



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



# Métodos Cuantitativos aplicados a la Agenda de Pacientes de Tratamientos Médicos

- Aplicación para la agenda de pacientes de radioterapia -

**Informe final**

**Proyecto de grado de Ingeniería de Producción**

**Realizado por:**

Forcella, Agustina

Frechou, Chloé

Jorba, Juan Andrés

**Tutor:** Piñeyro, Pedro

*Facultad de Ingeniería - Universidad de la República*

---

*Montevideo, Uruguay*

*Octubre 2022*



## **Resumen ejecutivo**

En el presente informe se describe el trabajo realizado en el marco del proyecto de grado de Ingeniería de Producción, cuyo principal objetivo era la aplicación de métodos cuantitativos para la agenda de pacientes de radioterapia, particularmente en el Centro de Radioterapia ONCOSUR de Florida, Uruguay. Para esto, en primera instancia se relevó y analizó la literatura existente en torno a modelos matemáticos aplicados a los tratamientos de radioterapia y, en particular, se hizo énfasis en aquellos trabajos cuyo foco es el problema del scheduling en radioterapia, es decir la programación de las sesiones de tratamiento con radioterapia de un conjunto de pacientes, en un determinado plazo de tiempo.

ONCOSUR es un condominio formado por cinco mutualistas de distintos departamentos del país, siendo uno de sus objetivos mejorar la calidad y accesibilidad a los tratamientos del cáncer en el interior del país. El Centro cuenta con la particularidad de estar certificado bajo la norma de calidad ISO 9001:2015.

Se desarrolló un modelo de programación matemática lineal entera para representar la forma en la que se agenda los pacientes de radioterapia de ONCOSUR y reflejar las restricciones que presenta. Para la elaboración del modelo propuesto, se utilizó la información recabada del mismo Centro junto con los conocimientos adquiridos de la revisión sistemática de literatura sobre el tema en cuestión. El modelo toma en cuenta las restricciones planteadas por ONCOSUR y, en conjunto con una categorización de los pacientes en proceso, crea agendas de tratamiento según las preferencias horarias de cada paciente, respetando días de descanso, fechas límite y la continuidad del tratamiento.

Se validó el modelo propuesto tanto con la contraparte como con la realización de experimentos numéricos. ONCOSUR encontró de esta metodología aplicada y el modelo creado una herramienta útil como apoyo a la toma de decisiones de gestión.

Finalmente, en cuanto a los resultados obtenidos, se pudieron identificar notorias mejoras en el armado de la agenda de pacientes. En comparación con la realidad de hoy en día del Centro, se aumenta la cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento en la semana, se incorpora la preferencia horaria de los pacientes y se respeta en su mayoría, y se reduce significativamente el tiempo de planificación destinado a esta tarea.

**Palabras clave:** Radioterapia, Programación Entera, Scheduling, Scheduling en Radioterapia, Preferencias Horarias.



## **Agradecimientos**

En primer lugar, el equipo quiere agradecer al tutor Pedro Piñeyro, quien además de haber integrado la cátedra de varias materias clave a lo largo de la carrera, acompañó desde un inicio el desarrollo de este proyecto. En ese transcurso, Pedro supo transmitir su experiencia y conocimiento constantemente guiando y apoyando al equipo.

En segundo lugar se le agradece enormemente al Centro de Radioterapia ONCOSUR por abrir sus puertas y brindarnos su espacio y su tiempo, permitiendo al equipo conocer y adentrarse en su operativa. Particularmente se agradece la colaboración de Alejandro Cortés, uno de los técnicos del equipo de ONCOSUR. Alejandro fue desde un principio el nexo de contacto con la empresa y con un interés genuino por compartir y aprender, dedicó mucho esfuerzo y tiempo personal a interiorizar al equipo en el funcionamiento del centro, la programación de los tratamientos y el flujo de pacientes por el centro. Todo esto es valorado aún más por el equipo dado que el proyecto se desarrolló en momentos de alta complejidad para ONCOSUR como lo fue la pandemia COVID 19 y el proceso de cambio de equipo de tratamiento.

Por otro lado, se agradece a todo el personal y docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, quienes tuvieron un importante rol en la formación de todo el equipo a lo largo de la carrera.

También, el equipo agradece a la empresa AMPL, por brindar al equipo una licencia académica que permitió al equipo utilizar el paquete de software, una herramienta clave para la experimentación.

Por último, el equipo agradece el apoyo de amigos y familiares a lo largo del proyecto y de toda la carrera.



## Índice de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
<b>2. Marco teórico del problema de agenda de tratamientos de radioterapia</b>	<b>17</b>
2.1. El cáncer y la radioterapia	17
2.2. El tratamiento de Radioterapia	19
2.3. Concepto de scheduling	21
2.4. Problemas en la gestión del scheduling en radioterapia	22
2.5. Revisión de la Literatura del RTSP	22
<b>3. Caso de estudio</b>	<b>27</b>
3.1. Presentación de ONCOSUR	27
3.2. Flujo de pacientes	28
3.3. Situación actual	30
3.4. Bibliografía relevante aplicada a la realidad de ONCOSUR	31
<b>4. Objetivos y metodología del proyecto</b>	<b>33</b>
4.1. Objetivos	33
4.2. Metodología del proyecto	34
<b>5. Definición del problema y formulación del modelo</b>	<b>39</b>
5.1. Descripción del problema	39
5.2. Modelo MILP para la agenda de tratamientos de radioterapia de ONCOSUR	41
Conjuntos	42
Parámetros	43
Variables de decisión	43
Formulación matemática	44
5.3. Implementación del modelo	49
<b>6. Verificación y validación del modelo</b>	<b>51</b>
Plan de verificación	51
6.1. Caso 2 - Preferencias en lista de espera	52
6.2. Caso 4 - Paciente con preferencia que incluye la ventana obligatoria	54
6.3. Caso 6 - Paciente con ventana obligatoria y fecha límite mayor al horizonte de agenda. LINAC sin disponibilidad en ventana obligatoria.	57
6.4. Caso 7 - Paciente con preferencia disjunta a ventana obligatoria	59
6.5. Caso 8 - Mantener horario en pacientes ya agendados	62
6.6. Caso 9 - Pacientes sin ventana temporal de preferencia	64
Plan de validación	66
<b>7. Recolección y análisis de los datos de ONCOSUR</b>	<b>67</b>
<b>8. Análisis de resultados</b>	<b>71</b>
8.1. Criterios para Evaluar la Calidad de las Soluciones	71
8.2. Determinación de los parámetros de la función objetivo	72

8.3. Comparación entre la solución y la realidad de ONCOSUR	74
<b>9. Análisis de sensibilidad</b>	<b>79</b>
9.1. Caso de agregación de pacientes	79
9.2. Cantidad de slots diarios	80
9.3. Caso de aumento de pacientes que comienzan su tratamiento (parámetro C)	82
9.4. Caso de aumento en la duración de los slots ( $q = 10$ )	83
<b>10. Conclusiones</b>	<b>85</b>
10.1. Conclusiones generales del proyecto	85
10.2. Trabajo futuro	87
<b>Referencias</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO 1: Estado del Arte</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 2: Acta de Constitución del proyecto</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO 3: Matriz de riesgos del Proyecto</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO 4: Modelo de partida (Proceso de validación)</b>	<b>151</b>
<b>ANEXO 5: Casos de validación</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO 6: Imagen de Agenda brindada por ONCOSUR</b>	<b>163</b>
<b>ANEXO 7: Caso Base. Tabla de parámetros de entrada</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO 8: Concepto de MILP</b>	<b>173</b>
<b>ANEXO 9: Caso Base. Agenda por Slot-Día</b>	<b>177</b>

## **Índice de Figuras**

Figura 2.1. A) Célula normal que se altera genéticamente y luego muere.	
B) Célula cancerosa que se reproduce descontroladamente y no mueren.	17
Figura 2.2. A) Acelerador Lineal.	
B) Forma de empleo.	18
Figura 2.3. Diagrama de flujo de tratamiento de radioterapia.	20
Figura 2.4. Gráfico de cantidad de documentos publicados sobre RTS por año.	23
Figura 2.5. Distribución y clasificación de la revisión literaria.	23
Figura 2.6. Clasificación de la literatura recabada.	24
Figura 3.1. Etapas del tratamiento de radioterapia en ONCOSUR.	28
Figura 6.1. Ejecución casos de verificación.	51
Figura 6.2. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 2 de verificación.	52
Figura 6.3. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 4 de verificación.	55
Figura 6.4. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 6 de verificación.	57
Figura 6.5. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 7 de verificación.	60
Figura 6.6. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 8 de verificación.	63
Figura 6.7. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 9 de verificación.	65
Figura 8.1. Agenda por paciente por día obtenida del modelo	75
Figura 9.1. Diferencia máxima de horario entre agendado y preferido en la semana.	84



## **Índice de Tablas**

Tabla 3.1. Tiempos de espera máximo por clasificación de paciente.	30
Tabla 4.1. Clasificación de los riesgos de un proyecto según método PMI.	37
Tabla 4.2. Cuadro de riesgos del proyecto con tabla de puntaje.	37
Tabla 6.1. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 2 de verificación.	53
Tabla 6.2. Agenda resultante del Caso 2.	53
Tabla 6.3. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 4 de verificación.	56
Tabla 6.4. Agenda resultante del Caso 4	56
Tabla 6.5. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 6 de verificación.	58
Tabla 6.6. Agenda resultante del caso 6.	58
Tabla 6.7. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 7 de verificación.	61
Tabla 6.8. Agenda resultante del caso 7	61
Tabla 6.9. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 8 de verificación.	63
Tabla 6.10. Agenda resultante del caso 8	64
Tabla 6.11. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 9 de verificación.	65
Tabla 6.12. Agenda resultante del caso 9	66
Tabla 7.1. Esqueleto planilla base con datos de pacientes de ONCOSUR	68
Tabla 7.2. Campos agregados a planilla base.	69
Tabla 8.1. Resultados experimentación con relación de parámetros $w$	72
Tabla 8.2. Resultados experimentación con parámetro $\alpha$	73
Tabla 8.3. Comparación entre solución de modelo y realidad ONCOSUR	75
Tabla 9.1. Calidad de solución para la variación con 3 pacientes	79
Tabla 9.2. Calidad de solución aumentando slots diarios	80
Tabla 9.3. Calidad de solución disminuyendo slots diarios	81
Tabla 9.4. Calidad de solución variando parámetro $C$	83
Tabla 9.5. Calidad de solución variando parámetro $q$	83



## **Glosario de términos**

**Cáncer:** enfermedad en la que algunas de las células del cuerpo crecen sin control y se extienden a otras partes del cuerpo (INC, 2021).

**Cuello de botella:** es un proceso o etapa productiva que funciona de manera ineficiente, o a un bajo nivel de productividad, causando un retraso en las operaciones y limitando el resto de las etapas en una cadena de producción (EDS, 2020).

**Horizonte de planificación:** marco temporal para el que se planifica la agenda de pacientes de radioterapia.

**LINAC:** acelerador lineal médico. Equipo que personaliza rayos X o electrones de alta energía para adaptarse a la forma de un tumor y destruir las células cancerígenas sin afectar el tejido normal circundante (Radioncology, 2021).

**Modelos de Programación Lineal Entera (MILP):** modelo de programación matemática con expresiones lineales y con variables que toman valores reales y variables que toman valores enteros. Por más información ver Anexo 8.

**PMI:** Project Management Institute. Organización internacional dedicada a la dirección de proyectos, que pretende establecer un conjunto de directrices que orienten la dirección y gestión de proyectos, proponiendo aquellos procesos de gestión más habituales que la práctica ha demostrado que son efectivos (OBS, 2015).

**Radioterapia (RT):** tratamiento del cáncer que usa altas dosis de radiación para destruir células cancerosas y reducir tumores (INC, 2019).

**Radiotherapy Scheduling (RTS):** agenda de pacientes para tratamientos de radioterapia.

**Radiotherapy Scheduling Problem (RTSP):** problema de la confección de la agenda de pacientes de radioterapia.

**Scheduling:** actividad de planificar los tiempos en que una serie de tareas van a ser realizadas (Cambridge, 2022).

**Scrum:** metodología en la que se aplican de manera regular un conjunto de buenas prácticas para trabajar colaborativamente, en equipo, y obtener el mejor resultado posible de un proyecto (P.A, 2019).

**Slot:** intervalo de tiempo estándar de cada sesión de tratamiento de radioterapia (Li, 2014).

**Sprint:** cada uno de los ciclos o iteraciones de un proyecto Scrum (A. Requena, 2018).



## **1. Introducción**

El siguiente trabajo es el documento final de un proyecto de grado sobre la agenda de tratamientos de radioterapia y la disciplina de la programación matemática aplicada a tal efecto. La finalidad de este proyecto fue el desarrollo y experimentación de un modelo de programación matemática para la agenda de tratamientos de radioterapia, específicamente aplicado a la realidad del Centro de Radioterapia ONCOSUR, localizado en Florida, Uruguay. Este modelo busca optimizar recursos administrativos y operativos con un enfoque científico y matemático hacia las tareas de gestión hospitalaria, enfocándose en tratamientos de alta especialidad, capacidad limitada y alto impacto en la salud y supervivencia de pacientes como lo es la radioterapia. Hasta donde sabemos, no existen estudios similares en el Uruguay, como tampoco han habido proyectos de grado de Ingeniería de Producción aplicados a la agenda o scheduling de tratamientos de cáncer.

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el cáncer en sus variadas formas, se posiciona dos veces en la lista de las diez principales causas de muerte humana en el mundo. A su vez, la enfermedad se encuentra dentro de las más comunes dentro de las que puede padecer una persona en su vida (ONU, 2020). Con el crecimiento poblacional y el desarrollo de la medicina en general, los diagnósticos de cáncer a nivel mundial han sido permanentemente crecientes desde el descubrimiento de la enfermedad. Afortunadamente, los métodos disponibles para su tratamiento también se han desarrollado de manera significativa en los últimos años. Dentro de los principales métodos utilizados para tratar el cáncer, se encuentra la radioterapia (INC, 2019).

Los centros de radioterapia y sus áreas administrativas tienen la responsabilidad de programar y ejecutar, de la mejor manera posible, tratamientos extensos y complejos enfrentando restricciones de capacidad. A su vez, existe alta demanda de tratamientos de radioterapia y ocurre que la demora y las filas de espera, inherentemente generadas por lo antedicho, tienen un efecto negativo en la salud y las posibilidades de recuperación del paciente.

El documento de proyecto tiene la finalidad de mostrar los detalles del proceso de investigación y de desarrollo del modelo, así como de su experimentación en base a un caso de estudio de la realidad. Se organizaron las siguientes secciones de manera de guiar al lector a través del desarrollo del proyecto y el objeto del mismo. En la Sección 2 se describen aspectos generales y el flujo del tratamiento de radioterapia, así como el concepto del scheduling. Posteriormente, se presenta el problema de scheduling de radioterapia. En la Sección 3 se introduce al caso de estudio detallando la realidad del Centro de radioterapia ONCOSUR. En la Sección 4, se presentan los objetivos del proyecto así como las metodologías y herramientas a utilizar a lo largo del mismo. En la Sección 5, se presenta el modelo propuesto, se brindan detalles sobre su funcionamiento, ideas detrás del mismo y los supuestos que se asumen para su utilización. En la Sección 6, se presenta el plan de verificación y validación utilizado para corroborar el funcionamiento esperado y mejorar el modelo. La Sección 7 contiene los detalles del proceso de recolección y procesamiento de datos provenientes de ONCOSUR para la experimentación. En la Sección 8 se analizan los resultados de la experimentación y en la Sección 9 se presenta el

análisis de sensibilidad. Por último, en la Sección 10 se presentan las conclusiones de este proyecto y posibles direcciones de trabajo futuro.

## 2. Marco teórico del problema de agenda de tratamientos de radioterapia

El objetivo de esta sección es introducir al lector a la complejidad del cáncer como enfermedad y los diferentes métodos de tratamiento que existen para mejorar la salud de los pacientes. Por otro lado, se relaciona la problemática del cáncer y la necesidad de incursionar en el scheduling para la radioterapia. Por último, se presentan algunos de los trabajos vertebrales del proyecto recabados en la fase de investigación que tratan sobre modelos matemáticos para el scheduling en radioterapia.

### 2.1. El cáncer y la radioterapia

Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cáncer es una de las principales causas de muerte en todo el mundo y es la segunda mayor causa de muerte en América Latina. Se trata de una enfermedad genética que produce cambios en la forma en que las células crecen y se dividen. Este cambio genera una reproducción descontrolada de las células derivando en tumores que afectan el funcionamiento normal de los órganos del cuerpo humano. Cuando se genera una célula con características anormales, el cuerpo tiende a destruirla, mientras que en el caso de las células cancerígenas, esto no sucede y se reproducen sin control. Los tumores se caracterizan como benignos no cancerígenos, o malignos (cancerígenos) (NCI, 2021). En la Figura 2.1 se presenta la reproducción normal de las células en comparación con la reproducción de las células cancerosas.

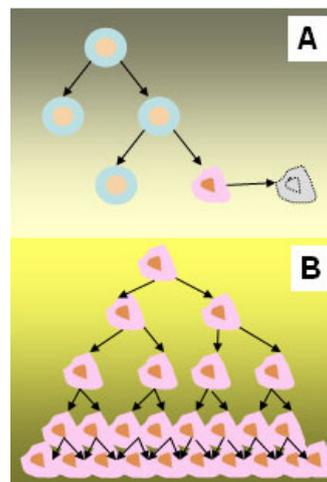


Figura 2.1. a) Célula normal que se altera genéticamente y luego muere. b) Célula cancerosa que se reproduce descontroladamente y no mueren.

Fuente: SEOM, 2022.

Existen variedad de tratamientos para el cáncer, entre los más utilizados se encuentra la radioterapia, quimioterapia, braquiterapia y la cirugía, y una combinación de ellos. Este proyecto se enfocó en la forma de tratamiento a través de la radioterapia.

La radioterapia (RT) consiste en irradiar una zona del cuerpo con el fin de destruir a las células cancerosas, mejorar el estado del cáncer y/o aliviar los síntomas. Actualmente, existen principalmente tres tipos de radioterapia: interna, externa e intraoperatoria. El tipo elegido a utilizar depende del grado de avance del cáncer, el tipo de cáncer, entre otros factores. Este proyecto se enfocó en la radioterapia externa, donde el instrumento más utilizado son aceleradores lineales de partículas o LINACS por sus siglas en inglés (RIR, 2021). Éste irradia partículas subatómicas al área afectada para destruir las células cancerígenas. En este proceso también mueren células sanas que rodean al tumor, por lo cual pueden verse comprometidos otros órganos adyacentes durante la radioterapia. Esto muestra la importancia del control durante el tratamiento y de la precisión al brindarlo.

La Figura 2.2(a) presenta un ejemplo de un LINAC que emite radiación de rayos X, y la Figura 2.2(b) presenta un LINAC junto al paciente y los doctores especialistas que realizan la radioterapia.



2.2(a)



2.2(b)

Figura 2.2 (a) Acelerador Lineal. Fuente: Manilas, 2018.

(b) Forma de empleo. Fuente: Necolex, 2019.

La radioterapia externa se realiza enviando rayos X o protones al área afectada. Hoy en día, en los centros de salud más desarrollados tecnológicamente, se utiliza la radioterapia de protones, la cual consiste en enviar protones al área donde se encuentra el tumor cancerígeno para exterminar las células que componen el tumor. En este proceso de irradiación, mueren tanto células benignas como malignas. Es por esto que la mayoría de las veces los tejidos adyacentes al tumor están comprometidos. Este tipo de radioterapia tiene la particularidad que los daños a los tejidos sanos alrededor de la zona afectada son menores que utilizando rayos X, lo cual resulta muy útil cuando la zona con células cancerígenas se encuentra cerca de órganos vitales o delicados. Por otro lado, la radioterapia interna consiste en introducir al cuerpo del paciente, una fuente interna, sólida o líquida, que libera radiación hacia el tumor. La fuente puede introducirse a través del sistema intravenoso, o mediante pastillas o implantes mantenidos durante un período de tiempo dentro del cuerpo (Medline Plus, 2020).

Uno de los métodos de radioterapia interna más conocidos es la braquiterapia, que consiste en un elemento sólido (fuente de radiación) que se introduce cerca del tumor maligno e

irradia la zona para matar las células del tumor. Este elemento se coloca en forma de semillas, cápsulas o listones y se localiza en una parte específica del cuerpo para ser tratada. Existen distintos tipos de braquiterapia, los cuales dependen del tipo de cáncer a tratar: la braquiterapia intersticial, la cual se inserta la fuente dentro del tumor y se utiliza por ejemplo en cáncer de próstata; braquiterapia intracavitaria, donde la fuente se coloca en una cavidad del cuerpo y se utiliza para tratar cáncer de cuello uterino; y la braquiterapia epiescleral, en la que la fuente de radiación se adhiere al ojo para tratar melanoma (INC, 2019a).

## **2.2. El tratamiento de Radioterapia**

El tratamiento de radioterapia consta globalmente de tres fases principales. La primera es el pretratamiento, donde se genera la cita con el paciente, se recetan estudios médicos, se realiza el diagnóstico y la definición del tratamiento. La segunda fase es el tratamiento, el cual consiste en la irradiación y consultas de seguimiento con los médicos donde evalúan el avance del tratamiento y su continuidad. Por último, el post-tratamiento donde se le hace seguimiento al paciente luego de terminadas las sesiones. En la Figura 2.3 puede visualizarse un mapa del proceso de tratamiento de radioterapia

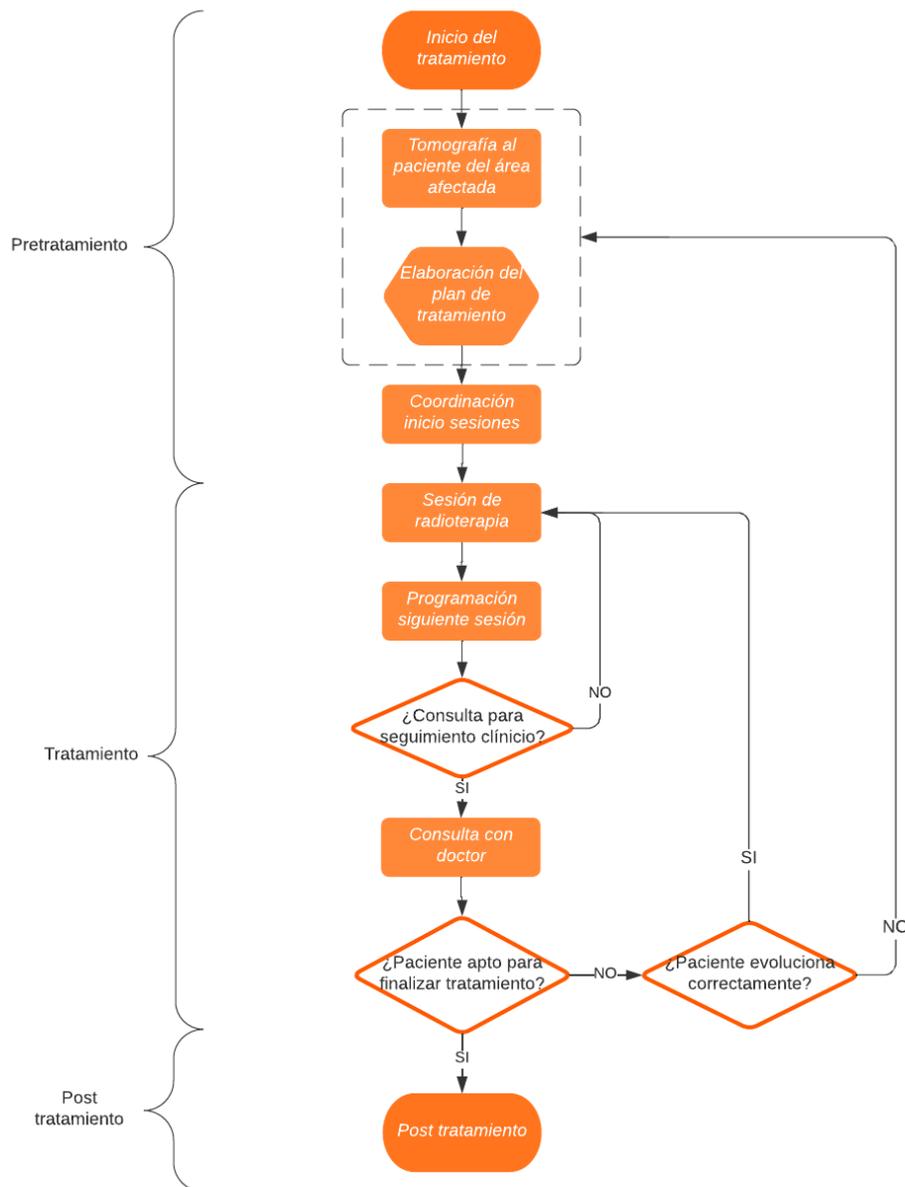


Figura 2.3. Diagrama de flujo de tratamiento de radioterapia.

Fuente: elaboración propia.

El proceso descrito en la Figura 2.3 exige la coordinación de equipos multidisciplinares y recursos del hospital para que pueda llevarse a cabo. Uno de los grandes desafíos es la coordinación de recursos compartidos con otras áreas, por ejemplo la agenda del tomógrafo, camas del hospital, nutricionista, traslados, entre otros.

En todas las etapas del tratamiento de radioterapia se encuentra el desafío de mantener la calidad de vida del paciente y que el mismo tenga el menor impacto posible en la rutina y su desarrollo como ser Biopsicosocial, además asegurar que zonas que no necesitan ser irradiadas se encuentren fuera del blanco terapéutico, para así minimizar efectos no deseados. Esto implica para la programación del tratamiento, intentar buscar un horario conveniente para que el paciente tenga sus sesiones y mantener ese horario a lo largo del

tratamiento así como poder programar cambios con debida antelación. Sin embargo, el tratamiento debe ser un compromiso de prioridad. En otras palabras, si el tratamiento no resulta adaptable a la rutina de un paciente, no se perjudica al tratamiento sino a la rutina (Vieira et al. 2021).

Por lo general, dentro de los centros de radioterapia se clasifica a los pacientes en tres categorías dependiendo su estado (ACS, 2020). En primer lugar, se encuentran los pacientes a los cuales se les brinda el tratamiento de radioterapia paliativa. Su objetivo es controlar los síntomas de cáncer y aliviarlos, así como mejorar la calidad de vida de los pacientes. Suele brindarse a pacientes con cáncer en estado avanzado.

