

5. Estudio Histológico y Comparativa

5.1. El hígado⁴

El hígado es la más grande de las glándulas y la víscera más voluminosa del organismo. Pera alrededor de 1.500 gramos y corresponde más o menos al 2,5% del peso corporal total del adulto. Está ubicado principalmente en la región del abdomen llamada hipocondrio derecho, aunque en parte, también se extiende un poco hacia el hipocondrio izquierdo, y está protegido por la parrilla costal.

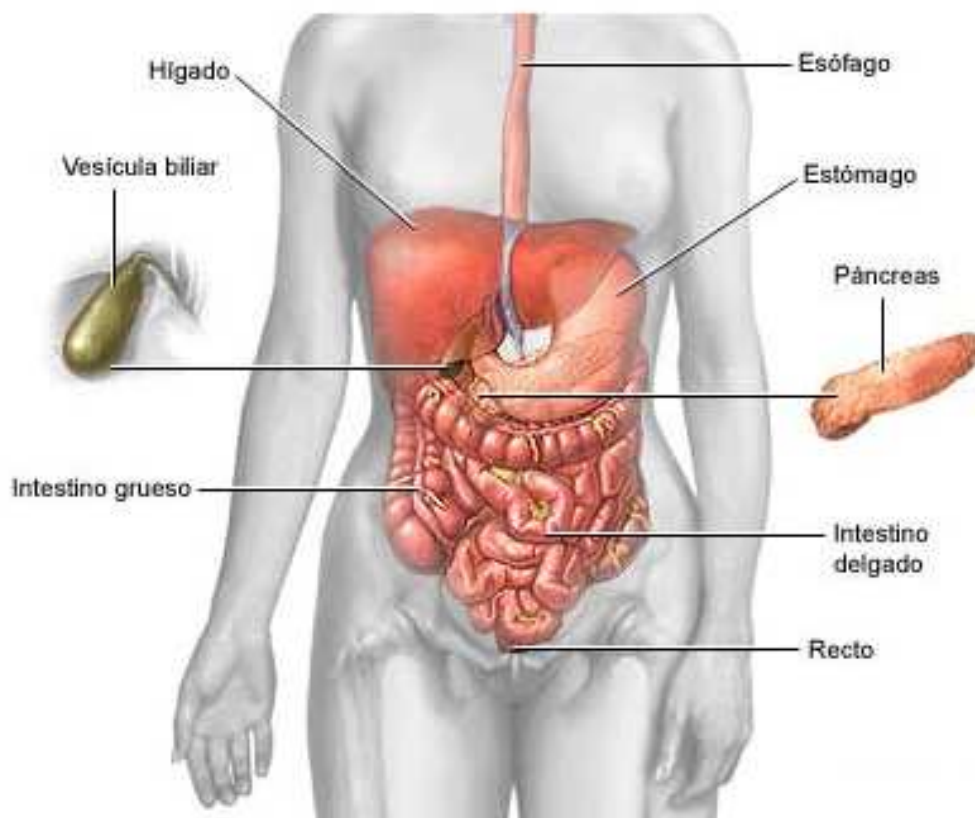


Fig. 5.1 – Situación del hígado en el cuerpo humano

⁴ Ref.: [3], [4], [9], [10], [21]

5.1.1. Estructura general del hígado

El hígado está revestido un por capsula de tejido conjuntivo fibroso (capsula de *Glisson*); una cubierta serosa (peritoneo visceral) rodea la capsula excepto donde la glándula se adhiere directamente al diafragma o a otros órganos.

El hígado está dividido anatómicamente por surcos profundos en dos lóbulos grandes (derecho e izquierdo) y en otros dos más pequeños (lóbulo cuadrado y lóbulo caudado o de *Spiegel*). Esta división anatómica solo tiene importancia topográfica porque relaciona los lóbulos hepáticos con otros órganos abdominales. La división en segmentos funcionales/quirúrgicos que corresponden a la irrigación sanguínea y el drenaje biliar tiene mayor importancia clínica.

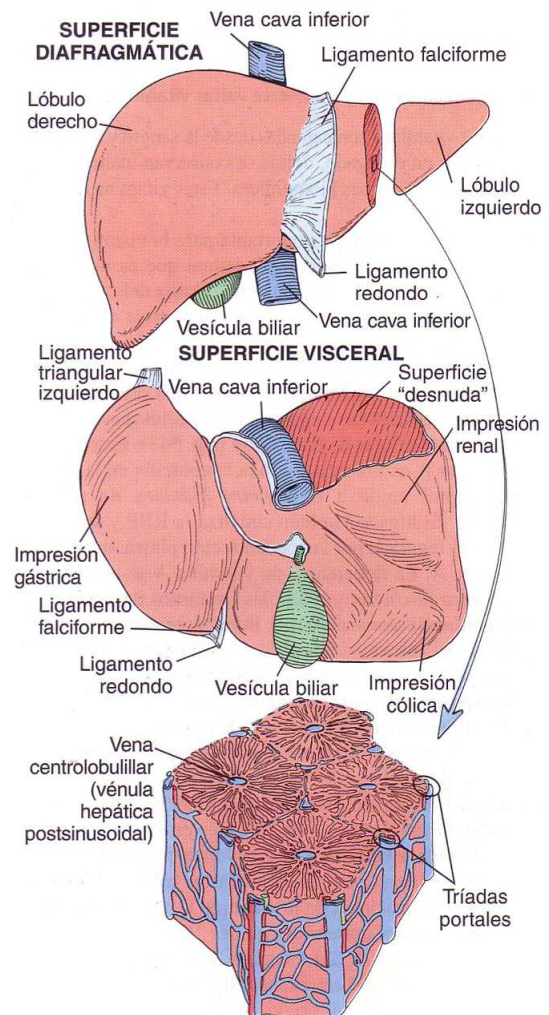


Fig. 5.2 – Estructura anatómica del hígado

5.1.2. Irrigación sanguínea del hígado

La gran cantidad de funciones que lleva a cabo el hígado son gracias a una irrigación singular y como la sangre es distribuida a los hepatocitos (célula propia del hígado). En el hígado hay una irrigación doble que tiene un componente venoso dado

por la vena porta y un componente arterial dado por la arteria hepática. Ambos vasos se introducen en el hígado a través del hilio o porta hepatis, el mismo sitio por el que salen las vías biliares y los vasos linfáticos.

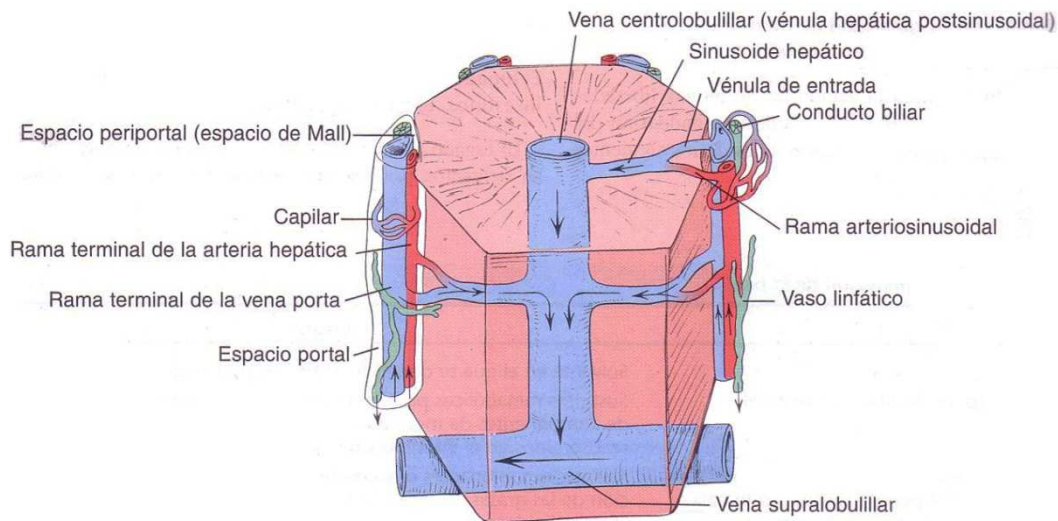


Fig. 5.3 – Irrigación sanguínea del hígado.

El hígado es singular entre los órganos porque recibe su irrigación principal (en torno al 75%) de la vena porta, que conduce sangre venosa con poca concentración de oxígeno. La sangre que llega al hígado con la vena porta proviene del tubo digestivo y de órganos abdominales importantes como el páncreas o el bazo.

Así, el hígado está interpuesto directamente en el trayecto de los vasos sanguíneos que transportan las sustancias absorbidas en el tubo digestivo. Si bien el hígado es el primero órgano en recibir sustratos metabólicos y sustancias nutritivas, también es el primero que está expuesto a los compuestos tóxicos que se han absorbido.

La arteria hepática, que es una rama del tronco celiaco, lleva sangre oxigenada al hígado y provee el 25% restante de su irrigación. Como la sangre de las dos fuentes se

mezcla junto antes de perfundir los hepatocitos del parénquima hepático, estos nunca quedan expuestos a una sangre oxigenada por completo.

Dentro del hígado, las ramas de distribución de la vena porta y de la arteria hepática (que entregan sangre a los capilares sinusoidales o sinusoides que irrigan los hepatocitos) y las ramas de drenaje de la vía biliar (que desembocan en el conducto hepático común) transcurren juntas en lo que se ha dado en llamar triada portal. Aunque es una denominación conveniente, en realidad no es estrictamente correcta, porque siempre hay vasos linfáticos eferentes y filetes nerviosos que transcurren con la vena, la arteria y el conducto biliar.

Los sinusoides están en íntimo contacto con los hepatocitos y sirven para el intercambio de sustancias entre la sangre y las células hepáticas. Estos sinusoides desembocan en una vena central o centrolobulillar (vénula hepática postsinusoidal) que a su vez drena en las venas supralobulillares. La sangre abandona el hígado a través de las venas suprahepáticas, que desembocan en la vena cava inferior.

5.2. El riñón⁵

El riñón es uno de los órganos que compone el aparato urinario (junto a los uréteres, la vejiga y la uretra).

Como los pulmones y el hígado, los riñones recuperan componentes esenciales y eliminan los desechos. Conservan agua, electrolitos esenciales y metabolitos y eliminan del organismo ciertos productos de desecho del metabolismo. Los riñones desempeñan

⁵ Ref.: [3], [4], [9], [19]

un papel importante en la regulación y el mantenimiento de la composición y el volumen del líquido extracelular. También son indispensables para mantener el equilibrio ácido-base porque excretan iones hidrogeno cuando los líquidos corporales se toman demasiado ácidos o excretan bicarbonato cuando estos líquidos se tornan demasiado alcalinos.

