



INSTITUTO NACIONAL DE SILICOSIS

ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE LIMITAN EL TIEMPO DE AUTONOMÍA DE LOS AUTORRESCATADORES DE OXÍGENO QUÍMICO

Convenio de colaboración entre la Administración del Principado de Asturias y el INSALUD – Instituto Nacional de Silicosis de 15/10/2001

MEMORIA



Noviembre 2003

GESTOR DEL PROYECTO:

Manuel Martínez Fidalgo*

EQUIPO DE TRABAJO:

Luis Álvarez-Santullano Martínez**

Enrique Fernández Bustillo*

Montserrat Casillas Borbolla***

Misael García González***

Laura García García***

COLABORACIONES

Servicio de Fisiología respiratoria

Unidad de Ergonomía

HUNOSA

La Rasa- ANTISA

Brigada de Salvamento Minero

*Dr. Ingeniero de Minas. Coordinador Dto. Técnico I.N.Silicosis

** Ingeniero Técnico de Minas. Servicio Prevención Técnica.I.N.Silicosis

***Ingeniero de Minas. Becario

INDICE DE CONTENIDOS

1. ANTECEDENTES	3
2. OBJETIVO DEL PROYECTO	7
3. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROYECTO	8
4. MATERIAL Y METODO.	10
4.1. Medición de parámetros fisiológicos	10
4.1.1. Introducción	10
4.1.2. Equipo de medición	11
4.1.3. Realización de las medidas	12
4.1.4. Características del colectivo	16
4.2. Elaboración de los modelos de consumo de oxígeno	17
4.2.1. Validación de los datos de campo	17
4.2.2. Elaboración de los modelos	19
4.3. Análisis de los parámetros de funcionamiento de los autorrescatadores	20
5. RESULTADOS	25
5.1. Consumo de oxígeno.	25
5.2. Oxígeno disponible	33
5.3. Contenido de Dióxido de Carbono	38
5.4. Dióxido de carbono en la inspiración	41

6. DURACIÓN DE LOS AUTORRESCATADORES. APLICACIÓN PRÁCTICA	43
6.1. Ejemplo práctico	44
7.CONCLUSIONES	46

1. ANTECEDENTES

El presente informe se refiere a los resultados del proyecto de investigación *“Estudio de los factores que limitan el tiempo de autonomía de los autorrescatadores de oxígeno químico”* desarrollado al amparo del Convenio Específico de Colaboración suscrito entre la Consejería de Industria del Principado de Asturias y el INSALUD (Instituto Nacional de Silicosis) suscrito en fecha 15 de Octubre de 2001 y referente a un proyecto más amplio denominado *“Estación de entrenamiento de autorrescatadores de oxígeno químico y análisis de su autonomía”*

Dicho proyecto tiene sus antecedentes en otros trabajos realizados por el Instituto Nacional de Silicosis con el objeto de optimizar la eficacia en el uso de los autorrescatadores de oxígeno químico a partir de una mejora en la formación de los trabajadores. Concretamente, mediante convenios entre los organismos citados anteriormente, se desarrolló un simulador incluido como base de una estación de entrenamiento ubicada en el recinto de la Fundación Barredo de la Consejería de Industria del Principado de Asturias, en funcionamiento permanente desde el año 2001 y en la que se han entrenado hasta la fecha más de 3.000 trabajadores de la minería de Asturias.

En el origen de estos trabajos se encuentra la observación de diversas disfunciones en el uso de los autorrescatadores, como consecuencia de sus propias características, especialmente en lo que se refiere al disconfort que ocasiona su uso -elevadas temperaturas y humedad del oxígeno respirado, resistencia e incomodidad-, y a la limitación del tiempo de duración.

Precisamente, diversas experiencias han puesto en evidencia que, en situaciones críticas, el desconocimiento previo, por parte del usuario, de las condiciones de discomfort en que se produce la evacuación, pudiera inducir rechazos del mismo, de consecuencias fatales, lo que justifica el desarrollo de la estación de entrenamiento y simulación citada, capaz de proporcionar a todos los trabajadores mineros la formación y las sensaciones características de estos equipos.



Figura 1. Estación de entrenamiento Fundación Barredo

En cuanto a la duración de los equipos, es evidente que la eficacia del salvamento en situaciones de emergencia puede fracasar por agotamiento del autorrescatador, si el tiempo de desplazamiento a zona segura supera el tiempo de uso del equipo. Este tiempo tiene una relación directa con el esfuerzo requerido en la evacuación y, consecuentemente, con la dificultad de las vías de escape. Así, por ejemplo, existirán importantes diferencias entre la evacuación realizada por galerías horizontales y la realizada por planos inclinados.

Las instrucciones de uso del autorrescatador hacen referencia a la necesidad de evitar los esfuerzos durante el escape, en previsión de un agotamiento prematuro del equipo, o incremento insoportable del disconfort. No se dispone de especificaciones más concretas que cuantifiquen el disconfort en función de los requerimientos respiratorios a pesar de que, en determinadas circunstancias, bien por las características del incidente que implica la evacuación, bien por las dificultades de las vías de escape, no será posible evitar cierto grado de esfuerzo.

No existen referencias de que los problemas planteados estén suficientemente evaluados en nuestra minería, siendo previsible que la dotación de autorrescatadores al personal, en muchos casos, no esté complementada con un análisis riguroso de las características de los lugares de trabajo, de las condiciones de las vías de escape y, en su caso, de las infraestructuras de salvamento complementarias que sería necesario incorporar.

Por otra parte, la realización de este hipotético análisis no dispone, en la actualidad, de los elementos de juicio objetivos que permitan precisar las infraestructuras y normas de evacuación adaptadas a cada caso. Los requerimientos de flujos respiratorios en circunstancias concretas, - de vital importancia para la determinación de los tiempos de uso de los equipos - los parámetros de evaluación de las vías de escape o la sobrecarga funcional de los propios equipos de evacuación, son cuestiones insuficientemente conocidas.

En la práctica, la información suministrada por los fabricantes de los equipos es muy genérica, limitándose a exponer la duración de los mismos relacionada con el volumen respiratorio (*Figura 2*). Sin embargo, este

último dato es muy variable en relación, al menos, con las dificultades de la evacuación y con las características individuales y, por tanto, la información suministrada resulta de poca utilidad.

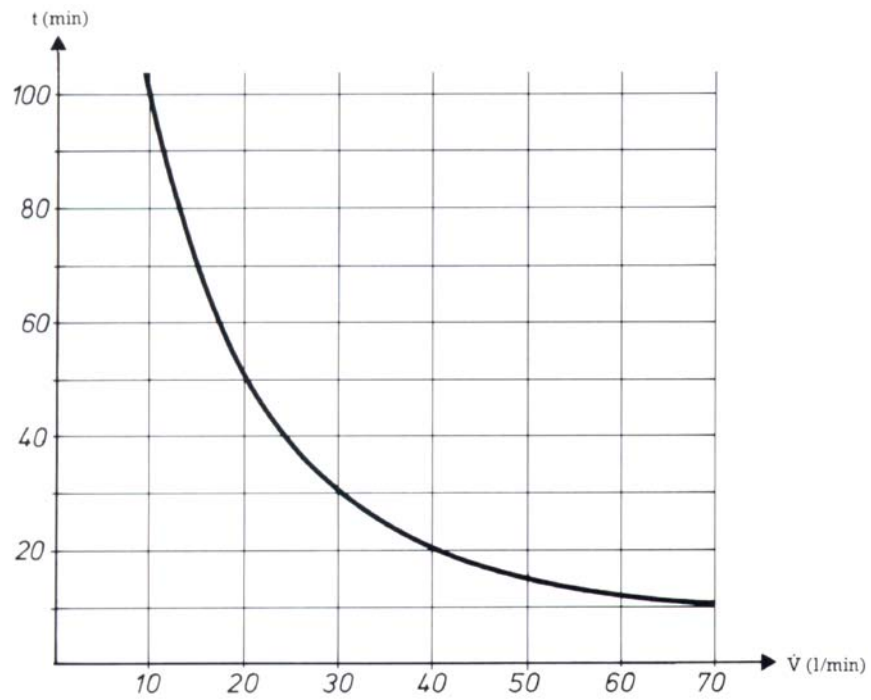


Figura 2. Duración de los autorrescatadores

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

De acuerdo con lo expuesto, el objetivo del proyecto es el diseño de una herramienta que permita estimar la duración de los autorrescatadores considerando las características de las vías de evacuación, previendo, en su caso, la necesidad de establecer estaciones intermedias u otras medidas alternativas sin riesgo de que el agotamiento de los autorrescatadores determine el fracaso de los medios de salvamento.

El proyecto se justifica especialmente en el ámbito de la minería asturiana, donde abundan las explotaciones en que las vías de evacuación en caso de emergencia discurren por labores de inclinación acusada y, por tanto, en las que el comportamiento y duración de los autorrescatadores será muy diferente al caso de evacuaciones por galerías horizontales.

3. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROYECTO

El planteamiento del estudio supone la necesidad de determinar los consumos de oxígeno característicos máximos en una evacuación, por una parte, y el volumen de oxígeno que ceden los equipos, por otra. Además, es necesario analizar la respuesta de los equipos ante determinados requerimientos.

Por ello, para la realización del estudio se abordaron las siguientes actividades:

- Medición de diferentes parámetros fisiológicos de un colectivo de trabajadores en recorridos reales de las minas asturianas. Como se especifica más adelante, algunos de los parámetros medidos fueron el volumen respiratorio (VE), el consumo de oxígeno (VO₂), y la frecuencia cardiaca (HR).

- Elaboración de los modelos de consumo de oxígeno en la evacuación por labores de distinta inclinación, mediante el tratamiento de los datos obtenidos en la actividad anterior.
- Medición de los parámetros de funcionamiento de autorrescatadores, con diferentes individuos y demandas. Entre dichos parámetros destacan las pérdidas de oxígeno del equipo, los contenidos de oxígeno y dióxido de carbono y la temperatura, todo ello en función del tiempo. Esta actividad permite la determinación del oxígeno disponible de los equipos, habida cuenta de las pérdidas del mismo evacuadas por la válvula de alivio de presión.

4. MATERIAL Y METODO.

4.1. Medición de parámetros fisiológicos

4.1.1. Introducción

El objetivo específico de esta actividad es la determinación del oxígeno demandado por un colectivo de trabajadores (VO_2) circulando por galerías o labores de distinta inclinación.

Para ello, se realizaron mediciones de campo en diferentes explotaciones mineras de Asturias, participando en las mismas trabajadores voluntarios. Los recorridos elegidos coinciden con tramos reales de vías de escape característicos de la minería asturiana.

