase gaseosos, sino también modelizar problemas multifase polvo-aire.
- Las modelizaciones mediante métodos numéricos computacionales CFD, resuelven los problemas de las metodologías convencionales: complejidad y rigidez en los cálculos y limitación en la geometría y posicionamiento espacial de los apilamientos.
- Una parte importante de la investigación ha sido la correcta elección y contrastación del modelo de turbulencia empleado (K-épsilon), de los existentes en las ecuaciones RANS de los DNS. Además de la importancia de poder variar la geometría y el posicionamiento (cálculos en CFD4D), ésta metodología nos permite el estudio de la influencia de las variables operacionales industriales que se deseen. También nos permite el importante análisis en tiempo real (cálculos en CFD4D), lo cual implica que se puede realizar estudios de diseños iniciales y estudios continuos de optimizaciones de dichos diseños en función de las variables de campo que se aporten.
- A partir de las modelizaciones realizadas mediante los métodos numéricos computacionales se pueden implementar programas sencillos de fácil acceso por parte de técnicos de las empresas, diseñadores de apilamientos de minerales a la intemperie. Las herramientas de software desarrolladas HIEPA v1.0 y CAFM v1.0, permiten calcular y localizar las emisiones de forma rápida y sencilla.

- El empleo de barreras para la protección de las parvas, puede llegar a reducir la emisión hasta en un 95% para las peores condiciones ambientales y operacionales. La eficacia de las barreras depende de su ubicación en cuanto a distancia a la base del apilamiento. Asimismo la eficacia de las barreras depende de la relación de su altura con la de la parva cónica de almacenamiento. Ambos parámetros de diseño, altura de la barrera y distancia a la base de la parva están directamente relacionadas entre si y con la cantidad de polvo emitido a la atmósfera.
- Lo anterior redundará en beneficio de las administraciones y de las empresas tanto desde el punto de vista de la minimización del impacto ambiental por polvo, así como una importante menor pérdida de material particulado, en definitiva del mineral, con la consiguiente mejoría de costes.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

- Inclusión de elementos barrera en diversas configuraciones, tanto en posición como en porosidad de los materiales que la forman.
- Inclusión de fases líquidas en forma de nubes que permitirán la mitigación de las emisiones mediante pulverización de agua.
- Estudio de variación de la velocidad friccional límite con elementos discretos y efecto de humedad y otras fuerzas cohesivas. Posibilidad de variación en el peso de las partículas a medida que se desplazan por un aire cargado de humedad.
- Estudio de la propagación del polvo a distancias grandes mediante las técnicas GIS.
- Volcado en ambas direcciones de los estudios y modelos de los dos últimos apartados con los modelos que presentamos basados en técnicas numéricas computacionales CFD.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EPA Technical Assesment Paper, 1998. Available Information for Estimating Air Emissions for Stone Mining and Quarrying Operations.
- [2] Stunder B., and Arya S., 1988. Windbreak Effectiveness For Storage Pile Fugitive Dust Control: A Wind Tunnel Study, *Journal Of The Air Pollution Control Association*, 38, 135-143.
- [3] Diego I., Rodríguez R., Toraño J., 2006. Surface velocity contour analysis in the airborne dust generation due to open storage piles. 1,12. ISBN: 84-89925-70-4. ECCOMAS Editorial: CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería). España.
- [4] Toraño J., Rodríguez R., Diego I., Pelegry A., 2007. Influence of the Pile Shape on Wind Erosion. *CFD Emission Simulation, Applied Mathematical Modelling*. 21-44.
- [5] Diego I., Torno S., García B., Pelegry A., Toraño J., 2007. Herramienta de inventario de emisiones pulverulentas en apilamientos HIEPA v1.0. Clase de obra: Programa de ordenador y manual de uso. Nº de Asiento Registral: 5/2007/105.
- [6] Diego I., Torno S., García B., Toraño J., 2007. Herramienta de inventario de emisiones pulverulentas en apilamientos (HIEPA v1.0) de minerales en intemperie. IX Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Lugo. España.
- [7] Diego I., Pelegry A., Toraño J., Menéndez M., Torno S., 2008. Simultaneous CFD Evaluation of Wind Flow and Dust Emission in Open Storage Piles, *Applied Mathematical Modelling*. 31-7. 21-44.
- [8] Diego I., Torno S., Toraño J., Menéndez M., 2008. CFD Simulations of the aerodynamic resistance in the underground spaces ventilation, *WIT Transactions on the Built Environment*. ISSN: 1743-3509. Article in Press.
- [9] Diego I., Toraño J., Torno S., García B., 2008. Experimental tests and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations of barriers installed around open storage piles of raw materials, *Seventh International Conference on Advances in Fluid Mechanics (AFM 2008)*. The New Forest, UK.
- [10] Diego I., Torno S., Toraño J., Menéndez M., 2008. Multiphase simulation of the dust emission from a conical stockpile vs. experimental measurements, *Computers & Fluids*. ISSN: 0045-7930. Article in Press.
- [11] Torno S., Diego I., Toraño J., Menéndez M., 2008. Dust emission calculations in open storage piles protected by means of barriers and CFD and Experimental test, *Journal of Environmental Engineering and Science*. ISSN: 1496-256X. Article in Press.
- [12] Alhajraf S., 2004. Computacional fluid dynamc modelling of drifting particoles at porous fences, *Enviromental Modelling&Software*, 19, 169-170.

- [13] Estudios varios del Instituto Nacional de Silicosis.
- [14] Informe de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. 1997.
- [15] Ballester F., 2003. Estudio multicéntrico español sobre la relación entre contaminación atmosférica y mortalidad. EMECAM-EMECAS. Medicina Clínica. Madrid.
- [16] Contaminación Ambiental y Cambio Climático. El futuro de nuestros niños. 4ª Conferencia Ministerial de la OMS. Budapest, 2004.
- [17] Querol X., Alastuey A., Rodríguez S., Viana M., Artiñano B., Salvador P., Mantilla E., García S., Fernández R., De la Rosa J., Sánchez de la Campa A., Menéndez M., 2002. Origen de las partículas de suspensión en España. Implicaciones en la implementación de la directiva europea de calidad del aire. VI Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid.
- [18] Artiñano B., Querol X., Salvador P., Rodríguez S., Alastuey A., 2001. Assessment of airborne particulate matter in Spain in response to the new EU-directive, Atmospheric Environment, 35, Supplement I, 43-53.
- [19] Hazenkamp-von Arx M., 2004. PM_{2,5} and NO₂ assessment in 21 European study centres of ECRHS II: annual means and seasonal differences, Atmospheric Environment 38, 13, 1943-1953.
- [20] Sloss L.L., Smith I.M., 2002. PM₁₀ and PM_{2,5} legislation, measurement and control, International Journal of Environment and Pollution, 17, 1-2, 157-169.
- [21] ITC 07.1.04: Condiciones ambientales. Lucha contra el polvo en trabajos a cielo abierto. Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.
- [22] Johansson C., Johansson P., 2002. Particulate matter in the underground of Stockholm, Atmospheric Environment, 37, 1, 3-9.
- [23] Oravisjärvi K., Timonen K.L., Wiikinkoski T., Ruuskanen A.R., Heinanen K., Ruuskanen J., 2003. Source contributions to PM_{2,5} particles in the urban air of a town situated close to a steel works, Atmospheric Environment, 37, 8, 1013-1022.
- [24] LIFE-HADA, 2003. Estimación de factores de emisión de partículas emitidas por actividades portuarias. Dpto. Impacto Ambiental de la Energía e Instituto Jaime Almera del CSIC.
- [25] Bernabé J.M., Carretero M.I., 2003. Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido de partículas atmosféricas del área industrial de Huelva. Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía. 26-A, 61-62. Madrid.
- [26] Espert V., López A., 2000. Dispersión de contaminantes en la atmósfera. Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. ETSII. Universidad Politécnica de Valencia.

- [27] Catalá J., 1980. Manual de Ingeniería Ambiental. Atmósfera, meteorología, climatología. Ed. Escuela Organización Industrial, Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- [28] Pasquill F., Smith F.B., 1983. Atmospheric diffusion. Ed. John Wiley and Sons. New York.
- [29] Aparicio M., 1999. Guía práctica para el control y prevención del polvo en canteras y graveras. Entorno Gráfico. Madrid.
- [30] Cowherd Jr., 1983. A New Approach To Estimating Wind Generated Emissions From Coal Storage Piles, Presented at the APCA Specialty Conference on Fugitive Dust Issues in the Coal Use Cycle, Pittsburgh, PA.
- [31] Muleski G. E., 1985. Coal Yard Wind Erosion Measurement, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, March.
- [32] Update Of Fugitive Dust Emissions Factors In AP-42 Section 11.2 — Wind Erosion, MRI No. 8985-K, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, 1988.
- [33] Chepil W. S., 1952. Improved Rotary Sieve For Measuring State And Stability Of Dry Soil Structure, Soil Science Society Of America Proceedings, 16:113-117.
- [34] Gillette D. A., Adams J., Endo A., Smith D., Kihl R., 1980. Threshold Velocities For Input Of Soil Particles Into The Air By Desert Soils", Journal Of Geophysical Research, 85(C10): 5621-5630.
- [35] Cowherd C., Muleski G.E., Kinsey J.S., 1988. Control Of Open Fugitive Dust Sources, EPA 450/3-88-008, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, September.
- [36] Local Climatological Data, National Climatic Center, Asheville, NC.
- [37] Changery M. J., 1978. National Wind Data Index Final Report, HCO/T1041-01 UC-60, National Climatic Center, Asheville, NC, December.
- [38] Axtell K., Cowherd C., 1984. Improved Emission Factors For Fugitive Dust From Surface Coal Mining Sources, EPA-600/7-84-048, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, March.
- [39] CFX 2004. CFX User's Guide V. 5.7.
- [40] Page S.J. and Organiscak J.A., 2004. Semi-Empirical Model for Predicting Surface Coal Mine Drill Respirable Dust Emissions, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 18, 1, 42-59.
- [41] Xuan J., 2004. Turbulence Factors for Threshold Velocity and Emission Rate of Atmospheric Mineral Dust, Atmospheric Environment, 38, 1777-1783.
- [42] Witt P.J., Carey K., Nguyen T., 2002. Prediction of Dust Loss From Conveyors Using CFD Modelling, Applied Mathematical Modelling, 26(2), 297-309.

- [43] Muleski G.E., 1991. Review of Surface Coal Mining Emission Factors, EPA-454/R-95-007. U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- [44] Anon, 1979. Compilation of Past Practices and Interpretations by EPA Region VIII on Air Quality-Mining”, US EPA, Region VIII, Denver.
- [45] Parker S.T., Kinnersley R.P., 2004. A Computational and Wind Tunnel Study of Particle Dry Deposition in Complex Topography, *Atmospheric Environment*, 38, 3867-3878.
- [46] Temmerman L., Wang C., Leschziner M.A., 2004. A Comparative Study Of Separation From A Three-Dimensional Hill Using Large Eddy Simulation And Second-Moment-Closure Rans Modelling. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. ECCOMAS.
- [47] Silvester S.A., Lowndes I.S., Kingman S.W., 2004. The ventilation of an underground crushing plant. *Mining Technology, Transaction of the Institute of Mining & Metallurgy (A)*, 113, 201-214.
- [48] Castro I.P., Apsley D.D., 1997. Flow and Dispersion Over Topography: a Comparison Between Numerical and Laboratory Data for Two-Dimensional Flows, *Atmospheric Environment*, 31, 6, 839-850.
- [49] Toraño J., Rodríguez R., Diego I., 2006. Surface velocity contour analysis in the airborne dust generation due to open storage piles. European Conference on Computational Fluid Dynamics. ECCOMAS CFD 2006.
- [50] Castro I.P., Snyder W.H., Lawson Jr.R.E., 1988. Wind Direction Effects on Dispersion From Sources Downwind of Steep Hills, *Atmospheric Environment*, 22, 10, 2229-2238.
- [51] Page S.J., Organiscak J.A., 2004. Semi-Empirical Model for Predicting Surface Coal Mine Drill Respirable Dust Emissions, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 18, 1, 42-59.
- [52] Xuan J., 2004. Turbulence Factors for Threshold Velocity and Emission Rate of Atmospheric Mineral Dust, *Atmospheric Environment* 38, 1777-1783.
- [53] Witt P.J., Carey K., Nguyen T., 2002. Prediction of Dust Loss From Conveyors Using CFD Modelling, *Applied Mathematical Modelling*, 26(2), 297-309.
- [54] Muleski G.E., 1991. Review of Surface Coal Mining Emission Factors, EPA-454/R-95-007. U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- [55] Anon, 1981. Compilation of Past Practices and Interpretations by EPA Region VIII on Air Quality-Mining”, US EPA, Region VIII, Denver.

[56] Diego I., Torno S., García B., Pelegrí A., Toraño J., 2007. Herramienta de inventario de emisiones pulverulentas en apilamientos HIEPA v1.0. Clase de obra: Programa de ordenador y manual de uso. N° de Asiento Registral: 5/2007/105.

[57] <http://www.inm.es>

[58] <http://www.noaa.gov/>: <http://weather.noaa.gov/weather/metar.shtml>

[59] <http://www.wunderground.com/weatherstation/WXDailyHistory.asp>

[60] Weggel J.R., 1999. Maximum daily wind gusts related to mean daily wind speed, *Journal of Structural Engineering*, 125, 4.

[61] ASCE/SEI American Society of civil Engineers/Structural Engineering Institute. [ncsea-sei-bssc_20joint_20ibc_20code_20changes_202006.pdf](#).

[62] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Particle Transport Theory: Lagrangian Tracking Implementation, pp 174.

[63] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory. Particle Transport Theory: Lagrangian Tracking Implementation, pp 173.

[64] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory. Multiphase Flow Theory: Interphase Momentum Transfer Models, pp 124.

[65] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Solver Modelling. Particle Transport Modelling, pp 229.

[66] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Solver Modelling/Basic Capabilities Modelling/Point Sources/ Page 26.

[67] Dale A., Gillette D., Adams J., Endo A., Smith D., Kihl R., 1980. Threshold Velocities for Input Soil Particles into the Air by Desert Soils. *Journal of Geophysical Research*, 85, C10, 5621 – 5630.

[68] Witt P.J., Carey K., Nguyen T., 2002. Prediction of Dust Loss From Conveyors Using CFD Modelling, *Applied Mathematical Modelling*, 26(2), 297-309.

[69] Parker S.T., Kinnersley R.P., 2004. A Computational and Wind Tunnel Study of Particle Dry Deposition in Complex Topography, *Atmospheric Environment*, 38, 3867-3878.

[70] Hayden K.S., Park K., Curtis J.S., 2003. Effect of Particle Characteristics on Particle Pickup Velocity, *Powder Technology* 13, 7-14.

[71] Gillette, D., 1978. A Wind Tunnel Simulation of the Erosion of Soil: Effect of Soil Texture, Sandblasting, Wind Speed, and Soil Consolidation on Dust Production, *Atmospheric Environment*, 12, 1735.

[72] <http://www.epa.gov/>

- [73] Muleski G.E., 1985. Coal Yard Wind Erosion Measurement, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, March.
- [74] Lee S.J., Parkb K.Ch., Parka Ch.W., 2002. Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements. *Atmospheric Environment*, 36, 1453-1463.
- [75] Lee S.J., Kim H.B., 1999. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp 311-326.
- [76] Moloney K.M., Lowndes I.S., Hargrave G.K., 1999. Analyzes of flow patterns in drivages with auxiliary ventilation, *Transaction of the Institute of Mining & Metallurgy*, 108, 17-26.
- [77] Moloney K.M., Lowndes I.S., 2004. Comparison of measured underground air velocities and air flows simulated by computational fluid dynamic, *Transaction of the Institute of Mining & Metallurgy*, 108, 105-114.
- [78] Wala A., Jacob J., Brown J., Huang G., 2003. New approaches to mine-face ventilation, *Mining engineering*, pp 25-30.
- [79] Toraño J., Rodriguez R., Diego I., Rivas J.M., Pelegry A., 2007. Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation, *Applied Mathematical Modelling*, 31, 2487–2502.
- [80] Silvester S.A., Lowndes I.S., Kingman S.W., 2004. The ventilation of an underground crushing plant. *Mining Technology*, *Transaction of the Institute of Mining & Metallurgy (A)*, 113, 201-214.
- [81] Parsons D.R., Walker I.J., Wiggs G.F.S., 2004. Numerical modelling of flow atructures over idealized transverse aeolian dunes of varying geometry, *Geomorphology*, 59, 149-164.
- [82] Hayden K.S., Park K., Curtir J.S., 2003. Effect of particle characteristics on particle pickup velocity, *Powder Technology*, 131, 7-14.
- [83] Stunder B.J.B., Arya S.P.S., 1988. Windbreak effectiveness for storage piles fugitive dust control: a wind tunnel study, *Journal of Air Pollution Control Association*, 38, 135-143.
- [84] Boldes U., Goldberg A., Di Leo J.M., Colman J., Scarabino A., 2002. Canopy flow and aspects of the response of plants protected by herbaceous shelterbelts and wood fences, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1253-1270.
- [85] Billman B.J., Arya S.P.S., 1985. Windbreak effectiveness for storage-pile fugitive dust control: A wind tunnel study, EPA/600/S3-85/059, United Stated Environmental Protection Agency, Research and Development.
- [86] Wang H., Takle E.S., 1995. A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts, *Boundary-Layer Meteorology*, 75, 141-173.

- [87] Wilson J.D., 1985. Numerical studies of flow through a windbreak, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 21, 119-154.
- [88] Zeng P., Takahashi H., 2000. A first-order closure model for the wind within and above vegetation canopies, *Agricultural & Forest Meteorology*, 103, 301-313.
- [89] Raine J.K., Stevenson D.C., 1977. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamic*, 2, 159-180.
- [90] Perera M.D.A.E.S., 1981. Shelter Venid two-dimensional solid and porous fence, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamic*, 8, 93-104.
- [91] Castro I.P., 1971. Wake characteristics of two-dimensional perforated plates normal to an air-stream, *Journal Fluid Mechanics*, 46, 599-609.
- [92] Kim H.B., Lee S.J., 2001. The structure of turbulent shear flow around a two-dimensional porous fence having a botton gap, *Journal of Fluids and Structures*, 16 (3), 317-329.
- [93] Wang H., Takle E.S., 1996. On the three-dimensionality of shelterbelt structure and its influences on shelter effects, *Boundary-Layer Meteorology*, 79, 83-105.
- [94] Packwood A.R., 2000. Flow through porous fencesin thick boundary layer: Comparisons between laboratory and numerical experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 88, 75-90.
- [95] Packwood A.R., 2005. On modelling porous barriers with CFX. Guildford, Surrey. Personal communications.
- [96] ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory; Flow in porous media, pp 65-67.
- [97] Tiwary A., Morvan H.P., Colls J.J., 2005. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols, *Journal of Aerosol Science*, 37, 990-1015.
- [98] Raupach M.R., Woods N., Dorr G., Leys J.F., Cleugh H.A., 2001. The entrapment of particles by windbreaks, *Atmospheric Environment*, 35, 3373-3383.

**ANEXO I: EJEMPLOS DE CAMPAÑA DE
MEDIDAS EN CAMPO**

1.-INTRODUCCIÓN

De las 6 campañas de medidas efectuadas en los años 2006, 2007 y 2008, para no extendernos demasiado pero a su vez para ilustrar los trabajos realizados, pasamos a exponer de forma resumida, después de una pequeña introducción, la realizada en Julio del año 2007.

Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la Mina de Carbonar S.A. ubicada en Cangas de Narcea. Para la realización de las distintas medidas se comenzó con una serie de acondicionamientos del lugar de trabajo.

En primer lugar, se limpió la zona de trabajo, dando mayor hincapié en el suelo donde posteriormente construiríamos la parva, figura 1. Esta parva estaría formada por apilamiento de carbón todo uno, considerado en las simulaciones con una rugosidad de 1 cm.



Figura 1: Pala limpiando el suelo de trabajo

La parva, de un metro de altura, se forma con la ayuda de una pala “VIATALLIS”, que realizará el montón y lo remodelará con al ayuda de un operario para alcanzar la cota deseada, (figura 2).



Figura 2: Construcción de la parva

Se continuó con el montaje y colocación del ventilador y la manga con la ayuda de distintos operarios, figura 3.



Figura 3: Montaje del ventilador y la tubería de ventilación

Destacar que en ocasiones se producía la caída desde una cinta transportadora de material procedente de los filtros del agua de lavado del

carbón, suceso que no impedía la correcta realización de los ensayos (figura 4).

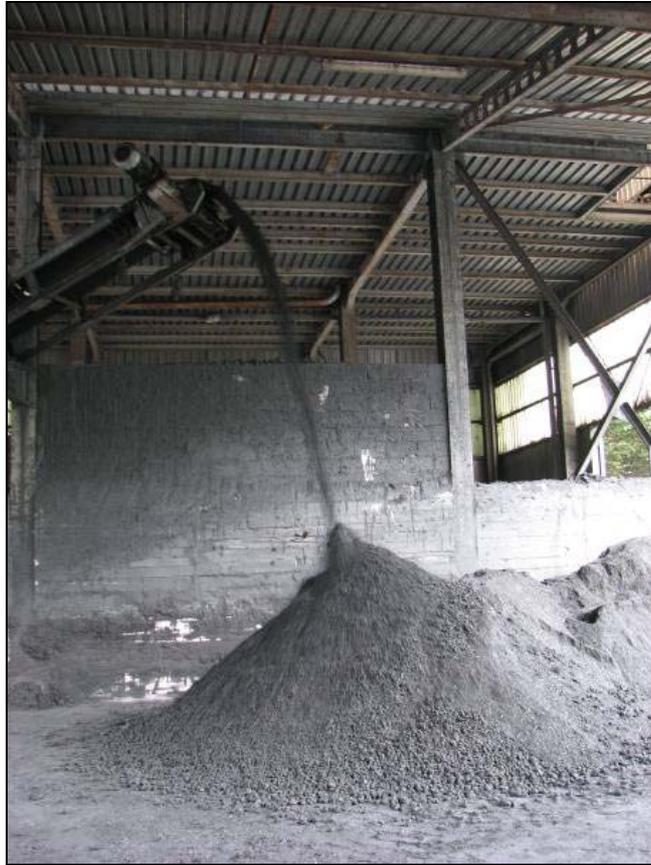


Figura 4: Caída del material del filtro

Una vez realizado todos los preliminares, procedimos a la realización de los distintos ensayos. En un primer momento decidimos colocar los captadores por detrás de la balsa, pero al no obtener resultados los pasamos a la parte delantera. La dirección y velocidad del viento no permitían unas buenas medidas de concentración por lo que decidimos cambiar de sentido toda la instalación.

Se consiguieron resultados aunque no satisfactorios, por lo que se optó por la realización de una parva más pequeña, la mitad de altura que la del día anterior. Se realizaron distintas pruebas y los resultados fueron mejores.

El resultado de las distintas medidas tanto de flujo como de concentración (a partir de los anemómetros, captadores y el multímetro), son los que se presentan en los distintos apartados que podemos ver a continuación.

2.-INSTRUMENTACIÓN

Se utilizaron distintos tipos de instrumentos de medidas para la recopilación de los datos de velocidad del aire, polvo, humedad y temperatura del aire. A continuación se muestra un listado de los mismos:

- dos captadores de polvo.
- dos anemómetros.
- un medidor de humedad en suelos.
- un multímetro.
- tamices homologados TYLER.
- ventilador de 300 mm de diámetro.

Para la realización de las medidas de velocidad se usaron los dos anemómetros que se muestran en la figura 5, uno de ellos de hilo caliente, Velocicalc Plus (TSI) con una sonda que contiene los sensores de velocidad, temperatura y humedad. Y el otro se trata de un anemómetro “de veleta” modelo MiniAir Junior Schiltkuecht, prestado por Carbonar.

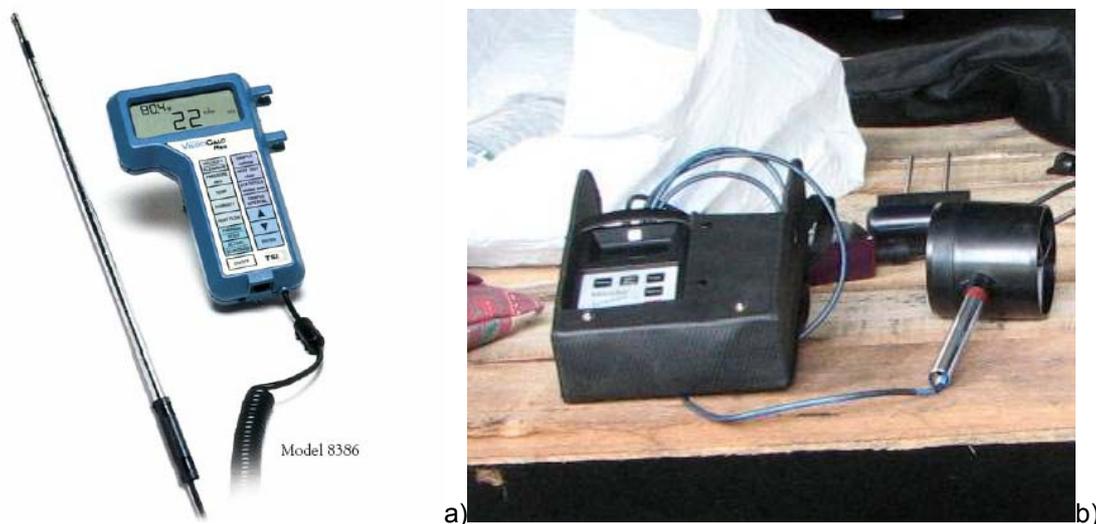


Figura 5: a) Anemómetro de hilo caliente, b) Anemómetro de “veleta”

En el caso de las medidas de concentración se utilizaron dos captadores de polvo, E-Sampler de la casa Met One Instruments, Inc, midiendo partículas totales y aquellas inferiores a 10 micras al colocarle a uno de ellos un ciclón

para captar sólo estos tamaños. Las medidas se guardan en la memoria del captador siendo transferidas al ordenador una vez finalizado el ensayo.

Las medidas se cotejan con las conseguidas a partir del multímetro conectado al captador que mide las partículas totales. Los captadores establecen una relación de conversión directa entre milivoltios y microgramos, de ahí que nos interese recoger las medidas instantáneas del multímetro para relacionarlas a posteriori en el laboratorio.

