

Tema:

POTENCIAL TÉRMICO PASIVO DE TRADICIONALES UNIDADES SUBTERRÁNEAS DE CONSERVACIÓN DEL VINO FRENTE AL CLIMA CÁLIDO-ÁRIDO DE SAN JUAN

[AUTOR]
[Info de contacto]

RESUMEN: Este estudio determina el potencial que presentan las configuraciones subterráneas de vasijas de vinificación como elementos de climatización natural para el vino elaborado, en un contexto de clima cálido. Para determinar los resultados se lleva a cabo un seguimiento térmico con sensores y un modelado térmico de las vasijas de vinificación. Mediante esta metodología se ejecuta una simulación en régimen estacionario de casos de diversa naturaleza morfológica, situacional y material, comúnmente utilizados en la conservación del vino. Se obtienen resultados empíricos a partir del monitoreo térmico durante la estación cálida del año, complementados con datos cuantitativos alcanzados con la simulación térmica, que confirman el potencial pasivo de las unidades subterráneas entre ellas y frente a las vasijas sobre-rasantes aisladas y aglomeradas.

Palabras clave: *vinificación, vasijas subterráneas, demanda termo-energética*

INTRODUCCION

La vinificación es un proceso que comprende desde la molienda del grano de uva hasta el embotellamiento del vino elaborado. Sin embargo, este estudio aborda un acotado espacio de dicho proceso, entre el vino acabado y su período previo al fraccionamiento, comúnmente llamado estabilización o conservación. El tipo de vino *común* es representativo de la vinificación en San Juan, superando en volúmenes al mosto, como asimismo al champagne, los vinos *frizzé*, *les grans cús*, los *abocados* y vinos *especiales*. El proceso del vino común se maneja con parámetros térmicos más amplios que los requeridos por el vino fino, el cual exige un control riguroso de su temperatura. Durante la conservación del vino, la invariabilidad térmica constituye el rango térmico de conservación del vino hasta su expedición al mercado. Este estado de quietud de la masa de vino peligra en mayor o menor medida con las variaciones cíclicas de la temperatura del aire exterior, dependiendo de la envolvente que lo protege. La importancia de esta condición de estabilidad térmica tiene implicancias sanitarias para el vino y económicas para el productor. Por ejemplo, altas temperaturas en el seno del vino promueven la proliferación de microorganismos que pueden deteriorar al mismo en diversos niveles, hasta su destrucción total. El foco de la presente investigación se centra en la determinación de los umbrales térmicos que delimitan las condiciones adecuadas en la etapa de conservación de vinos comunes y varietales finos, blancos y tintos, y en el análisis del clima, entendiendo que es el conocimiento básico y fundamental para la definición de medidas constructivas que contribuyan al ahorro energético. En este sentido, el interés por conocer en forma específica los factores térmicos ambientales que inciden en la elaboración del vino, ha motivado el abordaje de varias investigaciones. Entre ellas en Cañas Guerrero, I.; Martín Ocaña, S. (2005) Study of thermal behaviour of traditional wine cellars: the case study of the area of Tierras Sorianas del Cid (Spain) *ELSEVIER, Renewable Energy* 30 (2005) págs. 43-55 se analizan las antiguas bodegas subterráneas de la localidad de Soria, en España, donde se indaga sobre el papel que desempeña la inercia térmica del suelo en las condiciones ambientales interiores de estos recintos enterrados. Los resultados de estos autores demuestran la estabilidad elevada de las condiciones térmicas de una bodega inserta en una colina, donde las condiciones interiores en un día de verano oscilan 0.8 °C a una humedad constante del 100%, debida a la escasa ventilación. En una bodega subterránea la estabilidad térmica es superior: las

oscilaciones térmicas alcanzan 0.4 °C. Esto les permite afirmar que el cambio de las técnicas de construcción de las bodegas subterráneas a las bodegas superficiales es la causa del incremento del consumo energético en estas industrias.

Otros trabajos en la línea temática (Assan y Sancaktar, 1998; Bahadori y Fariboz, 1985; Mihalakakou *et al*, 1997; Unver y Agen, 2003) demuestran las ventajas de la construcción vernácula subterránea en el ahorro de energía utilizada en el proceso de maduración y añejamiento del vino. Los autores aseveran que las condiciones estables de temperatura debajo de la tierra frente a las oscilaciones térmicas diarias en la superficie, hacen del subsuelo un recurso muy útil en verano para conseguir un efecto refrigerante y en invierno para obtener temperaturas más cálidas y constantes que las exteriores.

Geográficamente el Valle del Tulum se encuentra ubicado a los 31° de Latitud Sur y 68° de Longitud Oeste. Este oasis es considerado uno de las más importantes áreas vitivinícolas de Argentina, junto con el Valle de Uco, en la vecina provincia de Mendoza (INV, 2008). La *vitis vinífera* es introducida en la región por los colonizadores y desde a partir de allí, las provincias de Mendoza y San Juan se especializaron en la elaboración de caldos, constituyéndose los dos centros históricos de vinificación en Argentina, y uno de los más relevantes de Latinoamérica. Su importancia persiste en la actualidad, dado que Argentina es uno de los cinco países de mayor producción de vinos en el mundo, con 1 500 000 000 L/año (Larousse, 2008). Desde su introducción en el medio árido de la zona de Cuyo, las condiciones climáticas han sido un limitante en la conservación del vino elaborado, dada la extremas temperaturas de verano. El área de la Provincia de San Juan se clasifica como de clima desértico (IRAM 11603) de manera que la temperatura del aire es extrema tanto en verano (TMAX 33.6 °C) como en invierno (TMIN 0.3 °C). En sus orígenes, las bodegas del Virreynato del Río de la Plata consistían en construcciones elementales, afectadas tanto por el clima como por los frecuentes movimientos sísmicos. Sin embargo, con el tiempo esta precariedad transitoria se encaminó a construcciones consolidadas nacidas con el Nuevo Estado Nacional y la llegada de mano de obra especializada desde países vitivinicultores. Entonces, las cellas se edificaron bajo tierra, del mismo modo que en las tierras agrícolas continentales de España. En 1900 existía gran número de esta tipología de vasijas de vinificación subterráneas. A finales de siglo XIX se introduce la pileta sobre rasante, unidades de vinificación aglomeradas, adosadas unas a otras en dirección horizontal y vertical. Esta tradición Californiana tuvo gran difusión, dada su gran capacidad, permanencia y fácil limpieza. Posteriormente el ferrocarril acerca la tecnología a la vinificación. Con la maquinaria importada, la producción continua es posible y permite el comercio de vinos a granel. Surge la bodega industrial; las naves existentes se adosan a otras en forma paralela (Grilli, 2008). Por la influencia italiana, los muros de adobe y tapial se sustituyen por los mampuestos de ladrillo, cuyo espesor final alcanza desde los 0.45 m en adelante (Manzzini, 2001). Desde la década de 1970 hasta la actualidad, las vasijas para vino común disponen de capacidades superiores a los 30 000 L y pueden ubicarse a nivel, sobre-nivel y enterradas. A pesar de la tendencia globalizadora del mercado, las estadísticas indican que se elabora vinos de mayor calidad con la misma infraestructura de treinta años atrás, siendo la vasija de vinificación de mampostería u hormigón armado la predominante. Prácticamente el 68 % de las bodegas utilizan este tipo de vasija (Min. de Prod. De la Prov. De San Juan, 2010). Estos ámbitos de conservación se conservan en las industrias por su resistencia al paso del tiempo y por su elevada capacidad específica, ofreciendo -según sea el espesor- cierta amortiguación y retardo de la onda térmica del aire exterior. Permiten, además almacenar diversidad de volúmenes de vino, según la necesidad del enólogo.