4.1.2. Equipo de medición¹

Para la medición de los parámetros fisiológicos se utilizó el equipo portátil Aerosport VO₂₀₀₀ (*Figura 3*). El equipo está dotado de un sistema de medición de consumo de oxígeno y de dióxido de carbono. Las opciones que presenta el VO₂₀₀₀ son la de trabajar con una conexión directa al ordenador mediante control remoto o trabajar sin establecer una conexión continua, de modo que los datos sean almacenados hasta su posterior volcado al ordenador. Ésta última opción fue la utilizada para la realización de las pruebas correspondientes al presente proyecto.

El equipo dispone de un neumotacógrafo que permite medir el flujo respiratorio mediante presión diferencial, así como captar una muestra de dicho flujo para la realización del análisis de oxígeno y dióxido de carbono.

El analizador es portado por el individuo a lo largo de la prueba, dentro de una mochila habilitada para este fin.

En las pruebas realizadas se utilizó un bocado de goma acoplado al neumotacógrafo y una pinza de nariz, para adaptarse a la situación real de respiración con los autorrescatadores. (*Figura 4*)

¹ Ver ANEXO 1. *Equipo De medición*. Y ANEXO 2. *Ejemplo de utilización*



Figura 3. Equipo VO₂₀₀₀



Figura 4. Neumotacógrafo

El equipo opera mediante el software *Aerograph* para la recuperación y análisis de los datos grabados durante las pruebas. Los resultados de las pruebas individuales se almacenan en la base de datos, pudiendo ser consultados o analizados estadísticamente una vez exportados a una hoja de cálculo.

4.1.3. Realización de las medidas

Las pruebas se realizaron en recorridos de minas que abarcan una variedad de situaciones representativas de las existentes en las explotaciones mineras. Las labores recorridas por los participantes en las pruebas fueron:

- Diferentes distancias por galerías horizontales
- Plano inclinado de 16° y 400m de longitud
- Plano inclinado de 30 ° y 200m de longitud
- Pozos de 40° y 100,140 o 156m de longitud.
- Pozos de 55° y 55m de longitud.

Las pruebas se realizaron en los Pozos Sotón, Montsacro y San Nicolás, pertenecientes a la empresa HUNOSA y en la Mina La Rasa, de la empresa ANTISA.

Cada uno de los trabajadores que realizaron las pruebas, recorrieron uno o varios tramos de las características citadas (*Figuras 5 y 6*). Para la identificación de los diferentes tramos se realizaron descansos entre los mismos, normalmente de 3 minutos, que permitieron, al realizar el análisis de los datos obtenidos, evaluar objetivamente los consumos netos de oxígeno correspondientes a cada tramo.



Figura 5 . Subiendo pozo de 40°



Figura 6. Subiendo pozo de 55°



Figura 7. Preparación de la prueba.

De cada una de las pruebas realizadas se registraron los diferentes datos relativos al sujeto y a las condiciones de la prueba, quedando dichos registros incorporados a la base de datos. En la metodología aplicada se utilizó un modo de registro cada 20 segundos. Parte de la información proporcionada por el software tiene el formato que se observa en las Figuras 8, 9 y 10.

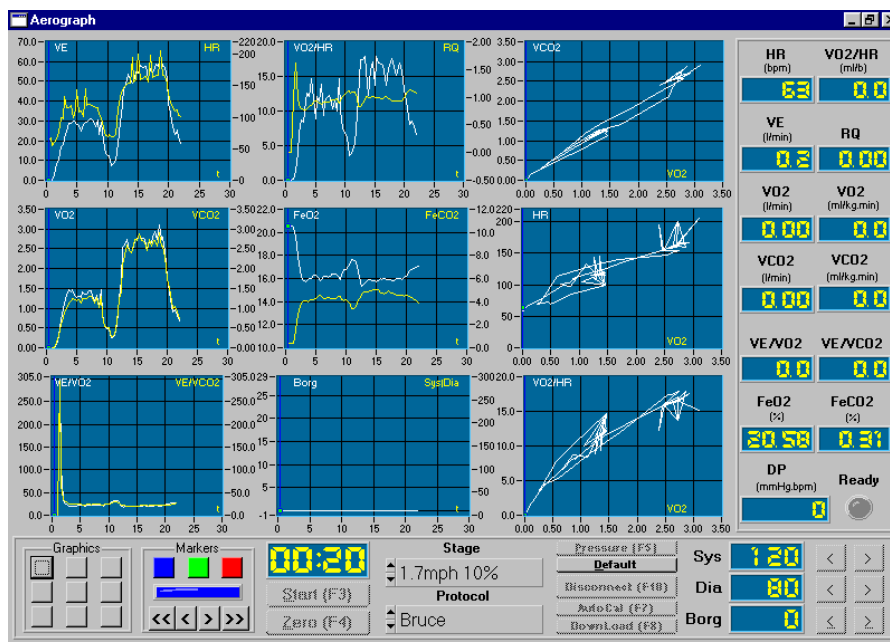


Figura 8. Informe Aerograph. Gráficos generales

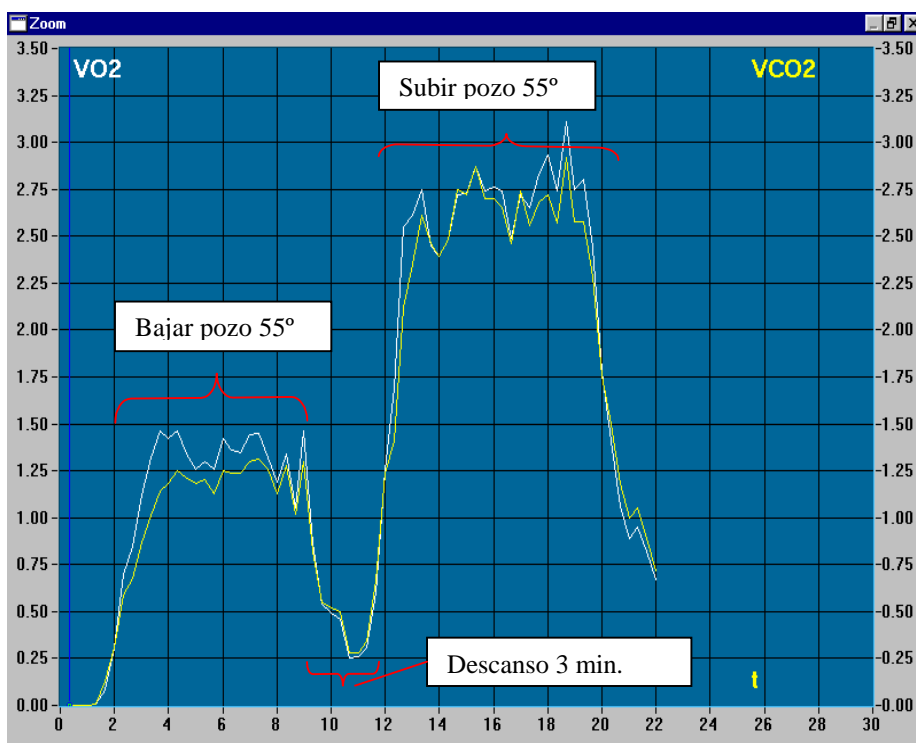


Figura 9. Informe Aerograph. Detalle VO₂ y VCO₂

Time	HR	VE STPD	VO2	VCO2	RQ	VE/VO2	VE/VCO2	VO2/HR	FeO2	FeCO2	Cor
(mm:ss)	(bpm)	(l/min)	(l/min)	(l/min)				(ml/b)	(%)	(%)	
00:20	63	0,2	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	20,6	0,3	
00:40	67	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	20,5	0,3	
01:00	55	0,1	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	20,5	0,4	
01:20	61	3,0	0,01	0,01	1,00	300,0	300,0	0,2	20,5	0,4	
01:40	65	8,5	0,08	0,13	1,63	106,3	65,4	1,2	19,7	1,6	
02:00	77	11,0	0,31	0,31	1,00	35,5	35,5	4,0	17,9	2,9	
02:20	100	16,7	0,70	0,59	0,84	23,9	28,3	7,0	16,7	3,5	
02:40	98	17,8	0,85	0,68	0,80	20,9	26,2	8,7	16,2	3,9	
03:00	133	21,7	1,12	0,87	0,78	19,4	24,9	8,4	15,8	4,0	
03:20	115	25,1	1,32	1,01	0,77	19,0	24,9	11,5	15,8	4,1	
03:40	116	28,9	1,46	1,14	0,78	19,8	25,4	12,6	15,9	4,0	
04:00	118	28,8	1,42	1,18	0,83	20,3	24,4	12,0	16,0	4,1	
04:20	99	30,0	1,46	1,25	0,86	20,5	24,0	14,7	16,0	4,2	
04:40	114	29,4	1,34	1,21	0,90	21,9	24,3	11,8	16,3	4,2	
05:00	143	28,2	1,26	1,18	0,94	22,4	23,9	8,8	16,3	4,2	
05:20	108	27,4	1,30	1,20	0,92	21,1	22,8	12,0	16,1	4,4	
05:40	110	25,1	1,26	1,13	0,90	19,9	22,2	11,5	15,8	4,6	
06:00	102	28,5	1,42	1,25	0,88	20,1	22,8	13,9	15,9	4,4	
06:20	146	29,1	1,36	1,24	0,91	21,4	23,5	9,3	16,1	4,3	
06:40	118	29,2	1,35	1,24	0,92	21,6	23,5	11,4	16,2	4,3	
07:00	120	30,3	1,44	1,30	0,90	21,0	23,3	12,0	16,1	4,3	

Figura 10. Informe Aerograph. Listado de datos

4.1.4. Características del colectivo²

Los trabajadores participantes en el estudio fueron voluntarios sin ningún requisito especial. Sus características generales son las siguientes:

- Número de individuos: 79
- Edad: $37,2 \pm 4,6$
- Peso: $80 \pm 10,7$
- Altura: $172,7 \pm 6,1$

Los participantes realizaron las pruebas con diferentes modelos de recorridos. En algunos casos los recorridos fueron uniformes, bien en horizontal o en pendiente. No obstante, la mayor parte de los recorridos se realizaron con variaciones de pendiente durante las pruebas. En estos casos se hicieron descansos de 3 min. en las transiciones entre tramos con el objeto de obtener consumos netos de los diferentes tramos. El número de tramos diferentes en cada pendiente, se expone en la *Tabla 1*.

² Ver ANEXO 3. *Características del colectivo*.