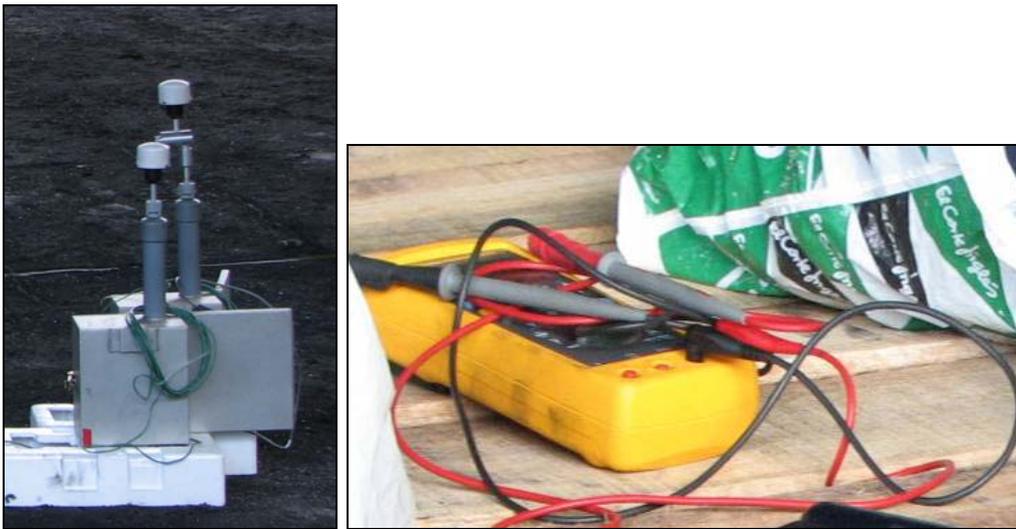


Figura 6: a) Captadores de polvo, el de la derecha mide PM-10. b) Multímetro

La humedad de la superficie de la parva la medimos a partir de TDR-100 de Field Scout (Soil Moisture System) tanto en los 3cm superficiales, como en el interior de la parva, figura 7.



Figura 7: Medidor TDR-100

El estudio granulométrico se realizó a partir de tamices homologados de distintos tamaños de malla, como los que se muestran en la figura 8.



Figura 8: Distintos tamices

Para conseguir una velocidad de aire adecuada para levantar el polvo de la parva, se utilizó en una primera fase un ventilador accionado por aire comprimido de 300 mm unido a una manga flexible, también de 300 mm de diámetro. Posteriormente se pasó (como veremos cuando expongamos como ejemplo los resultados de una de las campañas de medidas) a un ventilador con tubería metálica rígida y con una base de la parva cónica metálica.



Figura 9: Ventilador, manga enganchada a tres soportes a lo largo de su recorrido

La parva se realiza con carbón “todo uno” y tendrá unas dimensiones que se presentan tanto en la figura 10 como en la tabla1.

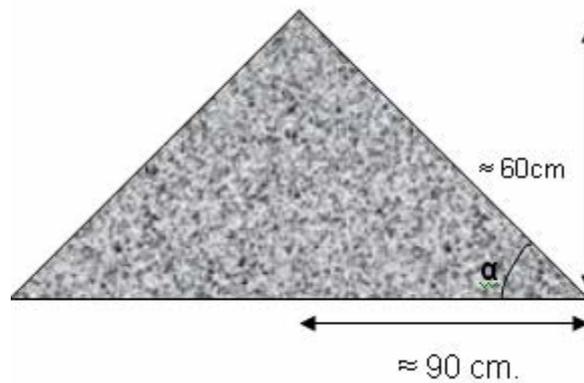


Figura 10: Dimensiones de la parva

En la tabla 1 se recogen tres medidas en tres puntos diferentes de la zona de sotavento para conocer el ángulo de talud de la parva cónica. Consideraremos dicho ángulo una media cualitativa de los resultados obtenidos.

PARVA 1		
ALTURA	ANCHURA	α (ángulo de talud)
70	90	37.87
60	92	33.11
50	85	30.46

Tabla 1: Relación de las distintas medidas realizadas en la parva

Se realizaron distintos ensayos, los cuales los diferenciamos en función de la colocación de los captadores y el sentido del aire proveniente del ventilador. Antes de la realización de los ensayos, comenzamos con un estudio granulométrico del carbón “todo uno” usado para la construcción de la parva. Y así determinar la velocidad de fricción límite. Ésta se obtendrá con cribas de tamaños de apertura de 4, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm (Tyler No. 5, 9, 16, 32 y 60). El tamizado de la muestra se realizará de manera manual, con varias cribas agitándose a la vez.

Las figuras 11 a 16 se muestra el proceso de cribado y detalles de las distintas cribas, y en la figura 17 una comparación de todos los tamaños juntos.



Figura 11: Un momento del tamizado



Figura 12: Criba de 4 mm



Figura 13: Criba de 0.5 mm



Figura 14: Criba de 2 mm



Figura 15: Criba de 0.25 mm



Figura 15: Criba de 1 mm



Figura 16: Menor de 0.25 mm



Figura 17: Resultado del tamizado

El tamaño con mayor cantidad de material corresponde al tamaño de criba de 250 micras.

En la figura 18, se muestra la primera instalación de captadores, en la figura 19 la ubicación de tubería soplante y del apilamiento cónico, en la figura 20 se puede ver la instalación completa de los equipos para ensayo de caliza (sería la segunda configuración), en la figura 21 el apilamiento cónico de caliza y en la figura 22, ensayos realizados con caliza para la tercera opción de ensayos.



Figura 18: Instalación de captadores



Figura 19: Ubicación de tubería soplante y apilamientos cónicos



Figura 20: Instalación completa de los equipos para ensayo de caliza



Figura 21: Apilamiento cónico de caliza



a)



b)

Figura 22: Ensayos con caliza

3.-ENSAYOS

BATERIA DE ENSAYOS 1

ENSAYO 1.2: CEMENTO SOBRE PARVA METÁLICA – CAPTADORES A 6 m DEL CONO

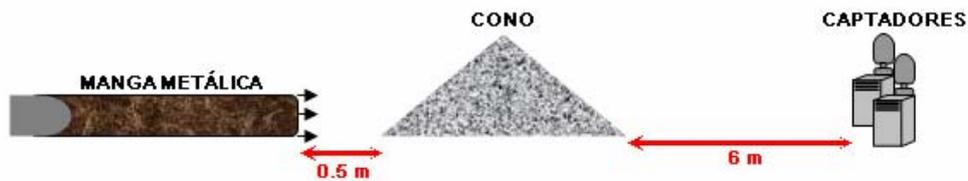


Figura 23: Ensayo cemento 1. Croquis



Figura 24: Ensayo cemento 1. Detalles

- Temperatura Ambiente: 21°
- Humedad: 9%
- Velocidad Ambiental: 1 m/s
- Humedad del material: 0 %
- Cemento: 1.550 kg
- Hora encendido captador: 14:41
- Hora comienza a medir captador: 14:46

- Hora encendido ventilador: 14:48
- Hora apagado ventilador: 15:11
- No se repartió uniformemente el material sobre la parva.
- Se recogieron muestras de material a: 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m y sobre diversos puntos del material que quedó sobre la superficie del cono: barlovento, sotavento, vértice y lateral.
- Limpieza de aire comprimido: 15:36 (chorro de aire directo al cono).
- Fin de la limpieza: 15:40 (limpieza justo al lado de los captadores).
- Parada de captadores: 15:41
- Resultados de captadores en la figura 25.

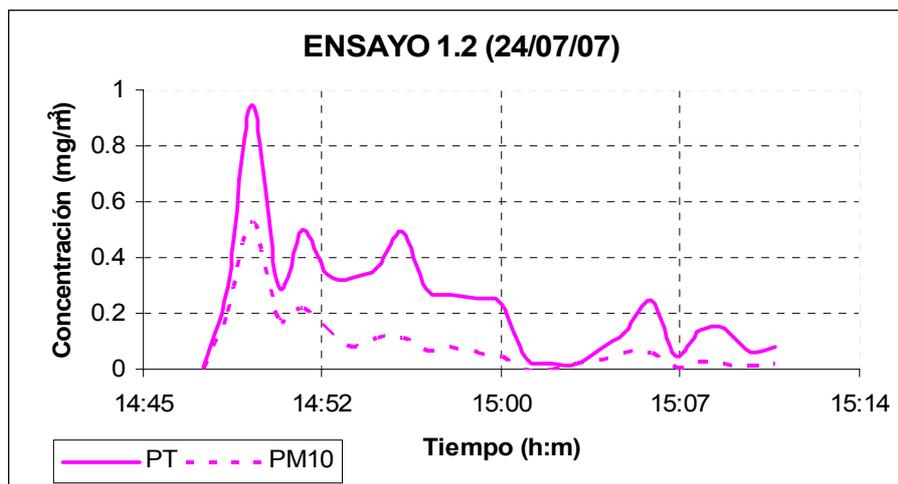


Figura 25: Ensayo cemento 1. Resultado captadores

ENSAYO 1.4: CEMENTO SOBRE PARVA METÁLICA - CAPTADORES A 12 m DEL CONO

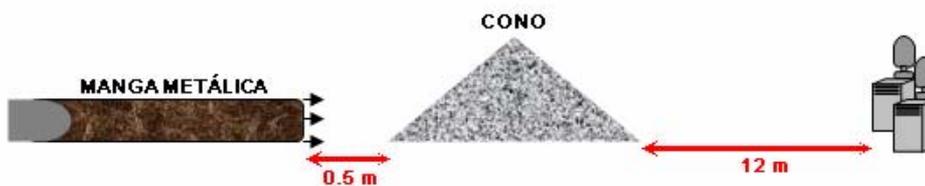


Figura 26: Ensayo cemento 2. Croquis



Figura 27: Ensayo cemento 2. Detalles

- Temperatura Ambiente: 21.6°
- Humedad: 10.2%
- Velocidad Ambiental: 1 m/s
- Humedad del material: 0.3 – 1.8 %
- Cemento: 1.550 kg
- Hora encendido captador: 16:34
- Hora comienza a medir captador: 16:39
- Hora encendido ventilador: 16:44
- Hora apagado ventilador: 16:56
- Se repartió uniformemente el material sobre la parva.
- Limpieza de aire comprimido: 16:59 (16:59 – 17:01 aire comprimido incidiendo directamente sobre el cono).
- Fin de la limpieza: 17:06
- La nube de polvo no llega directamente a los captadores, se desvía hacia la izquierda (colocándose de espaldas hacia el cono).
- Resultado de captadores en figura 28.

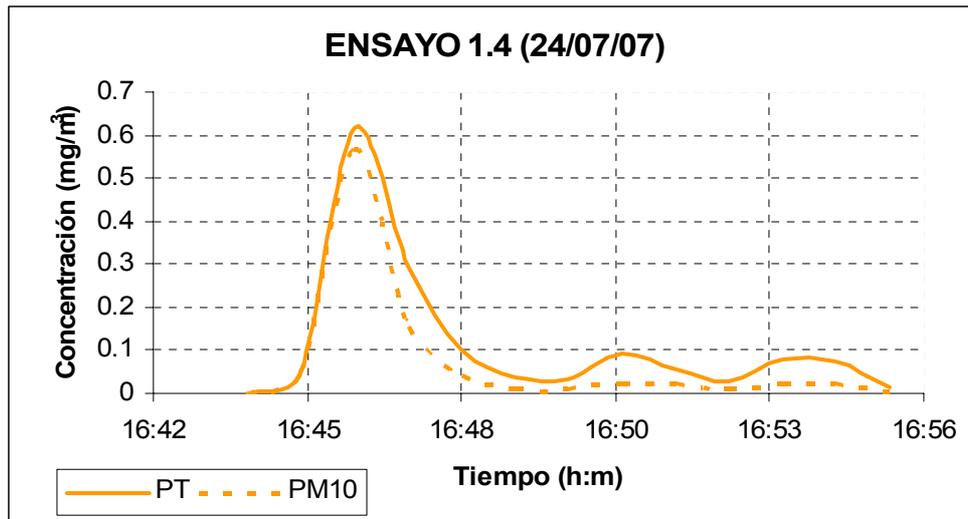


Figura 28: Ensayo cemento 2. Resultado captadores

ENSAYO 1.3: CALIZA SOBRE PARVA METÁLICA – CAPTADORES A 12 m DEL CONO

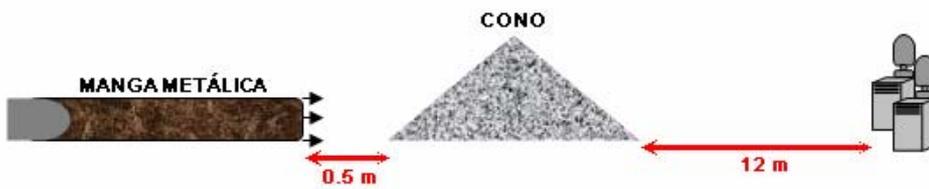


Figura 29: Ensayo caliza 1. Croquis



Figura 30: Ensayo caliza 1. Detalles

- Temperatura Ambiente: 22.6°
- Humedad: 11%
- Velocidad Ambiental: 0.39-0.5 m/s
- Humedad del material: 0 %
- Caliza: 1.575 kg
- Hora encendido ventilador: 17:16 (viento en dirección contraria al aire del ventilador).
 - 17:17: viento favorable al aire de la turbina.
 - 17:20: continúa avanzando la nube más o menos.
 - 17:21: apenas sale polvo del cono.
- Hora apagado ventilador: 17:26
- Se repartió uniformemente el material sobre la parva.
- Volaron 0.5 kg de material.

REPETICIÓN DE ENSAYO 1.3

- Hora encendido ventilador: 17:38 (viento del sur: en sentido contrario a la dirección del aire proveniente del ventilador).
- 17:40: viento soplando del norte (misma dirección que el aire del ventilador). La nube de polvo atraviesa el captador.
- 17:45: Se agitó el cono con una pala, sale nube de polvo.
- 17:48: Golpe sobre el cono, sale otra nube de polvo.
- 17:50: Golpe sobre el cono.
- 17:51: Golpe sobre el cono.
- 17:52: Limpieza de aire comprimido.
- Resultado de captadores en figura 31.

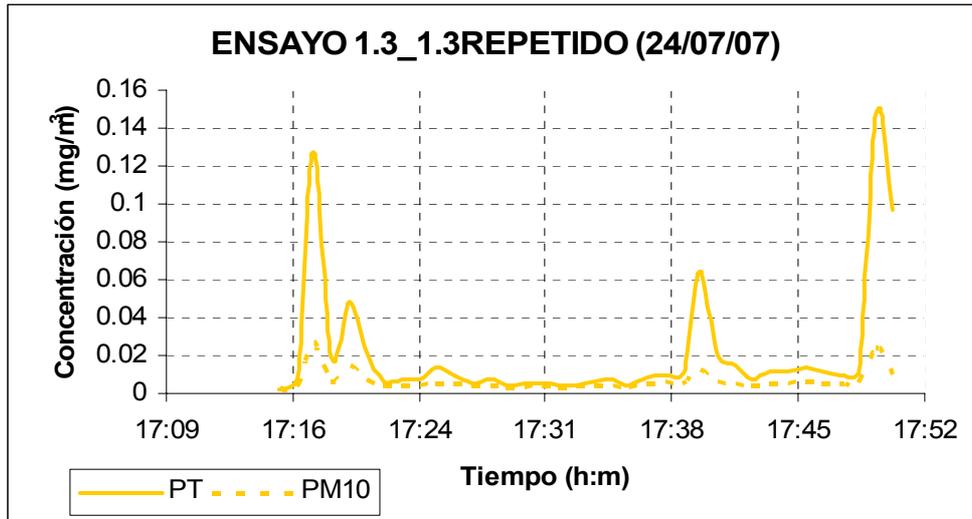


Figura 31: Ensayo caliza 1. Resultado captadores

ENSAYO 1.1: CALIZA SOBRE PARVA METÁLICA – CAPTADORES A 6 m DEL CONO

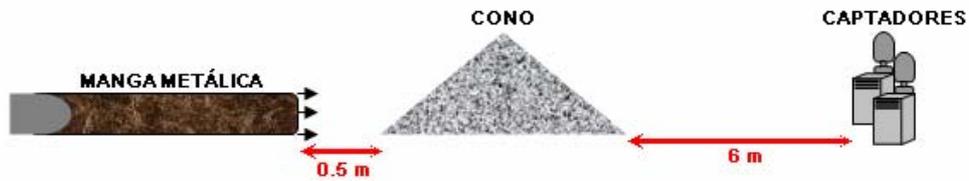


Figura 32: Ensayo caliza 2. Croquis



Figura 33: Ensayo caliza 2. Detalles

- Temperatura Ambiente: 20.5°
- Humedad: 12.8%
- Velocidad Ambiental: 1 m/s
- Caliza: 1.550 kg
- Hora encendido captador: 18:01
- Hora encendido ventilador: 18:04
- 18:10: el captador de partículas totales registraba 0.034 mg/m³.
- Hora apagado ventilador: 18:14
- Limpieza de aire comprimido: 18:32
- Fin de la limpieza: 18:36
- Se recogieron muestras de material a 0.5 m, 1m, 2 m, 3m, 4m, y 5 m del cono. También se recogieron muestras del material que quedó sobre el cono en: barlovento, sotavento, un lateral y vértice.
- Resultado de captadores figura 34.

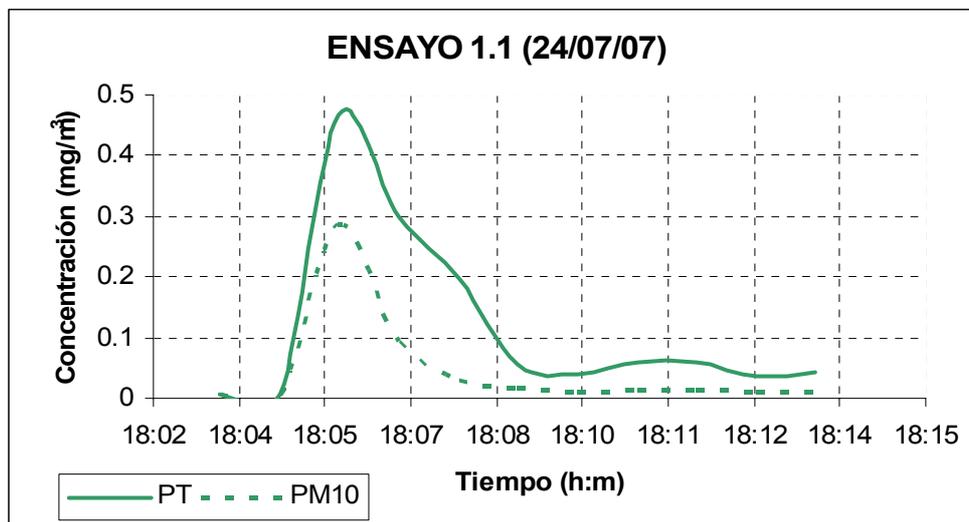


Figura 34: Ensayo caliza 2. Resultado captadores

ENSAYO 1.7: CARBÓN ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA –
CAPTADORES A 6 m DEL CONO

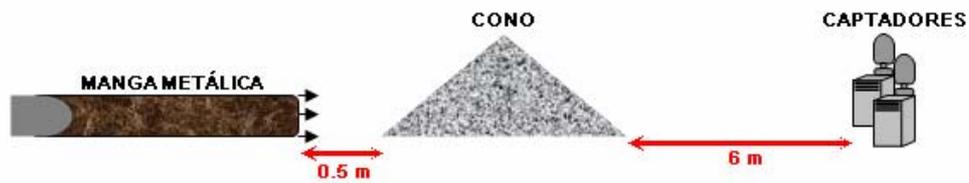


Figura 35: Ensayo carbón 1. Croquis



Figura 36: Ensayo carbón 1. Detalles

- Temperatura Ambiente: 19.3°
- Humedad: 12.8%
- Velocidad Ambiental: 0.7 - 1 m/s
- Humedad superficial del ultrafino: 0 %
- Humedad a 15 cm de profundidad del ultrafino: 20%
- Ultrafino: 1.550 kg
- Hora encendido ventilador: 18:55

- Hora apagado ventilador: 19:05
- Volaron aproximadamente 0.9 kg de material.
- Se recogieron muestras de material a 0.5 m, 1m, 2 m, 3m, 4m, y 5 m del cono. También se recogieron muestras del material que quedó sobre el cono en: barlovento, sotavento y un lateral, tal como se muestra en la figura 37.



Figura 37: Ensayo carbón 1. Recogida de muestras

- Resultado de captadores en figura 38.

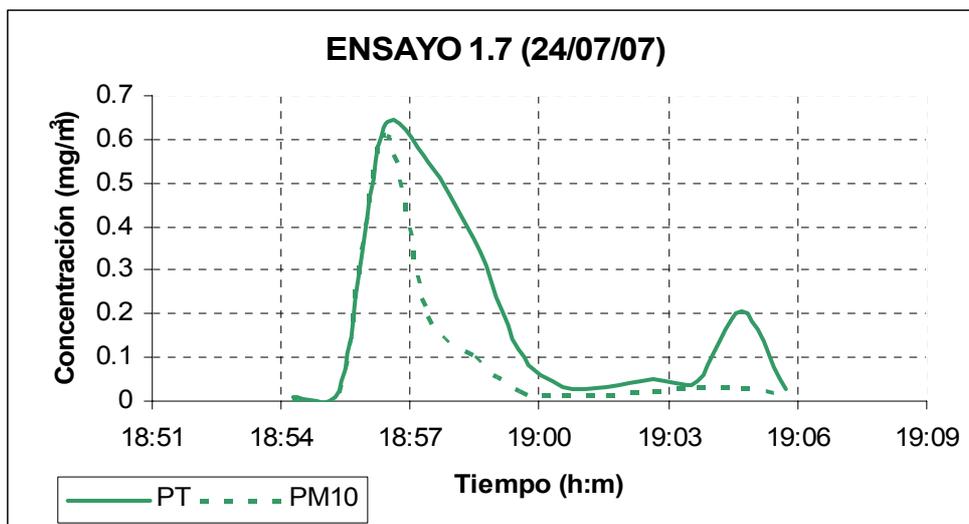


Figura 38: Ensayo carbón 1. Resultado captadores

**ENSAYO 1.8: CARBÓN ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA –
CAPTADORES TUMBADOS A 5.90 m DEL CONO**

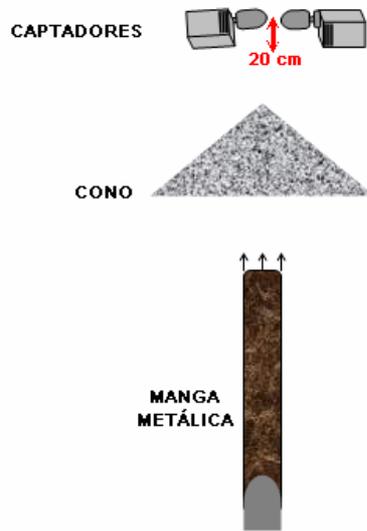


Figura 39: Ensayo carbón 2. Croquis



Figura 40: Ensayo carbón 2. Detalles

- Los capuchones de los captadores se elevan del suelo 20 cm.
- La distancia entre la manga y el cono continúa siendo de 50 cm.
- Temperatura Ambiente: 17.9
- Humedad: 12.6

- Velocidad ambiental: 0.6 m/s
- Ultrafino: 1.550 kg
- Hora encendido ventilador: 19:38
- Hora apagado ventilador: 19:48
- Resultado de captadores en figura 41.

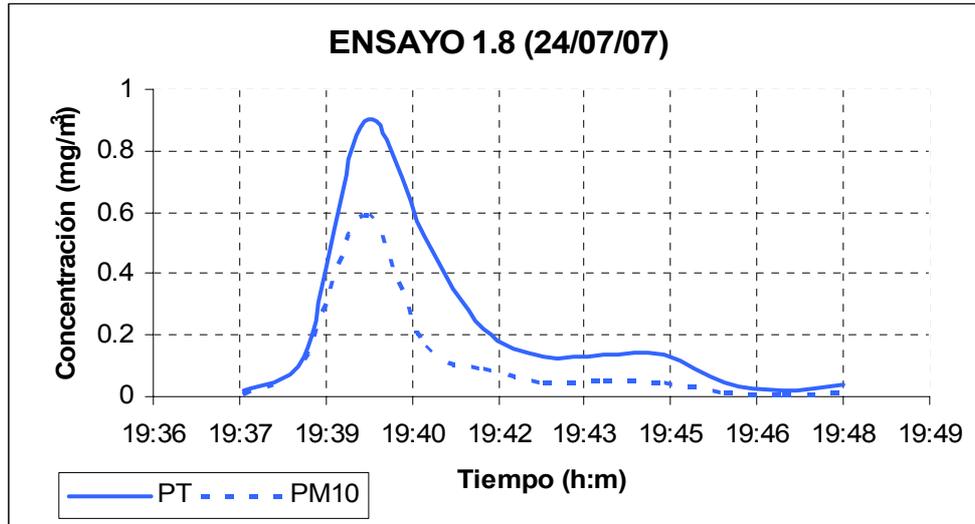


Figura 41: Ensayo carbón 2. Resultado captadores

ENSAYO 1.9: CARBÓN ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA – CAPTADORES TUMBADOS A 5.50 m DEL CONO

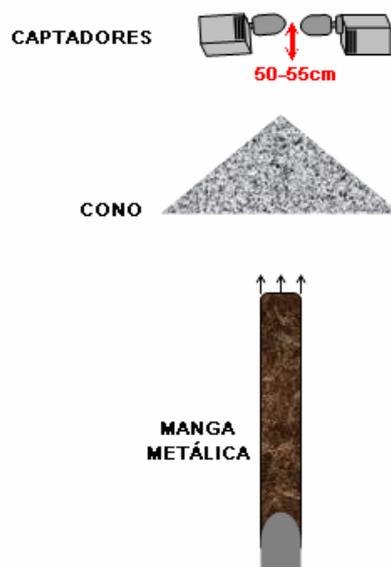


Figura 42: Ensayo carbón 3. Croquis



Figura 43: Ensayo carbón 3. Detalles

- Los capuchones de los captadores se elevan del suelo 50-55 cm.
- La distancia entre la manga y el cono continúa siendo de 50 cm.
- Ultrafino: 1.550 kg
- Hora encendido ventilador: 19:55
- Hora apagado ventilador: 20:05
- Resultado de captadores en figura 44.