METODOLOGÍA

Se realiza una búsqueda bibliográfica y entrevistas a expertos para determinar los umbrales de las condiciones térmicas teóricas requeridas durante la conservación de vinos comunes (Simone, 2005 a, b y c; Oreglia, 1978; Mendoza, 2008). Para las entrevistas se elabora una encuesta-guía semi-estructurada y se seleccionan tres Enólogos con vasta y reconocida experiencia en la provincia de San Juan. Para lograr datos consistentes se contrastan los obtenidos de la bibliografía consultada con los brindados por los expertos, dialogando con ellos sobre dichos parámetros, hasta la determinación fundamentada de los valores correctos. Finalmente se elabora una tabla síntesis y se delimita la zona de rango térmico de conservación del vino en un diagrama. Para la verificación de los umbrales, se lleva a cabo un estudio de campo consistente en mediciones realizadas con data loggers HOBO U12

T12 localizados en las vasijas de vinificación de una bodega asentada en la zona urbana de la Provincia de San Juan. Las lecturas de temperatura y humedad relativa se registraron cada media hora mientras tuvo lugar la conservación del vino en período cálido. El dato de humedad es irrelevante en este trabajo ya que las vasijas de conservación (piletas o cisternas) se encuentran llenas de vino hasta la compuerta superior del espacio de control. Dada la falta de recursos y los riesgos potenciales de pérdida y destrucción de los equipos de medición, se protegieron los sensores por una cubierta plástica hermética. Estos sensores permanecieron en contacto in-directo con el vino, pero sumergidos en él, dado que no existen espacios de aire entre la superficie del vino y la compuerta. Esto tiene su explicación en la higiene del producto, ya que el aire motiva la oxigenación del vino y la proliferación de bacterias.

Para determinar la incidencia de los factores físicos de la vasija de vinificación y ambientales propios del clima árido continental, se elabora una herramienta de simulación térmica en régimen estacionario. Para el empleo de la misma se utilizan los valores empíricos –medios, mínimos y máximos y desviación estándar- de la temperatura en el vino en conservación y del clima. Así mismo se utilizan modelos semi-empíricos para conocer otros datos, tales como la temperatura del terreno natural a la profundidad del fondo de las vasijas (cisternas) de conservación, o el efecto del viento en la conductancia térmica superficial de la interacción superficie de la vasija-clima. Los datos climáticos empleados son estadísticos, provistos por las Normas IRAM.

Se aborda la metodología del *estudio de casos*; de una muestra de 8 vasijas de conservación relevadas, monitoreadas con sensores y modelizadas por parámetros físicos, interesan dos casos en particular. De éstos, los casos 1 y 4 son seleccionados por su inserción en el terreno natural, para demostrar las condiciones térmicas de conservación del vino en el interior de estas celdas subterráneas. A efectos comparativos, se citan los resultados de la simulación de la totalidad de las unidades de conservación del vino.

MODELO FÍSICO APLICADO

Para cuantificar la carga de refrigeración en la conservación del vino, se desarrolla un modelo térmico de las diversas vasijas de vinificación. Se supone que la transferencia de calor es estacionaria, que la masa del vino es isoterma y por lo tanto homogénea. Se plantea el supuesto de que entre vasijas (piletas) vecinas sus muros divisorios compartidos son adiabáticos porque se comparte igual régimen térmico. Es decir se considera que las vasijas adosadas y apiladas unas a otras son utilizadas con el mismo fin de conservación del vino. En los casos en los cuales los elementos de la estructura de la vasija están expuestos a la intemperie-, la dirección del flujo de calor es unidireccional (x) y perpendicular al plano de la envolvente.

La profundidad (z) a la cual se encuentran las bases de las vasijas de vinificación plantea la necesidad de conocer la temperatura del suelo en z. El modelo analítico de predicción de la temperatura del suelo en función del tiempo y de las condiciones medias exteriores es el propuesto por Labs, K. (1982). La temperatura de la superficie del suelo exterior, afectada por la radiación solar directa y difusa es una condición de frontera. Dada la inexistencia de los datos de temperatura del terreno del solar analizado, se procede a emplear expresiones semi-empíricas. Para conocer la temperatura del suelo en función del tiempo y la profundidad, en Cañas Guerrero y Martín Ocaña (2005) se utiliza la siguiente expresión;

$$T_{(o,t)} = T_m - A_s \cos [2\pi/365*(t-t_o)] \quad (1)$$

$$(2)$$

$$T_{(z,t)} = T_m - A_s e^{-z\sqrt{2\pi/365*\alpha}} \{ \cos 2\pi/365[t-t_o - (z/2)(\sqrt{365/\pi \alpha})] \}$$

$$T_m = T_{m \text{ aire}} + 1.68 \quad (3)$$

$$A_s = \frac{1}{2} (T_{m \text{ verano}} - T_{m \text{ invierno}}) + 1.10 \quad (4)$$