Pendiente (°)	nº de casos	Longitud (m)
-55	6	55 y 110
-40	15	132
-30	10	137
-16	12	420
0	38	843
16	14	420
30	10	137
40	26	132
55	9	55 y 110 m
TOTAL	140	

Tabla 1. Estadística de recorridos

4.2. Elaboración de los modelos de consumo de oxígeno³

4.2.1. Validación de los datos de campo

Las condiciones de dificultad en que se realizaron las pruebas en campo requirió un análisis riguroso de la fiabilidad de las mismas y de los datos obtenidos, prescindiendo de pruebas completas o parte de las mismas en que fueron detectadas irregularidades durante su realización.

Los datos finales utilizados fueron el resultado de una selección basada en la aplicación de tres criterios sucesivos de validación (*Figura 11*):

³ Ver Anexo 3. *Características del colectivo*

- Un primer criterio se refirió a la validez global de la prueba en sí misma, por defectos de ejecución (falta de colaboración del sujeto, fallos detectados del equipo, u otras incertidumbres en la calidad de la prueba).
- El segundo criterio de selección se basó en la coherencia de los datos registrados, especialmente, el cociente respiratorio (VE/VO_2), el RQ (VCO_2 /VO_2) y la relación entre el FeO_2 y el $FeCO_2$.
- Finalmente, el tercer criterio aplicado fue de carácter estadístico, eliminando las pruebas que se situaban fuera del intervalo de confianza del 95%. ($\mu \pm 1,96 \sigma$).

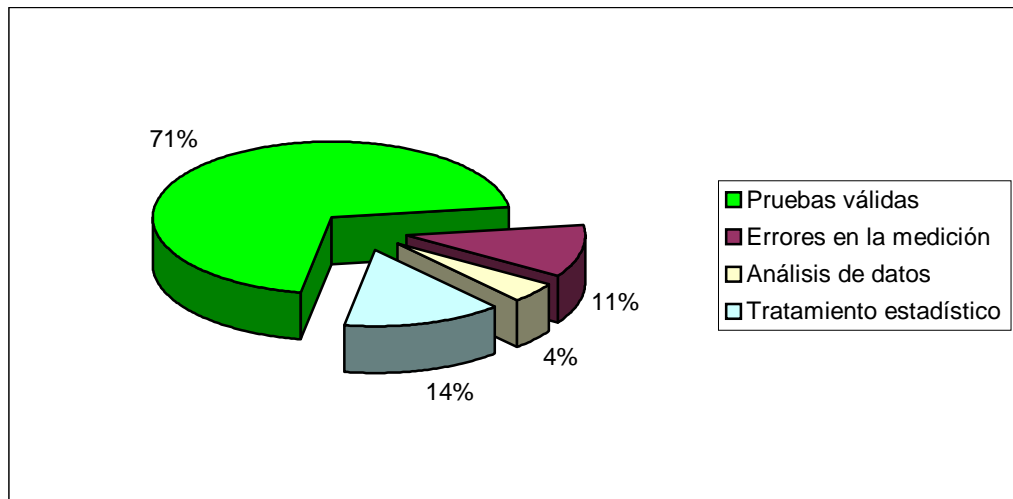


Figura 11. Resultado de la validación de las pruebas

4.2.2. Elaboración de los modelos⁴

La base de datos que contiene la información de las mediciones de campo, dispone de los registros de los diferentes parámetros para cada prueba e individuo, en intervalos de 20 segundos. La identificación de los registros correspondientes a cada tipo de recorrido se estableció mediante cronometraje, lo que permitió calcular los modelos de consumo de oxígeno específicos de dichos recorridos.

Para dicho cálculo se realizó una primera estimación de los consumos de oxígeno una vez alcanzada la estabilidad en cada tramo. Las cifras estimadas se compararon con el resultado de calcular la mediana de los registros cada 20 segundos, observando una discrepancia global menor del 5%. Dicho estadístico fue el aplicado, eliminando errores subjetivos de estimación.(Figura 12)

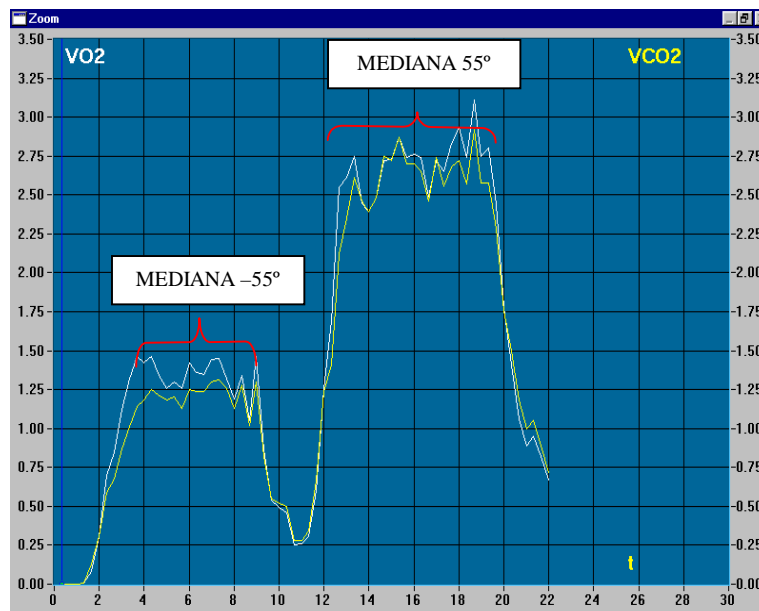


Figura 12. Estimación de modelos de consumo

⁴ Anexo 4. Tratamiento de los datos de campo.

4.3. Análisis de los parámetros de funcionamiento de los autorrescatadores⁵

El objetivo fundamental de esta fase del proyecto ha sido la estimación del oxígeno realmente disponible de los autorrescatadores, teniendo en cuenta que de la cantidad total producida por las reacciones químicas, una parte sustancial es evacuada a la atmósfera por la válvula de alivio, al no existir un ajuste perfecto entre la velocidad de producción de oxígeno y su consumo. Lógicamente, este parámetro resulta imprescindible para la estimación de la duración de los equipos en diferentes vías de escape. (*Figura 13*)

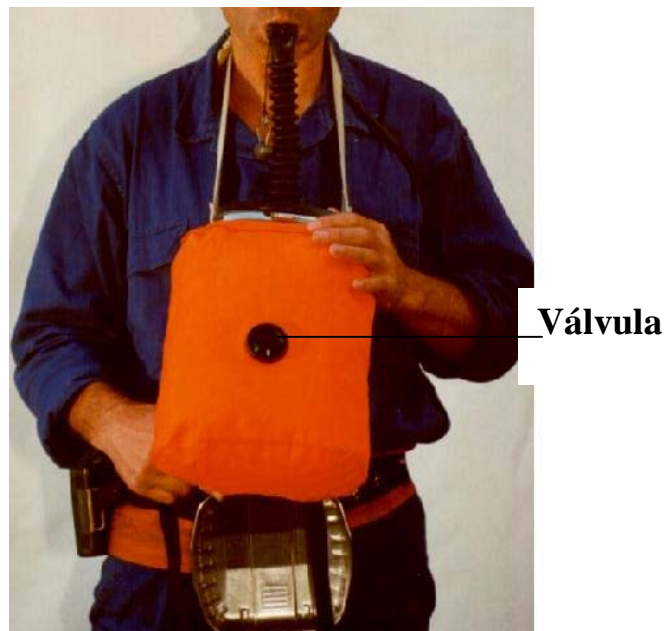


Figura 13. Detalle válvula de alivio

⁵ Verr ANEXO 5. Ensayo de equipos en Laboratorio de Ergonomía

Paralelamente a este objetivo, otras mediciones simultáneas permitieron estimar los contenidos de dióxido de carbono y temperatura del oxígeno respirado, en relación a diferentes demandas e individuos.

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de Ergonomía del Instituto Nacional de Silicosis, sobre un tapiz rodante con variación de pendiente y velocidad. Los parámetros de esfuerzo (VO_2 , VE, HR, etc) fueron determinados con el medidor de intercambio gaseoso breath by breath Cardio O₂ de Med-Graphics (USA).

Cuatro individuos se sometieron a 4 pruebas diferentes con pendientes de 0, 5, 10 y 15 % respectivamente, a velocidad constante de 5 km/hora. Cada prueba constó de las siguientes etapas realizadas de forma continua y con la misma pendiente:

- Caminando sin equipo, con medición de consumo de oxígeno y frecuencia cardíaca durante un tiempo variable en función de la pendiente de la prueba (15 a 30 min.).
- 30 - 60 min. de descanso.
- Caminando con autorrescatador AUER-MSA (SSR30/100) hasta agotamiento del mismo o situación insoportable, con medición de frecuencia cardíaca, volumen de pérdidas de oxígeno por la válvula de alivio, contenido de dióxido de carbono y temperatura.
- Caminando 5 min sin autorrescatador con medición de frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno.

Para la determinación del volumen de pérdidas de oxígeno y contenido de dióxido de carbono en la bolsa del autorrescatador se prepararon

acoplamiento especiales para recoger el gas evacuado por la válvula de alivio del autorrescatador. Durante la prueba se disponía de dos bolsas estancas acopladas a la válvula mediante una derivación en “Y”. Cada 2 minutos a lo largo de la duración de la prueba se retiraba una de las bolsas al tiempo que se conectaba la otra. Inmediatamente se medía el contenido en oxígeno, dióxido de carbono y volumen de la bolsa retirada. (Figuras 14 y 15)



Figura 14 Recogida de pérdidas de oxígeno



Figura 15. Determinación de O₂ y CO₂

Con el objeto de confirmar los contenidos reales de dióxido de carbono que afectaban al individuo en diferentes condiciones de las pruebas, se preparó un equipamiento específico, capaz de determinar el contenido de dicho gas en el flujo inspirado. Para ello, se utilizó una electroválvula pilotada por un sensor de presión diferencial operando a través de un autómata programable. Mediante un carrete intercalado en la tráquea del equipo y próximo a la boquilla, se realizaron las tomas de presión y de muestra del flujo. La primera se conectó al sensor mediante un tubo de 2 mm de diámetro interior y la segunda, mediante un tubo capilar, a la electroválvula

y seguidamente a la aspiración del analizador. El autómata gestionó la apertura de la válvula durante el flujo inspirado, a partir de la señal de presión negativa en la boquilla. Mediante este equipamiento se dispuso de los contenidos de dióxido de carbono en la inspiración, cada 2 minutos. (Figuras 16, 17 y 18)