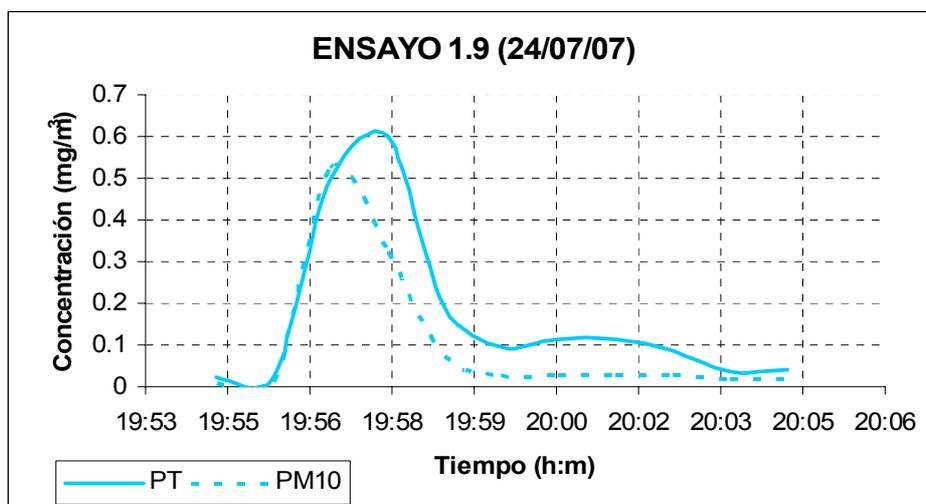


Figura 44: Ensayo carbón 3. Resultado captadores

ENSAYO 1.10: CARBÓN ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA –
CAPTADORES A 5.90 m DEL CONO

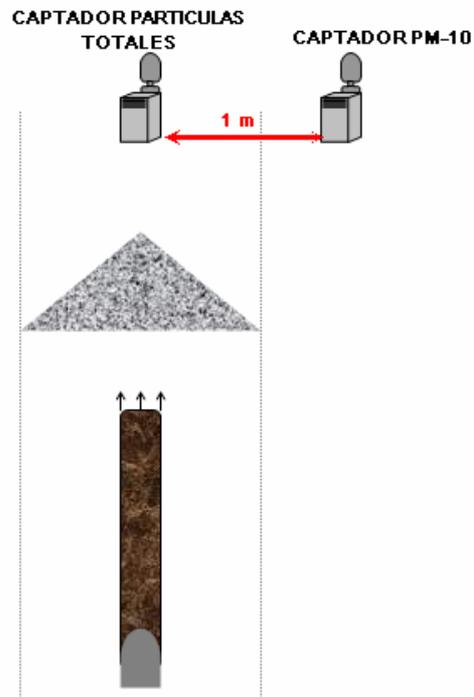


Figura 45: Ensayo carbón 4. Croquis



Figura 46: Ensayo carbón 4. Detalles

- La distancia entre la manga y el cono continúa siendo de 50 cm.

- El captador de partículas totales se coloca en línea recta tomando como puntos de referencia la manga metálica y el vértice del cono.
- El captador de PM-10 se coloca a 1 m de distancia del captador partículas totales hacia la derecha (nuestra derecha si nos colocamos de espalda al obstáculo o cono).
- Hora encendido ventilador: 20:14
- Hora apagado ventilador: 20:23
- Hora apagado captadores: 20:25
- Resultado de captadores en figura 47.

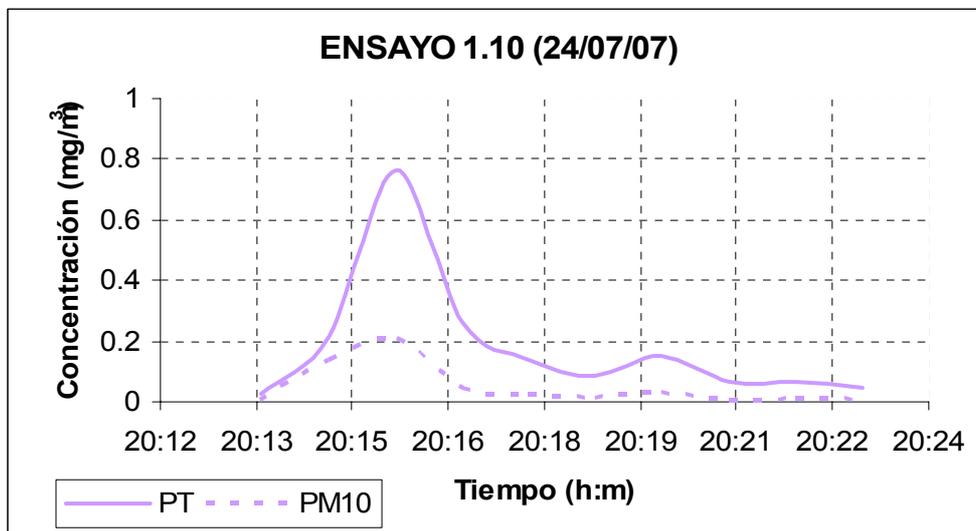


Figura 47: Ensayo carbón 4. Resultado captadores

BATERIA DE ENSAYOS 2

ENSAYO PREVIO 2: CARACTERIZACIÓN DE AIRE

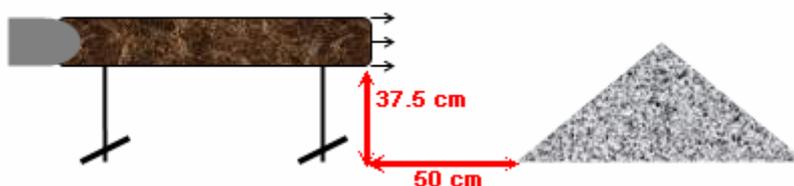
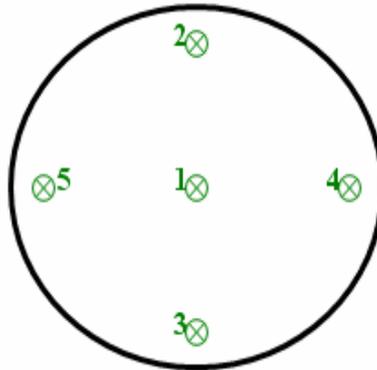


Figura 48: Ensayo viento 1. Croquis

- Temperatura Ambiente: 15.3°

- Humedad: 10.5%
- Velocidad ambiental: 0.5-1 m/s
- Hora de inicio de medidas: 9:40
- Caracterización del aire en la boca de la manga:



SALIDA DE LA MANGA				
UBICACIÓN				
1	2	3	4	5
12.2 m/s	10.8 m/s	15.7 m/s	12.3 m/s	13.5 m/s

Tabla 2: Datos de viento 1

- Dos puntos de medida de velocidad entre la tubería y el cono figura 49.

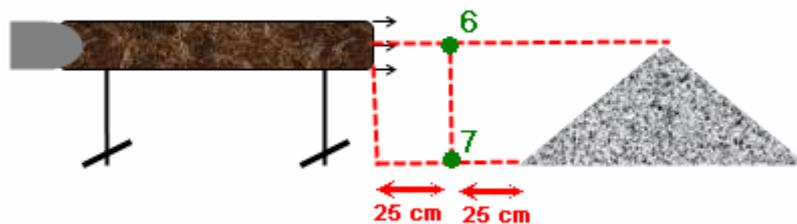


Figura 49: Ensayo viento 2. Croquis

- Los valores de las medidas de los puntos 6 y 7 (figura 49) situados entre el cono y la tubería son de 12.5 m/s y 1 m/s respectivamente.
- En la tabla 3 se muestran los datos de velocidad recogidos en campo, para el croquis que aparece en la figura 50.

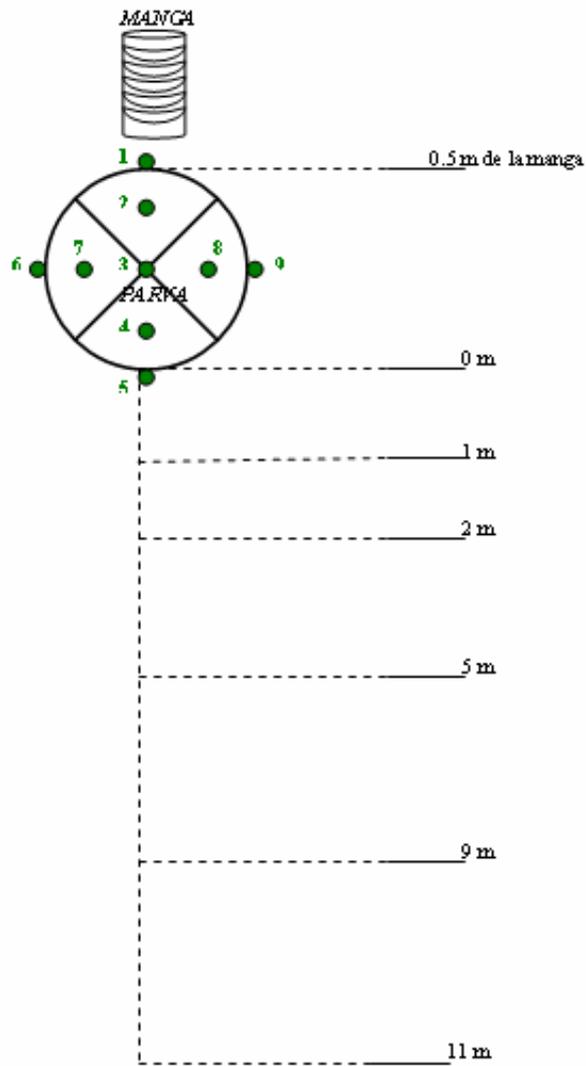


Figura 50: Croquis de puntos de medida 2

UBICACIÓN	VELOCIDADES (m/s)
EN EL CONO	Tabla B
<i>Punto 1: nivel superficial:</i>	0.9
<i>Punto 2: nivel superficial:</i>	2
20 cm de altura	8
50 cm de altura	9.7
<i>Punto 3: vértice de la parva:</i>	14
20 cm de altura	10
<i>Punto 4: nivel superficial:</i>	6.3
20 cm de altura:	9.3
1 m de altura	0.5

Punto 5: nivel superficial:	6
Punto 6: nivel superficial:	0.5
Punto 7: nivel superficial:	4
50 cm de altura:	0.7
Punto 8: nivel superficial:	2.8
50 cm de altura:	0.5
Punto 9: nivel superficial:	0.4
A DISTANCIA DEL CONO	CENTRAL
A 1 m del cono: nivel superficial:	6.2
20 cm de altura:	5.8
50 cm de altura:	1.8
1 m de altura:	0.4
A 2 m del cono: nivel superficial:	4.8
50 cm de altura:	1.5
1 m de altura:	0.6

Tabla 3: Datos de viento 2

ENSAYO 2: BARRERA SÓLIDA

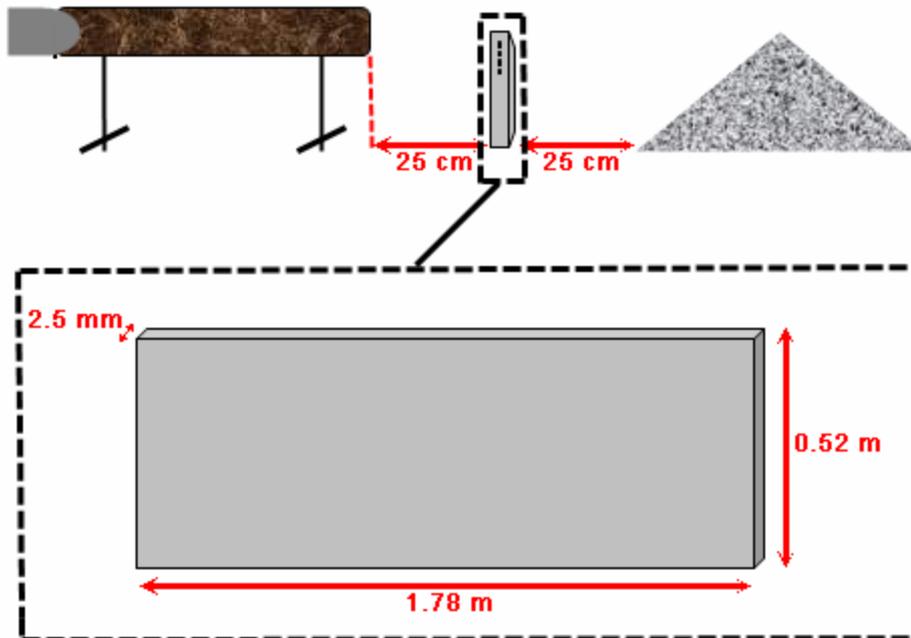


Figura 51: Ensayo barrera sólida. Croquis

- MEDIDA 2.2: CARACTERIZACIÓN DE AIRE

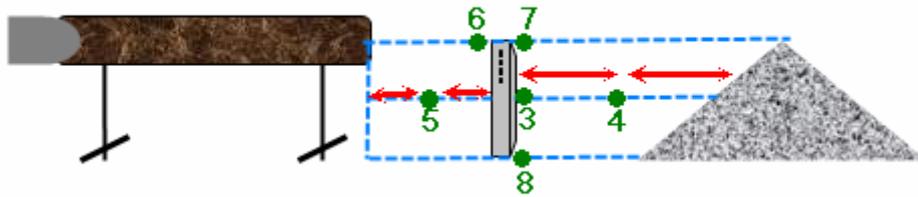


Figura 52: Ensayo viento 1. Puntos caracterización aire

Estos puntos que a continuación se citan, están tomados, según se coloca un observador de espaldas a la manga y mirando hacia la malla, en el punto medio de la malla (de izquierda a derecha) en el croquis de la figura 53. Punto 3: 0.1 m/s; Punto 4: 0.15 m/s; Punto 5: 4.5 m/s; Punto 6: 5 m/s; Punto 7: 0.3 m/s; Punto 8: 0.6 m/s y tabla 4.

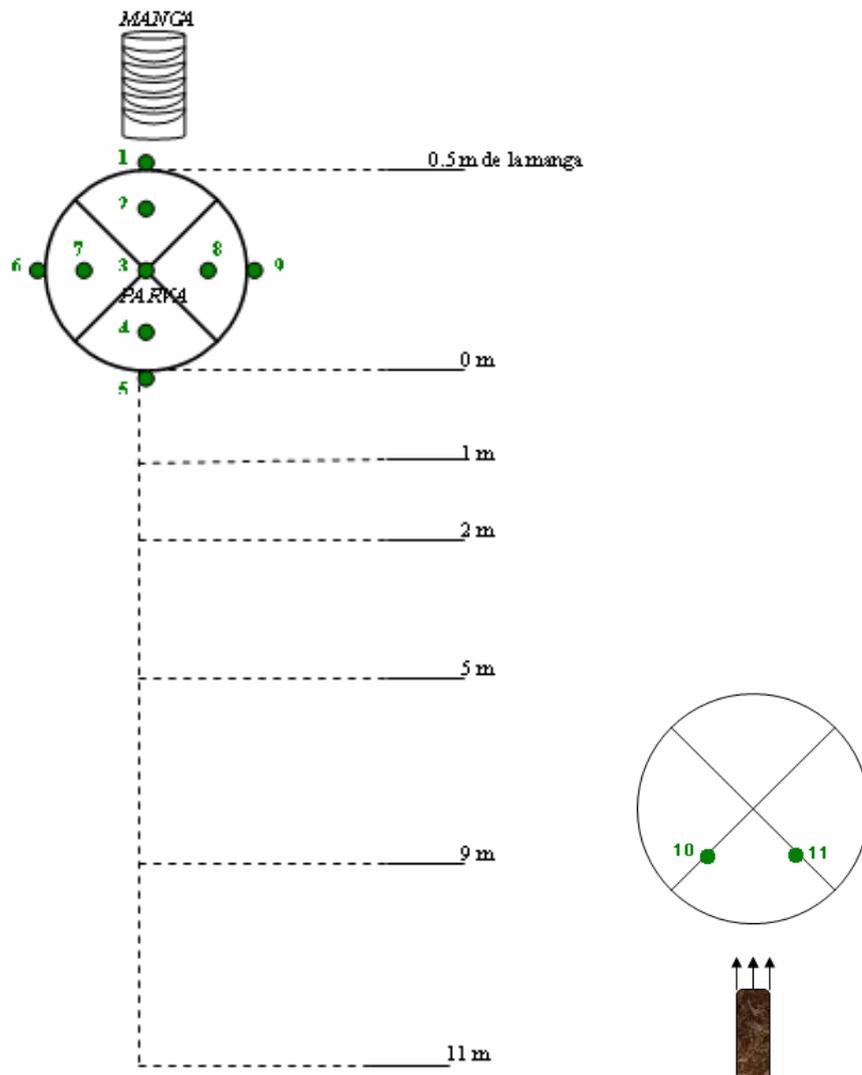


Figura 53: Croquis de puntos de medida 3

UBICACIÓN	VELOCIDADES (m/s)
<i>EN EL CONO</i>	TABLA A Medida2.2 (Barrera)
<i>Punto 1: nivel superficial:</i>	0.15
<i>Punto 2: nivel superficial:</i>	0.14
<i>20 cm de altura</i>	0.2
<i>50 cm de altura</i>	0.7
<i>Punto 3: vértice de la parva:</i>	0.5
<i>20 cm de altura</i>	0.6
<i>Punto 4: nivel superficial:</i>	0.1-0.2
<i>20 cm de altura:</i>	0.2-0.3
<i>1 m de altura</i>	0.6
<i>Punto 5: nivel superficial:</i>	0.1
<i>Punto 6: nivel superficial:</i>	0.2
<i>Punto 7: nivel superficial:</i>	0.5
<i>50 cm de altura:</i>	1-1.2
<i>Punto 8: nivel superficial:</i>	0.75
<i>50 cm de altura:</i>	0.65
<i>Punto 9: nivel superficial:</i>	0.44
<i>Punto 10: nivel superficial:</i>	0.2
<i>20 cm de altura:</i>	0.4
<i>50 m de altura</i>	0.65
<i>Punto 11: nivel superficial:</i>	0.2
<i>20 cm de altura:</i>	0.7
<i>50 cm de altura</i>	1.6
<i>A DISTANCIA DEL CONO</i>	CENTRAL
<i>A 1 m del cono: nivel superficial:</i>	0.22
<i>20 cm de altura:</i>	0.4
<i>50 cm de altura:</i>	0.33
<i>1 m de altura:</i>	0.2-0.3
<i>A 2 m del cono: nivel superficial:</i>	0.1
<i>50 cm de altura:</i>	0.15
<i>1 m de altura:</i>	0.2

A 3 m del cono: nivel superficial:	0.05-0.1
50 cm de altura:	0.10-0.15
1 m de altura	0.10

Tabla 4: Datos de viento 3

ENSAYO 9: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA, BARRERA SÓLIDA Y CAPTADORES A 3 m DEL CONO

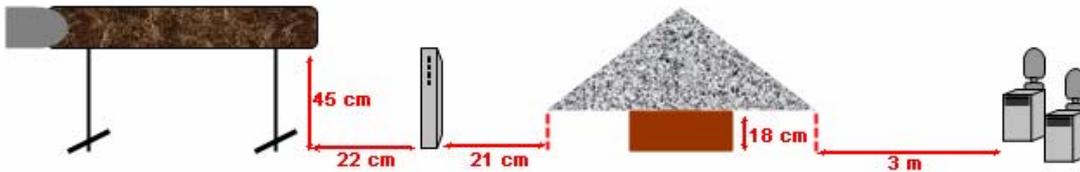


Figura 54: Ensayo barrera sólida y polvo 1. Croquis



Figura 55: Ensayo barrera sólida y polvo 1. Detalles

- Temperatura Ambiente: 21.2°
- Humedad: 16.5%
- Velocidad Ambiental: 1 m/s
- Humedad del material: 0 %

- Ultrafino: 1 kg
- Hora encendido captador: 12:14
- Hora encendido ventilador: 12:23
- Hora apagado ventilador: 12:33
- Volaron 100 g de ultrafino.
- Se recogieron muestras de material a: 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m del cono y en diversos puntos de la superficie del cono: barlovento, sotavento y lateral.
- Caracterización de viento, en las figuras 56 y 57 y en la tabla 5.

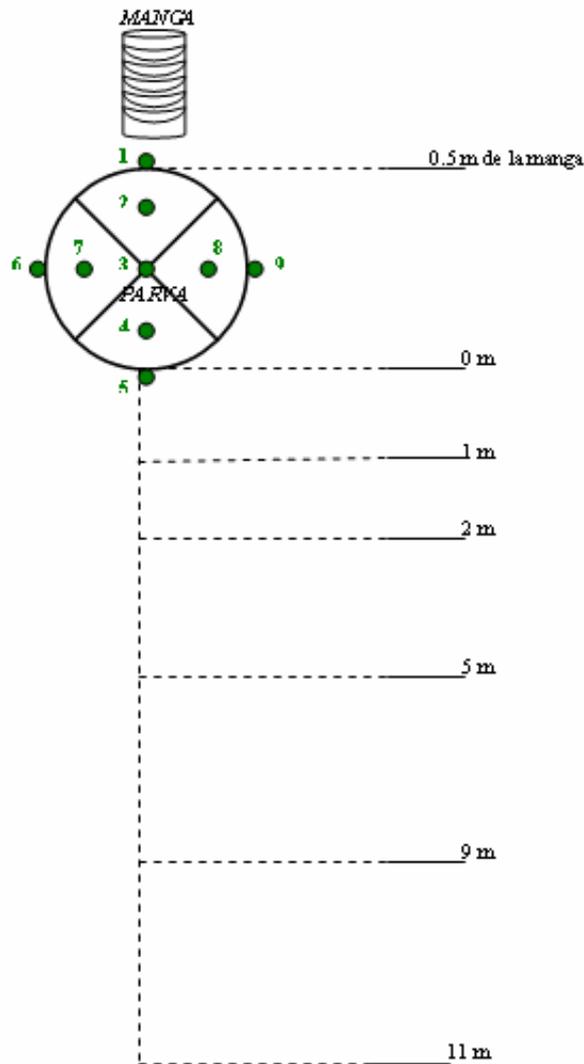


Figura 56: Croquis de puntos de medida viento y polvo

UBICACIÓN	VELOCIDADES (m/s)		
EN EL CONO	ENSAYO 9		
<i>Punto 1: nivel superficial:</i>	0.7		
<i>Punto 2: nivel superficial:</i>	0.9-1		
20 cm de altura	1.4		
50 cm de altura	9		
<i>Punto 3: vértice de la parva:</i>	3.5		
20 cm de altura	9		
<i>Punto 4: nivel superficial:</i>	0.6-0.7		
20 cm de altura:	1.8		
1 m de altura	2-3		
<i>Punto 5: nivel superficial:</i>	1		
<i>Punto 6: nivel superficial:</i>	0.7		
<i>Punto 7: nivel superficial:</i>	2.1		
50 cm de altura:	0.5		
<i>Punto 8: nivel superficial:</i>	0.5		
50 cm de altura:	1.4		
<i>Punto 9: nivel superficial:</i>	0.3		
<i>Punto 10: nivel superficial:</i>	2.5		
20 cm de altura:	3		
50 m de altura	2		
<i>Punto 11: nivel superficial:</i>	2.5		
20 cm de altura:	3.5		
50 cm de altura	0.5		
A DISTANCIA DEL CONO	CENTRAL	DERECHA	IZQUIERDA
<i>A 1 m del cono: nivel superficial:</i>	0.7	0.3	0.1-0.2
20 cm de altura:	2	1	0.5-0.7
50 cm de altura:	1.4	1-1.2	0.6-0.9
1 m de altura:	3.5	1	1.5
<i>A 2 m del cono: nivel superficial:</i>	0.5	1.4	0.7-0.8
50 cm de altura:	2.2	0.7	1
1 m de altura:	1.9	0.9	0.2
<i>A 3 m del cono: nivel superficial:</i>	0.3	0.5	0.7-0.9

50 cm de altura:	0.7	0.5	0.3-0.6
1 m de altura	0.4	1.4	0.5
A 4 m del cono: nivel superficial:	0.2	0.5	0.7-1.5
50 cm de altura:	1.4	0.15-0.2	0.2-0.3
1 m de altura	1.5	0.2-0.4	0.6-1

Tabla 5: Resultados de viento en ensayo polvo y viento

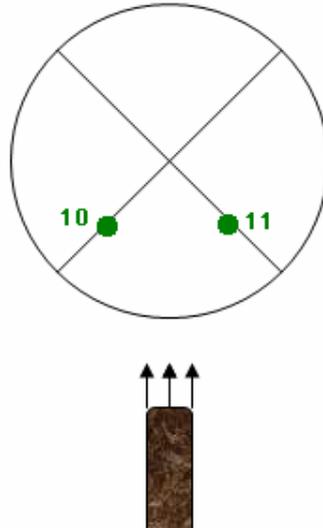


Figura 57: Croquis de ensayo de polvo y viento

- Resultado de captadores en figura 58.

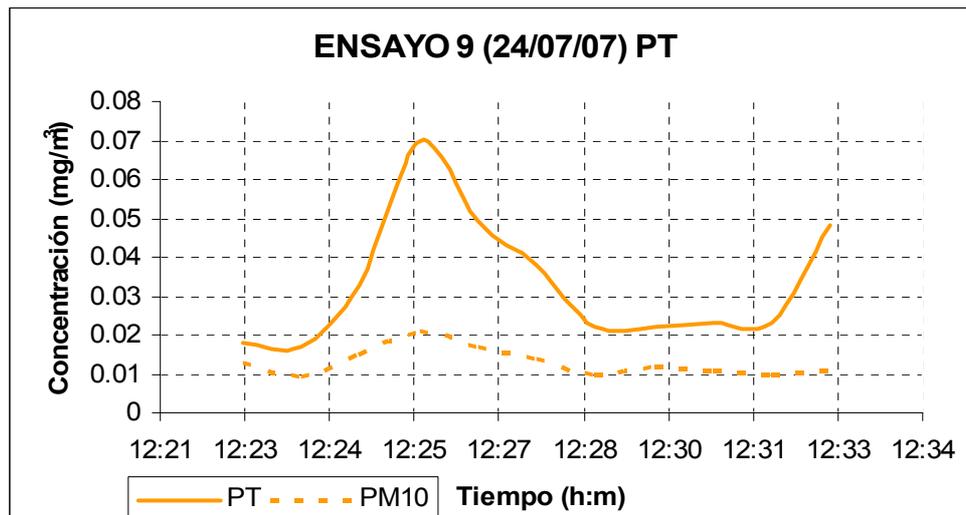


Figura 58: Ensayo de polvo y viento 1. Resultado captadores

ENSAYO 10: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA Y CAPTADORES A 3 m DEL CONO

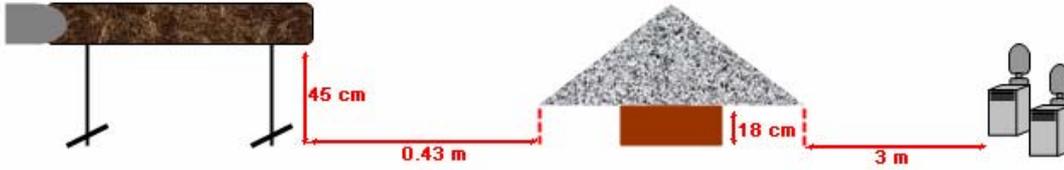


Figura 59: Ensayo carbón 5. Croquis



Figura 60: Ensayo carbón 5. Detalles

- Temperatura ambiente: 23.6°
- Humedad: 17.5%
- Velocidad ambiental: 0.1-0.3 m/s
- Ultrafino: 1 kg
- Hora encendido ventilador: 13:05
- Hora apagado ventilador: 13:15
- Volaron 750 g de ultrafino.