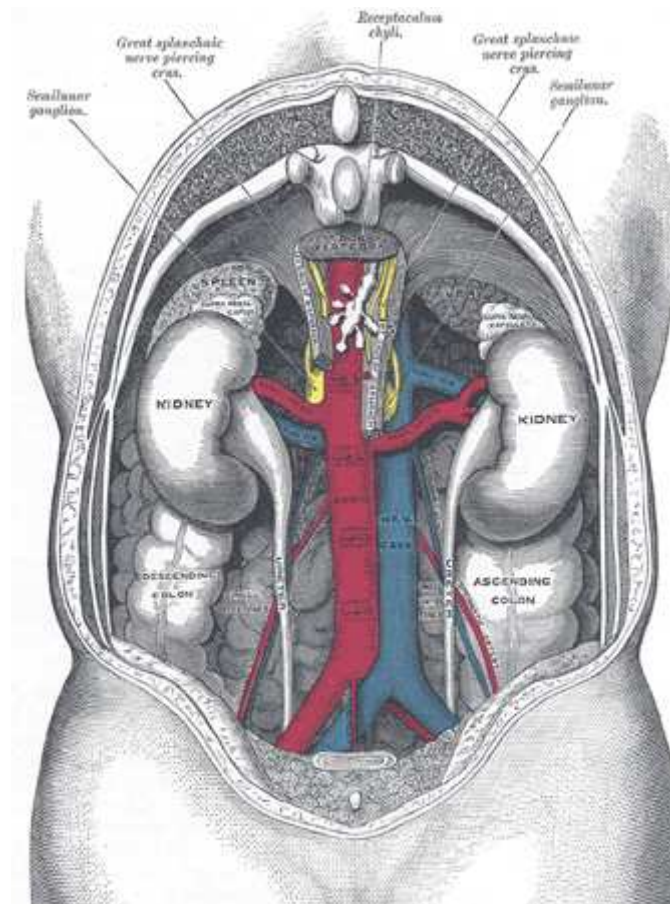


Fig. 5.4 – Ubicación de los riñones en el cuerpo humano

Los riñones son órganos muy vascularizados que reciben aproximadamente el 25 del volumen minuto cardiaco. Producen la orina, que en un principio es un ultrafiltrado de la sangre que luego las células renales modifican por reabsorción selectiva y

secreción específica. La orina definitiva es conducida por los uréteres hacia la vejiga urinaria, donde se almacena hasta que se elimina a través de la uretra.

La orina definitiva contiene agua y electrolitos, así como productos de desecho, como urea, ácido úrico y creatinina y productos de la degradación de diversas sustancias.

Los riñones también funcionan como órganos endocrinos:

- Sintetiza y segrega la hormona glucoproteica eritropoyetina, que regula la formación de los eritrocitos (eritropoyetina) en respuesta a una disminución de las concentraciones de oxígeno en la sangre.
- Sintetiza y segrega la proteasa ácida renina, una enzima que participa en el control de la tensión arterial y del volumen sanguíneo.
- Hidroxilación del 25-OH vitamina D, un precursor esteroide producido en el hígado, hacia su forma hormonal activa 1, 25-(OH)₂ vitamina D₃.

5.2.1. Estructura general del riñón

Los riñones son órganos grandes, rojizos, con forma de habichuela que están situados en el retroperitoneo a ambos lados de la columna vertebral. Se extienden desde la duodécima vértebra torácica hasta la tercera vértebra lumbar y el riñón derecho está ubicado apenas más alto que el izquierdo. Cada riñón mide más o menos 12 cm. De largo por 6 cm. De ancho (del borde cóncavo al convexo) por 3 cm. De espesor. En el polo superior de cada riñón, incluida dentro de la fascia renal y de una gruesa capa protectora de tejido adiposo perirrenal, hay una glándula suprarrenal. El borde medial

del riñón es cóncavo y posee una incisura vertical profunda, denominada hilio, que permite la entrada y salida de los vasos y nervios renales y contiene el segmento inicial del uréter (dilatado a la manera de un embudo) llamado pelvis renal. Un corte frontal del riñón permite ver la relación entre estas estructuras tal como aparecen justo por dentro del hilio en un espacio conocido como seno renal.

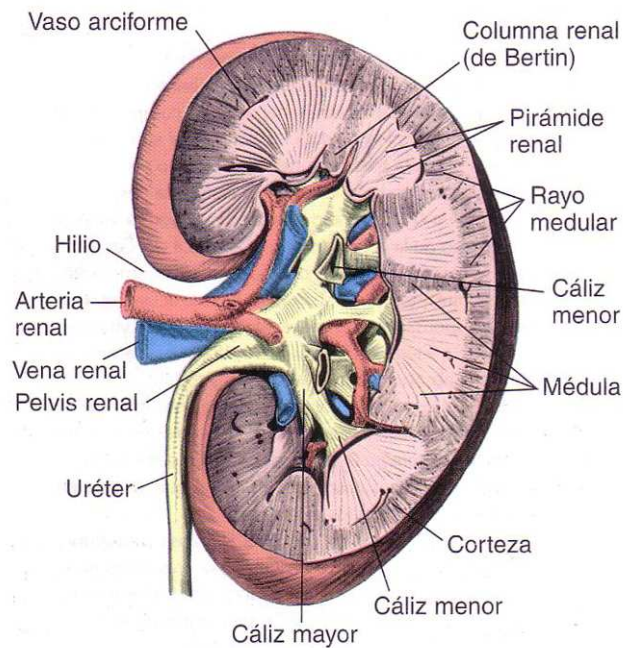


Fig. 5.5 – Diagrama de la estructura del riñón humano

La superficie del riñón está cubierta por una capsula de tejido conjuntivo. La capsula posee dos capas bien definidas: una capa externa de fibroblastos y fibras colágenas y una capa interna con un componente celular de miofibroblastos. La contractilidad de los miofibroblastos contribuiría a resistir las variaciones de presión y volumen que puedan acompañar las variaciones de la función renal. No obstante, su papel específico se desconoce. La capsula se introduce a la altura del hilio para formar la cubierta de tejido conjuntivo del seno y se continua con el conjuntivo que forma las paredes de los cálices renales y la pelvis renal.

El examen a simple vista de la superficie de corte de un riñón hemiseccionado permite comprobar que su sustancia está dividida en dos regiones bien definidas: corteza (parte externa pardo rojiza) y medula (parte interna mucho mas pálida). Aproximadamente el 90-95 % de la sangre que pasa por los riñones está en la corteza, y solo en torno al 5-10% está en la medula.

La corteza está compuesta por los corpúsculos renales, junto con los túbulos contorneados y rectos de la nefrona, los conductos colectores y una extensa red vascular. La nefrona es la unidad funcional básica del riñón. Los corpúsculos renales son estructuras esferoidales apenas visibles a simple vista. Constituyen el segmento inicial de la nefrona y poseen una red capilar singular denominada glomérulo.

El examen de un corte a través de la corteza que sea perpendicular a la superficie del riñón, deja ver una serie de estriaciones verticales que parecen irradiarse desde la medula. Estas estriaciones parecen emanar como rayos desde la medula. Desde la medula hacia la corteza se proyectan en torno a 400-500 rayos medulares.

Cada rayo medular contiene túbulos rectos de las nefronas y conductos colectores. Las regiones situadas entre los rayos medulares contienen los corpúsculos renales, los túbulos contorneados de las nefronas y los túbulos colectores. Estas regiones se conocen como laberintos corticales. Cada nefrona con su túbulo colector (que se comunica con un conducto colector en el rayo medular) forma un túbulo urínífero.

Los túbulos rectos de las nefronas y los conductos colectores continúan de la corteza a la médula. Están acompañados por una red capilar, los vasos rectos, de

disposición paralela a los diversos túbulos. Estos vasos forman la parte vascular del sistema intercambiador de contracorriente que regula la concentración de la orina.

Los túbulos de la medula, a causa de su distribución y sus diferencias de longitud, en conjunto forman varias estructuras cónicas llamadas pirámides renales o medulares (de *Malpighi*). Por lo general en el riñón humano hay entre 8 y 12 pirámides, pero puede haber hasta 18. Las bases de las pirámides están orientadas hacia la corteza, mientras que sus vértices apuntan hacia el seno renal. Cada pirámide está dividida en una zona externa o medula externa (contigua a la corteza) y una zona interna o medula interna. La medula externa se subdivide a su vez en una franja interna y una franja externa. Esta división en zonas y franjas se ve bien en los cortes sagitales de las pirámides de especímenes frescos. Son un reflejo de la ubicación de las distintas partes de la nefrona en diferentes alturas específicas dentro de las pirámides renales.

Los casquetes de tejido cortical que hay sobre las pirámides se extienden alrededor de las caras laterales de éstas para formar las columnas renales (de *Betin*). Aunque contienen los mismos componentes que el resto del tejido cortical, las columnas renales se consideran una parte de la medula. En efecto, la cantidad de tejido cortical es tan abundante que “se derrama” por los lados de la pirámide como si fuera una gran bola de helado sobre un cucurucho que sobresale de sus bordes y entra en contacto con la superficie lateral.

El vértice de cada pirámide, llamado papila, se proyecta dentro de un cáliz menor, que es una extensión con forma de copa de la pelvis renal. La punta de la papila, también conocida como área cribosa, está perforada por los orificios de desembocadura de los conductos colectores. Los cálices menores son ramificaciones de los dos o tres cálices mayores, que a su vez son las divisiones principales de la pelvis renal.

Cada pirámide medular y el tejido cortical asociado con su base y lados (la mitad de cada columna renal contigua) constituyen un lóbulo del riñón.

Los lóbulos renales se subdividen en lobulillos que están formados por un rayo medular central y el tejido cortical circundante. Aunque el centro o eje del lobulillo es fácil de identificar, los límites entre lobulillos contiguos no están marcados de manera nítida por tabiques de tejido conjuntivo. El concepto de lobulillo tiene un fundamento fisiológico importante; el rayo medular que contiene el conducto colector de un grupo de nefronas que drenan en éste constituye la unidad secretora renal. Ésta es el equivalente de un lobulillo o unidad secretora glandular.

La nefrona es la unidad estructural y funcional fundamental del riñón. Cada riñón humano contiene alrededor de 2 millones de nefronas. Las nefronas tienen a su cargo la producción de la orina y son el equivalente de la porción secretora de otras glándulas. Los conductos colectores realizan la concentración definitiva de la orina y son análogos de los conductos excretores de las glándulas exocrinas que modifican la composición del producto de secreción. A diferencia de lo que ocurre con las glándulas exocrinas típicas, en las cuales las porciones secretora y excretora surgen de un solo brote epitelial, las nefronas y sus túbulos colectores se originan desde promordios diferentes y posteriormente se conectan.

5.2.2. Irrigación sanguínea del riñón

Cada riñón recibe una rama colateral de la aorta abdominal que recibe el nombre de arteria renal. La arteria renal se ramifica dentro del seno renal en las arterias interlobulares, que se introducen en el parénquima del riñón. Las arterias interlobulares

transcurren entre las pirámides hasta la corteza y luego se curvan para seguir un trayecto arqueado a lo largo de la base de la pirámide entre la medula y la corteza. En consecuencia, estas arterias interlobulares se designan arterias arciformes.

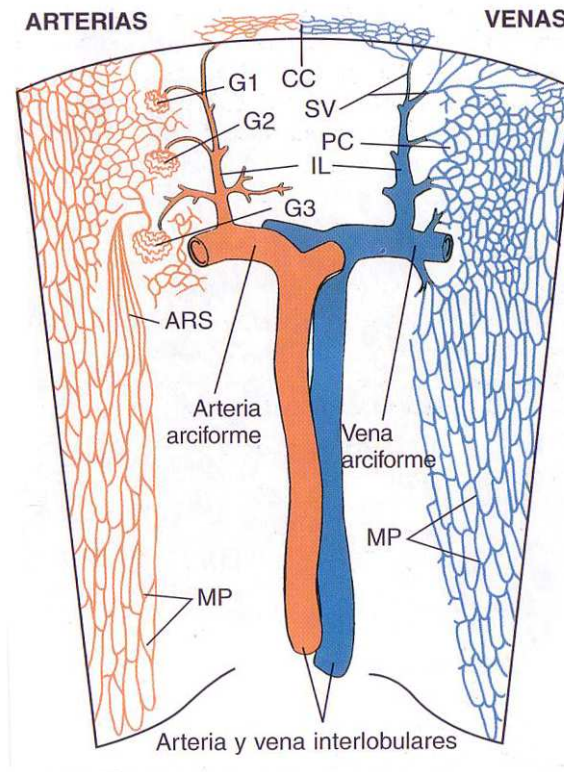


Fig. 5.6 – Irrigación sanguínea renal

Las arterias interlobulillares son ramificaciones de la arterias arciformes que ascienden a través de la corteza hacia la capsula. Aunque los límites entre los lóbulos no son nítidos, las arterias interlobulillares, cuando están incluidas en un corte perpendicular al vaso, aparecen ubicadas a medio camino entre rayos medulares contiguos que están en el laberinto cortical. A medida que atraviesan la corteza hacia la capsula, las arterias interlobulillares emiten ramas llamadas arteriolas aferentes, una para cada glomérulo. Una arteriola aferente individual puede originarse directamente de una arteria intelobulillar o un tronco común derivado de ésta puede ramificarse para

formar varias arteriolas aferentes. Algunas arterias interlobulillares terminan cerca de la periferia de la corteza mientras que tras se introducen en la capsula renal para proveerle de su irrigación.