En segundo lugar se hallan los pacientes de tratamiento de radioterapia radical, el cual consiste en administrar dosis con criterio curativo de radiación al paciente para eliminar las células cancerígenas. En comparación al tratamiento paliativo, el tratamiento radical suele ser más largo y complejo de planificar.

Por último, se considera un paciente de radioterapia como urgente cuando se debe actuar de manera inmediata, en situaciones incluso de compromiso de estructuras vitales que pueden poner en riesgo la vida del paciente y/o paliar una situación de inestabilidad o dolor aguda (ACS, 2020).

### **2.3. Concepto de scheduling**

Según el diccionario de Cambridge, se conoce como “scheduling” a la actividad de planificar los tiempos en que una serie de tareas van a ser realizadas (Cambridge Dictionary, 2022). La traducción al español que más se ajusta a scheduling es “planificación”, pero en el contexto que se utiliza para este proyecto se considera la palabra escrita en inglés, ya que también hace referencia a “cronograma”.

Este concepto es utilizado en diferentes disciplinas para llevar a cabo tanto proyectos como en la producción industrial. Por ejemplo, en la industria fabril es necesario tener un cronograma o agenda de tareas, también conocido por su traducción al inglés “schedule”. A dichas tareas se les asigna horarios de comienzo y finalización. Estas asignaciones no son al azar y tienen el objetivo de optimizar la producción, dependiendo del recurso en el que se haga foco. A modo de ejemplo, se plantea la confección de un schedule para aumentar la producción en una fábrica aprovechando los tiempos de preparación de una línea o las tareas de manejo de stock dentro de un depósito (Sharma, 2015).

En las últimas décadas se comenzó a investigar el scheduling como disciplina con el objetivo de optimizar los recursos y tener un plan que se ajuste a los requerimientos de la compañía. Uno de los métodos de scheduling utilizados es FIFO (First In First Out, por sus siglas en inglés). Este criterio se utiliza comúnmente en la gestión de stock de productos perecederos donde se utilizan primero aquellos productos que llegaron primero al depósito con el fin de mantener una rotación. En el scheduling o la programación de servicios, FIFO se refiere a seguir el orden de llegada de los casos a atender. Por esto es que FIFO, en lo

que respecta a la atención de clientes o pacientes, se traduce a FCFS (First Come First Served) que implica atender por orden de llegada (InCo, 2014).

Dentro de las aplicaciones existentes del concepto de scheduling, se encuentra el scheduling de las sesiones de radioterapia para los pacientes, conocido en la literatura como Radiotherapy Scheduling Problem (RTSP) el cual se abordará en profundidad en las Secciones 2.4 y 2.5.

## **2.4. Problemas en la gestión del scheduling en radioterapia**

En los últimos años se ha detectado un incremento en la cantidad de casos de cáncer, por lo que existe un aumento en la cantidad de pacientes que atraviesan tratamientos de radioterapia. Si se mantiene la actual tasa de crecimiento, se prevé que para 2040 se registren un 60% más de casos aproximadamente en América Latina (OPS, 2021). La demanda de tratamientos también crece a la par. El principal problema que genera esto es la escueta oferta de tratamiento que sea efectivo y pueda comenzarse lo antes posible debido a que los LINACS, personal de la salud y otros recursos necesarios, son limitados y costosos.

Otros factores a tener en cuenta son el estado del paciente y la toma de decisión de a qué paciente ingresar primero al sistema. Se debe tener en cuenta que una vez que se ingresa el paciente, es indispensable que no corte su tratamiento a no ser que sea indicado por el médico, ya que existe una radiación máxima que puede recibirse en la vida. Por otro lado, también hay que considerar la frecuencia con la que deben realizarse las sesiones y los descansos predefinidos. Además, hay que analizar si los pacientes mantendrán un horario, si necesitan atenderse con un médico en especial, entre otras decisiones.

Todo lo mencionado anteriormente ha dado lugar a lo que se conoce en la literatura de Investigación de Operaciones, como Radiotherapy Scheduling Problem (RTSP, en adelante). Se trata del desafío de crear un cronograma o agenda (de ahora en más referido como schedule), considerando las restricciones tanto de la disponibilidad de recursos del hospital como de los requerimientos de los tratamientos y de cada paciente, de forma de lograr atender correctamente a todos los pacientes de un centro de radioterapia.

## **2.5. Revisión de la Literatura del RTSP**

Se realizó una revisión sistemática sobre el RTSP. Se obtuvo la información desde tres repositorios: Scopus, ScienceDirect y Springer, importantes para la comunidad científica. La búsqueda se basó en las determinadas palabras claves con el objetivo de conocer estudios aportados por la comunidad científica sobre RTSP, y específicamente orientado al uso de métodos cuantitativos. Las palabras claves establecidas fueron: *Radiotherapy Scheduling, Patient Scheduling, Programming, Optimization, Scheduling, Mathematical Programming, Operations Research*.

Por otro lado, se estableció un marco temporal que abarca las publicaciones desde 2010 hasta 2021 inclusive. Esto se debe a que la cantidad de publicaciones a partir de 2010 incrementa sustancialmente, como lo muestra el gráfico extraído del buscador PubMed, presentado en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Gráfico de cantidad de documentos publicados sobre RTS por año.  
Fuente: PubMed, 2022.

La recolección, la clasificación y el análisis de todos los trabajos hallados se presenta en el Anexo 1. La distribución y clasificación de los documentos recabados de los repositorios se presenta a modo de resumen en las Figuras 2.5 y 2.6. La Figura 2.5 muestra la distribución por repositorio de los trabajos recabados.

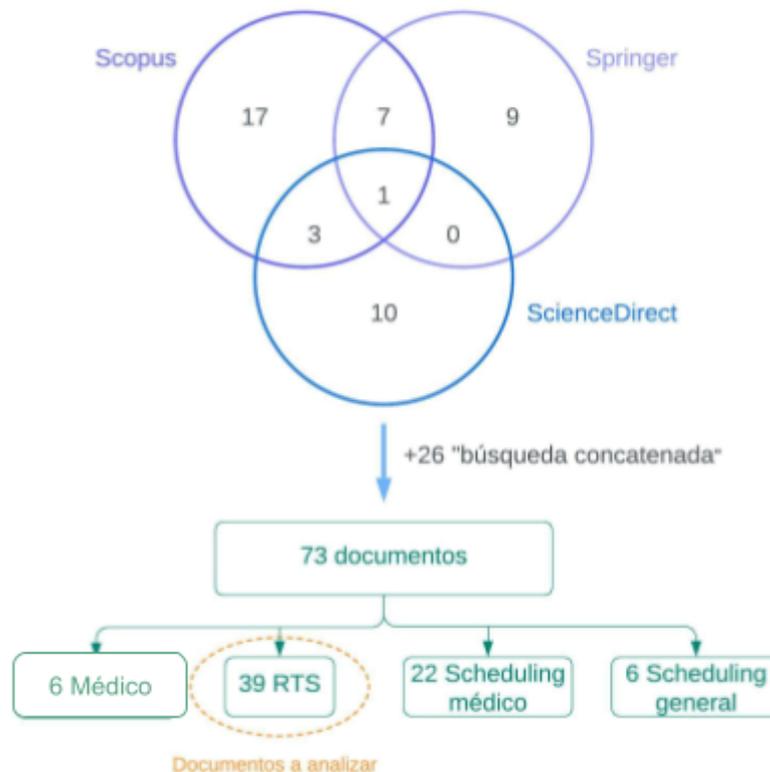


Figura 2.5. Distribución y clasificación de la revisión literaria.  
Fuente: elaboración propia.

Luego del relevamiento, se procede a clasificar las publicaciones. Como primera clasificación, se identifican las cuatro siguientes disciplinas: Radiotherapy Scheduling (RTS), Scheduling, Médico y Médico Scheduling. La categoría Médico, contiene trabajos que abordan el tema de radioterapia desde un punto de vista estrictamente técnico médico. Aquellos trabajos clasificados bajo Scheduling, hacen referencia al scheduling pero aplicado a otras disciplinas. Luego, aquellos que estaban relacionados a diferentes técnicas de scheduling en el ambiente de la medicina, pero no a la radioterapia, se los clasificó como Médico Scheduling. Por último, aquellos trabajos que tratan de scheduling de pacientes de radioterapia, integran la categoría RTS por las siglas en inglés Radiotherapy Scheduling.

Una vez que se discierne entre las disciplinas, se enfoca en la categoría RTS (39 documentos de los 73 totales) ya que es la temática principal de este proyecto. Dentro de este grupo, se vuelve a clasificar a los trabajos dependiendo si el documento presenta o no un modelo de programación matemática. A los mismos, se los subdivide en cuatro categorías más según si el trabajo busca optimizar el tiempo de la “Infraestructura”, de los “Pacientes” o de los “Recursos humanos”. De no estar dentro de estos criterios, se le adjudica al grupo de “Otros”. Esta clasificación en diferentes categorías y subcategorías se muestra en la Figura 2.6.

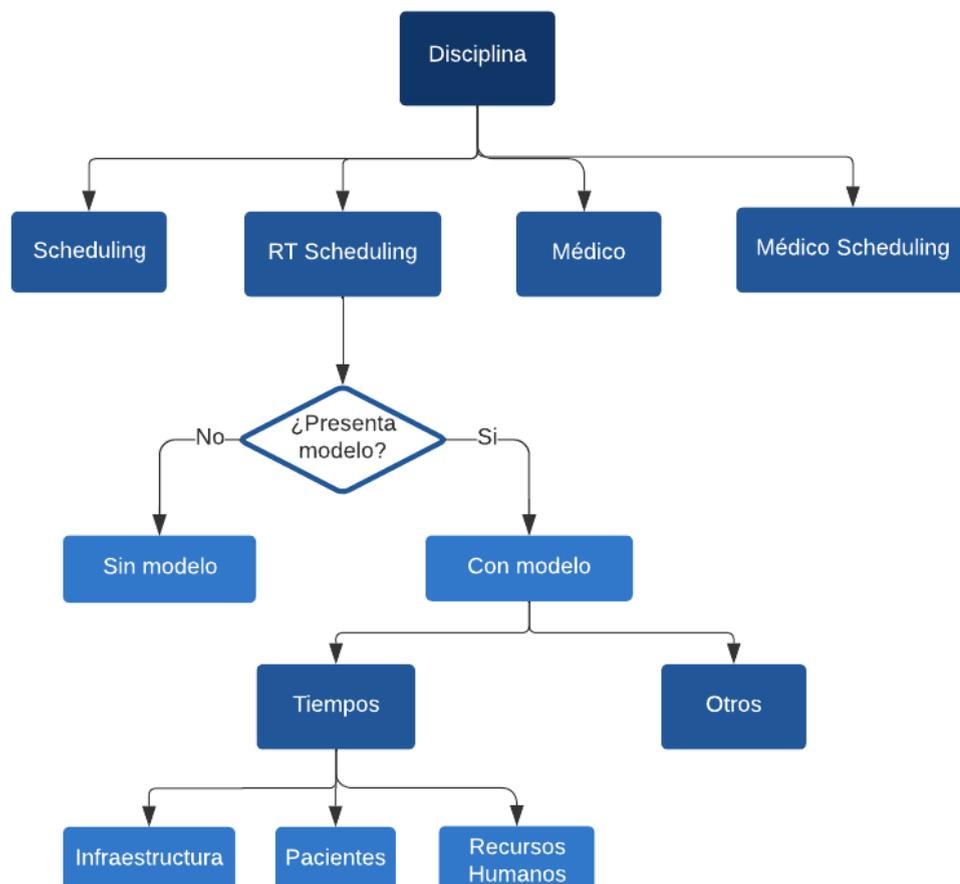


Figura 2.6. Clasificación de la literatura recabada.  
Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan algunos trabajos relevantes que surgen de la revisión de literatura realizada. Estos documentos consolidaron las bases y principios para el desarrollo del modelo matemático del proyecto.

De los artículos relevados, el conjunto de autores de Vieira et. al. (2016, 2018, 2020, 2021) se destaca por su investigación sobre la materia reflejado en publicaciones como son las cuatro citadas anteriormente, donde construye un modelo de scheduling para radioterapia teniendo en cuenta las preferencias de los pacientes. Además, en Vieira et. al. (2021) destaca que hasta 2021, no existe suficiente evidencia científica sobre la implementación de modelos de scheduling en la práctica de radioterapia.

Por otro lado, se encuentra Kapamara et al. (2006), uno de los precursores en la materia. Los autores adaptan el modelo de planificación del Job Shop Problem (JSP) al RTSP. El JSP refiere a la planificación de producción de un número finito de trabajos en un conjunto de máquinas distintas, contando con que no todos los trabajos siguen la misma ruta de producción. De lo anterior, los autores toman la forma de clasificar los tiempos productivos: estático o dinámico. Además, adaptan si la información de los trabajos es estocástica o determinista.

En Castro et al. (2012) los autores se enfocan en disminuir el tiempo de espera del pretratamiento de los pacientes, categorizados según su estado de salud. Trata el problema de la discontinuidad en la disponibilidad de los recursos, al tener recursos multidisciplinarios. Para ello plantean un problema multiobjetivo, donde el objetivo mejor ponderado (al que se le da mayor peso en la función objetivo) está en reducir el tiempo de espera para comenzar el tratamiento de cada paciente, minimizando los comienzos fuera de fecha, y a su vez que los tiempos estén balanceados según la categoría de cada uno. Se basan en los tiempos límites y las buenas prácticas estipuladas por el Joint Council for Clinical Oncology. El modelo de programación matemática que proponen consiste en una combinación de dos problemas conocidos: el problema del viajero o TSP y el JSP. Como resultado, se obtiene que llegar a una solución óptima en un tiempo razonable se torna imposible debido a la complejidad computacional que tiene la resolución de este tipo de problemas. Es por esto que se crean criterios de salida que permiten llegar a una solución factible. Dentro de esos criterios, el de mejor performance fue el Waiting List Status - Lastest Doctor Appointment (WLS-LD).

En Sauré et al. (2012) se plantea una extensión del problema planteado en un trabajo anterior de los mismos autores (Patrick et al., (2008)). Además de considerar múltiples restricciones asociadas al proceso, tiene la particularidad de dejar agendar posterior a la fecha de comienzo de tratamiento. Para ello, se le asigna un costo en la función objetivo de forma de penalizar estos retrasos para que ocurran únicamente en aquellos casos que sea necesario flexibilizar la agenda. Otra particularidad de este enfoque es que es dinámico, es decir que crea agendas que utilizan información cambiante y se renuevan al final de cada periodo.

En Cares et al. (2013), se presenta un algoritmo de búsqueda local donde distinguen dos tipos de restricciones: las duras y las blandas. A este algoritmo se lo nombró "LS<sup>2</sup>R". Las

restricciones blandas son aquellas que son deseables de cumplir y las duras son las que se deben cumplir. Algunas de las consideraciones duras a destacar son: el tiempo límite máximo para comenzar el tratamiento, las cantidad de sesiones e interrupciones posibles y que la asignación doctor-paciente sea siempre la misma. El algoritmo se basa en iteraciones continuas hasta llegar a un valor considerado aceptable. Parte de la base de una agenda factible según el método ASAP (por sus siglas en inglés, "as soon as possible") y luego se itera eliminando pacientes al azar y reagendándolos de forma ASAP teniendo en cuenta los ya agendados. Para evaluar si la solución es mejor que la anterior, se establecen dos criterios, llamados "entropía" de la solución. La primera se hace sobre la distribución de los días de espera ponderados según las categorías, y la segunda se establece haciendo lo mismo pero dentro de una misma categoría de pacientes. Minimizando la entropía se consigue llegar a una mejor solución en cuanto a minimizar el tiempo de espera para empezar el tratamiento, y llegar a un balance entre las categorías y los pacientes. Si bien la entropía global calculada con los métodos ASAP y JIT (Just In Time) son parecidos a LS<sup>2</sup>R, los autores obtienen como resultado un mejor balance a nivel local por paciente y entre categorías.

A lo largo de la búsqueda bibliográfica se pudo concluir que si bien en los últimos 12 años la comunidad científica ha expandido su conocimiento, se puede observar que los trabajos que para el equipo son más destacables, están escritos por los mismos grupos de autores. También, se concluye que el conocimiento construido en lo que respecta al scheduling de radioterapia, es extrapolable y aplicable a otras áreas complejas de la medicina y de la gestión hospitalaria. Por otro lado, se han propuesto diversos métodos de resolución a lo largo de los años, con distintos enfoques y resultados variados.

Si bien los beneficios de la aplicación de métodos cuantitativos en RTS son evidentes en todos los trabajos analizados, siguen existiendo problemas en la aceptación e incorporación de ellos en el área médica. Esta dificultad es parte de la motivación del equipo al querer desarrollar una solución mediante un modelo matemático en un centro de oncología, como se presenta a continuación.

### **3. Caso de estudio**

En la presente sección se presenta a ONCOSUR, un centro regional de radioterapia en Florida, Uruguay. Este centro fue utilizado como caso de estudio a lo largo de este proyecto. Se busca modelar la realidad de la confección de la agenda de pacientes de radioterapia, con el fin de brindar una herramienta para la ayuda en la toma de decisiones de la parte operativa de la empresa. A su vez, se presenta la situación actual de ONCOSUR y la motivación para su elección. La información a presentar a continuación fue recabada mediante entrevistas con un Técnico en Radioterapia de ONCOSUR.

#### **3.1. Presentación de ONCOSUR**

El Centro de Radioterapia ONCOSUR es un condominio localizado en el departamento de Florida en Uruguay, fundado por cinco mutualistas:

- Cooperativa Médica de Canelones (COMECA)
- Cooperativa Médica de Flores (COMEFLO)
- Cooperativa médica de Florida (COMEF)
- Asociación Médica de San José (AMSJ)
- Cooperativa de Asistencia Médica de Durazno (CAMEDUR)

La motivación de estas instituciones pertenecientes a la Federación Médica del interior (FEMI) para fundar ONCOSUR en el año 1996 fue mejorar la calidad y accesibilidad a los tratamientos del cáncer en el interior del país. Esto se logra a través de brindar al paciente el traslado al Centro, de tener un mejor control sobre las dosis de radiación y número de campos de irradiación, además de mejorar los costos del tratamiento (ONCOSUR, 2022). Esta motivación se ve reflejada en lo que hoy en día es su misión y visión.

La misión del Centro es brindar a la población tratamientos de radioterapia con los mejores recursos humanos, infraestructura y tecnología, con el fin de contribuir a la mejora de la salud y el estándar de vida de nuestra sociedad. Es parte de su misión desempeñar obras de ayuda social y promover la investigación científica en radioterapia y radioprotección en equilibrio con valores como la confianza, el respeto, la dignidad y la responsabilidad social. También lo es el trabajar en todos los aspectos y etapas de la enfermedad neoplásica maligna, como son la prevención, el diagnóstico y el tratamiento, siguiendo los criterios más modernos (ONCOSUR, 2022).

Asimismo, ONCOSUR orienta su visión hacia el liderazgo regional en la realización de tratamientos de radioterapia mediante la renovación constante de tecnología, conocimientos y capacitación profesional (ONCOSUR, 2022).

Toda la cadena de proceso está certificada con la norma de calidad ISO 9001:2015, por lo que se asegura el cumplimiento detallado de los estándares estipulados. A su vez, en lo que respecta a la radioprotección, se encuentran regidos bajo el principio ALARA, que por sus siglas en inglés significa "tan bajo como sea razonablemente posible" (As Low As

Reasonably Achievable). Como fue mencionado en la Sección 2, la radiación máxima posible que un humano puede recibir en su vida es limitada, por lo que deben ser mantenidas a niveles tan bajos como sea razonablemente posible.

### 3.2. Flujo de pacientes

El flujo de pacientes en ONCOSUR consta de tres etapas: pretratamiento, tratamiento y seguimiento o post-tratamiento, como se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Etapas del tratamiento de radioterapia en ONCOSUR.

Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso de pretratamiento se clasifica a los pacientes en tres grupos según el grado de avance de la enfermedad: urgentes (requieren inicio inmediato), paliativo-radical (pacientes con dolor constante, terminales o con procesos crónicos avanzados) y paliativo-curativo (pacientes a los cuales se les alivia los síntomas; pueden o no ser pacientes terminales). Este consiste de los siguientes pasos:

1. Consulta con un médico: en una primera instancia se tiene una consulta paciente-médico con una duración de alrededor de 20-25 minutos. Luego, el médico estudia el caso con el historial clínico.
2. Médicos analizan la situación del paciente, y se le realiza una tomografía y una tomografía computarizada.
3. Con la tomografía, en ONCOSUR se mapea el contorno del tumor, se dimensiona y luego se comienza con la creación del plan de tratamiento para el paciente.
4. Simulación virtual y creación del plan. En la simulación se visualiza el tumor y la evolución de la radiación que reciben los órganos durante el tratamiento, y en base a eso se genera el plan de tratamiento adecuado al paciente.
5. Se evalúa el plan de tratamiento. Se realiza una reunión con representantes del equipo multidisciplinario del Centro, donde se termina de definir el plan de tratamiento para cada paciente en particular, utilizando todos los estudios anteriores.
6. Comienza la etapa de agenda al paciente. Se agendan las sesiones con la frecuencia indicada en el plan, y se da comienzo al tratamiento.

En el caso que el paciente sea clasificado como urgente, se saltean varios de los pasos anteriores de forma de poder dar comienzo al tratamiento lo más rápido posible y con absoluta prioridad en cuanto a los recursos a utilizar. Ejemplos de pacientes urgentes pueden ser aquellos con compresión medular, compresión de síndrome de vena cava (tórax), sangrado, o lesiones abiertas.

ONCOSUR se encuentra geográficamente enfrentado al sanatorio de COMEF. Ambas instituciones comparten recursos, lo que permite realizar diferentes etapas del pretratamiento de radioterapia dentro del sanatorio. Por ejemplo, las tomografías son realizadas utilizando los recursos de COMEF. La capacidad del tomógrafo está estimada en 4 a 5 pacientes por hora y cada paciente toma alrededor de 15 minutos, siendo citados entre las 8 y las 16 horas.

Actualmente, se tiene asignado un día a la semana donde ONCOSUR puede acceder a la utilización de la infraestructura de COMEF tales como el block quirúrgico, equipos de radiografía y tomografía. También es posible coordinar en el momento la utilización de ciertos recursos en casos de emergencia. Para pacientes no urgentes, esta situación puede derivar en un aumento en el tiempo de espera para comenzar el tratamiento ya que la disponibilidad de este tipo de recursos no depende del propio Centro.

ONCOSUR hoy en día dispone de un acelerador lineal (LINAC) monoenergético. En cuanto a la energía brindada, cuenta con un rango energético de 6 a 10 Mb fotones y un rango de electrones entre 6 y 18 Mev. Los tratamientos que requieren la utilización de electrones son los más superficiales, como por ejemplo el cáncer de mama y lesiones cutáneas menores a dos centímetros. Sin embargo, todo tipo de cáncer puede utilizar los fotones, aunque es utilizado para patologías más profundas que superficiales. Para algunos tratamientos se necesitan moldes para fijar al paciente en el LINAC. Para esto, cuentan con una impresora 3D con el fin de crear moldes adaptados a las dimensiones de cada paciente.

ONCOSUR cuenta también con un equipo diseñado para tratamientos de braquiterapia ginecológica. Se utiliza para tratar específicamente cáncer de útero insertando un catéter al mismo, y ubicando una fuente de cobalto 60, durante un periodo de entre 6 y 15 minutos. Previo a esto, en COMEF se le brinda anestesia al paciente en el block quirúrgico y otras etapas parte del pretratamiento .

En cuanto al personal médico de ONCOSUR, actualmente cuenta con tres Radioncólogos de tiempo completo (siempre al menos uno presente por día) y uno para suplencias. A su vez, hay un Director técnico y dos Físico Médicos. Cuenta con seis Técnicos en Radioterapia y uno auxiliar para suplencias, además de tres personas dedicadas a la administración del Centro. La organización de los horarios del personal depende fuertemente del flujo de los pacientes. Según lo expuesto por el técnico en radioterapia de ONCOSUR, los días lunes y jueves son los más concurridos por pacientes.

Anualmente, el Centro recibe y brinda tratamiento a entre 350 y 380 pacientes, tanto de Florida como de otras localidades del interior del país. Los pacientes de otras localidades tienen la opción de elegir trasladarse hacia el Centro en un vehículo contratado por

ONCOSUR o de forma particular. En el primer caso, las mutualistas de las distintas localidades contratan un servicio de transporte con una frecuencia determinada en el que traen a cierta cantidad de pacientes y, una vez que todos terminan con sus sesiones, los trasladan de vuelta hacia la localidad de origen. Estos traslados se coordinan según cada localidad, arriban a cierta hora y regresan una vez culminado el último paciente trasladado. Por este motivo ONCOSUR ofrece alojamiento de espera, para que los pacientes puedan esperar cómodamente a que todos terminen sus sesiones. El Centro planea a futuro realizar una reforma en su sala de espera para aumentar la comodidad de los pacientes mientras aguardan.

### **3.3. Situación actual**

Debido a la creciente demanda de tratamientos de radioterapia alrededor del mundo (INC, 2019), se ha vuelto de suma importancia su correcta gestión y la organización efectiva de todas sus etapas para poder procesar a la mayor cantidad de pacientes, manteniendo el estándar de calidad. A su vez, los tiempos de espera al momento de comenzar un tratamiento, tienen incidencias negativas directas e indirectas sobre la salud del paciente, ya que las patologías avanzan y se disminuye la posibilidad de curación efectiva así como el malestar y preocupación que genera encontrarse a la espera de un tratamiento de una patología terminal como lo es el cáncer (OMS, 2022).

El tratamiento de radioterapia requiere la conjunción de recursos humanos y de infraestructura muy especializados, lo cual los vuelve escasos. De esta manera, la correcta utilización y cuidado de los tiempos de los recursos, permite su uso prolongado en el tiempo y asegura la calidad del tratamiento. Particularmente, puede observarse este problema y sus efectos en ONCOSUR. El Centro cuenta con capacidad limitada, ya que debe atender a todos sus pacientes dentro de un tiempo límite estipulado por sus políticas de calidad, y debe atenderlos en un solo equipo de radioterapia externa (LINAC y/o equipo de braquiterapia). También, la fuerza laboral es reducida ya que está compuesta por personal altamente capacitado e involucrado en todos los pasos de los tratamientos que se ofrecen. Los tiempos máximos de espera según sus políticas de calidad para cada categoría de paciente se pueden ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tiempos de espera máximos según tipo de paciente. Valores estándar fijados por ONCOSUR.