- Se recogieron muestras de material a las distancias de: 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m y en diversos puntos de la superficie del cono: barlovento, sotavento y lateral.

Nota análisis granulométrico: cuando se recogen las muestras a las distancias más alejadas (4m y 5m) se observa la existencia de partículas grandes que se mueven por arrastre de las distancias más cercanas al cono.

- Caracterización de viento en las figuras 61 y 62 y en la tabla 6.

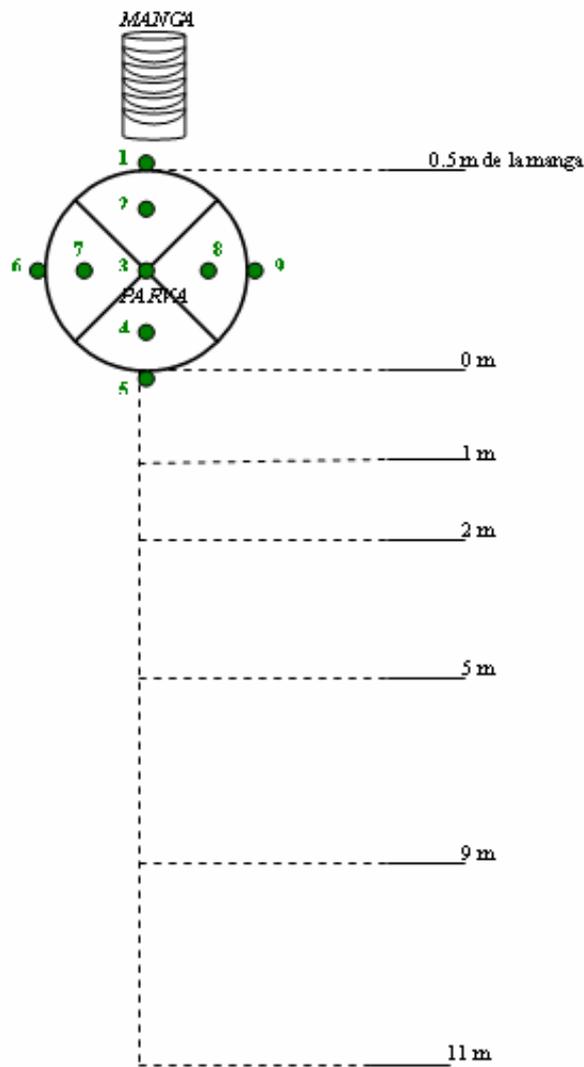


Figura 61: Croquis de medidas de viento. Ensayo 5

UBICACIÓN	VELOCIDADES (m/s)		
EN EL CONO	ENSAYO 10		
<i>Punto 1: nivel superficial:</i>	1		
<i>Punto 2: nivel superficial:</i>	5		
20 cm de altura	7-8		
50 cm de altura	3		
<i>Punto 3: vértice de la parva:</i>	13.5		
20 cm de altura	8.5-9		
<i>Punto 4: nivel superficial:</i>	6.5		
20 cm de altura:	8		
1 m de altura	0.8		
<i>Punto 5: nivel superficial:</i>	5		
<i>Punto 6: nivel superficial:</i>	1		
<i>Punto 7: nivel superficial:</i>	4-4.5		
50 cm de altura:	0.5		
<i>Punto 8: nivel superficial:</i>	6		
50 cm de altura:	0.5-1		
<i>Punto 9: nivel superficial:</i>	1-1.5		
A DISTANCIA DEL CONO	CENTRAL	DERECHA	IZQUIERDA
<i>A 1 m del cono: nivel superficial:</i>	5	0.6-0.7	1
20 cm de altura:	4.4	0.8	0.7
50 cm de altura:	3	0.4-0.7	0.5
1 m de altura:	0.35	0.24	0.3
<i>A 2 m del cono: nivel superficial:</i>	4	0.7-0.9	1
50 cm de altura:	0.6-1.10	0.5	0.6
1 m de altura:	0.2	0.2	0.5-0.25
<i>A 3 m del cono: nivel superficial:</i>	3-3.5	1.5	2
50 cm de altura:	0.7-1.1	0.3-0.5	0.6
1 m de altura	0.16-0.26	0.3-0.4	0.15-0.20
<i>A 4 m del cono: nivel superficial:</i>	1	1.5-2	2
50 cm de altura:	0.2-0.5	0.3	0.6
1 m de altura	0.4	0.3	0.2

A 5 m del cono: nivel superficial:	0.3	0.3-0.4	0.3
50 cm de altura:	0.5	0.3	0.15-0.3
1 m de altura	0.3-0.4	0.2-0.3	0.7

Tabla 6: Resultados de viento ensayo 5

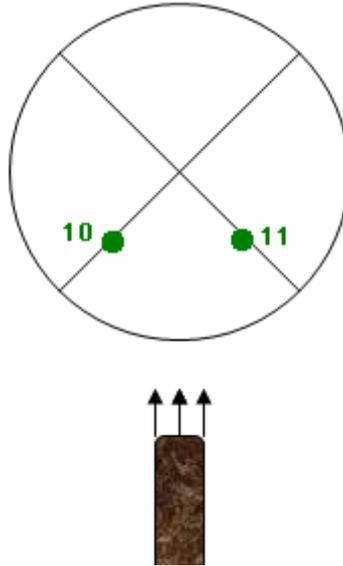


Figura 62: Ensayo carbón 5. Croquis de viento

- Resultado de captadores en figura 63.

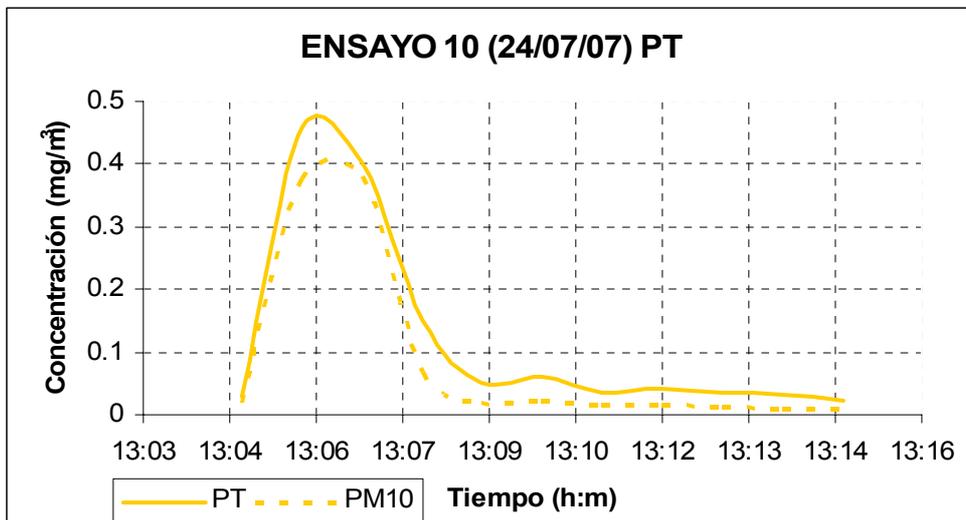


Figura 63: Ensayo carbón 5. Resultado captadores

ENSAYO 11: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA, BARRERA POROSA Y CAPTADORES A 3 m DEL CONO

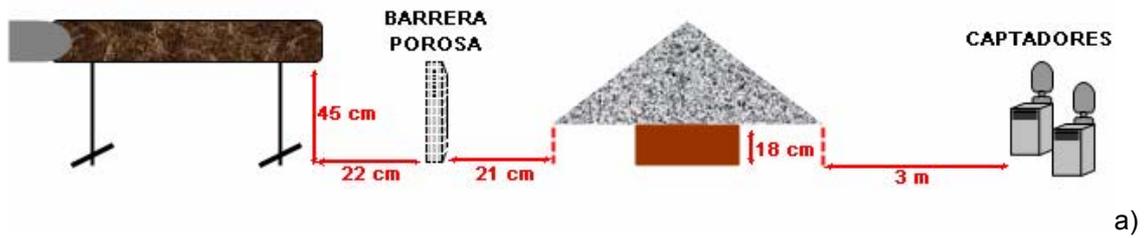


Figura 64: Ensayo barrera porosa y polvo. Croquis a) y ensayo b)

- Barrera porosa de 2 mm de espesor y porcentaje de porosidad del 31%, 32%.
- Temperatura Ambiente: 25.3°
- Humedad: 17.3%
- Velocidad Ambiental: 0.17-0.2 m/s
- Ultrafino: 1 kg
- Hora encendido ventilador: 13:53
- Hora apagado ventilador: 14:03
- Volaron 320 g de ultrafino.

- Se recogieron muestras de material a las distancias de: 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m y en diversos puntos de la superficie del cono: barlovento, sotavento, vértice y lateral.

NOTA: en un momento del ensayo se observaron los captadores y éstos estaban en modo SPAM, por este motivo ellos se repite el ensayo.

- Caracterización del viento, figuras 65 y 66 y en la tabla 7.

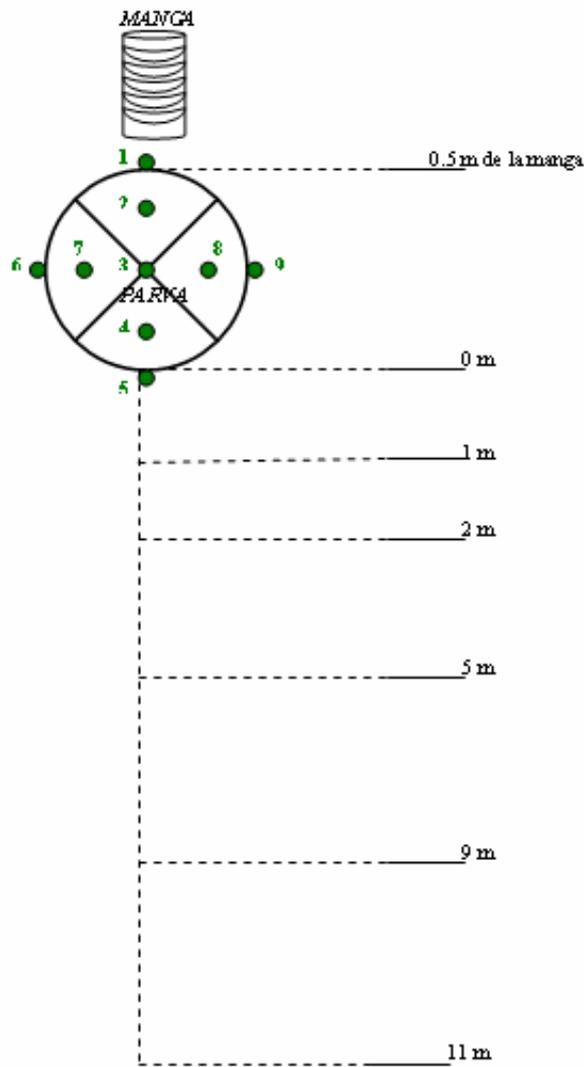


Figura 65: Croquis de puntos de medida viento y polvo

UBICACIÓN	VELOCIDADES (m/s)	
EN EL CONO	ENSAYO 11	
Punto 1: nivel superficial:	2	
Punto 2: nivel superficial:	2	

20 cm de altura	11.55		
50 cm de altura	7		
<i>Punto 3: vértice de la parva:</i>	13.2		
20 cm de altura	9.2		
<i>Punto 4: nivel superficial:</i>	4.6		
20 cm de altura:	9.2		
1 m de altura	4.2		
<i>Punto 5: nivel superficial:</i>	2.6		
<i>Punto 6: nivel superficial:</i>	0.8		
<i>Punto 7: nivel superficial:</i>	5.7		
50 cm de altura:	0.3		
<i>Punto 8: nivel superficial:</i>	1.8		
50 cm de altura:	3.5		
<i>Punto 9: nivel superficial:</i>	0.5-1		
<i>Punto 10: nivel superficial:</i>	3.5		
20 cm de altura:	1.5-2		
50 m de altura	4		
<i>Punto 11: nivel superficial:</i>	2.5		
20 cm de altura:	1.2		
50 cm de altura	1.5-2		
A DISTANCIA DEL CONO	CENTRAL	DERECHA	IZQUIERDA
<i>A 1 m del cono: nivel superficial:</i>	2.5	1-1.5	1.4
20 cm de altura:	3.5	0.4	0.5
50 cm de altura:	3.5	0.2	0.8
<i>A 2 m del cono: nivel superficial:</i>	1-1.5	1.2	1.5
50 cm de altura:	1.3	1	0.5
1 m de altura:	1-1.2	0.5-0.7	0.6
<i>A 3 m del cono: nivel superficial:</i>	1.5-2.5	1-1.5	1.3
50 cm de altura:	1-1.5	1-1.5	0.9
1 m de altura	1-1.5	1.3	1.2
<i>A 4 m del cono: nivel superficial:</i>	1.5-2	2 *	0.2
50 cm de altura:	0.8	0.7	0.5
1 m de altura	1.1	0.7-0.8	0.6-0.8

Tabla 7: Resultados de viento en ensayo polvo y viento

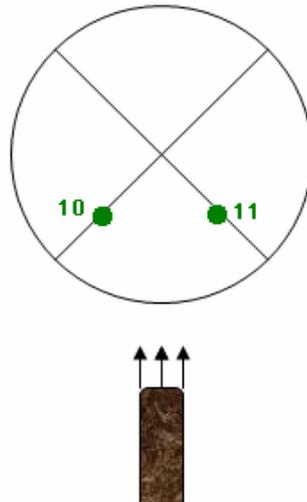


Figura 66: Croquis de ensayo de polvo y viento

- Resultado de captadores en figura 67.

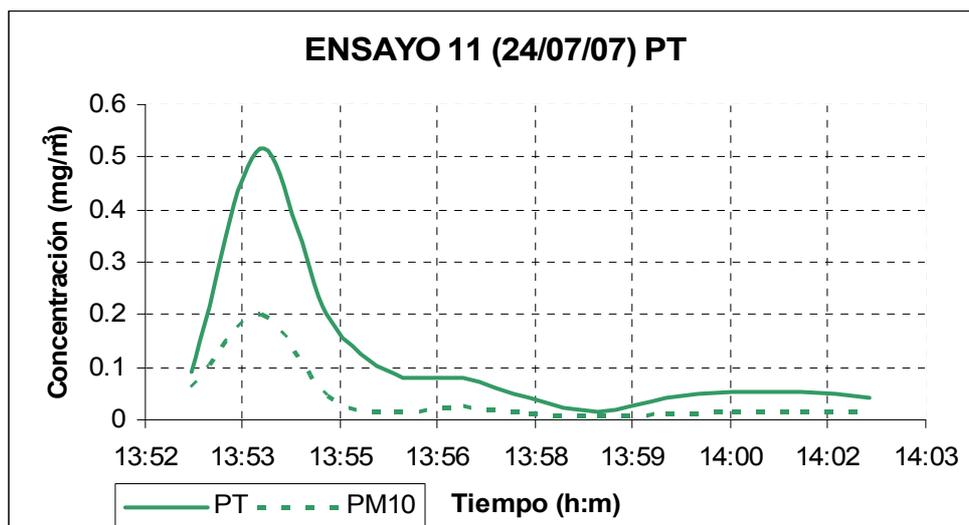


Figura 67: Ensayo de polvo y viento. Resultado captadores

ENSAYO 11 REPETICIÓN: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA, BARRERA POROSA Y CAPTADORES A 3 m DEL CONO

- Hora encendido ventilador: 14:27
- Hora apagado ventilador: 14:38
- Hora inicio limpieza de aire comprimido: 14:38
- Hora final limpieza de aire comprimido: 14:42
- Hora parada captadores: 14:43

- Resultado de captadores en figura 68.

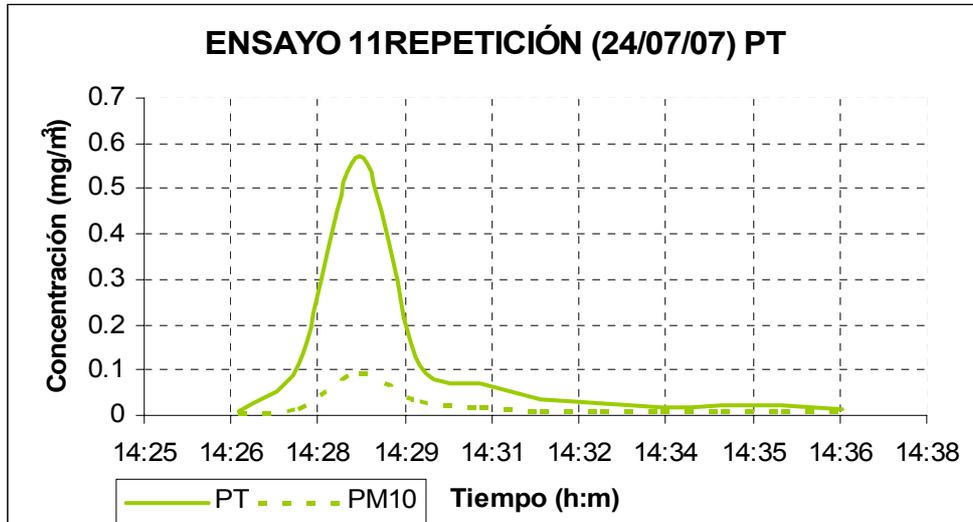


Figura 68: Ensayo de polvo y viento. Resultado captadores. Repetición

ENSAYO 12.1: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA, BARRERA POROSA A 3.5 m DEL CONO Y CAPTADORES

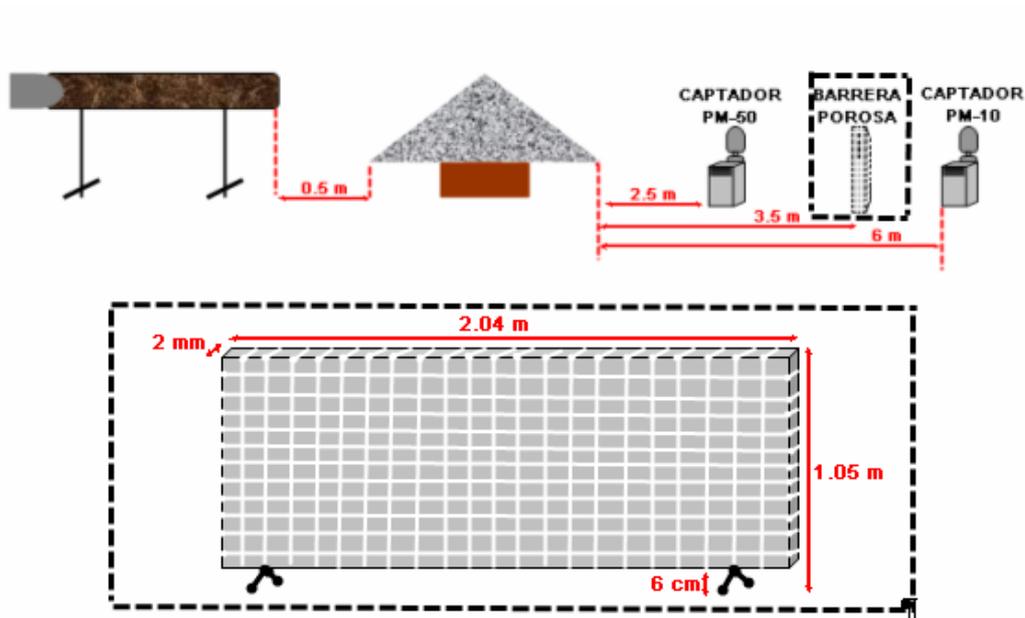


Figura 69: Ensayo barrera sólida y polvo 2. Croquis

- Ultrafino utilizado sobre cono: 1 kg
- Encendido captadores: 18:04



Figura 70: Ensayo barrera sólida y polvo 2. Detalles

- Ultrafino utilizado sobre cono: 1 kg
- Encendido captadores: 18:04
- Hora inicio ventilador: 18:18
- Hora apagado ventilador: 18:31
- Recogida de muestras a 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m.
- Resultado de captadores, figura 71.

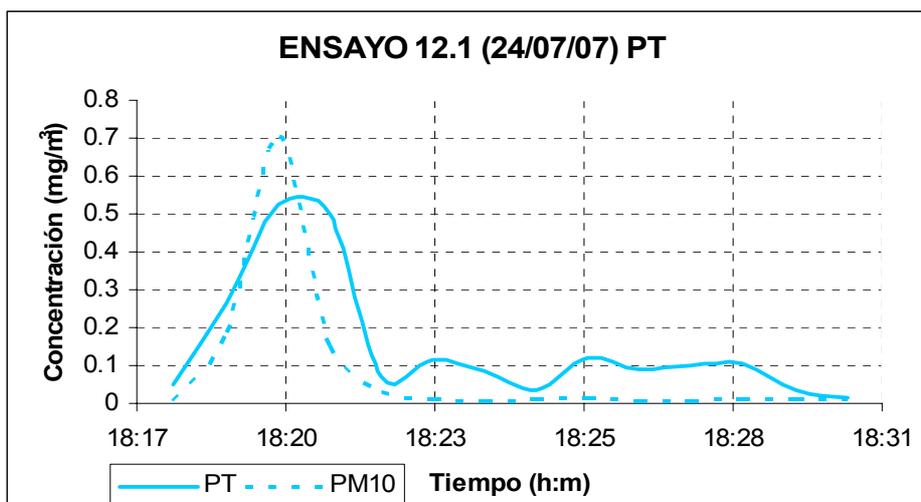


Figura 71: Ensayo de polvo y viento 2. Resultado captadores

ENSAYO 12.2: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA, BARRERA POROSA A 3.5 m DEL CONO Y CAPTADORES A 6 m DEL CONO

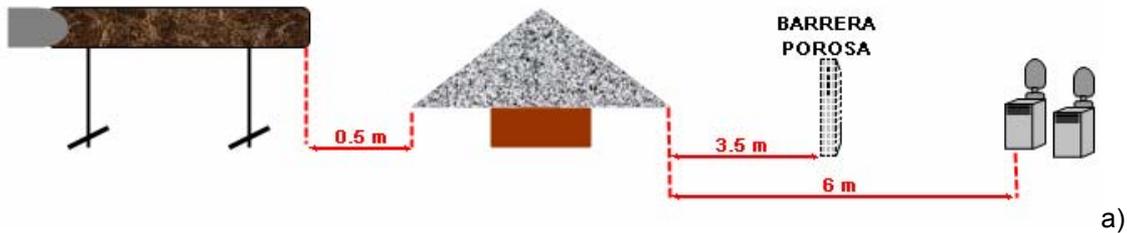


Figura 72: Ensayo barrera porosa y polvo 3. a) croquis, b) ensayo

- Se añadió ultrafino sobre el ultrafino que quedó sobre el cono del ensayo anterior (800 gramos).
- Hora inicio ventilador: 18:53
- Hora apagado ventilador: 19:03
- Hora 19:00: se coloca un tablón sobre la parte superior de la boca de la manga quedando dividida ésta en dos mitades simétricas, acto seguido se quita el tablón de esta posición y se golpea con él el cono.
- Resultado de captadores, figura 73.

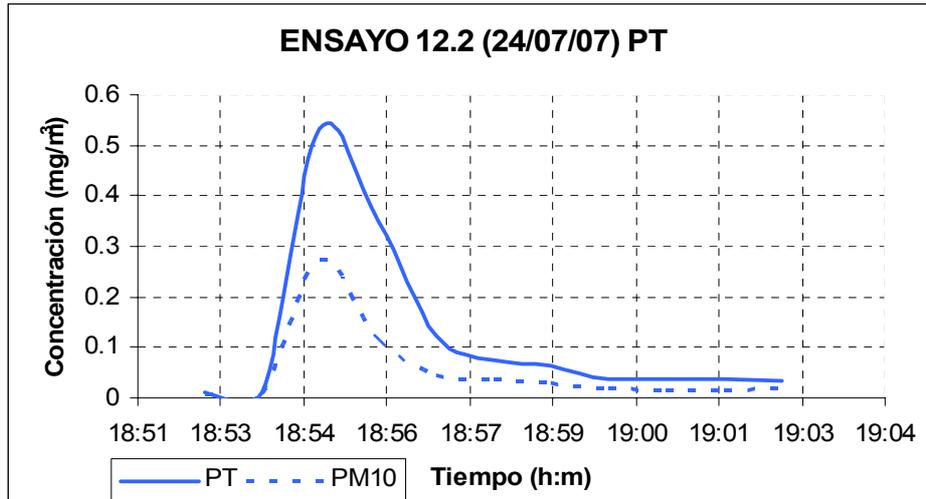


Figura 73: Ensayo de polvo y viento 3. Resultado captadores

ENSAYO 12.3: REPETICIÓN DEL ENSAYO ANTERIOR PERO AJUSTANDO LA DIRECCIÓN DE LA MANGA

- Parecía que en el ensayo anterior la manga no estaba del todo recta hacia el cono, por lo que se reajustó (unos pocos grados) la dirección de la misma.
- Sobre el material restante del ensayo anterior, se agregan 600 g de ultrafino.
- Hora inicio ventilador: 19:08
- Hora apagado ventilador: 19:29
- Los puntos de medida de velocidad están tomados en el centro de la barrera de izquierda a derecha, tal como se muestra en la figura 74. En la figura 75, se muestran las medidas de velocidad de viento en la barrera porosa.