Las arteriolas aferentes dan origen a los capilares que forman el glomérulo. Los capilares glomerulares se reúnen para formar una arteriola eferente que a su vez da origen a una segunda red capilar, los capilares peritubulares. La distribución de estos capilares es diferente según provengan de glomérulos corticales o glomérulos yuxtamedulares.

- Las arteriolas aferentes de los glomérulos corticales dan origen a una red capilar peritubular que rodea los túbulos uriníferos locales.
- Las arteriolas eferentes de los glomérulos yuxtamedulares descienden hacia el interior de la médula a lo largo del asa de *Henle* y se subdivide en vasos más pequeños que continúan hacia el vértice de la pirámide pero describen asas a diversas alturas para retornar en la forma de vasos rectos hacia la base de la pirámide. Así, las arteriolas eferentes de los glomérulos yuxtamedulares dan origen a los vasos rectos que participan en el sistema intercambiador de contracorriente y a su red capilar peritubular.

En el riñón, el flujo venoso en general sigue el trayecto inverso del flujo arterial y las venas transcurren paralelas a las arterias correspondientes. Por tanto:

- Los capilares corticales peritubulares drenan en las venas interlobulillares, que a su vez drenan en las venas arciformes, las venas interlobulares y, por último, la vena renal.

- La red vascular medular drena en las venas arciformes y así sucesivamente.
- Los capilares peritubulares cercanos a la superficie del riñón y los capilares de la capsula drenan en venas estrelladas, que a su vez drenan en las venas interlobulillares y así sucesivamente.

5.3. El corazón⁶

El corazón es el músculo más fuerte del cuerpo. Late unas 100.000 veces al día. Pesa menos de 450 gramos y bombea la sangre por unos 95.000 Km. de vasos sanguíneos.

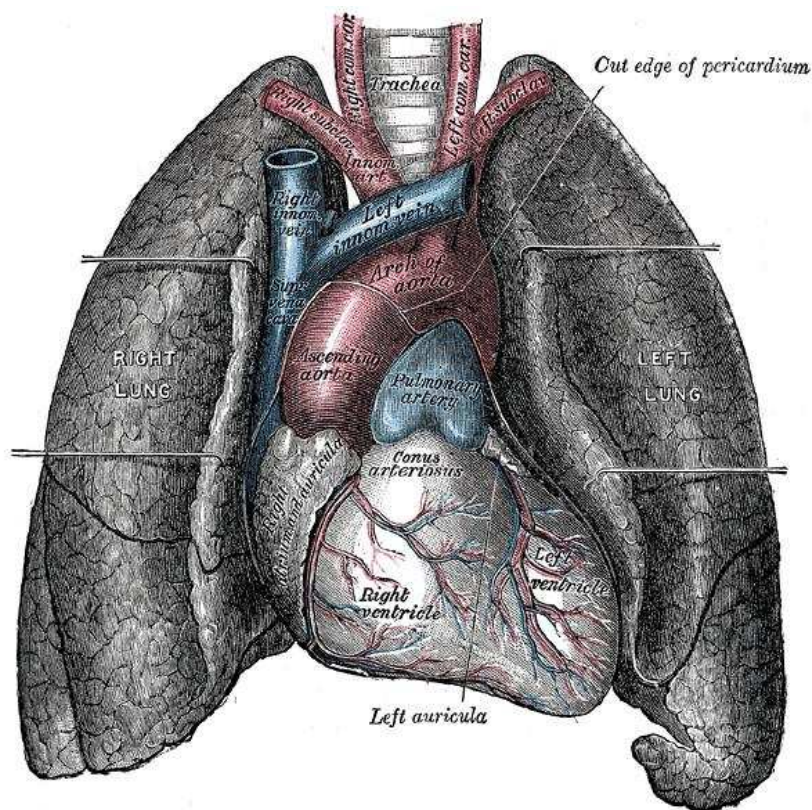


Fig. 5.7 – Ubicación del corazón en el cuerpo humano

⁶ [3], [4], [8], [9], [20]

El corazón está situado prácticamente en medio del tórax, entre los dos pulmones, encima del diafragma y por delante de la columna vertebral torácica. Se separa de las vertebrae por el esófago y la aorta hacia su izquierda. Está situado detrás del esternón, separado del mismo y de la parrilla por el musculo triangular del esternón. El corazón se fija en esta situación por medio de los grandes vasos que salen y llegan a él. Su volumen varía según el género y la edad. Tradicionalmente se ha comparado el volumen del corazón con el de un puño, pero cambia considerablemente dependiendo de si el corazón está en sístole o en diástole. El volumen total varía de 500 a 800 mililitros, siendo más importante el volumen de eyección del ventrículo izquierdo. Su peso ronda los 275 gramos en el hombre y 250 gramos en la mujer.

5.3.1. Estructura general del corazón

Al igual que todos los órganos del cuerpo, el corazón necesita un suministro de sangre para el aporte de oxígeno. No puede obtener oxígeno de la sangre contenida en sus cámaras dado que pasa a través de ellas rápidamente y a una presión muy elevada. En su lugar, el músculo que constituye la pared del corazón, el miocardio, recibe sangre oxigenada de un sistema de pequeñas arterias que se ramifica desde la aorta. Estas arterias se denominan coronarias. Cruzan sobre la superficie del corazón, dividiéndose y enviando diminutos ramos al músculo del corazón. Las dos arterias coronarias no son más anchas que una pajita de refresco. La arteria coronaria derecha rodea el borde inferior y la parte posterior del corazón como una corona. De ahí viene el nombre de coronaria. Esta arteria suministra sangre al grueso músculo del ventrículo derecho. Por

otro lado, la arteria coronaria izquierda se divide en dos grandes ramos, que suministran sangre al resto del corazón.

Desde los grandes vasos coronarios salen ramos menores, los capilares, que se dividen y se insertan en el músculo del corazón, suministrando los nutrientes necesarios.

El corazón está formado por:

- Una componente de musculo estriado cardiaco cuya contracción impulsa la sangre.
- Un esqueleto fibroso que consiste en cuatro anillos fibrosos alrededor de los orificios valvulares, dos trígonos fibrosos para conectar los anillos y la porción membranosa de los tabiques interauricular e interventricular.

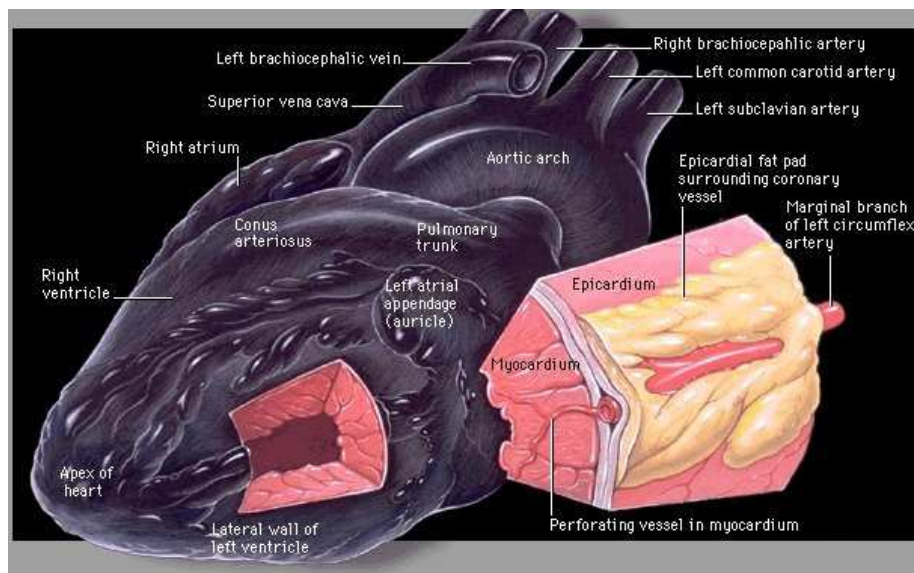


Fig. 5.9 – Ubicación del miocardio en la estructura del corazón

A su vez, la pared cardiaca está compuesta de tres capas:

- Epicardio: una capa de células mesoteliales en la superficie externa del corazón y su tejido conjuntivo subyacente.
- Endocardio: una capa interna de endotelio y tejido conjuntivo subendotelial, una capa media de tejido conjuntivo y células musculares lisas y una capa externa de tejido conjuntivo (capa subendocárdica).
- Miocardio: formado por musculo cardiaco, el componente principal del corazón.

5.3.2. Irrigación sanguínea del corazón

El corazón posee cuatro cavidades (las aurículas derecha e izquierda y los ventrículos derecho e izquierdo) a través de las cuales es bombeada la sangre. A la salida de las cavidades hay válvulas que impiden el flujo retrógrado de la sangre. Un tabique interauricular y un tabique interventricular separan los lados derecho e izquierdo del corazón.

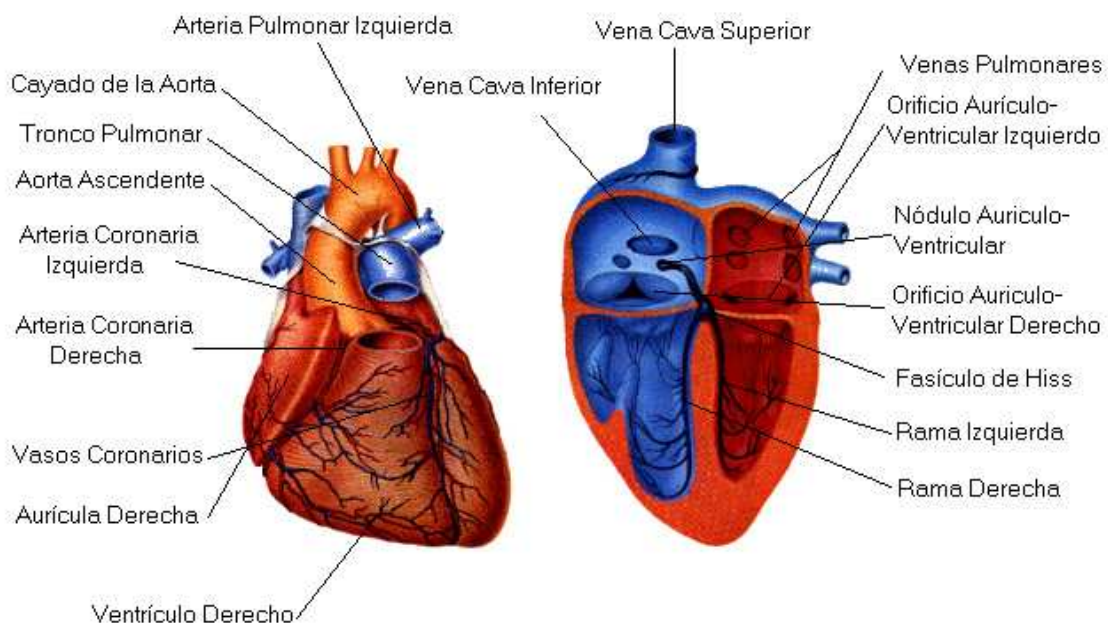


Fig. 5.8 – Estructura del corazón humano

La aurícula derecha recibe sangre desoxigenada que retorna del cuerpo a través de las venas cavas superior e inferior, las dos venas más grandes de todo el organismo. El ventrículo derecho recibe la sangre desde la aurícula derecha y la bombea hacia los pulmones para su oxigenación a través de las arterias pulmonares.