Clasificación de paciente	Tiempo máximo de espera
Curativo radical	15 días
Paliativo	7 días
Urgente	1 o 2 días

ONCOSUR necesita de los recursos de COMEF para cumplir con distintas etapas del pretratamiento, como lo es la realización de las tomografías. Esto puede derivar en

complicaciones para avanzar con las otras etapas del pretratamiento, siendo por razones externas al propio Centro.

Tanto la agenda de pacientes para los LINACs como para el equipo de braquiterapia, actualmente se realiza de forma manual: antes de comenzar la semana se cuenta con un listado de pacientes que deben comenzar su tratamiento, y se los incorpora en los espacios disponibles de la agenda. Se tiene un horizonte de 5 días de planificación de agenda.

A lo largo de toda la ejecución del proyecto, ONCOSUR se halló en proceso de implementación de un equipo nuevo para tratar pacientes. Este nuevo LINAC, viene acompañado de un software de gestión llamado ARIA, que opera en todas las áreas del centro formando una red. De esta manera, todos los colaboradores del centro tendrán usuarios y serán los responsables de gestionar en el sistema todo el flujo de pacientes.

Un aspecto importante del equipo a implementar es que con él puede hacerse radioterapia guiada por imagen, un método novedoso de radioterapia externa que permite validar, con el paciente ya posicionado en el equipo, las tomografías a través de rayos X. Esto significa una reducción notoria del error y permite una precisión casi exacta de tratamiento. Además, el nuevo software de gestión digitaliza todos los registros y planes de tratamiento, maneja agenda de consultas e historias médicas e incluso puede guardar plantillas de tratamiento que pueden ser utilizadas y modificadas fácilmente. Esto tendrá un efecto importante sobre los pacientes que son paliativos o urgentes, ya que basándose en una plantilla de plan de tratamiento almacenada, se podría acortar el tiempo de espera para la primera sesión. Lo único que no abarca este sistema es la planificación de los tratamientos y la programación de las agendas, las cuales seguirán siendo creadas por el equipo técnico.

### **3.4. Bibliografía relevante aplicada a la realidad de ONCOSUR**

Se busca mencionar algunos trabajos relevantes que surgieron en la revisión de literatura presentada en detalle en el Anexo 1 y en parte en la Sección 5, vinculándolos específicamente a aspectos relevantes del RTSP en ONCOSUR.

El modelo presentado en de Vieira et al. (2021) es de programación lineal entera mixta (MILP) y presenta un enfoque offline, es decir que contempla la realidad por completo para generar una solución. Contempla una realidad abierta y genérica de un centro de radioterapia y podría modificarse para adaptarlo a la realidad de ONCOSUR. Tiene la particularidad de considerar las preferencias horarias de los pacientes, y coincide con uno de los objetivos perseguidos en nuestro trabajo. A su vez, presentan restricciones para restringir el horario posible para ciertos pacientes, y eso resulta de utilidad para ONCOSUR al querer agendar a pacientes que se trasladen en transporte contratado por sus mutualistas de origen.

Continuando con el análisis de Vieira et al. (2021), los autores proponen un parámetro para cada paciente que indique el último día en el cual ese paciente puede comenzar su tratamiento, lo cual sigue la línea de los objetivos de calidad de ONCOSUR, según lo expresado en la Sección 3. Esa característica del modelo permite respetar la condición de

no sobrepasar los días máximos de espera desde que se le indica el tratamiento al paciente y que da comienzo al mismo, indicados en la Tabla 3.1 de la Sección 3.3.

Por otra parte, en Conforti et al. (2010) se presenta un enfoque “non-block”, es decir que no utiliza intervalos fijos de tiempo para la agenda. La creación de una agenda non-block tiene dos pasos principales. El primero consiste en la selección de pacientes, es decir definir qué pacientes se tratarán en cada LINAC en cierto día, y el segundo paso consiste en distribuir y ordenar las listas de pacientes con tiempos no uniformes de tratamiento para cada LINAC y cada día. Particularmente, el modelo propuesto en Conforti et al. (2010) se enfoca en el paso de selección de pacientes. Este es un enfoque interesante para la agenda de pacientes y puede utilizarse para la agenda de los pacientes de ONCOSUR que requieren de tiempos no fijos para sus sesiones, como ser el tratamiento de braquiterapia. Sin embargo, los propios autores exponen que a pesar de ser útil, el enfoque non-block es usualmente desestimado por ser considerablemente menos práctico que el enfoque tradicional de intervalos de tiempo fijos. Esto generó la idea de optar por un enfoque “block” con intervalos de tiempo fijos, pero que permita atribuir más de un intervalo (en adelante referido como slot por su traducción al inglés) a un paciente cuyo tratamiento requiera de más tiempo.

Siguiendo con el trabajo Conforti et al. (2010), se considera la severidad de la enfermedad de cada paciente en particular creando una lista de prioridades al momento de agendar, previamente definido por el médico, y con la posibilidad de modificarla a lo largo del tratamiento. Esta característica resulta de interés, ya que esta idea mantiene el foco en la calidad de vida de los pacientes. Si el modelo para la agenda de ONCOSUR considera la evolución de la salud del paciente a lo largo del tratamiento y a lo largo del tiempo, entonces se estaría cumpliendo con uno de los objetivos propuestos.

## **4. Objetivos y metodología del proyecto**

En esta sección, se presentan los objetivos principales y secundarios del equipo de trabajo para el proyecto de grado. Posteriormente, se presenta la metodología seguida para alcanzar dichos objetivos.

### **4.1. Objetivos**

Como objetivos principales del equipo se distinguen los siguientes:

- Investigar los beneficios que brinda la programación matemática en la agenda de tratamientos de radioterapia, desarrollando un modelo que se adapte a las necesidades de ONCOSUR, utilizando como base la literatura relevada.

Este primer objetivo se refiere a evaluar la realidad de la programación de tratamientos en ONCOSUR, en todas sus etapas, comparándola en un ambiente experimental utilizando un modelo creado por el equipo que sea útil y ayude en la toma de decisiones del centro. La evaluación entonces consiste en la comparación de los resultados del modelo con la programación real del centro. Los beneficios que se desprenden de este objetivo principal definen los siguientes objetivos.

- Reducir los tiempos de espera promedio para pacientes que ingresan a ONCOSUR.
- Reducir el tiempo de realización de agendas semanales de tratamiento.
- Crear agendas que cumplan o superen los estándares de calidad de ONCOSUR y respeten las restricciones de capacidad y de políticas de la empresa involucrada.
- Identificar y presentar oportunidades de mejora en la planificación de tratamientos de ONCOSUR.

La motivación de los objetivos presentados surge de la investigación por parte del equipo sobre modelos matemáticos aplicados al scheduling como disciplina que ha permitido enormes avances en la industria. Al profundizar en técnicas complejas para el RTSP, descubriendo los pormenores de este tipo de tratamientos, se infunde la curiosidad de experimentar con la realidad local de Uruguay, la cual, hasta donde se tiene conocimiento, no ha sido abordada.

Además, el equipo valora la oportunidad de basar su estudio en un caso real. Esto quiere decir, estableciendo contacto con la misma, relevando las particularidades presentes e interpretándolas para crear un modelo matemático que logre simplificar y ser una representación adecuada de la misma.

Otro factor motivante del proyecto es trabajar en conjunto con una organización cuyo sistema de gestión de calidad está certificado y ha sido ganador del Premio Nacional de

Calidad. A su vez, se valora el desafío de presentar la noción de optimización a través de métodos cuantitativos y las posibilidades de mejora que brindaría este tipo de herramientas a ONCOSUR.

## **4.2. Metodología del proyecto**

Para lograr los objetivos planteados anteriormente, se siguió una metodología de proyecto la cual va a ser detallada a continuación.

La metodología utilizada para este proyecto no pertenece estrictamente a los modelos tradicionales de metodologías, sino que, de manera más laxa, se toman aspectos de las metodologías tradicionales como la del Project Management Institute (PMI) o las metodologías ágiles utilizadas frecuentemente en proyectos de desarrollo de software. La razón detrás de este enfoque híbrido es que el equipo, instruido en ambas metodologías a lo largo de la carrera, encontró que la metodología PMI es útil para darle un marco de trabajo y planificación a los hitos del proyecto y a la componente de investigación y redacción del mismo. A su vez, generar algunos de los documentos de proyecto que componen la metodología, ayudó a definir y ajustar el alcance del proyecto y la manera de trabajar. Por otro lado, como el proyecto tiene un componente fuerte de programación, en ambientes con experimentación, verificación y validación, se adoptaron ciertos aspectos de las metodologías ágiles como SCRUM para el corto plazo durante esas etapas.

En primer lugar, se definieron las etapas del proyecto, estas serían las etapas de iniciación, planificación, ejecución, seguimiento y control, y cierre.

En la fase de iniciación se definió la temática, equipo, objetivos principales y el ámbito de aplicación del proyecto. En esta etapa también se definen los riesgos principales existentes, la gestión de las comunicaciones y los actores involucrados. Durante esta etapa se creó un acta de constitución, una herramienta perteneciente al método PMI. Este acta fue luego actualizada al definirse la etapa de caso de estudio con ONCOSUR y se presenta en el Anexo 2.

En la fase de planificación, se define en base a los objetivos principales un plan de ejecución dividido en etapas de mediano plazo. Para este proyecto, las etapas de trabajo fueron:

1. **Investigación:** lograr una masa crítica de conocimiento en el RTSP mediante el estudio de trabajos académicos. En esta etapa, se recabaron trabajos de varios repositorios y fuentes para entender los conceptos claves de la radioterapia, de la disciplina de scheduling en general y de el RTSP.
2. **Revisión Literaria:** se realizó una revisión sistemática de la literatura del tema RTS en ciertos repositorios y bajo parámetros de búsqueda específicos. En esta parte se profundizó en el conocimiento sobre los conceptos base de este proyecto.

3. **Estado del Arte:** esta etapa incluye la confección de un documento que sintetiza los trabajos en la disciplina recabados en la etapa anterior. Este documento se encuentra en el Anexo 1 y presenta de manera detallada el proceso de búsqueda realizado, además de una introducción a la temática del proyecto. También se presentan conclusiones acerca de los estudios realizados por la comunidad científica, los cuales contienen modelos matemáticos aplicados al RTSP y de la evolución de los métodos y herramientas de modelados que surgen de los mismos.
4. **Caso de estudio:** consiste en establecer contacto con una entidad local abocada al tratamiento de pacientes con radioterapia. Luego de manejar candidatos posibles, la buena disposición y desarrollo de procesos del Centro de Radioterapia ONCOSUR fue un factor determinante en la decisión de elegirlo como caso de estudio. Luego, se realizó una visita al Centro y se mantuvo contacto con la contraparte de manera de relevar la realidad a modelar posteriormente.
5. **Desarrollo de modelo matemático:** se desarrollan modelos matemáticos en base a la situación relevada en ONCOSUR. Para esto, se utilizan los conocimientos adquiridos en la etapa 2 de manera de adaptarlos y aplicarlos en la realidad de la empresa.
6. **Validación y verificación:** en esta etapa, se verifica mediante experimentación que el modelo cumple con los requisitos que el equipo establece en el plan de verificación presentado más adelante, y se valida con la contraparte en la empresa que el modelo realizado sea una representación correcta de la realidad de ONCOSUR en cuanto a supuestos principales, objetivos y restricciones.
7. **Recolección de datos:** se trabaja en conjunto con la empresa para recabar, analizar y procesar datos históricos de la agenda de pacientes. Esta etapa se centra en la interpretación y manejo de datos, los cuales tienen un carácter confidencial y deben tratarse con la sensibilidad correspondiente.
8. **Experimentación y análisis:** en esta etapa, se utiliza la información procesada para experimentar con el modelo creado en la etapa 5. Se realizan varias pruebas para comparar las agendas creadas por el modelo con las agendas reales del Centro. También, esta etapa incluye un análisis de sensibilidad en el cual se realizan pequeñas perturbaciones a los datos de entrada y se estudian sus repercusiones en la salida del experimento. Por último, se analizan los resultados obtenidos.
9. **Redacción de documento de proyecto:** en esta etapa final, se redacta el documento del proyecto en base a todas las etapas anteriores y las conclusiones finales para su posterior entrega y presentación.

Durante la fase de ejecución, se llevan a cabo las tareas de todas las etapas de la planificación antedichas. Es en estas etapas, y particularmente en las de programación y prueba, que se define la carga de tareas semanal para cada integrante y se realiza un

seguimiento activo diario de todo el equipo. Este enfoque es similar a los “sprints” de un proyecto desarrollado con la metodología ágil SCRUM.

La fase de seguimiento y control es una fase transversal al proyecto, es decir que transcurre desde el inicio hasta el cierre. Para el seguimiento de todas las otras fases, se definieron reuniones bisemanales con el tutor del proyecto y semanales para el equipo de trabajo. A su vez, se establecen, junto con el tutor, entregables a partir de los cuales se brinda retroalimentación sobre la ejecución de cada fase.

En la fase de cierre, se realiza la entrega del informe al tutor y al tribunal de evaluación así como a la contraparte en la empresa ONCOSUR.

Para la comunicación entre los actores involucrados del proyecto, se reconoce:

**Comunicación Equipo-Tutor:** reuniones bisemanales vía videoconferencia para el seguimiento y correos electrónicos para manejar entregas, consultas y devoluciones.

**Comunicación intra-equipo:** los integrantes del equipo se comunicaron a lo largo del proyecto a través de mensajería instantánea con una frecuencia de 1 o 2 días, reuniones presenciales o virtuales con frecuencia semanal y correos electrónicos. La frecuencia de dichos intercambios es variable según etapas del proyecto y los requerimientos de cada una y de la gestión de riesgos y problemas que ocurren normalmente. A su vez, el equipo comparte en conjunto una carpeta de Google Drive, en la cual se mantienen todas las versiones de documentos redactados, apuntes de reuniones, cronogramas, trabajos estudiados en la fase de investigación, entre otros.

**Comunicación con la contraparte ONCOSUR:** En cuanto a la comunicación con la contraparte se realizó una visita a la empresa en Florida, guiada por uno de los técnicos de radioterapia del Centro y con el fin de introducir al equipo en la operativa. Luego, a lo largo de la fase de desarrollo, validación, y verificación, se mantuvieron reuniones virtuales en varias oportunidades con el representante, así como contacto mediante correo electrónico o mensajería instantánea, cuando se deseaba validar algún detalle o realizar consultas. A su vez, se intercambia con la empresa información sensible sobre pacientes, la cual tiene carácter confidencial.

Para la gestión de riesgos del proyecto, se creó una matriz de riesgos. Esta es otra herramienta tomada del método PMI y refiere a un documento en el cual se plasman los principales riesgos para el desarrollo del proyecto y se analiza el impacto, el disparador, así como las acciones preventivas y correctivas de los mismos (Toledo et. al., 2007).

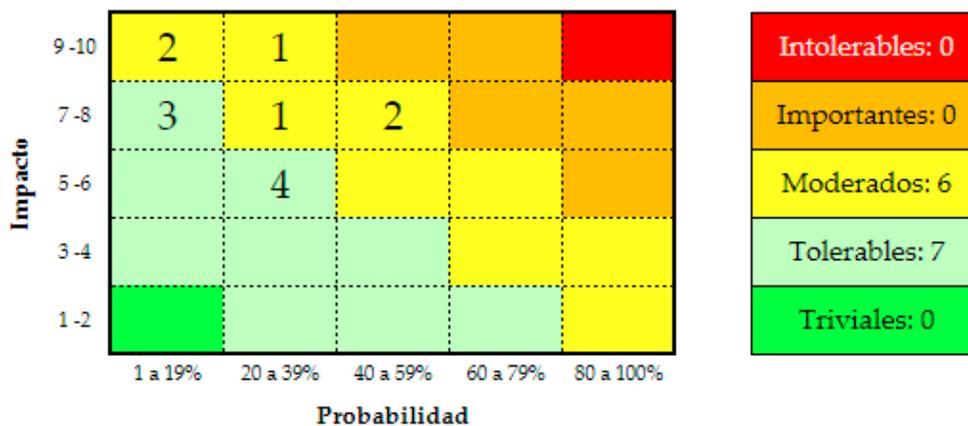
La lista de riesgos con su respectiva descripción, probabilidad e impacto se presenta junto con las acciones preventivas y correctivas en el Anexo 3 Para el proyecto, se identificaron 11 riesgos, los cuales se presentan en la Tabla 4.1, clasificándose según los valores de probabilidad de ocurrencia e impacto adjudicados por el equipo.

Tabla 4.1. Clasificación de los riesgos de un proyecto según método PMI.

Impacto			Probabilidad		
De	A	Nivel de impacto	Desde	Hasta	Nivel de probabilidad
1	2	1–Insignificante	1%	19%	1- Sería excepcional
3	4	2–Levemente dañino	20%	39%	2- Es raro que suceda
5	6	3–Dañino	40%	59%	3- Es posible
7	8	4–Muy dañino	60%	79%	4- Muy probable
9	10	5–Catastrofe	80%	100%	5- Casi seguro que sucede

Los resultados del análisis de riesgos muestran siete riesgos tolerables y seis riesgos moderados, lo cual es un valor considerado aceptable por el equipo dado que no existen riesgos importantes ni intolerables tal cual se presentan en la Tabla 4.2 Además, el índice de riesgos, calculado como el promedio del producto entre probabilidad e impacto es de 1,47. El índice, por su forma de cálculo, y según los valores que se presentan en la Tabla 4.2 toma un valor entre 0 y 10, y en cuanto a su valoración, no existen criterios más que la aversión del equipo al riesgo para determinar si es aceptable o no (Gazzano, 2022). El equipo considera que el valor de 1,47 es sumamente tolerable para la continuidad del proyecto.

Tabla 4.2. Cuadro de riesgos del proyecto con tabla de puntaje.



Como puede verse, la metodología aplicada no integra un único estilo o método sino que utiliza, a conveniencia del equipo de trabajo, distintas herramientas provenientes de metodologías conocidas. Otra particularidad es que el proyecto no tuvo un cronograma global, es decir una fecha de finalización marcada hasta la fase de cierre. Esto se debe a que el alcance del proyecto fue definido en paralelo a su desarrollo y a que la investigación y desarrollo tienen un componente de incertidumbre considerable.



## **5. Definición del problema y formulación del modelo**

En esta sección se describen aspectos de la realidad de ONCOSUR a considerar para la creación de un modelo matemático de la agenda de pacientes de radioterapia, cumpliendo con distintos requerimientos. Luego se presenta el modelo explícito y los conceptos claves para su definición.

### **5.1. Descripción del problema**

En el Centro ONCOSUR, se brindan tratamientos de radioterapia a pacientes tanto privados como de varias mutualistas que en conjunto son propietarias del Centro. En el mismo, se realizan todas las etapas de pretratamiento y tratamiento utilizando personal de la empresa, sus equipos y utilizando los equipos de tomografía de una de las mutualistas.

Se atienden en el Centro unos 350 pacientes a lo largo del año y se le administran entre 3 y 42 sesiones a cada uno de ellos utilizando un acelerador lineal y un equipo de 4 radioncólogos y 7 técnicos en radioterapia. Las sesiones se dan a razón de una por día y en días consecutivos de la semana laboral. Esto quiere decir que una vez ingresados, los pacientes no pueden interrumpir su tratamiento y deben mantener la frecuencia de una sesión cada día. La programación de los tratamientos se realiza semanalmente en ONCOSUR y se asigna una jornada laboral completa de un integrante del equipo técnico para su confección.

En el Centro, no se toma a todos los pacientes por igual, sino que se los categoriza según la gravedad de su cáncer y el tipo de tratamiento a suministrar. Además, dado que ONCOSUR está situado en el departamento de Florida y brinda tratamientos a pacientes de un conjunto de mutualistas de distintos departamentos, varios pacientes se trasladan al centro desde otras localidades utilizando transporte colectivo contratado por sus mutualistas. Estos pacientes arriban juntos y se van juntos, por lo cual si están dispersos en la agenda, existen tiempos prolongados de espera previos y posteriores a la sesión. Además de la duración de cada sesión de un paciente debe considerarse la duración y horarios de las sesiones de otros pacientes que comparten transporte. La lista de los pacientes que utilizan transporte contratado incluye tanto a pacientes en tratamiento como en la lista de espera.

Por las complejidades que tiene el tratamiento de radioterapia, y las diversas características que tiene cada paciente, los radioncólogos de ONCOSUR deciden que las sesiones de ciertos pacientes se den bajo su supervisión. Esta restricción obliga a que las sesiones de dichos pacientes coincidan con el horario de atención de uno de los radioncólogos.

La planificación de estos tratamientos debe tener en cuenta los pasos previos al inicio del mismo como lo son las consultas, tomografías, simulaciones del tumor y creación del plan de tratamiento. También, deben tenerse en cuenta las fechas límite para comenzar cada tipo de tratamiento dictados por los estándares de calidad de ONCOSUR. Al igual que en muchos centros de radioterapia, en ONCOSUR se procura que los pacientes adquieran una

rutina de tratamiento, es decir, asignarle un horario de tratamiento y mantenerlo a lo largo de las semanas.

Al momento, el Centro dedica una jornada entera cada semana para la actualización de la lista de pacientes y la creación manual de las agendas de la siguiente semana. Esta programación es una tarea ardua ya que conlleva las dificultades previamente mencionadas. Los horarios de trabajo del Centro son acotados, teniendo una semana laboral de cinco días, operando desde 07:55 a 18:20. También, debe tomarse en cuenta que la disponibilidad del LINAC no es igual al tiempo de operación del Centro ya que existen periodos de calibración o mantenimiento rutinarios.

El tiempo de operación del equipo LINAC, se fracciona en intervalos o slots de igual duración y para cada uno de esos intervalos se sabe si el equipo está disponible o no. Las causas de no disponibilidad refieren tareas de mantenimiento, calibración o que se haya bloqueado por el equipo técnico.

ONCOSUR tiene tres clasificaciones de pacientes, estas son pacientes paliativos, radicales o urgentes. Esta característica de cada paciente depende de la gravedad y grado de avance del cáncer del mismo. También, el tipo de paciente dicta el tratamiento que se le debe brindar en cuanto a cantidad de sesiones, dosis de radiación y duración de las mismas. Un aspecto importante, es que a partir de la consulta inicial de un paciente, su categoría dicta la fecha límite para comenzar el tratamiento. De igual manera, para la programación debe tomarse en cuenta la prioridad de un paciente según su fecha límite y no su categorización.

Otro desafío que tiene ONCOSUR es el manejo de los pacientes de carácter urgente. Estos son pacientes cuya situación es de dolor, o crítica. Los urgentes arriban sin aviso y deben tratarse lo antes posible. A menudo sucede que debe trabajarse tiempo extra por pacientes urgentes o demoras por llegadas tarde y contingencias.

Lo que se desea optimizar en ONCOSUR es aquello que se condice con su misión. Esto es ofrecer un tratamiento de calidad que cumpla con los estándares fijados por el Centro y que el mismo se adapte de la mejor manera posible a la rutina de los pacientes. De este objetivo se desprende que el tratamiento se brinde lo antes posible, ya que los pacientes llegan al Centro con un diagnóstico y con la necesidad de tratarse. Esta necesidad se ve incrementada con el transcurso del tiempo. En otras palabras, para mejorar la calidad y efectividad del tratamiento, el mismo debe administrarse lo antes posible.

Para saber en qué medida se adapta un tratamiento a la rutina de un paciente, se debe primero establecer una preferencia horaria, es decir un tiempo máximo y mínimo en el cual el paciente prefiere ser atendido, y evaluar si las sesiones programadas se alinean con la preferencia o tienen una desviación. Por todo esto, se debe minimizar el desvío entre las sesiones agendadas a cada paciente y su preferencia. También, debe lograrse que los pacientes en lista de espera se agenden lo antes posible, es decir que se tiene como objetivo maximizar la cantidad de sesiones administradas a pacientes nuevos.

Las razones expuestas anteriormente, muestran que la situación de ONCOSUR es posible de ser estudiada a través de un enfoque de RTSP como el relevado en la literatura y presentado en la Sección 3.4 de este documento.

## **5.2. Modelo MILP para la agenda de tratamientos de radioterapia de ONCOSUR**

En esta sección se describen los supuestos para la creación de un modelo matemático del tipo de RTSP, para la agenda de pacientes de radioterapia de ONCOSUR, teniendo en cuenta los aspectos más relevantes de la realidad del Centro, descritos en la subsección anterior. Posteriormente se presenta la formulación completa del modelo matemático propuesto.

ONCOSUR tiene prioridades asignadas a cada paciente de radioterapia según la urgencia de comienzo del tratamiento que se tenga. Por lo tanto, para el modelo se crean distintas franjas de prioridad para los pacientes, determinadas según la fecha límite que tengan asignada. La franja de mayor prioridad, contiene a los pacientes que ya están siendo tratados, es decir que deben comenzar el primer día del horizonte de planificación. En segundo lugar, se encuentran los pacientes que deben comenzar su tratamiento en algún punto del horizonte de planificación. En tercer y cuarto lugar, se encuentran los pacientes cuya fecha límite está fijada más adelante que el horizonte de planificación y estas dos franjas se dividen según si la fecha del paciente es mayor o menor a un valor  $z$ . En síntesis, se define una franja prioritaria para los pacientes en tratamiento y tres franjas para los pacientes en lista de espera llamadas A, B y C. Es necesario destacar que los pacientes ya en tratamiento y los de la franja A deben ser agendados, mientras los de las categorías B y C pueden o no ser agendados.

Para aquellos pacientes cuya clasificación es urgente, es decir que deben comenzar su tratamiento el mismo día o un día después de su ingreso a ONCOSUR, se reserva un intervalo de tiempo al final de cada día para que estos pacientes puedan ser atendidos. El margen amortiguador de tiempo es de 20 minutos y no se considera dentro del horario normal de atención.

En cuanto a los pacientes que se trasladan hacia el Centro en camionetas contratadas por su mutualista de origen, se buscará que a estos pacientes se les asigne su sesión dentro del horario en que la camioneta se encuentra en ONCOSUR, y esto sin ningún tipo de flexibilidad. Esto es análogo para la situación planteada para los pacientes que requieren de un médico especialista en particular para realizar su sesión: el horario de las sesiones de este paciente debe ajustarse al horario de atención disponible de este médico especialista.