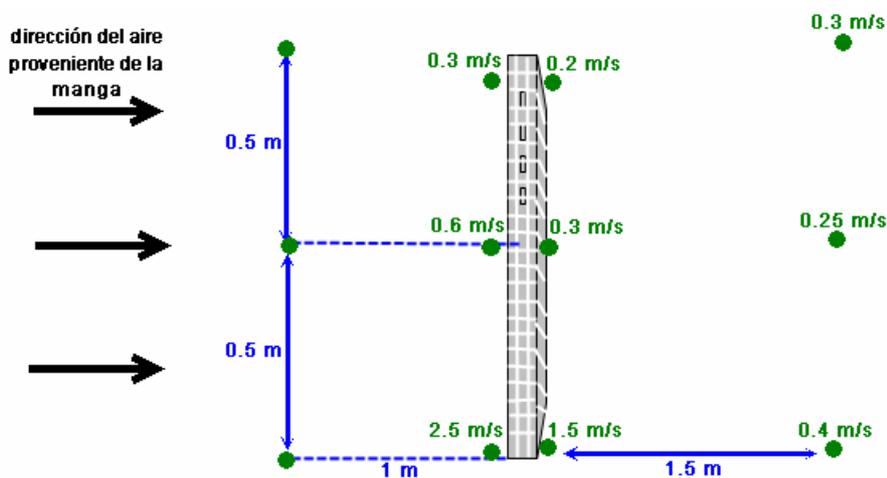


Figura 74: Croquis de los puntos de medidas

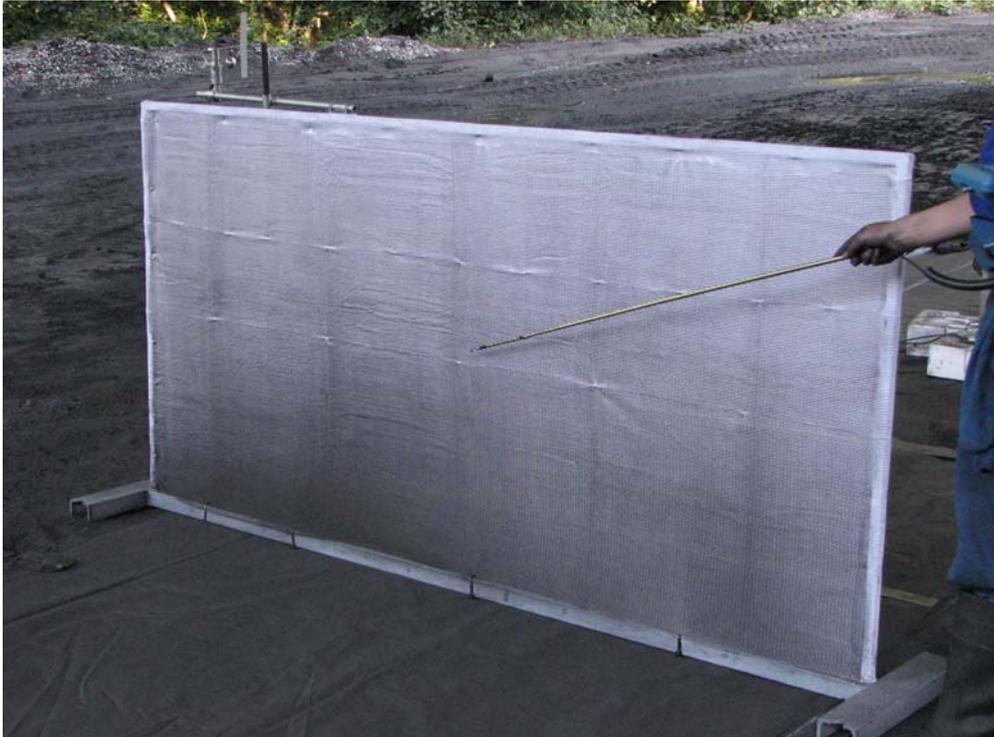


Figura 75: Repetición ensayo anterior

ENSAYO 12.4: ULTRAFINO SOBRE PARVA METÁLICA, BARRERA POROSA CUBIERTA A 3.5 m DEL CONO Y CAPTADORES A 6 m DEL CONO

En la figura 76, 77 y 78 se muestran el croquis y los detalles del ensayo.



Figura 76: Croquis y ensayo barrera sólida

- Sobre el material resultante (ultrafino sobre el cono metálico) del ensayo anterior, se agregan 600 g de ultrafino.
- Hora inicio ventilador: 19:46
- Hora apagado ventilador: 20:01
- Medida de flujo entorno a la barrera, figura 78.



Figura 77: Repetición ensayo anterior

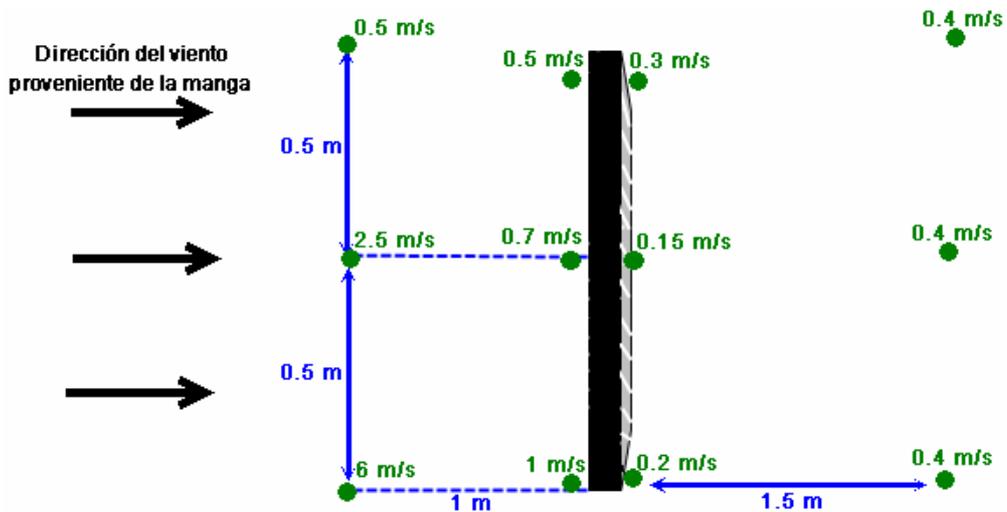


Figura 78: Repetición ensayo anterior

ENSAYO 12.5: MISMO ENSAYO ANTERIOR PERO CON CALIZA

- Se limpia el cono y se añade caliza. Se sopla de nuevo.
- Hora inicio ventilador: 20:03
- Hora apagado ventilador: 20:08
- Resultado de captadores, figura 80.



Figura 79: Repetición ensayo anterior con caliza

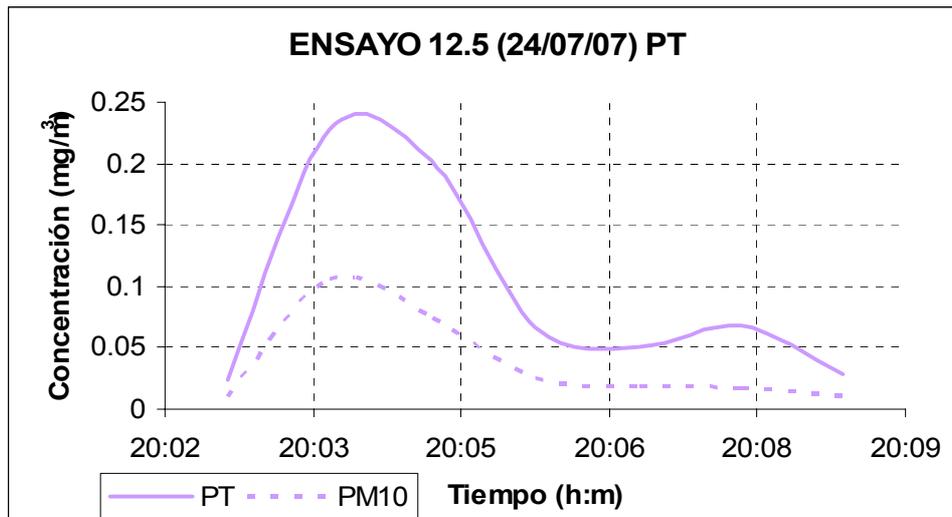


Figura 80: Datos de los captadores de las medidas de concentración de polvo en caliza (I)

ENSAYO 12.6: MISMO ENSAYO ANTERIOR PERO CON BARRERA MOJADA

- Hora inicio ventilador: 20:03
- 20:12: Se le dio golpecitos al cono para que saliera más polvo del cono. Esto se prolongó hasta el minuto 17.
- 20:18: Se añadió más caliza y se volvió a golpear sobre la superficie del cono provocando una nube densa de polvo.

- Hora apagado ventilador: 20:19
- Se recogieron muestras sobre el material que quedó impregnado en la superficie de la barrera, en la parte central superior y en la parte central inferior (figura 81).



Figura 81: Detalles de toma de muestras en barrera

- Se observó la nube de polvo que quedó dibujada en el suelo entorno a la barrera y se tomaron las dimensiones de la misma.
- Resultado de captadores figura 82.

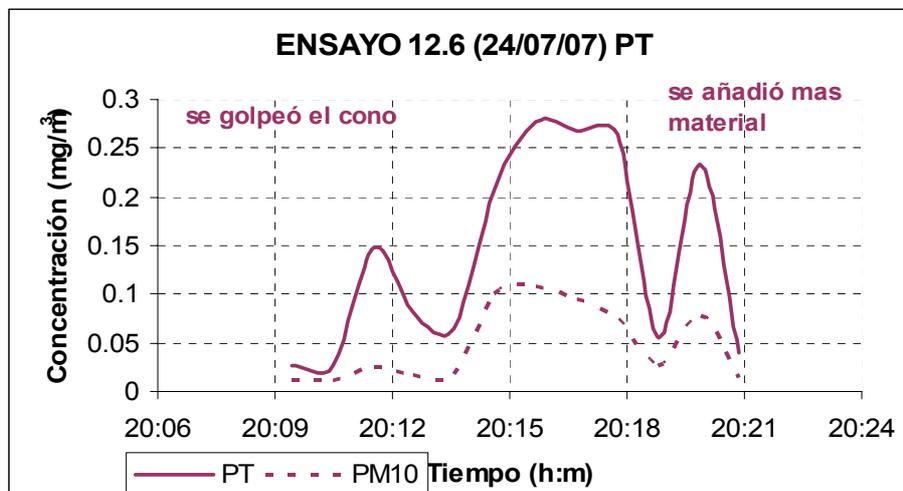


Figura 82: Datos de los captadores de las medidas de concentración de polvo en caliza (II)

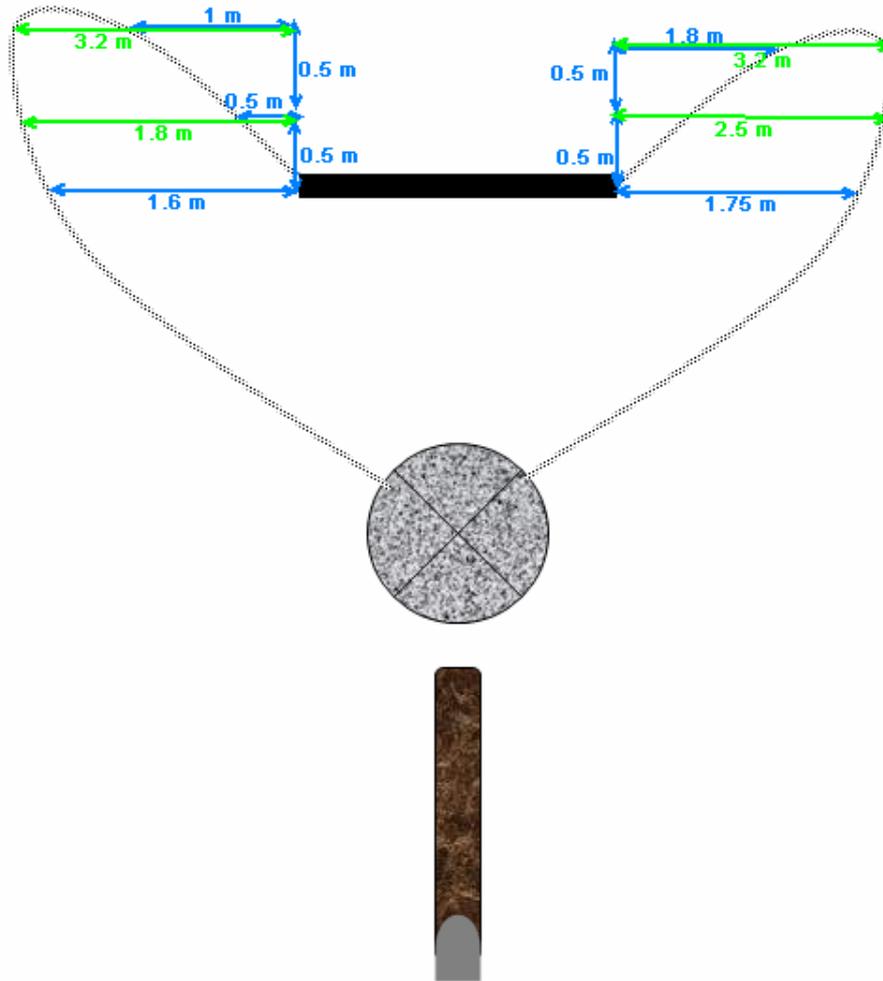


Figura 83: Croquis de ensayo de polvo y viento con barrera mojada

**ANEXO II: ESTUDIOS
GRANULOMÉTRICOS, MICROSCÓPICOS Y
DE DENSIDAD EN EL INCAR (CSIC)**

1.-MUESTRAS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COULTER

1.1.-MUESTRAS DE TODO UNO

De todas las muestras recogidas en las dos campañas de medidas realizadas en Carbonar en julio del 2006, tres de ellas son de “todo uno” pero de distintos materiales, caliza, cemento y carbón. Sus análisis nos muestran tamaños de grano aproximados de (1.5-100), (1-100) y (0.15-110) micras respectivamente.

1.1.1.-“TODO UNO” DE CALIZA

Como se muestra en la figura 1, la curva granulométrica de la caliza es concordante con los datos que nosotros tenemos de ella, es decir, se trata de una muestra muy homogénea y con un tamaño de grano de corte de unas 63 micras.

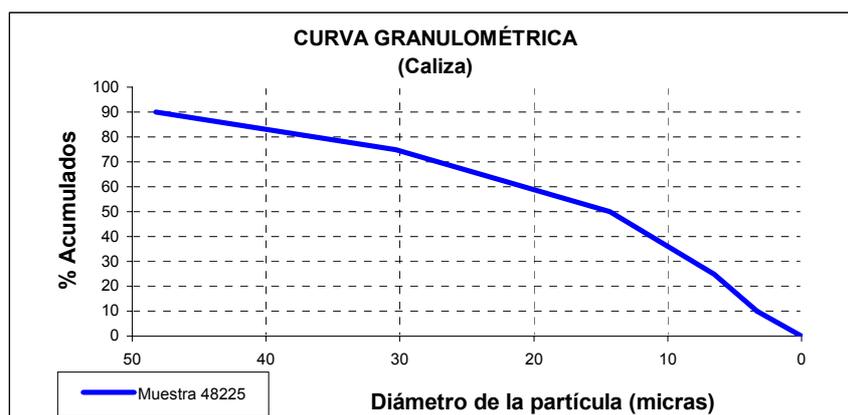


Figura 1: Curva granulométrica de caliza “todo uno”

1.1.2.-“TODO UNO” DE CEMENTO

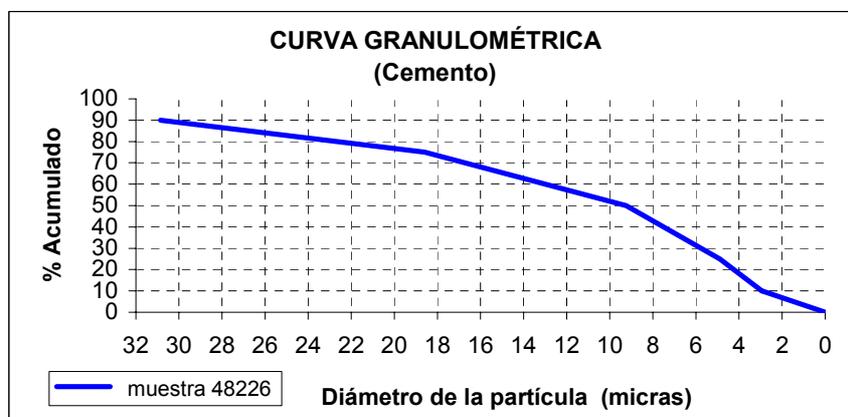


Figura 2: Curva granulométrica del cemento “todo uno”

En este caso, (figura 2) menos del 90% de los tamaños son de 30.85 micras, por lo que el resto son los tamaños mayores que serían los minoritarios.

Esta curva granulométrica del cemento sería buena, ya que coincide con la curva granulométrica típica del cemento Pórtland.

El procedimiento utilizado para comparar las curvas fue incluir los datos de los tamaños de partículas en micras y los porcentajes acumulados en la curva típica y compararlas. En este caso coincide muy bien ya que se trata de un cemento comercial.

Se realizaron las mismas pruebas para el carbón previamente molido.

1.1.3.-“TODO UNO” DE CARBÓN

Se realizarán las mismas pruebas para el siguiente material utilizado, el carbón. Pero en este caso utilizaremos carbón ultrafino, previamente molido, figura 3.

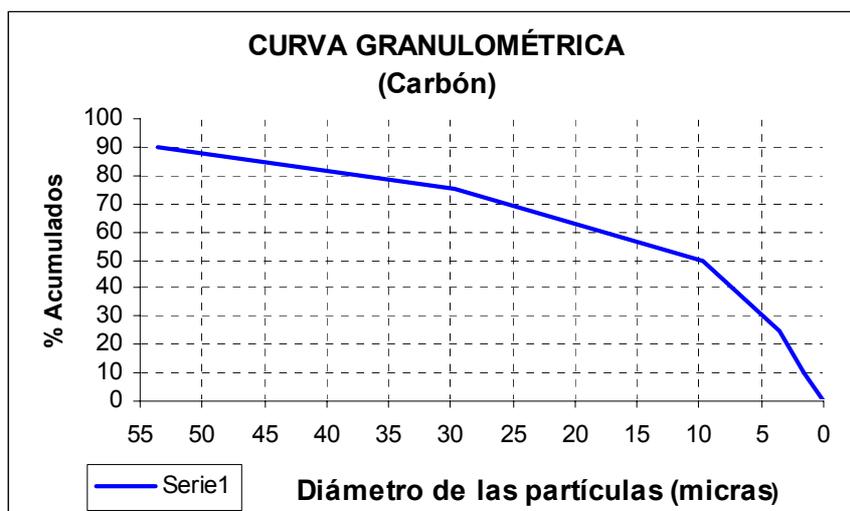


Figura 3: Curva granulométrica del carbón "todo uno"

La curva granulométrica del carbón (figura 3), se ajusta bien a la curva de referencia obtenida en el Laboratorio de Mineralurgia de la ETSIMO, aunque no lo hace a la perfección como en el caso del cemento. Esto se debe a que el cemento utilizado es cemento Pórtland comercial.

Destacamos de la curva de la figura 3, una verticalidad hasta el 10%, para hacerse luego mas tendida a medida que vamos aumentando el diámetro de las partículas.

El procedimiento fue igual que el utilizado para el caso anterior, con nuestros datos de los tamaños en micras y los porcentajes acumulados, los representamos en la gráfica típica, y comprobamos sus similitudes.

1.2.-MATERIAL A DISTINTAS DISTANCIAS

El resto de las muestras corresponden a una cantidad de material volado a distintas distancias. Estas distancias dependen del ensayo en el que se recogieron.

1.2.1.-CALIZA

1.2.1.1.-CAMPAÑA DE MEDIDAS I

El primero de ellos es el ensayo realizado con caliza y las muestras se recogieron para las distancias:

0.5m => 48228

1m => 48229

2m => 48230

3m => 48231

4m => 48232

6m => 48233

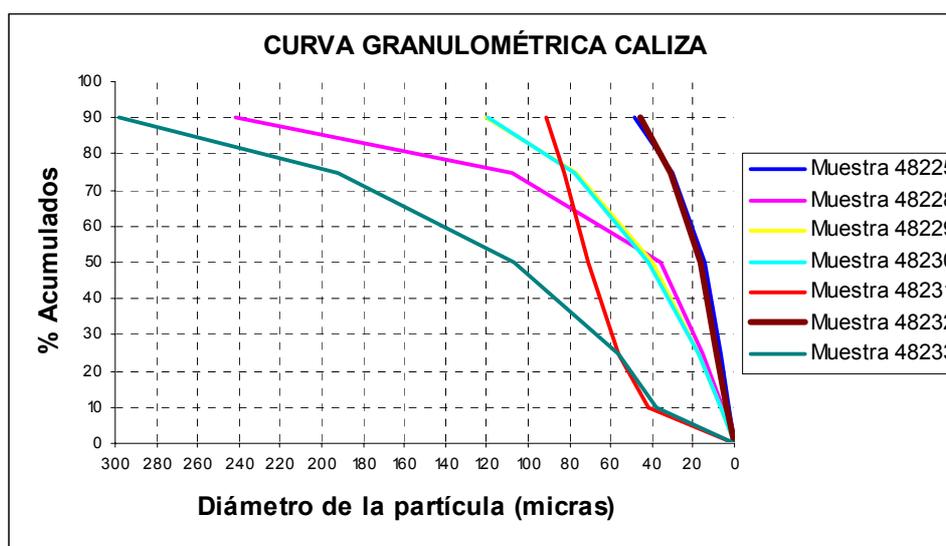


Figura 4: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras con los valores reales

En este caso la curva que mas se parece a la de “todo uno” es la que corresponde a la muestra 32, las más dispares son las 31 y 33, que se trata de las que alcanzan tamaños de hasta 1000 micras (para la 33). La muestra 32 es también la que más homogéneos tiene los tamaños de las partículas, por lo que hace suponer que es la muestra que menos contaminación ha sufrido.

En la figura 5 se muestran estas curvas retocadas. Lo que intentamos es determinar los valores reales de la muestra, es decir, eliminar los tamaños que por ser demasiado grandes no concuerdan con los de la muestra de origen, así cortamos en 100 micras. Aunque nuestra muestra de origen sería en 50 micras.

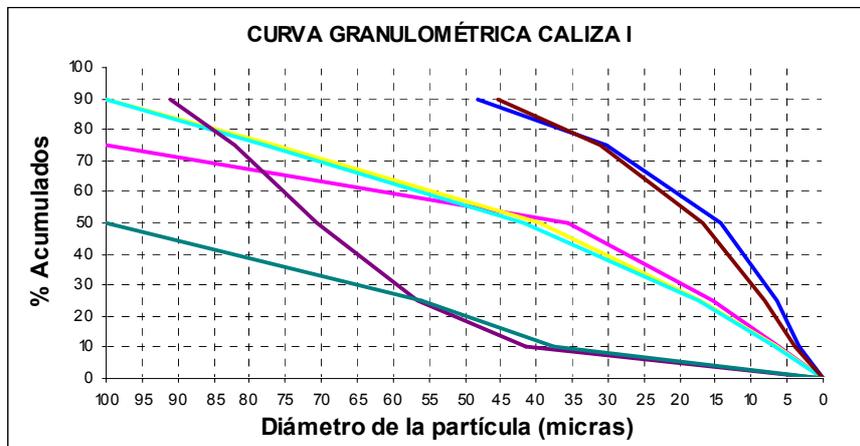


Figura 5: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras, con los valores retocados

1.2.1.2.-CAMPAÑA DE MEDIDAS II

El segundo grupo sería un ensayo realizado también con caliza pero se recogieron las muestras a unas distancias diferentes:

0m => 48234

6m => 48235

12m => 48236

Es de parecer extraño que aquellas muestras mas alejadas del foco emisor sean las que tienen tamaños de grano tan dispersos, desde los que presenta la muestra de “todo uno” hasta las 220 micras. Esto se supone que es debido a la contaminación de la muestra a la hora de realizar el ensayo o a la recogida de las mismas, figuras 6 y 7.

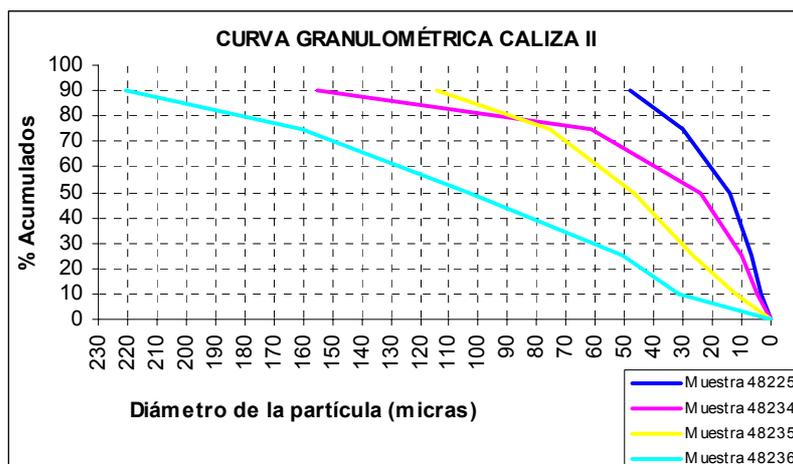


Figura 6: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras con los valores reales

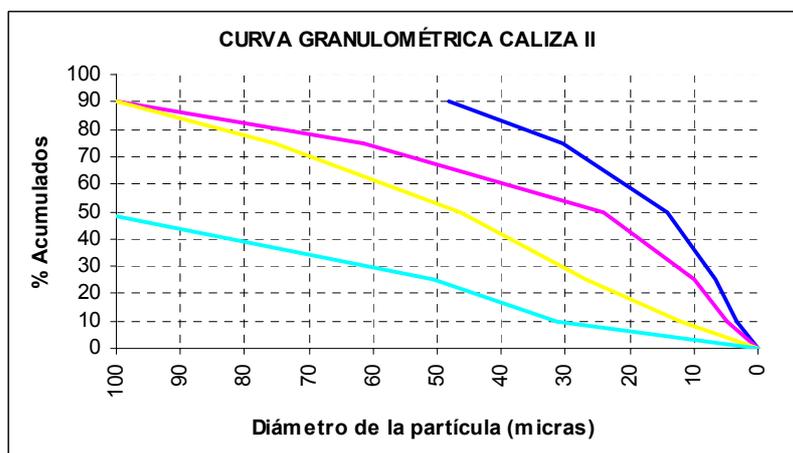


Figura 7: Curvas granulométricas de los ensayos con caliza para todas las muestras, con los valores retocados

Si a las muestras anteriores las cortamos por el tamaño de partícula de 100 micras, vemos como la muestra “todo uno” es mas vertical que las demás y por lo tanto mas homogénea.