La aurícula izquierda recibe la sangre oxigenada que retorna desde los pulmones a través de las cuatro venas pulmonares. El ventrículo izquierdo recibe la sangre desde la aurícula izquierda y la bombea hacia la aorta para su distribución en el circuito sistémico.

5.4. Simulaciones⁷

El proyecto original desarrollaba una simulación para el musculo cardiaco humano. En esta ocasión vamos a realizar simulaciones con el miocardio, la glandula hepática y la medula renal, realizando una comparación directa con los resultados obtenidos. Para ello seleccionaremos fotografías del mismo tamaño, con parámetros de simulación idénticos (variando únicamente las propiedades físicas de los materiales). A su vez, realizaremos tres simulaciones con cada órgano, variando la velocidad de enfriamiento.

5.4.1. Selección de los parámetros

Lo primero que necesitamos son las imágenes a tratar. Para ello se han seleccionado las siguientes:

⁷ Ref.: [7], [8], [13], [14]

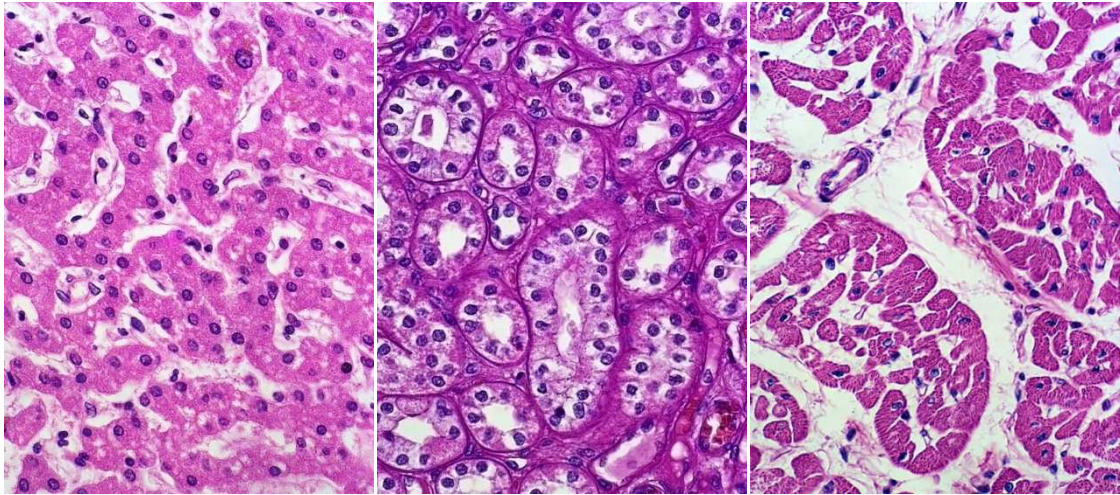


Fig. 5.10 – Histologías de hígado (1ª), corteza renal (2ª) y miocardio (3ª)

Tras un procesamiento digital de las mismas llegamos a las siguientes imágenes que serán usadas para las simulaciones:

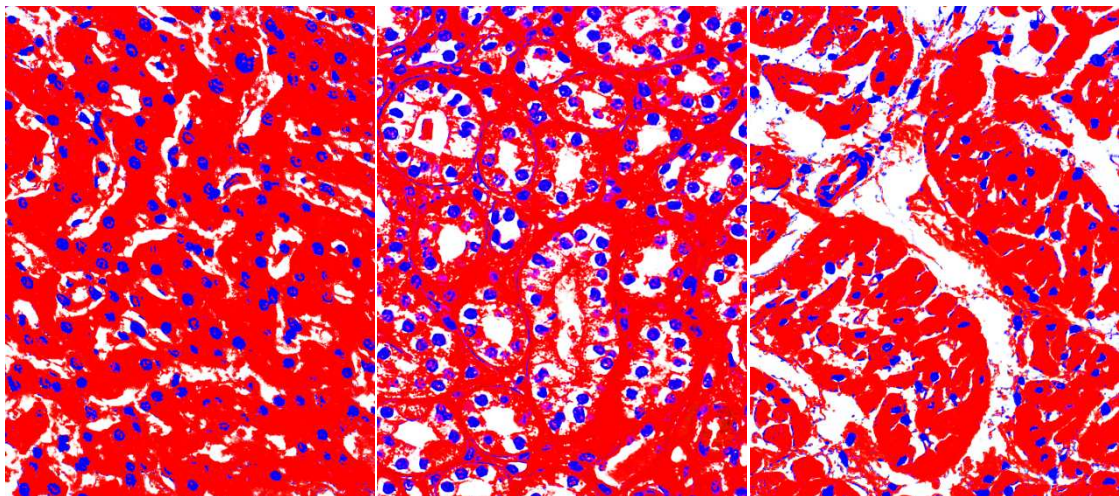


Fig. 5.11 – Histologías de hígado (1ª), corteza renal (2ª) y miocardio (3ª) tratadas digitalmente

A partir de los tamaños reales de estas fotografías y sus resoluciones podemos calcular el tamaño real que ocupa una subestructura. Como vamos a usar los mismos parámetros de resolución y el tamaño de las tres fotografías es el mismo, este dato será

idéntico para todas las simulaciones. Las fotografías tienen un tamaño de 0.0001405 m. x 0.0001875 m. y vamos a trabajar con 6x8 subestructuras. Nos resulta un tamaño de subestructura de 0.000023425 m. Los siguientes datos que necesitamos son los parámetros de los materiales de los distintos componentes que forman los órganos. Así tenemos la siguiente tabla:

Material \ Parámetro	Conductividad Térmica	Densidad	Capacidad Calorífica	Velocidad
Miocardio	0.533	1100	3712	0
Riñón	0.539	1022	3600	0
Hígado	0.511	1002	3620	0
Tejido Conjuntivo	0.570	1050	3920	0
Capilar/crioprotector	0.627	1000	4180	1

Fig. 5.12 – Tabla de parámetros de los materiales a una temperatura de 36° C

Impondremos condiciones de contornos adiabáticas para los cuatro márgenes de las fotografías. Estableceremos una temperatura inicial de 36°C, tanto para las subestructuras, como para el líquido crioprotector. Las imágenes son redimensionadas a una resolución de 60x80 pixeles (para un calculo más eficientemente).

Las velocidades de enfriamiento que hemos seleccionado son -0,2° C/s, -0,4° C/s y -0,8° C/s. Nuestra intención es llegar a los -10°C, por lo que seleccionaremos unos intervalos de simulación de 240 s, 120 s y 60 s respectivamente.

5.4.2. Resultados de las simulaciones

Tras la realización de las simulaciones, se han extraído una serie de datos mediante los cuales se alcanzaran una serie de conclusiones. En primer lugar se muestran las tablas con los datos numéricos. Posteriormente se han generado unas graficas a partir de estos datos. En el siguiente apartado estos datos serán utilizados para alcanzar las conclusiones finales del estudio comparativo.

5.4.2.1. Tablas con los resultados numéricos

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	36,000	36,000	36,000
1	35,985	35,982	35,976
2	35,959	35,951	35,935
3	35,925	35,909	35,881
4	35,881	35,857	35,814
5	35,830	35,796	35,736
6	35,772	35,727	35,649
8	35,636	35,566	35,451
10	35,478	35,380	35,225
15	34,996	34,823	34,569
20	34,417	34,164	33,816
25	33,762	33,430	32,998
30	33,046	32,639	32,133
35	32,282	31,804	31,235
40	31,478	30,936	30,312
80	24,253	23,394	22,543
120	16,462	15,494	14,582
160	8,523	7,521	6,591
200	0,542	-0,470	-1,406
240	-7,451	-8,468	-9,406

Fig. 5.13 – Tabla de valores de la temperatura media en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	36,000	36,000	36,000
1	35,970	35,964	35,952
2	35,919	35,903	35,871
3	35,850	35,819	35,762
4	35,763	35,715	35,628
5	35,661	35,593	35,473
6	35,545	35,454	35,299
8	35,273	35,133	34,903
10	34,956	34,761	34,451
15	33,993	33,646	33,138
20	32,835	32,328	31,633
25	31,525	30,860	29,996
30	30,093	29,278	28,267
35	28,565	27,609	26,470
40	26,957	25,873	24,624
80	12,507	10,788	9,087
120	-3,075	-5,011	-6,834

Fig. 5.14 – Tabla de valores de la temperatura media en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	36,000	36,000	36,000
1	35,941	35,929	35,905
2	35,839	35,807	35,743
3	35,700	35,639	35,524
4	35,526	35,430	35,256
5	35,322	35,186	34,946
6	35,090	34,909	34,598
8	34,547	34,267	33,806
10	33,912	33,522	32,903
15	31,986	31,293	30,276
20	29,670	28,657	27,266
25	27,050	25,721	23,993
30	24,187	22,557	20,534
35	21,130	19,219	16,941
40	17,915	15,746	13,249
60	3,972	1,013	-2,080

Fig. 5.15 – Tabla de valores de la temperatura media en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	-0,0150	-0,0180	-0,0240
2	-0,0260	-0,0310	-0,0410
3	-0,0340	-0,0420	-0,0540
4	-0,0440	-0,0520	-0,0670
5	-0,0510	-0,0610	-0,0780
6	-0,0580	-0,0690	-0,0870
8	-0,0680	-0,0805	-0,0990
10	-0,0790	-0,0930	-0,1130
15	-0,0964	-0,1114	-0,1312
20	-0,1158	-0,1318	-0,1506
25	-0,1310	-0,1468	-0,1636
30	-0,1432	-0,1582	-0,1730
35	-0,1528	-0,1670	-0,1796
40	-0,1608	-0,1736	-0,1846
80	-0,1806	-0,1886	-0,1942
120	-0,1948	-0,1975	-0,1990
160	-0,1985	-0,1993	-0,1998
200	-0,1995	-0,1998	-0,1999
240	-0,1998	-0,2000	-0,2000

Fig. 5.16 – Tabla de valores de la pendiente de la temperatura media en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	-0,0300	-0,0360	-0,0480
2	-0,0510	-0,0610	-0,0810
3	-0,0690	-0,0840	-0,1090
4	-0,0870	-0,1040	-0,1340
5	-0,1020	-0,1220	-0,1550
6	-0,1160	-0,1390	-0,1740
8	-0,1360	-0,1605	-0,1980
10	-0,1585	-0,1860	-0,2260
15	-0,1926	-0,2230	-0,2626
20	-0,2316	-0,2636	-0,3010
25	-0,2620	-0,2936	-0,3274
30	-0,2864	-0,3164	-0,3458

35	-0,3056	-0,3338	-0,3594
40	-0,3216	-0,3472	-0,3692
80	-0,3612	-0,3771	-0,3884
120	-0,3896	-0,3950	-0,3980

