








# Comparative angiotomographic study of swine vascular anatomy: contributions to research and training models in vascular and endovascular surgery

## *Estudo de anatomia comparada suína por angiotomografia: contribuições para modelos de pesquisa e treinamento em cirurgia vascular e endovascular*

Adenauer Marinho de Oliveira Góes Junior<sup>1,2</sup> , Rosa Helena de Figueiredo Chaves<sup>1</sup> , Ismari Perini Furlaneto<sup>1</sup> ,  
Emanuelle de Matos Rodrigues<sup>1</sup> , Flávia Beatriz Araújo de Albuquerque<sup>1</sup> , Jacob Hindrik Antunes Smit<sup>1</sup> ,  
Carolina Pinheiro de Oliveira<sup>1</sup> , Simone de Campos Vieira Abib<sup>2</sup> 

### Abstract

**Background:** Medium and large animal models allow researchers to evaluate the efficacy and safety of cardiovascular procedures in systems that resemble human anatomy and can be used to simulate scenarios for training purposes. Although porcine models have been used extensively, many physiological and anatomical features remain unknown or only superficially described. **Objectives:** To describe the normal porcine vascular anatomy on computed tomography scans, compare it to human vascular anatomy, and discuss the application of porcine models for open and endovascular procedures. **Methods:** Three male Landrace pigs underwent computed tomography. The vascular anatomy of the neck, thorax, abdomen, and limbs was analyzed and described; relevant similarities and differences between porcine and human vascular anatomies and the implications for vascular procedures in pigs are highlighted. **Results:** The carotid territory, aortic arch, and terminal aorta branches all show marked differences in pigs compared to their human counterparts. Compressions of both left renal and common iliac veins were detected, analogous to those seen in human Nutcracker and May-Thurner syndromes. Vascular measurements (diameters, lengths, and angles) of several different porcine territories are presented. **Conclusions:** The data presented should be useful for planning preclinical trials and basic research and for refining surgical training using porcine models in vascular fields.

**Keywords:** pigs; blood vessels; vascular surgical procedures; anatomy, comparative; endovascular procedures; computed tomography angiography.

### Resumo

**Contexto:** Modelos com animais de médio e grande porte permitem que pesquisadores avaliem a eficácia e a segurança de procedimentos cardiovasculares em sistemas que se assemelham à anatomia humana e podem ser usados para simular cenários para fins de treinamento. Embora modelos suínos tenham sido extensivamente utilizados, muitos fatores fisiológicos e anatômicos permanecem desconhecidos ou apenas superficialmente descritos. **Objetivos:** Descrever a anatomia vascular do suíno por tomografia computadorizada, compará-la à anatomia humana e discutir a aplicação dos modelos porcinos em procedimentos abertos e endovasculares. **Métodos:** Três porcos machos da raça Landrace foram submetidos a tomografia computadorizada. A anatomia vascular de pescoço, tórax, abdome e membros foi analisada e descrita; foram destacadas similaridades e divergências relevantes entre a anatomia vascular de suínos e de humanos e as implicações em procedimentos vasculares nos suínos. **Resultados:** O território carotídeo, o arco aórtico e os ramos terminais da aorta em suínos apresentaram diferenças marcantes quando comparados aos de humanos. Foram detectadas compressões de veias renal e íliaca comum, ambas à esquerda, semelhantes às encontradas nas síndromes humanas de Nutcracker e May-Thurner. Medidas vasculares (diâmetro, comprimento e ângulos) de diferentes topografias de suínos foram fornecidas. **Conclusões:** Os dados fornecidos podem ser úteis para o planejamento de ensaios pré-clínicos e pesquisa básica, bem como para o refinamento do treinamento cirúrgico usando modelos suínos no campo da cirurgia vascular.

**Palavras-chave:** suínos; vasos sanguíneos; procedimentos cirúrgicos vasculares; anatomia comparada; procedimentos endovasculares; angiografia por tomografia computadorizada.

**How to cite:** Góes Junior AMO, Chaves RHF, Furlaneto IP, et al. Comparative angiotomographic study of porcine vascular anatomy: contributions to research and training models in vascular and endovascular surgery. *J Vasc Bras.* 2021;20:e20200086. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.200086>

<sup>1</sup> Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA, Curso de Medicina, Belém, PA, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, São Paulo, SP, Brasil.

Financial support: Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA), Belém, PA, Brazil.

Conflicts of interest: No conflicts of interest declared concerning the publication of this article.

Submitted: June 15, 2020. Accepted: August 26, 2020.

The study was carried out in a partnership between Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), São Paulo, SP, Brazil and Faculdade de Medicina, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA), Belém, PA, Brazil.



## ■ INTRODUCTION

Cardiovascular diseases are among the most significant health problems and constitute a fundamental target of biomedical research.<sup>1</sup> Some preliminary studies are conducted with smaller animals (mice, rats, and rabbits), because they offer a good cost-benefit relationship.<sup>2</sup> Non-human primates (baboons, for example) are also used when there is a need for tests with larger devices, but cost and the complexity of ethical issues are limiting factors. Pig and sheep models constitute important options for research in vascular surgery.<sup>2-4</sup> These animals can be used by researchers to assess the efficacy and safety of cardiovascular procedures in systems with similar anatomy to humans and can also be used in training.<sup>1</sup>

Pigs have been used as surgical models for a long time, in particular because they are reasonably priced and have similar cardiovascular anatomy and physiology to human beings.<sup>1,3-8</sup> Porcine cardiovascular anatomy and physiology are the most studied, as illustrated by studies on the distribution of coronary arteries, ventricular function, cardiac metabolism, electrophysiology, and development of collateral circulation after acute myocardial infarction.<sup>1</sup>

Recent publication of the genome and the possibility of genetically modifying pigs have increased even further the importance of porcine models in medical research.<sup>4</sup> One key factor in development of experimental models and in training is knowledge of the anatomy and its variants.<sup>5</sup> Classic studies, based on surgical dissections, such as “The anatomy of domestic animals”, were published in 1910,<sup>9</sup> and were followed by others that described use of pigs for a variety of procedures.<sup>1,2,5-8,10-16</sup>

Over recent decades, the complexity of open and endovascular surgery has been increasing. Noninvasive imaging methods, such as computed tomography (CT), have become routine for treatment planning and monitoring of cases and are progressively substituting traditional angiography. Despite technical developments, there is a lack of detailed descriptions of the extracardiac vascular anatomy of pigs.<sup>3,5,6,13</sup>

The objective of this study was to describe the characteristics of the vascular anatomy of pigs using CT, compare it to human anatomy, and discuss applications of porcine models for open and endovascular surgical procedures.

## ■ METHODS

This study was approved by the institutional animal research ethics committee.

Three male Landrace pigs were used for CT image acquisition. Their body weights were 45.4 kg, 49.2 kg,

and 52.3 kg. The animals were kept in standard conditions (with controlled temperature and humidity) and had fasted for 12 hours before examinations.

### Anesthetic protocol

Procedures were conducted under general anesthesia and monitored by a veterinary physician. Pre-medication comprised intramuscular injection of ketamine (15 mg/kg) and xylazine (1.5 mg/kg).

Anesthesia was induced by intravenous injection of propofol (2.5-5 mg/kg) and maintained with continuous infusion of the same medication (0.1-0.2 mg/kg/min). Animals were positioned in ventral decubitus during acquisition of images. There was no need for intubation.

### Computed tomography

Images were acquired in a 64-channel scanner, with 0.625 mm slices. The intravenous iodinecontrast used was Ioxol (120 mL at a flow velocity of 5 mL/s). Vascular measurements were taken during the arterial phase, using the bolus-tracking technique and the venous phase was initiated immediately after the arterial phase.

After the CT examinations, the animals were used in surgical skills training at the same institution and then euthanized by intravenous injection of potassium chloride.

### Image analysis

Images were viewed on Horos™ v3.1.0 (Horosproject.org) software. For the anatomic descriptions, the terms “ventral” and “dorsal” were adopted as equivalents of “anterior” and “posterior” in humans. Along the same lines, “cranial” and “caudal” were used as equivalents of “superior” and “inferior”.<sup>17</sup>

The largest diameters of vessels were measured along two perpendicular axes and then the mean diameter in that territory was obtained.

Measurements were taken at anatomic landmarks related to surgical and endovascular procedures, such as visceral angioplasties, vena cava filter implantation, and aortic procedures (Figure 1).

### Statistical analysis

Means, medians, standard deviations, and coefficients of variation (CV) were calculated using Prism 6 (Graphpad Software, La Jolla, United States).

## ■ RESULTS

### Arterial anatomy

The external carotids had larger diameter than the internal carotids.

The aorta exhibited accentuated and progressive narrowing from its origin to its distal portion, with mean diameter of 25 mm at the ascending aorta and 9.8 mm at the terminal aorta.

The visceral branch with the largest diameter was the cranial mesenteric artery, followed by the celiac

artery. The caudal mesenteric artery had the smallest diameter. Arterial diameters are shown in Table 1.

One of the animals had a left renal artery that was more caudal than the right, while in the other two animals both renal arteries emerged at the same level of the aorta. The angle of the renal arteries in relation

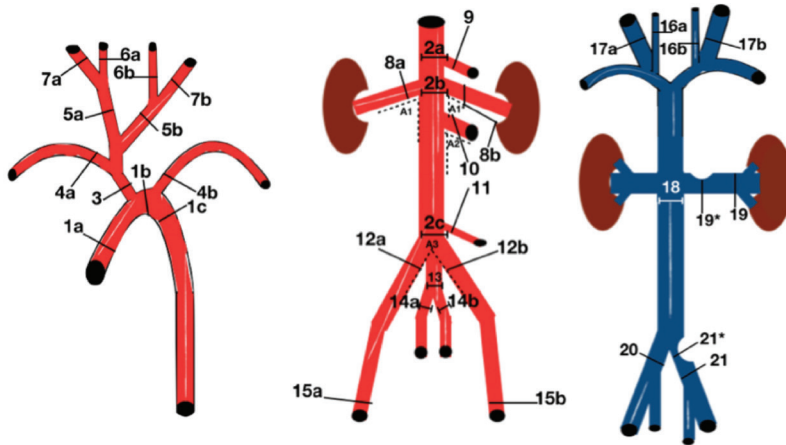


Figure 1. Diagrams illustrating measurement reference points. \*:venous diameter measurement at the point of compression.

Table 1. Diameters arterial.

Arterial diameters	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV%
Ascending aorta (1a)	22.9	28.2	25.0	2.8	11.1
Aortic arch (1b)	18.7	24.1	21.5	2.7	12.5
Descending aorta (1c)	16.4	22.5	19.4	3.0	15.6
Abdominal aorta (2a)	12.1	13.4	12.9	0.7	5.4
Abdominal aorta (2b)	8.7	11.1	10.2	1.3	12.6
Abdominal aorta (2c)	9.1	10.8	9.8	0.9	9.1
Brachiocephalic trunk (3)	10.6	13.0	11.5	1.3	11.3
Right subclavian artery (4a)	4.3	6.8	5.8	1.4	23.5
Left subclavian artery (4b)	4.4	6.2	5.6	1.1	19.1
Right common carotid (5a)	4.0	5.6	4.8	0.8	17.0
Left common carotid (5b)	4.7	5.4	4.9	0.4	7.8
Right internal carotid (6a)	3.5	4.0	3.8	0.3	7.7
Left internal carotid (6b)	3.4	3.7	3.5	0.2	5.0
Right external carotid (7a)	4.5	5.5	5.0	0.5	10.6
Left external carotid (7b)	5.1	5.8	5.4	0.4	6.8
Right renal artery (8a)	3.5	5.1	4.4	0.8	18.9
Left renal artery (8b)	5.1	5.7	5.3	0.4	6.7
Celiac trunk (9)	4.8	7.1	6.2	1.2	19.6
Cranial mesenteric artery (10)	6.9	8.2	7.4	0.7	9.8
Caudal mesenteric artery (11)	2.0	2.6	2.4	0.3	13.6
Right external iliac artery (12a)	5.4	8.2	7.2	1.6	22.0
Left external iliac artery (12b)	6.1	7.3	6.7	0.6	8.6
Internal iliac trunk (13)	4.7	8.0	6.1	1.7	28.4
Right internal iliac artery (14a)	3.7	4.7	4.3	0.6	12.7
Left internal iliac artery (14b)	3.8	4.3	4.1	0.3	6, 4
Right superficial femoral artery (15a)	4.9	6.4	5.8	0.8	13.7
Left superficial femoral artery (15b)	4.8	5.6	5.3	0.4	8.2

SD = standard deviation; CV = coefficient of variation; number and letters in parenthesis (for example, 1a) correspond to the measurement points shown on Figure 1.

to the aorta varied widely, from 82.5° to 114.5° (mean of 96.8°) on the right and from 76.8° to 116.3° (mean of 93.8°) on the left.

The mean length of the right superficial femoral artery (at the level of the head of the femur) to the terminal aorta (L1) was 12.9 cm. Starting from the same point, mean lengths were 22.1 cm to the more caudal renal artery (L2), 30 cm to the celiac artery (L3), and 58.9 cm to the left subclavian artery (L4). Angles and lengths of the arteries are presented in Table 2.

### Venous diameters

The external jugulars had much larger diameters than the internal jugulars. The mean diameter of the right external jugular was 9.2 mm and mean diameter of the left external jugular was 8.6 mm. The internal jugular veins had mean diameters of 4 mm on the right side and 4.5 mm on the left side.

The mean diameter of the caudal vena cava, proximal to the level of the more caudal renal vein, was 10.5 mm.

In view of the narrowing of the left renal vein between the aorta and the cranial mesenteric artery (similar to the Nutcracker syndrome), measurements

were taken at the renal hilum (mean diameter: 5.8 mm) and at the point of maximum compression (mean diameter: 2.8 mm).

The mean diameter of the right common iliac vein was 7.2 mm; the mean diameter of the left common iliac vein was 6.9 mm proximal to the confluence with the cava and 2.6 mm at the point of maximum compression between the aorta and the adjacent vertebrae (similar to May-Thurner Syndrome). Diameters of the veins are presented in Table 3.

### Coefficients of variation

The greatest variations (> 20%) were detected at the following points: left renal vein at the point of maximum compression (CV = 29.6%), internal iliac trunk (CV = 28.4%), right subclavian artery (CV = 23.5%), right external iliac artery (CV = 22.0%), and emerging angle of the left renal artery (CV = 21.7%).

Figures 2 through 6 illustrate some of the anatomic information related to arterial and venous anatomy.

### Swine vs. human anatomy

The porcine aortic arch gives rise to two branches: the brachiocephalic and left subclavian arteries; in humans, this structure usually gives rise to the three

Table 2. Arterial angles and lengths.

