

donde :

$$\rho_a c_{pa} = \rho_{\text{aire seco}} c_{p \text{ aire seco}} + \rho_v c_{pv} = \frac{P - P_v}{R_a T} c_{p \text{ aire seco}} + \frac{P_v}{R_v T} c_{pv}$$

Para las diferentes relaciones d/β y los valores de d correspondientes se calcula fácilmente el coeficiente

$$\beta = \frac{d}{d/\beta} \quad (\text{I.81})$$

y luego el coeficiente de transferencia de masa a partir de la expresión (I.35).

KIRSCHBAUM y GRUBENMAN [26] consideran según sus experiencias que la relación d/δ toma un valor constante, así :

$$\frac{d}{\delta} = 0,1976 \text{ Régimen laminar} \quad (\text{I.82})$$

$$\frac{d}{\delta} = 0,2115 \text{ Régimen turbulento} \quad (\text{I.83})$$

d es el coeficiente de transferencia de calor $\text{Kcal/m}^2 \text{h} \text{ } ^\circ\text{C}$
 δ el coeficiente de evaporación $\text{g/m}^2 \text{h}$.

A partir de las relaciones (I.82) o (I.83) es posible calcular el coeficiente de transferencia de masa por medio de las expresiones (I.35) y (I.39).

II. VERIFICACION PRACTICA Y EQUIPO UTILIZADO

Las medidas de verificación fueron efectuadas en una galería en ventilación secundaria. El aire era aspirado del circuito principal por un ventilador auxiliar y conducido hasta el frente de trabajo por medio de una línea de ventilación de 800 mm de diámetro.

La galería tiene una sección nominal de 20 m^2 , la sección exacta fue determinada por un método tan preciso como el método del foto-perfil, y mejor adaptado en el caso de una galería obstruida con material, se utilizó la medición directa.

Los aparatos de medida utilizados son los termohigrógrafos SINA que miden y registran alternativamente la temperatura seca y la humedad relativa del aire en cada sección de medida. Algunas medidas de temperatura seca y humedad fueron también efectuadas por medio de psicrómetros.

Además de los aparatos especializados para la medida de humedad, se utilizaron también todos los aparatos necesarios para mediciones de la velocidad del aire en una línea de ventilación, venturís y sondas de Pitot y para el control del consumo de aire comprimido de las máquinas que trabajaban en el frente de trabajo [32].

Las medidas realizadas fueron de dos tipos, medidas de humedad absoluta a diferentes distancias del frente y balances de entalpía y de masa para trozos de galería de diferentes longitudes, con estos balances se verificó el modelo matemático concebido para el cálculo del desprendimiento de vapor de agua a partir de la pared de la galería.

El hecho de que la galería se encuentre en ventilación secundaria complica el problema a causa de las fugas en la línea, las cuales se incorporan directamente a la corriente de aire. Estas fugas se estiman con dificultad.

II.1. MEDIDAS DE HUMEDAD ABSOLUTA

A diferentes distancias del frente de trabajo y durante un período largo se midió la concentración de agua en el aire

de la galería con el fin de determinar la variación de esta concentración a partir del frente [32] .

Esta campaña de medidas permitió constatar que para condiciones de temperatura más o menos constantes a la entrada de aire y a lo largo de la galería, la variación de humedad absoluta es sensiblemente lineal a partir de una cierta distancia del frente (40 o 50 m aproximadamente). Entre el frente y el comienzo de la zona de linealidad, la variación del tenor en vapor de agua es más rápida a causa del agua que se utiliza en el frente en las labores de perforación y cargue y de la presencia de superficies del masivo expuestas mas recientemente y para las cuales el desprendimiento de calor y humedad es más intenso. Por el método de los mínimos cuadrados se ajustó para esta zona una variación parabólica.

II.2. BALANCES DE ENTALPIA Y DE MASA

El objetivo de un balance es encontrar, durante el período de medidas, la cantidad de calor y de vapor de agua suministrados por el terreno a lo largo de un trozo de galería considerado. Durante cada balance se midieron la temperatura seca y la humedad relativa en las extremidades del trozo de galería estudiado, dentro de la línea de ventilación y en la corriente principal de retorno de aire.

Se hicieron al mismo tiempo medidas de caudal de aire dentro de la galería y dentro de la línea de ventilación.