1.2.2.-CEMENTO

El tercer grupo sería realizado con cemento pero las muestras que nos dieron en el INCAR no aparecen dos de ellas llamadas como cemento, sino como caliza. No sabemos si es un error de nomenclatura o que no son cemento en realidad. Las muestras se tomaron a las mismas distancias que el ensayo anterior:

0m => 48237

6m => 48238

12m => 48239

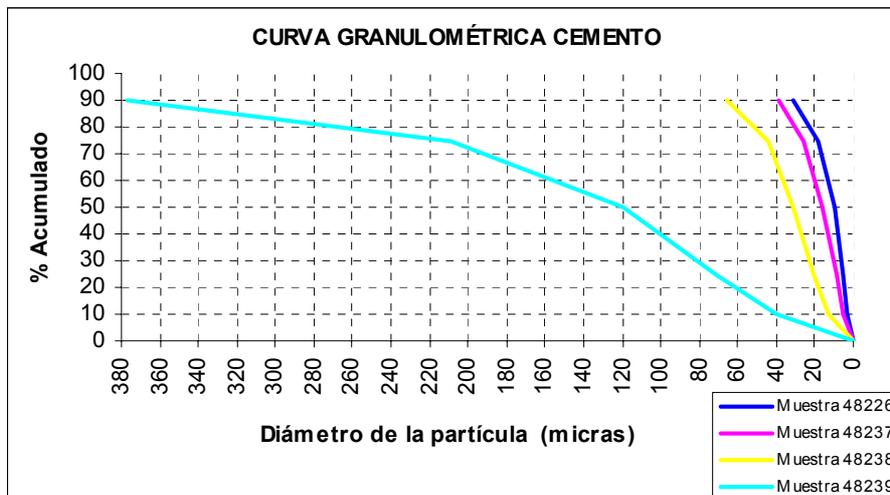


Figura 8: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras con los valores reales

El cemento es la muestra más homogénea, con tamaños de partículas constitutivos más pequeños. Destaca la muestra 39, que es la que alcanza los valores más dispares por lo tanto mas contaminación, mientras que el resto, son más verticales y similares a la muestra “todo uno”.

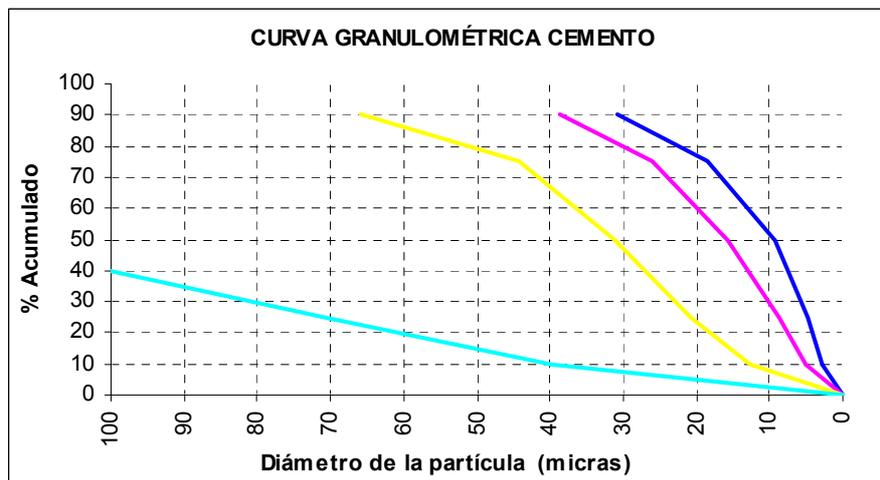


Figura 9: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras, con los valores retocados

Para este caso ocurre lo mismo, cuanto mas nos alejamos del foco emisor, mas dispersión de tamaños y por lo tanto mas contaminación en la muestra. Se puede ver en la muestra 39, la más alejada, a 12 m de la parva.

1.2.3.-CARBÓN

En el caso del último grupo, tenemos muestras de carbón también distribuidas para las mismas distancias:

0m => 48240

6m => 48241

12m => 48242

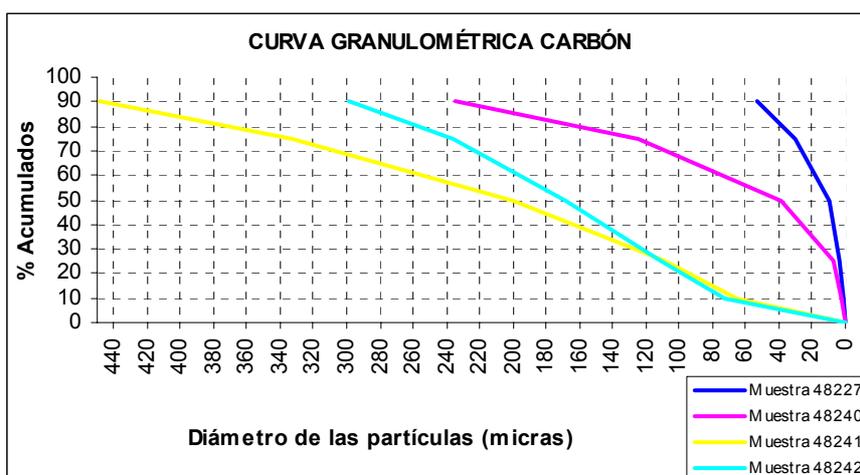


Figura 10: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras con los valores reales

En el caso del carbón ocurre lo mismo que en el primer ensayo donde las muestras son más distintas entre sí, con tamaños cada vez más grandes a medida que nos alejamos del foco emisor.

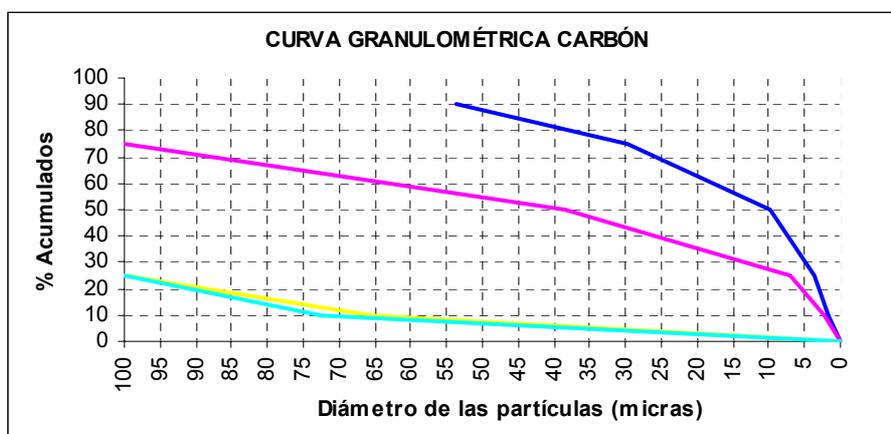


Figura 11: Curvas granulométricas de los ensayos con cemento para todas las muestras, con los valores retocados

En este caso la diferencia entre las distintas curvas es mucho mayor, estando todas las curvas por encima de la muestra “todo uno”. A mayor diferencia de tamaños de grano, mas tendidas son las curvas, lo podemos ver en la figura11 para las muestras 41 y 42.

1.3.-CURVA GRANULOMÉTRICA DE LOS TRES MATERIALES

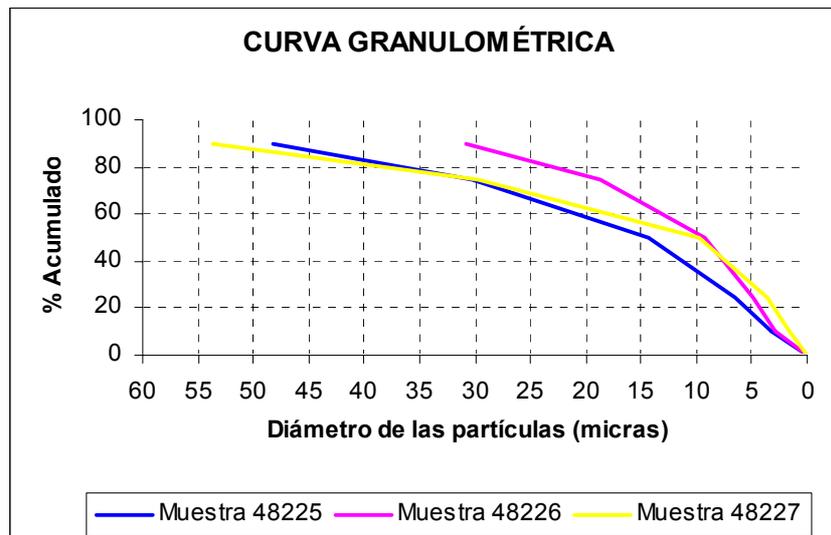


Figura 12: Gráfico donde aparecen las curvas granulométricas de los tres materiales, caliza, cemento y carbón

Las tres curvas son muy similares, pero podemos determinar algunas diferencias, el cemento es el que menor tamaño de partícula posee y por lo tanto es el más homogéneo, el carbón es la muestra con tamaños mas grandes, y la caliza es intermedia entre las dos.

2.-DENSIDADES

DENSIDADES DEL INCAR			
Ref.INCAR	Ref. Muestra	Densidad real (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)
48225	1. Caliza	2.714	1.31
48226	2. Cemento	2.752	1.23
48227	3. Carbón	2.040	1.12

Tabla 1: Datos de densidad proporcionados por el INCAR

3.-ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE LAS MUESTRAS

De todos los ensayos analizados exponemos como ejemplo el correspondiente al carbón y a la caliza.

3.1.-CARBÓN

Las microfotografías han sido tomadas con un microscopio óptico (Zeiss Axioplan) de luz blanca reflejada, en conexión con un software de Leica para la captura de imágenes. Todas las fotos están tomadas en luz blanca reflejada y con objetivo de inmersión en aceite de 50x. Esta muestra es una muestra carbonosa. Contiene al menos dos carbones de diferente rango tal y como se aprecia en las microfotografías. En la figura 13 se muestra una partícula de vitrinita (V) (es el componentes mayoritario) afectada térmicamente lo que le da esa porosidad, ya que el carbón en su origen tiene volátiles que al calentarse se volatilizan dejando esta porosidad. En la figura 14 se pueden ver partículas carbonosas de diferente tamaño. Las dos que están señaladas con flechas son partículas de dos carbones de diferente rango. En la figura 15 una partícula carbonosa del carbón de bajo rango (flecha). En la figura 16 una partícula carbonosa del carbón de alto rango conteniendo pirita (P). En las figura 17 y 18 partículas de los dos carbones de diferente rango. Son dos fragmentos de vitrinita afectadas térmicamente y en la figura 19 una partícula carbonosa constituida por vitrinita e inertinita. La escala de las microfotografías sería de 200 micras el largo de la microfotografía.

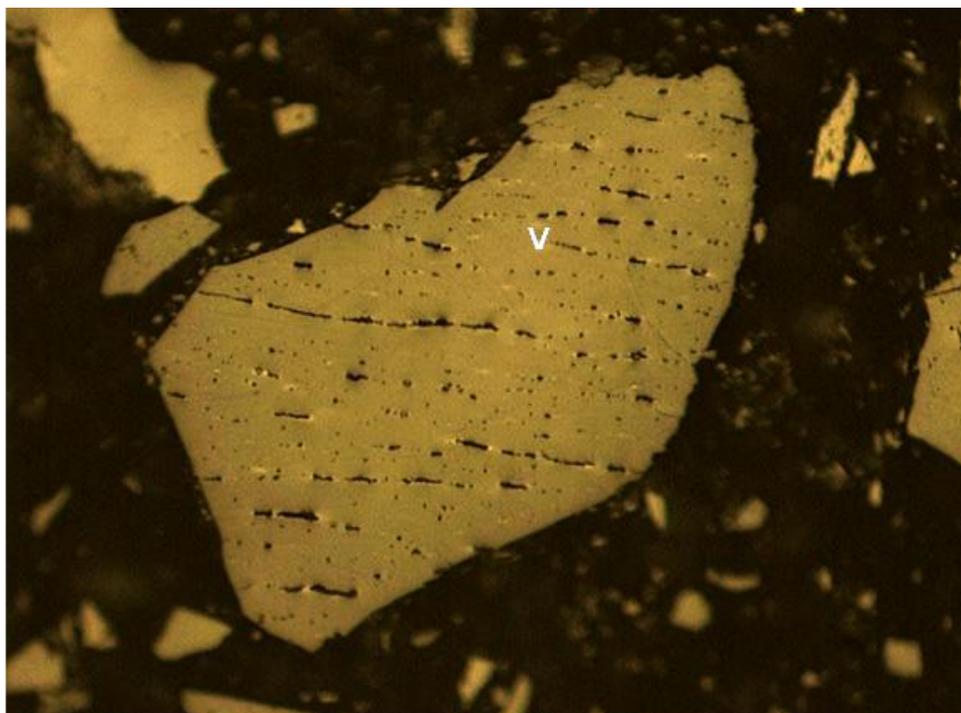


Figura 13: Partícula de vitrinita (V) afectada térmicamente

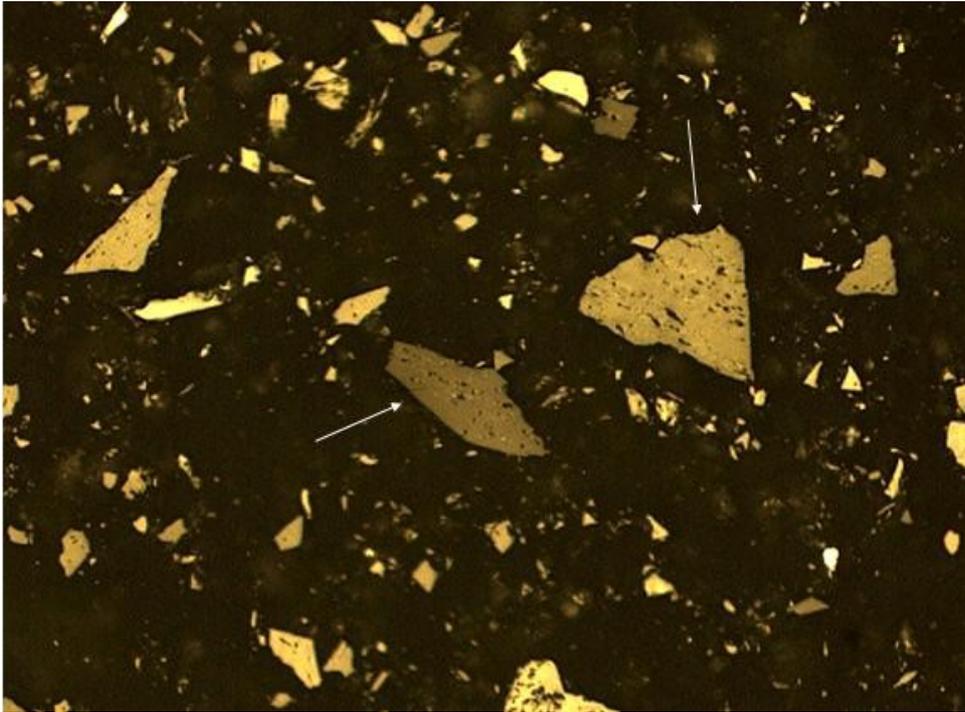


Figura 14: Partículas carbonosas de diferente tamaño

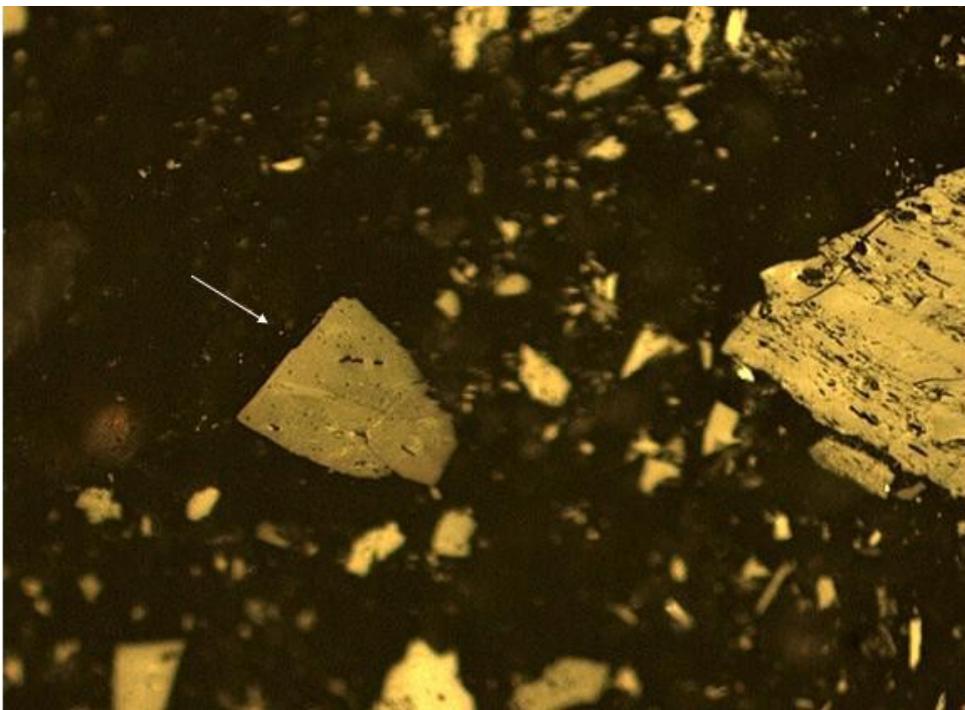


Figura 15: Partícula carbonosa del carbón de bajo rango (flecha)

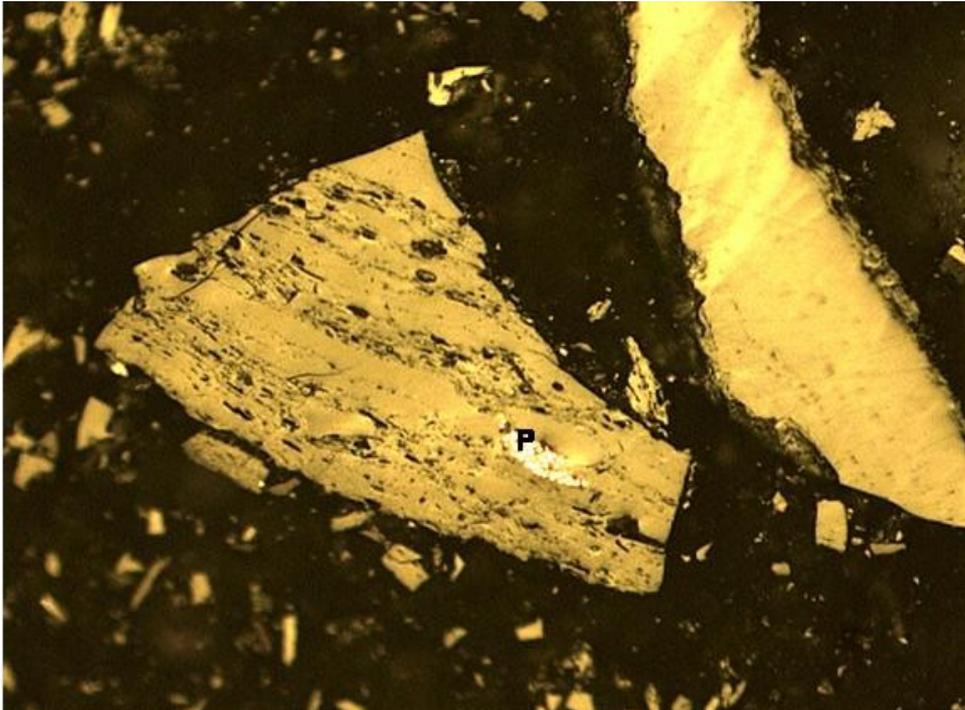


Figura 16: Partícula carbonosa del carbón de alto rango conteniendo pirita (P)

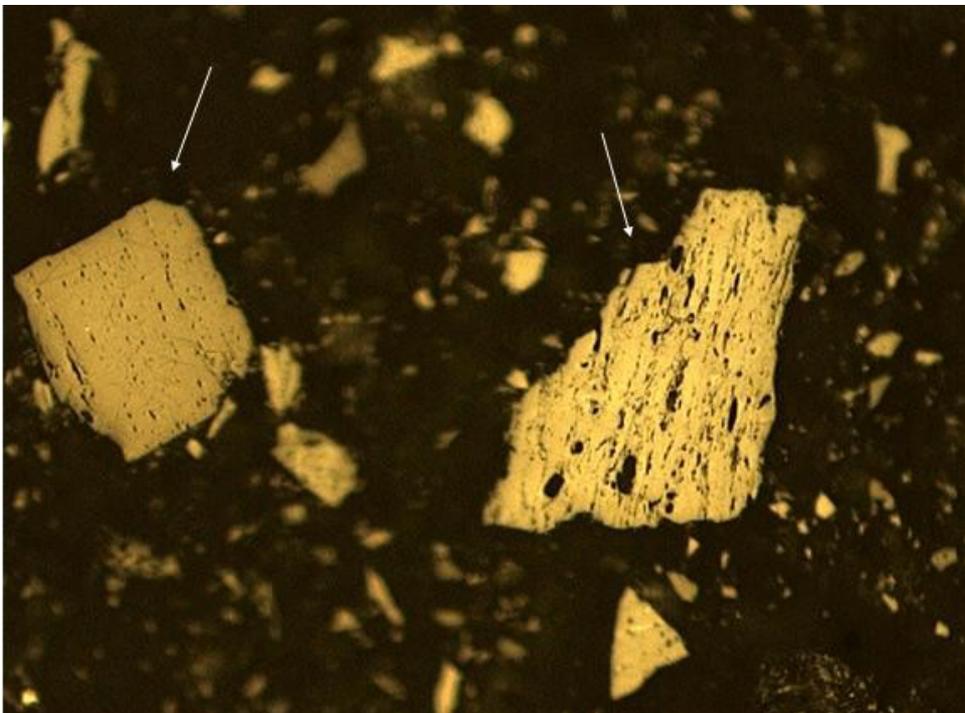


Figura 17: Partículas de los dos carbones de diferente rango

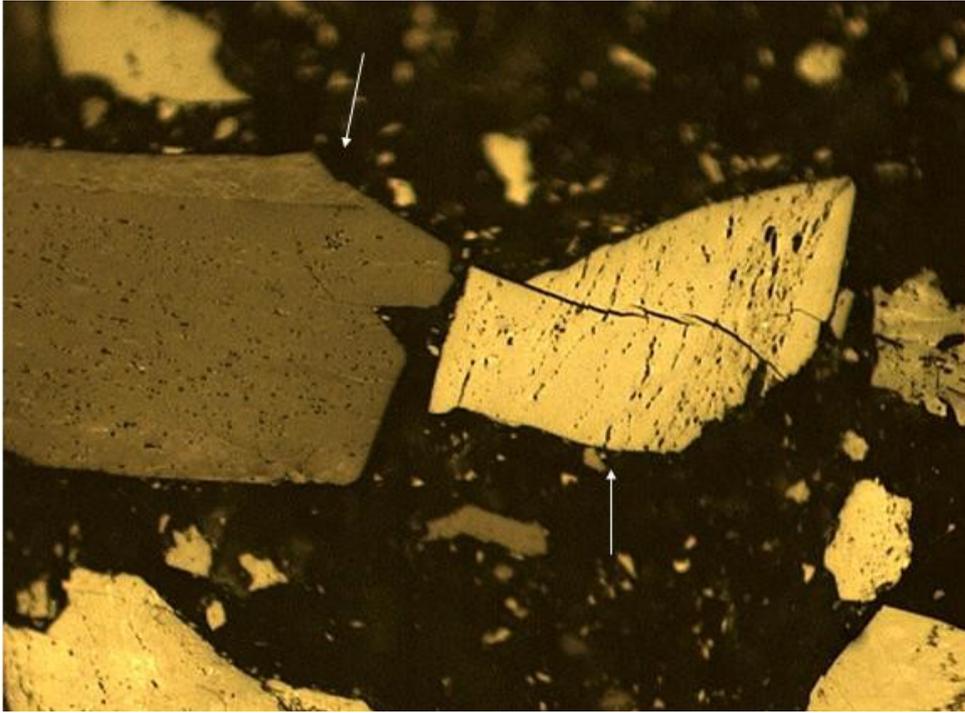


Figura 18: Ídem anterior

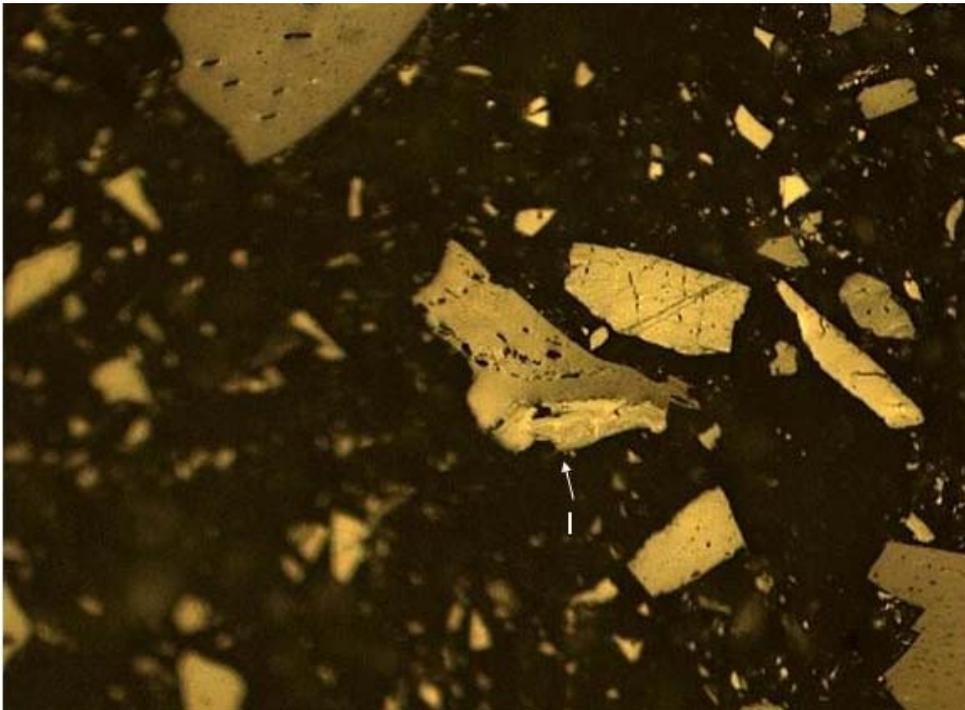


Figura 19: Partícula carbonosa constituida por vitrinita e inertinita (I)

3.2.-CALIZA

Las microfotografías se toman con el mismo procedimiento explicado para el caso del carbón, microscopio óptico (Zeiss Axioplan) en conexión con un software de Leica y con inmersión en aceite de 50x. En cada ejemplo se explica el tipo de iluminación.

Esta muestra es una muestra inorgánica. Solamente se ha encontrado una partícula carbonosa perteneciente a un carbón de alto rango.

En las figuras 20, 21, 22 y 23 se muestra un aspecto general de la muestra. Solo material inorgánico. Microfotografías tomadas en luz blanca reflejada.

En las figuras 24 se muestra una partícula carbonosa perteneciente a un carbón de medio-alto rango y la figura 25 sería el mismo campo que la figura anterior pero tomado con nicols cruzados y placa de retardo λ , siendo la partícula isotrópica.