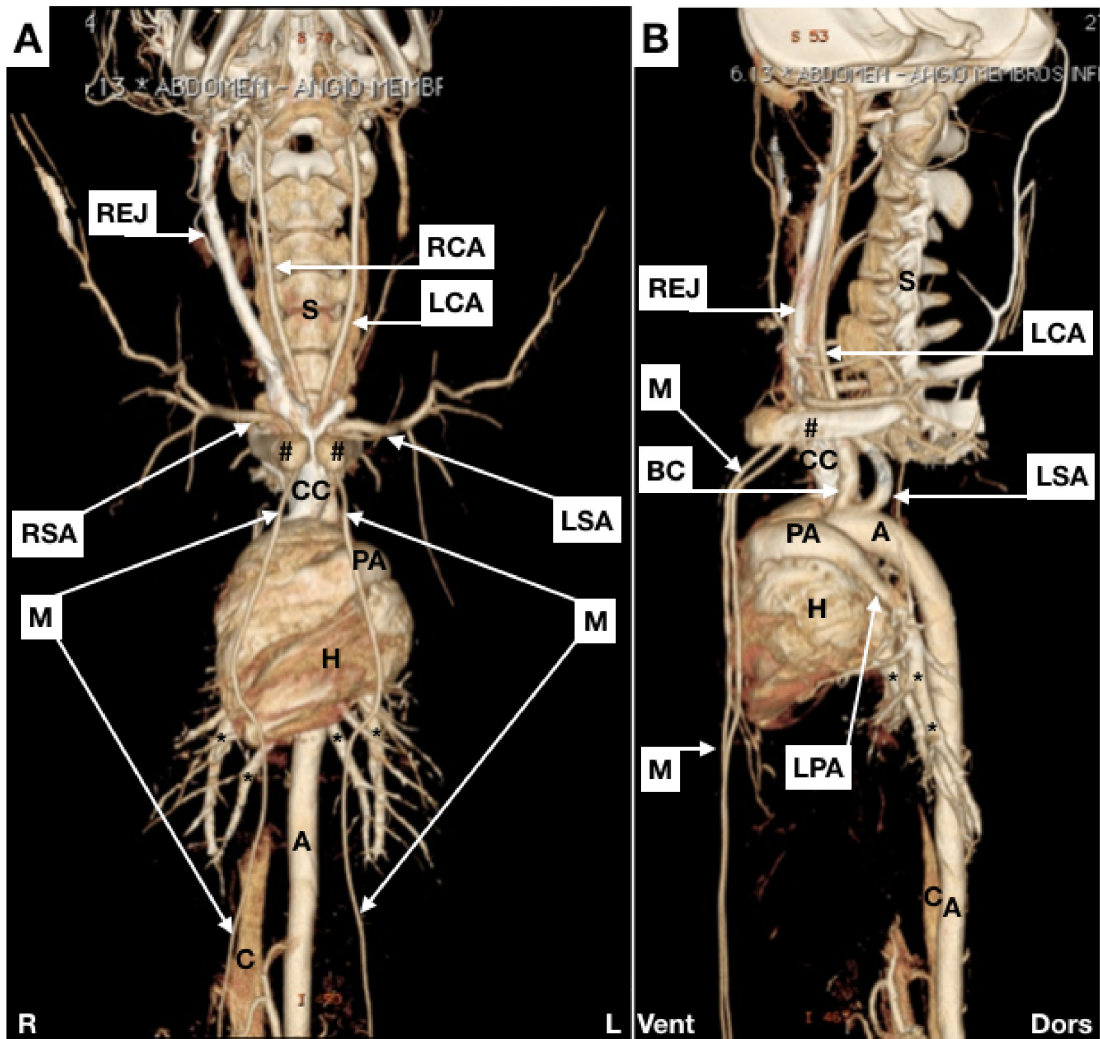
Arterial angles/lengths	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV%
Angle of the right renal artery (A1)	82.5	114.5	96.8	16.3	16.8
Angle of the left renal artery (A1*)	76.8	116.3	93.8	20.3	21.7
Aortic-mesenteric angle (A2)	64.5	87.2	74.8	11.5	15.4
Angle of the external iliac arteries (A3)	31.7	44.0	36.6	6.5	17.8
Aortic-femoral length (L1)	12.4	13.5	12.9	0.5	4.0
Femoral-renal length (L2)	19.9	23.6	22.1	1.9	8.6
Femoral-celiac length (L3)	27.0	31.6	30.0	2.6	8.6
Femoral-subclavian length (L4)	52.9	62.0	58.9	5.2	8.9

SD = standard deviation; CV = coefficient of variation; number and letters in parenthesis (for example, A1) correspond to the measurement points shown in Figure 1. L1, L2, L3, and L4 represent the lengths from the superficial femoral artery (at the level of the head of the femur) to the following points: terminal aorta, more caudal renal artery, celiac artery, and left subclavian artery, respectively.

Table 3. Venous diameters.

Diameter venous	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV%
Right internal jugular (16a)	3.6	4.3	4.0	0.4	9.2
Left internal jugular (16b)	3.8	5.4	4.5	0.8	17.2
Right external jugular (17a)	8.0	10.5	9.2	1.3	13.8
Left external jugular (17b)	7.7	9.2	8.6	0.8	9.5
Caudal vena cava (18)	9.2	11.7	10.5	1.2	11.8
Left renal vein [RH] (19)	5.3	6.4	5.8	0.5	9.4
Left renal vein [PC] (19*)	1.8	3.4	2.8	0.8	29.6
Right common iliac vein (20)	6.5	7.9	7.2	0.7	10.2
Left common iliac vein (21)	6.6	7.4	6.9	0.4	5.7
Left common iliac vein [PC] (21*)	2.3	2.8	2.6	0.3	11.0

SD = standard deviation; CV = coefficient of variation; RH = renal hilum; PC = point of compression; number and letters in parenthesis (for example, 16a) correspond to the measurement points shown in Figure 1.



**Figure 2.** Maximal Intensity Projection (MIP) images. (A) anterior view; (B) lateral view. REJ = right external jugular vein; RCA = right common carotid; LCA = left common carotid; S = spinal column; # = clavicles; CC = cranial vena cava; RSA = right subclavian artery; LSA = left subclavian artery; M = mammary arteries; PA = pulmonary artery (trunk); H = heart; A = aorta; C = caudal vena cava; R = right; L = left; BC = brachiocephalic artery; LPA = left pulmonary artery; \* = branches of the pulmonary arteries; Vent = ventral; Dors = dorsal.

supra-aortic branches. The brachiocephalic artery gives rise to the right subclavian artery and the bicarotid trunk, which leads to the common carotids (Figure 2).

Another difference is observed at the carotid bifurcation. In humans, the common carotid artery forms a bulb, branching into the internal and external carotids. In pigs, the external carotid artery emerges as a continuation of the common carotid and has a larger caliber than the internal carotid.

Although the study objective did not include describing anatomy in the cephalic region, certain differences compared with human circulation stand out, such as multiple extracranial communications between the external and internal carotid arteries and

the *rete mirabile*, a complex ovoid epidural arteriolar network.<sup>2,6,9,18</sup>

With regard to venous peculiarities, divergent from humans, the external jugular is almost as deep as the internal, but is located within a different compartment. It is also of much larger caliber than the internal jugular, which runs parallel to the carotid (Figure 3A). Additionally, the internal and external jugulars on each side join to the subclavian vein, forming a short trunk which joins to the contralateral equivalent, giving rise to the cranial cava.

The thoracic segment of the caudal cava is much longer than the human equivalent (the thoracic segment of the inferior vena cava) and has a portion

surrounded by pulmonary parenchyma. The caudal cava crosses the diaphragm and receives the hepatic veins, similar to the retro-hepatic segment of the human inferior cava (Figure 4B).

The renal veins drain to the caudal vena cava. Pigs have a significant narrowing of the left renal vein between the abdominal aorta and the cranial mesenteric artery, analogous to Nutcracker syndrome in humans<sup>19-21</sup> (Figures 4C and 4D).

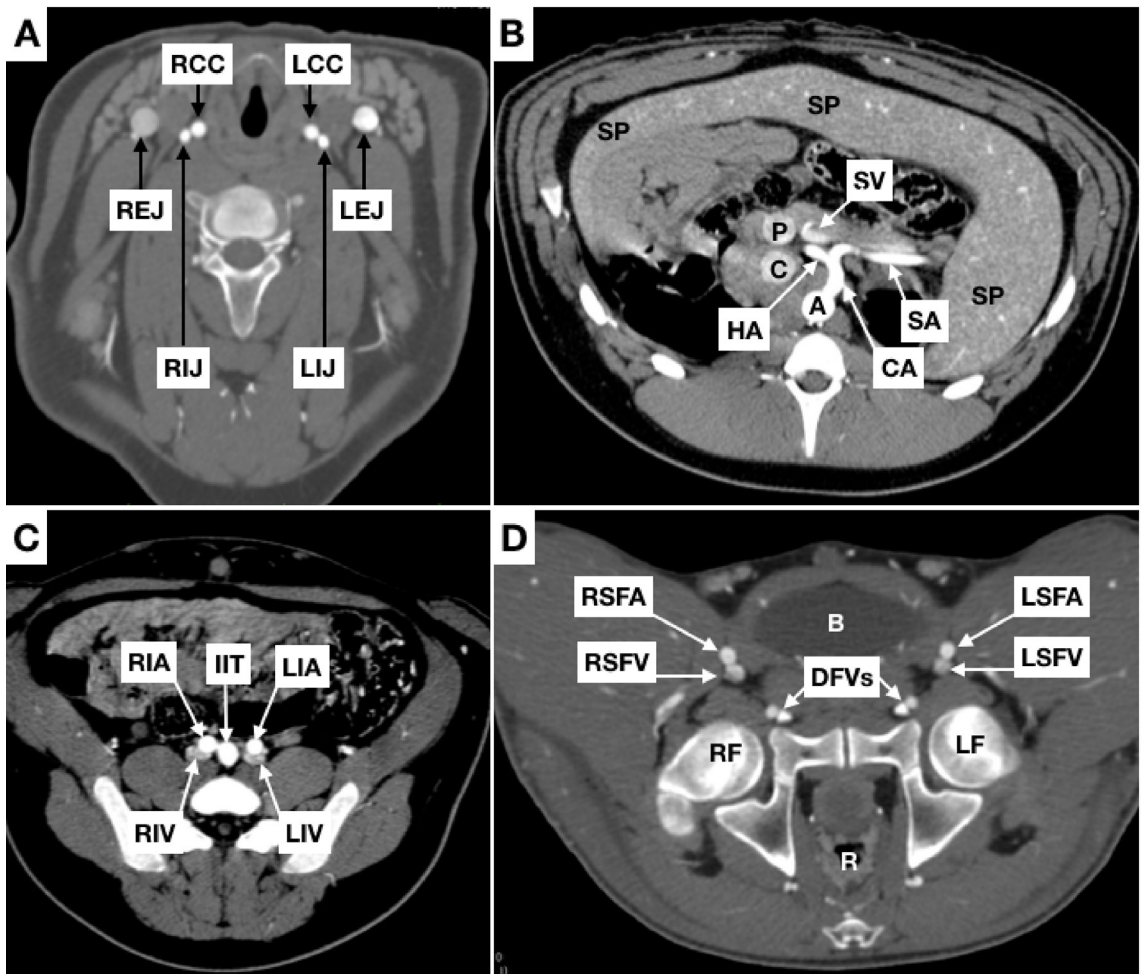
The abdominal aorta gives off the celiac, cranial mesenteric, caudal mesenteric, and right and left renal arteries at different angles (Figures 5A and 5D).

Pigs do not have a “common” iliac artery, because the aorta ends in a “trifurcation”, giving off right

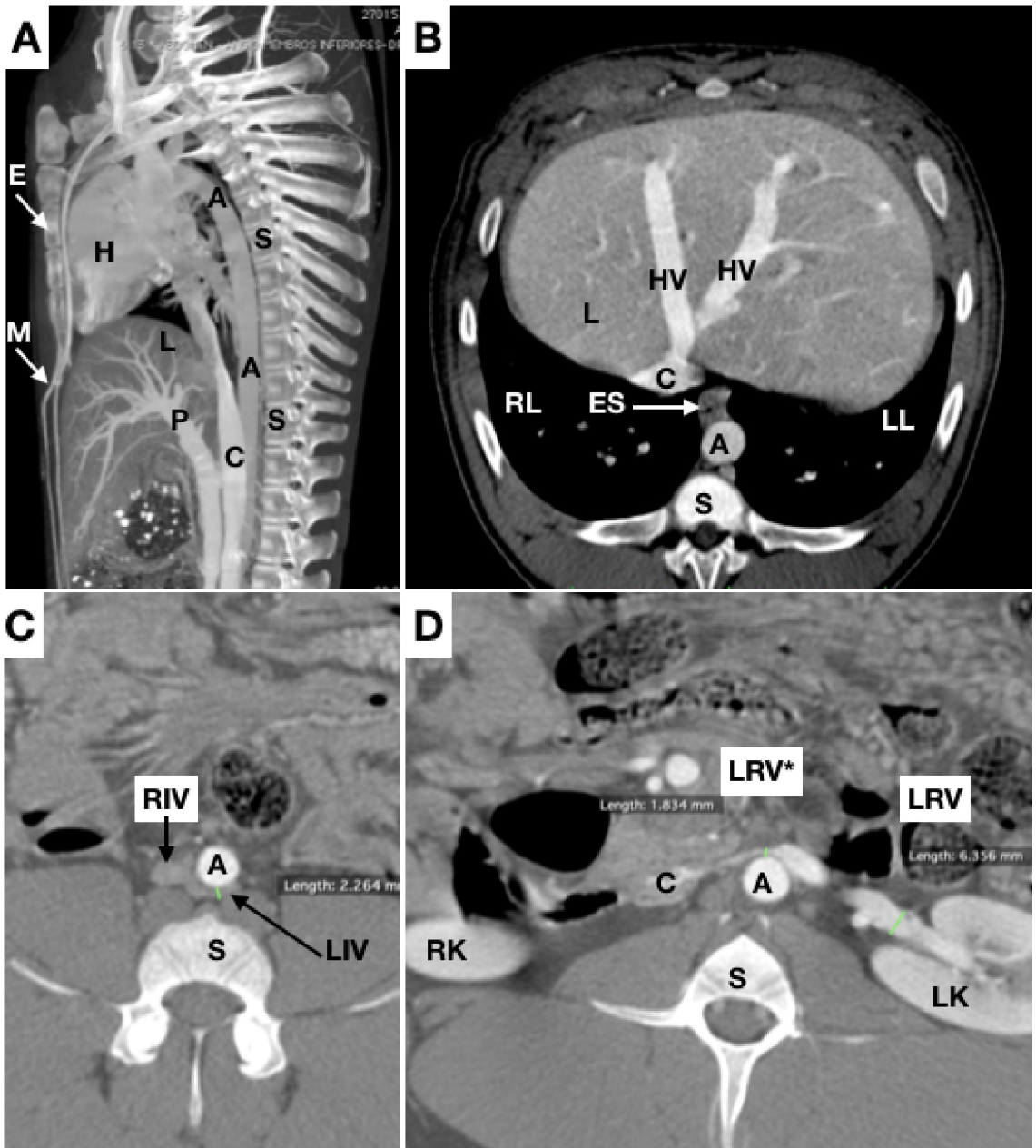
and left external iliac arteries and the internal iliac trunk, which in turn gives rise to the right and left internal iliac arteries and the median sacral artery (Figures 5B, 6A and 6B).

The external iliac artery continues as the femoral artery. In contrast with what is observed in humans, while still within the pelvis, the femoral artery (the equivalent of the human common femoral) branches into superficial and deep femoral arteries; the artery at the prominence of the head of the femur is the superficial femoral, whereas the deep femoral vessels follow a path close to the pubis (Figures 3D and 6C).