Los datos de los aparatos SINA se completan con las mediciones siguientes :

- presión atmosférica en superficie y en cada estación
- cota de las estaciones con respecto a la superficie
- sección ofrecida al paso de aire en cada estación

-caudal en volumen de aire húmedo en cada estación.

Luego mediante la aplicación de las fórmulas clásicas recopiladas en un programa [1] es posible calcular para cada estación :

- la concentración del vapor de agua g/Kg aire seco
- el valor de la entalpía del aire $Kcal/Kg$
- el flujo másico de aire a cada instante, Kg/s
- las temperaturas húmeda y resultante, $^{\circ}C$
- la cantidad total de vapor de agua que pasa por cada estación durante el balance
- la cantidad total de calor que atravieza cada estación durante el balance, $Kcal$.

Con los datos mencionados calculó la cantidad total de vapor de agua desprendida por el terreno a lo largo del trozo de galería considerado y durante el tiempo del balance.

II.3. RESULTADOS NUMERICOS

II.3.1. VARIACION DE LA HUMEDAD ABSOLUTA

Los valores de humedad que se midieron a diferentes distancias del frente durante la campaña se encuentran en la tabla II.7.

La representación gráfica de la nube de puntos, figura II.1., muestra que hay una tendencia a la relación lineal entre la concentración de agua y la distancia del punto de medida al frente, tendencia que se presenta a partir de una distancia de 45 m del frente aproximadamente. El análisis estadístico de esta parte de la curva da los resultados siguientes :

$$X = 0,011 l + 13,27$$

$$l \geq 45m$$

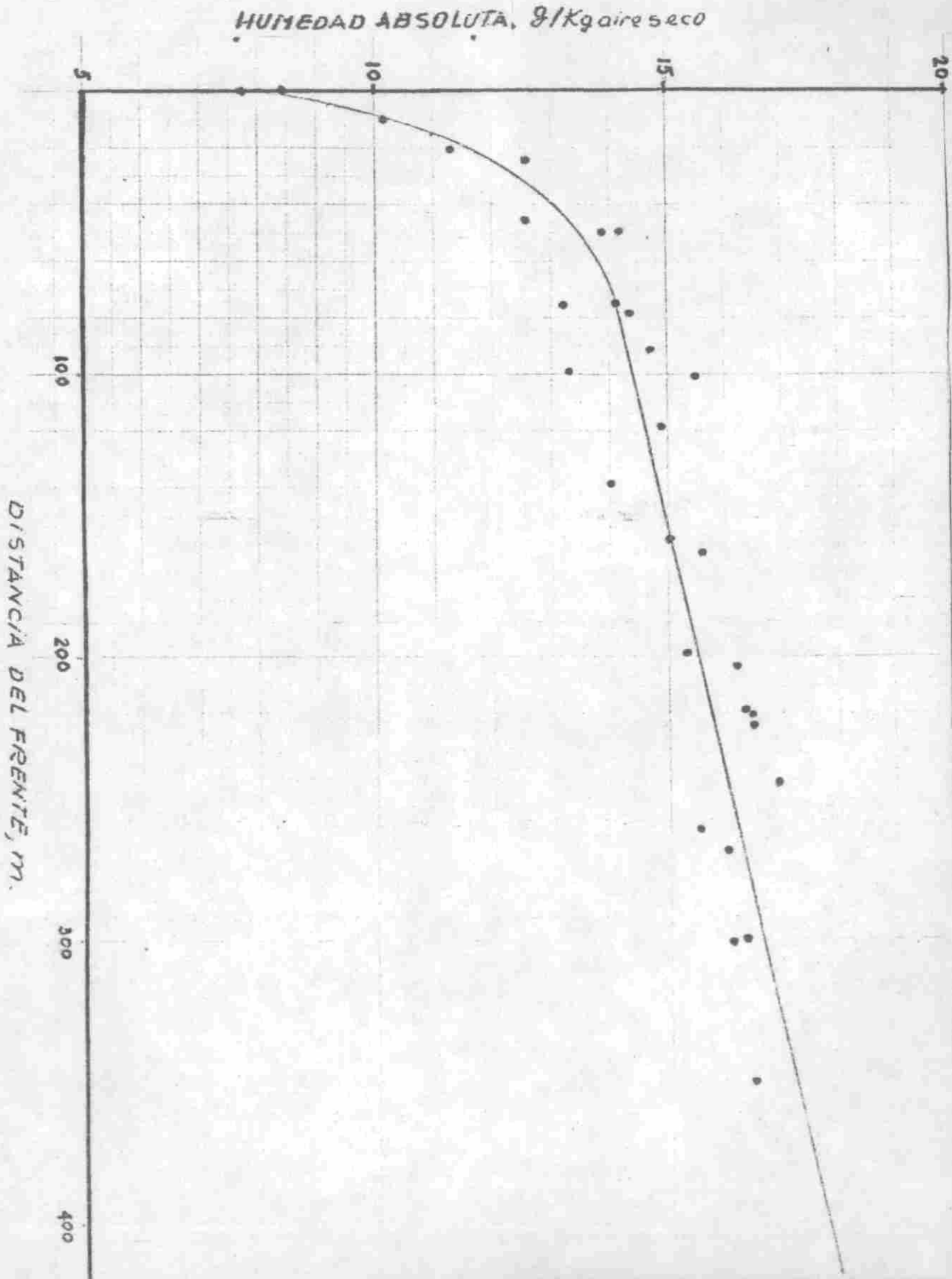
Tabla. II.7 valores de humedad a diferentes distancias del frente