Los coeficientes 1.68 y 1.10 son estimados y responden a una variación térmica entre 0.56 °C y 2.78 °C, debida a la naturaleza de la cubierta vegetal y al color de la superficie que cubre el terreno. El valor de la difusividad térmica se determina a partir del perfil real del terreno, compuesto en los primeros 7.00 m por tierra vegetal, seguido de arcilla y arena. Utilizando datos estadísticos oficiales y empíricos (IRAM 11603; 1996), se determinan las temperaturas para verano, resultantes a 4.50 m¹ de profundidad;

$$T_{(4,50) \text{ verano}} = 26.60 \text{ °C}$$

La estimación de la convección natural o forzada (h_{ic}), Mc Adams (Colombié *et al*, 2006) proporciona algunos modelos empíricos para obtener h_{ic} ;

$$h_{ic} = \frac{Nu * \lambda_{fluido}}{H} \quad (5)$$

En la convección natural, Lienhard (en Cengel, 2007) sugiere la siguiente expresión para determinar el valor de Nu;

$$Nu = 0.678 Ra^{1/4} * (Pr / 0,952 + Pr)^{1/4} \quad (6)$$

Donde Ra es el número de Rayleigh y Pr el número de Prandtl. Ambos datos se obtienen de;

$$Ra = \frac{g * 1 / 273.15 + T_e (T_e - T) H^3}{\nu_{fluido} \alpha_{fluido}} \quad (7)$$

$$Pr_{fluido} = \nu_{fluido} / \alpha_{fluido} \quad (8)$$

En la generalidad de los casos no se contempla la influencia que tiene el coeficiente superficial de intercambio por radiación h_{ir} dentro de la vasija de vinificación. Los cálculos preliminares confirman que en las situaciones de interés, h_{ir} es un valor despreciable en comparación al valor de la conductancia por convección térmica superficial. Para la estimación del comportamiento térmico en los demás casos de envoltentes se estima el coeficiente de intercambio térmico exterior por convección h_{ec} . Este valor se emplea también en el cálculo de los flujos en las cubiertas de las vasijas de vinificación subterráneas. Para su obtención se definen;

$$Nu = 0.32 + 0.43 * Re^{0.52} \quad (9)$$

En donde Re es el número de Reynolds:

$$Re = V_{fluido} * D / \nu_{fluido} \quad (10)$$

Estimando una velocidad de viento para verano igual a 3.60 m/seg (IRAM 11603; 1996) se reemplaza Nu y Re (Cengel, 2007);

¹ La profundidad calculada es de - 4.50 mts y corresponde a la máxima registrada en el relevamiento de la totalidad de las vasijas de vinificación comprendidas.

$$h_{ec} = \left[0.32 + 0.43 \left(\frac{V_{fluido} H}{v_{fluido}} \right)^{0.52} \right] \lambda_{fluido} / H \quad (11)$$

PRESENTACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

El objetivo del trabajo consiste en demostrar las prestaciones térmicas naturales de las vasijas de vinificación subterráneas, frente a las demás vasijas sobre rasantes aglomeradas y aisladas. Se detallan las características de los casos 1 y 4. Los demás casos se presentan sintéticamente en la Tabla 1, dada la limitada extensión del artículo. Es importante aclarar que en la medición con sensores, los casos 9, 10, 11 y 12 se encontraban fermentando mosto. Sin embargo, estos casos fueron modelados y se simularon como conservadores de vino.

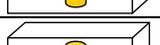
Orden	Ambiente	Forma planta	Relacion	Ubicación	Material	Capacidad (L)	Configuración
Caso 1	Cisterna de conservación		aislada	subterránea	ladrillón	>150000	
Caso 2	Tanque de conservación		aislada	sobrerasante	chapa	>150000	
Caso 3	Pileta de conservación		entre vasijas	sobrerasante	ladrillón	<30000	
Caso 4	Cisterna de conservación		entre vasijas	subterránea	adobe	<30000	
Caso 5	Pileta de conservación		entre vasijas	sobrerasante	ladrillón	30000 a 150000	
Caso 6	Pileta de conservación		entre vasijas	sobrerasante	ladrillón	<30000	
Caso 7	Cisterna de conservación		entre vasijas	sobrerasante	hormigón armado	30000 a 150000	
Caso 8	Pileta de fermentación		aislada	sobrerasante	hormigón armado	<30000	
Caso 9	Pileta de fermentación		entre vasijas	sobrerasante	hormigón armado	30000 a 150000	
Caso 10	Tanque de fermentación		aislada	sobrerasante cubierto	acero inox	30000	
Caso 11	Tanque de fermentación		aislada	sobrerasante cubierto	chapa	30000	
Caso 12	Tanque de fermentación		aislada	subterránea cubierto	chapa	30000	

Tabla 1: Descripción de los casos seleccionados para el seguimiento térmico y el modelado.

Caso 1

Este caso presenta la totalidad de su envolvente vertical y piso en contacto directo con el terreno natural, a -3.20 m de profundidad. La cubierta de esta vasija de vinificación (53.36 m²) se encuentra a nivel +/- 0.00, en contacto directo con el aire exterior, a la sombra de una estructura de losa pretensada. La capacidad de esta pileta alcanza los 233 180 L de vino. Se determina que la cubierta es efectivamente el elemento de la envolvente que presenta mayor transmitancia térmica con el medio exterior, luego de la compuerta cuyo efecto es casi despreciable, dadas su reducidas dimensiones (0.25 m²). Tanto piso como muros se caracterizan por una notable inercia y reducida transmitancia térmica.

Caso 1						Conservación
COMPONENTE	MATERIAL	Espesor	Resistencia Térmica R	Retardo[φ]	Amortiguación[μ]	Trasmittancia Verano (Kv) [W/m ² C]
		[m]	[m ² C/W]	[h]	[-]	
MURO	terreno natural	1,000	3,571	1,324	0,707	0,24
	Pintura Epoxi	0,003	0,019	0,162	0,958	
	Revoque	0,020	0,022	0,570	0,861	
	ladrillo macizo	0,300	0,330	5,050	0,267	
	Revoque	0,020	0,022	0,570	0,861	
	Total Muro	1,343	3,965	7,675	3,655	
TECHO	Revestimiento marmol travertino	0,018	0,006	0,378	0,906	1,72
	Carpeta Cemento	0,040	0,077	1,490	0,677	
	losa maciza de hormigón armado	0,250	0,2632	7,759	0,131	
	revoque	0,020	0,022	0,570	0,861	
	Pintura Epoxi	0,003	0,0188	0,162	0,958	
	Total Techo	0,331	0,387	10,359	3,534	
PISO	Pintura Epoxi	0,003	0,019	0,162	0,958	0,24
	Carpeta Cemento	0,100	0,192	3,726	0,377	
	Contrapiso Hormigón	0,150	0,192	4,199	0,333	
	terreno natural	1,000	3,571	1,324	0,707	
	Total Piso	1,253	3,975	9,411	2,376	
COMPUERTA	cemento-CIRCULAR	0,050	0,053	1,552	0,666	3,90



Tabla 2: Coeficiente K de transmitancia térmica para el vino en conservación. Datos obtenidos mediante cálculos propios en planillas Excell. Componentes de los elementos de la envolvente del caso 1, descripción y propiedades física de cada uno.