Fig. 5.17 – Tabla de valores de la pendiente de la temperatura media en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	-0,0590	-0,0710	-0,0950
2	-0,1020	-0,1220	-0,1620
3	-0,1390	-0,1680	-0,2190
4	-0,1740	-0,2090	-0,2680
5	-0,2040	-0,2440	-0,3100
6	-0,2320	-0,2770	-0,3480
8	-0,2715	-0,3210	-0,3960
10	-0,3175	-0,3725	-0,4515
15	-0,3852	-0,4458	-0,5254
20	-0,4632	-0,5272	-0,6020
25	-0,5240	-0,5872	-0,6546
30	-0,5726	-0,6328	-0,6918
35	-0,6114	-0,6676	-0,7186
40	-0,6430	-0,6946	-0,7384
60	-0,6972	-0,7367	-0,7665

Fig. 5.18 – Tabla de valores de la pendiente de la temperatura media en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0102	0,0108	0,0111
2	0,0194	0,0206	0,0200
3	0,0278	0,0291	0,0273
4	0,0355	0,0367	0,0334
5	0,0425	0,0435	0,0387
6	0,0489	0,0496	0,0432

8	0,0607	0,0605	0,0510
10	0,0712	0,0703	0,0576
15	0,0953	0,0933	0,0734
20	0,1192	0,1176	0,0912
25	0,1446	0,1442	0,1120
30	0,1713	0,1725	0,1351
35	0,1987	0,2016	0,1593
40	0,2261	0,2304	0,1836
80	0,4006	0,4066	0,3229
120	0,4851	0,4849	0,3735
160	0,5191	0,5139	0,3884
200	0,5319	0,5240	0,3926
240	0,5365	0,5274	0,3938

Fig. 5.19 – Tabla de valores de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0204	0,0217	0,0222
2	0,0389	0,0411	0,0400
3	0,0557	0,0583	0,0546
4	0,0709	0,0734	0,0669
5	0,0849	0,0870	0,0773
6	0,0979	0,0992	0,0864
8	0,1213	0,1211	0,1019
10	0,1424	0,1406	0,1153
15	0,1906	0,1865	0,1469
20	0,2385	0,2351	0,1823
25	0,2892	0,2884	0,2239
30	0,3426	0,3451	0,2701
35	0,3974	0,4031	0,3186
40	0,4522	0,4607	0,3671
80	0,8013	0,8132	0,6458
120	0,9702	0,9697	0,7468

Fig. 5.20 – Tabla de valores de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0409	0,0434	0,0444
2	0,0779	0,0823	0,0801
3	0,1113	0,1165	0,1093
4	0,1419	0,1468	0,1338
5	0,1699	0,1739	0,1547
6	0,1958	0,1985	0,1729
8	0,2426	0,2421	0,2038
10	0,2848	0,2812	0,2306
15	0,3812	0,3731	0,2938
20	0,4771	0,4702	0,3647
25	0,5785	0,5768	0,4477
30	0,6852	0,6901	0,5402
35	0,7948	0,8062	0,6372
40	0,9044	0,9214	0,7341
60	1,3031	1,3309	1,0698

Fig. 5.21 – Tabla de valores de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0102	0,0108	0,0111
2	0,0092	0,0098	0,0089
3	0,0084	0,0085	0,0073
4	0,0077	0,0076	0,0061
5	0,0070	0,0068	0,0053
6	0,0064	0,0061	0,0045
8	0,0059	0,0055	0,0039
10	0,0053	0,0049	0,0033
15	0,0048	0,0046	0,0032
20	0,0048	0,0049	0,0036
25	0,0051	0,0053	0,0042
30	0,0053	0,0057	0,0046
35	0,0055	0,0058	0,0048
40	0,0055	0,0058	0,0049

80	0,0044	0,0044	0,0035
120	0,0021	0,0020	0,0013
160	0,0009	0,0007	0,0004
200	0,0003	0,0003	0,0001
240	0,0001	0,0001	0,0000

Fig. 5.22 – Tabla de valores de la pendiente de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0204	0,0217	0,0222
2	0,0185	0,0194	0,0178
3	0,0168	0,0172	0,0146
4	0,0152	0,0151	0,0123
5	0,0140	0,0136	0,0104
6	0,0130	0,0122	0,0091
8	0,0117	0,0110	0,0078
10	0,0106	0,0098	0,0067
15	0,0096	0,0092	0,0063
20	0,0096	0,0097	0,0071
25	0,0101	0,0107	0,0083
30	0,0107	0,0113	0,0092
35	0,0110	0,0116	0,0097
40	0,0110	0,0115	0,0097
80	0,0087	0,0088	0,0070
120	0,0042	0,0039	0,0025

Fig. 5.23 – Tabla de valores de la pendiente de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

Instante de Tiempo (s)	Corazón(°C)	Hígado (°C)	Riñón (°C)
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0409	0,0434	0,0444
2	0,0370	0,0389	0,0357
3	0,0334	0,0342	0,0292
4	0,0306	0,0303	0,0245

5	0,0280	0,0271	0,0209
6	0,0259	0,0246	0,0182
8	0,0234	0,0218	0,0155
10	0,0211	0,0196	0,0134
15	0,0193	0,0184	0,0126
20	0,0192	0,0194	0,0142
25	0,0203	0,0213	0,0166
30	0,0213	0,0227	0,0185
35	0,0219	0,0232	0,0194
40	0,0219	0,0230	0,0194
60	0,0199	0,0205	0,0168

Fig. 5.24 – Tabla de valores de la pendiente de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos para una velocidad de enfriamiento de $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

5.4.2.2. Gráficas obtenidas

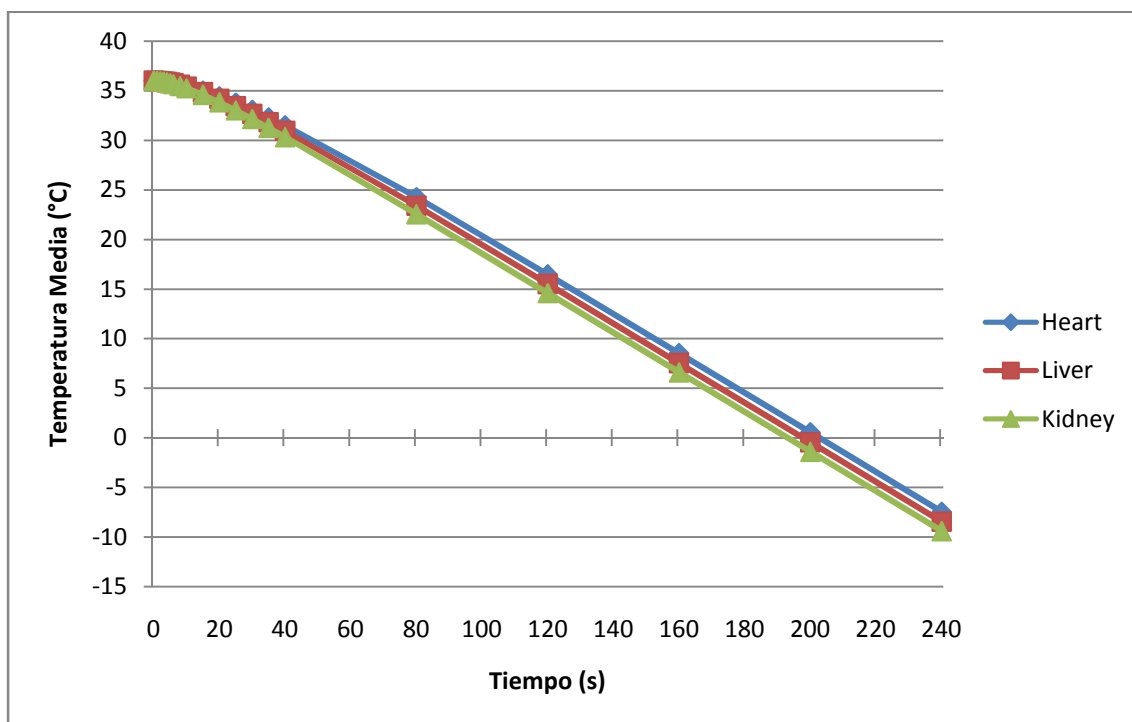


Fig. 5.25 – Gráfica de la temperatura media en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

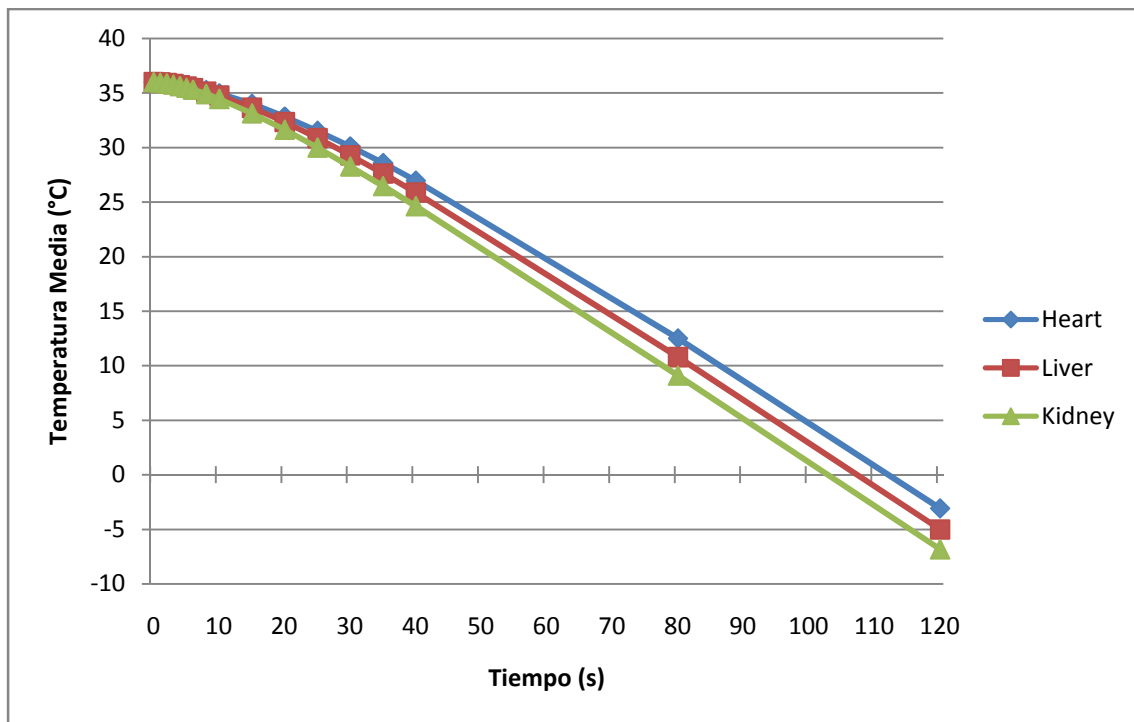


Fig. 5.26 – Gráfica de la temperatura media en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