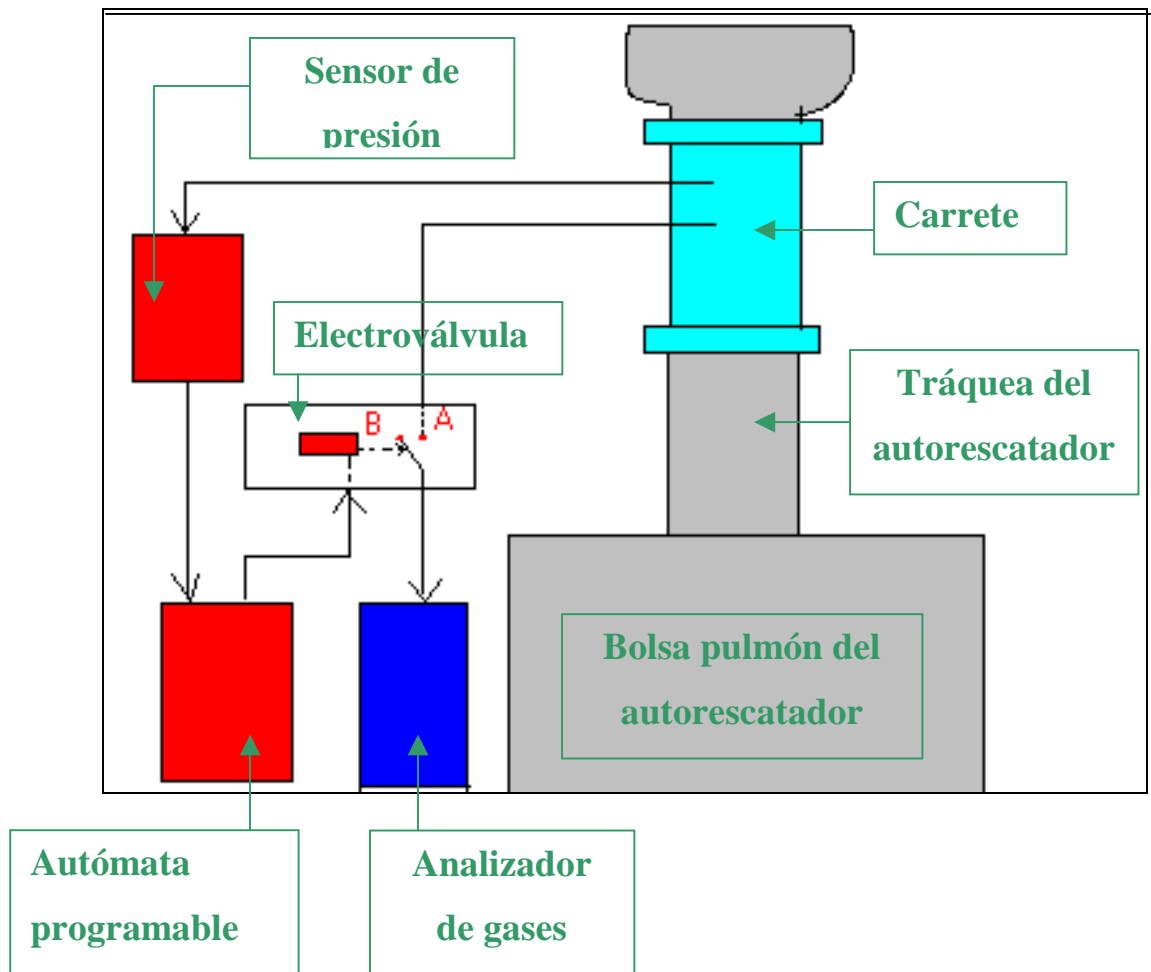


Figura 16: Esquema de medición en inspiración.

El sensor de presión recibe la señal de presión negativa producida en la inspiración. Dicha señal provoca el accionamiento de la electroválvula a través del autómata, permitiendo el paso del flujo de la muestra hacia el analizador de gas.

La temperatura se midió igualmente en la boquilla a intervalo de 1 minuto, mediante un termómetro de termopar de lectura digital.

Carrete y tomas de presión y análisis



Figura 17. CO2 en boquilla

Sensor de presión

electroválvula

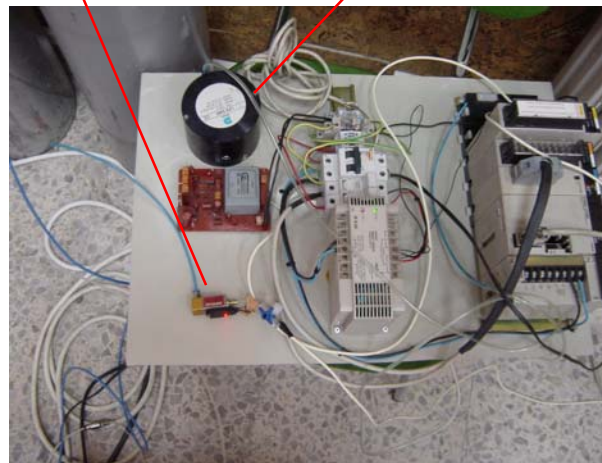


Figura 18. Autómata

5. RESULTADOS

Los resultados finales del trabajo se refieren por separado a las principales actividades desarrolladas, cuya justificación y metodología han sido expuestas en apartados anteriores. Los resultados de dichas actividades convergen en el objetivo final del estudio, consistente en el desarrollo de una herramienta de utilidad para determinar las estrategias de evacuación de acuerdo con estimaciones fiables de la duración de los equipos de auto-salvamento y de la previsión de las demandas de oxígeno.

5.1. Consumo de oxígeno.

En la *Tabla 2* se recogen los consumos de oxígeno de cada uno de los individuos en los diferentes tramos, expresados en litros/minuto y estimados de acuerdo al criterio definido en el punto 4.2.2. En la *Tabla 3* se exponen dichos consumos en litros/km. para las diferentes pendientes.

INDIVIDUOS	PENDIENTES								
	-55	-40	-30	-16	0	16	30	40	55
1	1,6								2,9
2								4,0	
3					1,2	2,6			
4					0,9	2,2			
5								3,4	
6					1,4	2,4			
7					1,9				
8				1,2	1,2	2,6			
9								3,8	
10					1,9			4,3	
11					2,1			3,0	
12				1,1	1,1	2,4			
13								2,6	
14									3,4
15								3,6	
16				1,0	1,1	2,7		3,3	2,5
17				1,0	1,2	2,8			
18				1,4	1,4	3,0			
19								2,8	
20	1,3								2,7
21				1,3	1,5	2,8			
22			1,3					2,1	
23			1,1					2,3	
24			1,6					2,8	
25			1,0					2,0	
26			1,5					3,0	
27			1,2					2,6	
28			1,3					2,8	
29			0,8					1,9	
30			1,8					2,6	
31					1,0			1,9	
32		1,3			1,1			2,4	
33		2,0			1,6			3,5	
34		1,8			1,7				
35		1,1			1,0			1,6	
36		1,9			1,9			3,2	
37		1,8			1,8			3,2	
38		1,2			1,1			2,7	
39		1,3			1,2			2,2	
40		1,6			1,4			2,9	
41					0,9			1,7	
42		1,6			1,3			2,8	
3		1,2			1,3			2,1	
44		1,4			1,1			2,5	
45				0,9	1,1	2,4			
46									1,4
47	1,3								2,2
48				1,0	1,2	2,3			
49					1,0				
50				1,3	1,2				
51	1,3								2,7
52		2,2			1,6			2,8	
53	0,9								2,1
54	1,4								2,7
55				1,1	1,0	2,3			
56				1,1	1,3	2,4			
57				0,8	1,1	1,9			
58		1,2			0,9			2,1	
59					1,2				
60					1,4			2,5	
61		1,5			1,3			2,7	
62			2,3				4,2		

TABLA 2: Consumo de O₂ en *litros por minuto* de los distintos individuos del estudio en función de las pendientes

INDIVIDUOS	PENDIENTES								
	-55	-40	-30	-16	0	16	30	40	55
1	132,4								278,3
2								121,1	
3					15,7	54,9			
4					14,3	43,5			
5								159,9	
6					19,5	63,4			
7					23,0				
8				12,3	13,7	48,7			
9								163,8	
10					17,9			155,4	
11					24,1			126,3	
12				17,7	15,6	52,8			
13								103,6	
14									286,3
15								106,4	
16				13,2	13,1	54,0		141,6	133,7
17				13,2	15,2	59,8			
18				32,1	16,6	51,5			
19								139,8	
20	93,4								209,7
21				13,1	14,8	55,4			
22			31,2					82,5	
23			20,7					61,8	
24			42,3					67,7	
25			30,5					86,4	
26			36,4					72,0	
27			21,0					62,8	
28			31,8					81,5	
29			20,6					68,6	
30			43,6					69,3	
31					14,5			132,4	
32		41,7			14,3			84,6	
33		62,3			19,3			141,1	
34		66,7			25,1				
35		46,0			14,7			77,5	
36		45,5			31,0			150,5	
37		41,5			27,9			107,9	
38		16,2			19,1			100,1	
39		40,0			21,3			94,8	
40		48,5			23,3			114,6	
41					15,2			44,5	
42		54,7			15,3			111,7	
43		49,8			21,6			140,3	
44		28,4			19,2			84,6	
45				13,7	12,7	47,9			
46									92,4
47	90,7								196,2
48				14,6	15,4	55,9			
49					10,7				
50				20,5	17,4				
51	81,7								191,0
52		65,2			18,4			118,5	
53	44,3								187,2
54	56,9								194,8
55				16,9	12,9	39,9			
56				18,2	14,9	39,2			
57				11,6	13,5	45,3			
58		27,5			13,4			94,1	
59					17,5				
60					17,8			120,9	
61		48,4			25,1			117,4	
62			44,7				113,2		

TABLA 3: Consumo de O₂ en litros por kilómetro de los distintos individuos del estudio en función de las pendientes

En la *Tabla 4* figuran los modelos de consumo medio y máximo expresados en litros por minuto para cada una de las pendientes, calculados a partir de los datos anteriores.