Figura 1: Planta de la vasija de vinificación correspondiente al Caso 1. Se observa que el mismo no colinda con otras cellas vinarias, sino que se halla en contacto directo con el terreno natural.

Caso 4

Caso 4						Conservación
COMPONENTE	MATERIAL	Espesor	Resistencia Térmica R	Retardo[φ]	Amortiguación[μ]	Trasmittancia Verano (Kv) [W/m ² C]
		[m]	[m ² C/W]	[h]	[-]	
MURO I	Pintura Epoxi	0,003	0,019	0,162	0,958	0,24
	Revoque	0,000	0,022	0,570	0,861	
	adobe	0,300	0,353	11,242	0,053	
	terreno natural	1,000	3,571	1,324	0,707	
	Muro 1	1,303	3,966	13,298	2,580	
MURO II	Pintura Epoxi	0,003	0,019	0,162	0,958	0,42
	Revoque	0,000	0,022	0,570	0,861	
	adobe	0,300	0,353	11,242	0,053	
	Revoque	0,020	0,022	0,570	0,861	
	Pintura Epoxi	0,003	0,019	0,162	0,958	
	vino	1	1,724	3,707	0,379	
Muro 2	1,326	2,160	16,413	4,071		
TECHO	Revestimiento marmol travertino	0,018	0,006	0,378	0,906	1,72
	Carpeta Cemento	0,040	0,077	1,490	0,677	
	losa maciza de hormigón armado	0,250	0,2632	7,759	0,131	
	revoque	0,020	0,022	0,570	0,861	
	Pintura Epoxi	0,003	0,0188	0,162	0,958	
	Total Techo	0,331	0,387	10,359	3,534	
PISO	Pintura Epoxi	0,003	0,019	0,162	0,958	0,24
	Carpeta Cemento	0,100	0,192	3,726	0,377	
	Contrapiso Hormigón	0,150	0,192	4,199	0,333	
	terreno natural	1,000	3,571	1,324	0,707	
	Total Piso	1,253	3,975	9,411	2,376	
COMPUERTA	cemento-CIRCULAR	0,050	0,053	1,552	0,666	3,90



Tabla 3: Coeficiente K de transmitancia térmica para el vino en conservación. . Datos obtenidos mediante cálculos propios en planillas Excell. Componentes de los elementos de la envolvente del caso 4, descripción y propiedades física de cada uno.

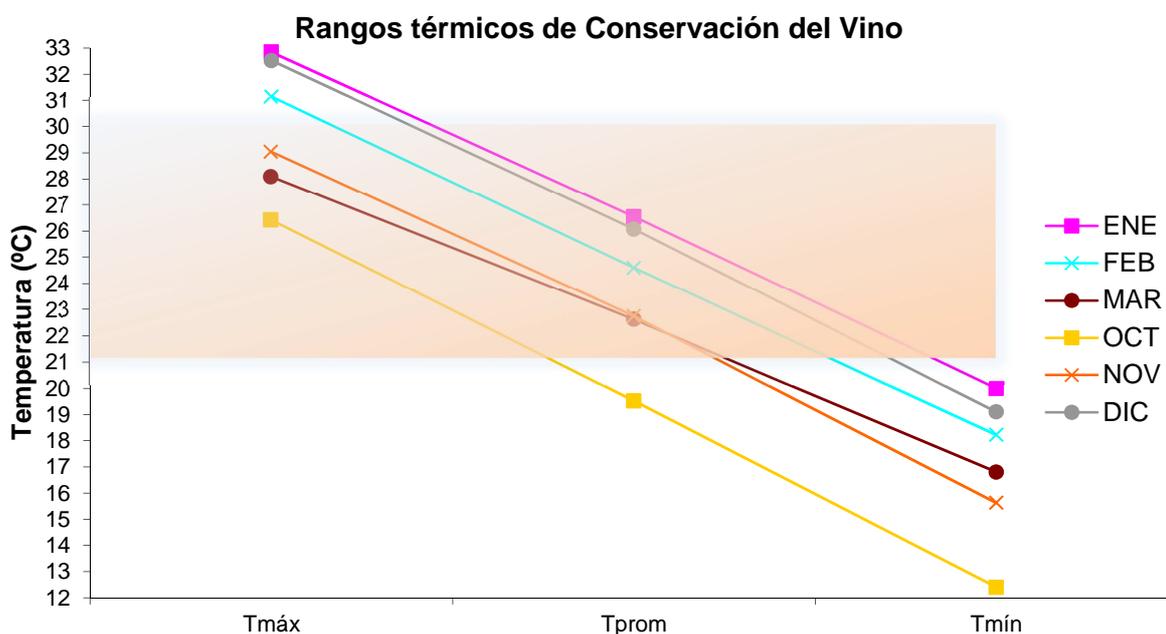
Figura 2: Planta de la envolvente de vinificación correspondiente al caso 4.