En las figuras 26, 27 y 28 se puede ver el aspecto general de la muestra. Solo material inorgánico. Microfotografías tomadas en luz blanca reflejada.

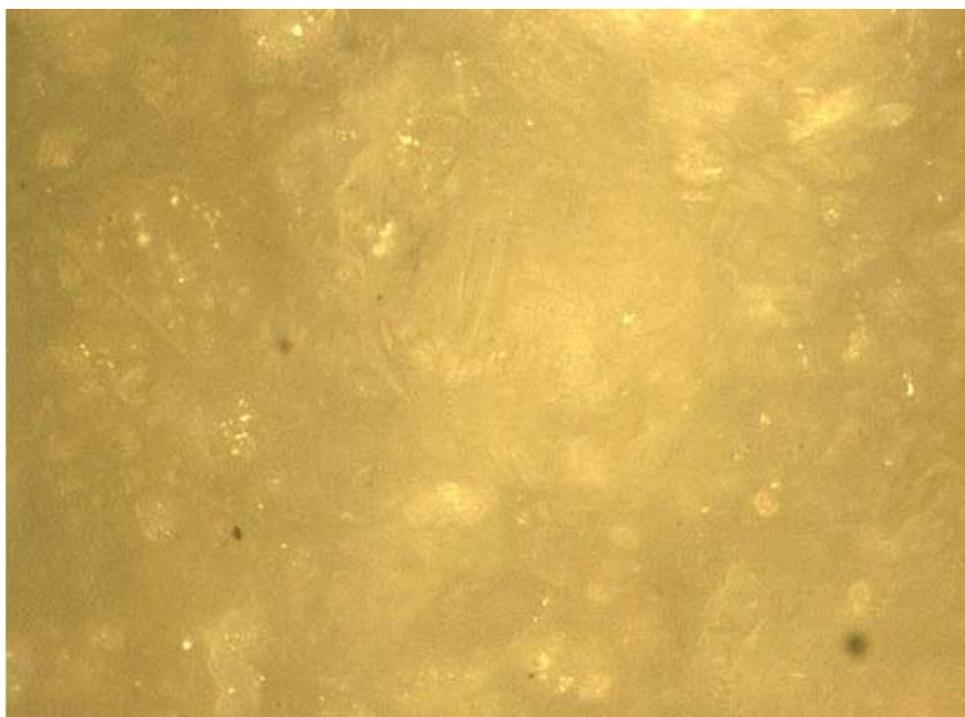


Figura 20: Caliza

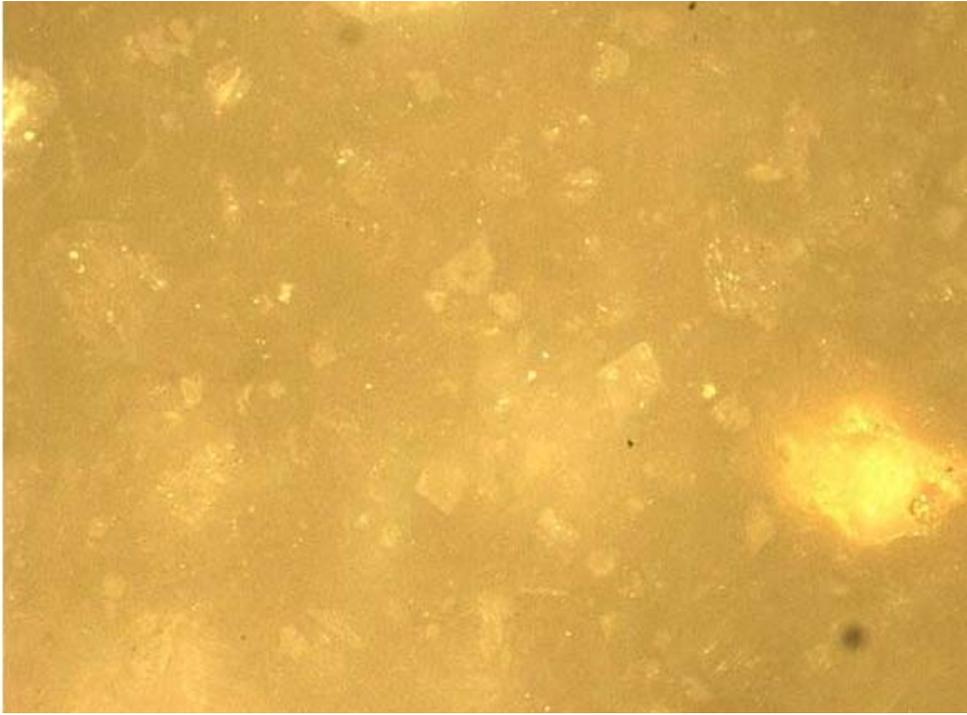


Figura 21: Caliza

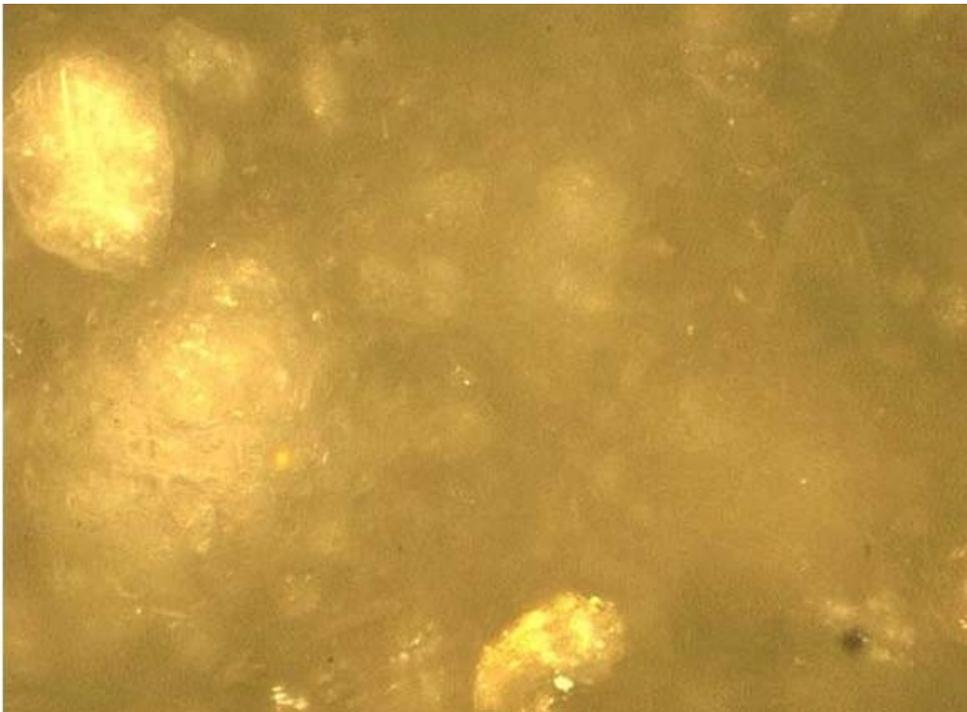


Figura 22: Caliza

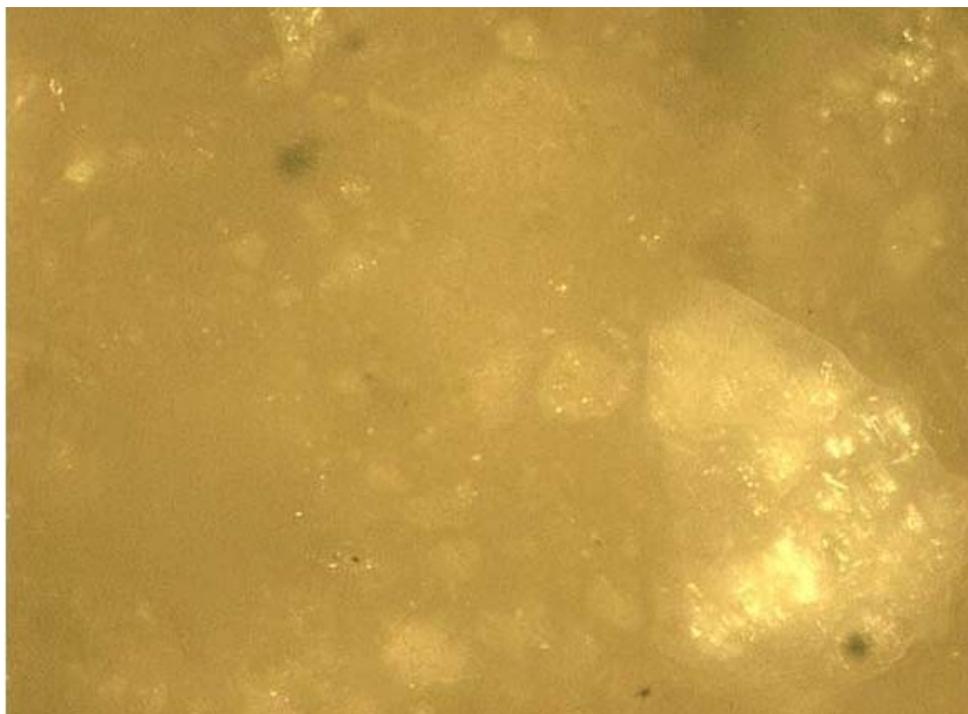


Figura 23: Caliza

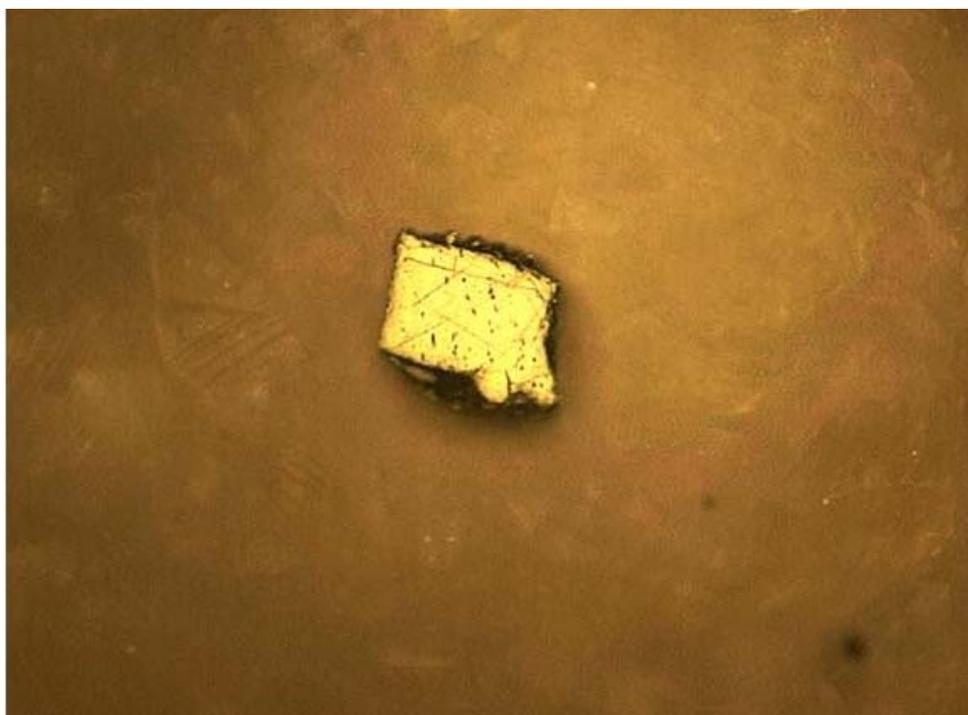


Figura 24: Partícula carbonosa perteneciente a un carbón de medio-alto rango

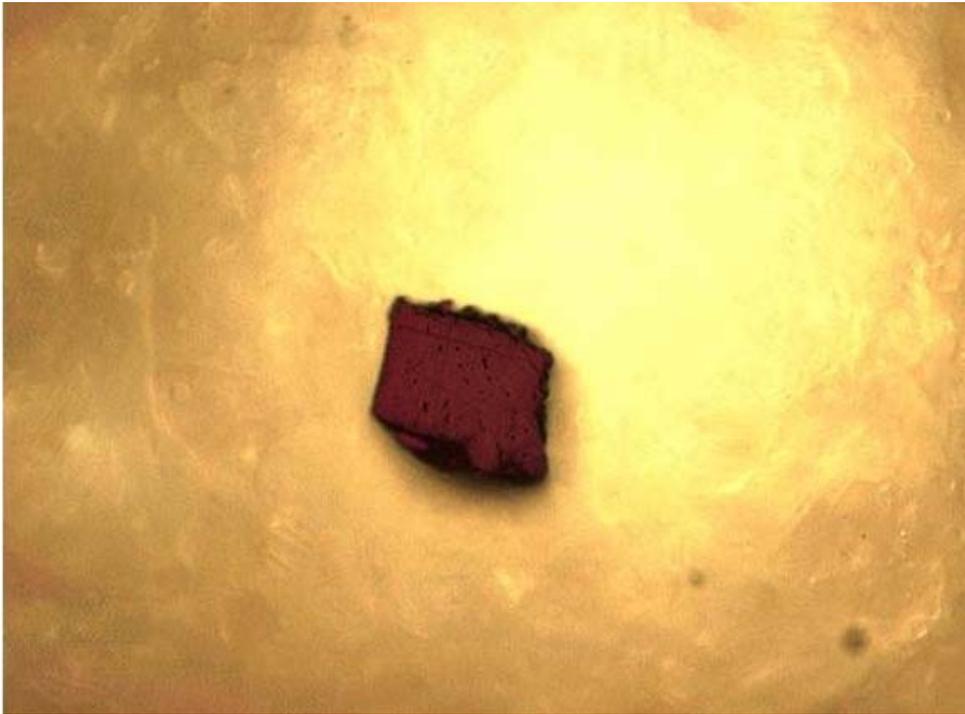


Figura 25: Partícula carbonosa con nicoles cruzados y con una placa de retardo de 1λ .

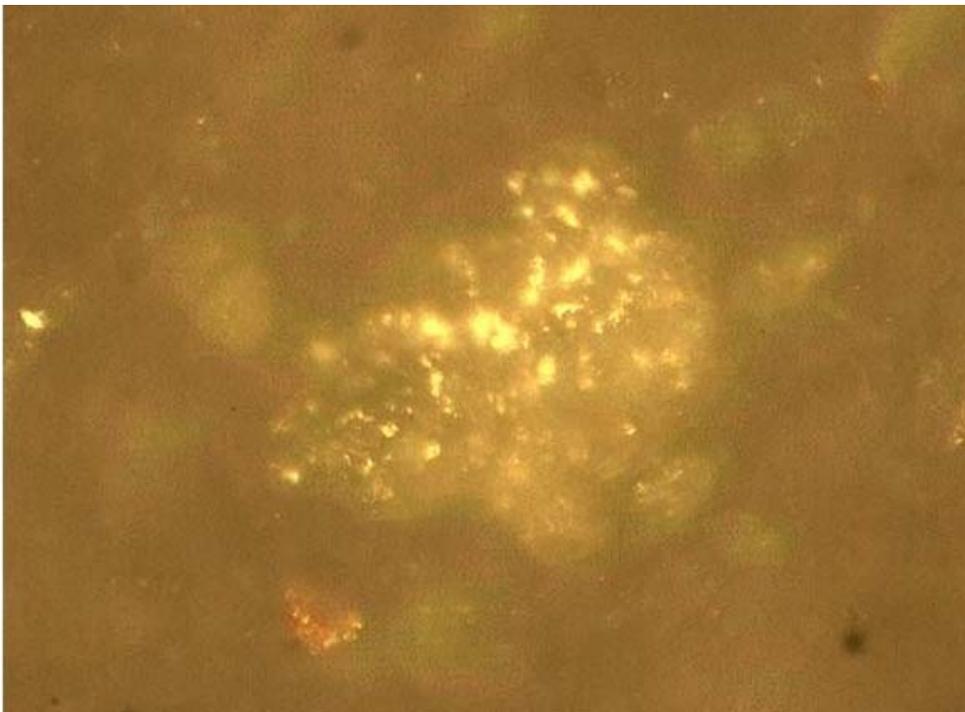


Figura 26: Caliza

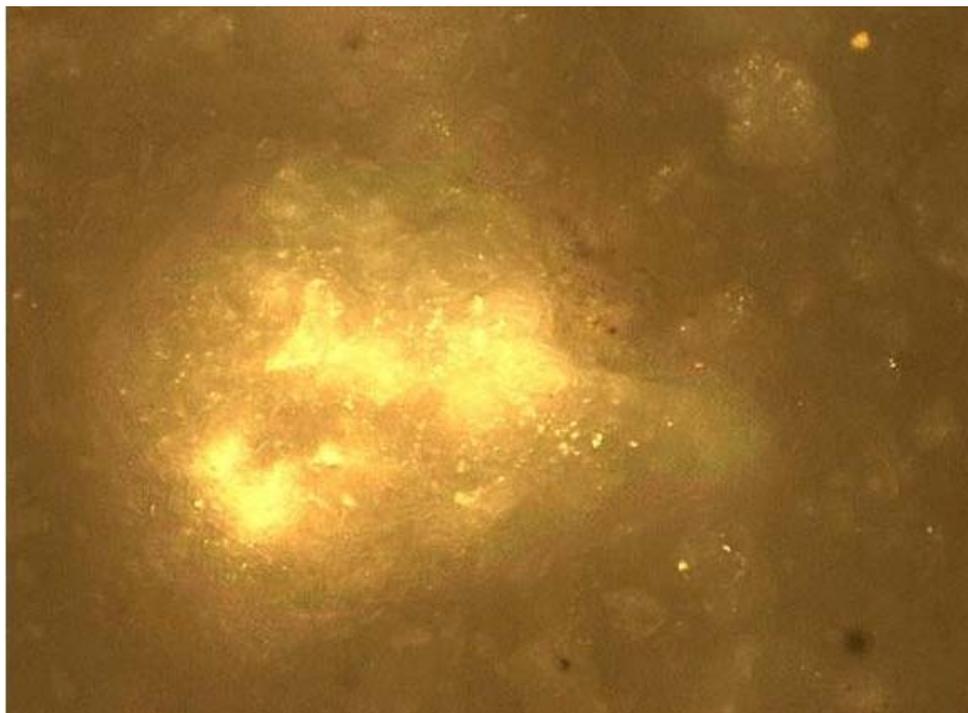


Figura 27: Caliza

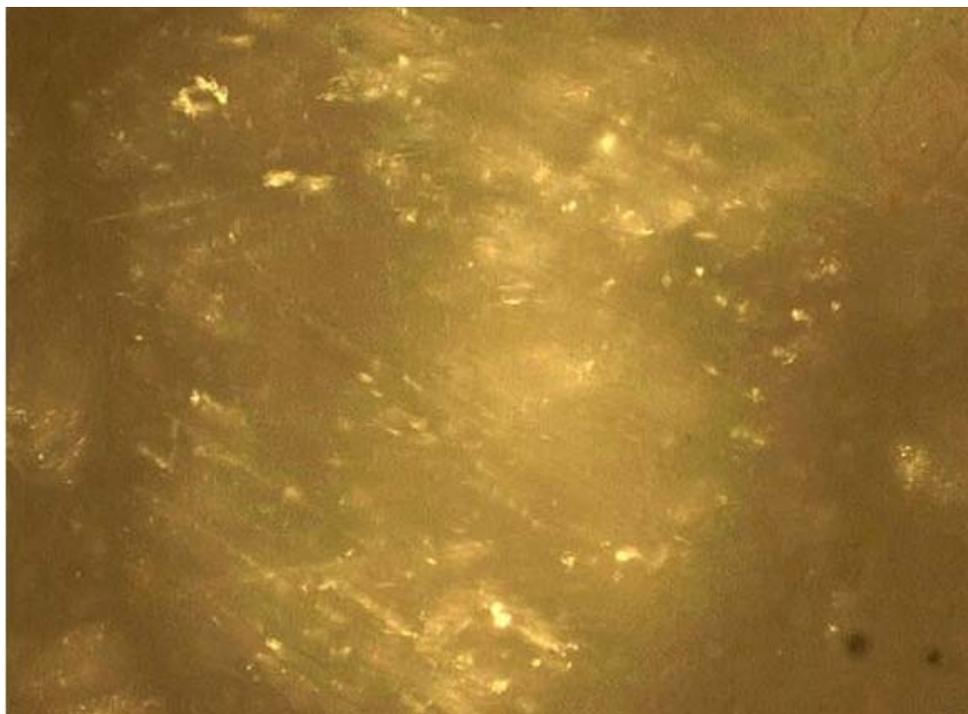


Figura 28: Caliza

**ANEXO III: BARRERAS POROSAS.
CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS**

1.-INTRODUCCIÓN

Las distintas investigaciones realizadas con barreras, demostraron la existencia de dos fenómenos producidos por el viento aguas debajo de las mismas, y que interferían de manera importante en la emisión de polvo.

Estos dos fenómenos serían, la zona de altas y bajas velocidades del vórtice de viento explicados ampliamente en el apartado 6. Los recordamos en la figura 1 para el caso de la barrera con menor emisión de polvo, de 13.2m de altura, y situada a 33m de distancia de la parva de 11m de altura.

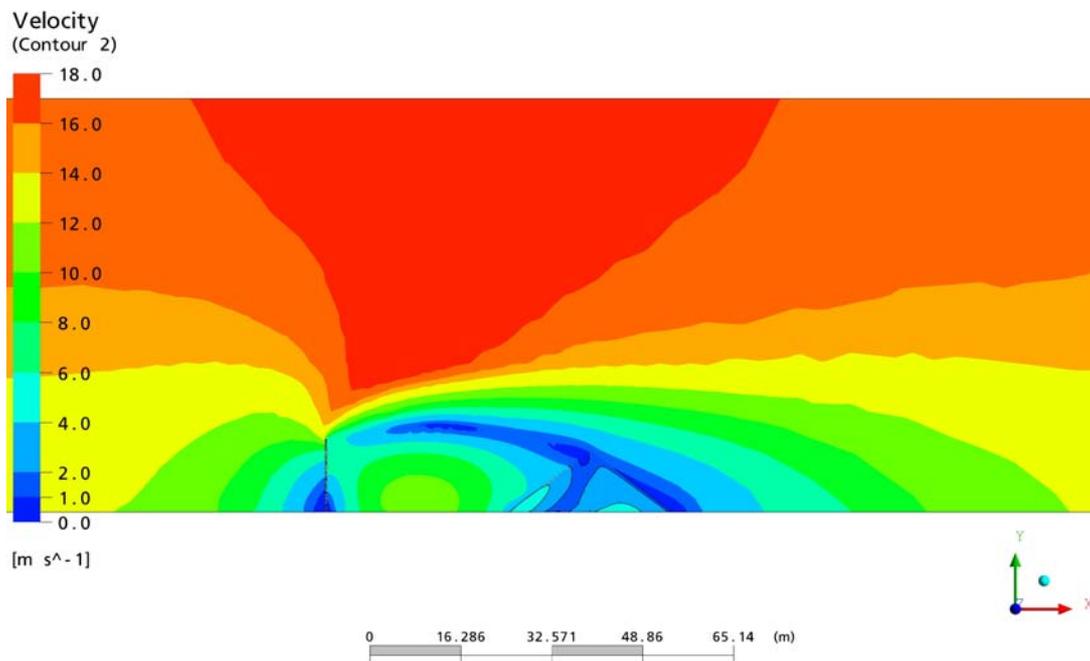


Figura 1: Vórtice de alta velocidad y zona de baja velocidad para la barrera de menor emisión

De los dos fenómenos el que mas nos influye en la emisión de polvo es correspondiente al vórtice de alta velocidad, ya que da lugar a una mayor velocidad en la zona de barlovento de la parva y por lo tanto una mayor emisión.

Este hecho se intentó subsanar, realizando nuevas configuraciones de barreras, como por ejemplo introduciendo unas aperturas en la parte interior de las mismas. Nuestros estudios se centraron en dos aperturas de 1 y 2m de las cuales la mas eficaz ha sido la de dos metros, que reducía mucho la velocidad

del vórtice e incluso producía una zona de baja velocidad que ayudaba a disminuir la emisión total hasta en un 97%.

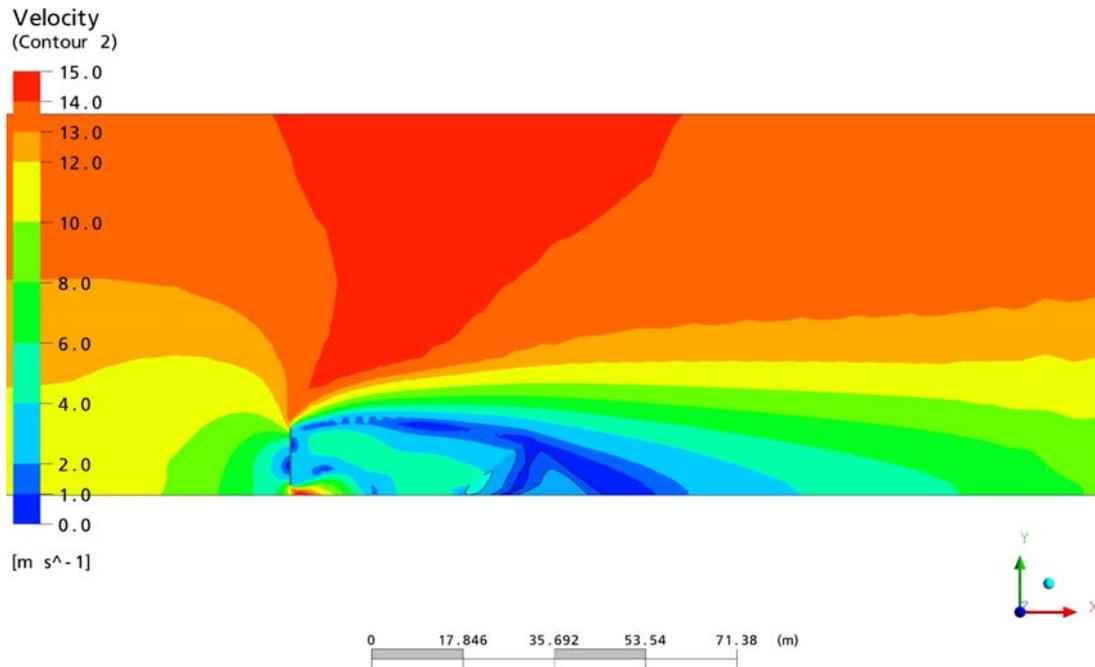


Figura 2: Reducción del vórtice por la apertura inferior de 2 m

Aún habiendo mejorado notablemente, la disminución de las velocidades del viento en el vórtice no es total, lo que nos hace seguir investigando en otras direcciones tales como el empleo de la novedosa técnica de las barreras porosas, actualmente en fase de investigación e implantación a escala industrial.