Debido a que la primera sesión de un paciente es naturalmente más larga y tiene más incertidumbre debido a la adaptación del paciente, calibración del equipo y fabricación de moldes, se establece una restricción de máximo de sesiones iniciales por día, para tener un control sobre esta cantidad y el esfuerzo que requiere del equipo técnico de ONCOSUR.

Se tiene en consideración que los tiempos de las sesiones de los pacientes pueden variar dependiendo de distintos factores (tipo de tratamiento, número de sesión, entre otros), lo

cual implica que debe detallarse, para cada paciente, cuántos slots requiere para su sesión. Por ejemplo, si se toman slots de 5 minutos y cada sesión del paciente requiere 10 minutos, se tiene una cantidad de dos slots por sesión para ese paciente.

En línea con el objetivo de mantener y mejorar la calidad de vida de los pacientes, se busca la forma de hacer partícipe al paciente en la elección de su horario de tratamiento. Como se verá en la descripción del modelo, parte del objetivo es evitar en lo posible que las sesiones de los pacientes sean agendadas por fuera del horario elegido por ellos.

Para el desarrollo del modelo, se tomó como base el modelo presentado en Vieira et al. (2021) debido a que en el mismo se modela una realidad similar a la de ONCOSUR. Sobre esta base se realizaron diferentes extensiones para considerar las particularidades de la realidad del Centro.

A continuación se detallan los conjuntos, parámetros y variables de decisión utilizados en el modelo, y su función objetivo y restricciones. A medida que se presentan, se explica cómo se relacionan con las particularidades de la realidad de ONCOSUR.

## **Conjuntos**

$PB$ : Conjunto de pacientes agendados anteriormente y que continúan su tratamiento.

$PM$ : Conjunto de pacientes en lista de espera que deben comenzar su tratamiento de manera urgente.

$PD$ : Conjunto de pacientes en lista de espera que deben comenzar su tratamiento de manera no urgente.

$PW$ :  $PW = PM \cup PD$ . Conjunto de pacientes en lista de espera para comenzar su tratamiento.

$PF$ :  $PF \subset P$  Conjunto de pacientes con tiempo restringido para sus sesiones.

$P$ :  $P = PB \cup PW$ . Conjunto de todos los pacientes, con  $P = \{1, \dots, nP\}$ ,  $nP$  la cantidad total de pacientes, y subíndices  $i, i', i'', i'''$ .

$K$ : Conjunto de todos los LINACs, con  $K = \{1, \dots, nK\}$ ,  $nK$  la cantidad total de LINACS, y subíndice  $k$ .

$T$ : Conjunto de días del horizonte de planificación, con  $T = \{1, \dots, nT\}$ ,  $nT$  la cantidad total de días, y subíndice  $t$ .

$S$ : Conjunto de slots disponibles para cada día del horizonte de agenda, con  $S = \{1, \dots, nS\}$ ,  $nS$  la cantidad total de slots, y subíndice  $s$ .

## Parámetros

$a_{stk}$	: Disponibilidad del slot $s$ el día $t$ para el LINAC $k$ . Vale 1 si está disponible y 0 si no lo está.
$f_{ti}^-$	: Límite inferior del slot de la ventana temporal obligatoria del paciente $i$ el día $t$ .
$f_{ti}^+$	: Límite superior del slot de la ventana temporal obligatoria del paciente $i$ el día $t$ .
$r_i$	: Cantidad de sesiones restantes a ser brindadas al paciente $i$ hasta finalizar su tratamiento por completo.
$d_i$	: Último día en que el paciente $i$ puede comenzar su tratamiento.
$p_i$	: Duración de cada sesión del paciente $i$ medida en cantidad de slots.
$b_i$	: Cantidad de días de descanso requeridos para el paciente $i$ entre sesión y sesión agendada.
$t_i^-$	: Límite inferior en minutos de la ventana temporal de preferencia del paciente $i$ .
$t_i^+$	: Límite superior en minutos de la ventana temporal de preferencia del paciente $i$ .
$c$	: Cantidad máxima de pacientes por día que puede dar comienzo a su tratamiento.
$q$	: Duración en minutos de cada slot.
$w_i$	: Ponderación de la agenda de cada paciente $i$ .
$z$	: Día de partición de las categorías de pacientes por prioridad.
$\alpha$	: Ponderación para franjas de prioridad en la función objetivo.

## Variables de decisión

$x_{tisk}$	: Variable binaria que toma el valor 1 si el paciente $i$ tiene agendada una sesión de tratamiento el día $t$ en el slot $s$ en el LINAC $k$ . Vale 0 en otro caso.
$y_{tik}$	: Variable binaria que toma el valor 1 si el paciente $i$ comienza su tratamiento el día $t$ en el LINAC $k$ . Vale 0 en otro caso.
$\Delta_{it}^-$	: Desviación inferior en minutos de la ventana temporal de preferencia elegida por el paciente $i$ en el día $t$ .

$\Delta_{it}^+$  : Desviación superior en minutos de la ventana temporal de preferencia elegida por el paciente  $i$  en el día  $t$ .

### Formulación matemática

A continuación, se presenta el MILP propuesto para el problema de agenda pacientes de radioterapia de ONCOSUR, siguiendo el enfoque del RTSP y tomando como base el modelo propuesto por Vieira et al. (2021).

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} (\Delta_{it}^- + \Delta_{it}^+) w_i - \sum_{k \in K} \left( \alpha \sum_{t \in T} \sum_{i' \in PW, d_{i'} \leq nT} \sum_{s \in S} x_{ti'sk} + \right. \\ & \left. + \frac{3\alpha}{2} \sum_{t \in T} \sum_{i'' \in PW, nT < d_{i''} < z} \sum_s x_{ti''sk} + \frac{\alpha}{3} \sum_{t \in T} \sum_{i''' \in PW, d_{i'''} \geq z} \sum_{s \in S} x_{ti'''sk} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{tiks} \leq 1, \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} x_{tiks} \leq a_{kst}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_{tik} \geq \sum_{s \in S} x_{tiks} - \sum_{s \in S} x_{t'iks}, \quad \forall i \in PD, \forall k \in K, \\ \forall t = 2, \dots, nT, t' = \max\{1, t - b_i\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$y_{1ik} \geq \sum_{s \in S} x_{1iks}, \quad \forall i \in PW, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in PW} y_{tik} \leq c, \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{tiks} \leq r_i, \quad \forall i \in P \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{s \in S} x_{tiks} - \sum_{s \in S} \sum_{t'=1}^{t-1} x_{t'iks} \leq \sum_{s \in S} x_{niks}, \\ \forall i \in P, \forall k \in K, \forall t = 2, \dots, nT, \\ \forall n \in \{t + b_i, t + 2b_i, \dots, \min\{nT, t + b_i(r_i - 1)\}\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sum_{s \in S} x_{1iks} \leq \sum_{s \in S} x_{niks}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \\ \forall n \in \{b_i + 1, 2b_i + 1, \dots, \min\{nT, b_i(r_i - 1) + 1\}\} \quad (9)$$

$$1 - \sum_{s \in S} x_{tiks} \geq \sum_{s \in S} x_{niks}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall t \in \{1, \dots, nT - b_i\}, \\ \forall n \in \{t + 1, \dots, t + b_i - 1\}, b_i \geq 2 \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{d_i} x_{tiks} \geq 1, \quad \forall i \in P: d_i \leq nT \quad (11)$$

$$x_{tiks} \leq 1 - \sum_{i' \in P} x_{ti'ks'}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in \{1, \dots, nS - p_i + 1\}, \\ \forall t \in T, \forall s' \in \{s + 1, \dots, s + p_i - 1\}, p_i \geq 2 \quad (12)$$

$$x_{tiks} = 0, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in S: s \leq nS - p_i + 2, \\ \forall t \in T, p_i \geq 2 \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} x_{tiks} \leq 0, \quad \forall i \in PF, \forall k \in K, \\ \forall s \in S: s < f_{ti}^-, s > f_{ti}^+, \forall t \in T \quad (14)$$

$$t_i^- x_{tiks} - \Delta_{it}^- \leq q(s - 1)x_{tiks} \leq t_i^+ * x_{tiks} + \Delta_{it}^+, \\ \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (15)$$

$$t_i^- \leq t_i^+, \quad \forall i \in P \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{i \in PW} x_{tiks} \geq \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{i' \in PW} x_{ti'ks'}, \quad d_i > nT, d_i < z, d_i \geq z \quad (17)$$

$$\sum_{t \in T, t < d_i - 1} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{tiks} = 0, \quad \forall i \in PB: d_i > 1 \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{1iks} = 1, \quad \forall i \in PB: d_i = 1 \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{tiks} = 1, \quad \forall i \in PB, t = d_i \quad (20)$$

$$\Delta_{it}^- \geq 0, \Delta_{it}^+ \geq 0, \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (21)$$

$$x_{tik}, y_{tik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (22)$$

La función objetivo (1) se divide en dos términos: minimizar las desviaciones entre las ventanas temporales y las sesiones fijadas de cada paciente, y maximizar el uso del LINAC. Respecto al término de las desviaciones, se las multiplica por el parámetro  $w_i$  para ponderar la prioridad de ventanas temporales de preferencia de los pacientes con tratamiento ya en curso con respecto a los pertenecientes a la lista de espera. La finalidad de multiplicar por este parámetro es que la desviación representada por las variables  $\Delta_{it}^-$  y  $\Delta_{it}^+$  para un paciente con tratamiento en curso provoque un aumento superior en la función objetivo respecto a la desviación de los pacientes que están en la lista de espera para comenzar su tratamiento. Esto se explica porque se considera de mayor importancia mantener el horario de las sesiones de pacientes que ya habían comenzado previo a este horizonte de agenda su tratamiento, frente a las desviaciones en las sesiones de los pacientes que aún no han comenzado su tratamiento. Para ello, el valor del parámetro  $w_i$  de todo paciente que continúe su tratamiento deberá ser mayor al valor de aquellos pacientes que estén en lista de espera.

El segundo término es para incluir en la agenda a la mayor cantidad posible de pacientes que se encuentran en lista de espera, siguiendo cierta ponderación que se explicará a continuación. Este segundo término figura como negativo con la finalidad de que cada paciente en la lista de espera cuyas sesiones sean fijadas en el horizonte de planificación actual, colabore a favor del valor objetivo (recordar que  $x_{tisk}$  toma el valor 1 si el paciente  $i$  tiene agendada una sesión de tratamiento el día  $t$  en el slot  $s$  en el LINAC  $k$  y vale 0 en otro caso).

Los tres términos de  $x_{tisk}$  son para discriminar en tres categorías a los pacientes dentro de la lista de espera: aquellos pacientes  $i'$  cuyo último día de comienzo de tratamiento ( $d_{i'}$ ) es menor al horizonte de planificación actual (categoría A), aquellos pacientes  $i''$  cuyo  $d_{i''}$  es mayor al horizonte de planificación actual pero menor al parámetro  $z$  (categoría B), y aquellos pacientes  $i'''$  cuyo  $d_{i'''}$  es mayor a  $z$  (categoría C).

La ponderación de los tres términos de  $x_{tisk}$  se realiza mediante el parámetro  $\alpha$ , y hace énfasis en que el modelo, dentro de los pacientes en lista de espera, priorice la asignación de sesiones a pacientes cuyo último día de comienzo de tratamiento sea lo más cercano al primer día del horizonte de planificación, y que comiencen su tratamiento apenas sea posible y sin perder de vista las desviaciones entre su ventana temporal de preferencia. Para priorizar la agenda de pacientes según las franjas de prioridad A, B y C, se utilizan tres términos separados en la función objetivo, ponderados por un mismo valor de  $\alpha$  que se fracciona según la importancia de la franja de prioridad en 3 escalones de igual peso. Entonces, agendar una sesión a un paciente de categoría A es tres veces más beneficioso que agendar uno de categoría C y 1.5 veces más beneficioso que uno de categoría B.

Las restricciones (2) dictaminan que cada paciente puede recibir como máximo una sesión por día, lo cual se alinea con lo expuesto acerca de la máxima dosis diaria en la Sección 3.

Las restricciones (3) se aseguran que cada slot disponible de cada LINAC sea agendado a una sesión diaria como máximo.

Las restricciones (4) y (5) fuerzan a las variables  $y_{tik}$  a tomar el valor 1 si el paciente comienza el tratamiento ese día y en ese LINAC, y diferencian a los pacientes urgentes (4) de los no urgentes (5). Esto permite discriminar claramente de qué y cuántos pacientes comienzan su tratamiento por día y por LINAC.

Las restricciones (6) acotan la cantidad de pacientes diarios que comienzan su tratamiento en un mismo LINAC según el valor máximo establecido por el Centro.

Las restricciones (7) limitan la cantidad de sesiones administradas a cada paciente a lo largo del horizonte de agenda, según la cantidad restante en su tratamiento. Esto permite la flexibilidad de aumentar o disminuir las sesiones restantes para culminar el tratamiento, según la evolución del paciente.

Las restricciones (8) y (9) se aseguran que los pacientes reciban la totalidad de sus sesiones en un mismo LINAC y con la requerida frecuencia hasta que culmine su tratamiento o se termine el horizonte de planificación. De este modo, puede determinarse un tiempo entre sesiones para todo el horizonte de planificación y para cada paciente en particular, si es indicado para el tratamiento.

Las restricciones (10) evitan que a los pacientes con días de descanso entre sesiones se les agende una sesión.

Las restricciones (11) imponen que cada paciente comience su tratamiento antes de la fecha límite establecida por el médico.

Las restricciones (12) prohíben que los slots restantes necesarios para cumplir con la duración de cada sesión de cada paciente luego de haber elegido el slot inicial, sean asignados a otros pacientes en ese mismo LINAC y ese mismo día. Esto posibilita la asignación de más de un slot a las sesiones de un paciente, si es que su tratamiento lo requiere.

La familia de restricciones (13) asegura que las sesiones de aquellos pacientes cuya cantidad de slots por sesión sea superior a uno, no sean asignados al último slot disponible del día.

La familia de restricciones (14) asegura que las sesiones de los pacientes que tengan una ventana temporal obligatoria sean asignados dentro de ella, para cada día. Como fue explicado al principio de esta Sección, los pacientes pueden pertenecer al conjunto  $PF$  por dos motivos. Uno de ellos es porque ese paciente necesita concurrir en cierto horario a

ONCOSUR debido a que un médico o radioterapeuta en particular necesita estar presente al momento de recibir su tratamiento, por lo cual la sesión del paciente debe restringirse al horario de ese médico o radioterapeuta. El otro motivo es por lo mencionado en la Sección 3 acerca de que ciertos pacientes vienen a ONCOSUR desde otros departamentos del país en transporte contratado por su mutualista, por lo cual sus sesiones deben estar restringidas al horario diario de ese transporte en particular. Estas dos condiciones son obligatorias, y por ello se incluyen en el conjunto de restricciones - no existe solución factible si no se respeta esta ventana temporal obligatoria. En caso que un mismo paciente necesite de la presencia de cierto personal y a la vez se traslade a ONCOSUR en transporte contratado, es el personal de ONCOSUR el que debe acomodar sus horarios para poder coincidir con el paciente.

Las restricciones (15) y (16) fuerzan a que las variables  $\Delta_{it}^-$  y  $\Delta_{it}^+$  tomen un valor distinto a cero si el comienzo de una sesión se desvía de los límites inferior y superior respectivamente seleccionados por el paciente. A este rango temporal entre los límites inferior y superior elegidos por el paciente para tener sus sesiones se le conoce como ventana temporal de preferencia. Por cómo fueron construidas las restricciones (15) y (16), puede notarse que las variables  $\Delta_{it}^-$  y  $\Delta_{it}^+$  son expresadas en minutos.

En el caso de aquellos pacientes que van a ONCOSUR haciendo uso del transporte contratado, su ventana temporal de preferencia se amolda al horario de ese transporte. De forma similar sucede con los pacientes que necesitan de la presencia de un médico o radioterapeuta en particular al momento de recibir su tratamiento, para estos pacientes su ventana temporal de preferencia debe coincidir con la ventana temporal obligatoria.

Las restricciones (17) aseguran equilibrio entre la cantidad de sesiones agendadas para un paciente perteneciente a la categoría B ( $nT < d_i < z$ ) y otro paciente en categoría C ( $d_i > z$ ). De esta forma no permite agendar más sesiones de pacientes con menor prioridad que las sesiones de pacientes con mayor prioridad.

Las restricciones (18), (19) y (20) fuerzan a que todos los pacientes agendados previamente al horizonte temporal nuevo, sigan la periodicidad de su tratamiento según su última sesión y respetando los días de descanso.

Por último, las restricciones (21) y (22) son de no negatividad e integralidad de las variables.

En síntesis, basado en el modelo de Vieira et al. (2021), se utilizaron todas las restricciones que marcan la frecuencia, duración, cantidad de sesiones y fecha límite de los tratamientos así como las restricciones de penalización, disponibilidad y de la correcta programación de las secciones en los slots. Luego, se agregó la familia de restricciones (17) que permite la agenda según franjas de prioridad de pacientes. Otra ampliación fue la adición del segundo, tercer y cuarto término de la función objetivo que impulsan la agenda ordenada en prioridad con respecto a la fecha límite y lo antes posible. Por último, se toma la restricción de

ventana obligatoria de Vieira et al. (2021) como herramienta para agendar a los grupos de pacientes que viajan en transporte contratado dentro de los horarios de permanencia de los vehículos.

### **5.3. Implementación del modelo**

Para poder experimentar con el modelo creado, se tuvo que formular en primer lugar en un lenguaje interpretable por el programa de resolución (en adelante solver por su traducción al inglés) GLPK de la empresa GNU. Con este solver se ejecutaron todos los casos de prueba de verificación del modelo. Más adelante, para las pruebas con volúmenes de pacientes y slots mayores, se utilizó el solver CPLEX de la empresa IBM. Este último es notoriamente más potente que GLPK, el cual no pudo resolver en tiempo razonable ninguna de las pruebas de gran porte.

Todos los experimentos numéricos de este trabajo se realizaron utilizando una laptop Lenovo Think Pad E580 con 16gb de RAM, procesador Intel Core i5 de octava generación y versión 64 bits de Windows. La versión de CPLEX es 20.1.0.0. y la de GLPK es 4.65.

Para todos los experimentos realizados se fijaron 28800 segundos (8 horas) como tiempo límite para la resolución. Una vez alcanzado el tiempo límite, el proceso se corta y se obtiene el mejor valor hasta ese momento. Se utilizaron 8 horas como tiempo límite porque es el tiempo que insume la confección de la programación semanal actualmente en ONCOSUR.



## 6. Verificación y validación del modelo

### Plan de verificación

El plan verificación del modelo consiste en la generación de casos de prueba ficticios para verificar el correcto funcionamiento del mismo bajo distintos valores de parámetros de ingreso. De esta manera, se probaron condiciones de casos de borde y casos de ingreso erróneo y se comparó el resultado obtenido con el resultado esperado. Para ello, se eligió el método de caja negra que consiste en validar que las salidas sean las esperadas dependiendo de las entradas elegidas. Se utiliza el solver GLPK para la validación del modelo ya que la complejidad de los casos es reducida.

Se comienza el proceso de validación utilizando el modelo de partida (presentado en Anexo 4) y se le realizaron modificaciones para culminar con el modelo presentado en la Sección 5. El modelo final, como resultado, cumple con todos los casos de verificación de forma satisfactoria. La Figura 6.1 presenta un diagrama de flujo explicando el desarrollo iterativo de la ejecución de los casos de prueba.

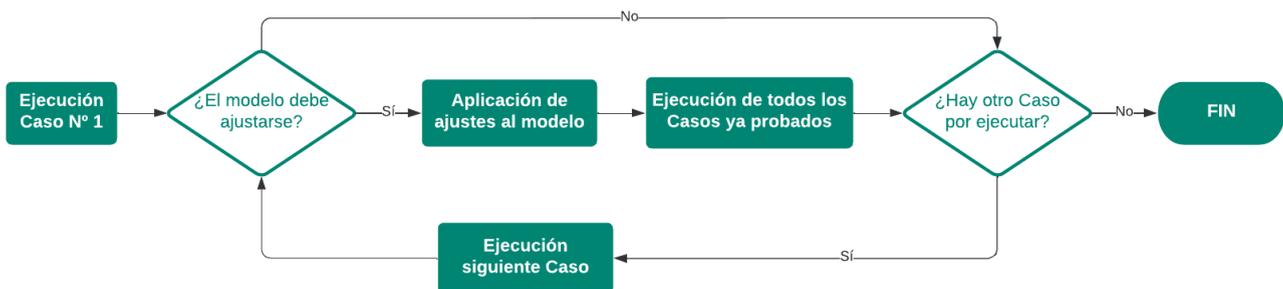


Figura 6.1. Ejecución casos de verificación.

Fuente: elaboración propia.

Un plan de verificación exitoso es aquel que descubre los errores existentes en el modelo. De esta manera, se presentarán en las siguientes secciones nueve casos de prueba creados para ese propósito. En todos los casos, el horizonte de agenda es de seis días con cinco slots cada uno y se tienen entre uno y tres pacientes.

Se presentarán aquellos más relevantes para el proceso de desarrollo. En el Anexo 4 se encuentran aquellos casos que por sus características se decidió no presentar. Según el método de caja negra, se presentan tanto las entradas como las salidas siguiendo un formato predeterminado. Para las entradas, se presentan los valores de cada parámetro según aplique el caso. Para las salidas, en caso de contar con una agenda factible, se presenta la misma bajo un mismo formato. A su vez, cada caso de prueba cuenta con una descripción del mismo y las salidas o resultados esperados. Por último, se explican las mejoras o ajustes a aplicar al modelo a raíz de la ejecución de cada caso, si es que corresponde.

Es importante destacar que el modelo que se presenta en la Sección 5 es el resultado de esta validación y cumple con lo esperado en todos los casos.

### 6.1. Caso 2 - Preferencias en lista de espera

**Descripción:** se tienen 3 pacientes: P1, P2, P3. P1 es un paciente del conjunto  $PB$ , es decir en tratamiento. P2 y P3 tienen fechas límite posteriores a la semana y distintas entre sí. El LINAC tiene disponibilidad para cumplir solo con dos de las citas. La preferencia del P1 está alineada con el primer slot disponible y la del P2 con el segundo slot disponible. La preferencia temporal de P3 es abierta.

**Entrada:** se especifica en la Figura 6.2 y la Tabla 6.1.

Conjuntos		Parámetros					
$K$	1	Paciente $\rightarrow$ Parámetro $\Downarrow$	P1	P2	P3	Generales	
$S$	1, 2, 3, 4, 5	$b_i$	1	1	1	$c$	7
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6	$d_i$	1	8	14	$q$	15
$P$	1, 2, 3	$p_i$	1	1	1	$\alpha$	1
$PB$	1	$r_i$	6	12	11		
$PD \subset PW$	2, 3	$t_i^-$	0	15	0		
		$t_i^+$	15	30	75		
		$w_i$	10	1	1		
		$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	NC*	NC*	NC*		

\*NC: No Corresponde.

Figura 6.2. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 2 de verificación.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.1. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 2 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↓	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

**Salida esperada:** P1 será agendado, es un paciente ya en tratamiento y por tanto tiene fecha límite el primer día y debe mantener la continuidad a lo largo del horizonte de planificación. Se agendará también al paciente 2 ya que su preferencia coincide con los slots disponibles.

**Salida obtenida:** presentado en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Agenda resultante del Caso 2.

Matriz Día/Slot/Paciente						
Día → Slot ↓	1	2	3	4	5	6
1	P1	P1	P1	P1	P1	P1
2	P2	P2	P2	P2	P2	P2
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-

La primera vez que se probó este caso, se ingresaba a P3 y no a P2. Así surgió la idea de crear las categorías entre pacientes evaluando fecha límite de comienzo de tratamiento, descartando la idea de la lista ordenada de pacientes, y creando el parámetro  $z$  para dividir dichas categorías.

Posteriormente a incorporar la categorización de pacientes, al volver a probar este caso, el modelo ingresaba a P2 pero no necesariamente lo ingresaba lo antes posible, es decir el

día del horizonte de planificación. Es así que surgió la idea de incorporar el segundo término de la función objetivo, que busca impulsar a que se agende la mayor cantidad de sesiones minimizando la cantidad de slots disponibles vacíos.

En conclusión, con este caso se busca confirmar que si por la ventana temporal de preferencia los pacientes pueden ser agendados sin penalización alguna, entonces el modelo los agenda. Si para dichos pacientes la ventana temporal de preferencia no coincide con algún slot disponible, el modelo evalúa el desvío respecto a la misma al agendar las sesiones, y toma la decisión si los agenda o no en base a la penalización en la función objetivo.

## **6.2. Caso 4 - Paciente con preferencia que incluye la ventana obligatoria**

**Definición:** Se tiene un paciente a agendar que tiene asignada una ventana temporal obligatoria (sea porque va a ONCOSUR en camioneta, o necesita de un médico o especialista en particular en sus sesiones). Su ventana temporal de preferencia engloba a la ventana obligatoria. Se tiene además, un segundo paciente de similares características pero sin ventana obligatoria asignada y con menor prioridad. Recordar que la ventana temporal obligatoria se mide en slots, no en minutos como lo es la ventana temporal de preferencia.

**Entrada:** se presenta en la Figura 6.3 y la Tabla 6.3.

Conjuntos		Parámetros				
$K$	1	Paciente → Parámetro ↘	P1	P2	Generales	
$S$	1, 2, 3, 4, 5	$b_i$	1	1	$z$	15
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6	$d_i$	3	12	$c$	5
$P$	1, 2	$p_i$	1	1	$q$	15
$PD \subset PW$	1, 2	$r_i$	5	5	$\alpha$	1
$PF \subset PW$	1	$t_i^-$	0	0		
		$t_i^+$	75	75		
		$w_i$	1	1		
		$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	*	NC**		

\*\*NC: No Corresponde.

\*Ventana temporal obligatoria P1:

$T$	1	2	3	4	5	6
$f_{ti}^-$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 2	slot 3	slot 1
$f_{ti}^+$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 5	slot 5	slot 5

Figura 6.3. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 4 de verificación.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.3. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 4 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0

**Salida esperada:** el paciente 1 es agendado dentro de la ventana obligatoria. El paciente 2 se agenda dentro de su ventana de preferencia. Además, si es posible, se mantiene el horario de asignación durante la semana y se intenta comenzar el tratamiento de los pacientes lo antes posible.