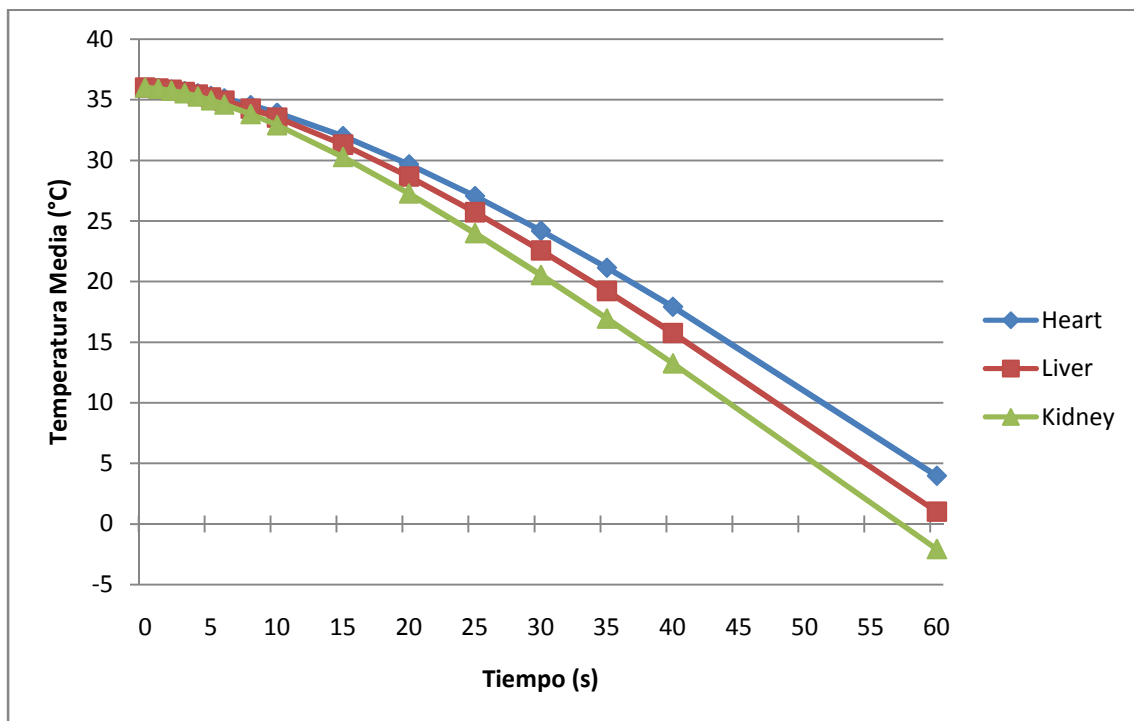


Fig. 5.27 – Gráfica de la temperatura media en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

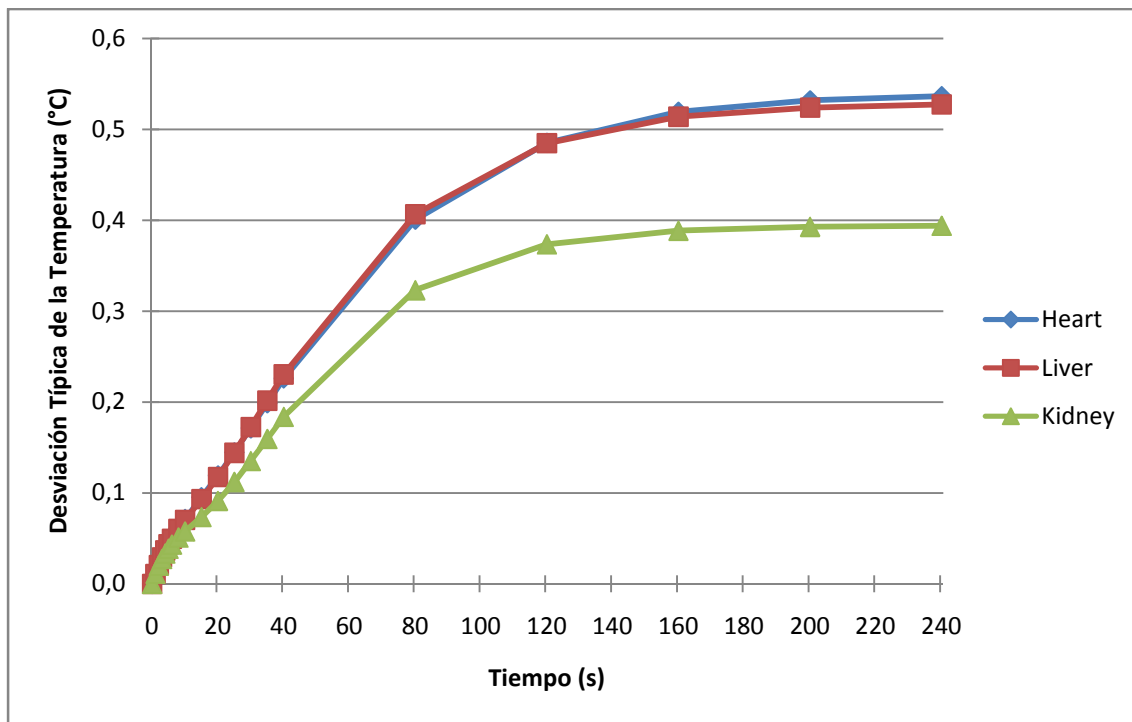


Fig. 5.28 – Gráfica de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

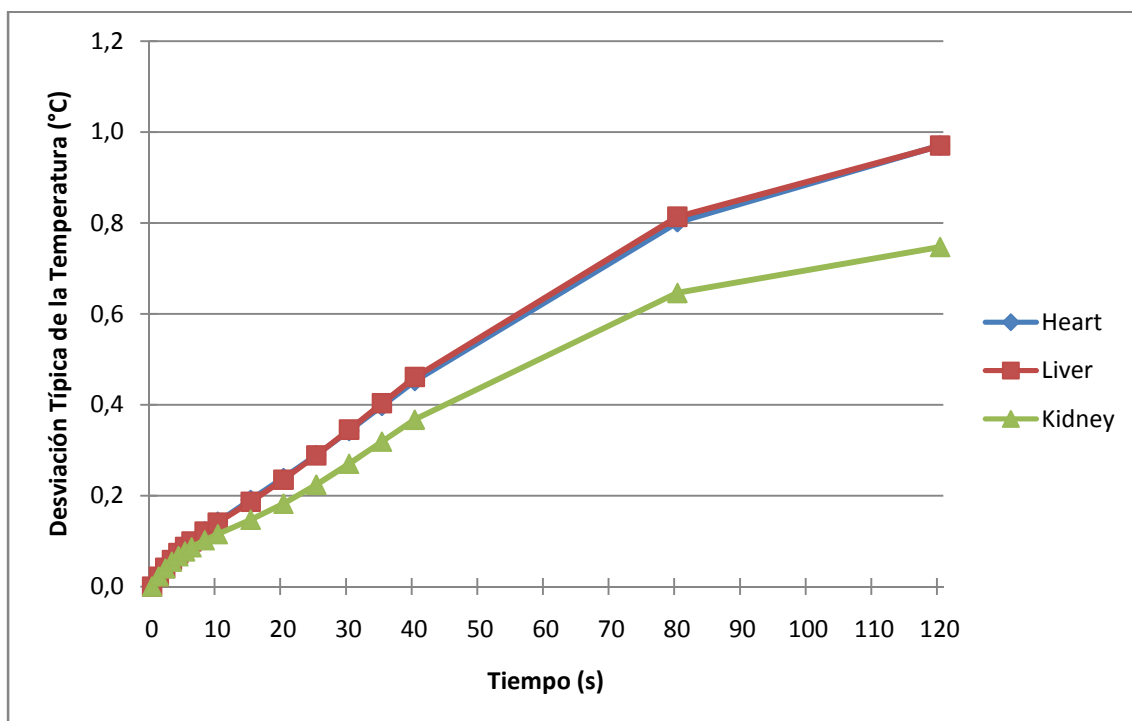


Fig. 5.29 – Gráfica de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

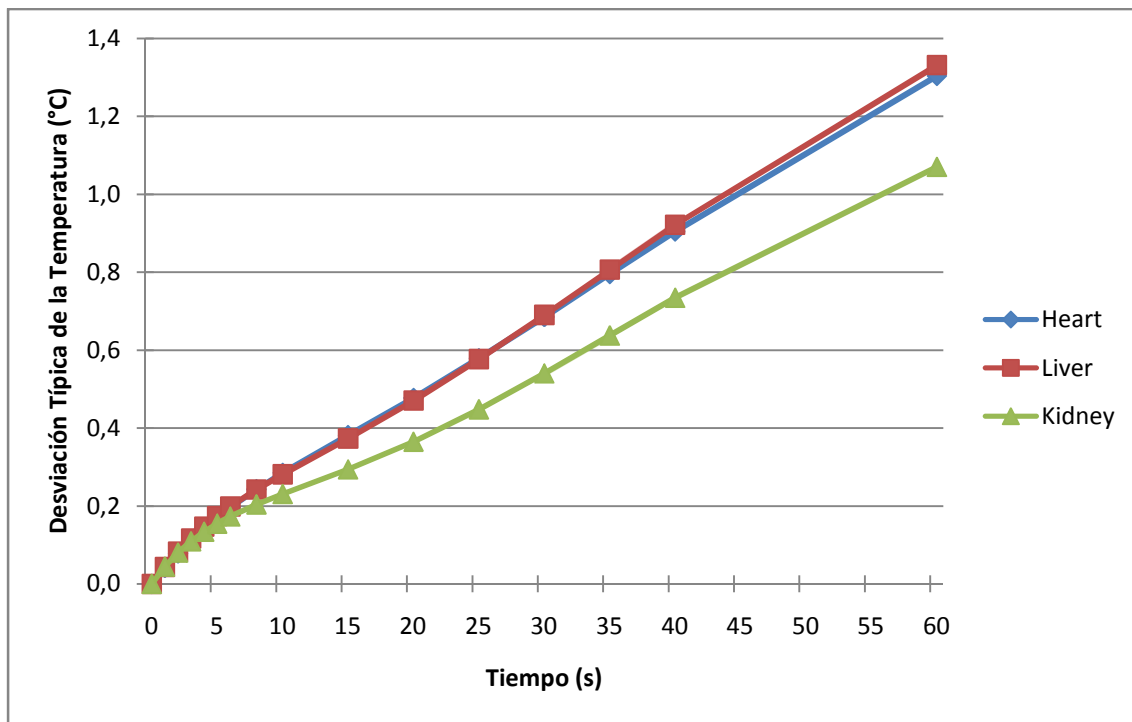


Fig. 5.30 – Gráfica de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

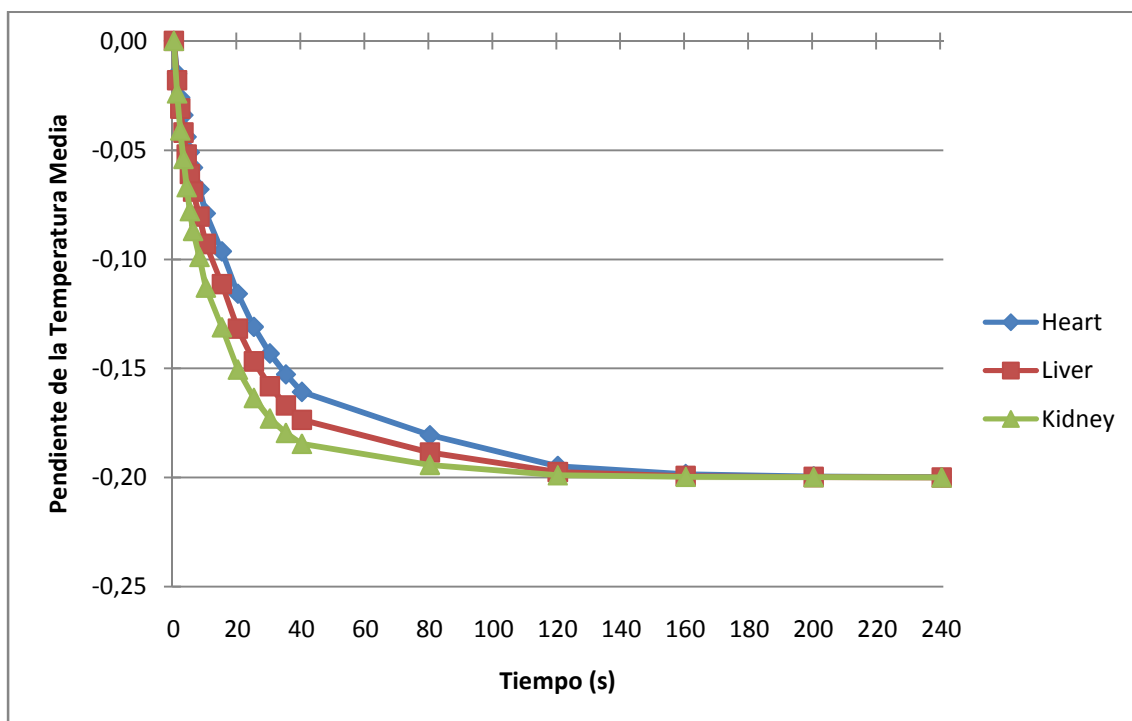


Fig. 5.31 – Gráfica de la pendiente de la temperatura media en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