The pelvic venous anatomy is similar to the human: the internal and external iliac veins join to form



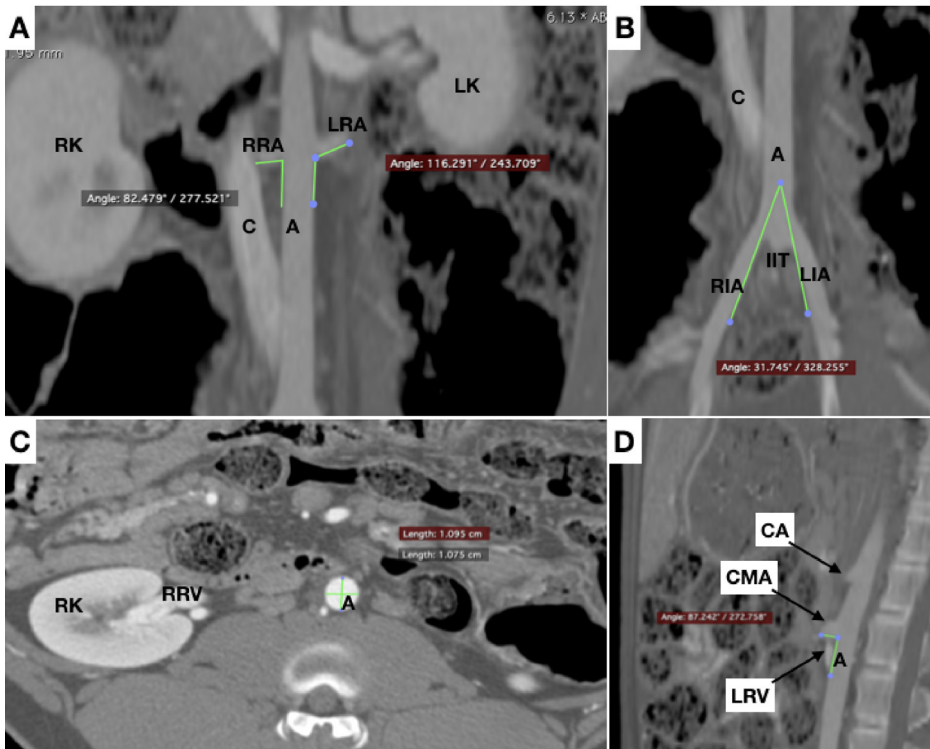
**Figure 3.** Coronal slices. (A) neck; (B) abdomen; (C) and (D) pelvis. RCC = right common carotid; LCC = left common carotid; REJ = right external jugular vein; LEJ = left external jugular vein; RIJ = right internal jugular vein; LIJ = left internal jugular vein; A = aorta; C = caudal vena cava; P = portal vein; CA = celiac artery; SA = splenic artery; HA = hepatic artery; SV = splenic vein; SP = spleen; RIA = right external iliac artery; LIA = left external iliac artery; RIV = right common iliac vein; LIV = left common iliac vein; IIT = internal iliac trunk; RSFA = right superficial femoral artery; LSFA = left superficial femoral artery; RSFV = right superficial femoral vein; LSFV = left superficial femoral vein; DFVs = deep femoral vessels (arteries and veins); B = bladder; R = rectum; RF = right femur; LF = left femur.



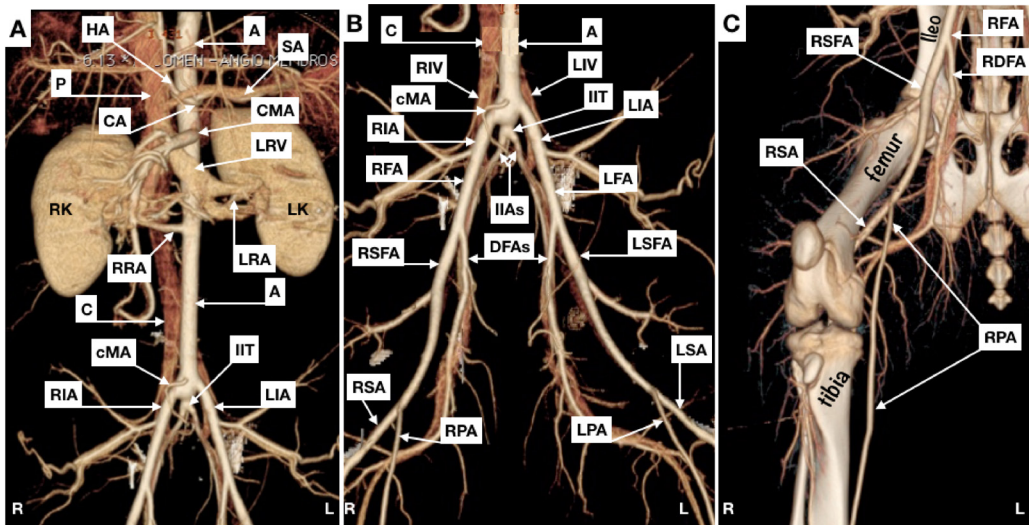
**Figure 4.** (A) sagittal slices; (B), (C), and (D) axial slices. A = aorta; C = caudal vena cava; P = portal vein; L = liver; S = spinal column; E = sternum; HV = hepatic vein; M = mammary arteries; H = heart; ES = esophagus; RL = right lung; LL = left lung; LRV = left renal vein; LRV\* = length from aorta to cranial mesenteric artery; RIV = right common iliac vein; LIV = common iliac vein; RK = right kidney; LK = left kidney.

common iliac veins, which flow together to form the caudal vena cava. We detected compressions of the left common iliac vein, analogous to May-Thurner syndrome; although in pigs the vein narrows between the aorta and the spine, rather than between the right common iliac artery and the spine, as in humans<sup>22,23</sup> (Figure 4C).

Arterial supply to the hind limbs diverges considerably from the human equivalent. The superficial femoral artery divides into the saphenous and popliteal arteries at the mid third of the femur. The saphenous artery emits branches that supply the greater part of the musculature, including the plantar and dorsal digital arteries. The popliteal artery penetrates the



**Figure 5.** (A) and (B) Coronal slices for measurement of angles between renal arteries and the aorta and between external iliac arteries (trifurcation of the aorta), respectively; (C) Axial slice for measurement of diameter of aorta; (D) Sagittal slice for measurement of the angle between the aorta and the anterior mesenteric artery. A = aorta; C = caudal vena cava; RRA = right renal artery; LRA = left renal artery; RK = right kidney; LK = left kidney; RIA = right external iliac artery; LIA = left external iliac artery; IIT = internal iliac trunk; RRV = right renal vein; CA = celiac artery; CMA = cranial mesenteric artery; LRV = left renal vein.



**Figure 6.** Maximal intensity projection (MIP). (A) abdomen (anterior view); (B) pelvis (anterior view); (C) right hind limb (anterior view). HA = hepatic artery; A = aorta; SA = splenic artery (partially superimposed by the splenic vein); P = portal vein; CA = celiac artery; CMA = cranial mesenteric artery; LRV = left renal vein; RK = right kidney; LK = left kidney; RRA = right renal artery; LRA = left renal artery; C = caudal vena cava; cMA = caudal mesenteric artery; IIT = internal iliac trunk; RIA = right external iliac artery; LIA = left external iliac artery; R = right; L = left; RIV = right common iliac vein; LIV = left common iliac vein; RFA = right common femoral artery; LFA = left common femoral artery; IIA = internal iliac arteries; RSFA = right superficial femoral artery; DFAs = deep femoral arteries (partially superimposed by the deep femoral vein); LSFA = left superficial femoral artery; RSA = right saphenous artery; RPA = right popliteal artery; LPA = left popliteal artery; LSA = left saphenous artery; RDFA = right deep femoral artery



interosseous membrane in the anterior direction, from where it becomes the cranial tibial artery and supplies several muscular branches.

## ■ DISCUSSION

### Pig models for training and experimentation

Animal experimentation is frequently employed to assess the efficacy and safety of new treatments before they are applied in clinical trials.<sup>1-7,9-15,24</sup> Although pigs have been used extensively in many areas, such as genomics, organ transplantation, oncology, trauma, and neurological and cardiovascular diseases,<sup>2-4,10,18</sup> many important physiological and anatomic factors remain unknown or have only been described superficially.<sup>1,5,25</sup>

The literature contains several conflicting anatomic descriptions, such as the “bifurcation” of the aorta,<sup>3,6,26</sup> which is actually a “trifurcation” in pigs. Additionally, the subclavian arteries,<sup>3,6,11,15,27</sup> which emerge from the brachiocephalic artery on the right side and from the aortic arch on the left side, supplying the animal’s front limbs, are occasionally referred to as brachial arteries.<sup>9</sup> Another example is the anterior and posterior mesenteric arteries,<sup>9</sup> which have been described as superior<sup>3,11,28</sup> and inferior<sup>3,11,15,28</sup> or cranial and caudal.<sup>6</sup>

Several pig breeds have been used in vascular research. Yucatan pigs have been used for studies involving hemodialysis catheters, because this breed stops growing after 1 year of age, with a mean weight of 70 kg, making them appropriate for this use.<sup>13</sup> At 3 months of age, weighing from 32.4 to 34.5 kg, the same breed has been used to study microsurgical vascular anastomoses in a model of tibia transplantation<sup>9</sup> and, at 4 months of age, has been used to evaluate differences between the sexes with relationship to the results of coronary stenting.<sup>24</sup>

The Göttingen minipig breed has been used in tomographic studies of vascular anatomy, more specifically with a focus on pediatric issues, since at 11 weeks of life, these animals have approximately the same weight as a newborn human being,<sup>3</sup> with an appropriate profile for these projects.

The same breed as used in the present study, Landrace, weighing approximately 55 kg were used in experimental construction of aneurysms of the aorta and treatment of types IA and II endoleaks by laparoscopy and thoracoscopy.<sup>13</sup> At weights from 70 to 95 kg, they were used in a study of resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta (REBOA).<sup>29</sup> Landrace pigs weighing 20 to 30 kg were also used successfully for training aortic surgery via videolaparoscopy.<sup>26</sup> In 1998, a radiological anatomy study was conducted with Landrace pigs weighing from 20 to 25 kg,

describing angiographic aspects of the brain, head, neck, thorax, abdomen, and pelvis.<sup>6</sup>

In addition to the fact that this breed has already been used for training and research into several open and endovascular surgical techniques, the choice to study Landrace pigs was made because they are widely available and are appropriate for a variety of procedures, depending on the age, size and weight of the animal.

Over time, computed tomography angiography (angio-CT) has supplanted conventional angiography in many situations, because of its many advantages, such as cost and the speed with which the professionals needed to conduct it can be mobilized. It is also less invasive, with lower morbidity and, because of this, it constitutes the method of choice for the circulatory system in many situations.<sup>28</sup> However, there are few descriptions of the porcine vascular anatomy using tomography.<sup>5</sup>

### Considerations with relation to training and research in vascular procedures

#### a) Vascular access

Vascular access, using the Seldinger technique, can be performed by ultrasound-guided puncture or by surgical dissection.<sup>1</sup> Dissection of the porcine femoral artery is performed on the superficial femoral artery and not the common femoral artery, since this is intrapelvic in pigs. During dissection of the common carotid, care should be taken to avoid injuring the sympathetic chain, located within the carotid sheath, medial and dorsal to the vagus nerve, since this can lead to Horner syndrome. Local vasodilators may be needed during manipulation of the carotid territory, because spasms occur easily.<sup>1</sup> As in human beings, the close proximity of the esophagus and left common carotid artery should be kept in mind.

#### b) Coagulation

Pigs are relatively hypercoagulable compared to humans, making intraoperative anticoagulation very important.<sup>1,30</sup> As in clinical practice, intravenous heparin (100-300 units/kg) is administered to maintain activated coagulation time  $\geq 250$  s.<sup>7</sup> Depending on the procedure (stenting or graft bypass, for example), antithrombotic treatment with acetylsalicylic acid and/or clopidogrel is recommended during the postoperative period.<sup>1,11</sup>

#### c) Stents

Stent diameters should be suited to the vessel to be stented, with minimal oversizing (1.0 to 1.1 times the

diameter of the vessel) to avoid mechanical injuries from excessive dilations, resulting in unreliable safety and efficacy data, while stents that are too small could migrate.<sup>1</sup> The results presented in Tables 1 and 3 should be of help when choosing stent diameters.

Arteries should be carefully chosen so that stents are implanted in vessels with similar characteristics to those treated in clinical practice. This is particularly important when using drug-eluting stents, since vessels with different histological characteristics may respond differently to the active ingredient released.<sup>1</sup>

#### d) Aortic occlusion

In surgical practice, aortic occlusion is often obtained by clamping or by intraluminal balloon inflation. An experimental study in pigs that involved both histological and biomechanical analyses showed that parietal damage and consequent reduced aortic resistance were more intense when aortic flow was interrupted using clamps than when intraluminal balloon occlusion was used.<sup>31</sup>

The vast collateral circulation explains why the repercussions of acute arterial occlusion can be dramatically different from what is observed in humans. In humans, acute aortic occlusion, in saddle embolism, for example, can cause mortality as high as 30%, whereas in porcine models several oligosymptomatic cases of acute and prolonged occlusion have been observed.<sup>11</sup>

These characteristics suggest that while pig models of acute aortic occlusion are anatomically appropriate for surgical training (such as in the REBOA technique, for example), they can yield results that are imprecise from a physiological perspective.

The REBOA technique was developed as an alternative for thoracotomy to aortic clamping. A compliant balloon is advanced into the aorta and inflated, obstructing the flow to distal circulation, increasing afterload and proximal aortic pressure and improving myocardial and cerebral perfusion, with potentially beneficial effects for patients in deep hemorrhagic shock.<sup>12,32,33</sup>

Porcine models have been employed for development, training, and studies of REBOA.<sup>12,29,32,33</sup> Studies have focused on comparing continuous vs. intermittent<sup>33-35</sup> and partial vs. total aortic occlusion,<sup>36</sup> the ideal duration of occlusion,<sup>37</sup> and tissue oxygenation,<sup>38</sup> targeting better results in clinical practice. Our results and the scant published data available suggest that the biological and histochemical repercussions of aortic occlusion in pigs should be judiciously interpreted, since the blood supply to the hind limbs is ensured by anastomoses, such as those between the internal thoracic (mammary) arteries and the epigastric

vessels<sup>11</sup> (Figure 4A illustrates the course of the mammary arteries).

The collateral network of the abdominal wall also includes the deep and lumbar circumflex iliac arteries. Moreover, in proximal occlusions, the proportions of the diameters of the blood vessels involved in perfusion of the hind limbs are much more favorable to immediate collateral perfusion than in humans.<sup>11</sup> While there is no doubt that porcine models are useful for teaching and practicing these surgical procedures, their peculiarities may mean that the results of occlusion of the infrarenal aorta are not comparable to those obtained in clinical practice.

#### e) Venous procedures

Venous catheters are usually inserted via the external jugular, which has a larger caliber than the internal jugular (Figure 2A), which is the opposite to humans.<sup>6,13,16</sup>

Pigs have been used in vena cava filters studies.<sup>6,39,40</sup> It is possible to puncture the venous femoral axis, but ultrasound-guidance advised, because the vein courses posterior to the artery, as can be observed in Figure 3D, making puncture more difficult.

The way hepatic veins converge to the retro-hepatic segment of the caudal vena cava allows practicing maneuvers used in trauma surgery, such as the Pringle technique and triple vascular exclusion of the liver.

After extensive searches of the literature, no article describing the situations analogous to Nutcracker and May-Thurner syndromes in pigs, as observed in the present study, was identified.

During the bibliographic review, a study describing the development of a novel venous stent employing an ovine animal model was found, which mentioned as a limitation the fact that the stent had been implanted in a vein without stenosis, because of the difficulty of simulating these conditions in animals.<sup>34</sup> This limitation can be potentially overcome by employing pigs, in which venous compression could be detected prior to the experiment with noninvasive examinations, as demonstrated in the present study.

Since CT examinations were performed with the animals in ventral decubitus and duly hydrated, it is improbable that the narrowing seen in the left renal and left common iliac veins (Figures 2E and 2F) can be attributed by abdominal organs compression, suggesting that there is indeed a mechanism that is more similar to that observed in humans. Future studies could focus on examining these findings of stenosis with intravascular ultrasound, or in developing animal models of venous stenting.