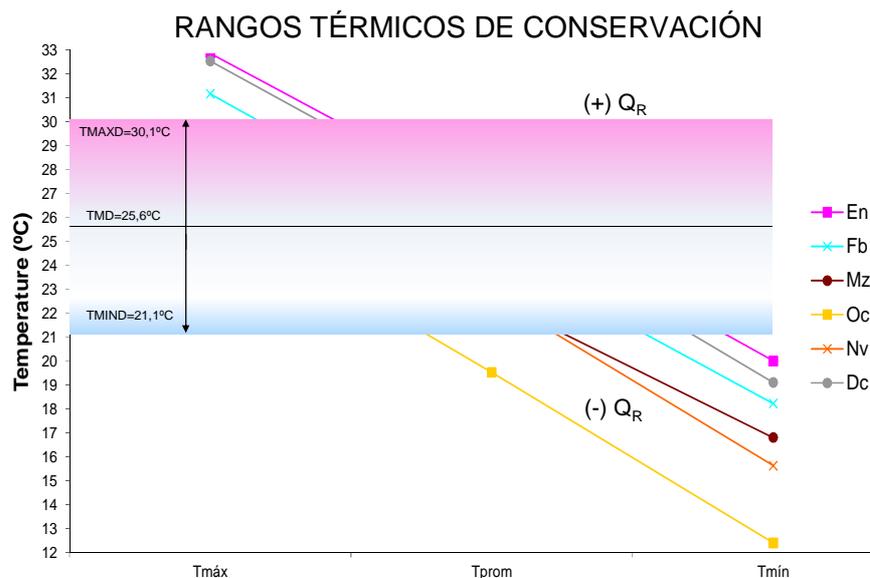
El caso 4 consiste en una celda vinaria en contacto parcial con el terreno natural. Sin embargo en dos de los cuatro muros se conserva en contacto directo con otras unidades aglomeradas. Estas se encuentran llenas de vino en conservación, por lo cual la transferencia de calor entre ellas es igual a cero. Los otros elementos verticales y el piso se hallan en contacto directo con el terreno natural. La base de la celda alcanza la misma profundidad que el caso 1, - 3.20 m. La capacidad de la vasija de vinificación de análisis es de 24 940 L, significativamente inferior a la del caso 1. La cubierta (8.31 m²) de este caso está parcialmente en contacto directo con el aire exterior –a la sombra-, compartiendo la misma con la base de otra pileta, un 70 % asentada sobre ella. Es notable que la transmitancia térmica de los muros en contacto con el terreno natural y los muros en contacto con otra vasija de vinificación son relativamente reducidas. A pesar de que la menor transmitancia térmica se debe a los

muros en contacto con el terreno natural, esta es también reducida en muros colindantes, ya que el vino ofrece iguales propiedades físicas que el agua. De esta manera la gran capacidad específica del vino reduce la relevancia de la transferencia térmica entre vasijas de vinificación aglomeradas.

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉRMICOS SEMI-EMPÍRICOS DE CONSERVACIÓN DEL VINO

Los parámetros térmicos para el confort de las levaduras condicionan simultáneamente la calidad del producto y la demanda en refrigeración. A pesar de que la *vitis vinífera* es oriunda de climas templados, se adapta a las condiciones climáticas de San Juan. El conflicto se presenta cuando las prácticas enológicas modernas imponen bajas temperaturas al vino en conservación y con pocos márgenes de variación térmica. Este factor es determinante en la demanda energética en refrigeración del vino, particularmente en clima cálido-seco. La temperatura de conservación del vino persigue la estabilidad térmica. Una reducida variación térmica en la masa del vino causa la decantación de sustancias, afectando la limpieza, claridad y vida del vino.





MES	En	Fb	Mz	Oc	Nv	Dc
Confort	29,32	29,86	34,19	27,89	29,17	29,17
QR(+)	69,48	55,21	36,98	18,98	39,09	64,09
QR(-)	0,00	14,93	28,37	52,75	31,55	6,94

Tabla 4: Datos cualitativos; porcentaje de rangos de datos dentro de las zonas de confort de la conservación del vino en período cálido.

Figura 3: Zonas de rangos térmicos de conservación del vino en conservación estival. Cada línea representa la totalidad de los datos medios máximos, y mínimos de cada mes cálido.

Para reducir el error en cuanto al valor medio de temperatura de conservación del vino, se persiguen parámetros semi-empíricos. A partir de los datos recogidos por los sensores en una muestra de 8 vasijas de conservación, se obtienen los valores de temperatura media y desviación estándar de cada una. La literatura (Larrouse, 2002; Oreglia, 1978; Simone, 2005c) señala que las desviaciones estándar comúnmente manejadas son similares tanto para vinos comunes como varietales, entre +/- 1.50 K y +/- 1.40 K. Parámetros térmicos bajos son elegidos para vinos de mayor calidad. La literatura señala una media de 15.70 °C para la conservación de vinos de menor calidad.

Los valores semi-empíricos obtenidos señalan una temperatura promedio (TMD) de conservación del vino en verano, igual a 22.20 °C con una desviación estándar de +/- 1.90 K. En todos los casos la humedad relativa es elevada, dada la escasa población de aire en el interior de las vasijas. La literatura citada sugiere ciertos porcentajes, menores a los obtenidos en los casos analizados, sin embargo estos valores son tomados de ámbitos de conservación en cuyo interior se alojan bordalesas y botellas de vino, como se practica tradicionalmente en Europa.

En este estudio se consideran las condiciones climáticas de los meses más cálidos del año, aquellos cuya temperatura media (TM) supera la TM anual, estimada en 18.30 °C. Entre éstos se encuentran Enero (En), Febrero (Fb), Marzo (Mz), Octubre (Oc), Noviembre (Nv) y Diciembre (Dc). Los meses de Enero, Febrero y Diciembre presentan más de la mitad de los valores térmicos sobrepasando las temperaturas máximas de conservación del vino. En la Figura 5, cada línea representa un mes, conteniendo los valores promedio de temperatura máxima, mínima y media. Asimismo se distinguen tres parámetros térmicos de conservación del vino; temperatura óptima (22.20 °C), temperatura aceptable (24.10 °C – 20.30 °C) y zona de temperatura inaceptable, indicada como (+) QR. La zona indicada como (-) QR refleja un descenso de la temperatura del vino que si bien excede los parámetros de confort, favorece a un refrescamiento natural del vino durante la noche, que en momentos del día es utilizado para acumular calor tanto en el elemento constructivo de la vasija como en el seno del vino. A partir de este diagrama es posible identificar el porcentaje de valores mensuales que promueven las condiciones térmicas apropiadas a una buena conservación estival del vino. Por supuesto que los

valores que exceden las condiciones de confort inducen un incremento de la carga en refrigeración o (+) QR, así como ocurre lo contrario mientras más baja y más próxima es la temperatura a (-) QR. Puede notarse que en Enero (En) las temperaturas mínimas dentro del área de confort, no inducen un refrescamiento del vino por lo cual es aconsejable incorporar un sistema de enfriamiento durante la jornada completa. El mes de Diciembre (Dc) se comporta de manera similar. En Octubre (Oc), la conservación se puede llevar a cabo dentro de una vasija de vinificación de gran resistencia térmica, sin necesidad de recurrir a sistemas de enfriamiento mecánico. Este mes presenta los menores porcentajes de carga térmica entre los meses comprendidos en período cálido.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Considerando que los casos de interés 1 y 4 difieren en sus capacidades, se lleva a cabo un análisis comparativo entre éstos y otros casos de igual capacidad. Los volúmenes de las vasijas de conservación se clasifican en capacidad 1 ($\leq 30\ 000$ L), capacidad 2 ($\geq 30\ 000$ L y $\leq 90\ 000$ L) y capacidad 3 ($\geq 90\ 000$ L). Mediante la simulación térmica de los casos se realiza un análisis comparativo del caso 1 entre las vasijas de vinificación de capacidad 3; y el caso 4 y las vasijas de vinificación de capacidad 1. La simulación térmica de los casos permite cuantificar la carga térmica (Wh/L) del vino guardado en las vasijas de vinificación físicamente modelizadas. Luego, mediante los resultados del monitoreo térmico se verifica el desempeño térmico entre estos dos casos, 1 y 4.