Nuestras investigaciones sobre las barreras porosas se basan en distintos estudios realizados por varios investigadores, que dedujeron la eficacia de las mismas a través de medidas de campo (Boldes et al., 2002 [84]), de estudios en túneles de viento (Billman and Arya, 1985 [85]) o de simulaciones numéricas (Wang and Takle, 1995 [86], Willson, 1985 [87], Zeng and Takahashi, 2000 [88]).

Raine and Stevenson, 1977 [89], realizaron medidas de la velocidad media del viento y de la intensidad de la turbulencia para varios tipos de barreras porosas, usando un anemómetro de hilo caliente. Clasificaron el viento por detrás de la barrera en dos regiones: “bleed-flow domain” y “displacement-flow-domain”. Sin embargo, el anemómetro de hilo caliente, no pudo detectar el

vórtice de alta velocidad que se produce inmediatamente después de la barrera y subestimaron la intensidad de la turbulencia en esa zona.

A efectos ilustrativos, en la figura 3 se muestra un caso de barreras porosas naturales constituyendo una pantalla de protección contra el polvo en una planta de tratamiento de carbón.

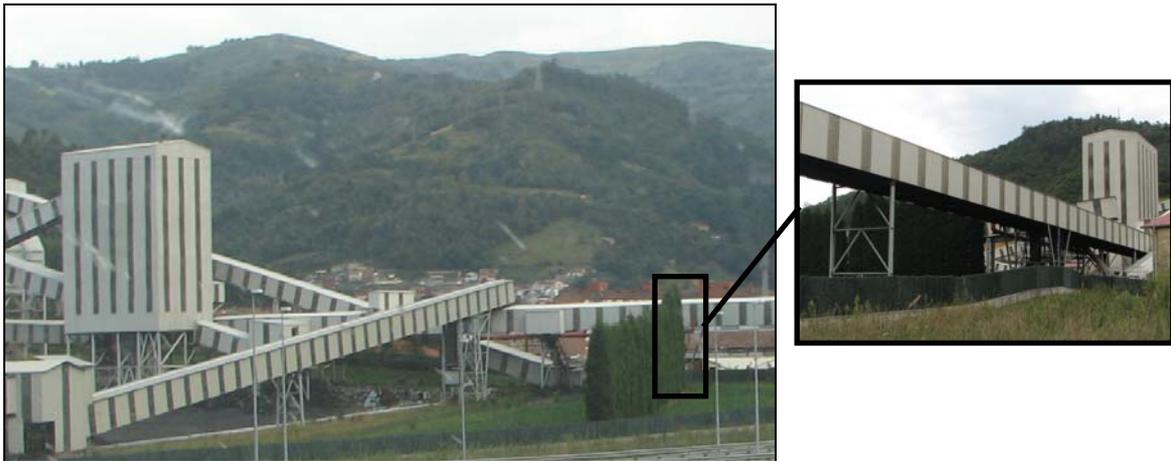


Figura 3: Barrera porosa en una planta de tratamiento de carbón

Perera, 1981 [90] empleó un anemómetro de pulso caliente (el valor de la velocidad se obtiene a partir de un pulso de repetición de corriente que lo conduce a una resistencia) para resolver los defectos de las medidas realizadas con el anemómetro de hilo caliente y así demostrar que es una buena herramienta para medir la zona de separación del flujo por detrás de la barrera. En sus estudios, determina a la porosidad de la barrera como el factor que mas influye en el flujo de viento por detrás de la barrera, en comparación con otros factores como puede ser su configuración o diseño.

Castro, 1971 [91] determinó que no hay vórtice por detrás de la barrera si esta tiene una porosidad mayor del 30%. Perera en sus estudios anteriores, encontró también resultados similares.

Lee and Kim, 1999 [75] midieron perfiles de la velocidad media del viento y turbulencia por detrás de la barrera para diferentes porosidades usando la técnica “Particle tracking velocimetry” (se trata de un algoritmo matemático que permite calcular la velocidad de las partículas a partir de fotografías en cámara oscura), determinando que una porosidad igual al 20% muestra una reducción

alta de la velocidad por detrás de la barrera. Sin embargo, la porosidad del 40% tiene una intensidad de turbulencia más pequeña que la barrera con 20% de porosidad. En trabajos posteriores (Kim and Lee, 2001 [92]) investigaron este efecto, determinaron que la mejor porosidad es del 38.5%.

2.-MODELIZACIÓN DE LAS BARRERAS POROSAS

2.1-MODELO MATEMÁTICO

Las distintas simulaciones son realizadas a partir del software Ansys CFX 10.0, basado en Códigos Numéricos Computacionales en 3D. Este software permite calcular los perfiles de velocidad $U(x, y, z)$, aguas debajo de la barrera.

La estimación adecuada de la variable U_b (“through flow velocity” o velocidad que tiene la parte del flujo que pasa a través de la barrera) es crítica para saber la porción del flujo total que se filtra por los poros de la barrera. Sin embargo, las perturbaciones de presión en barreras con suficiente porosidad, están también sometidas a “efectos de borde” debido a la advección y difusión turbulenta (Wang and Takle, 1996 [93]), este efecto de borde corresponde con un punto de inflexión en el perfil de velocidad media existente en el borde de la misma, y que coincide con el máximo de intensidad turbulenta y con el máximo gradiente de la velocidad media en la capa de corte. Por lo tanto, lo anterior es necesario para obtener una descripción detallada de los flujos de viento dentro y alrededor de la barrera porosa, además determinan como a medida que aumenta la distancia a la barrera, la zona de mayor turbulencia característica desciende, debido al descenso de las líneas de corriente del flujo exterior que rodea la zona protegida.

Packwood, 2000 [94] parametrizó las barreras porosas utilizando una placa metálica porosa y un “factor de resistencia de la velocidad” a lo largo de la dirección de flujo (R_{FX}), factor muy importante a tener en cuenta, cuando tenemos barreras vegetales en las cuales varía su porosidad con la longitud de la misma (Packwood, 2005 [95]).

Nosotros especificamos el momento correspondiente al cálculo de la pérdida de presión entre la zona porosa y el dominio fluido a través de dos coeficientes, el coeficiente de resistencia lineal (C_{R1}) y el coeficiente de resistencia

cuadrático (C_{R2}), que determinan la viscosidad y la pérdida inercial respectivamente y que explicamos en detalle mas adelante.

Aplicando los modelos de dos fases, siendo la fase continua el aire que se calcula usando la discretización las ecuaciones de Navier-Stokes [96]. Esta discretización produce una serie de ecuaciones diferenciales parciales que describen las propiedades del flujo (ecuaciones del momento y de la continuidad), (1) y (2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + S_{Mi} \quad (2)$$

I II III IV V Términos

donde:

I es el término de la aceleración.

II es el término de la advección.

III es el término de la presión.

IV es el término de la difusión.

V es el termino fuente.

$$S_{Mi} = -C_{R1} u_i - C_{R2} |U| u_i \quad (3)$$

donde:

u_i son los componentes direccionales de la velocidad a lo largo de las 3 direcciones (x,y,z).

U es el vector velocidad.

|U| es la velocidad.

P es la presión.

ρ es la densidad del aire incompresible.

μ es la viscosidad dinámica.

S_{Mi} son los términos fuente en las tres direcciones, en la ecuación (3) indica la barrera porosa.

C_{R1} se considera como 0 ($\text{Kg} / \text{m}^3 \text{ s}^1$) asumiendo insignificante pérdida viscosa en el flujo de aire (siendo μ igual a $1.79 \times 10^{-5} \text{ N s} / \text{m}^2$).

C_{R2} se calculó utilizando $[-k_r \rho / W \text{ (kg} / \text{m}^4)]$, siendo K_r el coeficiente de resistencia en función del largo (W) de la barrera.

En la simulación, la atenuación de la velocidad del viento dentro de los poros de la barrera se modela implementando la ley de Darcy en forma generalizada (4).

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\mu}{k} u_i + k_{\text{loss}} \rho |U| u_i \quad (4)$$

La segunda parte de la ecuación anterior corresponde al término de la velocidad del fluido además de la forma lineal de la Ley de Darcy. Estos términos, para los efectos inerciales en el régimen no lineal del flujo con altos números de Reynolds, relaciona la velocidad del flujo y la presión vía $K_{\text{loss}} [C_{R2} \cdot \rho]$.

Las propiedades del flujo que incluyen la energía cinética turbulenta, la disipación de la turbulencia debida al estrés viscoso, los componentes de la velocidad del flujo y la distribución de la presión, se calcularon para un volumen de malla que engloba el dominio de la simulación.

2.2-MODELO FÍSICO

La geometría del modelo consta de un paralelepípedo de (8x5x25) metros y engloba la manga de tres metros y 300 mm de diámetro, la barrera y el cono de 52 cm de altura. El modelo se malló con un total de 1107611 elementos y una calidad de 0.35. En la figura 4, se muestran dos detalles del mallado, el de la derecha representa un plano con los elementos de mallado coloreados en función de su calidad.

En los dos casos, se destaca una zona de mallado mas fino a 3m de la parva, que será donde están situados los captadores y donde mediremos la concentración de polvo. Además, para reducir el tiempo de cálculo y aumentar

la exactitud de los resultados, se recurre a una malla mas fina que englobe la barrera y la parva. El tamaño del dominio se considera el adecuado, y los resultados de los ensayos se consideran independientes del mallado.

Una vez creada la geometría y el mallado, el siguiente paso es la definición física del modelo. Para este caso, se necesitaron nuevas simulaciones para conseguir dotar de porosidad a la barrera.

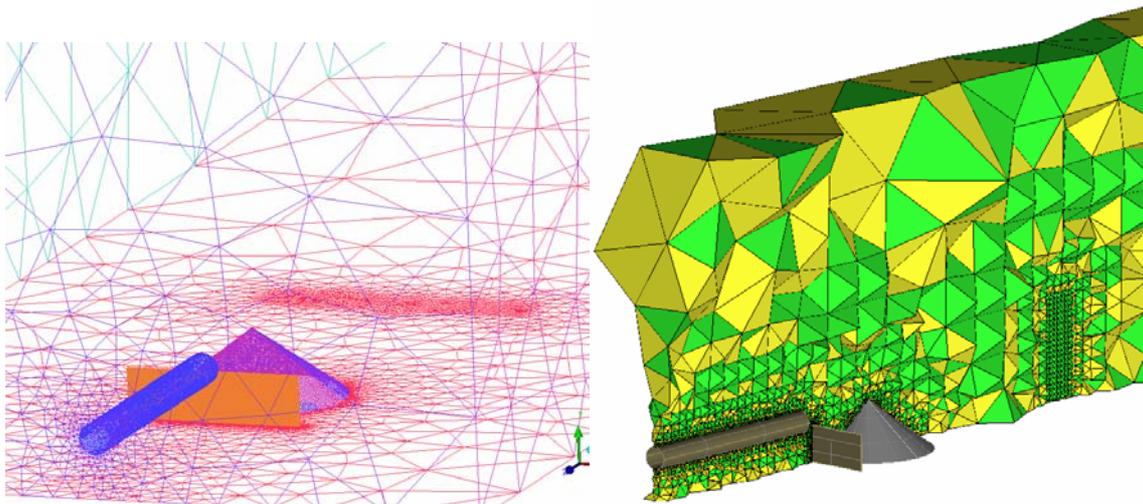


Figura 4: Mallado del modelo en 3D

El Ansys CFX, incorpora la porosidad de varias maneras diferentes:

- a partir de un dominio poroso: en este caso la barrera se considera como un dominio poroso, mientras que el dominio aire es un dominio fluido. Este dominio poroso se determina por la variable “Volumen Porosity”, introduciendo en la casilla correspondiente el volumen de porosidad que nosotros consideremos, en este caso del 30%.
- a partir de un dominio sólido: en este caso el dominio sólido está caracterizado por el material elegido, el aluminio, y creamos un “domain interface”, es decir, una superficie ficticia que relaciona el dominio fluido y el sólido coincidiendo con las superficies que integran la barrera. No conseguimos buenos resultados.
- a partir de un subdominio: dentro del dominio fluido aire, se crea un subdominio que engloba la barrera, y se seleccionan la opción “Momentum

Source” y los Coeficientes de Resistencia Lineal y Cuadrático, que serán los encargados de determinar la porosidad.

La mejor opción para representar la porosidad en el Software Ansys CFX, es utilizar el subdominio poroso, aunque presente el problema de que al no ser posible introducir la porosidad como un valor absoluto, se tiene que incorporar a partir del Coeficiente de Resistencia Cuadrático o C_{R2} , tal como realizaron los autores Tiwary et al., 2005 [97] en sus estudios.

Dichos autores determinaron una relación entre los valores C_{R2} con el valor de la porosidad a través de los resultados de las investigaciones de Wang and Takle, 1995 [86], que se muestran en la tabla 1. En la misma se puede observar que Tiwary et al., 2005 [97] realiza las medidas de la altura de vórtice, punto de separación, punto de estancamiento, punto de recuperación del flujo y z, y las compara con las mismas medidas realizadas por Wang and Takle, 1995 [86], constatando que son muy parecidas. De esta manera, Tiwary et al., 2005 [97] determina que para valores de $C_{R2}=18.45$ le corresponde una porosidad del 30%.

Estos autores (Tiwary et al., 2005 [97]) determinan el valor del C_{R2} a partir de k_r , que a su vez se determina por la comparación de este parámetro con dos publicaciones diferentes. La primera de ellas es de Willson, 1985 [87], que determinó una expresión para calcular el máximo valor de la reducción de la velocidad al atravesar los poros, como k_r [$k_r = \Delta P / (1/2\rho U^2)$]. Según sus investigaciones esto resulta impracticable debido a la complejidad en determinar el valor de la velocidad mínima en la dirección del viento para condiciones ambientales en la zonas mas cercanas a la barrera.

Alternativamente a esto, otro autor Raupach et al., 2001 [98], calculó la U_b a partir de otra expresión empírica que determina k como "creen pressure coefficient" definida por la fuerza por unidad de área $= 1/2\rho k U^2$.

Una comparación entre estos dos términos, k_r y k, confirma que los dos parámetros representan la misma entidad. Basados en esta analogía, Tiwary et al., 2005 [97], utilizan estas ecuaciones para estimar el valor experimental de K_r como:

Property	Tiwary (2005)						Wang and Takle (1995)					
	C _{R2}						Porosity					
Aerodynamic structure parameter	18.45	24.6	27.68	110.7	372.08	787.2	0.3	0.27	0.25	0.14	0.08	0.06
Bubble height (m)	0.17	0.46	0.66	0.72	0.82	0.95	0.2	0.5	0.6	0.8	0.9	1.00
Separation point (m)	6.12	3.76	1.95	1.46	0.67	0.06	5.00	4.00	2.5	1.5	0.75	0.00
Reattachment point (m)	8.12	6.76	6.20	5.73	5.20	4.75	8.00	7.50	6.50	6.00	5.50	5.00
Stagnation point (m)	7.20	6.15	3.20	3.71	1.55	1.20	6.50	5.50	4.00	3.25	2.00	1.00
z	0.26	0.32	0.37	0.45	0.52	0.6	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	0.5

Tabla 4: Relación entre C_{R2} y la porosidad

$$\frac{U_b}{U_{OH}} = \sqrt{\frac{\Gamma_{bl}}{k_r + (\Gamma_{bl} k_1)}} \quad (5)$$

donde:

Γ_{bl} es el coeficiente de resistencia de la barrera porosa y se puede estimar como 1.07 para una incidencia de flujo normal en un túnel de viento y con una altura de la barrera sólida de 2 m de altura (Raupach et al., 2001 [98]).

$K_1=1+2a$, siendo a el parámetro de rugosidad incluido en el rango (0.14-0.3) para superficies con rugosidad suave y para superficies rugosas, respectivamente. El valor de $a=0.14$.

La influencia de estos parámetros sobre el modelo, les permite calcular K_r usando cuatro valores intermedios junto con los dos valores extremos en la ecuación (5) dejando el resto de los parámetros constantes. Obtienen unas resultados con una desviación estándar del 15%.

Realizaron tres tandas de ensayos con medidas simultáneas de U_b y U_{OH} para cada tipo de barrera y a diferentes alturas, destacando las medidas realizadas a 0.75 m de altura.

Para realizar nuestras simulaciones, partimos de los datos obtenidos por Tiwary et al., 2005 [97] para el valor de C_{R2} , que determina la porosidad del

30% dentro del programa CFX, por lo tanto asumimos que sus comparaciones con los valores de la publicación de Wang and Takle, 1995 [86], son correctas.

En investigaciones posteriores, seguiremos los mismos pasos que estos autores, para comprobar que los resultados si son correctos, y lo haremos a partir de datos recogidos por nosotros en sucesivas campañas de medidas.

3.-CAMPAÑA DE MEDIDAS Y AJUSTES DE LOS MODELOS

3.1.-EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN

Como ya hemos visto en el Anexo I, se realizaron una serie de ensayos en las instalaciones que tiene la empresa minera Carbonar S.A. en Cangas de Narcea. En esta ocasión se tuvo en cuenta una barrera porosa situada entre la manga y el cono metálico, figura 5, para caracterizar el flujo de viento por detrás de la barrera porosa que afecta a la parva y medidas de concentración de polvo que se produce con este tipo de barrera y su comparación con el caso anterior de la barrera sólida.

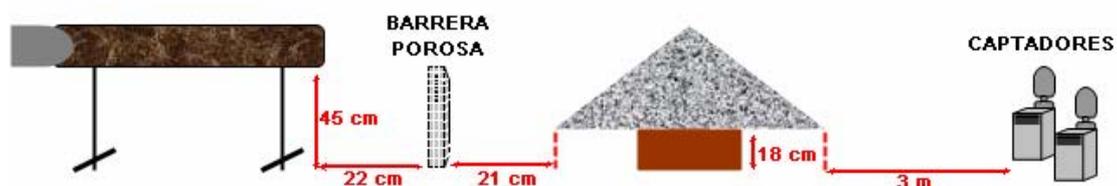


Figura 5: Croquis de la configuración del ensayo con barrera porosa

Se realizaron un total de 59 medidas de velocidad y 2 ensayos de concentración de polvo para cada material (caliza, cemento y carbón).

En esta Campaña de Medidas los equipos y elementos empleados son los mismos que utilizamos en los campañas anteriores, constan de un cono metálico y un ventilador de 12 kW unido a un tubo de 30 cm de diámetro y 3 m de longitud (figura 6), por donde sale el aire impulsado a una velocidad media de 12.5 m/s,).

A éstos se les añade una barrera porosa, caracterizada por coincidir con las mismas dimensiones que la barrera sólida con la que trabajamos en las

simulaciones anteriores, es decir 1,78m de largo por 0,52m de altura, además de poseer un espesor de 2 mm y un porcentaje de porosidad del 31% al 32%.

La instrumentación utilizada, también es ya conocida, sería un anemómetro de hilo caliente, un medidor de humedad superficial del material y la estación meteorológica conectada a los captadores de polvo, figura 7, además podemos ver en el plástico recoge muestras, dos zonas de color mas claro, que corresponden a las distancias donde se tomaron las muestras.

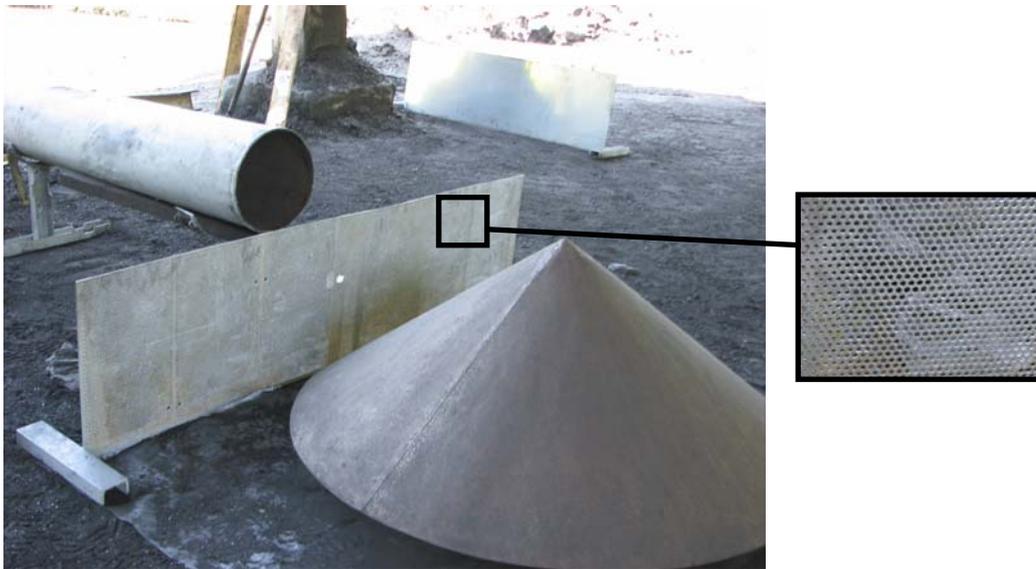


Figura 6: Configuración de los equipos con barrera porosa



Figura 7: Equipos de medida y recogida de muestras

3.2.-MEDIDAS DE VELOCIDAD Y POLVO

Como ya comentamos anteriormente, nosotros asumimos como válidos los valores de porosidad determinados por Tiwary et al., 2005 [97]. Una vez realizadas las modelizaciones, compararemos sus resultados con los obtenidos por los ensayos realizados en campo.

Todos los datos de velocidad obtenidos de las simulaciones, los calculamos a partir del modelo de turbulencia k-epsilon, ya que todas nuestras investigaciones nos determinaron que este modelo es el que mejor se ajusta a los datos de campo.

Los puntos de medidas en el campo, se trasladan con las mismas coordenadas a las simulaciones en el CFX-Post, figura 8, y los datos se exportan en formato .csv a una hoja Excel donde se comparan con los experimentales a través de un gráfico de dispersión, figura 9, al que incluimos una línea de regresión, dando lugar a una correlación muy alta, de 0.8493.

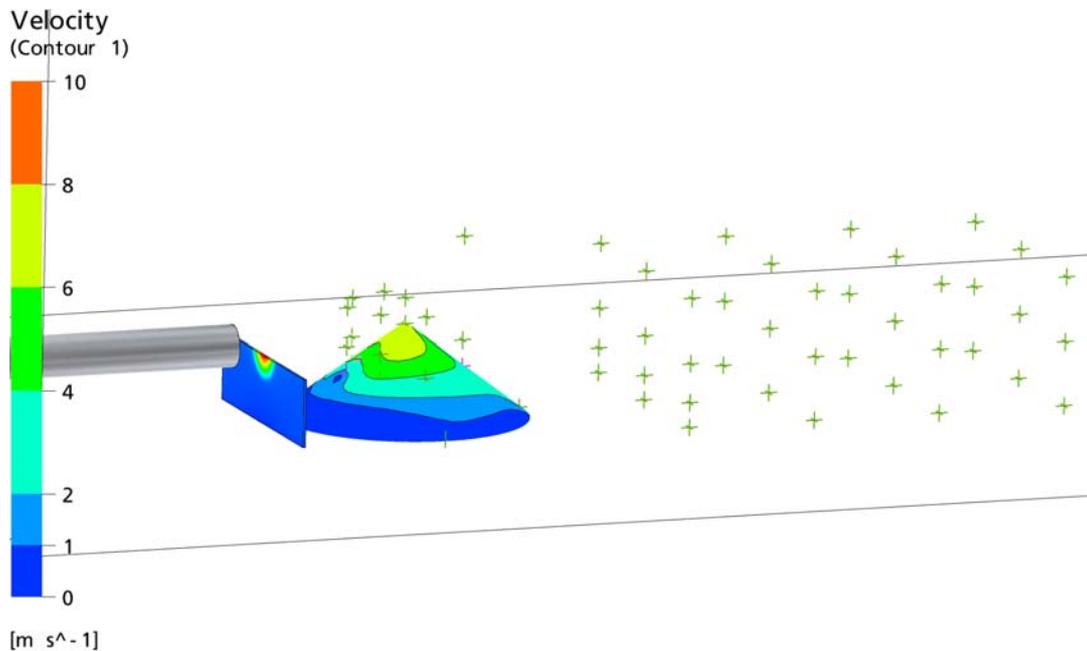


Figura 8: Puntos de medida de velocidad de viento

Si en los resultados anteriores se tiene en cuenta la emisión de polvo calculado a partir del método Post, los resultados obtenidos para los tres casos de situación de la parva sin barrera, con barrera sólida y con barrera porosa (con

una porosidad óptima tal como habíamos visto del 30%), los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

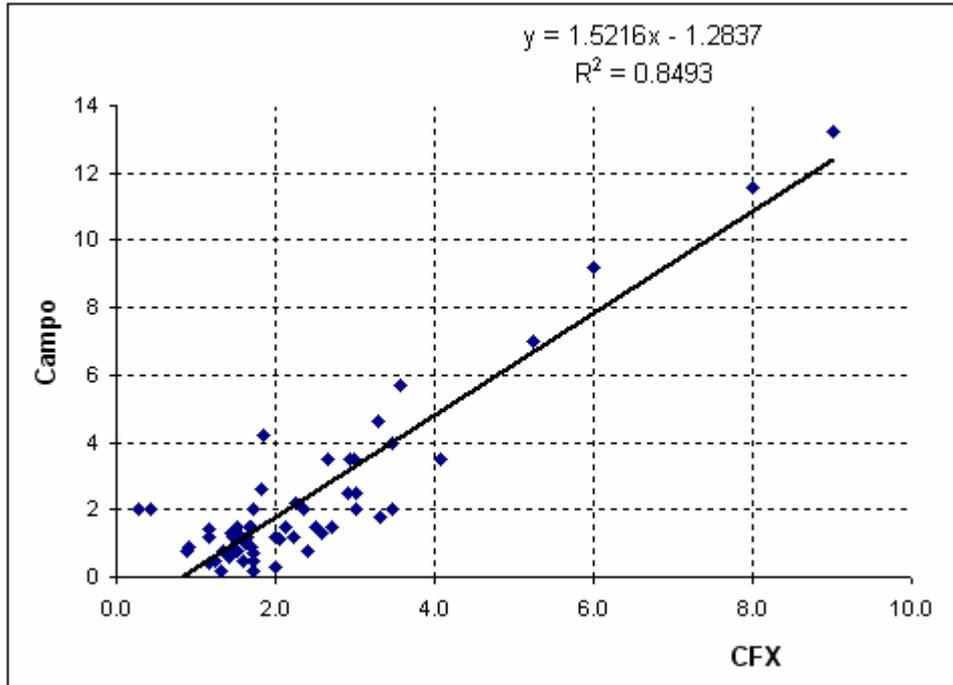


Figura 9: Comparación datos de velocidad de viento: Campo-CFX