**Salida obtenida:** el resultado obtenido con la última ejecución fue el esperado. El paciente 1 se agenda siempre dentro de la ventana, y a causa del método de resolución, en los casos en los cuales la ventana ocupa más de un slot, se agenda en el primer slot disponible de la misma. Lo mismo sucede con el paciente 2, el cual se mantiene desde el día 2 al 5 en el primer horario disponible y solo se desvía al slot 2 cuando obligatoriamente el paciente 1 debía utilizarlo. Como se tiene para ambos pacientes una preferencia abierta, no existe penalización mayor y se contaba con suficientes slots disponibles para cumplir con la ventana obligatoria, descansos y sesiones restantes. De esta manera, se cumple que comienza a los dos pacientes no en su fecha si no lo antes posible, como era esperado. La Tabla 6.4 presenta la salida en formato agenda.

Tabla 6.4. Agenda resultante del Caso 4.

Matriz Día/Slot/Paciente						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	P1	P2	P2	P2	P2	-
2	P2	P1	-	P1	-	-
3	-	-	P1	-	P1	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-

**6.3. Caso 6 - Paciente con ventana obligatoria y fecha límite mayor al horizonte de agenda. LINAC sin disponibilidad en ventana obligatoria.**

**Descripción:** se tiene un paciente que debe ser agendado en la ventana obligatoria fijada para cada día. No hay lugares disponibles en esas ventanas todos los días. Hay un segundo paciente cuya preferencia está abierta.

**Entrada:** se presenta en la Figura 6.4 y la Tabla 6.5.

Conjuntos	
$K$	1
$S$	1, 2, 3, 4, 5
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P$	1, 2
$PD \subset PW$	1, 2
$PF \subset PW$	1

Parámetros				
Paciente → Parámetro ↴	P1	P2	Generales	
$b_i$	1	1	$z$	15
$d_i$	8	12	$c$	5
$p_i$	1	1	$q$	15
$r_i$	4	5	$\alpha$	1
$t_i^-$	0	0		
$t_i^+$	75	75		
$w_i$	1	1		
$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	*	NC**		

\*\*NC: No Corresponde.

\*Ventana temporal obligatoria P1:

$T$	1	2	3	4	5	6
$f_{ti}^-$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 2	slot 3	slot 1
$f_{ti}^+$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 5	slot 5	slot 5

Figura 6.4. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 6 de verificación.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.5. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 6 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	1	1	0
2	1	0	1	0	1	0
3	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	0	0

**Salida esperada:** como el paciente 1 no tiene necesidad estricta de agendarse en la semana, quedará en lista de espera. Como el paciente 2 pertenece a la misma franja de prioridad  $6 < d < 15$  y tiene preferencia abierta se lo agendará en los horarios libres.

**Salida obtenida:** se presenta en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. Agenda resultante del Caso 6.

Matriz Día/Slot/Paciente						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	-	P2	P2	P2	P2	-
2	P2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-

Como puede verse en la Tabla 6.6, el resultado coincide con lo esperado. Otra vez, gracias al método de resolución, se agenda al paciente 2 lo antes posible tanto dentro de cada día como dentro de la semana ya que se agenda en los primeros slots disponibles de cada día y se comienza el lunes.

Este caso generó varios cambios en el modelo. En la primera versión del modelo se debía ingresar una lista ordenada de pacientes (según fecha límite de tratamiento y luego por criterio FIFO) y existía una restricción para los pacientes en espera que exigía que los

pacientes se ingresaran por orden de prioridad dentro de la semana. Se entendió que esta restricción era muy fuerte, por lo que se decidió no permitir el comienzo del tratamiento de un paciente si todos los pacientes previos a él no estaban ya ingresados, sin importar el orden de los mismos en la semana. La problemática detectada de este enfoque es que no es coherente con las restricciones que gobiernan el inicio del tratamiento de los pacientes, y efectivamente no devolvió los resultados esperados. El siguiente cambio probado fue agregar una variable auxiliar que asimilaba la función principal de las restricciones de inicio de pacientes, pero no fue posible crear la misma sin distorsionar las sesiones normales de cada paciente.

La problemática entonces se daba cuando un paciente de mayor prioridad no era agendado - ya sea porque el horario era muy distinto a la ventana de preferencia o por no tener disponibilidad en la ventana obligatoria - de esta forma el modelo prohibía la agenda de todos los pacientes menos prioritarios de la lista de espera. Así es que se decidió asignar franjas de prioridad para los pacientes en espera, y categorizarlos según su fecha límite de comienzo de tratamiento. Se generaron tres franjas basadas en un parámetro de ingreso  $z$ , siendo estas:

1.  $d_i \leq nT$
2.  $nT < d_i < z$
3.  $d_i > z$

De esta manera, y con la creación de la familia de restricciones (17) se puede manejar a los pacientes de las franjas dos y tres que no son prioritarios inmediatos. Dentro de cada franja, se agenda indistintamente a los pacientes de la misma. Lo que debe cumplirse es que se agenden más sesiones a la franja dos que a la franja tres. Con esta restricción, se soluciona el problema planteado de que la imposibilidad de un paciente perjudique al resto.

A su vez, con la familia de restricciones (17) se soluciona el problema de la agenda de pacientes solamente según su preferencia, lo cual permite ingresar a un paciente de prioridad muy baja (ej:  $d_i = 21$ ) antes que uno de prioridad relativamente alta (ej:  $d_i = 7$ ).

A diferencia de esto, con el enfoque planteado por el equipo, siempre se prioriza a la franja de pacientes más prioritaria y solamente se agendan pacientes de menor importancia si, además de coincidir aceptablemente con los horarios disponibles, se agendaron previamente la misma cantidad de sesiones a pacientes de la categoría más prioritaria.

En este caso, si el paciente 2 hubiera tenido una fecha límite mayor a 15 días, no hubiera sido agendado porque pertenecería a la franja de prioridad siguiente y no existen sesiones asignadas a la franja de mayor prioridad (paciente 1).

#### **6.4. Caso 7 - Paciente con preferencia disjunta a ventana obligatoria**

**Descripción:** se tiene un paciente con fecha límite en la semana, el cual tiene asignada una ventana obligatoria que no coincide con su preferencia horaria (último slot del día).

También, se tiene un segundo paciente de menor prioridad con la misma preferencia y sin ventana obligatoria asignada.

**Entrada:** se presenta en la Figura 6.5 y la Tabla 6.7.

Conjuntos	
$K$	1
$S$	1, 2, 3, 4, 5
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P$	1, 2
$PD \subset PW$	1, 2
$PF \subset PW$	1

Parámetros				
Paciente → Parámetro ↴	P1	P2	Generales	
$b_i$	1	1	$z$	15
$d_i$	3	12	$c$	5
$p_i$	1	1	$q$	15
$r_i$	6	20	$\alpha$	1
$t_i^-$	60	60		
$t_i^+$	75	75		
$w_i$	1	1		
$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	*	NC**		

\*\*NC: No Corresponde.

\*Ventana temporal obligatoria P1:

$T$	1	2	3	4	5	6
$f_{ti}^-$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 2	slot 3	slot 1
$f_{ti}^+$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 4	slot 4	slot 4

Figura 6.5. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 7 de verificación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.7. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 7 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1

**Salida esperada:** Se agendará al paciente 1 dentro de la ventana obligatoria por más que exista desvío de la preferencia temporal y se penalizará en el valor objetivo. El paciente 2 puede ser agendado en su ventana de preferencia y será asignado al último slot del día. La disponibilidad del LINAC es completa, es decir no hay problemas de disponibilidad.

**Salida obtenida:** se presenta en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. Agenda resultante del Caso 7.

Matriz Día/Slot/Paciente						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	P1	-	-	-	-	-
2	-	P1	-	-	-	-
3	-	-	P1	-	-	-
4	-	-	-	P1	P1	P1
5	P2	P2	P2	P2	P2	P2

El resultado obtenido fue el esperado. El paciente 1 siempre es agendado en la ventana obligatoria, y si la misma ocupa más de un slot, se le asigna lo más cercano posible a su preferencia (día cuatro, cinco y seis). Al no llegar nunca a su preferencia temporal, el paciente 1 siempre es penalizado en la función objetivo. Por esto, si el paciente 1 solo debiera recibir cuatro sesiones, comenzaría su tratamiento el día tres, ya que los días uno y dos es cuando más se aleja de su preferencia, logrando así un mejor valor objetivo.

Al desarrollar este caso, se vio la oportunidad de agregar un término a la función objetivo. Este término consiste en la suma de un valor grande ligado a la cantidad de slots disponibles en el horizonte de agenda y que cada sesión agendada a pacientes de la lista de espera provoque una mejora en el valor objetivo. Intuitivamente, se creó además mediante el uso de coeficientes una ponderación para el beneficio que genera agendar a pacientes de cada franja prioritaria. De esta manera, agendar a los pacientes de distintas franjas prioritarias tiene un efecto distinto sobre el valor objetivo. Para el valor objetivo, es mejor si se asigna un slot a un paciente de alta prioridad a que se le asigne un slot a uno de baja prioridad. Este cambio entonces impulsa a que se utilicen la mayor cantidad de slots posibles y de la mejor manera posible, es decir con pacientes más prioritarios. Un desafío generado por esta ponderación fue relacionar los coeficientes con el peso del desvío de la ventana de preferencia de un paciente. De esta manera, al balancear correctamente los dos términos de la función objetivo, el modelo no utilizará un slot más si la utilización del mismo lleva un desvío de más de cierta cantidad de minutos de la preferencia del paciente.

Como ejemplo, se probó la variación de este caso en la cual el desvío entre la asignación del paciente 1, el día uno, con respecto a su preferencia era lo suficientemente grande para que se decida agendar al paciente 1 desde el día dos y postergar su última sesión para la siguiente semana.

## **6.5. Caso 8 - Mantener horario en pacientes ya agendados**

**Descripción:** se tienen dos pacientes con frecuencias diferentes que coinciden en un día. Ambos tienen preferencias de ventanas de tiempo iguales y solo hay lugar para agendar a 1 de ellos respetando su preferencia. Uno de ellos ya comenzó el tratamiento, el otro está en la lista de espera y se agendará esta semana por fecha límite.

**Entrada:** se presenta en la Figura 6.6 y la Tabla 6.9.

Conjuntos		Parámetros				
$K$	1	Paciente → Parámetro ↴	P1	P2	Generales	
$S$	1, 2, 3, 4, 5	$b_i$	3	1	$z$	15
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6	$d_i$	3	2	$c$	5
$P$	1, 2	$p_i$	1	1	$q$	15
$PB$	1	$r_i$	8	8	$\alpha$	1
$PD \subset PW$	2	$t_i^-$	0	15		
		$t_i^+$	0	15		
		$w_i$	100	1		
		$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	NC*	NC*		

\*NC: No Corresponde.

Figura 6.6. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 8 de verificación.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.9. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 8 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

**Salida esperada:** Se espera que se le asigne el slot libre desfasado en el día 4 al paciente que comienza esta semana su tratamiento (P1) y que al ya agendado de semanas previas se le mantenga el horario (P2)

**Salida obtenida:** se presenta en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Agenda resultante del Caso 8.

Matriz Día/Slot/Paciente						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	P1	P2	P2	P2	P2	P2
2	-	-	-	P1	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-

Se confirma el concepto de descanso entre sesiones, este determina una frecuencia exacta de tratamiento. Por otro lado, la preferencia de tiempo a iguales condiciones, se prioriza al que ya estaba agendado anteriormente frente a los pacientes en lista de espera. Le da el slot más cercano al horario de preferencia a aquel que pierde la preferencia frente al ya agendado.

## 6.6. Caso 9 - Pacientes sin ventana temporal de preferencia

**Descripción:** pacientes en lista de espera, sin preferencia de tiempo (es decir, con una ventana temporal de preferencia que abarca toda la disponibilidad horaria). Ambos cuentan con diferente fecha límite. A su vez, el descanso entre sesiones es diferente entre ellos. A ambos pacientes les quedan sesiones restantes para culminar el tratamiento.

**Entrada:** se presenta en la Figura 6.7 y la Tabla 6.11.

Conjuntos		Parámetros				
$K$	1	Paciente → Parámetro ↴	P1	P2	Generales	
$S$	1, 2, 3, 4, 5	$b_i$	1	3	$z$	15
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6	$d_i$	7	20	$c$	5
$P$	1, 2	$p_i$	1	1	$q$	15
$PD \subset PW$	1, 2	$r_i$	8	8	$\alpha$	1
		$t_i^-$	0	75		
		$t_i^+$	0	75		
		$w_i$	1	1		
		$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	NC*	NC*		

\*NC: No Corresponde.

Figura 6.7. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 9 de verificación.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.11. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 9 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1

**Salida esperada:** debe agendarse según las secciones y categorías determinadas por el parámetro  $z$ . A la vez, debe cumplir la fecha límite para comenzar su tratamiento. Durante el resto de la semana, no necesariamente mantiene el horario.

**Salida obtenida:** se presenta en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Agenda resultante del Caso 9.

Matriz Día/Slot/Paciente						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	P2	P2	P2	P2	P2	P2
2	P1	-	-	P1	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-

Se mantuvo el horario para ambos pacientes, pero no es una condición de agenda. Por otro lado, con respecto a la semana entrante los pacientes 1 y 2 tendrán prioridad de horario frente a los pacientes nuevos siempre y cuando esto no se superponga con una restricción.

En este caso, se visualizó que en primera instancia no se respetaba el descanso entre agendas del paciente 1 porque al empezar el día 1, las restricciones 5 y 6 interfieren entre sí y hacían que empiece más de una vez. Para ello, se agregó la restricción (R.22) que indica que la suma de  $y_{tik}$  de cada paciente por semana a lo sumo es 1.

### Plan de validación

Para la validación del modelo, se presentaron en reuniones con ONCOSUR las funcionalidades del modelo y los supuestos tomados. Los resultados fueron aceptables para la contraparte y se interpretaron correctamente las restricciones y prioridades que se utilizan para la programación de tratamientos en el Centro.

## **7. Recolección y análisis de los datos de ONCOSUR**

Para esta etapa del proyecto, el equipo tuvo encuentros virtuales con uno de los técnicos de radioterapia de ONCOSUR con el fin de explicarle qué datos eran necesarios para poder ingresarlos como parámetros en el modelo. Se acordó con la contraparte que en el envío de datos se mantiene el nombre de los pacientes de forma anónima, y para identificarlos se los enumera.

Dado que la planificación en ONCOSUR se realiza de forma semanal, se solicitó la agenda de cada día por tres semanas consecutivas de tratamientos, compuestas por la identificación del paciente, la hora y duración de tratamiento, el centro médico del cual provienen, el medio de transporte que utilizan para asistir (particular o camioneta contratada), las sesiones restantes a esa fecha, y el último día en que cada paciente podía comenzar su tratamiento. Asimismo, se solicitó el horario y frecuencia de las camionetas contratadas por parte de las mutualistas para que los pacientes asistan a su tratamiento en ONCOSUR. De esta forma, se define el horizonte de planificación de lunes a viernes, lo que implica que  $nT = 5$ . Posteriormente en esta sección se explicará la razón de elección de tres semanas consecutivas.

Luego de varios intercambios entre ONCOSUR y el equipo, se logró obtener parte de la información solicitada en el formato presentado en el Anexo 6: una foto de una planilla con la agenda de cada paciente (su horario), la fecha y turno actual, nombre del paciente, ficha técnica (número de historial), tipo de cáncer, centro médico de procedencia, entre otros. A su vez, el técnico en radioterapia del Centro agregó a la hoja manualmente las sesiones restantes de cada paciente. Por otro lado, indicó los horarios de las camionetas diarias según cada centro médico externo, y una proporción aproximada de pacientes que asisten a su tratamiento en ONCOSUR utilizando el servicio de las camionetas contratadas y de forma particular.

Si bien el equipo le facilitó al técnico en radioterapia de ONCOSUR una planilla electrónica con distintos campos para completar con los datos solicitados, se entendió que era más práctico para la contraparte enviarnos fotos de la agenda diaria que ya tenía parte de la información necesaria en ella y agregar manualmente los datos faltantes, para luego transcribir esa información a una planilla electrónica. Se recibieron un total de 32 fotos de la agenda diaria de ambos turnos (matutino y vespertino) de las tres semanas elegidas. El horario designado a tratamientos es de 7:55 a 18:20, y debido al colchón adicional de tiempo mencionado en la Sección 5.2, se elige el horario desde las 7:55 a 18:00.

Para poder tratar los datos de manera centralizada y ordenada, se creó una planilla “base” de Excel que cuenta con la información facilitada por la contraparte, y la “traducción” en parámetros de dicha información. Esto quiere decir que se traduce la información real en parámetros numéricos que luego son ingresados en el solver para resolver el problema de la agenda de ONCOSUR. Para comenzar a crear este documento, se debió elegir como horizonte de planificación una de las semanas brindadas por la contraparte, y esta fue la semana número dos (del lunes 13 de junio al viernes 17 de junio).

A continuación, se explica la creación de la planilla base. La Tabla 7.1 presenta el esqueleto de la planilla utilizado para ser completado, con los datos de un paciente a modo de ejemplo. Cada columna representa información de utilidad para conocer la composición de los conjuntos y parámetros que representan la realidad de ONCOSUR.

Tabla 7.1. Esqueleto planilla base con datos de pacientes de ONCOSUR.

Fecha agenda:	LUNES 13 de junio
---------------	-------------------

Nº Paciente	Hora agenda	Slot agenda	Procedencia	Sesiones restantes ( $r$ )	Fecha límite comienzo tratamiento ( $d$ )	Frec. sesiones ( $b$ )	Duración sesiones en slots ( $p$ )	Pertenece a $PB$ ?
1	07:55	1	COMEFLO	14	1	1	2	SI

Para lograr generar esa planilla base, previamente se analizaron todos los pacientes de la agenda para entender si faltaba información o distinguir algún caso particular. Fue en este momento que el equipo reconoció la existencia de “pacientes concomitantes”, es decir pacientes que requieren que un tratamiento finalice para dar comienzo a su tratamiento de radioterapia, o requieren que su tratamiento de radioterapia comience a la vez que otro tratamiento (por ejemplo, quimioterapia en conjunto con radioterapia). Estos casos particulares no son frecuentes en ONCOSUR, y si bien se puede contar con una fecha límite para que estos pacientes comiencen su tratamiento de radioterapia, el comienzo efectivo depende de factores externos al Centro, lo cual complejiza la situación y particularmente al modelo creado por el equipo. Es por esta razón que se decide no ingresar en el conjunto de pacientes en lista de espera ( $PW$ ) a aquellos pacientes concomitantes.

Continuando con el objetivo de obtener una planilla base con los datos reales de ONCOSUR, una vez analizada la situación de los pacientes concomitantes se continuó analizando los horarios y duración de tratamiento de los pacientes. Como puede visualizarse en la foto de la agenda de una fecha específica (ver Anexo 6), la duración del tratamiento para todos los pacientes agendados es de 10 minutos. Por otro lado, en las reuniones con la contraparte, se expresó que la duración del tratamiento de todos los pacientes varía, y que la duración de la mayoría de los tratamientos es entre 5 y 15 minutos (con excepciones de 30 minutos, para ciertos tipos de cáncer). Analizando este escenario, el equipo decidió que la duración de cada slot de tiempo fuera de 5 minutos, debido a que las duraciones mencionadas por el técnico fueron múltiplos de cinco.

Con el análisis mencionado hasta el momento y la información brindada por el técnico de ONCOSUR, se pudieron completar los campos desde la columna “Nº Paciente” hasta la columna “Duración sesión en slots” de la Tabla 7.1. El parámetro  $r_i$  se completa con la información de la columna “Sesiones restantes”, el parámetro  $d_i$  con la columna “Fecha

límite comienzo tratamiento”, la columna “Frecuencia de las sesiones” representa al parámetro  $b_i$  y la columna “Duración sesión en slots” el parámetro  $p_i$ .

A la planilla base se le incorporaron las columnas presentadas en la Tabla 7.2, y así poder procesar los datos en el solver. Para completar estas columnas nuevas, parte de la información utilizada fue la proporción de pacientes que se trasladan al Centro en camionetas contratadas o vehículos particulares. Siendo que un 40% aproximadamente del total de pacientes en un día utilizan las camionetas contratadas, se asignó al azar esta característica al listado de pacientes. Una vez identificados los pacientes que se trasladan en transporte colectivo (es decir, pacientes que pertenecen al conjunto  $PF$ ), se ingresan en la planilla los slots de los parámetros  $f_{ti}^-$  y  $f_{ti}^+$  (ventana temporal obligatoria) basándose en el horario de la camioneta contratada por su mutualista. Luego, para estos pacientes, la ventana temporal de preferencia (parámetros  $t_i^-$  y  $t_i^+$ ) se asignó igual a la del horario del transporte si los pacientes pertenecen a la lista de espera ( $PW$ ), y si ya habían comenzado su tratamiento previamente (pertenecen a  $PB$ ) entonces su ventana temporal de preferencia se asigna al horario correspondiente a la hora en que realmente fueron agendados en la semana 2. Esta elección de ventana temporal de preferencia para los pacientes del conjunto  $PB$  se tomó con el fin de mantener el horario de agenda de las semanas anteriores.

Tabla 7.2. Campos agregados a planilla base.

Fecha agenda:	LUNES 13 de junio			
Camioneta/ Particular	Slot arribo camioneta ( $f_{ti}^-$ )	Slot partida camioneta ( $f_{ti}^+$ )	Hora inicio ventana preferencia ( $t_i^-$ )	Hora fin ventana preferencia ( $t_i^+$ )

Por otro lado, aquellos pacientes cuyo traslado se asignó en vehículos particulares no corresponde completar la columna de la ventana temporal obligatoria, pero sí la ventana temporal de preferencia. Al no conocer las preferencias horarias de los pacientes, se asignó a aquellos pacientes en lista de espera ( $PW$ ) al azar un rango horario de entre 3 y 4 horas en algún momento del día, y a los pacientes pertenecientes al conjunto  $PB$  se les asignó como ventana temporal de preferencia el horario correspondiente a la hora en que efectivamente fueron agendados en la semana 2. La justificación es análoga a la justificación dada para los pacientes que pertenecen tanto a  $PF$  como a  $PB$  en simultáneo.

Por último, se describe cómo se deduce si un paciente ya se encontraba o no en tratamiento para el periodo considerado (es decir, si pertenece al conjunto  $PB$  o  $PW$ ), y también el motivo por el cual se tomó la semana número dos a modo de estudio y comparación. Al posicionarse en el momento de crear la semana 2, se puede buscar en la semana 1 si cada uno de los pacientes de la semana 2 contaba ya con un lugar en la agenda o no. Si al paciente de la semana 2 se lo encontraba en la agenda de la semana 1,

implica que ese paciente pertenece al conjunto  $PB$  (es decir que al momento de comenzar la semana 2, ese paciente es un paciente con tratamiento ya comenzado). Por otro lado, si no se encontraba al paciente en la semana 1, implicaba que ese paciente estaba comenzando su tratamiento en la semana 2 (y por lo tanto, pertenece al conjunto  $PW$ ).

De manera similar se explica cómo se dedujo cuáles pacientes continúan en la lista de espera (es decir, siguen perteneciendo al conjunto  $PW$ ) una vez que se organiza la agenda de la semana 2. Aquellos pacientes que se encuentran en la agenda de la semana 3 pero no se encuentran en las agendas de las semanas 1 y 2 se asume que se encontraban en lista de espera para comenzar su tratamiento en la semana 2 pero que no pudieron ser atendidos. Es una hipótesis realizada por el equipo debido a que algunos de estos pacientes que se consideran como postergados de la semana 2, pudieron haberse presentado en ONCOSUR por primera vez para comenzar su tratamiento en el correr de la semana 2.

Dado el análisis descrito anteriormente, se procede a presentar globalmente los datos relevados de ONCOSUR. Esta información proviene de las reuniones con el técnico en radioterapia de ONCOSUR, de la información brindada por él, y del análisis realizado por el equipo:

- Cantidad de pacientes del conjunto  $P$  en la semana 2: 74
- Cantidad de pacientes que continúan su tratamiento en la semana 2 ( $PB$ ): 57
- Cantidad de pacientes en lista de espera para la semana 2 ( $PW$ ): 17
- Cantidad de pacientes en lista de espera para la semana 2 que deben comenzar su tratamiento de manera urgente ( $PM$ ): 0
- Cantidad de pacientes en lista de espera para la semana 2 que pueden comenzar su tratamiento de manera no urgente ( $PD$ ): 17
- Cantidad de pacientes con tiempo restringido para sus sesiones ( $PF$ ): 31
- Cantidad de LINACS ( $nK$ ): 1
- Días del horizonte de planificación ( $nT$ ): 5
- Cantidad de slots disponibles por día ( $nS$ ): 121
- Cantidad máxima de pacientes que comienzan su tratamiento en un día ( $c$ ): 75
- Duración en minutos de un slot ( $q$ ): 5 minutos
- Día de partición de las categorías de pacientes ( $z$ ): 10

Los parámetros restantes (excluyendo al parámetro  $\alpha$ ) dependen de cada paciente; se deja esta información detallada en el Anexo 7. Respecto a los parámetros  $\alpha$  y  $w_i$ , se justifican sus valores en la Sección 8 del documento.

Con la información relevada se creó un archivo en formato “.dat” para resolver el modelo en AMPL (la Sección 5.4. indica cómo se implementó el modelo). En la siguiente sección, se procede a analizar y explicar los resultados del modelo utilizando los datos reales.

## **8. Análisis de resultados**

En esta sección, se presentan los resultados de la experimentación del modelo de RTSP propuesto, utilizando como entrada los datos recabados de ONCOSUR y procesados según lo descrito en la sección anterior.

El modelo utilizado para la experimentación es el presentado en la Sección 5. De igual manera, se detallan a continuación distintas variaciones en los parámetros de ponderación de la función objetivo del modelo, con el fin de alcanzar una solución satisfactoria para los mismos datos de entrada.

Dentro de las alteraciones realizadas a la función objetivo, se tomaron distintas combinaciones de los parámetros  $w_i$  y  $\alpha$ , que fijan el peso ponderado del primer o segundo objetivo de la función objetivo del modelo. De esta manera,  $w_i$  asigna una importancia relativa a mantener el horario de agenda de los pacientes y  $\alpha$  asigna importancia a agendar a la mayor cantidad posible de pacientes nuevos de cada categoría.