	PENDIENTES								
	-55,0	-40,0	-30,0	-16,0	0,0	16,0	30,0	40,0	55,0
Nº DE CASOS	6,0	15,0	10,0	12,0	38,0	14,0	10,0	26,0	9,0
MÁXIMO	1,6	2,1	2,1	1,4	1,8	2,9	3,7	4,0	3,4
MEDIA	1,3	1,5	1,4	1,1	1,3	2,5	2,6	2,8	2,5
DESVIACIÓN TÍPICA	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	0,7	0,7	0,6

TABLA 4: Tabla resumen del consumo de O₂ en *litros por minuto* en el conjunto de las pruebas del estudio en función de las pendientes

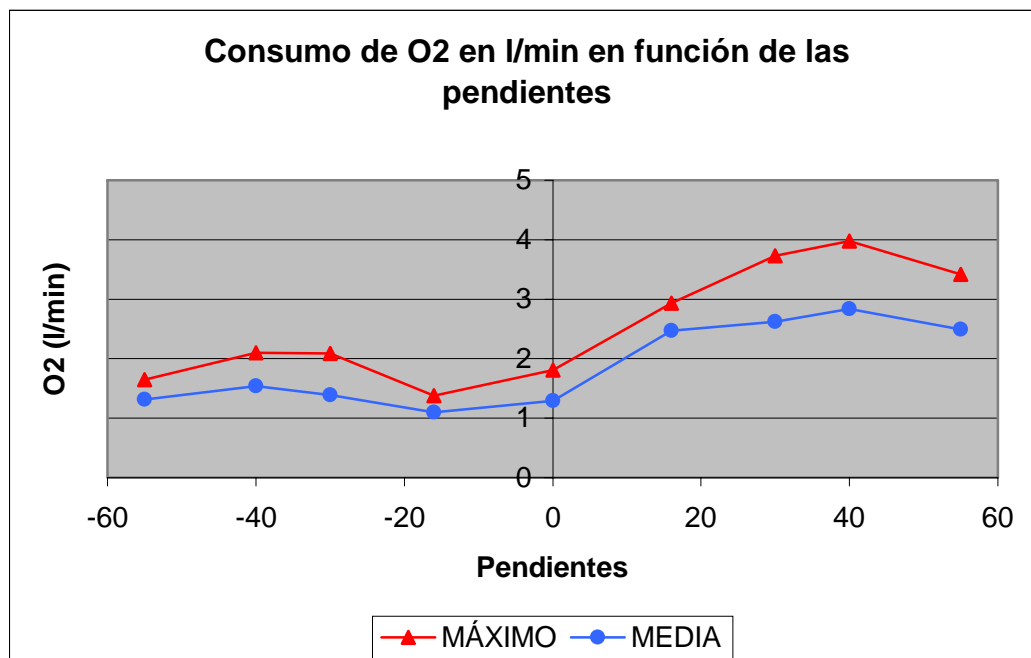


Figura 19: Representación de los consumos de O₂ máximo y medio en *litros por minuto* en función de las pendientes

En la *Figura 20* se exponen la totalidad de los valores de consumo de oxígeno en función de la pendiente y en litros/km. Puede observarse que en las pendientes elevadas, tanto subiendo como bajando, las dispersiones en los consumos de los diferentes individuos, aumentan considerablemente. No obstante, esta cuestión es menos llamativa si se comparan los coeficientes de dispersión, que oscilan entre el 15 y 37%. Los valores promedio y máximo se reflejan en la *Tabla 5* y, gráficamente, en la *Figura 21*, que permite aproximar los consumos previstos para cualquier pendiente. Mediante las *tablas 6* y *7* es posible estimar los consumos de oxígeno para cualquier tipo de recorrido al haber realizado interpolaciones con un intervalo de 2 grados.

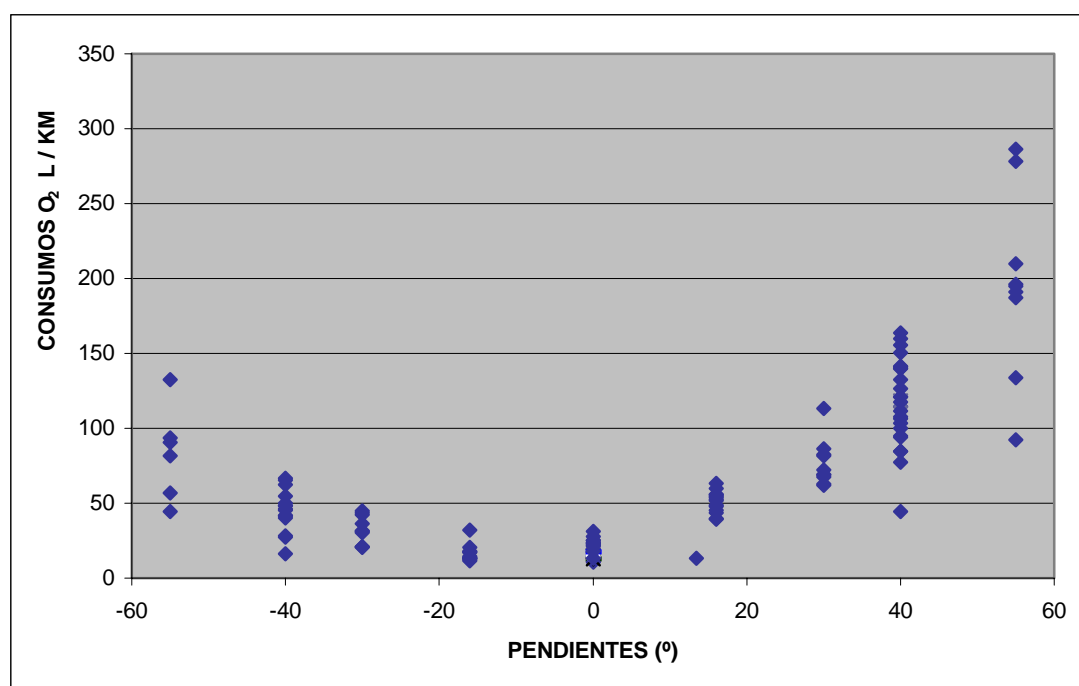


Figura 20. Consumos de oxígeno en función de las pendientes.

	PENDIENTES								
	-55,0	-40,0	-30,0	-16,0	0,0	16,0	30,0	40,0	55,0
Nº DE CASOS	6,0	15,0	10,0	12,0	38,0	14,0	10,0	26,0	9,0
MÁXIMO	134,1	68,6	47,8	25,7	25,4	62,7	101,8	163,8	297,0
MEDIA	83,2	45,5	32,3	16,4	17,8	50,9	76,6	117,4	196,6
DESVIACIÓN TÍPICA	30,9	14,1	9,4	5,6	4,6	7,2	15,3	28,2	61,1

TABLA 5: Tabla resumen del consumo de O₂ en *litros por kilómetro* en el conjunto de las pruebas del estudio en función de las pendientes

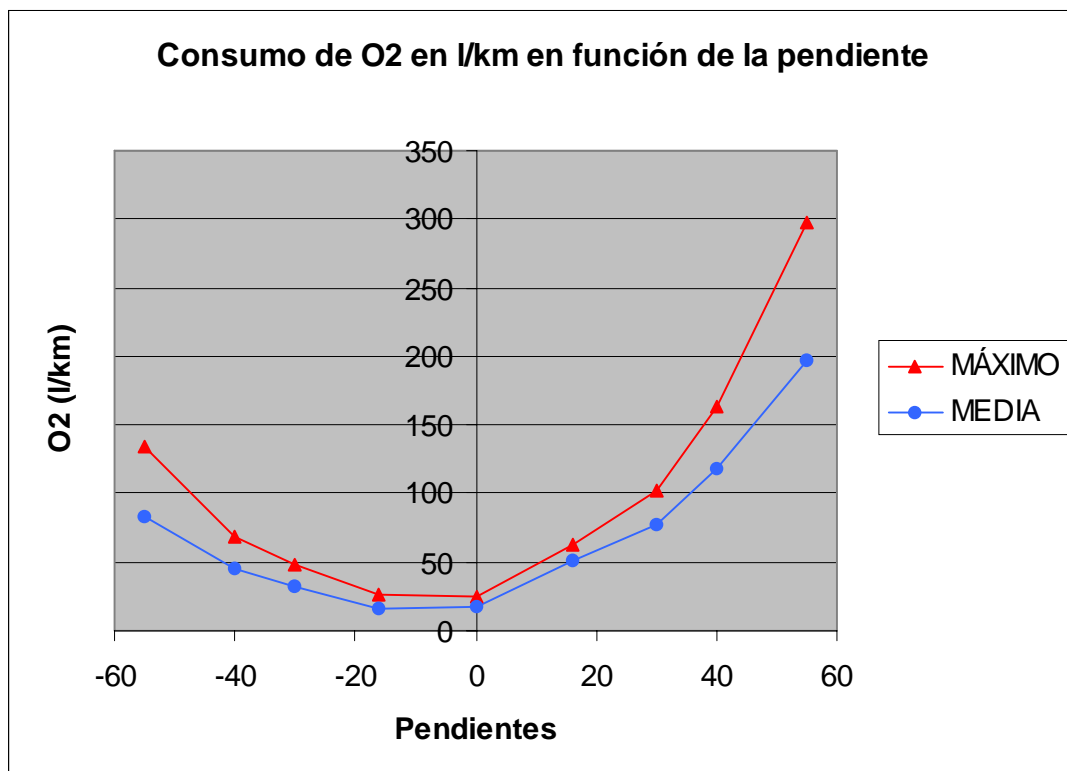


Figura 21. Representación de los consumos de O₂ máximo y medio en *litros por kilómetro* en función de las pendientes

CONSUMO DE OXÍGENO (l/km)		CONSUMO DE OXIGENO	
Grados (°)		MEDIO	MÁXIMO
PENDIENTES NEGATIVAS	-55,0	83,2	134,1
	-54,0	80,7	129,8
	-52,0	75,7	121,0
	-50,0	70,6	112,3
	-48,0	65,6	103,6
	-46,0	60,6	94,8
	-44,0	55,6	86,1
	-42,0	50,5	77,4
	-40,0	45,5	68,6
	-38,0	42,9	64,5
	-36,0	40,2	60,3
	-34,0	37,6	56,1
	-32,0	34,9	52,0
	-30,0	32,3	47,8
	-28,0	30,0	44,6
	-26,0	27,7	41,5
	-24,0	25,5	38,3
	-22,0	23,2	35,2
	-20,0	21,0	32,0
	-18,0	18,7	28,9
	-16,0	16,4	25,7
	-14,0	16,6	25,7
	-12,0	16,8	25,6
	-10,0	16,9	25,6
	-8,0	17,1	25,5
	-6,0	17,3	25,5
-4,0	17,4	25,5	
-2,0	17,6	25,4	
0,0	17,8	25,4	

TABLA 6. Consumos de O₂ en recorridos descendentes, en litros/km.