Limitations of the study include the fact that only three animals were studied and that animals of both sexes were not studied, since all three pigs were male.

## CONCLUSIONS

By providing the data presented here, this study should facilitate planning of pre-clinical trials and basic research and improvement of vascular surgery training using porcine models.

## REFERENCES

- Crisóstomo V, Sun F, Maynar M, et al. Common swine models of cardiovascular disease for research and training. *Lab Anim.* 2016;45(2):67-74. <http://dx.doi.org/10.1038/labon.935>. PMID:26814353.
- Mangla S, Choi JH, Barone FC, et al. Endovascular external carotid artery occlusion for brain selective targeting: a cerebrovascular swine model *Neuroscience. BMC Res Notes.* 2015;8(1):1-6. <http://dx.doi.org/10.1186/s13104-015-1714-7>.
- Siefert J, Hillebrandt KH, Kluge M, et al. Computed tomography-based survey of the vascular anatomy of the juvenile Göttingen minipig. *Lab Anim.* 2017;51(4):388-96. <http://dx.doi.org/10.1177/0023677216680238>. PMID:27932686.
- Judge EP, Hughes JML, Egan JJ, Maguire M, Molloy EL, O'Dea S. Anatomy and bronchoscopy of the porcine lung: a model for translational respiratory medicine. *Am J Respir Cell Mol Biol.* 2014;51(3):334-43. <http://dx.doi.org/10.1165/rcmb.2013-0453TR>. PMID:24828366.
- Bekheit M, Bucur PO, Wartenberg M, Vibert E. Computerized tomography-based anatomic description of the porcine liver. *J Surg Res.* 2017;210:223-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2016.11.004>. PMID:28457333.
- Dondelinger RF, Ghysels MP, Brisbois D, et al. Relevant radiological anatomy of the pig as a training model in interventional radiology. *Eur Radiol.* 1998;8(7):1254-73. <http://dx.doi.org/10.1007/s003300050545>. PMID:9724449.
- Sakaoka A, Koshimizu M, Nakamura S, Matsumura K. Quantitative angiographic anatomy of the renal arteries and adjacent aorta in the swine for preclinical studies of intravascular catheterization devices. *Exp Anim.* 2018;67(2):291-9. <http://dx.doi.org/10.1538/expanim.17-0125>. PMID:29353822.
- Smith AC, Swindle MM. Preparation of Swine for the Laboratory. *ILARJ.* 2006;47(4):358-63. <http://dx.doi.org/10.1093/ilar.47.4.358>. PMID:16963815.
- Septimus Sisson SB. The anatomy of the domestic animals. 2nd ed. Philadelphia: W.B. Saunders Company; 1930. p. 734-42.
- Michaud F, Li N, Plantefève R, et al. Selective embolization with magnetized microbeads using magnetic resonance navigation in a controlled-flow liver model. *Med Phys.* 2019;46(2):789-99. <http://dx.doi.org/10.1002/mp.13298>. PMID:30451303.
- Haacke N, Unger JK, Haidenhein C, Russ M, Hiebl B, Niehues SM. Pig specific vascular anatomy allows acute infrarenal aortic occlusion without hind limb ischemia and stepwise occlusion without clinical signs. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2011;48(1):173-85. <http://dx.doi.org/10.3233/CH-2011-1401>. PMID:21876245.
- Borger van der Burg BLS, Hörer TM, Eefting D, et al. Vascular access training for REBOA placement: a feasibility study in a live tissue-simulator hybrid porcine model. *J R Army Med Corps.* 2019;165(3):147-51. <http://dx.doi.org/10.1136/jramc-2018-000972>. PMID:30228195.
- Florescu MC, Runge J, Lof J, et al. Surgical technique of placement of an external jugular tunneled hemodialysis catheter in a large pig model. *J Vasc Access.* 2018;19(5):473-6. <http://dx.doi.org/10.1177/1129729818760964>. PMID:29557223.
- Kotsougiani D, Willems JI, Shin AY, Friedrich PF, Hundepool CA, Bishop AT. A new porcine vascularized tibial bone allotransplantation model: anatomy and surgical technique. *Microsurgery.* 2018;38(2):195-202. PMID:29131389.
- Kloster BO, Lund L, Lindholt JS. Laparo- and thoracoscopic aortic aneurysm neck optimization and treatment of potential endoleaks type IA and II in a porcine model. *Ann Med Surg.* 2015;5:5-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amsu.2015.11.002>. PMID:26793311.
- Swindle MM. Swine in the laboratory: surgery, anesthesia, imaging and experimental techniques. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group; 2007. p. 214-52. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420009156>.
- Genain MA, Morlet A, Herrtage M, et al. Comparative anatomy and angiography of the cardiac coronary venous system in four species: human, ovine, porcine, and canine. *J Vet Cardiol.* 2018;20(1):33-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvc.2017.10.004>. PMID:29191414.
- Habib CA, Utriainen D, Peduzzi-Nelson J, et al. MR imaging of the yucatan pig head and neck vasculature. *J Magn Reson Imaging.* 2013;38(3):641-9. <http://dx.doi.org/10.1002/jmri.24003>. PMID:23348984.
- Kim SH. Doppler US and CT diagnosis of nutcracker syndrome. *Korean J Radiol.* 2019;20(12):1627. <http://dx.doi.org/10.3348/kjr.2019.0084>. PMID:31854150.
- Sankaran L, Ramachandran R, Bala Raghu Raji V, Periasamy Varadaraju P, Panneerselvam P, Radhakrishnan PR. The role of multidetector CT angiography in characterizing vascular compression syndromes of the abdomen. *Egypt J Radiol Nucl Med.* 2019;50(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1186/s43055-019-0063-2>.
- Sablón González N, Lorenzo Villalba N, Parodis López Y, González Díaz P, Boada Díaz J, Kechida M. Nutcracker syndrome. *Medicina.* 2019;79(2):150-3. PMID:31048282.
- White JM, Comerota AJ. Venous compression syndromes. *Vasc Endovascular Surg.* 2017;51(3):155-68. <http://dx.doi.org/10.1177/1538574417697208>. PMID:28330436.
- Jayaraj A, Buck W, Knight A, Johns B, Raju S. Impact of degree of stenosis in May-Thurner syndrome on iliac vein stenting. *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord.* 2019;7(2):195-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvsv.2018.10.001>. PMID:30553783.
- Kunio M, Wong C, Markham PM, Edelman ER. Sex differences in the outcomes of stent implantation in mini-swine model. *PLoS One.* 2018;13(1):e0192004. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0192004>. PMID:29377941.
- von Trotha KT, Butz N, Grommes J, et al. Vascular anatomy of the small intestine - a comparative anatomic study on humans and pigs. *Int J Colorectal Dis.* 2015;30(5):683-90. <http://dx.doi.org/10.1007/s00384-015-2163-4>. PMID:25694139.
- Yoshida RA, Yoshida WB, Rollo HA, Kolvenbach R, Lorena SERS. Curva de aprendizado em cirurgia aórtica videolaparoscópica: estudo experimental em porcos. *J Vasc Bras.* 2008;7(3):231-8. <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-54492008000300008>.
- Nickel R, Schummer E, Seiferle E. The anatomy of the domestic animals: the circulatory system, the skin, and the cutaneous organs of the domestic mammals. Berlin: Springer-Verlag; 1981. p. 72-73. (vol. 3).
- Rosow DE, Sahani D, Strobel O, et al. Imaging of acute mesenteric ischemia using multidetector CT and CT angiography in a porcine model. *J Gastrointest Surg.* 2005;9(9):1262-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gassur.2005.07.034>. PMID:16332482.

29. White JM, Cannon JW, Stannard A, Markov NP, Spencer JR, Rasmussen TE. Endovascular balloon occlusion of the aorta is superior to resuscitative thoracotomy with aortic clamping in a porcine model of hemorrhagic shock. *Surgery*. 2011;150(3):400-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surg.2011.06.010>. PMID:21878225.
30. Chen Y, Tillman B, Go C, et al. A novel customizable stent graft that contains a stretchable ePTFE with a laser-welded nitinol stent. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2019;107(4):911-23. <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.b.34186>. PMID:30176119.
31. Prata MP, Jaldin RG, Lourenção PLTA, et al. Lesão aguda da parede arterial provocada pelo método de interrupção temporária de fluxo em diferentes vias de cirurgia aórtica: estudo morfológico e biomecânico da aorta de porcos. *J Vasc Bras*. 2020;19:e20190025. <http://dx.doi.org/10.1590/1677-5449.190025>. PMID:32499823.
32. Smith SA, McAlister VC. A novel REBOA system: prototype and proof of concept. *Can J Surg*. 2018;6(6):188-94. PMID:30417720.
33. Borger van der Burg BLS, van Schaik J, Brouwers JJWM, et al. Migration of Aortic Occlusion Balloons in an in vitro model of the human circulation. *Injury*. 2019;50(2):286-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2018.12.026>. PMID:30594315.
34. Che H, Jiang J, Liu H, Wei J, Zhang X. Preliminary report of a new type of braided vein stent in animals. *Phlebology*. 2019;34(4):246-56. <http://dx.doi.org/10.1177/0268355518801172>. PMID:30227789.
35. Kuckelman JP, Barron M, Moe D, et al. Extending the golden hour for Zone 1 resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta: Improved survival and reperfusion injury with intermittent versus continuous resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta in a porcine severe truncal hemorrhage model. *J Trauma Acute Care Surg*. 2018;85(2):318-26. <http://dx.doi.org/10.1097/TA.0000000000001964>. PMID:30080780.
36. Reva VA, Matsumura Y, Samokhvalov IM, et al. Defining degree of aortic occlusion for partial-REBOA: a computed tomography study on large animals. *Injury*. 2018;49(6):1058-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2018.04.021>. PMID:29699730.
37. Reva VA, Matsumura Y, Hörer T, et al. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta: what is the optimum occlusion time in an ovine model of hemorrhagic shock? *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2018;44(4):511-8. <http://dx.doi.org/10.1007/s00068-016-0732-z>. PMID:27738726.
38. Lam JH, O'Sullivan TD, Park TS, et al. Non-invasive dual-channel broadband diffuse optical spectroscopy of massive hemorrhage and Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta (REBOA) in swine. *Mil Med*. 2018;183(Suppl 1):150-6. <http://dx.doi.org/10.1093/milmed/usx163>. PMID:29635570.
39. Eggers MD, McArthur MJ, Figueira TA, et al. Pilot in vivo study of an absorbable polydioxanone vena cava filter. *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord*. 2015;3(4):409-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2015.03.004>. PMID:26992619.
40. Wang Z, Ashley DW, Kong L, Kang J, Nakayama DK, Dale PS. Nuclear factor- $\kappa$ B is activated in filter-implanted vena cava. *Cardiovasc Intervent Radiol*. 2019;42(4):601-7. <http://dx.doi.org/10.1007/s00270-018-2138-2>. PMID:30535787.

## Correspondence

Adenauer Marinho de Oliveira Góes Junior  
Rua Domingos Marreiros, 307/ 802  
CEP 66055-210 - Belém (PA), Brasil  
Tel: +55 (91) 98127-9656  
E-mail: adenauerjunior@gmail.com

## Author information

AMOGJ - Professor of Cirurgia Vasculare, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA); Postdoctoral candidate, Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).  
RHFC - Professor of Habilidades Cirúrgicas, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA); Veterinarian; PhD in Saúde e Produção Animal na Amazônia, Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).  
IPF - Professor of Bioestatística; Pharmacist, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA); PhD in Biologia Parasitária na Amazônia (PPGBPA/UEPA/IEC).  
EMR, FBAA and JHAS - Medical students, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA).  
CPO - Former medical student, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA).  
SCVA - Professor, Departamento de Cirurgia, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP); Mentor, Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).









## Author contributions

Conception and design: AMOGJ, SCVA  
Analysis and interpretation: AMOGJ, SCVA, RHFC, IPF  
Data collection: AMOGJ, RHFC, CPO, EMR  
Writing the article: AMOGJ, FBAA, CPO  
Critical revision of the article: AMOGJ, SCVA, RHFC, IPF, FBAA, EMR, JHAS, CPO  
Final approval of the article\*: AMOGJ, SCVA, RHFC, IPF, FBAA, EMR, JHAS, CPO  
Statistical analysis: IPF  
Responsabilidade geral pelo estudo: AMOGJ

\*All authors have read and approved of the final version of the article submitted to *J Vasc Bras*.

# Estudo de anatomia comparada suína por angiotomografia: contribuições para modelos de pesquisa e treinamento em cirurgia vascular e endovascular

## *Comparative angiotomographic study of swine vascular anatomy: contributions to research and training models in vascular and endovascular surgery*

Adenauer Marinho de Oliveira Góes Junior<sup>1,2</sup> , Rosa Helena de Figueiredo Chaves<sup>1</sup> , Ismari Perini Furlaneto<sup>1</sup> ,  
Emanuelle de Matos Rodrigues<sup>1</sup> , Flávia Beatriz Araújo de Albuquerque<sup>1</sup> , Jacob Hindrik Antunes Smit<sup>1</sup> ,  
Carolina Pinheiro de Oliveira<sup>1</sup> , Simone de Campos Vieira Abib<sup>2</sup> 

### Resumo

**Contexto:** Modelos com animais de médio e grande porte permitem que pesquisadores avaliem a eficácia e a segurança de procedimentos cardiovasculares em sistemas que se assemelham à anatomia humana e podem ser usados para simular cenários para fins de treinamento. Embora modelos suínos tenham sido extensivamente utilizados, muitos fatores fisiológicos e anatômicos permanecem desconhecidos ou apenas superficialmente descritos. **Objetivos:** Descrever a anatomia vascular do suíno por tomografia computadorizada, compará-la à anatomia humana e discutir a aplicação dos modelos porcinos em procedimentos abertos e endovasculares. **Métodos:** Três porcos machos da raça Landrace foram submetidos a tomografia computadorizada. A anatomia vascular de pescoço, tórax, abdome e membros foi analisada e descrita; foram destacadas similaridades e divergências relevantes entre a anatomia vascular de suínos e de humanos e as implicações em procedimentos vasculares nos suínos. **Resultados:** O território carotídeo, o arco aórtico e os ramos terminais da aorta em suínos apresentaram diferenças marcantes quando comparados aos de humanos. Foram detectadas compressões de veias renal e íliaca comum, ambas à esquerda, semelhantes às encontradas nas síndromes humanas de Nutcracker e May-Thurner. Medidas vasculares (diâmetro, comprimento e ângulos) de diferentes topografias de suínos foram fornecidas. **Conclusões:** Os dados fornecidos podem ser úteis para o planejamento de ensaios pré-clínicos e pesquisa básica, bem como para o refinamento do treinamento cirúrgico usando modelos suínos no campo da cirurgia vascular.

**Palavras-chave:** suínos; vasos sanguíneos; procedimentos cirúrgicos vasculares; anatomia comparada; procedimentos endovasculares; angiografia por tomografia computadorizada.