Entre los casos de capacidad 1, los resultados cuantitativos de la simulación térmica señalan que el caso 4 ofrece variaciones cíclicas menos acentuadas que el resto. Este se halla en contacto con la tierra vegetal y su superficie tiene escasa exposición con el medio exterior: entre el 62.80 % y el 55.10 % de la energía térmica se transfiere por conducción, y el restante lo hace por convección en su cubierta.

La temperatura a -4.50 m es ± 2.00 K que la temperatura de confort (22.20 °C) más la variación estándar (± 1.90 K). Debido a su inercia térmica y a la poca capacidad de almacenamiento el vino guardado en el interior del caso 4 tiende a estabilizar su temperatura con la de la tierra vegetal, trascendiendo los rangos térmicos definidos anteriormente.

Entre las vasijas de vinificación de capacidad 1, la simple y doble envolvente metálica de las vasijas se vale fundamentalmente de la protección de la edificación de la bodega, por la cual los intercambios convectivos y radiativos son irrelevantes, así como el enfriamiento en horas de la noche. Sin embargo, por tratarse de volúmenes reducidos la temperatura del vino se estabiliza térmicamente con la temperatura del aire cálido del exterior en un período de días. Asimismo, este factor conduce a que favorablemente el caso 4 se estabilice con la temperatura de la tierra vegetal.

Los casos de capacidad 3 tienen una gran inercia térmica inferida de su contenido de vino. El caso 1 presenta las menores variaciones térmicas y las menores cargas de frío. La vasija de un caso $150\ 000$ L mayor que el caso 1 no resulta más eficiente. Esto se debe a que la inercia de la vasija subterránea se incrementa por el espesor semi-infinito del terreno natural. Las superficies de los casos expuestos a la radiación solar, determina que los mismos presenten desfavorables condiciones térmicas para la conservación del vino. Particularmente estos constituyen el tipo de vasija de vinificación que se debe evitar para la conservación. El monitoreo térmico confirma también que el caso 4 ofrece mayor estabilidad térmica al vino que el caso 1.

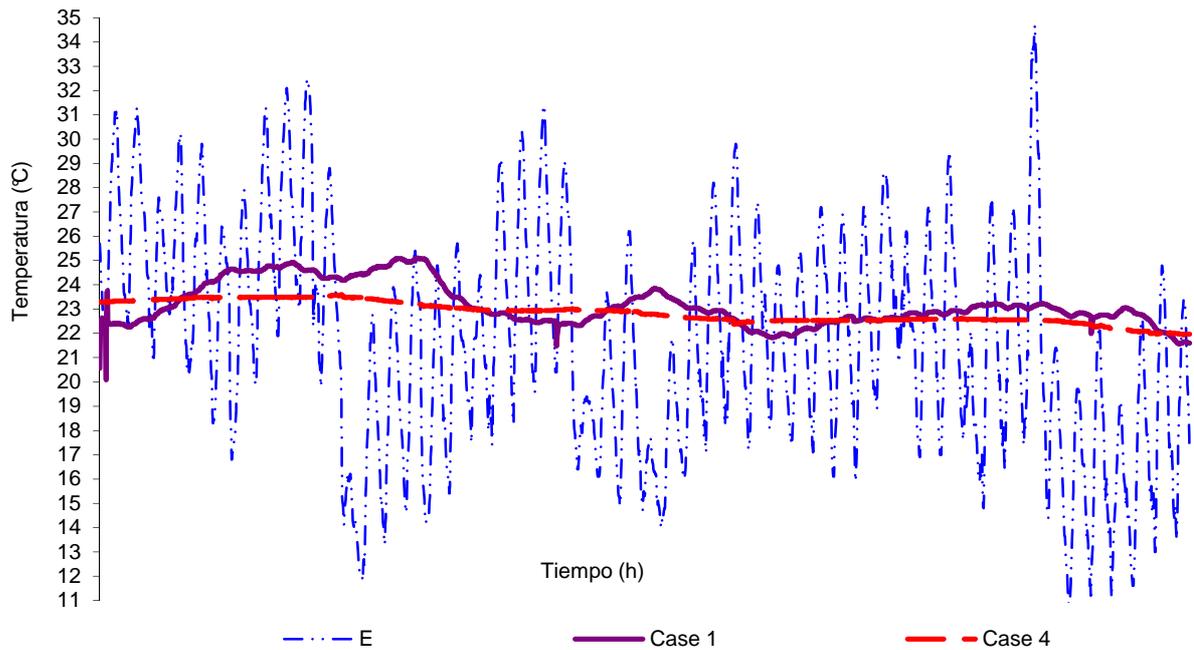


Figura 4: Resultados del seguimiento térmico de los casos subterráneos 1 y 4 y de la temperatura del aire exterior (a la sombra) durante el verano. Datos procesados con PROMEDI HTL (Blasco Lucas, 2007)

Está demostrado el acotado rango de tiempo anual –diciembre y enero- que las unidades de vinificación demandan control térmico artificial. Las elevadas temperaturas de los meses cálidos se amortiguan en el vino mediante la configuración espacial de estas unidades de producción. El seguimiento térmico demuestra que la estabilidad térmica del vino por medios pasivos es razonablemente posible. Esto se confirma recurriendo a la simulación térmica de las vasijas subterráneas, mediante la cual se estima una variación térmica máxima de + 0.01 K/h. Este análisis confirma que las envolventes de vinificación subterráneas garantizan la estabilidad del vino, con escasa asistencia de control térmico artificial. De hecho el nivel de exposición de la vasija al entorno climático es tan significativo como el grado de enterramiento de la misma. Esto indicaría que las unidades sobre-rasantes también podrían alcanzar temperaturas adecuadas de conservación del vino, a partir de las siguientes condiciones;