Distancia del frente	Temperatu ra seca	Humedad relativa	Presión sat	Presión atmosféri ca	Humedad Absoluta
l, m	$t_s, ^\circ\text{C}$	e, %	$P_{\text{sat}},$ mmHg	$P_a,$ mmHg	x, g/Kg aire seco
0	29,7	32,0	31,33	822	7,7
0	29,0	37,0	30,09	829	8,4
20	29,0	49,0	30,09	822	11,3
24	28,0	58,0	28,39	829	12,6
45	28,2	56,7	28,73	822	12,6
49	26,8	69,0	26,46	831	13,9
49	28,0	65,0	28,39	829	14,2
74	27,0	69,0	26,78	831	14,1
74	28,5	59,0	29,23	829	13,2
78	27,6	67,2	27,74	825	14,4
90	29,0	62,5	30,09	812	14,7
98	28,0	60,6	28,39	812	13,3
100	27,9	71,0	28,23	824	15,5
118	28,0	68,1	28,39	825	14,9
138	28,3	62,5	28,90	821	14,0
158	28,2	67,5	28,73	825	15,0
163	28,0	69,4	28,39	805	15,6
198	28,5	67,7	29,23	825	15,3
203	28,0	71,9	28,39	805	16,2
218	27,8	75,0	28,06	821	16,3
220	27,8	75,6	28,06	824	16,4
224	28,6	72,5	29,40	822	16,5
243	27,8	76,0	28,06	805	16,9
260	28,4	68,8	29,06	823	15,5
268	28,2	71,9	28,73	822	16,0
300	28,5	71,0	29,23	812	16,3
300	28,2	72,5	28,73	823	16,1
350	28,4	73,5	29,06	824	16,5

x representa la concentración de agua en el aire y l la distancia del punto de medida al frente.

El valor del coeficiente de correlación $r_c = 0,84$, no permite decir que hay una correlación perfecta entre la recta de mínimos cuadrados y la curva de puntos sino que la variación de la humedad absoluta con la distancia del frente al punto

FIG. II.1. Variación del tenor de agua en el aire con la distancia al frente



de medida es aproximadamente lineal.

En la zona del frente, hasta 45m aproximadamente, la Fig. II.1 permite observar una ley no lineal de aumento de la humedad absoluta. Esta humedad aumenta muy rápidamente con una pendiente decreciente lo cual hace pensar en una relación parabólica.

La expresión de la curva de segundo grado que pasa de manera aproximada por todos los puntos considerados es la siguiente:

$$X \# - 0,0021 l^2 + 0,24 l + 8,05 \quad X < 45m$$

II.3.2. BALANCES DE ENTALPIA Y DE MASA

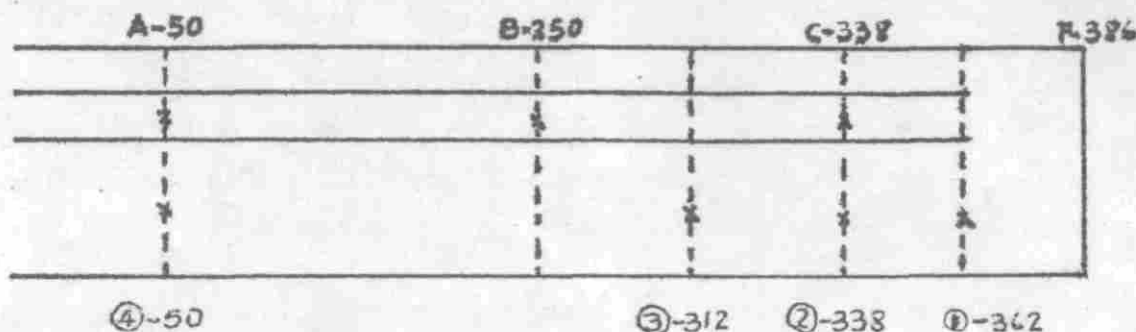
En la línea de ventilación, el caudal de aire se midió con un venturi adicionado de una sonda de pitot, luego, para conocer el caudal de aire en la galería a nivel de cada estación de medida, es necesario tener en cuenta que el caudal másico es el mismo dentro de la línea y en la galería en el mismo lugar, lo cual permite calcular el caudal en volumen o en masa en la galería a partir de una medición hecha dentro de la línea de ventilación y a la misma abscisa.

El caudal en la línea de ventilación se midió en tres secciones diferentes, lo cual permite establecer una ley de fugas aproximadamente lineal, es decir, suponer que el volumen de fugas por metro de longitud de línea es constante.

Si además se supone que no hay segregación de vapor de agua al interior de la línea de ventilación secundaria, el aire que pasa directamente de esta al aire de la galería tendrá el mismo tenor en vapor de agua a lo largo de toda la línea es decir, que dentro de esta la humedad absoluta no cambia.

II.3.2.1. PRIMER BALANCE

La figura II.2. muestra la localización de los aparatos de medida para este balance.



Las cifras indican las abscisas con respecto a la entrada de la galería.

Los valores, promedios del caudal medido dentro de la línea son ;

$$Q_A = 7,43 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_B = 5,86 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_C = 5,17 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las condiciones a nivel de cada estación son :

ESTACION	Q_a vol m^3/s	a kg/m^3	Q_a mas kg/s	e_s C	P mmHg	e %	X g/kg aire seco	caudal de agua g/s
①	4,97	1,28	6,36	26,9	831	68,9	13,6	86,50
②	5,17	1,28	6,62	26,8	831	69,0	13,9	92,02
③	5,27	1,28	6,87	27,0	831	69,0	14,1	96,87
④	7,43	1,28	9,44	28,6	831	66,1	14,9	140,66

El valor promedio de las fugas m³sicas de aire y vapor calculado entre los puntos de medida (A-B, B-C, A-C) es de 0,01

kg/metro de línea.s.

La humedad dentro de la línea de ventilación es de 8 g/Kg aire seco (medida en la estación A) y se supone constante a lo largo de la línea. La cantidad de vapor que pasa directamente de la línea a la galería es de 0,08 g/s y por metro de línea.

TROZO ①-②

longitud	24 m
perímetro	17 m
superficie de intercambio	408 m ²

Tasa de evaporación

$$\dot{m}_{v1} = (92,02 - 86,50) - 0,08 \times 24 \times \frac{3600}{408} = 31,5 \text{ g/h.m}^2$$

TROZO ②-③

longitud	26 m
perímetro	17 m
superficie de intercambio	442 m ²

Tasa de evaporación

$$\dot{m}_{v2} = (96,87 - 92,02) - 0,08 \times 26 \times \frac{3600}{442} = 22,6 \text{ g/h.m}^2$$

TROZO ③-④

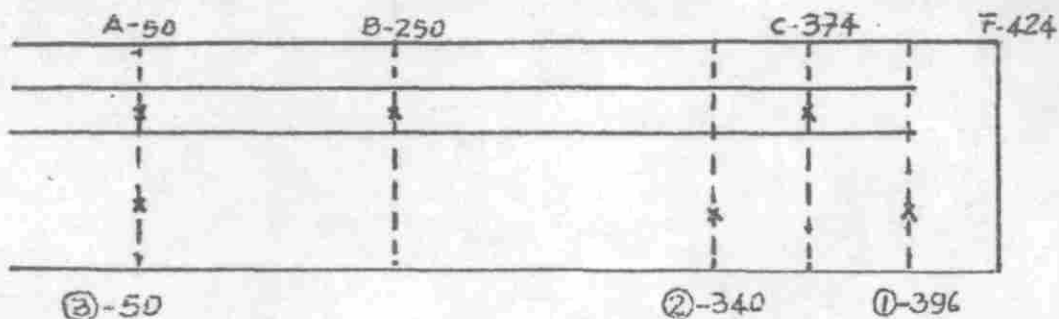
longitud	262 m
perímetro	17 m
superficie de intercambio	4454 m ²