### Abstract

**Background:** Medium and large animal models allow researchers to evaluate the efficacy and safety of cardiovascular procedures in systems that resemble human anatomy and can be used to simulate scenarios for training purposes. Although porcine models have been used extensively, many physiological and anatomical features remain unknown or only superficially described. **Objectives:** To describe the normal porcine vascular anatomy on computed tomography scans, compare it to human vascular anatomy, and discuss the application of porcine models for open and endovascular procedures. **Methods:** Three male Landrace pigs underwent computed tomography. The vascular anatomy of the neck, thorax, abdomen, and limbs was analyzed and described; relevant similarities and differences between porcine and human vascular anatomies and the implications for vascular procedures in pigs are highlighted. **Results:** The carotid territory, aortic arch, and terminal aorta branches all show marked differences in pigs compared to their human counterparts. Compressions of both left renal and common iliac veins were detected, analogous to those seen in human Nutcracker and May-Thurner syndromes. Vascular measurements (diameters, lengths, and angles) of several different porcine territories are presented. **Conclusions:** The data presented should be useful for planning preclinical trials and basic research and for refining surgical training using porcine models in vascular fields.

**Keywords:** pigs; blood vessels; vascular surgical procedures; anatomy, comparative; endovascular procedures; computed tomography angiography.

**Como citar:** Góes Junior AMO, Chaves RHF, Furlaneto IP, et al. Estudo de anatomia comparada suína por angiotomografia: contribuições para modelos de pesquisa e treinamento em cirurgia vascular e endovascular. J Vasc Bras. 2021;20:e20200086. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.200086>

<sup>1</sup> Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA, Curso de Medicina, Belém, PA, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, São Paulo, SP, Brasil.

Fonte de financiamento: Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA), Belém, PA, Brasil.

Conflito de interesse: Os autores declararam não haver conflitos de interesse que precisam ser informados.

Submetido em: Junho 15, 2020. Aceito em: Agosto 26, 2020.

O estudo foi realizado em parceria entre o Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), São Paulo, SP, Brasil e a Faculdade de Medicina, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA), Belém, PA, Brasil.



Copyright© 2021 Os autores. Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

## ■ INTRODUÇÃO

Doenças cardiovasculares estão entre os principais problemas de saúde e representam tema primordial de pesquisa biomédica<sup>1</sup>. Alguns estudos preliminares foram realizados em animais de menor porte (camundongos, ratos e coelhos), por apresentarem boa relação custo-benefício<sup>2</sup>. Primatas não humanos (por exemplo, babuínos) também são utilizados quando há necessidade de testes com dispositivos maiores, mas o custo e a complexidade das questões éticas são fatores limitantes. Modelos ovinos e suínos representam uma importante opção para pesquisas na área da cirurgia vascular<sup>2-4</sup>. Esses animais permitem aos pesquisadores a avaliação da eficácia e da segurança de procedimentos cardiovasculares em sistemas com anatomia semelhante à humana e que podem ser usados em treinamento<sup>1</sup>.

Há muito tempo suínos são utilizados como modelo cirúrgico, particularmente porque apresentam um preço razoável e sua anatomia e fisiologia cardiovasculares são semelhantes às dos seres humanos<sup>1,3-8</sup>. A anatomia e fisiologia cardíaca suínas foram mais estudadas, como demonstram os estudos sobre distribuição de artérias coronárias, função ventricular, metabolismo cardíaco, eletrofisiologia e desenvolvimento de circulação colateral após infarto agudo do miocárdio<sup>1</sup>.

A recente publicação do genoma e a possibilidade de modificação genética dos suínos aumentaram ainda mais a importância do modelo porcino em pesquisa médica<sup>4</sup>. Um fator chave para o desenvolvimento de modelos experimentais e de treinamento é o conhecimento da anatomia e suas variações<sup>5</sup>. Trabalhos clássicos, baseados em disseções cirúrgicas, como *The anatomy of domestic animals*, foram publicados em 1910<sup>9</sup>, seguidos por outros que descreveram o uso de suínos para uma variedade de procedimentos<sup>1,2,5-8,10-16</sup>.

Nas últimas décadas, houve aumento na complexidade das cirurgias abertas e endovasculares. Métodos de imagem não invasivos, como tomografia computadorizada (TC), tornaram-se rotineiros no planejamento terapêutico e no acompanhamento de casos, e estão progressivamente substituindo a angiografia tradicional. Apesar dos avanços técnicos, há carência de descrições detalhadas da anatomia vascular extracárdica de suínos<sup>3,5,6,13</sup>.

O objetivo deste estudo foi descrever as características da anatomia vascular de suínos por TC, compará-la à anatomia humana e discutir a aplicação de modelos porcinos para procedimentos cirúrgicos abertos e endovasculares.

## ■ MÉTODOS

Este estudo foi aprovado pelo comitê institucional de ética em experimentação animal.

Três porcos machos da raça *Landrace* foram utilizados para a aquisição de imagens de TC. Seus pesos eram 45,4 kg, 49,2 kg e 52,3 kg. Os animais foram mantidos em alojamento padrão (controle de temperatura e umidade) e permaneceram em jejum 12 horas antes dos exames.

### Protocolo anestésico

O procedimento foi realizado sob anestesia geral e monitoramento por médico veterinário. Para pré-medicação, foram utilizadas injeção intramuscular de cetamina (15 mg/kg) e xilazina (1,5 mg/kg).

Indução anestésica se deu por injeção intravenosa de propofol (2,5-5 mg/kg); a manutenção foi realizada com infusão contínua do mesmo medicamento (0,1-0,2 mg/kg/min). Os animais foram posicionados em decúbito ventral durante a aquisição das imagens. Não houve necessidade de intubação.

### Tomografia computadorizada

As imagens foram obtidas em um tomógrafo de 64 canais, com cortes de 0,625 mm. O contraste iodado endovenoso utilizado foi o loexol (120 mL em velocidade de fluxo de 5 mL/s). As medidas vasculares foram obtidas na fase arterial pela técnica de *bolus-tracking*, e a fase venosa foi iniciada imediatamente após a arterial.

Após a realização da TC, os animais foram utilizados no ensino de habilidades cirúrgicas na instituição e, em seguida, submetidos a eutanásia por injeção intravenosa de cloreto de potássio.

### Análise das imagens

Utilizou-se a plataforma Horos<sup>TM</sup> v3.1.0 (Horosproject.org). Para descrições anatômicas, os termos “ventral” e “dorsal” foram adotados como correspondentes a “anterior” e “posterior” em humanos. Da mesma forma, “cranial” e “caudal” foram utilizados como equivalentes a “superior” e “inferior”<sup>17</sup>.

Os maiores diâmetros dos vasos foram medidos em dois eixos perpendiculares, obtendo-se a seguir o diâmetro médio naquela topografia.

As medidas foram feitas em marcos anatômicos relacionados a procedimentos cirúrgicos e endovasculares, como angioplastias viscerais, implante de filtro de veia cava e endopróteses de aorta (Figura 1).

### Análise estatística

Utilizou-se o software Prism 6 (*Graphpad Software*, La Jolla, EUA). Foram determinadas média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação (CV).

■ RESULTADOS

**Anatomia arterial**

Em relação às carótidas, as externas apresentaram diâmetro maior que as internas.

A aorta apresentou estreitamento acentuado e progressivo desde sua origem até sua porção distal,

com diâmetro médio de 25 mm na aorta ascendente e de 9,8 mm na aorta terminal.

Entre os ramos viscerais, a artéria mesentérica cranial apresentou maior diâmetro, seguida pela artéria celiaca; a mesentérica caudal teve o menor diâmetro. Os diâmetros arteriais são mostrados na Tabela 1.

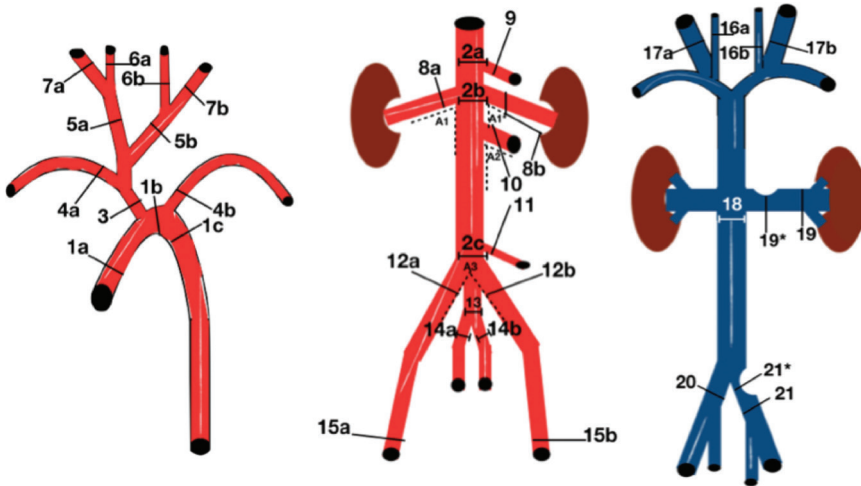


Figura 1. Ilustração dos pontos de referência para as medidas. \*: ponto de aferição do diâmetro venoso no ponto de compressão.

Tabela 1. Diâmetros arteriais.

Diâmetro arterial	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV%
Aorta ascendente (1a)	22,9	28,2	25,0	2,8	11,1
Arco aórtico (1b)	18,7	24,1	21,5	2,7	12,5
Aorta descendente (1c)	16,4	22,5	19,4	3,0	15,6
Aorta a (2a)	12,1	13,4	12,9	0,7	5,4
Aorta abdominal (2b)	8,7	11,1	10,2	1,3	12,6
Aorta abdominal (2c)	9,1	10,8	9,8	0,9	9,1
Tronco braquiocefálico (3)	10,6	13,0	11,5	1,3	11,3
Artéria subclávia direita (4a)	4,3	6,8	5,8	1,4	23,5
Artéria subclávia esquerda (4b)	4,4	6,2	5,6	1,1	19,1
Carótida comum direita (5a)	4,0	5,6	4,8	0,8	17,0
Carótida comum esquerda (5b)	4,7	5,4	4,9	0,4	7,8
Carótida interna direita (6a)	3,5	4,0	3,8	0,3	7,7
Carótida interna esquerda (6b)	3,4	3,7	3,5	0,2	5,0
Carótida externa direita (7a)	4,5	5,5	5,0	0,5	10,6
Carótida externa esquerda (7b)	5,1	5,8	5,4	0,4	6,8
Artéria renal direita (8a)	3,5	5,1	4,4	0,8	18,9
Artéria renal esquerda (8b)	5,1	5,7	5,3	0,4	6,7
Tronco celiaco (9)	4,8	7,1	6,2	1,2	19,6
Artéria mesentérica cranial (10)	6,9	8,2	7,4	0,7	9,8
Artéria mesentérica caudal (11)	2,0	2,6	2,4	0,3	13,6
Artéria ilíaca externa direita (12a)	5,4	8,2	7,2	1,6	22,0
Artéria ilíaca externa esquerda (12b)	6,1	7,3	6,7	0,6	8,6
Tronco ilíaco interno (13)	4,7	8,0	6,1	1,7	28,4
Artéria ilíaca interna direita (14a)	3,7	4,7	4,3	0,6	12,7
Artéria ilíaca interna esquerda (14b)	3,8	4,3	4,1	0,3	6,4
Artéria femoral superficial direita (15a)	4,9	6,4	5,8	0,8	13,7
Artéria femoral superficial esquerda (15b)	4,8	5,6	5,3	0,4	8,2

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; números e letras entre parênteses (por exemplo, 1a) correspondem aos pontos de medidas na Figura 1.

Um animal apresentou artéria renal esquerda mais caudal que a direita; nos outros dois animais, ambas as renais emergiam no mesmo nível da aorta. Os ângulos das artérias renais em relação à aorta diferiram amplamente, de 82,5° a 114,5° (média de 96,8°) à direita e de 76,8° a 116,3° (média de 93,8°) à esquerda.

O comprimento da artéria femoral superficial direita (na altura da cabeça do fêmur) até a aorta terminal (L1) foi em média de 12,9 cm. A partir do mesmo ponto, o comprimento médio foi de 22,1 cm até a artéria renal mais caudal (L2), 30 cm até a artéria celiaca (L3), e 58,9 cm até a artéria subclávia esquerda (L4). Ângulos arteriais e comprimentos estão dispostos na Tabela 2.

### Diâmetros venosos

As jugulares externas apresentaram diâmetro muito maior que as internas. O diâmetro médio da jugular externa direita foi 9,2 mm, enquanto que o da esquerda foi de 8,6 mm; já a jugular interna apresentou diâmetro médio de 4 mm no lado direito e 4,5 mm no lado esquerdo.

O diâmetro médio da veia cava caudal, proximalmente ao nível da veia renal mais caudal, foi de 10,5 mm.

Devido à detecção de estreitamento na veia renal esquerda entre a aorta e a artéria mesentérica cranial (semelhante à síndrome de Nutcracker), as medidas foram feitas no hilo renal (diâmetro médio de 5,8 mm) e no ponto de compressão máxima (diâmetro médio de 2,8 mm).

O diâmetro médio da veia ilíaca comum direita foi de 7,2 mm; o diâmetro médio da veia ilíaca comum esquerda foi de 6,9 mm proximalmente à confluência com a cava e 2,6 mm no ponto de compressão máxima entre a aorta e as vértebras adjacentes (semelhante à síndrome de May-Thurner). Diâmetros venosos são exibidos na Tabela 3.

### Coefficientes de variação

As maiores variações (> 20%) foram detectadas nos seguintes pontos: veia renal esquerda no ponto de compressão máxima (CV = 29,6%), tronco ilíaco interno (CV = 28,4%), artéria subclávia direita (CV = 23,5%), artéria ilíaca externa direita (CV = 22,0%) e ângulo de emergência da artéria renal esquerda (CV = 21,7%).

Algumas informações anatômicas relacionadas à anatomia arterial e venosa são ilustradas nas Figuras 2 a 6.

Tabela 2. Ângulos e comprimentos arteriais.

Ângulos/comprimento arterial	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV%
Ângulo da artéria renal direita (A1)	82,5	114,5	96,8	16,3	16,8
Ângulo da artéria renal esquerda (A1*)	76,8	116,3	93,8	20,3	21,7
Ângulo aórtico-mesentérico (A2)	64,5	87,2	74,8	11,5	15,4
Ângulo das artérias ilíacas externas (A3)	31,7	44,0	36,6	6,5	17,8
Comprimento aórtico-femoral (L1)	12,4	13,5	12,9	0,5	4,0
Comprimento femoral-renal (L2)	19,9	23,6	22,1	1,9	8,6
Comprimento femoral-celiaca (L3)	27,0	31,6	30,0	2,6	8,6
Comprimento femoral-subclávia (L4)	52,9	62,0	58,9	5,2	8,9

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; números e letras entre parênteses (por exemplo, A1) correspondem aos pontos de medidas na Figura 1. L1, L2, L3 e L4 representam os comprimentos entre a artéria femoral superficial (na altura da cabeça do fêmur) e os seguintes pontos: aorta terminal, artéria renal mais caudal, artéria celiaca e artéria subclávia esquerda, respectivamente.

Tabela 3. Diâmetros venosos.

Diâmetro venoso	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV%
Jugular interna direita (16a)	3,6	4,3	4,0	0,4	9,2
Jugular interna esquerda (16b)	3,8	5,4	4,5	0,8	17,2
Jugular externa direita (17a)	8,0	10,5	9,2	1,3	13,8
Jugular externa esquerda (17b)	7,7	9,2	8,6	0,8	9,5
Veia cava caudal (18)	9,2	11,7	10,5	1,2	11,8
Veia renal esquerda [H] (19)	5,3	6,4	5,8	0,5	9,4
Veia renal esquerda [CP] (19*)	1,8	3,4	2,8	0,8	29,6
Veia ilíaca comum direita (20)	6,5	7,9	7,2	0,7	10,2
Veia ilíaca comum esquerda (21)	6,6	7,4	6,9	0,4	5,7
Veia ilíaca comum esquerda [CP] (21*)	2,3	2,8	2,6	0,3	11,0

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; H = hilo renal; CP = ponto de compressão; números e letras entre parênteses (por exemplo, 16a) correspondem aos pontos medidos na Figura 1.