CONSUMO DE OXÍGENO (l/km)		CONSUMOS DE OXIGENO	
	Grados (º)	MEDIO	MÁXIMO
		PENDIENTES POSITIVAS	0,0
2,0	21,9		30,0
4,0	26,0		34,7
6,0	30,2		39,4
8,0	34,3		44,0
10,0	38,5		48,7
12,0	42,6		53,3
14,0	46,7		58,0
16,0	50,9		62,7
18,0	54,5		68,3
20,0	58,2		73,9
22,0	61,9		79,5
24,0	65,6		85,1
26,0	69,2		90,6
28,0	72,9		96,2
30,0	76,6		101,8
32,0	84,8		114,2
34,0	92,9		126,6
36,0	101,1		139,0
38,0	109,3		151,4
40,0	117,4		163,8
42,0	128,0		181,5
44,0	138,5		199,3
46,0	149,1	217,1	
48,0	159,7	234,9	
50,0	170,2	252,6	
52,0	180,8	270,4	
54,0	191,3	288,2	
55,0	196,6	297,0	

Tabla 7. Consumos de O₂ en recorridos ascendentes, en litros/km.

5.2.Oxígeno disponible

En la *Figura 22* se expone el desarrollo característico de los volúmenes de oxígeno evacuados por la válvula de alivio (pérdidas) durante la ejecución de las pruebas con autorrescatador, correspondientes a las diferentes pendientes y a uno de los individuos que participaron en estas pruebas realizadas en el la Unidad de Ergonomía del I.N.S. .

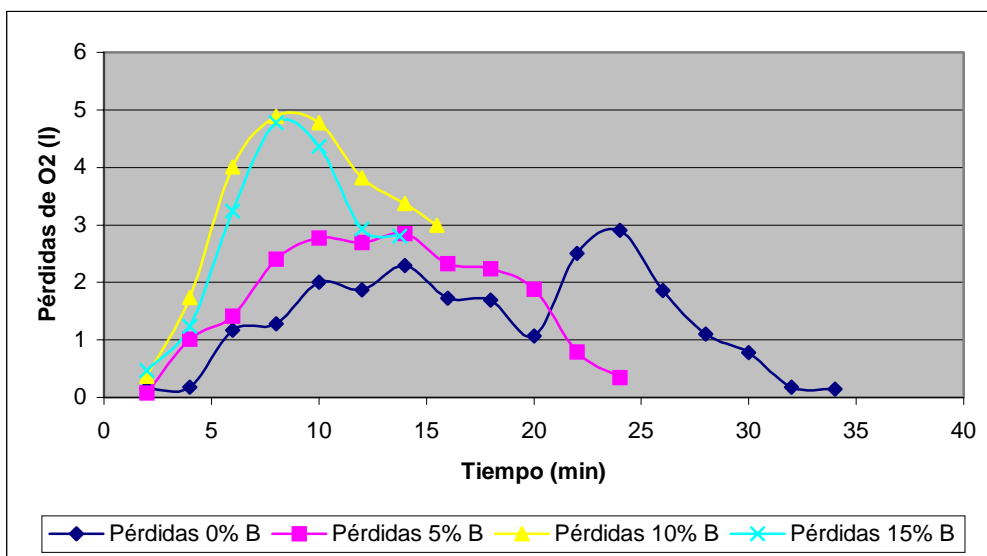


Figura 22. Pérdidas de oxígeno

Puede observarse que las pérdidas por unidad de tiempo aumentan con el esfuerzo realizado por el individuo y que en requerimientos elevados (pendientes de 10 y 15%) las pruebas se suspendieron antes del agotamiento del equipo, debido al exceso de dióxido de carbono, como puede observarse en el ejemplo de la *Figura 23*. Estas observaciones son aplicables a la mayoría de las pruebas realizadas⁶

⁶ Verr ANEXO 4. Ensayo de equipos en Laboratorio de Ergonomía.

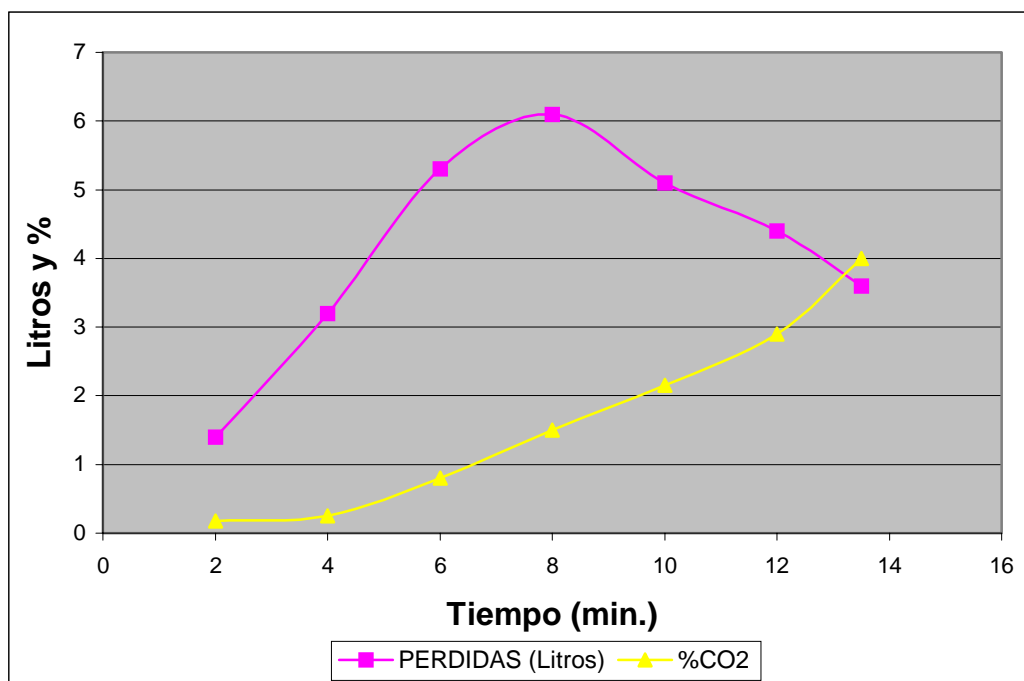


Figura 23. Relación de las pérdidas de oxígeno con el %CO₂ producido durante la realización de una prueba con el 10% de pendiente.

En la *Tabla 8* y *Figura 24* se expone el resultado de la determinación de las pérdidas de oxígeno en las pruebas realizadas por los diferentes individuos, en función de la pendiente y los consumos de oxígeno (VO₂). En dicha figura se señalan el valor medio y el intervalo en que se sitúan los valores con una confianza superior al 90%. Las casillas sombreadas de la *tabla 8* se corresponden con las pruebas en que, debido al aumento insoportable de dióxido de carbono, los equipos no llegaron al agotamiento. Puede observarse que no existe relación significativa entre los consumos y las pérdidas totales.

Pendiente (%)	Consumos O ₂ (l/min)	Pérdidas O ₂	Flujo medio de pérdidas (l/min)	Máximo de pérdidas (l cada 2 min.)
0	0,89	23,94	1,07	3,18
5	1,50	32,64	0,74	4,54
10	2,012	21,70	1,16	4,88
15	2,42	22,19	2,66	7,43

Individuo A

Pendiente (%)	Consumos O ₂ (l/min)	Pérdidas O ₂	Flujo medio de pérdidas (l/min)	Máximo de pérdidas (l cada 2 min.)
0	1,07	22,92	0,67	2,90
5	1,41	20,81	0,87	2,85
10	1,91	25,96	1,67	4,88
15	2,23	19,83	1,44	4,77

Individuo B

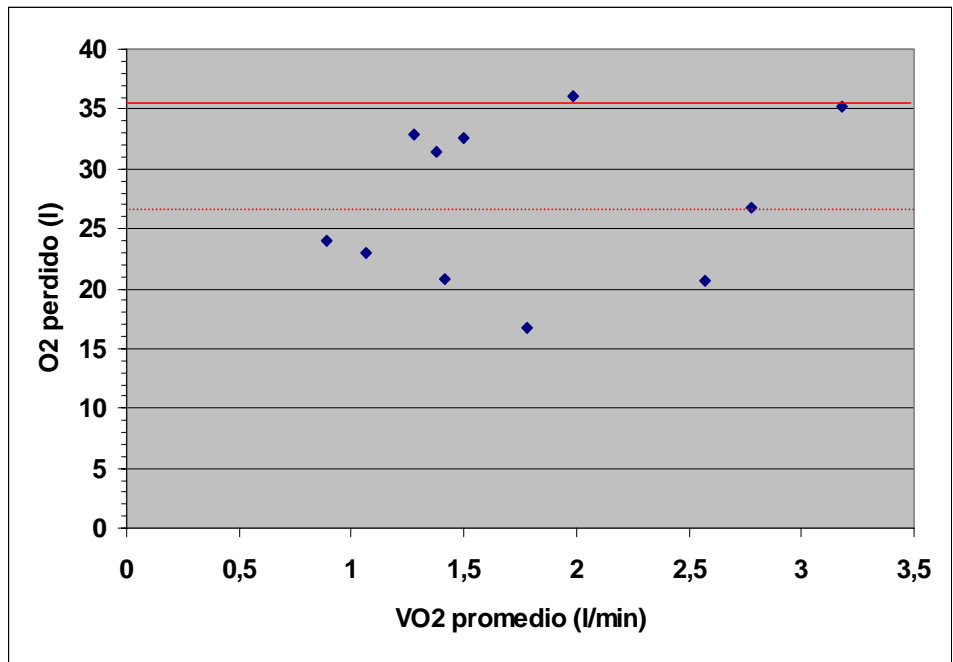
Pendiente (%)	Consumos O ₂ (l/min)	Pérdidas O ₂	Flujo medio de pérdidas (l/min)	Máximo de pérdidas (l cada 2 min.)
0	1,28	32,87	1,10	5,54
5	1,99	36,13	1,81	7,45
10	2,61	26,73	1,48	6,81
15	2,78	23,55	3,14	10,06

Individuo C

Pendiente (%)	Consumos O ₂ (l/min)	Pérdidas O ₂	Flujo medio de pérdidas (l/min)	Máximo de pérdidas (l cada 2 min.)
0	1,37	31,44	0,67	4,90
5	1,78	16,78	1,17	2,80
10	2,57	20,62	1,61	5,70
15	3,18	35,25	2,22	9,13

Individuo D

TABLA 8. Pérdidas de oxígeno



..... Promedio

Figura 24. Pérdidas de oxígeno medias y máximas

En la Figura 25 se observa el flujo medio de pérdidas de oxígeno en relación al consumo medio de oxígeno.