Tasa de evaporación

$$\dot{m}_{v3} = (140,66 - 96,87) - 0,08 \times 262 \times \frac{3600}{4454} = 18,5 \text{ g/h.m}^2$$

II.3.2.2. SEGUNDO BALANCE

La figura II.3. muestra la ubicación de las estaciones de medida



Los valores promedios de caudal dentro de la línea de ventilación son :

$$Q_A = 7,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_B = 6,05 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_C = 4,54 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las condiciones a nivel de cada estación son :

ESTACION	Q_a vol m^3/s	a Kg/m^3	Q_a mas Kg/s	e_s C	P mmHg	e %	X g/Kg aire s	caudal agua g/s
1	4,27	1,26	5,38	27,0	820	60	12,4	66,71
2	4,81	1,26	6,06	27,0	820	65	13,5	81,81
3	7,63	1,26	9,61	27,6	820	67	14,4	138,38

El valor promedio de las fugas de aire calculado entre los puntos de medida (A-B, B-C, A-C) es de 0,01 Kg de aire por metro de línea y por segundo. La humedad del aire dentro de la línea (medida en A) es de 7 g/Kg aire seco. La cantidad de vapor que se escapa es de 0,07 g/s por metro de línea.

TROZO ①-②

longitud	56 m
perímetro	17 m
superficie de intercambio	952 m ²

Tasa de evaporación

$$\dot{m}_{v4} = (81,81 - 66,71) - 0,07 \times 56 \frac{3600}{952} = 42,2 \text{ g/h.m}^2$$

TROZO ②-③

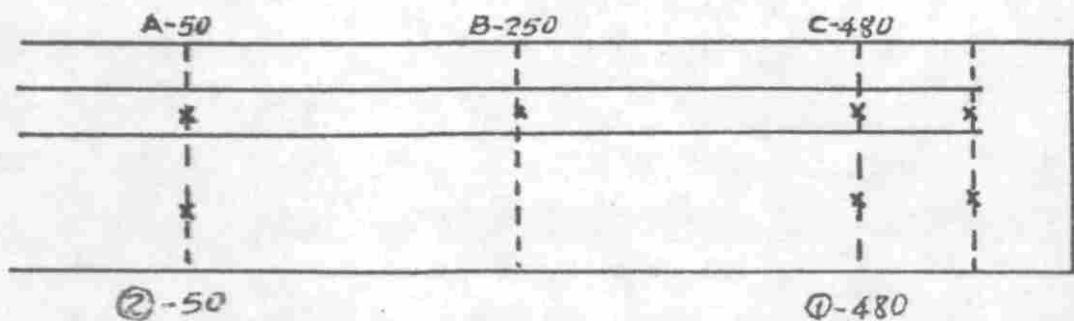
longitud	290 m
perímetro	17 m
superficie de intercambio	4930 m ²

Tasa de evaporación

$$\dot{m}_{v5} = (138,38 - 81,81) - 0,07 \times 290 \frac{3600}{4930} = 26,8 \text{ g/h.m}^2$$

II.3.2.3. TERCER BALANCE

La figura II 4 muestra la localización de los aparatos de medida



Las condiciones a nivel de cada estación son :

ESTACION	Q_a vol m ³ /s	ρ_a Kg/m ³	Q_a mas Kg/s	θ_s C	P mmHg	e %	X g/kg aire seco	caudal agua g/s
1	4,14	1,28	5,30	26,5	829	62,0	11,6	61,5
2	7,55	1,28	9,66	25,5	829	64,5	12,8	123,6

El valor promedio de las fugas de aire húmedo medido entre A y C es de 0,01 Kg de aire por metro de línea y por segundo.

La humedad del aire (medida en A) dentro de la línea es de 6 g/Kg aire seco. La cantidad de vapor que es cada es 0,06 g/s por metro de línea de ventilación.

TROZO ①-②

longitud	430 m
perímetro	17 m
superficie de intercambio	7310 m ²

Tasa de evaporación

$$\dot{m}_{v6} = (123,6 - 61,5) - 0,06 \times 430 \quad \frac{3600}{7310} = 18 \text{ g/h.m}^2$$

II.3.3. VERIFICACION TEORICA

La verificación de la tasa de evaporación medida durante los balances efectuados para los diferentes trozos de galería se hizo por aplicación del modelo descrito.