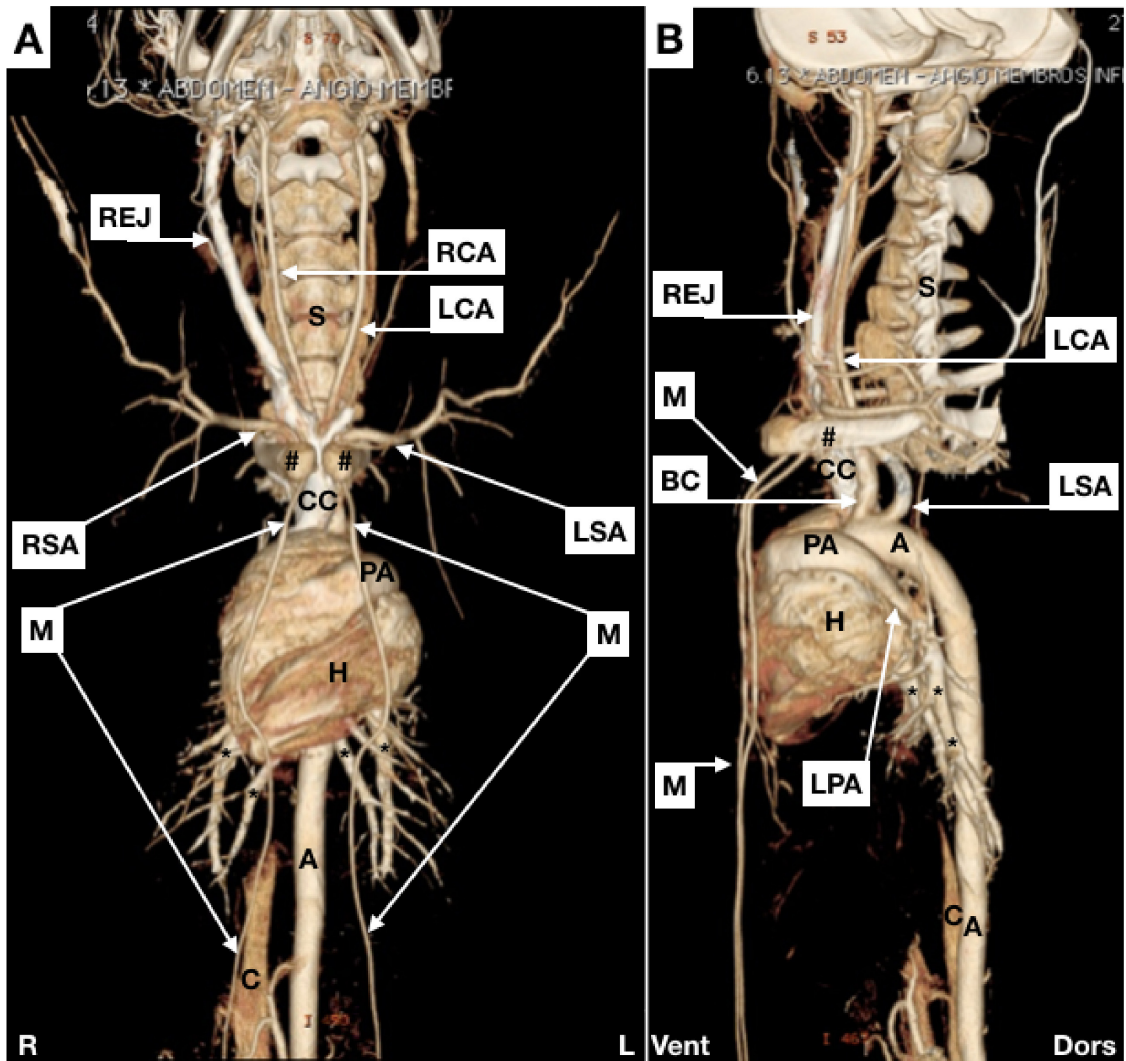


Figura 2. Imagens em projeção de intensidade máxima (*maximal intensity projection, MIP*). (A) visão frontal; (B) visão lateral. REJ = veia jugular externa direita; RCA = carótida comum direita; LCA = carótida comum esquerda; S = coluna vertebral; # = clavículas; CC = veia cava cranial; RSA = artéria subclávia direita; LSA = artéria subclávia esquerda; M = artérias mamárias; PA = artéria pulmonar (tronco); H = coração; A = aorta; C = veia cava caudal; R = direita; L = esquerda; BC = artéria braquiocefálica; LPA = artéria pulmonar esquerda; \* = ramos das artérias pulmonares; Vent = ventral; Dors = dorsal.

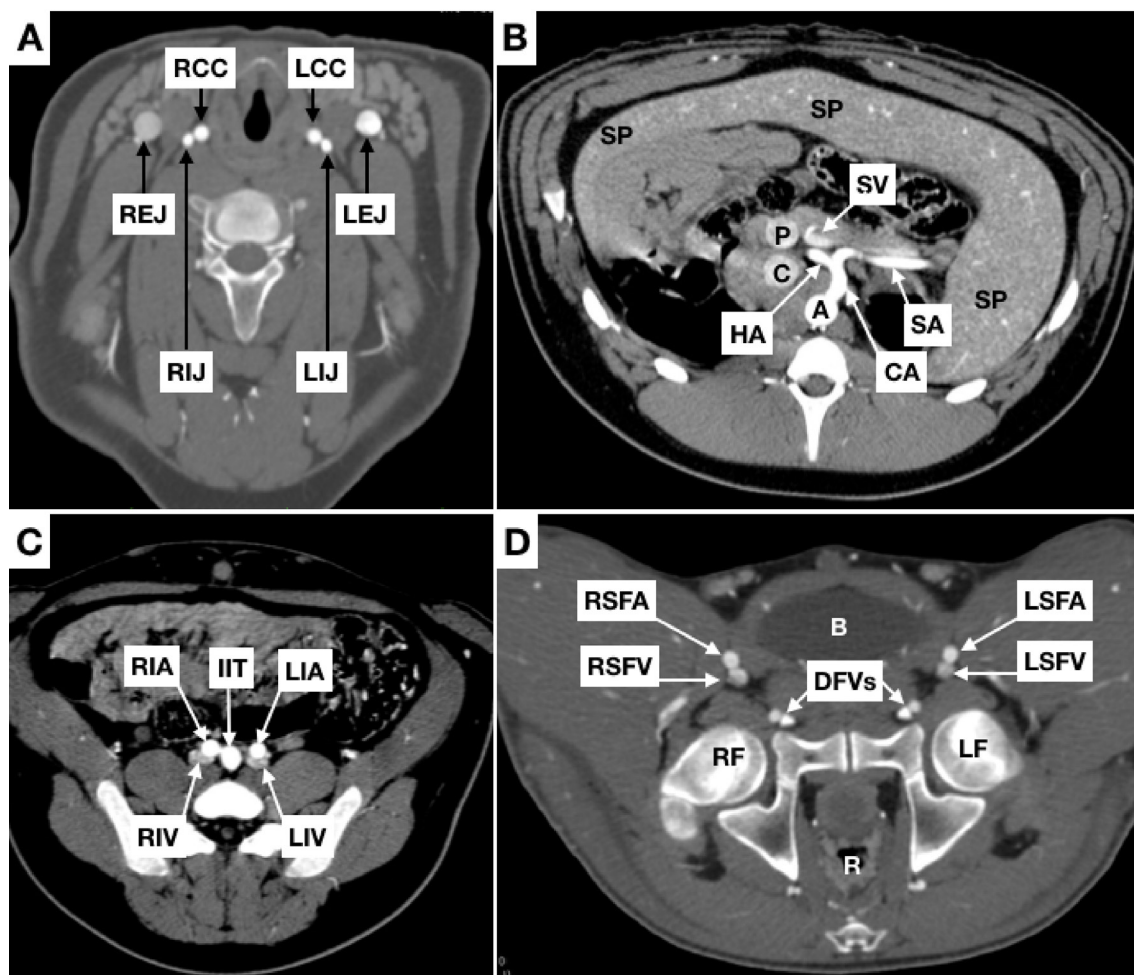
### Anatomia suína x humana

O arco aórtico porcino dá origem a dois ramos: artérias braquiocefálica e subclávia esquerda; em humanos, essa estrutura origina, normalmente, os três ramos supra-aórticos. A partir da artéria braquiocefálica, emergem a artéria subclávia direita e o tronco bicarotídeo, que origina as carótidas comuns (Figura 2).

Outra disparidade ocorre na bifurcação carotídea. Em humanos, a artéria carótida comum apresenta um bulbo e bifurca-se em carótidas interna e externa. Já em suínos, a artéria carótida externa emerge como continuidade da carótida comum e é mais calibrosa que a interna.

Apesar de não fazer parte do objetivo desta pesquisa descrever a anatomia da região cefálica, destacam-se diferenças em comparação à circulação humana, como a presença de múltiplas comunicações extracranianas entre as artérias carótidas externa e interna e da *rete mirabile*, uma complexa rede arteriolar epidural com formato ovoide<sup>2,6,9,18</sup>.

No que diz respeito às singularidades venosas, divergindo dos humanos, a jugular externa é quase tão profunda quanto a interna, porém está localizada em um compartimento diferente. Também é muito mais calibrosa que a interna, a qual cursa paralela à carótida (Figura 3A). Além disso, as jugulares internas e externas de cada lado se fundem à veia



**Figura 3.** Cortes coronais. (A) pescoço; (B) abdome; (C) e (D) pelve. RCC = carótida comum direita; LCC = carótida comum esquerda; REJ = veia jugular externa direita; LEJ = veia jugular externa esquerda; RIJ = veia jugular interna direita; LIJ = veia jugular interna esquerda; A = aorta; C = veia cava caudal; P = veia porta; CA = artéria celiaca; SA = artéria esplênica; HA = artéria hepática; SV = veia esplênica; SP = baço; RIA = artéria ílica externa direita; LIA = artéria ílica externa esquerda; RIV = veia ílica comum direita; LIV = veia ílica comum esquerda; IIT = tronco ílico interno; RSFA = artéria femoral superficial direita; LSFA = artéria femoral superficial esquerda; RSFV = veia femoral superficial direita; LSFV = veia femoral superficial esquerda; DFVs = vasos femorais profundos (artérias e veias); B = bexiga; R = reto; RF = fêmur direito; LF = fêmur esquerdo.

subclávia, formando um tronco curto que, ao se unir ao contralateral equivalente, origina a cava cranial.

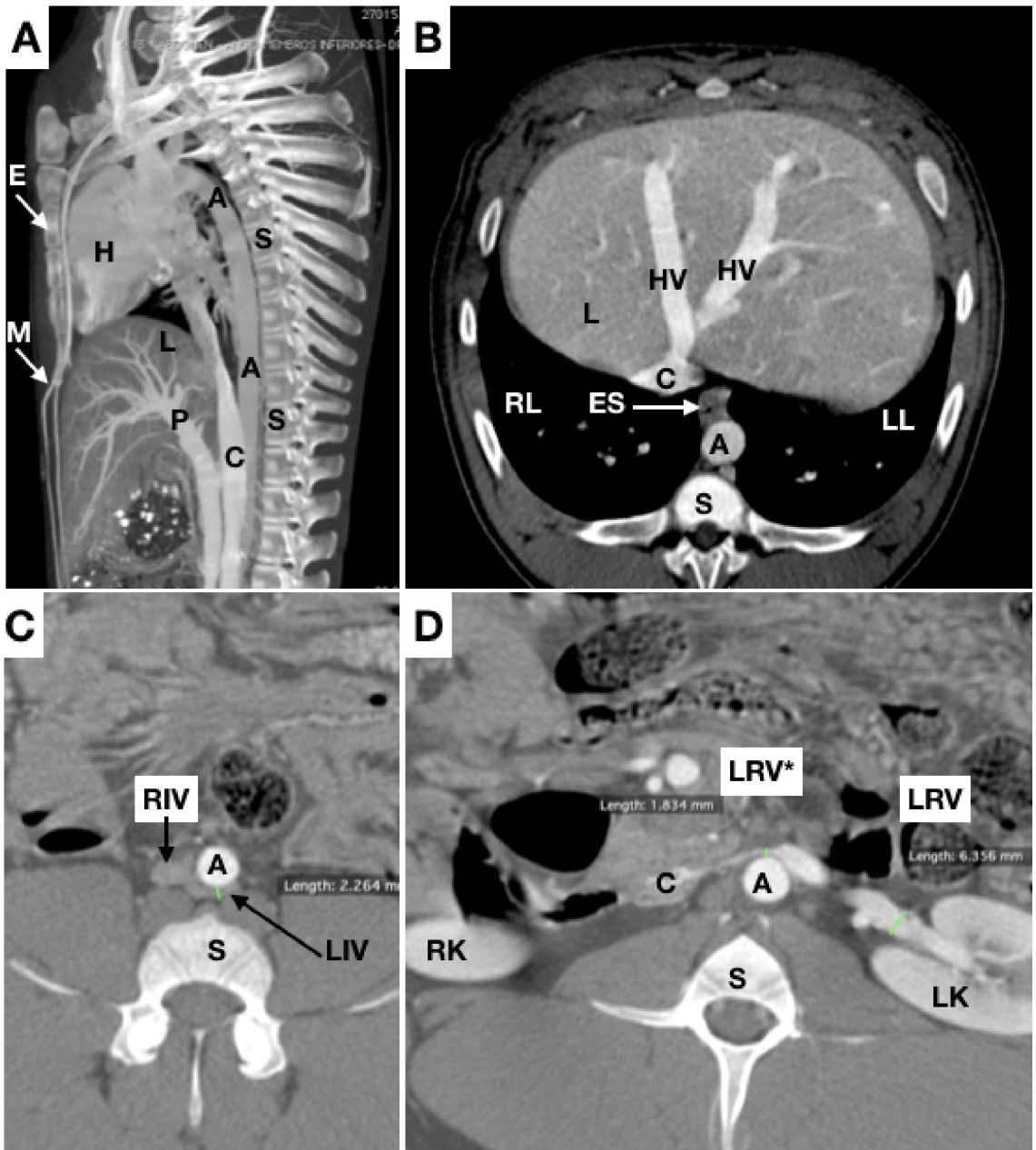
O segmento torácico da cava caudal é muito mais longo que o equivalente no humano (segmento torácico da veia cava inferior) e possui uma porção circundada por parênquima pulmonar. A cava caudal atravessa o diafragma e recebe as veias hepáticas, semelhante ao segmento retro-hepático da cava inferior humana (Figura 4B).

Na veia cava caudal desembocam as veias renais. Suínos podem apresentar um importante estreitamento na veia renal esquerda, entre a aorta abdominal e a artéria mesentérica cranial, análogo à síndrome de Nutcracker em humanos<sup>19-21</sup> (Figuras 4C e 4D).

A aorta abdominal emite as artérias celiaca, mesentéricas cranial e caudal, e renais direita e esquerda, em diferentes ângulos (Figuras 5A e 5D).

Suínos não possuem artéria ílica “comum”, pois a aorta termina em “trifurcação”, emitindo artérias ílicas externas direita e esquerda e o tronco ílico interno, que por sua vez origina as artérias ílicas internas direita e esquerda e a artéria sacral mediana (Figuras 5B, 6A e 6B).