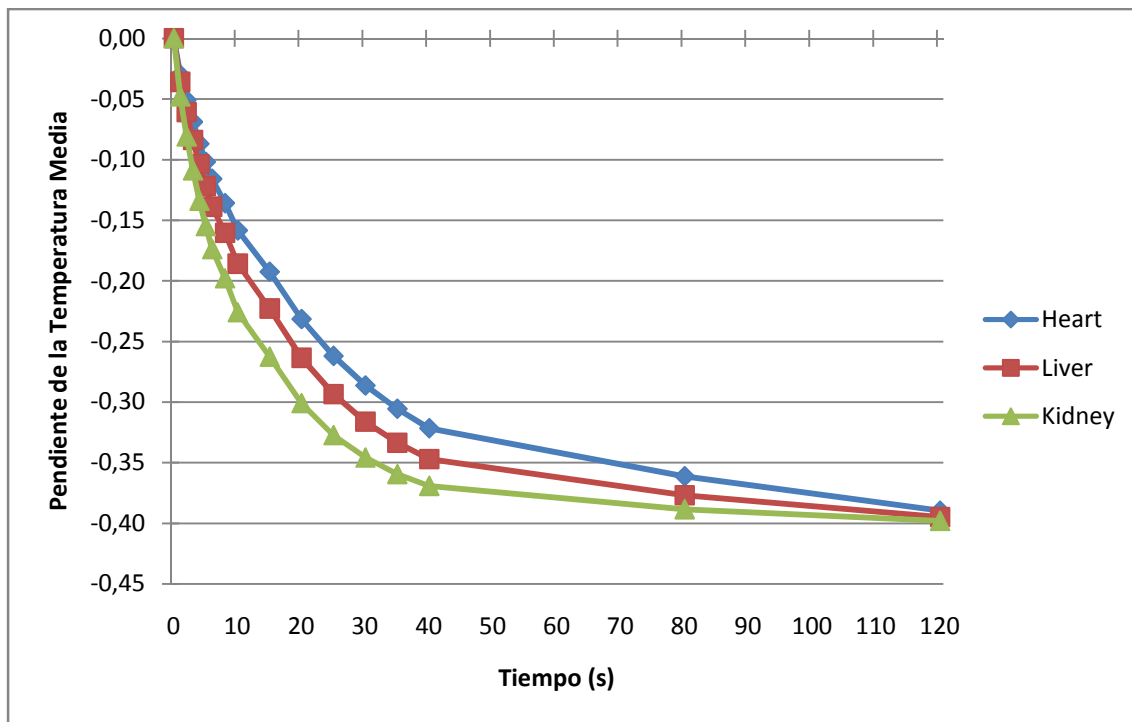


Fig. 5.32 – Gráfica de la pendiente de la temperatura media en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

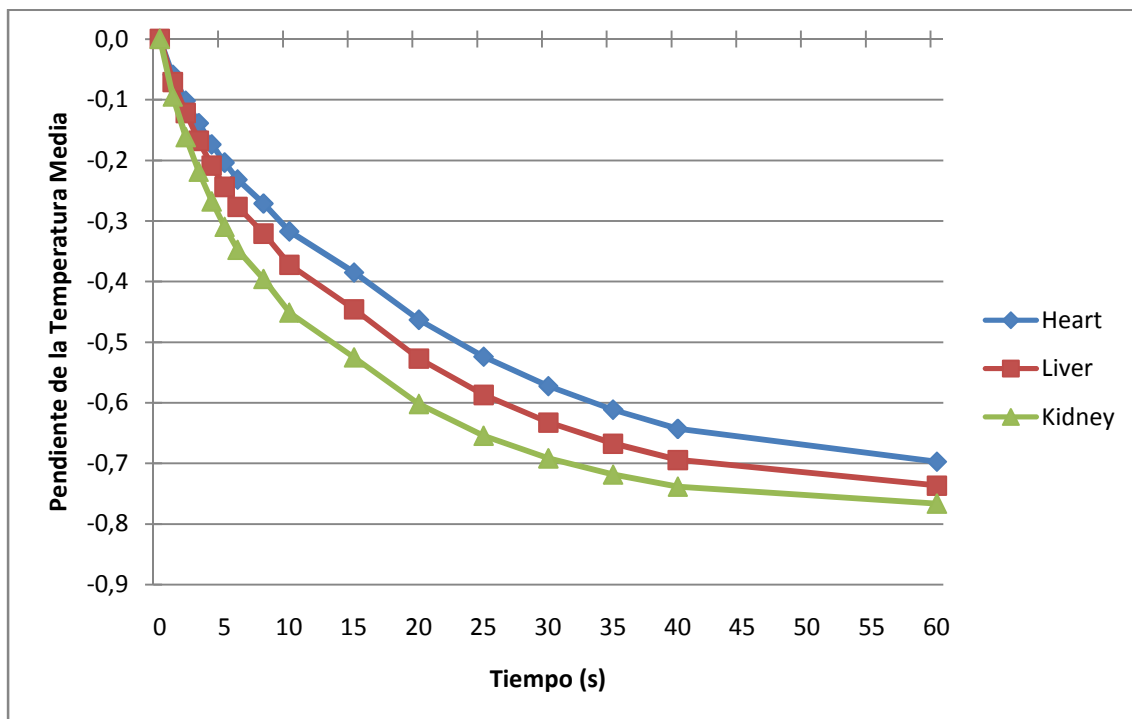


Fig. 5.33 – Gráfica de la pendiente de la temperatura media en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

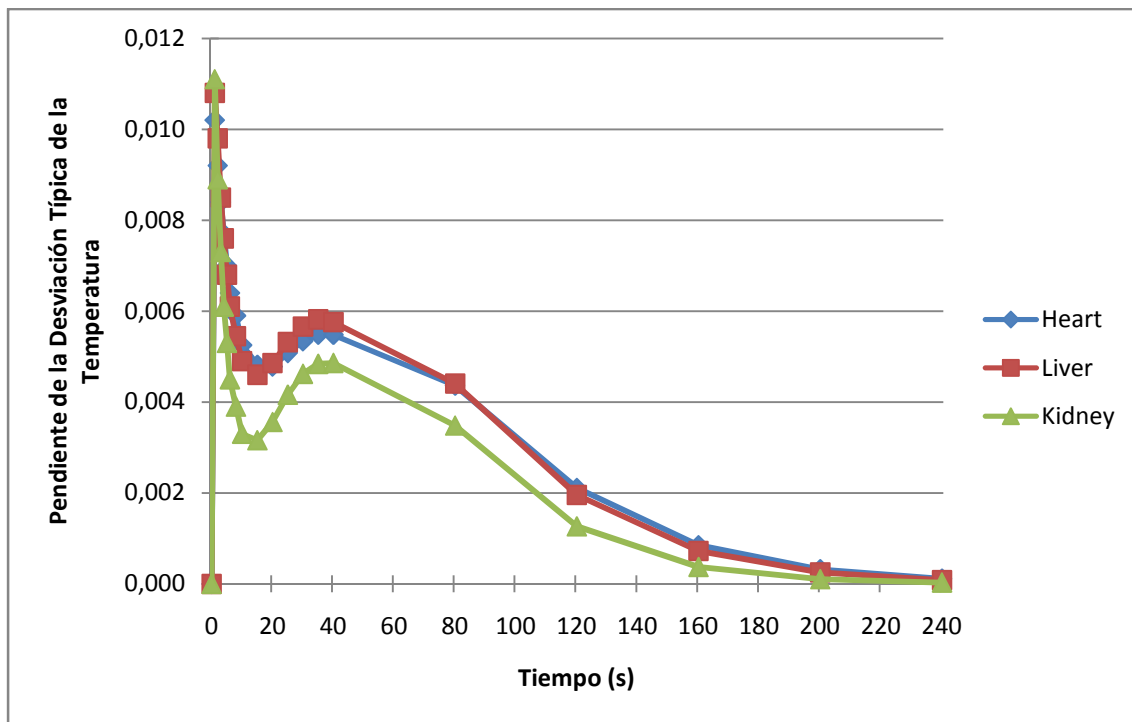


Fig. 5.34 – Gráfica de la pendiente de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,2^{\circ}\text{C/s}$

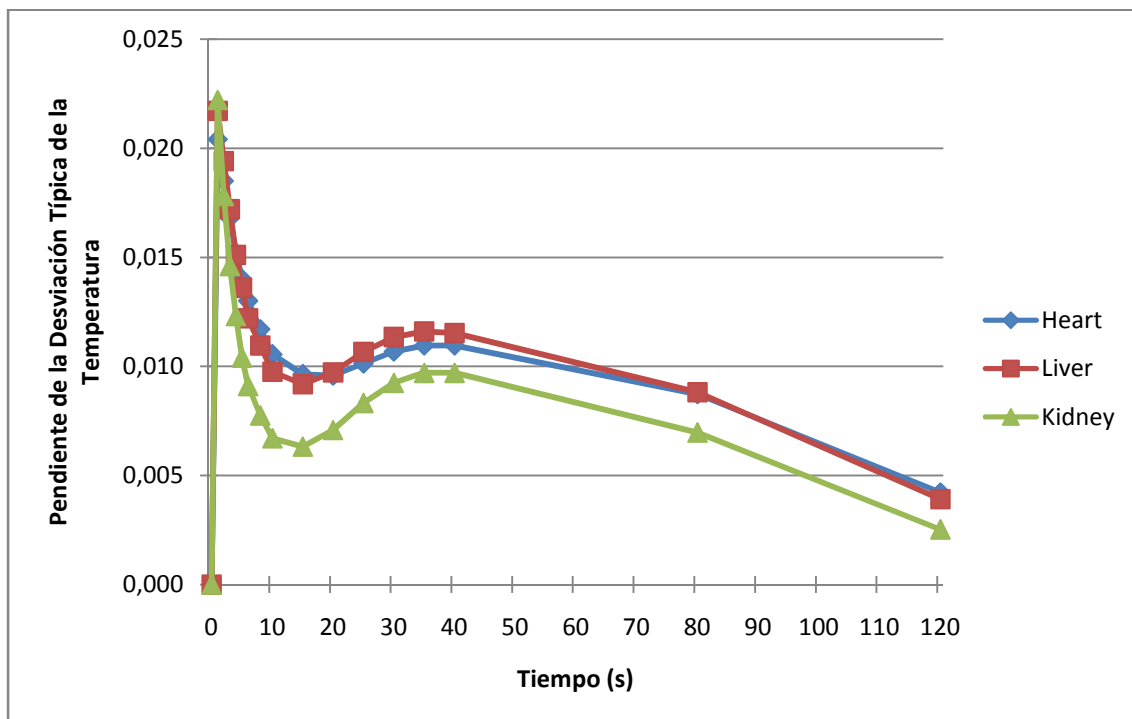


Fig. 5.35 – Gráfica de la pendiente de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,4^{\circ}\text{C/s}$