Luego de cada experimentación, se comparan las soluciones obtenidas mediante criterios de calidad de solución creados en base a los objetivos del modelo y del Centro. Se definieron cinco métricas para comparar la calidad de las soluciones, en base a su concordancia o discordancia con los objetivos del proyecto y se presentan a continuación.

### **8.1. Criterios para Evaluar la Calidad de las Soluciones**

#### **Tiempo de ejecución**

Se define como tiempo de ejecución la cantidad en segundos en que el solver encuentra una solución óptima. Se considera aceptable un tiempo de resolución menor o igual a dos horas para llegar a una solución óptima. Esto se debe a los tiempos operativos del Centro y de la elección de poder planificar la agenda lo más tarde posible para tener todos los pacientes de la semana anterior. Esas dos horas de resolución, en una jornada de ocho horas, permite tener seis horas en las que se revisa la agenda, se modifica lo que se considere pertinente, y se les informa a los pacientes de sus próximas sesiones.

#### **Cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento**

Esta métrica cuenta la cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento. Cuanto mayor sea este número (considerando una misma lista de espera), mejor será la solución obtenida.

#### **Porcentaje de ocupación**

Como tercer criterio, se consideró la utilización de la capacidad instalada. Esto refiere al porcentaje del total de slots libres que se utilizan del recurso LINAC en el correr de la semana. Se buscan porcentajes altos de ocupación, ya que maximizar la utilización de la capacidad actual ayuda a que el personal médico tenga menos trabajo fuera de hora.

### Porcentaje de pacientes que mantienen el horario

Esta métrica se refiere al porcentaje de pacientes que mantienen el horario a lo largo del horizonte de planificación. Para ello se mide en toda la semana el comienzo de la sesión del slot más tarde y el slot más temprano en el que comenzó su tratamiento; la diferencia entre ellos debe ser 0. Por ejemplo, si un paciente se atiende el lunes en el slot 2, el martes en el slot 3, y el resto de los días en el slot 2, se toma como slot más tardío el 3 y el slot más temprano el 2. En este caso, se considera que no mantiene el horario porque la diferencia entre slot 3 y slot 2 es 1.

Es de importancia mantener el horario de un paciente ya que un tratamiento repetitivo, que se centra en una rutina, se encuentra estrechamente ligado a la calidad de vida del paciente. Mantener un horario brinda estabilidad al paciente, además de reducir significativamente las llegadas tarde ligadas a confusión o desorganización.

## 8.2. Determinación de los parámetros de la función objetivo

Una vez definidos los criterios de calidad en la subsección anterior, la primera prueba realizada fue variar la relación entre el coeficiente  $w_i$  de los pacientes agendados y en espera. Esta relación entre los  $w$  de cada subgrupo indica cuánto más se penaliza en la función objetivo el no cumplir con la preferencia de dicho paciente.

Naturalmente, se prueban casos en los cuales  $w$  de los pacientes ya ingresados ( $PB$ ) es mayor a los que están en lista de espera ( $PW$ ), debido a que los primeros tienen un horario ya establecido y seteado como su preferencia. Esto genera que, de ser necesario, se agende a los pacientes en  $PW$  distante a su preferencia o variando el slot de tratamiento día a día. Se realizaron los casos A-C variando los parámetros según lo presentado en la Tabla 8.1, junto con los resultados.

Tabla 8.1. Resultados experimentación con relación de parámetros  $w_i$ .

Caso	$w$		$\alpha$	Solución	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que empiezan [#]	Ocupación LINAC [%]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Valor objetivo
	PB	PW							
A	10	1	1	OPTIMA	3208	8	98.512	69.2	3314
B	100	1	1	OPTIMA	3670	8	98.512	72.3	29217
C	1000	1	1	OPTIMA	4012	8	98.512	69.2	332626

Como puede verse en la Tabla 8.1, los resultados que se obtienen de variar la relación entre el parámetro  $w_i$  de los dos tipos de pacientes, son similares bajo todos los criterios de calidad. Esto indicaría que el modelo frente a esta relación, se comporta de manera estable. Se marca, a través del tiempo de ejecución, una tendencia a aumentar la complejidad del proceso de resolución, junto con el aumento del ratio entre los  $w_i$ .

La poca variabilidad en la calidad de estas soluciones puede reflejarse también en las escasas diferencias en la asignación de paciente a slot. Lo esperado ante estas pruebas

era que cada vez más pacientes ya agendados ( $PB$ ) mantengan el horario. El resultado de la experimentación mostró que para todos los casos, los mismos 13 pacientes  $PB$  no mantienen un horario uniforme en el horizonte de planificación.

Esto muestra que la solución no tiene holgura, es decir que por más que se penalice severamente el desvío del horario deseado, no existe una mejora en la agenda, sino una mayor penalización al aumentar el coeficiente  $w_i$ . Esto se ve en el valor objetivo, ya que el mismo crece acorde al orden de magnitud de los cambios efectuados. En cuanto a los pacientes  $PW$ , se tienen siete pacientes que no mantienen un horario en la semana para los casos A y C, y cinco para el caso B. De igual manera, como los pacientes  $PW$  tienen una preferencia mayor a un slot (como es el caso de los pacientes  $PB$ ), no necesariamente se genera una penalización al variar entre slots, permitiendo variaciones.

También, se concluye que la agenda de los pacientes  $PB$  es más rígida. Esto sucede ya que los pacientes  $PB$  tienen una preferencia mucho más acotada para este tipo de pacientes y una penalización de un orden 10 veces mayor por no cumplirla. Si se mueve un slot a un solo paciente en tratamiento, esto generaría una “reacción en cadena”, corriendo a una gran cantidad de pacientes y generando una acumulación de desvíos que derivaría en una penalización sustancial en el objetivo.

Luego se prosiguió a estudiar el efecto de la relación  $w_i$  y  $\alpha$ . Con estas pruebas lo que se evaluó fue la importancia de mantener el horario preferido de los pacientes contra la importancia de utilizar el LINAC. Las pruebas ejecutadas fueron con valores de  $\alpha$  de 1, 300 y 29000 y en todos los casos se utilizó  $w_i = 10$  para los pacientes ya ingresados y  $w_i = 1$  para los pacientes en espera. Los resultados se encuentran en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2. Resultados experimentación con parámetro  $\alpha$ .

Caso	$w$		$\alpha$	Solución	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que empiezan [#]	Ocupación LINAC [%]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Valor objetivo
	PB	PW							
D	10	1	1	OPTIMA	3208	8	98.5	69.2	3314
E	10	1	300	OPTIMA	5403	8	99.2	69.2	-4760
F	10	1	29000	Factible Gap 0.27%	28800	8	98.2	41.5	-815856

Los resultados de esta experimentación muestran que cuando  $\alpha$  aumenta, existe una disputa entre los dos objetivos del modelo e incrementa la complejidad computacional para arribar a una solución óptima.

Se utilizó un valor de 300 para  $\alpha$ , para que mover a un paciente  $PB$  por seis slots (o combinaciones similares como dos pacientes  $PB$  por tres slots) tenga el mismo peso en el objetivo que asignar una sesión a un paciente  $PW$ . Otra manera de ver esto es que es preferible agendar una sesión, aún cuando la misma dista en hasta 60 slots de la preferencia del paciente, que no agendarla.

Puede verse en la Tabla 8.2 que en los casos probados no se altera la cantidad de pacientes en espera ingresados. Esto es porque no existen espacios en la agenda para ingresar pacientes y mantener su frecuencia de tratamiento. Por ejemplo, un paciente podría comenzar el lunes a tratarse pero no habría lugar para tratarlo el jueves. Para comprobar esto se creó el caso F, visible en la Tabla 8.2. Se buscó probar si con un valor de  $\alpha$  suficientemente grande, se tornaría beneficioso agendar más pacientes para comenzar su tratamiento. De igual manera, por temas de holgura en la agenda, no se logra en estos casos tratar a más pacientes.

Luego de probar el efecto de balancear estos ponderadores, el equipo tomó como valores aceptables una relación 10 a 1 entre los  $w_i$  de los distintos tipos de pacientes y un  $\alpha$  de 1. Se consideran aceptables los parámetros elegidos ya que además de brindar la mejor calidad de soluciones, la combinación es numéricamente coherente.

Lo anterior puede verse con un ejemplo. Si se tiene un paciente de tipo *PB*, agendarlo con un desvío de 5 minutos desde su slot establecido una única vez, tiene una penalización en la función objetivo de 50 (desvío de 5 minutos,  $w_i=10$ ). Esto quiere decir que ante esa opción, es preferible agendar hasta 12 pacientes *PW* desviándose un slot desde su preferencia (o desviar un paciente por 10 slots, y demás combinaciones) antes de cambiar la rutina de tratamiento del paciente *PB*.

A su vez, se distingue que el segundo término de la función objetivo, cuando  $\alpha = 1$ , no interfiere en la agenda cuando existen casos de penalización. Esto sucede porque en el mejor de los casos, puede contribuir en cinco unidades al objetivo (cinco sesiones a un paciente de prioridad alta). Esto equivaldría a retrasar un paciente en espera 1 slot en un día y no es suficiente para mover la agenda de un paciente *PB*. Entonces, el segundo objetivo colabora en los casos donde no existe ninguna penalización, o en otras palabras, que se tiene disponibilidad totalmente coincidente con las preferencias. El aporte al objetivo que genera el término con  $\alpha$  es lo que impulsa al modelo a ingresar nuevos pacientes en esos casos donde no es estrictamente necesario el ingreso, pero no tiene ningún costo y mejora el flujo de pacientes y el uso del LINAC.

### 8.3. Comparación entre la solución y la realidad de ONCOSUR

Los valores de los parámetros de entrada para la experimentación del caso real se basan en el procesamiento de datos presentado en la Sección 7, y se presenta en el Anexo 7. La resolución de este caso real coincide con la probada en el caso A descrito anteriormente en esta sección. Se obtuvo una solución óptima luego de transcurrir 3208 segundos de procesamiento. La agenda generada se muestra en la Figura 8.1, donde se presenta en columnas los días del horizonte de planificación, en filas los pacientes, y los valores de la matriz el slot de comienzo de tratamiento. En el Anexo 9 se presenta la agenda obtenida en formato slot/día.

Paciente	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Paciente	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Paciente	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie
1	1	1	1	1	1	24	49	49	49	49	49	48	95	95	95	94	96
2	3	3	3	3	3	25	51	51	51	51	51	49	97				
3	5	5	5	5	5	26	53	53	53	53	53	50	99	99	99	100	98
4	7	7	7	7	7	27	55	55	55	55	55	51	106	106	106	106	106
5	9	9	9	9	9	28	57	57	57	57	57	52	108	108	108	108	108
6	11	11	11	11	11	29	59	59	59	59	59	53	110	110	110	110	110
7	13	13				30	61	61	61	61	61	54	112	112	112	112	112
8	15	15	15	15	15	31	63	63	63	63	63	55	114	114	114	114	114
9	17	17	17	17	17	32	65	65	65	65	65	56	116	116	116	116	116
10	19	19	19	19	19	33	67	67	67	67	67	57	118	118	118	118	118
11	23	23	23	23	23	35	69	69	69	69	69	58	120	120	120	120	120
12	25	25	25	25	25	36	71	71				59				104	86
13	27	27	27	27	27	37	73	73	73	72	72	60		102	102	98	100
14	29	29	29	29	29	38	75	75	75	74	74	61	102	104	104	102	102
15	31	31	31	31	31	39	77	77	77	76	76	62		21	13	13	13
16	33	33	33			40	79	79	79	78	78	63	104	97	97	96	104
17	35					41	81	81	81	80	80	65		35	35	33	35
18	37	37	37	37	37	42	83	83	83	82	82	67			21	21	21
19	39	39	39	39	39	43	85	85	85	84	84	68				35	33
20	41	41	41	41	41	44	87	87	87	86	88						
21	43	43	43	43	43	45	89	89	89	88	90						
22	45	45	45	45	45	46	91	91	91	90	92						
23	47	47	47	47	47	47	93	93	93	92	94						

Figura 8.1. Agenda por paciente por día obtenida del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez resuelto el modelo con los datos reales del Centro, se procedió a comparar la agenda obtenida con la agenda real del Centro, utilizando para ello los criterios de calidad definidos previamente en la presente sección. Esta comparativa se presenta en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Comparación entre solución de modelo y realidad ONCOSUR.

Agenda	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que comienzan tratamiento [#]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Ocupación [%]
Modelo	3208	8	69.2%	98.5%
ONCOSUR	28800	5	72.3%	92.6%

Puede verse que la agenda obtenida con el modelo creado por el equipo supera a la agenda obtenida manualmente en varios de los criterios establecidos. En primer lugar, además de agendar a todos los pacientes en tratamiento y los de la franja de prioridad A, se logra que tres pacientes adicionales comiencen su tratamiento. Se resalta que estos tres pacientes no tienen su fecha límite en la semana sino que más adelante, es decir de la franja prioritaria B que no era imperativo su ingreso pero sí muy beneficioso. Esto no solo mejora el flujo de pacientes, sino que genera una mayor utilización del tiempo del LINAC al reducir sus tiempos ociosos. Además, ingresar pacientes previo a su fecha límite disminuye los tiempos de espera para tratamientos. Esto impacta positivamente sobre las

posibilidades de recuperación del paciente, como también en su ansiedad y en los objetivos de calidad que tiene ONCOSUR.

En lo que respecta al tiempo de procesamiento, se ve una mejora sustancial con la utilización del modelo, ya que se llega a una agenda semanal en aproximadamente una hora de procesamiento y un periodo de aproximadamente 30 minutos para la parametrización utilizando herramientas de procesamiento de datos como Excel. En ONCOSUR, se destina una jornada de la semana para tareas de planificación y actualización del listado de pacientes. Es necesario destacar que la actualización de la lista de pacientes es una tarea necesaria en ambos casos, ya que independientemente de cómo se realiza la agenda, se debe cargar nuevos pacientes, remover a quienes culminaron su tratamiento y actualizar valores de sesiones restantes. Sin embargo, el tiempo de creación de las agendas es considerablemente menor utilizando el modelo y no requiere esfuerzo del personal administrativo.

En la Tabla 8.3, también se aprecia que el porcentaje de pacientes que mantienen el horario es de 72.3%. El modelo creado alcanzó mantener el horario de 69.2%. En este sentido, el modelo cumple con el objetivo de manera similar como lo hace el Centro. En la agenda que se recibió de ONCOSUR, se encuentran variaciones de hasta un slot entre días consecutivos para algunos de los pacientes. Este problema puede reducirse si se le solicita al paciente liberar 30 minutos de su día para el tratamiento. De esta manera, se puede manejar desvíos causados por tardanzas e imprevistos sin que existan demoras perceptibles para los pacientes. Esto no sería un gran inconveniente, ya que al igual que para la mayoría de los procedimientos médicos, se tienen tiempos de espera antes de ser atendido.

Se destaca que con el uso del modelo para la creación de la agenda, se cumplen todas las restricciones evitando el esfuerzo de coordinación manual. Estas son por ejemplo la coordinación de pacientes que viajan en un mismo transporte colectivo, la agenda de pacientes que deben atenderse durante la guardia de cierto radioncólogo, las sesiones restantes a administrar, fechas límite y la no interrupción del tratamiento. Todas estas restricciones son muy difíciles de contemplar simultáneamente de manera manual. En este sentido, el costo de generación de una agenda se vuelve considerablemente menor.

La utilización del modelo creado para el scheduling de pacientes de ONCOSUR, no solo brinda mejoras en aquello en lo que es comparable con la situación actual, sino que se implementa una nueva característica a la planificación: la capacidad de ajustarse a la ventana u horario de preferencia de un paciente. Esta implementación impacta de manera positiva en la calidad de los tratamientos brindados, ya que es el paciente quien elige un horario. Es necesario destacar que el tamaño de estas ventanas de preferencia incide sobre las agendas creadas, ya que dentro de una ventana no existen penalizaciones y se puede variar horarios a lo largo de la semana. Esto genera un deterioro de la calidad de la solución en cuanto al porcentaje de pacientes que mantienen el horario. Por otro lado, fijar una preferencia de menor amplitud o puntual para los pacientes, aumenta el tiempo de preparación de la ejecución de la prueba, ya que esto implica hacer cierta parte del scheduling en la fase de parametrización. De igual manera, en ese caso se tienen

preferencias disjuntas y cortas por lo que se reduce la complejidad del problema y el tiempo de resolución. Aparte de esto, el modelo ofrece una manera de controlar la cantidad de pacientes nuevos que se ingresan por día, ya que se conoce que la primera sesión de un paciente es más extensa por temas de calibración, adaptación del paciente y fabricación de moldes. Estos comienzos de tratamiento requieren un esfuerzo extra de toda la parte operativa del centro, y aunque ONCOSUR no tiene problemas con la demanda actual, esta funcionalidad permite regular la carga de trabajo adicional.



## 9. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de un modelo matemático, consiste en efectuar alteraciones o perturbaciones a los parámetros de entrada con el fin de estudiar la respuesta del modelo y la estabilidad de las soluciones óptimas. En otras palabras, estudiar qué tan sensible es el modelo a ciertas variaciones en parámetros que pueden ser ocasionadas por errores o incertidumbre en los datos de entrada.

En esta sección, se presenta el análisis de sensibilidad con respecto a los datos reales de ONCOSUR y la solución del modelo, presentados en la Sección 8. Se parte de la base de los datos reales del Centro y se alteran aquellos parámetros que, dada la realidad de ONCOSUR, su variabilidad en el tiempo es más probable. A continuación se detallan distintos casos, en los cuales se realizan dichas alteraciones y se describen los resultados obtenidos.

### 9.1. Caso de agregación de pacientes

Para este caso, se aumentó la cantidad de pacientes de 74 a 77 simulando que la demanda fuera mayor en alguna semana en particular. La calidad de la solución se presenta en la Tabla 9.1. En esa misma tabla, se presenta la calidad de la solución del caso base, es decir de la solución con los datos reales de ONCOSUR.

Tabla 9.1. Calidad de solución para la variación con tres pacientes.

Caso perturbación	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que comienzan tratamiento [#]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Ocupación [%]	Valor objetivo [min]
Caso base	3208	8	69.2%	98.5%	3314
Caso +3 pacientes	20298	8	76.9%	92.6%	5281

En este caso puede notarse como no se utiliza el 100% de la capacidad. Esto se debe a que en los días lunes, jueves y viernes solo existe un slot libre por día. Cualquier paciente que necesite una sesión de al menos dos slots (sesión estándar en el Centro) no podrá comenzar su tratamiento pues necesita agendar el viernes para mantener la continuidad.

Como muestra la columna “Tiempo de ejecución” de la Tabla 9.1, respecto al caso base, demora aproximadamente 6,5 veces más en llegar al óptimo. Esto está ligado a que los tres pacientes adicionales, tienen como fecha máxima de comienzo de tratamiento esta semana. Por lo tanto, se ve forzado a incluirlos en la agenda semanal. Existe un mayor porcentaje de ocupación debido a que los pacientes 77 y 78 comienzan su tratamiento. Esto es porque sus restricciones de horario fueron fijadas en un rango amplio y no existe penalización al ingresarlos a tratamiento.

## 9.2. Cantidad de slots diarios

El objetivo de este caso dentro del análisis de sensibilidad es estudiar cómo varía la agenda de pacientes en el horizonte de planificación, cuando se incrementa o disminuye la cantidad de slots por día y se mantienen los demás parámetros según los datos reales de ONCOSUR.

En primera instancia, se experimentó aumentando solo un slot más a la totalidad de los slots de la realidad de ONCOSUR (121 slots). A este caso se lo llama “+1 slot”. Se procede aumentando en tres, cinco y siete slots más respecto a la cantidad de slots originales, llamándolos “+3”, “+5” y “+7” respectivamente. Se presenta en la Tabla 9.2 la calidad de la solución de cada caso, junto con la calidad del caso base (solución con datos reales).

Tabla 9.2. Calidad de solución aumentando slots diarios.

Caso perturbación	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que comienzan tratamiento [#]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Ocupación [%]	Valor objetivo
Caso base	3208	8	69.2%	98.5%	3314
+1	23.08	9	90.8%	99.70%	9.67
+3	11.91	9	90.8%	98.10%	9.67
+5	12.01	9	90.8%	96.50%	9.67
+7	11.08	9	90.8%	95.00%	9.67

Se observa que el valor objetivo, la cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento y el porcentaje de pacientes que mantienen su horario en todos los casos de prueba es el mismo, por más que el tiempo de ejecución y la utilización del LINAC no lo son. A su vez, comparando cada criterio de la calidad de solución contra el caso base, se puede ver una notoria mejora.

Lo primero que llama la atención es el hecho que por más que aumenten la cantidad de slots por día, la cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento en el horizonte de planificación es la misma para cada caso de prueba. Esto se debe a que no se alteraron las ventanas temporales de preferencia de los pacientes respecto al caso base, y esto deriva en que no sea conveniente incorporar nuevos pacientes cuya ventana temporal de preferencia no coincida con los slots que se encuentran disponibles. Los pacientes pertenecientes a la lista de espera (*PW*) que tengan fecha límite dentro del horizonte de planificación sí comenzarán su tratamiento, por más que no coincidan los slots disponibles con su ventana temporal de preferencia.

Las variables que afectan la función objetivo no son alteradas por el aumento en la cantidad diaria de slots, por lo tanto el valor objetivo en cada caso es el mismo. A su vez, la misma combinación de slot-paciente fue hallada en todos los casos por la misma razón, lo cual explica que el porcentaje de pacientes que mantienen el mismo horario a lo largo de la semana es igual para cada caso.

La diferencia entre el tiempo de ejecución del caso base y el caso "+1" se explica porque cuantos menos slots haya, aumentan las iteraciones para generar una agenda, para la misma cantidad de pacientes. Esto se cumple hasta que se agregan cinco slots más, donde el tiempo de ejecución es muy similar al del caso "+3", dado que hasta cierto punto el aumento de slots disponibles es beneficioso para el armado de la agenda.

Por último, la disminución del porcentaje de ocupación del LINAC se explica porque aumenta la cantidad de slots disponibles caso a caso, pero los slots utilizados para tratamientos no. A su vez, no aumenta la cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento.

De este análisis se concluye que agregando solo cinco minutos al horario de atención, la solución es ampliamente mejor bajo los estándares de calidad planteados. Se entiende que esta mejora de la solución se debe a que el horario de ONCOSUR se representa en 121 slots, y los slots asignados por sesión son dos por paciente por día. Que la cantidad de slots disponibles sea impar y la cantidad de slots por sesión sea par repercute fuertemente en la confección de la agenda. Por otro lado, agregar más de un slot al horario del Centro deja de implicar una mejoría en la calidad de la solución.

Continuando con el análisis de sensibilidad variando la cantidad de slots diarios, resulta de interés presentar el caso contrario al expuesto anteriormente: disminución de la cantidad de slots por día en el horizonte de planificación. De esta forma, se disminuye la cantidad de slots restándole uno, tres, cinco y siete slots a las cantidades reales del Centro, y se le llama "-1", "-3", "-5" y "-7" a cada uno, respectivamente. La calidad de cada solución se presenta en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3. Calidad de solución disminuyendo slots diarios.

Caso perturbación	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que comienzan tratamiento [#]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Ocupación [%]	Valor objetivo
Caso base	3208	8	69.2%	98.5%	3314
-1	508	8	86.20%	99.30%	1614
-3	10221	6	65.60%	99.30%	11268
-5	10214	6	54.00%	99.30%	24222
-7	-	-	-	-	-

Se registra una disminución de la cantidad de pacientes que comienzan su tratamiento y la utilización del LINAC en cada caso, además de un aumento en el valor objetivo y tiempo de ejecución. En el único caso que se mantiene los pacientes que ingresan es al sacar 1 slot. El día está modelado con 121 slots y las sesiones de pacientes se componen de cantidad de slots consecutivos pares por lo que siempre queda algún slot libre. Eso explica que al sacar un solo slot, aumente la capacidad utilizada y se mantengan los pacientes que ingresan con respecto al caso base.

Al reducir la cantidad de slots por día, se reduce la capacidad del LINAC para ingresar nuevos pacientes al tratamiento. Esto se ve en los casos de prueba que se sacan 3 slots y 5 slots por día. No existe una solución factible para el caso “-7” porque, comparado a la solución base, ambos mantienen la cantidad de pacientes que dependen de las camionetas para trasladarse. Por lo tanto, al reducir la cantidad de slots, esa misma cantidad de pacientes debe ingresarse en menos tiempo disponible, lo cual resulta en una agenda no factible - es una restricción dura: si no pueden ingresarse los pacientes de  $PF$  con  $d_i \leq 5$ , no hay agenda posible. A modo de ejemplo: Se plantea un caso donde se tienen 10 pacientes, cada uno con dos slots por sesión, que se trasladan en camioneta en el horario entre los slots 100 y 121. Si los 10 pacientes habían comenzado su tratamiento previamente y lo finalizan posteriormente al horizonte de planificación, al reducir los slots por día disponibles no existe una agenda factible al no poder asignarles un horario.

El hecho que la cantidad de slots totales disponibles de ONCOSUR originalmente son 121 (impar) y la cantidad de slots por sesión son dos (par), provoca el aumento de la cantidad de iteraciones que se deben hacer para alcanzar la solución óptima, dado que por ese slot de diferencia entre el par e impar volvía extenso el proceso de resolución, ya que se deben que probar todas las combinaciones de un slot más y un slot menos.

Analizando la ocupación de slots en cada caso, se mantiene constante debido a que si bien la cantidad de slots disminuye, también disminuye la cantidad de slots en uso (disminuye la cantidad de pacientes que empiezan su tratamiento, en algún momento del horizonte de planificación). Esto se relaciona con el porcentaje de pacientes que mantienen su horario; pacientes deben ajustar su horario de sesión con el fin de incorporar a nuevos pacientes cuya fecha límite sea dentro de la semana considerada.

### **9.3. Caso de aumento de pacientes que comienzan su tratamiento (parámetro C)**

Para este caso, se modificó de  $C = 75$  (caso base) a Caso  $C = 3$  y Caso  $C = 5$ , para ver cómo varía la solución teniendo un límite de pacientes que pueden comenzar su tratamiento por día. Se recuerda que la primera sesión siempre dura unos minutos más que regularmente por lo que algunos centros, en este caso ONCOSUR no lo hace, distinguen a los pacientes que empiezan y limitan la cantidad de ellos por día. El análisis de la calidad de la solución se presenta en la Tabla 9.4.