A artéria ílica externa continua como artéria femoral. De forma divergente ao observado em humanos, a artéria femoral (equivalente à femoral comum em humanos), ainda intrapélvica, ramifica-se em artérias femorais superficial e profunda; a artéria na projeção



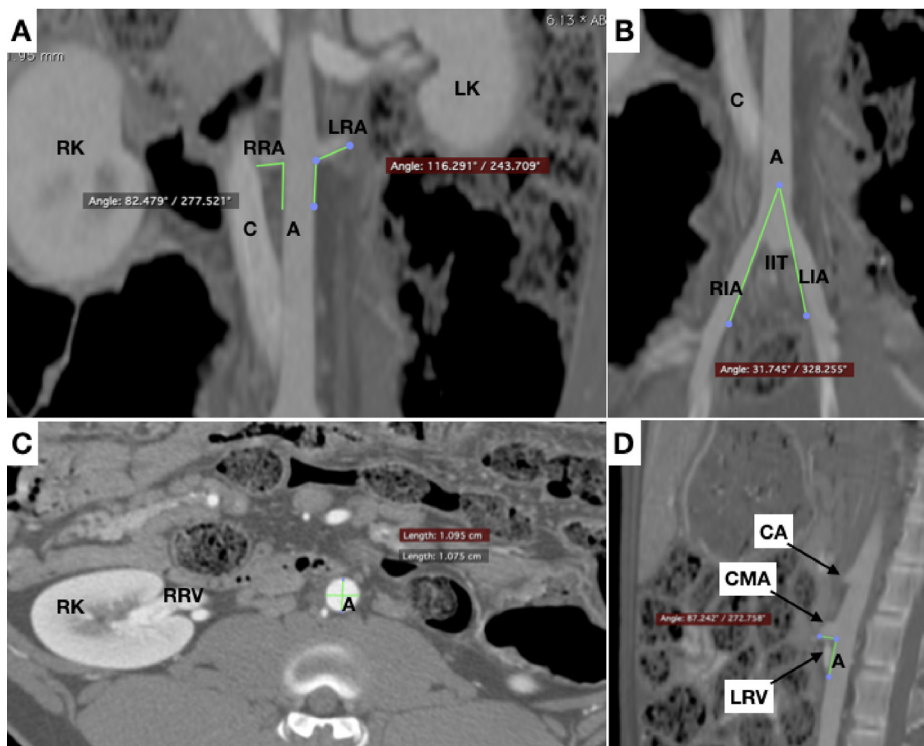
**Figura 4.** (A) corte sagital; (B), (C) e (D) cortes axiais. A = aorta; C = veia cava caudal; P = veia porta; L = fígado; S = coluna vertebral; E = esterno; HV = veia hepática; M = artérias mamárias; H = coração; ES = esôfago; RL = pulmão direito; LL = pulmão esquerdo; LRV = veia renal esquerda; LRV\* = comprimido entre a aorta e a artéria mesentérica cranial; RIV = veia íliaca comum direita; LIV = veia íliaca comum; RK = rim direito; LK = rim esquerdo.

da cabeça do fêmur é a femoral superficial, enquanto que os vasos femorais profundos percorrem um trajeto próximo ao púbis (Figuras 3D e 6C).

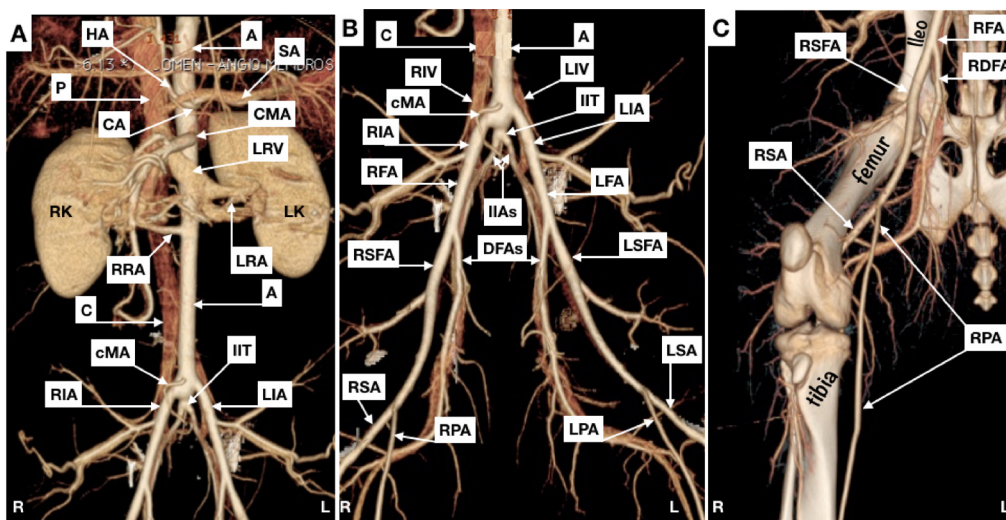
A anatomia venosa pélvica assemelha-se à humana: as veias íliacas interna e externa fundem-se em veias íliacas comuns, que confluem formando a veia cava caudal. Detectamos ocorrência de compressões da veia íliaca comum esquerda, análogas à síndrome

de May-Thurner; contudo, nos suínos o estreitamento venoso ocorre entre a aorta e a coluna vertebral, e não entre a artéria íliaca comum direita e a coluna vertebral, como em humanos<sup>22,23</sup> (Figura 4C).

O suprimento arterial dos membros posteriores diverge bastante daquele equivalente em humanos. A artéria femoral superficial, no terço médio do fêmur, divide-se nas artérias safena e poplítea. A artéria safena



**Figura 5.** (A) e (B) Cortes coronais, aferição dos ângulos entre as artérias renais e a aorta e entre as artérias ilíacas externas (trifurcação da aorta), respectivamente; (C) Corte axial para medir diâmetro aórtico; (D) Corte sagital para medir o ângulo entre a aorta e a artéria mesentérica anterior. A = aorta; C = veia cava caudal; RRA = artéria renal direita; LRA = artéria renal esquerda; RK = rim direito; LK = rim esquerdo; RIA = artéria ilíaca externa direita; LIA = artéria ilíaca externa esquerda; IIT = tronco ilíaco interno; RRV = veia renal direita; CA = artéria celíaca; CMA = artéria mesentérica cranial; LRV = veia renal esquerda.



**Figura 6.** Imagens em projeção de intensidade máxima (*maximal intensity projection, MIP*). (A) abdome (visão frontal); (B) pelve (visão frontal); (C) membro direito posterior (visão frontal). HA = artéria hepática; A = aorta; SA = artéria esplênica (parcialmente sobreposta pela veia esplênica); P = veia porta; CA = artéria celíaca; CMA = artéria mesentérica cranial; LRV = veia renal esquerda; RK = rim direito; LK = rim esquerdo; RRA = artéria renal direita; LRA = artéria renal esquerda; C = veia cava caudal; cMA = artéria mesentérica caudal; IIT = tronco ilíaco interno; RIA = artéria ilíaca externa direita; LIA = artéria ilíaca externa esquerda; R = direita; L = esquerda; RIV = veia ilíaca comum direita; LIV = veia ilíaca comum esquerda; RFA = artéria femoral comum direita; LFA = artéria femoral comum esquerda; IIA = artérias ilíacas internas; RSFA = artéria femoral superficial direita; DFAs = artérias femorais profundas (parcialmente sobrepostas pela veia femoral profunda); LSFA = artéria femoral superficial esquerda; RSA = artéria safena direita; RPA = artéria poplíteia direita; LPA = artéria poplíteia esquerda; LSA = artéria safena esquerda; RDFA = artéria femoral profunda direita.

emite ramos que suprem grande parte da musculatura, inclusive as artérias digitais plantares e dorsais. A artéria poplítea se anterioriza através da membrana interóssea, passando a ser denominada artéria tibial cranial e fornecendo vários ramos musculares.

## ■ DISCUSSÃO

### Modelos suínos para treinamento e experimentação

Animais de experimentação são frequentemente utilizados para avaliar a eficácia e a segurança de novos tratamentos antes da aplicação em ensaios clínicos<sup>1-7,9-15,24</sup>. Embora suínos tenham sido extensivamente utilizados em várias áreas, como genômica, transplante de órgãos, oncologia, trauma, doenças neurológicas e cardiovasculares<sup>2-4,10,18</sup>, muitos fatores fisiológicos e anatômicos importantes continuam desconhecidos ou superficialmente descritos<sup>1,5,25</sup>.

A literatura apresenta várias descrições anatômicas discordantes, como a da “bifurcação” da aorta<sup>3,6,26</sup>, que em suínos é, na verdade, uma “trifurcação”. Além disso, as artérias subclávias<sup>3,6,11,15,27</sup>, que surgem da artéria braquiocefálica no lado direito e do arco aórtico no lado esquerdo, suprimindo os membros anteriores do animal, são ocasionalmente chamadas de artérias braquiais<sup>9</sup>; outro exemplo são as artérias mesentéricas anterior e posterior<sup>9</sup>, para as quais também se encontram descrições como superior<sup>3,11,28</sup> e inferior<sup>3,11,15,28</sup> ou cranial e caudal<sup>6</sup>.

Diferentes raças têm sido usadas em pesquisa vascular. Porcos *Yucatan* foram utilizados para estudos envolvendo cateteres de hemodiálise, pois essa raça para de crescer após 1 ano de idade, com peso médio de 70 kg, tornando-os apropriados para esse propósito<sup>13</sup>. Essa mesma raça, aos 3 meses de idade, com peso entre 32,4 e 34,5 kg, foi utilizada para anastomoses vasculares microcirúrgicas em um modelo de transplante de tibia<sup>9</sup>; e, com 4 meses de idade, foi usada para avaliar a diferença entre os gêneros, em relação aos resultados de stents coronarianos<sup>24</sup>.

A raça de miniporco *Göttingen* foi utilizada em estudos de anatomia vascular por tomografia, mais especificamente com enfoque em problemas pediátricos, visto que, com 11 semanas de vida, esses animais têm o peso aproximado do ser humano ao nascer<sup>3</sup>, com um perfil adequado para esses projetos.

Porcos da raça *Landrace*, a mesma utilizada no presente estudo, pesando aproximadamente 55 kg, foram utilizados no desenvolvimento experimental de aneurismas de aorta e no tratamento de *endoleaks* tipos IA e II por laparoscopia e toracoscopia<sup>13</sup>. Com peso entre 70 e 95 kg, foram usados para pesquisa com

oclusão resuscitativa por balão endovascular da aorta (*resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta*, REBOA)<sup>29</sup>. Suínos *Landrace* com peso entre 20 e 30 kg também foram utilizados com sucesso para o treinamento de cirurgia aórtica por videolaparoscopia<sup>26</sup>. Em 1998, um estudo de anatomia radiológica feito em porcos *Landrace* pesando entre 20 e 25 kg descreveu aspectos angiográficos de cérebro, cabeça, pescoço, tórax, abdome e pelve<sup>6</sup>.

A opção por estudar essa raça, além de esta já ter sido utilizada em treinamentos e pesquisas de várias técnicas cirúrgicas abertas e endovasculares, se deve ao fato de a raça estar facilmente disponível e ser adequada a uma variedade de procedimentos, dependendo da idade, do tamanho e do peso do animal.

Com o tempo, a angiotomografia computadorizada (angio-TC) superou a angiografia convencional em muitos cenários, devido às suas diversas vantagens, como a economia e a rapidez para mobilizar profissionais necessários para execução. Também é menos invasiva e mórbida e, por isso, representa a modalidade de escolha para o sistema circulatório em diversas situações<sup>28</sup>. No entanto, descrições da anatomia vascular suína por tomografia são limitadas<sup>5</sup>.

### Considerações sobre modelos de treinamento e pesquisa em procedimentos vasculares

#### a) Acesso vascular

O acesso vascular, utilizando a técnica de Seldinger, pode ser realizado por punção guiada por ultrassonografia ou dissecação cirúrgica<sup>1</sup>. A dissecação da artéria femoral é realizada na artéria femoral superficial e não na femoral comum, devido ao fato de esta ser intrapélvica nos suínos. Durante a dissecação da carótida comum, devem-se evitar lesões da cadeia simpática, localizada dentro da bainha carotídea, medial e dorsal ao nervo vago, o que pode resultar em síndrome de Horner. Vasodilatadores locais podem ser necessários durante a manipulação do território carotídeo, pois o espasmo ocorre com facilidade<sup>1</sup>. Assim como nos seres humanos, a relação próxima entre o esôfago e a artéria carótida comum esquerda deve ser lembrada.

#### b) Coagulação

Comparados aos humanos, suínos apresentam hipercoagulabilidade, tornando a anticoagulação intraoperatória muito importante<sup>1,30</sup>. Como na prática clínica, administra-se heparina intravenosa (100-300 unidades/kg), mantendo o tempo de coagulação ativado  $\geq 250$  s<sup>7</sup>. Dependendo do procedimento (implante de stent, *bypass* com próteses,

por exemplo), complementa-se a terapia antitrombótica com ácido acetilsalicílico e/ou clopidogrel no período pós-operatório<sup>1,11</sup>.

#### c) Stents

O diâmetro deve ser apropriado ao vaso no qual serão implantados, com sobredimensionamento mínimo (1,0 a 1,1 vezes o diâmetro do vaso), para evitar que lesões mecânicas por dilatação excessiva gerem dados não fidedignos sobre segurança e eficácia, enquanto que stents muito pequenos podem migrar<sup>1</sup>. Resultados apresentados nas Tabelas 1 e 3 podem auxiliar na escolha do diâmetro dos stents.

As artérias devem ser cuidadosamente selecionadas, para que os stents sejam implantados em vasos com características semelhantes às dos tratados na prática clínica. Isso é particularmente importante ao usar stents farmacológicos, pois vasos com características histológicas distintas podem responder de forma variada ao princípio ativo liberado<sup>1</sup>.

#### d) Oclusão aórtica

Na prática cirúrgica, a oclusão aórtica frequentemente é feita pela aplicação de pinças ou pela insuflação intraluminal de balões. Um estudo experimental em suínos, o qual incluiu análises histológicas e biomecânicas, revelou que os danos parietais e consequente diminuição da resistência aórtica são mais intensos quando a interrupção do fluxo aórtico é realizada com a aplicação de pinças do que quando é utilizada a oclusão intraluminal por balão<sup>31</sup>.

A circulação colateral exuberante explica porque a repercussão da oclusão arterial aguda pode ser dramaticamente diferente daquela observada em humanos. Em humanos, a oclusão aórtica aguda, em uma embolia a “cavaleiro”, por exemplo, pode atingir 30% de mortalidade, enquanto que, em modelos suínos, foram encontrados vários casos oligossintomáticos de oclusão aguda e prolongada<sup>11</sup>.

Essas características sugerem que modelos suínos de oclusão aórtica aguda, embora anatomicamente adequados para o treinamento cirúrgico (como a REBOA, por exemplo), podem fornecer resultados imprecisos quanto à perspectiva fisiológica.

A técnica de REBOA evoluiu como alternativa ao clampeamento aórtico por toracotomia. Um balão complacente é introduzido na aorta e insuflado, obstruindo o fluxo para a circulação distal, aumentando a pós-carga e a pressão aórtica proximal, melhorando as perfusões miocárdica e cerebral com efeitos potencialmente benéficos em pacientes com choque hemorrágico profundo<sup>12,32,33</sup>.