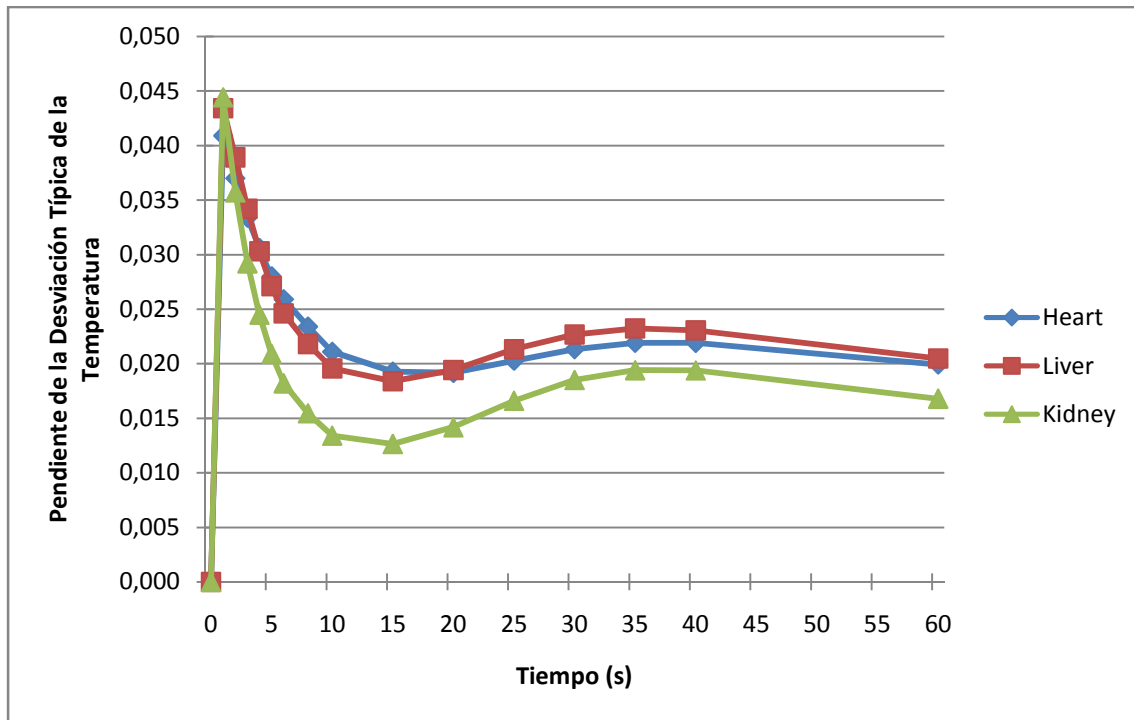


Fig. 5.36 – Gráfica de la pendiente de la desviación típica de la temperatura en los tres órganos con una velocidad de enfriamiento igual a $-0,8^{\circ}\text{C/s}$

5.4.2.3. Discusión de los resultados

Lo primero que tenemos que remarcar es que solo hemos simulado con una porción muy pequeña de una serie de órganos. Es decir, que es algo poco representativo, pues los órganos estudiados son muy complejos y no presentan una estructura similar en todo el órgano. Estamos realizando una simulación sobre una pequeña sección que nos da una idea de cómo esa zona evolucionaría según los cálculos teóricos realizados.

En primer lugar nos centraremos en los datos relaciones con la temperatura media. Las figuras 5.25, 5.26, y 5.27 nos muestran la evolución temporal de la media estadística en el seno de los órganos para las tres velocidades de enfriamiento utilizadas.

Y las figuras 5.31, 5.32 y 5.33 nos muestran la pendiente de la grafica correspondiente a temperatura media de cada órgano.

Lo primero que se observa es que en los tres casos, el riñón es el órgano que más rápidamente se enfría, mientras que el corazón lo hace de manera más lenta. Y entre ambos se encuentra el hígado.

El siguiente hecho significativo que se observar es que duplicar la velocidad de enfriamiento no supone dividir por dos el intervalo de simulación, sino que haría falta algo más de la mitad del intervalo de tiempo a simular para lograr alcanzar la misma temperatura.

Otro hecho observado es que las diferencias entre las temperaturas medias de los órganos estudiados aumentan a medida que aumentamos la velocidad de enfriamiento.

Por último, remarcar que la evolución temporal de la temperatura es prácticamente lineal, pero se muestra una variación al comienzo de todas las simulaciones. Es decir, que los tejidos presentan cierta inercia térmica. Pero cabe remarcar que este comportamiento inercial es independiente de la velocidad de enfriamiento, pues muestra una tendencia similar aproximadamente en los mismos instantes de tiempo (cuando podría llegar a suponerse que esta inercia debería aumentar a medida que la velocidad de enfriamiento se incrementase).

Así pues, teniendo en cuenta que los parámetros de simulación son exactamente los mismos para todas las simulaciones, a excepción de las propiedades físicas de los materiales (las cuales difieren muy poco entre sí), podemos concluir que el parámetro que mayor influencia tiene en la evolución de la temperatura de cada órgano es la morfología del tejido. Es decir, a más puntos fríos, mayor rapidez en la evolución de la

temperatura. Como podemos observar en la figura 5.11, vemos que el tejido correspondiente al riñón posee muchos más capilares que los tejidos correspondientes al hígado y al corazón.

Ahora nos centramos en los datos referidos a la desviación típica de la temperatura. Las graficas 5.28, 5.29 y 5.30 muestran la evolución temporal de la desviación típica de la temperatura en el seno de los tres órganos estudiados para las tres velocidades de enfriamiento seleccionadas. Las figuras 5.34, 5.35 y 5.36 muestran la evolución de la pendiente de la desviación típica de la temperatura a lo largo del tiempo.

Al igual que ocurría con la temperatura media, lo primero que se observa es que el tejido representativo del riñón es el que ofrece una evolución de la desviación típica menos pronunciada, es decir, que posee una evolución térmica más homogénea, en contraposición al corazón y al hígado, que muestran una evolución mucho más pronunciada, siendo la del corazón ligeramente mayor que la del hígado. Que la desviación típica aumente a medida que el tiempo evoluciona nos indica que los gradientes de temperatura entre los distintos puntos de la sección estudiada irán aumentando. Cuanto mayor sea, más irregular será la temperatura en el órgano. Esto quiere decir que el riñón es el órgano que mas homogéneamente se enfría, mientras que el corazón es el que menos. El hígado posee un comportamiento muy similar al corazón.

El siguiente hecho observado está relacionado con el concepto de inercia térmica que se vio anteriormente. Se comprobó que el comportamiento inercial que mostraban los tejidos era independiente de la velocidad de enfriamiento, mostrando los mismos hitos aproximadamente en los mismos instantes de tiempo. Se constata que la desviación típica se estabiliza en torno a los 120 segundos. Por eso en las simulaciones

con una velocidad de enfriamiento de $-0,8^{\circ}\text{C/s}$ la desviación típica no parece estabilizarse.

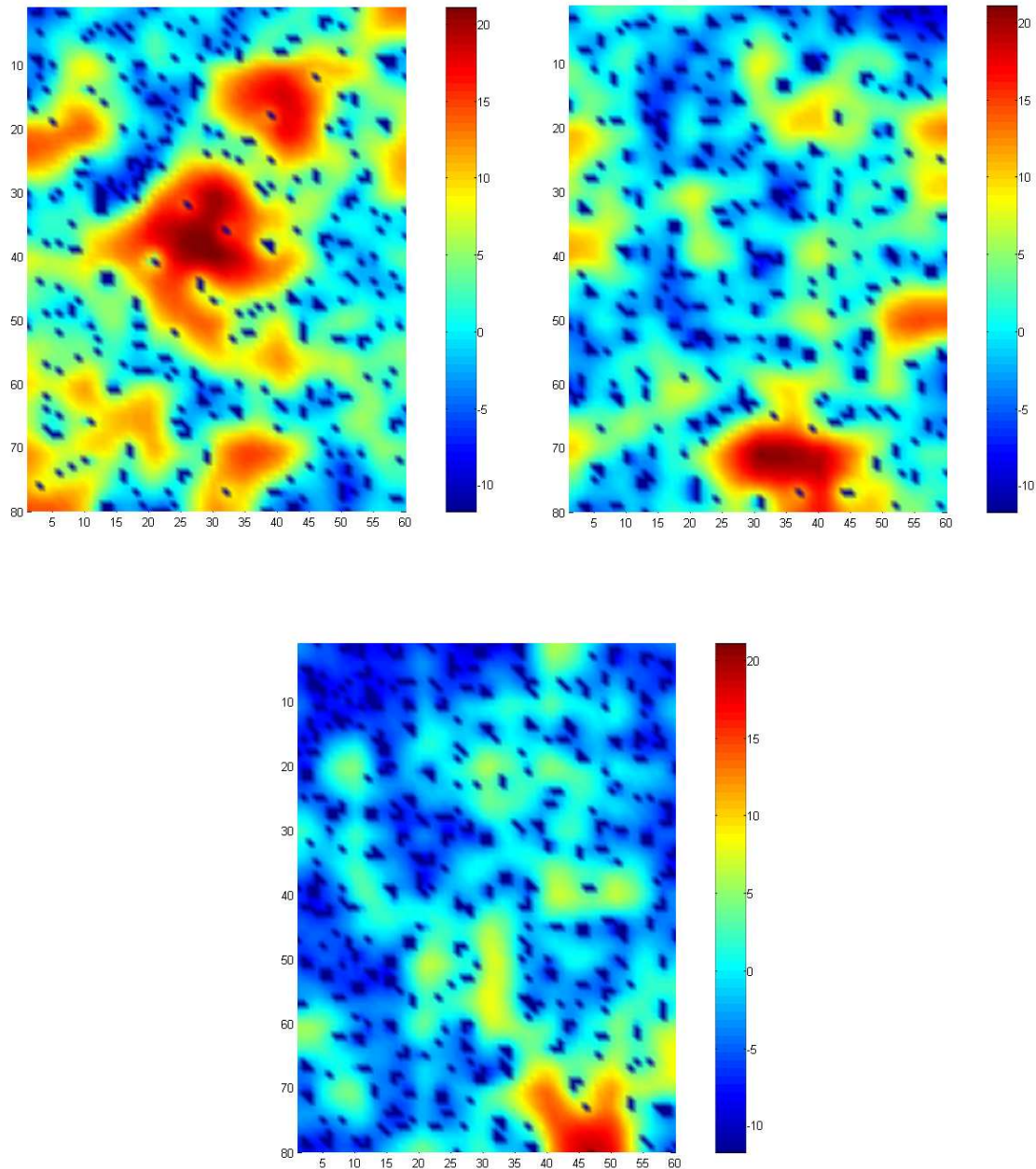


Fig. 5.37 – Gráficas devueltas por Cryojab para las simulaciones con velocidad de enfriamiento $-0,2^{\circ}\text{C/s}$ en el instante 60 s.

Así pues, tras observar los datos relacionados con la desviación típica podemos concluir que, al igual que con la rapidez de enfriamiento del órgano, el parámetro que influye más notablemente en la homogeneidad del enfriamiento es la distribución espacial de los capilares sanguíneos en el tejido. Una distribución más homogénea ofrece un enfriamiento mucho más homogéneo. Si observamos las fotografías que sirven de entrada al sistema, se comprueba que el riñón posee una distribución más regular de los capilares. Esto es gráficamente comprobable en la figura 5.37, donde se observa que el riñón ofrece un enfriamiento más regular que el hígado y que el corazón.