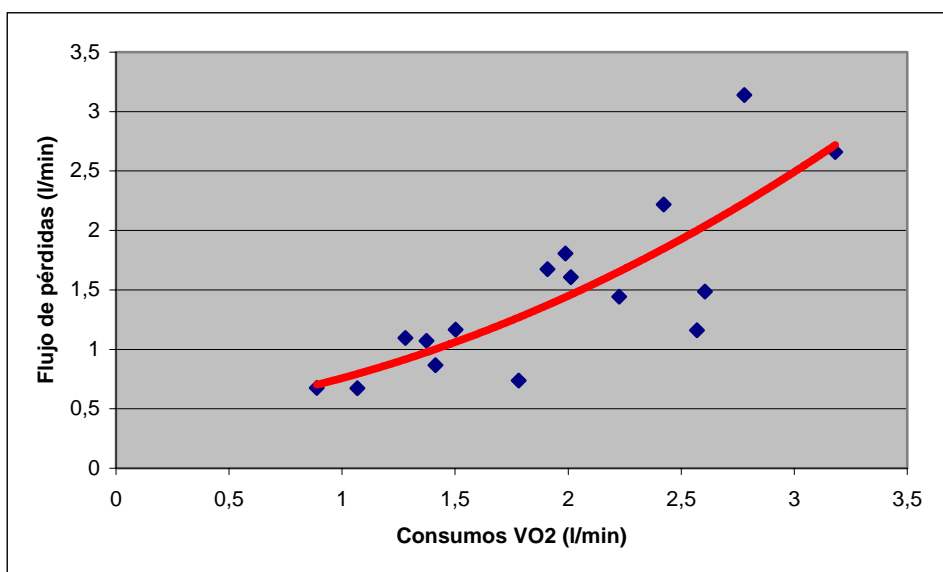


Figura 25: Flujo medio de pérdidas de O₂ en función del consumo.

En la *Figura 26* se muestra la evolución de las pérdidas acumuladas de O₂⁷ en litros totales, durante el tiempo que duraron las pruebas realizadas por uno de los individuos. En todos los casos, el mayor gradiente o velocidad de pérdidas de O₂ se produce en la franja intermedia de su uso.

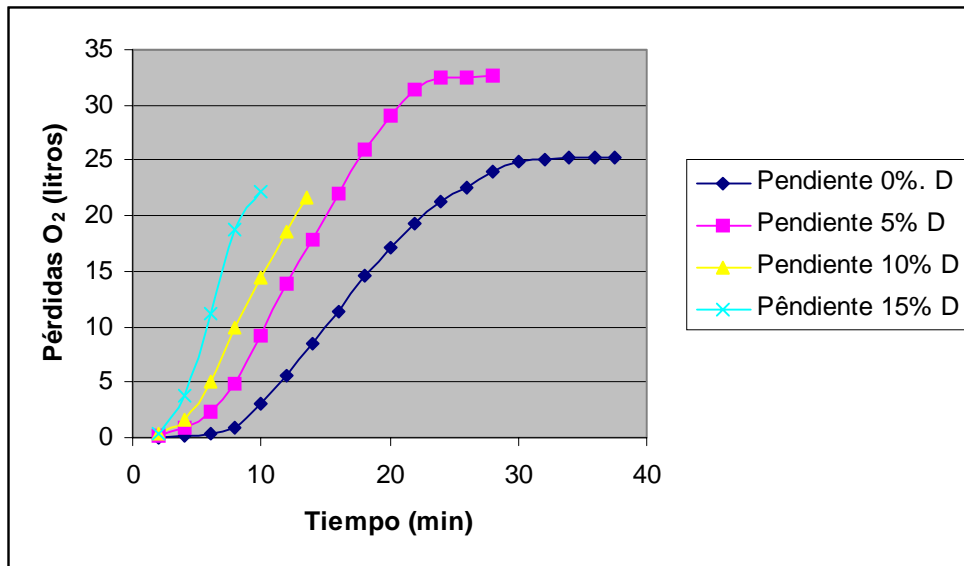


Figura 26: Evolución de las pérdidas de oxígeno.

Una vez realizados los cálculos con los datos de las pérdidas medidas en cada una de las 20 pruebas, se ha llegado a los resultados de la *Tabla 9* expresados gráficamente en las *Figuras 27* y *28*, referidos al volumen de oxígeno realmente disponible frente a la pérdida media y frente a la máxima, calculada con un intervalo de confianza superior al 90 %. Para este cálculo se ha prescindido de 5 pruebas en las que no se llegó al agotamiento de los equipos al alcanzarse situaciones de disconfort insostenibles.

Pérdidas O ₂ promedio	Pérdidas O ₂ desviación típica	Pérdidas O ₂ máx.
27.28	6.67	35.84

TABLA 9. Promedios de pérdidas de oxígeno

⁷ Anexo 5. Ensayo de equipos en el Laboratorio de Ergonomía.

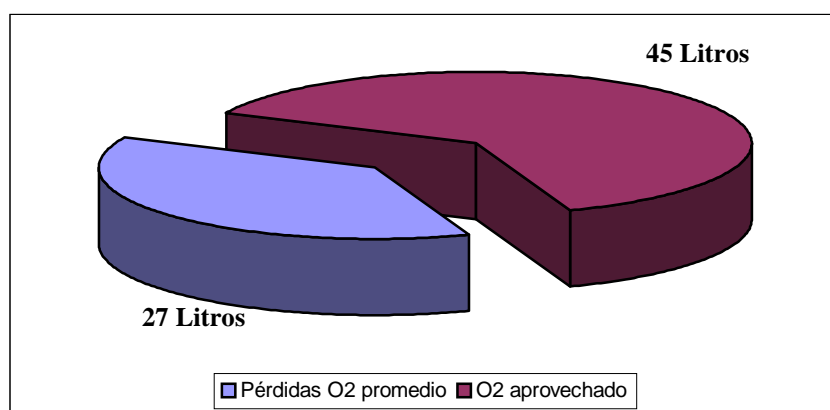


Figura 27. Oxígeno disponible. Promedio

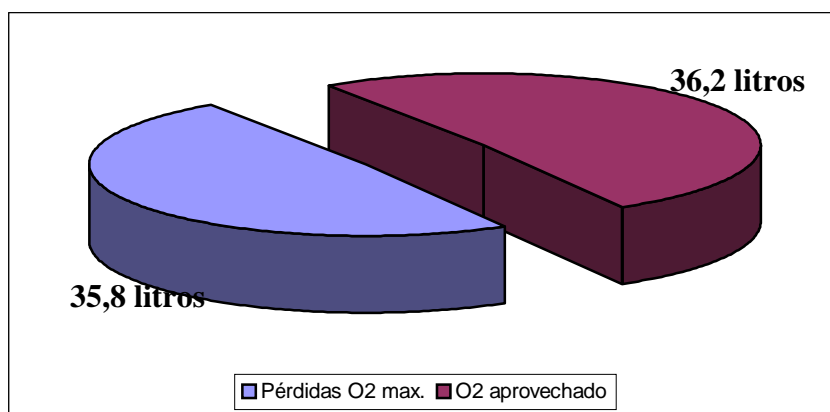


Figura 28. Oxígeno disponible. Pérdidas máximas.

5.3. Contenido de Dióxido de Carbono⁸

El resultado de las determinaciones de Dióxido de Carbono medido en el gas evacuado por la válvula de alivio durante la realización de las pruebas con autorrescatadores en el tapiz rodante, se expone en los gráficos siguientes.

⁸ Verr ANEXO 4. Ensayo de equipos en Laboratorio de Ergonomía.

La *Tabla 10* expresa el incremento de dióxido de carbono (en %) en función del tiempo y del consumo estable de oxígeno (VO_2) para cada uno de los 4 individuos que realizaron las pruebas. Se entiende por “velocidad de flujo de CO_2 ” al porcentaje de CO_2 máximo alcanzado en esa prueba (en el volumen de gases recogidos en la bolsa al cabo de dos minutos) dividido por el tiempo desde el inicio de la misma.

En la la misma tabla, los cuadros sombreados corresponden a pruebas en las cuales la persona que realizaba la prueba no pudo concluirla por exceso de CO_2 , superior, en la mayoría de estos casos, al 4%. La *Figura 29* muestra los contenidos de CO_2 máximos alcanzados durante las pruebas, en función de los consumos estables de oxígeno.

Pendiente (%)	Consumos	Velocidad de flujo de CO ₂	Máximos de CO ₂
(%)	O ₂ (l/min)	(%/min ²)	(%)
0	0,89	0,02	0,36
5	1,50	0,14	3,13
10	2,012	0,30	4,00
15	2,42	0,37	3,65

Individuo A

Pendiente (%)	Consumos	Velocidad de flujo de CO ₂	Máximos de CO ₂
(%)	O ₂ (l/min)	(%/min ²)	(%)
0	1,07	0,04	0,96
5	1,41	0,16	3,17
10	1,91	0,26	4,00
15	2,23	0,57	4,58

Individuo B

Pendiente (%)	Consumos	Velocidad de flujo de CO ₂	Máximos de CO ₂
(%)	O ₂ (l/min)	(%/min ²)	(%)
0	1,28	0,04	0,73
5	1,99	0,20	3,20
10	2,61	0,24	2,90
15	2,78	0,60	4,50

Individuo C

Pendiente (%)	Consumos	Velocidad de flujo de CO ₂	Máximos de CO ₂
(%)	O ₂ (l/min)	(%/min ²)	(%)
0	1,37	0,05	0,80
5	1,78	0,20	3,25
10	2,57	0,36	4,35
15	3,18	0,40	3,30

Individuo D

Tabla 10. Contenido de Dióxido de Carbono

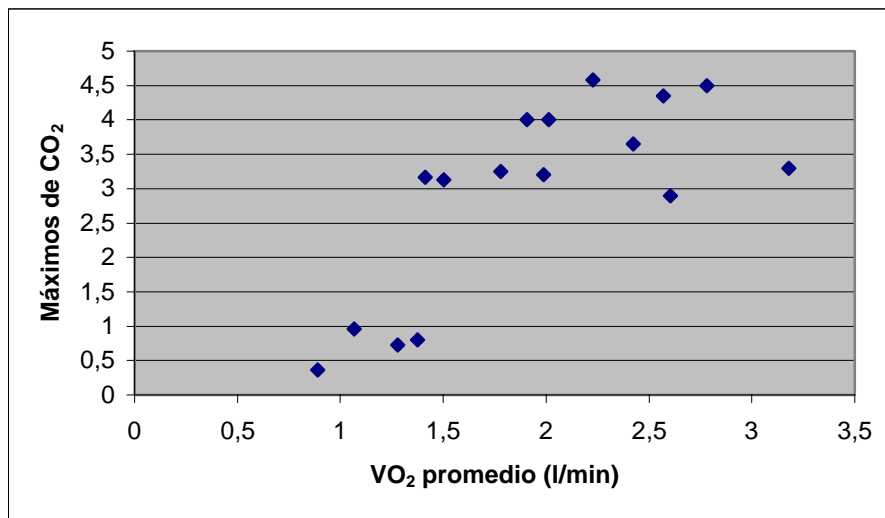


Figura 29. CO₂ máximo alcanzado.