Modelos suínos têm sido utilizados para o desenvolvimento, treinamento e pesquisas sobre REBOA<sup>12,29,32,33</sup>. As pesquisas enfocam comparações entre oclusão aórtica contínua e intermitente<sup>33-35</sup>, parcial versus total<sup>36</sup>, tempo ideal de oclusão<sup>37</sup> e oxigenação tecidual<sup>38</sup>, visando melhores resultados na prática clínica. Nossos resultados e os escassos dados da literatura sugerem que repercussões biológicas e histoquímicas da oclusão aórtica nos suínos devem ser criteriosamente interpretadas, pois o suprimento sanguíneo dos membros posteriores é assegurado por anastomoses, como as que existem entre as artérias torácica interna (mamária) e os vasos epigástricos<sup>11</sup> (a Figura 4A demonstra o curso das artérias mamárias).

A rede colateral da parede abdominal inclui ainda as artérias ilíacas circunflexa profunda e lombares. Além disso, em caso de oclusão proximal, as proporções de diâmetro dos vasos sanguíneos envolvidos na perfusão dos membros posteriores favorecem muito mais a imediata perfusão colateral do que em humanos<sup>11</sup>. Embora não haja dúvida de que os modelos suínos sejam úteis para ensinar e praticar tais procedimentos cirúrgicos, essas particularidades podem tornar os resultados da oclusão da aorta infrarrenal não comparáveis aos obtidos na prática clínica.

#### e) Procedimentos venosos

Cateteres venosos são usualmente inseridos pela jugular externa, mais calibrosa do que a interna (Figura 2A), uma situação oposta à encontrada em humanos<sup>6,13,16</sup>.

Suínos têm sido utilizados para estudos sobre filtro de veia cava<sup>6,39,40</sup>. A punção do eixo femoral é possível; porém, recomenda-se que seja guiada por ultrassom, uma vez que a veia passa posteriormente à artéria, como observado na Figura 3D, dificultando a punção.

O modo como as veias hepáticas convergem para o segmento retro-hepático da veia cava caudal permite o treinamento de manobras usadas em cirurgia do trauma, como a de Pringle e a tríplice exclusão vascular hepática.

Após extensa busca na literatura, não foram encontrados artigos que descrevessem as situações análogas às síndromes de Nutcracker e May-Thurner em suínos, como as relatadas no presente estudo.

Durante a revisão bibliográfica, foi encontrado um estudo sobre o desenvolvimento de um stent venoso utilizando modelo animal ovino; entre as limitações mencionadas, estava o fato de que o stent havia sido implantado em uma veia sem estenose, pela dificuldade de simular tais condições em animais<sup>34</sup>; uma limitação potencialmente superada utilizando-se suínos cuja compressão venosa poderia ser detectada

pré-experimento com exames não invasivos, conforme demonstrado no presente estudo.

Como a TC foi realizada com animais em decúbito ventral e devidamente hidratados, é improvável que o estreitamento descrito para as veias renal e íliaca comum esquerdas (Figuras 2E e 2F) seja provocado pelo peso dos órgãos abdominais, sugerindo, de fato, um mecanismo mais semelhante ao encontrado em humanos. Estudos futuros podem se concentrar em examinar esses achados de estenose com ultrassom intravascular, ou em desenvolver modelos animais para implante de stents venosos.

Entre as limitações do estudo, encontram-se o fato de que apenas três animais foram estudados; também não foram estudados animais de ambos os sexos, pois os três animais eram machos.

## CONCLUSÕES

Ao fornecer os dados aqui apresentados, este estudo pode facilitar o planejamento de ensaios pré-clínicos, as pesquisas básicas e o aperfeiçoamento do treinamento cirúrgico utilizando modelos suínos na área vascular.

## REFERÊNCIAS

- Crisóstomo V, Sun F, Maynar M, et al. Common swine models of cardiovascular disease for research and training. *Lab Anim*. 2016;45(2):67-74. <http://dx.doi.org/10.1038/labon.935>. PMID:26814353.
- Mangla S, Choi JH, Barone FC, et al. Endovascular external carotid artery occlusion for brain selective targeting: a cerebrovascular swine model *Neuroscience*. *BMC Res Notes*. 2015;8(1):1-6. <http://dx.doi.org/10.1186/s13104-015-1714-7>.
- Siefert J, Hillebrandt KH, Kluge M, et al. Computed tomography-based survey of the vascular anatomy of the juvenile Göttingen minipig. *Lab Anim*. 2017;51(4):388-96. <http://dx.doi.org/10.1177/0023677216680238>. PMID:27932686.
- Judge EP, Hughes JML, Egan JJ, Maguire M, Molloy EL, O'Dea S. Anatomy and bronchoscopy of the porcine lung: a model for translational respiratory medicine. *Am J Respir Cell Mol Biol*. 2014;51(3):334-43. <http://dx.doi.org/10.1165/rcmb.2013-0453TR>. PMID:24828366.
- Bekheit M, Bucur PO, Wartenberg M, Vibert E. Computerized tomography-based anatomic description of the porcine liver. *J Surg Res*. 2017;210:223-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2016.11.004>. PMID:28457333.
- Dondelinger RF, Ghysels MP, Brisbois D, et al. Relevant radiological anatomy of the pig as a training model in interventional radiology. *Eur Radiol*. 1998;8(7):1254-73. <http://dx.doi.org/10.1007/s003300050545>. PMID:9724449.
- Sakaoka A, Koshimizu M, Nakamura S, Matsumura K. Quantitative angiographic anatomy of the renal arteries and adjacent aorta in the swine for preclinical studies of intravascular catheterization devices. *Exp Anim*. 2018;67(2):291-9. <http://dx.doi.org/10.1538/exanim.17-0125>. PMID:29353822.
- Smith AC, Swindle MM. Preparation of Swine for the Laboratory. *ILAR J*. 2006;47(4):358-63. <http://dx.doi.org/10.1093/ilar.47.4.358>. PMID:16963815.
- Septimus Sisson SB. The anatomy of the domestic animals. 2nd ed. Philadelphia: W.B. Saunders Company; 1930. p. 734-42.
- Michaud F, Li N, Plantefève R, et al. Selective embolization with magnetized microbeads using magnetic resonance navigation in a controlled-flow liver model. *Med Phys*. 2019;46(2):789-99. <http://dx.doi.org/10.1002/mp.13298>. PMID:30451303.
- Haacke N, Unger JK, Haidenhein C, Russ M, Hiebl B, Nihues SM. Pig specific vascular anatomy allows acute infrarenal aortic occlusion without hind limb ischemia and stepwise occlusion without clinical signs. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2011;48(1):173-85. <http://dx.doi.org/10.3233/CH-2011-1401>. PMID:21876245.
- Borger van der Burg BLS, Hörer TM, Eefting D, et al. Vascular access training for REBOA placement: a feasibility study in a live tissue-simulator hybrid porcine model. *J R Army Med Corps*. 2019;165(3):147-51. <http://dx.doi.org/10.1136/jramc-2018-000972>. PMID:30228195.
- Florescu MC, Runge J, Lof J, et al. Surgical technique of placement of an external jugular tunneled hemodialysis catheter in a large pig model. *J Vasc Access*. 2018;19(5):473-6. <http://dx.doi.org/10.1177/1129729818760964>. PMID:29557223.
- Kotsougiani D, Willems JJ, Shin AY, Friedrich PF, Hundepool CA, Bishop AT. A new porcine vascularized tibial bone allotransplantation model: anatomy and surgical technique. *Microsurgery*. 2018;38(2):195-202. PMID:29131389.
- Kloster BO, Lund L, Lindholt JS. Laparo- and thoracoscopic aortic aneurysm neck optimization and treatment of potential endoleaks type IA and II in a porcine model. *Ann Med Surg*. 2015;5:5-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amsu.2015.11.002>. PMID:26793311.
- Swindle MM. Swine in the laboratory: surgery, anesthesia, imaging and experimental techniques. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group; 2007. p. 214-52. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420009156>.
- Genain MA, Morlet A, Herrtage M, et al. Comparative anatomy and angiography of the cardiac coronary venous system in four species: human, ovine, porcine, and canine. *J Vet Cardiol*. 2018;20(1):33-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvcv.2017.10.004>. PMID:29191414.
- Habib CA, Utraiainen D, Peduzzi-Nelson J, et al. MR imaging of the yucatan pig head and neck vasculature. *J Magn Reson Imaging*. 2013;38(3):641-9. <http://dx.doi.org/10.1002/jmri.24003>. PMID:23348984.
- Kim SH. Doppler US and CT diagnosis of nutcracker syndrome. *Korean J Radiol*. 2019;20(12):1627. <http://dx.doi.org/10.3348/kjr.2019.0084>. PMID:31854150.
- Sankaran L, Ramachandran R, Bala Raghu Raji V, Periasamy Varadaraju P, Panneerselvam P, Radhakrishnan PR. The role of multidetector CT angiography in characterizing vascular compression syndromes of the abdomen. *Egypt J Radiol Nucl Med*. 2019;50(1):1-12. <http://dx.doi.org/10.1186/s43055-019-0063-2>.
- Sablón González N, Lorenzo Villalba N, Parodis López Y, González Díaz P, Boada Díaz J, Kechida M. Nutcracker syndrome. *Medicina*. 2019;79(2):150-3. PMID:31048282.
- White JM, Comerota AJ. Venous compression syndromes. *Vasc Endovascular Surg*. 2017;51(3):155-68. <http://dx.doi.org/10.1177/1538574417697208>. PMID:28330436.
- Jayaraj A, Buck W, Knight A, Johns B, Raju S. Impact of degree of stenosis in May-Thurner syndrome on iliac vein stenting. *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord*. 2019;7(2):195-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvsv.2018.10.001>. PMID:30553783.
- Kunio M, Wong C, Markham PM, Edelman ER. Sex differences in the outcomes of stent implantation in mini-swine model. *PLoS One*. 2018;13(1):e0192004. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0192004>. PMID:29377941.

25. von Trotha KT, Butz N, Grommes J, et al. Vascular anatomy of the small intestine - a comparative anatomic study on humans and pigs. *Int J Colorectal Dis.* 2015;30(5):683-90. <http://dx.doi.org/10.1007/s00384-015-2163-4>. PMID:25694139.
26. Yoshida RA, Yoshida WB, Rollo HA, Kolvenbach R, Lorena SERS. Curva de aprendizado em cirurgia aórtica videolaparoscópica: estudo experimental em porcos. *J Vasc Bras.* 2008;7(3):231-8. <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-54492008000300008>.
27. Nickel R, Schummer E, Seiferle E. The anatomy of the domestic animals: the circulatory system, the skin, and the cutaneous organs of the domestic mammals. Berlin: Springer-Verlag; 1981. p. 72-73. (vol. 3).
28. Rosow DE, Sahani D, Strobel O, et al. Imaging of acute mesenteric ischemia using multidetector CT and CT angiography in a porcine model. *J Gastrointest Surg.* 2005;9(9):1262-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gassur.2005.07.034>. PMID:16332482.
29. White JM, Cannon JW, Stannard A, Markov NP, Spencer JR, Rasmussen TE. Endovascular balloon occlusion of the aorta is superior to resuscitative thoracotomy with aortic clamping in a porcine model of hemorrhagic shock. *Surgery.* 2011;150(3):400-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surg.2011.06.010>. PMID:21878225.
30. Chen Y, Tillman B, Go C, et al. A novel customizable stent graft that contains a stretchable ePTFE with a laser-welded nitinol stent. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2019;107(4):911-23. <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.b.34186>. PMID:30176119.
31. Prata MP, Jaldin RG, Lourenção PLTA, et al. Lesão aguda da parede arterial provocada pelo método de interrupção temporária de fluxo em diferentes vias de cirurgia aórtica: estudo morfológico e biomecânico da aorta de porcos. *J Vasc Bras.* 2020;19:e20190025. <http://dx.doi.org/10.1590/1677-5449.190025>. PMID:32499823.
32. Smith SA, McAlister VC. A novel REBOA system: prototype and proof of concept. *Can J Surg.* 2018;6(6):188-94. PMID:30417720.
33. Borger van der Burg BLS, van Schaik J, Brouwers JJWM, et al. Migration of Aortic Occlusion Balloons in an in vitro model of the human circulation. *Injury.* 2019;50(2):286-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2018.12.026>. PMID:30594315.
34. Che H, Jiang J, Liu H, Wei J, Zhang X. Preliminary report of a new type of braided vein stent in animals. *Phlebology.* 2019;34(4):246-56. <http://dx.doi.org/10.1177/0268355518801172>. PMID:30227789.
35. Kuckelman JP, Barron M, Moe D, et al. Extending the golden hour for Zone 1 resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta: Improved survival and reperfusion injury with intermittent versus continuous resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta of the aorta in a porcine severe truncal hemorrhage model. *J Trauma Acute Care Surg.* 2018;85(2):318-26. <http://dx.doi.org/10.1097/TA.0000000000001964>. PMID:30080780.
36. Reva VA, Matsumura Y, Samokhvalov IM, et al. Defining degree of aortic occlusion for partial-REBOA: a computed tomography study on large animals. *Injury.* 2018;49(6):1058-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2018.04.021>. PMID:29699730.
37. Reva VA, Matsumura Y, Hörer T, et al. Resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta: what is the optimum occlusion time in an ovine model of hemorrhagic shock? *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2018;44(4):511-8. <http://dx.doi.org/10.1007/s00068-016-0732-z>. PMID:27738726.
38. Lam JH, O'Sullivan TD, Park TS, et al. Non-invasive dual-channel broadband diffuse optical spectroscopy of massive hemorrhage and Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta (REBOA) in swine. *Mil Med.* 2018;183(Suppl 1):150-6. <http://dx.doi.org/10.1093/milmed/usx163>. PMID:29635570.
39. Eggers MD, McArthur MJ, Figueira TA, et al. Pilot in vivo study of an absorbable polydioxanone vena cava filter. *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord.* 2015;3(4):409-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvs.2015.03.004>. PMID:26992619.
40. Wang Z, Ashley DW, Kong L, Kang J, Nakayama DK, Dale PS. Nuclear factor-κB is activated in filter-implanted vena cava. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2019;42(4):601-7. <http://dx.doi.org/10.1007/s00270-018-2138-2>. PMID:30535787.

**Correspondência**

Adenauer Marinho de Oliveira Góes Junior  
 Rua Domingos Marreiros, 307/ 802  
 CEP 66055-210 - Belém (PA), Brasil  
 Tel.: (91) 98127-9656  
 E-mail: adenauerjunior@gmail.com

**Informações sobre os autores**

AMOGJ - Professor de cirurgia vascular, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA); Aluno de Pós-doutorado, Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).  
 RHFC - Professora de habilidades cirúrgicas, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA); Médica veterinária; Doutora em Saúde e Produção Animal na Amazônia, Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).  
 IPF - Professora de bioestatística; Farmacêutica, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA); Doutora em Biologia Parasitária na Amazônia (PPGBPA/UEPA/IEC).  
 EMR, FBAA e JHAS - Estudantes de medicina, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA).  
 CPO - Médica egressa, Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA).  
 SCVA - Professora Adjunta Livre-Docente, Departamento de Cirurgia, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP); Orientadora, Programa de Ciência Cirúrgica Interdisciplinar, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).

**Contribuições dos autores**

Concepção e desenho do estudo: AMOGJ, SCVA  
 Análise e interpretação dos dados: AMOGJ, SCVA, RHFC, IPF  
 Coleta de dados: AMOGJ, RHFC, CPO, EMR  
 Redação do artigo: AMOGJ, FBAA, CPO  
 Revisão crítica do texto: AMOGJ, SCVA, RHFC, IPF, FBAA, EMR, JHAS, CPO  
 Aprovação final do artigo\*: AMOGJ, SCVA, RHFC, IPF, FBAA, EMR, JHAS, CPO  
 Análise estatística: IPF  
 Responsabilidade geral pelo estudo: AMOGJ

\*Todos os autores leram e aprovaram a versão final submetida do J Vasc Bras.