Tabla 9.4. Calidad de solución variando parámetro  $C$ .

Caso perturbación	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que comienzan tratamiento [#]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Ocupación [%]	Valor objetivo
Caso base $C = 75$	3208	8	69.2%	98.5%	3314
Caso $C = 3$	27487	8	83.1%	92.6	3764.67
Caso $C = 5$	24892	8	69.2%	92.6	3314

Se observa que en el caso  $C = 3$  le toma aproximadamente un 10% más de tiempo que con  $C = 5$ . Esto es de esperarse ya que  $C = 3$  es más restrictivo que  $C = 5$  por lo que considerando el tiempo máximo de ingreso, hay días que debe aplazar el comienzo en la semana.

Por otro lado, al igual que las variaciones descritas en la sección, no varía la cantidad de pacientes que ingresan al tratamiento pero si varía la cantidad que mantienen el horario. En el caso de  $C = 3$  mantienen mejor el horario que con  $C = 5$ . Esto puede deberse a que al ingresar pacientes de forma restrictiva, no busque agregar a otro paciente y por ello cambiar al anterior. Por lo que es más factible que mantenga el horario.

En cuanto a la ocupación, en ambos casos son iguales. El valor objetivo difiere en un 10 % siendo mejor solución cuando  $C = 5$  que tiene coherencia porque el modelo tiene más libertad para elegir.

#### 9.4. Caso de aumento en la duración de los slots ( $q = 10$ )

Para este caso, se modificó de  $q = 5$  (solución original) a  $q = 10$  minutos ya que en los datos originales de ONCOSUR, la agenda se divide mayoritariamente en slots de 10 minutos y más del 90% de los pacientes la totalidad de la fracción dura 10 minutos. La calidad de la solución se presenta en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5. Calidad de solución variando parámetro  $q$ .

Caso perturbación	Tiempo de ejecución [seg]	Pacientes que comienzan tratamiento [#]	Pacientes que mantienen el horario [%]	Ocupación [%]	Valor objetivo
Caso base $q = 5$	3208	8	69.2%	98.5%	3314
Caso $q = 10$	8.406	8	89.2%	100%	-30.66

Primero, es de destacar la reducción significativa en el tiempo de resolución para el caso con  $q = 10$  con respecto al de  $q = 5$ , que fue de poco más de 8 segundos, comparado a los 3208 segundos del modelo base con  $q = 5$ .

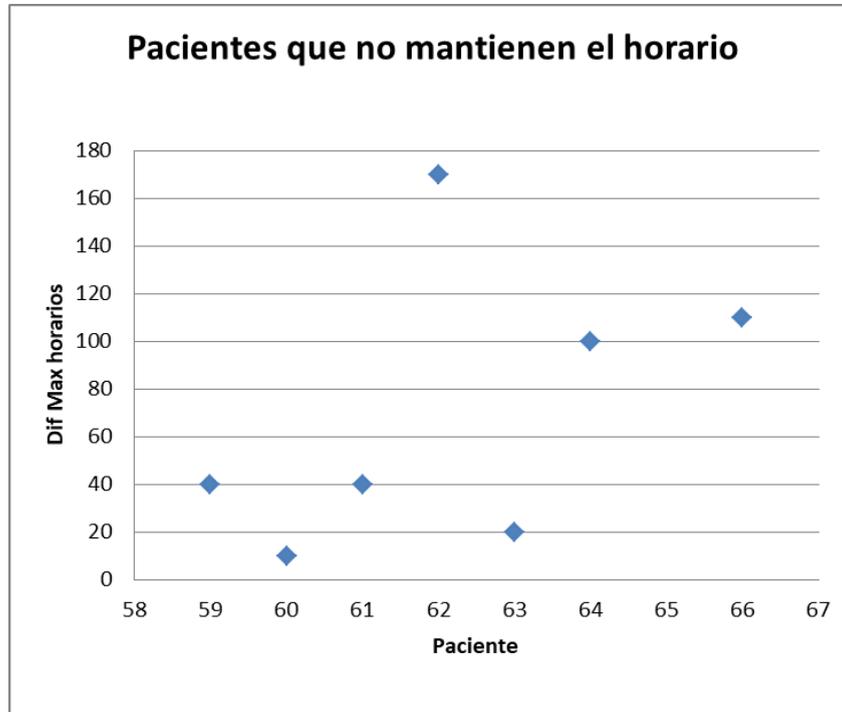


Figura 9.1. Diferencia máxima de horario entre agendado y preferido en la semana.

Se observa en la Figura 9.1 que de los siete pacientes que no mantienen el horario, cuatro se trasladan en transporte colectivo contratado, por lo que se desestiman a la hora de evaluar la solución. Sucede que la espera posterior a la sesión o la demora en atenderse se va a tener para todos ellos ya que deben llegar e irse con el transporte. En cuanto a los tres restantes, se observa que ese atraso en uno de los slots es debido a que no se puede interrumpir el tratamiento y, de no tener ese atraso, no podrían ser ingresados.

Se puede observar que el paciente 62 se destaca por no mantener su horario. Este paciente tiene una fecha máxima de ingreso de dos días en la semana por lo que el modelo debe agendarlo antes del martes y tener un desfase de horarios de comienzo. Luego, cuando el paciente 36 deja su horario libre, a partir del miércoles, lo toma el 62 y hasta el viernes mantiene su horario en el slot 36. Además, el paciente 62 tiene como ventana temporal de preferencia a la tarde y asiste al Centro por sus propios medios, por lo que nunca se penaliza la diferencia de horario ya que todas sus sesiones están agendadas para la tarde. Por otro lado, de los ocho pacientes que ingresan, solo a uno se le mantiene el horario en la semana.

## **10. Conclusiones**

En esta sección se concluye el documento de proyecto, se presentan los resultados principales sintetizando lo expuesto hasta el momento y posteriormente se presentan posibles direcciones para trabajo futuro.

### **10.1. Conclusiones generales del proyecto**

A lo largo de este proyecto de grado, se efectuó una investigación exhaustiva sobre métodos cuantitativos para el scheduling de pacientes de radioterapia. Esto significó profundizar en los procesos de radioterapia y gestión hospitalaria, los conceptos de scheduling y en el RTSP, un problema de suma importancia en los últimos diez años. Se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre el tema y se elaboró un estado del arte para documentar los resultados de la misma.

Una vez culminada la investigación, se entró en contacto con el Centro de Radioterapia ONCOSUR, con el fin de trabajar en conjunto para conocer la realidad de la empresa y desarrollar un modelo matemático para la realización de agendas de tratamiento que se adapte a la realidad del Centro. Este modelo de programación lineal entera mixta fue creado utilizando los conocimientos adquiridos en la fase de investigación y fue posteriormente mejorado y validado por el equipo en un proceso iterativo de prueba, evaluación y modificación. Luego, se experimentó con el modelo utilizando como entrada información real brindada por ONCOSUR y se compararon resultados con los registros reales del Centro. Esta comparación se realizó bajo criterios definidos por el equipo para medir la calidad de una agenda. Por último, se estudió la solución obtenida en un análisis de sensibilidad.

Para el periodo en estudio, la agenda proveniente del modelo creado por el equipo supera la creada manualmente por el Centro en tres de los cuatro criterios aplicables y la iguala en el cuarto criterio.

En primer lugar, se logró reducir el tiempo de creación de agendas de una jornada de trabajo a una hora de proceso de resolución del software de optimización. Esto quiere decir que se obtiene una agenda que pondera simultáneamente todas las restricciones que presenta el Centro en una fracción del tiempo, reduciendo el costo de creación de agendas tanto en tiempo como en esfuerzo administrativo del personal. La solución hallada por el modelo es óptima, es decir que no existe otra solución que cumpla de mejor manera en lo que refiere a los objetivos bajo las restricciones fijadas. Esto es un avance importante ya que para las agendas creadas actualmente por el Centro, solo podría verificarse que cumplan con los objetivos. Por lo tanto, la solución obtenida con el modelo es de gran utilidad para el tomador de decisiones, al momento de confeccionar la agenda definitiva.

En segundo lugar, se logra ingresar a más pacientes de la lista de espera de tratamiento. Esta mejora en el flujo de pacientes también resulta en una reducción de los tiempos de

espera para tratamientos, un indicador importante para ONCOSUR, y una mayor utilización del recurso más escaso y crítico para el mismo, el acelerador lineal.

En lo que refiere a mantener el horario de los pacientes a lo largo del tratamiento, se logra igualar la calidad de las agendas creadas por el centro. Aunque se tienen variaciones de horarios en la agenda, se mostró que las mismas son reducidas en magnitud y es reducida la cantidad de pacientes que tienen alguna variación. Esto no es un problema en lo operativo ni es perceptible por los pacientes si se los convoca por un periodo de tiempo más grande que la duración de su sesión.

Además de las mejoras mencionadas anteriormente, se logró incorporar con el modelo dos funcionalidades nuevas a la agenda. La primera, y más importante, es la de introducir una preferencia horaria para las sesiones de cada paciente la cual tiene como objetivo cumplir lo más posible con las preferencias indicadas por los pacientes. Esto permite que el tratamiento sea más cómodo, o en otras palabras que se ajuste a la rutina del paciente y por tanto mejore su calidad de vida durante el tratamiento. El equipo cree que esto se alinea fuertemente con la misión y visión de ONCOSUR. La segunda funcionalidad refiere a poder regular tanto la disponibilidad del LINAC como la cantidad de pacientes que comienzan en un mismo día de trabajo.

Otra característica que beneficia el uso del modelo para programar la agenda de pacientes es la posibilidad de reprogramación de pacientes en caso de ser necesario. El tiempo de ejecución del modelo es considerado relativamente bajo, y el programador de la agenda puede decidir entre reprogramar manualmente en caso que se vean alterado el horario de pocos pacientes, o volver a ejecutar el algoritmo.

En el análisis de sensibilidad, se demostró que las agendas obtenidas con el modelo desarrollado, dependen fuertemente de la cantidad de slots con los que trabaja ONCOSUR. Esto era esperable y puede comprobarse fácilmente que agregando un solo slot, la agenda mejora considerablemente en todo aspecto. Esto permite concluir que para trabajar de forma más adecuada, y poder enfrentar imprevistos o llegadas tarde, el Centro debería tener un mayor tiempo de trabajo. Esto es coherente con el hecho de que los operarios del Centro a menudo deben trabajar horas extra para cumplir con las sesiones agendadas.

Otro parámetro bajo el cual se puede apreciar la sensibilidad de las soluciones obtenidas, es el parámetro  $q$ , duración en minutos de cada slot. Esto demuestra que al utilizar el modelo, la manera de fraccionar los tiempos operativos del LINAC afecta considerablemente a las agendas creadas. Particularmente, se observaron mejoras al disminuir la cantidad de particiones del tiempo del equipo, lo cual simplifica el proceso de resolución.

En síntesis, y por todo lo antedicho, las agendas creadas por el modelo pueden ser una herramienta útil para el tomador de decisiones a la hora de confeccionar las agendas de tratamientos de radioterapia en ONCOSUR. También, se concluye que el modelo se adapta correctamente a la realidad del Centro, cumpliendo con los objetivos planteados y el alcance fijado. Además, se entiende que el modelo tiene la capacidad de ser adaptable y

escalable, por lo que se podría adaptar fácilmente a la realidad de otros centros de radioterapia con características similares y de mayor tamaño.

## **10.2. Trabajo futuro**

Si bien se cumplieron los objetivos del proyecto, se pueden identificar oportunidades para el estudio futuro y posteriores trabajos. Estas refieren principalmente a la posibilidad de ampliar el modelo, eliminando supuestos realizados o simplificaciones que se hicieron.

En primer lugar, se podría ampliar el modelo para abarcar el scheduling de los tratamientos de radioterapia de radiación interna que brinda el Centro (braquiterapia). Esto podría lograr agregando un parámetro, para cada paciente, que marque en qué equipo o equipos de tratamiento se puede tratar. También sería necesario crear restricciones para que cada paciente se trate en equipos adecuados a su necesidad. Además, se podría ampliar el modelo para abarcar ciertas partes del pretratamiento de pacientes como lo son las tomografías o las consultas con radioncológicos.

En segundo lugar, como fue presentado en la Sección 2, la cantidad de personas con cáncer a nivel mundial se ve en aumento año tras año, por lo que se espera que la cantidad de pacientes que ONCOSUR aumente en el futuro. Teniendo en cuenta esta situación y la Sección 9.1 del análisis de sensibilidad, se podría estudiar la forma de disminuir el tiempo de ejecución al aumentar la cantidad de pacientes desarrollando heurísticas, y basándose en las mencionadas en el Estado del Arte.

En tercer lugar, si se obtienen suficientes datos históricos de ONCOSUR, se podría crear una base de datos y utilizando métodos de regresión, estimar con mayor precisión los valores de varios parámetros que serían de gran interés como las tasas de arribo de pacientes de cada tipo. También podría estudiarse si existe algún tipo de estacionalidad en la demanda de tratamientos. Estos datos permiten crear modelos de online scheduling, un tipo de scheduling donde no se tienen todos los datos a la hora de crear la agenda, sino que utilizando datos históricos se predice la información faltante asumiendo que se mantienen los patrones existentes. En otras palabras, obtener suficientes datos del pasado permitirá que se puedan generar agendas que predican cómo será la realidad del centro en lo que refiere a demanda y patrones medibles.

Por último, es necesario plantear que la realidad de ONCOSUR se encuentra en un proceso de cambio sustancial. Esto refiere a la implementación de un equipo nuevo con potencial de mejorar el flujo de pacientes y los tiempos de espera además de implementar un proceso de digitalización de datos y experiencia del Centro. El equipo nuevo brindará una gestión integral de todo el flujo de pacientes a través de un sistema computacional utilizado por todas las áreas. Este sistema no abarca la programación de los tratamientos, por lo cual existe un gran desafío para el futuro. Este sería aprovechar los beneficios que brinda este nuevo sistema en todas las partes de la cadena de valor de ONCOSUR y potenciarlo con un modelo matemático para la programación de los tratamientos.

Finalmente, se concluye que este proyecto fue un reto muy gratificante para el equipo y más aún habiendo transcurrido durante una pandemia, que además de desafiar fuertemente a todo el sistema de salud fue motivo de dificultades para el equipo. La oportunidad de realizar un proyecto de manera integral, permitió aprender sobre técnicas de modelado, experimentación y análisis así como trabajar en conjunto con un Centro de Radioterapia que estuvo en todo momento dispuesto y sumamente interesado en lograr aplicar la ingeniería de procesos hacia la mejora en la gestión hospitalaria. También, fue muy importante para el equipo lograr validar y probar la efectividad de las herramientas aprendidas a lo largo de la carrera y ponerlas al servicio de un sector tan importante como lo es la salud.

## Referencias

- [1] ACS: American Cancer Society: How Treatment Is Planned and Scheduled, <https://www.cancer.org/>. 2020. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [2] Cambridge Dictionary. Schedule, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/schedule>. 2022. Último acceso: 01 de octubre de 2022.
- [3] J. P. Cares, M. C. Riff, B. Neveu. GeneRa: A problem generator for radiotherapy treatment scheduling problems. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 76, 191–214, 2016.
- [4] J. P. Cares, M. C. Riff, B. Neveu. LS<sup>2</sup>R: A local search algorithm to solve scheduling radiotherapy problems. *13th International Conference on Hybrid Intelligent Systems -Institute of Electrical and Electronics Engineers* 978 (1), 4799-2439, 2013.
- [5] J. P. Cares, M. C. Riff, B. Neveu. GeneRa: A Benchmarks Generator of Radiotherapy Treatment Scheduling Problem. *Learning and Intelligent Optimization 8th International Conference. Lecture Notes in Computer Science* 8426, 353–361, 2014.
- [6] E. Castro, S. Petrovic. Combined mathematical programming and heuristics for a radiotherapy pre-treatment scheduling problem. *Journal of Scheduling* 15, 333–346, 2012.
- [7] D. Conforti, F. Guerriero, Rosita Guido, M. Veltri. An optimal decision-making approach for the management of radiotherapy patients. *OR Spectrum* 33(1), 123–148, 2011.
- [8] D. Conforti, F. Guerriero, R. Guido. Innovative Applications of O.R: Non-block scheduling with priority for radiotherapy treatments. *European Journal of Operational Research*, 201, 289–296, 2010.
- [9] D. Conforti, F. Guerriero, R. Guido. Optimization models for radiotherapy patient scheduling. *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research* . 6, 263–278, 2008.
- [10] EDS Robotics. Cuello de botella en la producción: identificarlo y solucionarlo. 27 de agosto de 2020. Último acceso: 30 de septiembre de 2022.
- [11] G. Gazzano, Intercambio por correo electrónico acerca de gestión de riesgos en PMI, 2022.
- [12] INC: Instituto Nacional del Cáncer: ¿Qué es el Cáncer?. Link de acceso: <https://www.cancer.gov/about-cancer/understanding/what-is-cancer>. 2021. Último acceso: 9 de Julio de 2022.
- [13] INC: Instituto Nacional del Cáncer: Radioterapia para tratar el cáncer, <https://www.cancer.gov/espanol>. 2019a. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

- [14] INC: Instituto Nacional del Cáncer: Braquiterapia para tratar el cáncer, <https://www.cancer.gov/espanol>. 2019b. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [15] INC: Instituto Nacional del Cáncer. Radioterapia para tratar el cáncer, <https://www.cancer.gov/espanol>. 2019. Último acceso: 9 de Julio de 2022.
- [16] InCo: Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería de La República. Apartado del curso de Sistemas Operativos, 2014.
- [17] S. Li, X. Xie, N. Geng. A Queuing Approach for Radiotherapy Treatment Capacity planning. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 540-545, 2014.
- [18] NCI: National Cancer Institute. What is Cancer?, Link a página web: <https://www.cancer.gov/about-cancer/understanding/what-is-cancer>. 2021. Último acceso: 8 de Marzo de 2022.
- [19] IBM: International Business Machines Corporation. Programación de restricciones con CP Optimizer. Página web: <https://www.ibm.com/uy-es>. 2017. Último acceso: 28 de septiembre de 2022.
- [20] OBS Business School. Metodología PMI. Anna Pérez. Link de acceso: <https://www.obsbusiness.school/blog/conoces-la-metodologia-pmi>. 2015. Último acceso: 10 de agosto de 2022.
- [21] ONCOSUR. Centro Regional de Radioterapia ONCOSUR: misión y visión. <http://www.oncosur.com.uy/page2.html>. Último acceso: 26 de marzo de 2022.
- [22] OPS: Organización Panamericana de la Salud: Yo soy y voy a, <https://www.paho.org/es/campanas/dia-mundial-contra-cancer-2021-yo-soy-voy>. 2021. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [23] OMS: Organización Mundial de la Salud: Promoting Cancer Early Diagnosis, <https://www.who.int/activities/promoting-cancer-early-diagnosis>. 2022. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [24] Toledo, R. Prado, O. Planificación de riesgos desmitificada: un enfoque práctico-Demystifying risk planning: a practical approach. *PMI® Global Congress 2007—Latin America, Cancún, Mexico. Newtown Square, PA: Project Management Institute*, 2007.
- [25] P.A.: Proyectos ágiles. Qué es Scrum. Link de acceso a la página web: <https://proyectosagiles.org/que-es-scrum/>. 2019. Último acceso: 10 de Agosto de 2022.
- [26] Necolex: Acelerador Lineal, <http://www.necolex.com/>. 2019. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [27] Radioncology for patients. Linear Accelerator. Link de acceso a la página web: <https://www.radiologyinfo.org/en/info/linac>. 2021. Último acceso: 11 de Agosto de 2022.

- [28] A. Requena. Qué es un Sprint de Scrum. Link de acceso: <https://openwebinars.net/blog/que-es-un-sprint-scrum/>. 2018. Último acceso: 6 de Agosto de 2022.
- [29] SEOM: Sociedad Española de Oncología Médica. ¿Qué es el cáncer y cómo se desarrolla? Dr. J. Puente, Dr. G. Velasco. Link de acceso: <https://seom.org/informacion-sobre-el-cancer/que-es-el-cancer-y-como-se-desarrolla>. 2022. Último acceso: 28 de Septiembre de 2022.
- [30] P. Sharma, A. Jain. A Review on job shop scheduling with setup times. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* 1-17, 2015.
- [31] RIR: Radiology Information Resource: Linear Accelerator. Link de acceso: <https://www.radiologyinfo.org/en>. 2021. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [32] T. Kapamara, K. Sheibani, O.C.L. Haas, C.R. Reeves, D. Petrovic. A review of scheduling problems in radiotherapy. *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Systems Engineering*. 201-207, 2006.
- [33] Medline Plus, Biblioteca Nacional de Medicina: Radioterapia. Link de acceso: <https://medlineplus.gov/spanish/>. 2020. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- [34] D. Petrovic, M. Morshed, S. Petrovic. Multi-objective genetic algorithms for scheduling of radiotherapy treatments for categorised cancer patients. *Expert Systems with Applications* 38(6), 6994–7002, 2011.
- [35] S. Petrovic, E. Castro. A genetic algorithm for radiotherapy pre-treatment scheduling. *Applications of evolutionary computation* 2, Lecture Notes in Computer Science 6625, 454-463, 2012.
- [36] B. Vieira, E. W. Hans, C. van-Vliet-Vroegindewey, J van-de-Kamer, W. van-Harten. Operations research for resource planning and use in radiotherapy: a literature review. *BMC Medical Informatics and Decision Making* 16, 149, 2016.
- [37] B. Vieira, D. Demirtas, J. B. van-de-Kamer, E. W. Hans, W. van-Harten. A mathematical programming model for optimizing the staff allocation in radiotherapy under uncertain demand. *European Journal of Operational Research* 270(2), 709-722, 2018.
- [38] B. Vieira, D. Demirtas, J. B. van-de-Kamer, E. W. Hans, W. Jongste, W. van-Harten. Radiotherapy treatment scheduling: Implementing operations research into clinical practice. *PLoS ONE*. 16(2), 2021.
- [39] B. Vieira, D. Demirtas, J. B. van-de-Kamer, E. W. Hans, L-M. Rousseau, N. Lahrichi, W. H. van-Harten. Radiotherapy treatment scheduling considering time window preferences. *Health Care Management Science* 23, 520–534. 2020.



# **ANEXO 1: Estado del Arte**





# **Problemas de Scheduling para el tratamiento de pacientes de Radioterapia: Una revisión sistemática de la literatura**

**Estado del arte del proyecto de grado de Ingeniería de Producción**

**Realizado por:**

Forcella, Agustina

Frechou, Chloé

Jorba, Juan Andrés

**Tutor:** Piñeyro, Pedro

*Facultad de Ingeniería - Universidad de la República*

*Montevideo, Uruguay*

*Octubre 2022*



# Índice de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>99</b>
1.1. ¿Qué es la radioterapia?	99
1.2. Scheduling en medicina	102
1.3. Contexto histórico	102
1.4. Descripción del problema	103
1.5. Alcance	105
<b>2. Metodología de búsqueda</b>	<b>107</b>
2.1. Metodología aplicada	107
2.1.1. ScienceDirect	108
2.1.2. Scopus	109
2.1.3. Springer	109
2.1.4. Agregado y consolidación de trabajos	110
<b>3. Revisión de trabajos</b>	<b>113</b>
3.1. Clasificación de trabajos	113
3.2. Categoría: documentos sin MO. Total: 8 trabajos.	114
3.3. Categoría: Tiempos. Total: 31 trabajos.	119
3.3.1. Subcategoría: Infraestructura. Total: 8 trabajos.	119
3.3.2. Subcategoría: Pacientes. Total: 15 trabajos.	122
3.3.3. Subcategoría: Recursos Humanos. Total: 8 trabajos.	128
3.4. Categoría: Otros. Total: 3 trabajos.	132
<b>4. Conclusiones</b>	<b>135</b>
<b>Referencias</b>	<b>137</b>



## **1. Introducción**

El siguiente documento es un estado del arte sobre scheduling para tratamientos de radioterapia. Los objetivos principales de este documento consisten en analizar los avances que se han hecho entre los años 2010 y 2021 inclusive en lo que comprende la agenda de pacientes para tratamientos de radioterapia o Radiotherapy Scheduling (RTS) en inglés, y comprobar el interés de la comunidad científica en el tema.

### **1.1. ¿Qué es la radioterapia?**

La radioterapia es un método para combatir el cáncer y sus síntomas. Consiste en la aplicación de radiación en un área específica que elimina o desacelera la reproducción de las células cancerígenas. La finalidad de esta es reducir y eliminar los tumores además de reducir el dolor. Generalmente, la radioterapia se combina con otros tratamientos para generar mejores resultados (INC, España, 2019a).

Dentro de los tratamientos de radioterapia, existen distintas tecnologías empleadas y una variedad de posibles tratamientos de acuerdo al lugar, tamaño, avance del cáncer, tipo de cáncer, y distintas consideraciones como otros tratamientos que esté realizando el paciente, además de su estado de salud general (INC, España, 2019a).

Los tipos de radioterapia se clasifican en tres: radioterapia interna, externa e intraoperatoria. La radioterapia externa se realiza enviando rayos X o protones al área afectada. Hoy en día, en los centros de salud más desarrollados tecnológicamente, se utiliza la radioterapia de protones, la cual consiste en enviar protones al área donde se encuentra el tumor cancerígeno y exterminando las células del mismo. Esta radioterapia tiene la particularidad que los daños a los tejidos sanos alrededor de la zona afectada son menores que utilizando rayos X, lo cual resulta muy útil cuando la zona con células cancerígenas se encuentra cerca de órganos vitales o delicados. Por otro lado, la radioterapia interna consiste en introducir al cuerpo del paciente, una fuente interna, sólida o líquida, que libera radiación hacia el tumor. La fuente puede introducirse a través del sistema intravenoso, o mediante pastillas o implantes mantenidos durante un período de tiempo dentro del cuerpo (Medline Plus, 2020).