Ubicación: Es notable el impacto que tiene la temperatura exterior en la temperatura del vino conservado en los casos relevados, excepto sobre las dos vasijas subterráneas (casos 1 y 4). Las vasijas en contacto directo con el terreno natural conservan una estabilidad térmica del vino relativamente superior a las demás vasijas de vinificación. La temperatura del terreno ofrece un límite superior admisible, frente a los elevados valores térmicos del aire en verano. Asimismo se puede decir que las vasijas de vinificación expuestas a la radiación solar directa constituyen espacios no recomendados para la preservación de las condiciones de conservación del vino, sean estas envolventes altamente conductivas (metal) o no (hormigón armado). La ubicación de las vasijas de vinificación adosadas y apiladas entre sí, incrementa la inercia térmica de todas las unidades, promoviendo un comportamiento multizona de gran resistencia térmica. En el interior de estas vasijas de vinificación, el vino se conserva como se observa en el caso 4, con una temperatura constante, a pesar del reducido volumen contenido. Esto señala que las bodegas tradicionales disponen -a pesar de los estrictos rangos térmicos de conservación del vino- de un demostrado potencial significativo de eficiencia energética de la industria nacional. A contraposición de algunas opiniones carentes de rigor científico, este estudio no revela verdades archi-conocidas sino que demuestra fehacientemente que esta configuración de vasijas de vinificación aglomeradas, apiladas y enterradas -característica de las bodegas argentinas, constituyendo prácticamente el 70 % de la capacidad de guarda de vino del país- es el modelo de sustentabilidad agro-industrial que se persigue en otros países vitivinícolas del mundo. Esta clase de vasijas contribuye a un valor porcentual de ahorro del 78 % de la carga termo-energética del vino,

cubriendo de forma natural las demandas que en otras tipologías de bodegas se suplen mediante intensivos sistemas mecánicos de control térmico artificial.

Volumen de vino guardado; En comparación con el caso 4, la envolvente del caso 1 presenta una diferencia en la carga térmica de + 2077 Wh. Si bien esta carga no provoca una gran variación térmica en el vino, no garantiza estabilidad. El caso 4 alcanza + 0.004 K/h, y el caso 1 + 0.010 K/h, más de diez veces el incremento térmico que el primero.

Esto plantea la cuestión de la relevancia de la inercia térmica del volumen de vino en la absorción del calor. Grandes volúmenes ofrecen mayor inercia efectivamente, pero no está garantizada la estabilidad en aquellas vasijas de conservación con gran superficie de intercambio térmico con el aire exterior. Por otra parte, en la vinificación moderna de vinos de mayor calidad se evita el manejo de grandes volúmenes, prefiriendo reducidas unidades de control. Esto explica la difusión de pequeñas vasijas de acero inoxidable, con la implicancia de elevados costos de inversión, baja rentabilidad del producto y por supuesto gran dependencia termo-energética de sistemas de control térmico artificial.

Varias envolventes de vinificación subterráneas-aglomeradas son preferibles desde el punto de vista térmico y energético, frente a una gran envolvente subterránea sin aglomeración alguna. Asimismo es preferible utilizar vasijas de vinificación de reducidos volúmenes y gran aglomeración, que vasijas de acero inoxidable aisladas, climatizadas en el interior de un espacio de aire térmicamente controlado dentro de un galpón.

Materialidad; Las propiedades físicas de los materiales utilizados en la envolvente de las vasijas determinan la temperatura de conservación del vino. La variación térmica en casos de envolventes altamente conductivas indica gran inestabilidad térmica, a pesar de la ingente cantidad de vino contenida en la vasija. Continuamente se cita la efectividad del adobe en la amortiguación del flujo térmico. Frente al caso de las envolventes para vinificación, las propiedades físicas del adobe presentan una incidencia irrelevante sobre la variación térmica del vino. Esto se confirma al comparar la transmitancia térmica de muros de hormigón armado (caso 1) y muros de adobe (caso 4).

En la configuración de las bodegas, es frecuente encontrar unidades de vasijas adosadas y apiladas, o enterradas parcialmente. El efecto de la inercia térmica del terreno natural y/o del vino es significativamente mayor en la transmitancia térmica que el tipo y espesor del material de la envolvente de vinificación. En este sentido los muros aislados térmicamente se comportan de forma similar que las paredes dobles y ofrecen un conveniente 50 % de reducción de la demanda termo-energética en la conservación del vino. Sin embargo este porcentaje es notablemente inferior al alcanzado por las envolventes de las vasijas de conservación que disponen de inercia propia o conferida por otras vasijas colindantes.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirman el potencial de conservación térmica del vino en las estructuras existentes en abundancia en la región. En contraposición, la moderna enología promueve la implementación de bodegas de conservación con infraestructuras de frigoríficos, marcando una creciente dependencia energética de la producción del vino. Los recursos pasivos tales como la envolvente de vinificación subterránea o sobre rasante-aglomerada se desestiman por considerarse tecnologías obsoletas. La obsolescencia si bien es relativa en relación a los avances tecnológicos en materia de vinificación, es relativa también en cuanto a la disponibilidad de recursos energéticos. Determinar obsoletas a unidades de producción de baja intensidad energética frente a unidades modernas de elevada demanda termo-energética no es sólo relativo sino inadecuado en el contexto energético, económico y productivo del mercado regional del vino. Esta especie de estigma aplicado sobre las infraestructuras de las bodegas de mediados de siglo pasado condiciona la reutilización de las mismas solo a vinos de baja calidad. Está demostrado en este estudio que el potencial de explotación productiva de estas unidades en la conservación de vinos de mayor calidad es significativo. La menor carga térmica de los casos representativos demanda sistemas de control térmico también menos intensivos desde el punto de vista de los recursos energéticos. Por ejemplo, los casos 1 y 4 pueden complementarse con sistemas geotérmicos –con recursos acuíferos subterráneos- para conservar el margen apropiado de rango térmico de conservación del vino. Dada la gran inercia térmica de estas unidades el proceso de enfriamiento del vino puede ser condicionado en el tiempo solamente a horas

de la noche, cuando la temperatura exterior desciende. Este acentuado refrescamiento nocturno puede complementarse con el sistema de control térmico para enfriar el agua utilizada en el día y promover nuevos ahorros energéticos.

En la práctica es común emplear indistintamente todas las unidades de conservación de una bodega, ya que los volúmenes de producción son ingentes y los productores acostumbran a rentar estas unidades a propietarios de bodegas. Esta demanda de vasijas de vinificación condiciona su uso a todas las capacidades disponibles, aún aquellas unidades no recomendadas desde el punto de vista térmico. Este factor productivo local influye en el detrimento de la calidad del vino. Una auditoría térmica previa de las unidades existentes contribuiría a que los vinos de mayor calidad reposen en vasijas de vinificación de elevada resistencia térmica y asistencia de un complemento geotérmico para los meses más extremos del año.