La tabla II.2. muestra los resultados que se encuentran para cada uno de los trozos de la galería.

II.3.4. TABLA RECAPITULATIVA

TABLA II.2 - VALORES TEORICOS DE LA TASA DE EVAPORACION

BAL.	T.R.	θ_a °C	P Pa	h m	Q_a m ³ /s	S m ²	D _a m	V _m m/s	R m	ρ_a kg/m ³	θ_f °C	E h	V _A m ³ /h	K _A	P _r	N _A	λ_A kcal/hm ² °C	α kcal/hm ² °C	θ_p °C	P _{vp} Pa	P _{va} Pa	P-P _{va} Pa	P _{vm} Pa	P _{vm} Pa	Q_{pe} kcal/h ² °C	c/f	δ m/h	N _A m ³ /h	N _A m ³ /h
1	① - ②	26,9	110969,7	68,0	5,07	20	5	0,25	17	1,28	36,5	240	1,63 · 10 ⁻⁵	76 593	0,71	163,7	0,022	0,73	28,3	3855,7	2408,2	107733,4	3135,3	0,310	0,301	2,50	1,9 · 10 ⁻⁵	27,5	
	② - ③	26,9	110868,7	69,0	5,27	20	5	0,27	17	1,26	36,5	552	1,63 · 10 ⁻⁵	81 180	0,71	171,0	0,022	0,75	27,9	3762,3	2448,2	107760,1	3108,6	0,310	0,301	2,50	1,72 · 10 ⁻⁵	22,8	
	③ - ④	27,6	110868,7	67,8	6,40	20	5	0,22	17	1,28	36,5	2160	1,64 · 10 ⁻⁵	97 540	0,71	198,0	0,022	0,87	28,3	3855,7	2534,9	107666,7	3202,0	0,302	0,300	2,80	2,01 · 10 ⁻⁵	26,6	
	④ - ⑤	27,0	109401,1	62,5	6,56	20	5	0,23	17	1,26	36,5	480	1,63 · 10 ⁻⁵	70 466	0,71	154,0	0,022	0,69	28,0	3789,0	2228,0	106332,5	3068,6	0,305	0,290	2,40	1,79 · 10 ⁻⁵	26,0	
2	② - ③	27,3	109401,1	66,0	6,22	20	5	0,21	17	1,26	36,5	3600	1,63 · 10 ⁻⁵	94 975	0,71	194,0	0,022	0,85	27,7	3722,3	2401,5	106332,5	3068,6	0,306	0,297	2,85	2,06 · 10 ⁻⁵	27,2	
	③ - ④	23,9	110601,9	63,2	5,84	20	5	0,20	17	1,28	36,5	5040	1,62 · 10 ⁻⁵	92 421	0,71	190,0	0,022	0,83	26,3	3428,8	2108,0	107800,1	2801,7	0,310	0,302	2,70	1,95 · 10 ⁻⁵	25,6	

La tabla II.3. da los valores medidos de la tasa de evaporación y los valores teóricos calculados por medio del modelo matemático propuesto.

El error relativo permite calcular el error de un valor con respecto al otro. En este caso, los errores relativos fueron calculados con respecto al valor de la tasa de evaporación obtenida mediante el modelo matemático.

Se da también la longitud de los trozos de galería para poder sacar las conclusiones correspondientes.

Tabla II.3. valores de tasa de evaporación medida y calculada para cada trozo de galería.

BALANCE	TROZO	LONGITUD m	TASA DE EVAPORACION g/h.m ²		ERROR RELATIVO %
			MEDIDA	CALCULADA	
1	1 2	24	31,50	27,50	14,5
	2 3	26	22,60	22,80	0,9
	3 4	262	18,50	26,60	30,4
2	1 2	56	42,20	28,00	50,7
	2 3	290	26,80	27,20	1,5
3	1 2	430	18,00	25,80	30,2

III. CAUDAL DE AIRE NECESARIO A LA EVACUACION DEL CALOR DESPRENDIDO POR EL MASIVO.

La estimación de las cantidades de calor y de vapor de agua desprendidos en los frentes de trabajo y en las obras subterráneas de preparación y transporte puede hacerse por medio de los modelos matemáticos propuestos que han sido verificados experimentalmente [1,34,35].