5.4. Dióxido de carbono en la inspiración

Se efectuaron mediciones de contenido de dióxido de carbono en la inspiración mediante la metodología explicada en el apartado 4.3, con el objeto de relacionar dicho contenido con el determinado en el gas evacuado por la válvula de alivio, expuesto en el apartado 5.3.

El resultado de estas determinaciones, realizadas en las pruebas efectuadas por dos individuos, en pendientes de 0 y 15%, se expone en la *Figura 30*. Puede observarse que existe coincidencia entre los contenidos de dióxido determinados en el gas evacuado por la válvula y en el inspirado, medido en la boquilla.

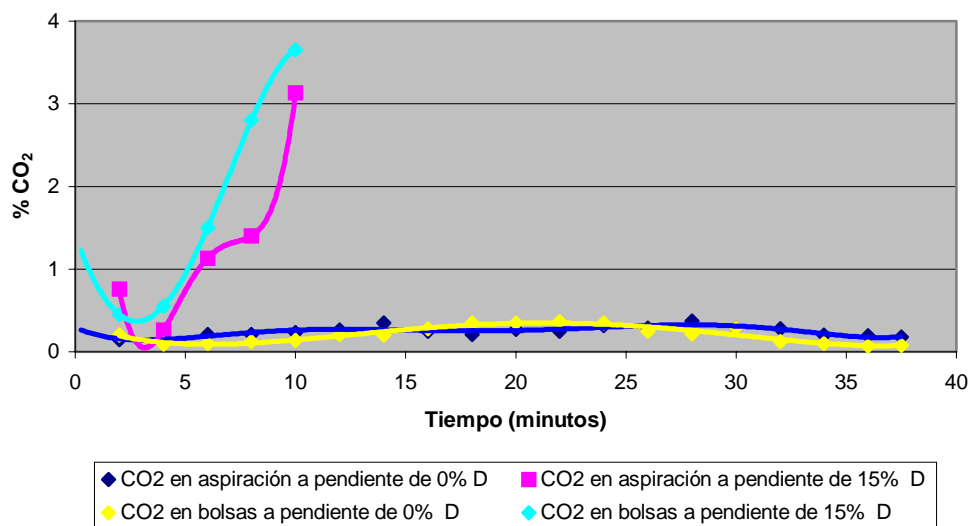
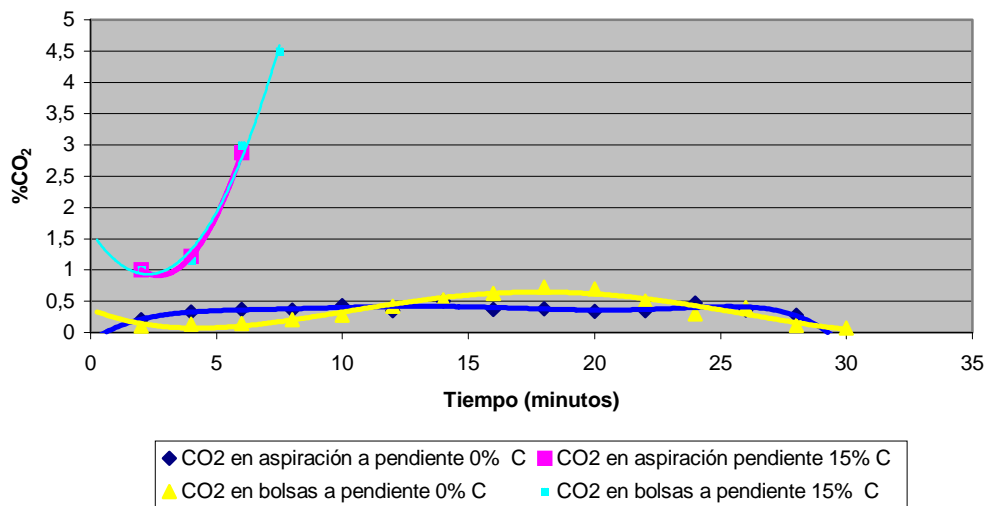


Figura 30. Dióxido de carbono en válvula y boquilla.

6. DURACIÓN DE LOS AUTORRESCATADORES. APLICACIÓN PRÁCTICA

El resultado de las actividades expuestas en apartados anteriores ha permitido alcanzar el objetivo fundamental del presente trabajo, al disponer de una herramienta para prever la duración de los autorrescatadores en diferentes vías de evacuación.

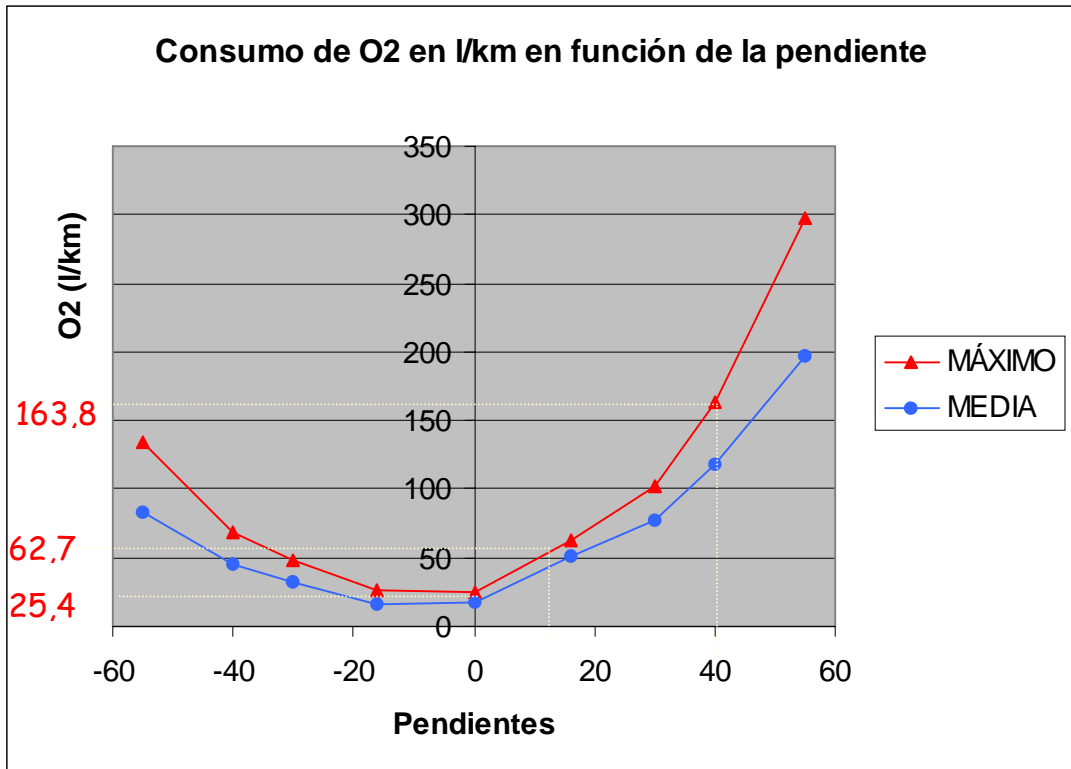
Para la aplicación de dicha herramienta se dispone, por una parte, de los modelos de consumo de oxígeno máximos en *litros por kilómetro* (Tablas 6 - 7 y Figura 21) y, por otra, del volumen de oxígeno disponible como consecuencia de las pérdidas evacuadas por la válvula de alivio del autorrescatador (Figuras 27 y 28).

Con independencia de lo anterior, el resultado de la actividad de análisis del funcionamiento de los autorrescatadores, confirma los problemas que conlleva la utilización de estos equipos con demandas de oxígeno elevadas, correspondientes a esfuerzos significativos. La elevación excesiva del

contenido de dióxido de carbono provoca, en algunos individuos, situaciones insoportables que pueden conducir al rechazo del equipo. Es evidente que estas situaciones son especialmente probables en evacuaciones por labores en pendiente, lo que implica una atención muy especial en la formación e información a los trabajadores sobre las pautas que deben seguirse en la evacuación.

6.1. Ejemplo práctico

Al objeto de ilustrar la utilidad de los resultados del proyecto, se desarrolla a continuación un ejemplo de estimación de la duración de los autorrescatadores en un recorrido de escape hipotético.



RECORRIDO EVACUACION		CONSUMO O ₂		RESERVA
LONG	PEN	l/km	LITROS	
				35
250	0°	25,4	6,35	-6,3 = 28,7
140	40°	163,8	22,9	-22,9 = 5,8
200	0°	25,4	5,08	-5,08 = 0,7
iii estación intermedia				
				35
370	0°	25,4	9,4	-9,4 = 25,6
400	16°	62,7	25,1	-25,1 = 0,5

7.CONCLUSIONES

- **Se ha alcanzado el objetivo fundamental del proyecto desarrollado, elaborando una herramienta que permite prever la duración de los autorrescatadores en relación a las características de las vías de escape. Mediante las *Tablas 4 y 5*, y disponiendo de la longitud y pendiente de los diferentes tramos por los que habría que evacuar una explotación en caso de emergencia, se determina el recorrido que es posible realizar con garantía razonable de funcionamiento de los autorrescatadores y, en consecuencia, la necesidad de disponer de estaciones intermedias de dotación de equipos u otras medidas alternativas. Para la elaboración de la herramienta citada se ha partido de las mediciones de consumo de oxígeno de un colectivo de individuos realizando recorridos característicos de las minas asturianas y de la estimación del oxígeno disponible a partir de la medición directa del oxígeno evacuado por la válvula de alivio durante la realización de pruebas con diferentes individuos y demandas.**

Del resultado de dichas mediciones se concluye que únicamente se dispone , con garantía, del 50% del oxígeno que teóricamente produce el equipo.

- **Durante la realización de los ensayos con autorrescatadores, se pusieron en evidencia las dificultades surgidas en el uso de estos equipos cuando el esfuerzo realizado implica demandas significativas de oxígeno. En estos casos, aunque con diferencias individuales importantes, tanto el gradiente de CO₂ como el contenido máximo alcanzado, aumenta considerablemente con el flujo de oxígeno consumido (VO₂). Esta circunstancia fue muy evidente en algunos casos en los que fue preciso suspender las pruebas al sufrir malestar insoportable los individuos, compatible con un elevado contenido en CO₂. Esta conclusión deberá ser tomada muy en cuenta en los programas de formación en el uso de autorrescatadores.**