Por otra parte, se observa en la literatura referida a vinificación una adopción y difusión de estándares internacionales de rangos térmicos de conservación del vino, sin diferenciación entre zonas climáticas. Si bien se indica la calidad del producto perseguido, no se analizan las preexistencias ambientales del sistema en el cual se inserta la viña, el vino y la bodega. Sin duda esta adopción de rangos térmicos importados a la vinificación en zonas áridas-cálidas define productos globalizados desplazados de su potencial valor regional. Asimismo, se ha mencionado que las levaduras encargadas de la vinificación son seres vivos adaptados a las condiciones climáticas de su hábitat. Esto explica que en zonas frías y cálidas se encuentre la *vitis vinífera* y la vinificación. Sin embargo, estas bodegas que se ubican en áreas frías deben estimular la actividad de las levaduras, lo opuesto a lo que sucede en zonas cálidas en las cuales la vinificación se controla con frío. Este condicionante climático sugiere quizás un estudio sobre los casos de vinificación en zona árida, en búsqueda de procesos metabólicos y químicos del vino, adaptados a la región. Los resultados de este análisis podrían contribuir por una parte a la modificación de los rangos térmicos de conservación del vino difundidos por el mundo y por otra a una eficaz explotación de la infraestructura agro-industrial existente, en vistas a una disminución progresiva de la dependencia energética y a un crecimiento de la rentabilidad de la vinificación.

LISTADO DE SÍMBOLOS

A_s es la amplitud térmica de la superficie a una profundidad $z=0$ en $^{\circ}\text{C}$

a es la difusividad térmica del material, igual a $\lambda/\rho * C_p$, en m^2/seg

α_{fluido} es la difusividad térmica del fluido. Para el agua $0,14 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$

g es la constante gravitacional, igual a $6,673 * 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ Kg}/\text{seg}$

λ_{fluido} es la conductividad térmica, para el agua o vino que es igual a $0,6 \text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$

H es la altura de la vasija de vinificación

h_e coeficiente combinado de intercambio térmico superficial exterior [$\text{Wh}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$]

h_i coeficiente combinado de intercambio térmico superficial interior [$\text{Wh}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$]

K coeficiente de transmitancia térmica [$\text{Wh}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$]

Nu es el número adimensional de Nusselt o módulo adimensional de transferencia de calor por convección

Ra es el número adimensional de Rayleigh

Pr es el número adimensional de Prandtl

t es el tiempo, en días, donde cero es la medianoche del 31/12 y t_0 es la fase constante

T_m es el promedio anual de la temperatura de la tierra

V_{fluido} es la velocidad del aire en m/seg

ν_{fluido} es la viscosidad cinemática del fluido en m^2/seg

REFERENCIAS

- Assan, H.; Sancaktar, Y. (1998) Effects of walls thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 1998; 60: págs.159-66
- Bahadori M.; Fariborz, H. (1985) Weekly storage of coolness in heavy bricks and adobe walls. *Energy and Buildings* 1985; 8: págs. 259-70
- Cañas Guerrero, I.; Martín Ocaña, S. (2005) Study of thermal behaviour of traditional wine cellars: the case study of the area of Tierras Sorianas del Cid (Spain) *ELSEVIER, Renewable Energy* 30 (2005) págs. 43-55

- Çengel, Y. (2007) Transferencia de Calor y Masa. Editorial McGraw Hill. México DF, México.
- Colombié et al (2006) Modeling of Heat Transfer in Tanks during wine-making fermentation. Food Control (18), 2007, págs. 953-960
- Grilli, D. (2008) La imagen como patrimonio. Transformaciones de la industria vitivinícola de Mendoza (Argentina). Dominios da Imagen, Londrina, Año 2; N° 3; págs. 55-64.
- Blasco Lucas I., Hoesé L., Pontoriero D. (2007). Procedimiento “PROMEDI-HTL-V3” para análisis comparativos de mediciones higrotérmicas y lumínicas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11., pp. 08.01-08.06.
- INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN (1996) IRAM11603 Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura San Juan (INV, 2008) Listado de bodegas elaboradoras de San Juan.
- Labs, K. (1982) Regional Analysis of ground and underground climate conclusion. Underground Space (7) págs. 37-65.
- Larousse (2002) Larousse de los vinos. Barcelona, España.
- Manzzini, L. (2001) Caracterización y evolución de las técnicas constructivas de las bodegas desde 1850 hasta 1950 en Mendoza, Argentina.
- Mendoza, A. (2008) La enología tunning, tecnologías complicadas que deben ser razonadas. Reflexiones para los jóvenes enólogos. Revista Trece grados, págs 68-77.
- Mihalakakou, G. et al (1997) On the application of the energy balance equation to predict ground temperatura profiles. Solar Energy 1997; 60: págs.181-90
- Ministerio de la Producción de la Provincia de San Juan. Calidad San Juan (2010) Informe Final de la Planificación Estratégica de la cadena Productiva de Vinos Básicos en San Juan
- Oreglia, F. (1978) Enología Teórico-práctica, Capítulo XI Cualidades de las levaduras e influencia del medio. Ediciones Instituto Seliciano de Artes Gráficas, Buenos Aires. Págs.185-204.
- Simone, R. (2005) Compuestos Volátiles y el detrimento de la calidad del vino. El Vino y su industria. Año 4, número 36. págs. 35-40.
- Simone, R. (2005) Oxidación del vino, Impacto sobre las características organolépticas. El Vino y su Industria N° 33; págs 22-30.
- Simone, R.A.; (2005) La refrigeración y los fenómenos en el vino. El Vino y su Industria N°34, págs. 32-40.
- Unver; B.; Agen, C. (2003) Aplicación of heat transfer analysis for frozen food storage caverns. Tunnelling an Underground space Technology 2003; 18: págs. 7-17.

ABSTRACT: *This study determines the thermal-energy potential presenting underground configurations of winemaking units as elements of wine natural thermal control in un-favorable outside conditions. To determine the results a thermal monitoring sensors and thermal modeling of winemaking vessels is developed. Using this methodology is running a steady-state simulation of different morphological, situational, and material real cases, commonly used in wine conservation. Empirical results from monitoring and simulation confirm the passive potential of the up-ground against under-ground winemaking units.*

Key words: *winemaking, underground cellars, thermal-energy demand*