Uno de los métodos de radioterapia interna más conocidos es la braquiterapia, que consiste en un elemento sólido que se introduce cerca del tumor maligno liberando radiación (es una fuente de radiación). Este elemento se coloca en forma de semillas, cápsulas o listones y se localiza en una parte específica del cuerpo para ser tratada. Existen distintos tipos de braquiterapia, los cuales dependen del tipo de cáncer a tratar: la braquiterapia intersticial, la cual se inserta la fuente dentro del tumor y se utiliza por ejemplo en cáncer de próstata; braquiterapia intracavitaria, donde la fuente se coloca en una cavidad del cuerpo y se utiliza para tratar cáncer de cuello uterino; y la braquiterapia epiescleral, en la que la fuente de radiación se adhiere al ojo para tratar melanoma (INC, España, 2019a).

Por lo general, dentro de los centros de radioterapia se clasifican a los pacientes en tres categorías, dependiendo del estado del mismo. En primer lugar, se encuentran los pacientes a los cuales se les brinda el tratamiento de radioterapia paliativa. Esta tiene como objetivo controlar los

síntomas de cáncer y aliviarlos, como también mejorar la calidad de vida de los pacientes. Suele brindarse en pacientes con cáncer en estado avanzado. En segundo lugar se hallan los pacientes de tratamiento de radioterapia radical. Esta consiste en administrar dosis altas de radiación al paciente, dado que se desea eliminar las células cancerígenas. En comparación al tratamiento paliativo, suele ser largo y complejo de planificar. Por último, se considera un paciente de radioterapia como urgente cuando se debe actuar de manera inmediata para salvar la vida del paciente o remediar una situación de inestabilidad o dolor aguda (ACS, 2020). Un ejemplo sería un paciente con complicaciones debido a efectos adversos en la quimioterapia o en la propia radioterapia.

La herramienta más conocida para aplicar la Radioterapia externa es el acelerador lineal de partículas, comúnmente denominado LINAC por sus siglas en inglés (RIR, 2021). La Figura 1 (a) presenta un ejemplo de un LINAC que emite radiación de rayos X, y la Figura 1 (b) que presenta un LINAC junto al paciente y los doctores especialistas que realizan la radioterapia.



(a)



(b)

Figura 1 (a) y (b) - Acelerador Lineal (Manilas, 2018) y forma de empleo (Necolex, 2019).

El tratamiento de radioterapia se realiza en sesiones o “fracciones” de irradiación diarias de entre 2 y 15 minutos. Las mismas ocupan distintos espacios en la semana y pueden repetirse hasta 5 veces semanalmente. El cronograma puede continuar así durante 2 a 9 semanas, dependiendo del tipo del tratamiento y la necesidad de cada paciente. Usualmente, deben realizarse suspensiones o descansos durante el tratamiento, lo cual le permite al cuerpo reparar el daño causado y asimilar mejor el tratamiento. Los descansos pueden estar programados desde un inicio o pueden implementarse bajo recomendaciones médicas a raíz de la situación del paciente. Si bien la radioterapia está diseñada para ser aplicada al área específica afectada por el tumor cancerígeno, la radiación puede dañar células benignas y por ende afectar órganos cercanos, como fue expresado anteriormente (INC, España, 2019a).

La radiación que puede recibir una persona a lo largo de su vida es limitada. Es por esto que es importante evitar las interrupciones no planificadas durante el tratamiento, ya que baja la efectividad y se debe alargar el tiempo del tratamiento, lo cual deriva en efectos negativos en la salud del paciente (Llorente, 2014).

La Figura 2 presenta un resumen en forma esquemática del procedimiento típico a seguir por los pacientes de radioterapia. Una vez que a un paciente se le asigna el tratamiento de radioterapia, se comienza tomando una tomografía de la zona la cual puede ser computarizada o tradicional, para luego ser evaluada por especialistas. Se estudia la zona y el médico tratante delinea el tumor observando los órganos riesgosos. Luego, se genera un plan de tratamiento el cual contiene las dosis de radiación a brindar, la cantidad de fracciones y su distribución en el tiempo ponderando descansos. Posteriormente, se procede a la etapa de pretratamiento donde se coordinan las sesiones del paciente y sus consultas oncológicas a lo largo del tratamiento. El pretratamiento culmina con la realización de la primera sesión, dando lugar al inicio del tratamiento y las fracciones subsiguientes. Al culminar el tratamiento, el radioncólogo tratante decide si se cumplió con las dosis necesarias para erradicar las células cancerígenas, dando lugar a la finalización o prolongación del tratamiento (Cortés, 2021).

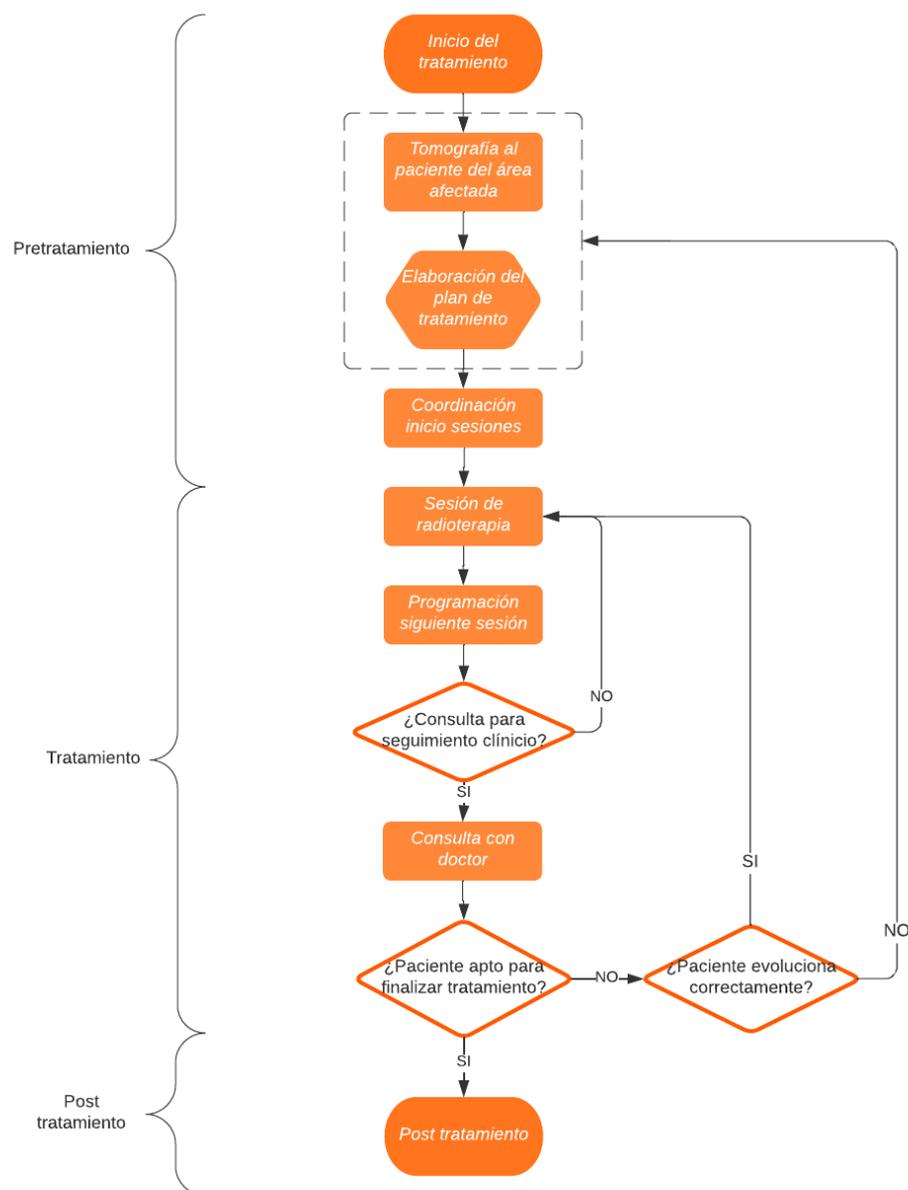


Figura 2 - Diagrama de flujo de tratamiento de radioterapia

## 1.2. Scheduling en medicina

Según el diccionario de Cambridge, se conoce como “scheduling” a la actividad de planificar los tiempos en que una serie de tareas van a ser realizadas. La traducción al español que más se ajusta a scheduling es “planificación”, pero en el contexto que se utiliza para este estado del arte se considera la palabra escrita en inglés, ya que también hace referencia a “cronograma”.

Cuando se habla de “scheduling en medicina” se hace referencia a todas aquellas actividades del scheduling realizadas en ambiente médico; ejemplos de aplicación varían desde la creación de una plataforma que permita al paciente agendar un turno con algún médico de cierta especialidad, hasta el estudio de modelos que resulten en dosis óptimas de tratamiento para pacientes que cursen cierta enfermedad. A su vez, existe el perfil de “técnico de programación médica”, persona encargada de programar exámenes para pacientes y gestionar consultas de servicio al cliente (Learn, 2021).

Dentro de las aplicaciones existentes, se encuentra la variante de RTS, la cual se estudiará en profundidad en secciones posteriores.

## 1.3. Contexto histórico

Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cáncer es una de las principales causas de muerte en todo el mundo y es la segunda mayor causa de muerte en América Latina. En 2018 se diagnosticaron 18.078.957 pacientes con la enfermedad, de los cuales 9.555.027 fallecieron a nivel mundial. En la Figura 3, se presenta la población total al año 2019 y la cantidad de casos de cáncer, incluyendo los casos de muerte por ello.

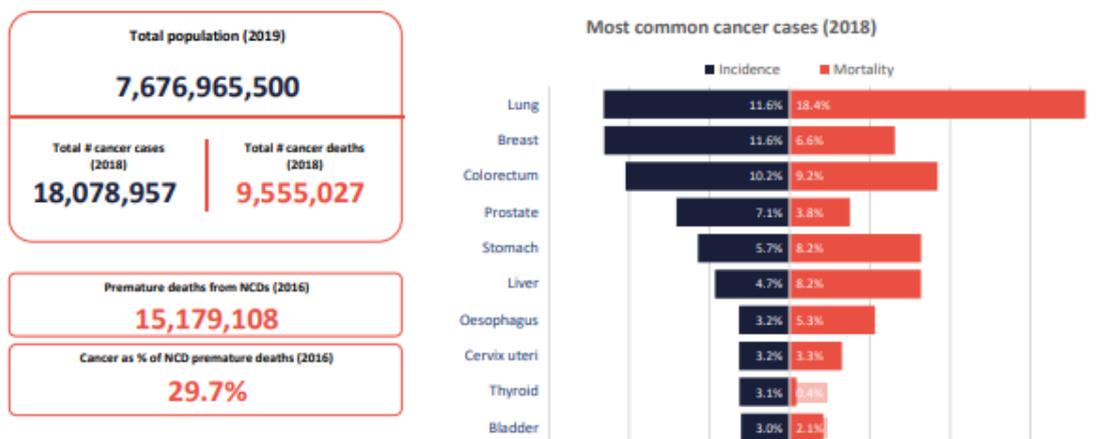


Figura 3 - Casos de cáncer en el mundo. Fuente: OMS.

Debido al envejecimiento global de la población y al creciente acceso a nuevos y mejores tratamientos de radioterapia y métodos de diagnóstico, existe un aumento en la cantidad de pacientes que atraviesan tratamientos de radioterapia. Si se mantiene la actual tasa de

crecimiento, se prevé que para 2040 se registre un 60% más de casos aproximadamente en América latina (OPS, 2021).

Tal como con los otros tipos de tratamiento del cáncer, los tratamientos de radioterapia tienen la dificultad inherente de que su efectividad está muy ligada con el tiempo de procesamiento o tiempo de espera. Más específicamente, un tiempo de espera prolongado repercute negativamente en el tratamiento. El tiempo de espera refiere a la ventana temporal entre el diagnóstico de un paciente hasta su primera sesión de radioterapia y está comprobado que cuanto menor sea el periodo de espera, más efectivo es el tratamiento (OMS, 2022).

El tratamiento de radioterapia es un proceso complejo que depende de múltiples recursos. Por un lado, se encuentra el personal médico: radioncólogos, técnicos en radioterapia, psiquiatras, entre otros profesionales de la salud. Por otro lado, es necesaria cierta infraestructura y maquinaria para poder realizar el tratamiento. La combinación de estos dos factores, entre otros, determinan la capacidad del Centro de Salud para cubrir la demanda de los tratamientos. A su vez, con frecuencia los médicos combinan diferentes métodos de tratamiento del cáncer para obtener un mejor resultado en la salud de los pacientes, lo que implica combinar los factores anteriormente mencionados. Dentro de las prácticas más utilizadas, se destacan tres: la quimioterapia, la radioterapia y la cirugía (INC, España, 2019b).

#### **1.4. Descripción del problema**

Al problema de la confección de la agenda de pacientes de radioterapia se le denomina comúnmente como Radiotherapy Scheduling Problem, por sus siglas en inglés (RTSP en adelante). El mismo nace a partir de la necesidad de atender a la mayor cantidad de pacientes, minimizando los recursos y beneficiando su salud y calidad de vida. A su vez, debe contemplarse la secuencia de los tratamientos y las distintas restricciones que suelen resultar incompatibles, para así lograr obtener el mayor rendimiento de la capacidad de los recursos destinados a la radioterapia (Vieira et al., 2020).

Una vez que el oncólogo define el tratamiento a seguir por el paciente, debe ser seguido en estricto rigor. Esto implica que una vez comenzadas las sesiones, es contraproducente interrumpir el tratamiento, sea por una discontinuidad intrínseca al Centro de salud, o una contingencia por parte del paciente. A su vez, la cantidad de radiación a recibir a lo largo de la vida de una persona es limitada. Interrumpir el tratamiento de forma no planificada no es recomendado, pues la efectividad no resulta ser la misma, además de necesitar una extensión en el plazo del tratamiento (tanto en tiempo como entre sesiones) (ACS, 2020).

Asimismo, cuanto más tiempo demore el comienzo del tratamiento, más riesgoso resulta para la salud del paciente. Esta prolongación de los tiempos de espera, es perjudicial para los pacientes tanto directamente como indirectamente, ya que además del estrés y malestar generado por la espera para tratarse, se puede dar un crecimiento de tumor o metástasis en el paciente, degenerando aún más su salud (Conforti et al., 2011).

Los tratamientos se componen, además de las fracciones o sesiones de radioterapia, de citas con diferentes profesionales de la salud, ordenadas por precedencias que deben ser respetadas para asegurar un correcto seguimiento del mismo (Instituto Nacional de Cáncer, 2019a). Por ejemplo, es necesario que periódicamente se visite al oncólogo para analizar el avance del paciente y controlar su evolución. Además, puede suceder que el tratamiento esté combinado con otras formas de combatir el cáncer, como lo son la quimioterapia y cirugías para extirpar tumores malignos. Esto genera una restricción de precedencia, es decir no poder continuar con la próxima cita sin haber hecho la anterior.

Por otro lado, la agenda de pacientes de radioterapia es un problema dinámico e impredecible. Todos los días se diagnostican personas con cáncer en el mundo. El grado de avance del cáncer es lo que determina la clasificación y la función de la radioterapia para ese paciente. Según lo explicado anteriormente, los pacientes pueden clasificarse de tres maneras: graves, urgentes y paliativos. Cada una de las clasificaciones define la urgencia y el tiempo máximo que puede pasar para comenzar el tratamiento antes que empeore la salud del paciente. El momento en que se descubre un problema médico, debe ser tratado y agendar al paciente. En el caso del cáncer, es esencial que se haga lo más rápido posible debido a su letalidad y el dolor que provoca. Cualquier cambio producido a partir de la llegada de un nuevo paciente o de un cambio en una consulta, puede reestructurar la agenda. Es éste dinamismo lo que hace que la planificación de la agenda se realice a corto plazo y reiteradas veces (ACS, 2020).

Adicionalmente, balancear la calidad de vida de los pacientes y maximizar la utilización de capacidad disponible se complejiza con el aumento de los pacientes. Asociar el cronograma de los LINACs con los médicos y técnicos en radioterapia, y los horarios disponibles de los pacientes actualmente se realiza de forma manual, lo cual insume recursos administrativos. Por lo tanto, a medida que la cantidad de pacientes de radioterapia crece, aumenta el tiempo y los recursos insumidos para lograr cumplir con todas las restricciones para que se pueda crear la agenda (Hajipour, 2016).

Respecto a los LINACs, infraestructura, médicos oncológicos y técnicos en radioterapia, son todos estos recursos usualmente limitados en los centros de salud, lo que implica que la asignación de los mismos resulte clave para una agenda óptima. El carácter dinámico de la demanda y de la productividad de estos recursos hace que la idea de que un centro de radioterapia cuente con la capacidad justa para asignar satisfactoriamente a todos los pacientes en tiempo y forma sea muy difícil de convertir en realidad. A su vez, aunque se dispusiera de más LINACs, P. E. Joustra et al. (2012) muestra que no son el cuello de botella en los centros de salud analizados. Asimismo, la disponibilidad de los recursos resulta comprometida dado que distintas especialidades de médicos se combinan para tratar a los pacientes de radioterapia, como anteriormente fue explicado. Por lo tanto, la limitación de capacidad y el problema de aumentarla provoca que los pacientes tengan un mayor tiempo de espera para empezar el tratamiento e interrupciones más largas de lo recomendado.

En Uruguay, Según el Cancer Country Profile 2020 de la World Health Organization (WHO) por sus siglas en inglés se diagnosticaron 15101 casos de cáncer y alrededor de 56% de muertes en 2018. Además según el relevamiento en Uruguay hay 2,6 centros públicos dedicados al Cáncer cada 10000 pacientes. Si bien la mayoría de los indicadores están por encima de la media a nivel

mundial, el porcentaje de muertes sigue siendo alto y los tiempos de espera para iniciar los tratamientos siguen siendo de dos a tres semanas, dependiendo del estado de urgencia del paciente (Barquet, 2017).

Un agravante del problema son las restricciones legales o políticas que inciden en la agenda de pacientes. Estas principalmente se constituyen de cotas máximas para el tiempo de procesamiento de pacientes en el pretratamiento y tratamiento, dependiendo de factores como tipo de cáncer y procedencia del paciente. A modo de ejemplo se plantea el caso de Países Bajos, en donde se requiere que un 80% de los pacientes no urgentes que ingresan a un centro de radioterapia deben comenzar el tratamiento dentro de los 20 días posteriores a la consulta y un 100% dentro de los 30 días (Vieira et al., 2018). Claramente, estas exigencias varían según tipo de paciente y los estándares varían en distintos lugares del mundo. Además, estas restricciones pueden no tener carácter legal, sino de donde no existen dichas normas, los centros de radioterapia usualmente buscan cumplir con pautas recomendadas por organismos internacionales o objetivos de procesamiento que dictan las políticas o los estándares de calidad propias del centro (CCP, 2020).

El RTSP ha demostrado tener una importancia y gran motivación en su estudio ya que ha sido y sigue siendo abordado por la comunidad científica en diversas ocasiones, bajo distintos supuestos y con una amplia variedad de resultados. En este documento, se busca analizar, clasificar y sintetizar dichos estudios en el área de programación matemática, para poder constatar dónde se encuentra la disciplina respecto a este tema y poder intuir futuras direcciones del estudio del problema. Para cumplir con el propósito, se utilizará la modalidad de revisión sistemática de literatura en la búsqueda de modelos matemáticos para Scheduling de tratamientos de Radioterapia.

## **1.5. Alcance**

La Sección 2 explica los criterios de búsqueda, descarte, selección y clasificación que se realizó para llegar a los documentos revisados. Posteriormente en la Sección 3, se detalla la clasificación y lo encontrado en la búsqueda, comparaciones y análisis de los documentos. Por último, en la Sección 4, se presentan las conclusiones generales de esta investigación y los trabajos hallados, comentarios del equipo de trabajo, y sugerencias finales o de estudio futuro.



## **2. Metodología de búsqueda**

En esta Sección se presenta la metodología empleada para la investigación de la literatura académica, la cual se basa en una revisión sistemática. La misma implica localizar estudios existentes sobre la temática en cuestión, seleccionar y evaluar las contribuciones realizadas, analizar y sintetizar los datos obtenidos y reportar lo hallado con el fin de constatar el acervo de conocimiento sobre el tema y las direcciones posibles o necesarias para el estudio futuro (Denyer et al., 2009).

Hasta donde sabemos, el primer documento que siguió la metodología de revisión sistemática fue Barbara Wootton en 1959), relacionado al comportamiento antisocial. Posteriormente, en el ámbito médico, se fundó en 1993 la organización benéfica Cochrane, la cual organiza los resultados sobre investigaciones médicas con el fin de basar las decisiones en evidencia sólida.

El objetivo de realizar una revisión sistemática de la literatura acerca de RTS es intentar que la búsqueda sea repetible y corroborable por los lectores, con el fin de obtener los mismos resultados en cualquier momento que quiera realizarse. A su vez, esta metodología procura brindarle al documento una sólida base científica y transparente, para intentar asegurar la objetividad de la información recabada (Denyer et al., 2009).

### **2.1. Metodología aplicada**

Para aplicar la metodología de revisión sistemática, se siguió el procedimiento que se menciona a continuación, el cual se ampliará posteriormente.

1. Se definen los repositorios de trabajos científicos previo al comienzo de la búsqueda.
2. Se define el marco temporal y las palabras claves a utilizar.
3. Por cada repositorio de trabajos, se establecen áreas de conocimiento para realizar la búsqueda.
4. Por cada repositorio de trabajos, se registra la cantidad de trabajos encontrados, sin aplicar ningún filtro de selección o eliminación.
5. Por cada repositorio de trabajos, se descartan trabajos que no estén relacionados con la temática, leyendo los títulos y resúmenes (abstract) de cada uno de ellos para realizarlo.
6. Por cada repositorio de trabajos, se registra la cantidad de trabajos una vez aplicado el paso 5.
7. Se consolidan los trabajos de los tres repositorios, se agregan trabajos que resultan pertinentes pero no pertenecen a los repositorios y se eliminan los duplicados.
8. Se realiza una lectura profunda de cada uno de los trabajos.
9. Se clasifica cada trabajo, según los criterios de clasificación elegidos.

Antes de comenzar con la búsqueda, se definieron los repositorios de trabajos científicos. Estos son; ScienceDirect, Scopus y Springer.

Los mismos fueron elegidos debido a que son reconocidos por la comunidad científica, cuentan con una volumen significativo de datos, y permiten la búsqueda de artículos académicos filtrando por años de publicación, palabras clave y áreas de conocimiento.

Posteriormente, se estableció el marco temporal de búsqueda desde el año 2010 hasta 2021 inclusive. El motivo principal de la selección de este período es porque, investigando en distintos repositorios de artículos, se constató que existe una gran diferencia entre la cantidad de títulos previos al año 2010 y los posteriores, siendo mayor los artículos publicados sobre RTS a partir de dicho año. Por ejemplo, si se grafica la cantidad de títulos publicados relacionados a “radiotherapy scheduling” hasta el 2010 y se compara con los títulos publicados entre 2010 y 2021, para el buscador PubMed se obtiene lo presentado en la Figura 4.

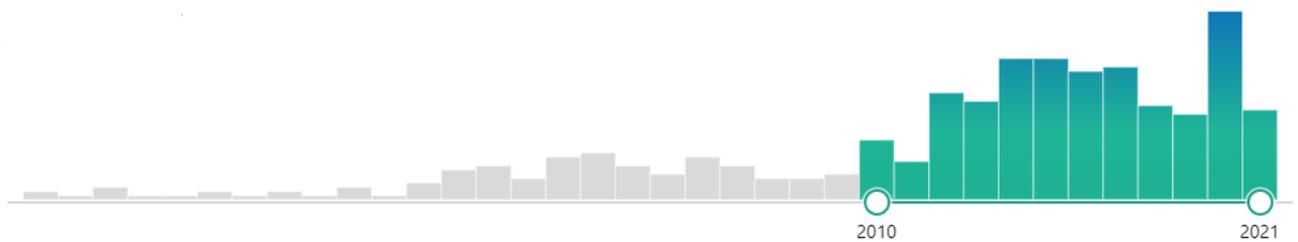


Figura 4 - Gráfico de documentos publicados sobre RTS según el año, *PubMed*.

Se establecen las palabras clave a utilizar en cada repositorio de artículos, y estas son: *Radiotherapy Scheduling, Patient Scheduling, Programming, Optimization, Scheduling, Mathematical Programming, Operations Research*. Luego se procede a definir específicamente por cada repositorio de trabajo, ciertas áreas de búsqueda y combinación de dichas palabras clave. Por último, se decide que se consideran en la búsqueda distintos tipos de documentos: artículos científicos (por lo general papers), capítulos de libros, conferencias, entre otros.

Las siguientes subsecciones del documento presentan cada uno de los repositorios de trabajos científicos con el fin de presentar los criterios de búsqueda particulares de cada uno, junto con los resultados obtenidos.

### 2.1.1. ScienceDirect

Para esta base de datos se realizó una única búsqueda. Los filtros aplicados fueron los siguientes:

- Palabras clave: *radiotherapy, patient scheduling, programming, optimization*.
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: *computer science, decision sciences, engineering*.
- Resultados: 115.

Una vez obtenidos los 115 artículos, se procedió a analizar el Abstract de cada uno y sus palabras clave. En caso de no contar con información sobre la temática Scheduling, RTS o temas médicos relacionados con Scheduling, se procedía a eliminar ese artículo de la búsqueda realizada. A este filtro se le llamó “filtro temático”.

Luego de aplicado este filtro temático, la cantidad de artículos encontrados en ScienceDirect que involucren la temática de estudio fueron 14, sin duplicaciones.

### 2.1.2. Scopus

Para este repositorio de trabajos se realizaron dos búsquedas.

#### Búsqueda 1:

- Palabras clave: *radiotherapy, patient scheduling.*
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: *computer sciences, decision sciences, engineering, mathematics.*
- Lenguaje: Inglés.
- Resultados: 42.

#### Búsqueda 2:

- Palabras clave: *radiotherapy, patient scheduling, operations research.*
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: no se seleccionó ninguna.
- Lenguaje: Inglés.
- Resultados: 6.

Una vez obtenidos los 48 artículos de ambas búsquedas, se procedió a analizar el abstract de cada uno, al igual que lo realizado para el repositorio de trabajos anterior. Siguiendo el mismo criterio de filtro temático, de ambas búsquedas se totalizan 31 trabajos sin duplicaciones.

### 2.1.3. Springer

Para este repositorio de trabajos se realizaron cuatro búsquedas, dos de ellas con las mismas palabras clave pero seleccionando áreas distintas, y lo mismo para las otras dos.

#### Búsqueda 1:

- Palabras clave: *radiotherapy, scheduling, mathematical programming.*
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: ingeniería.
- Resultados: 58.

#### Búsqueda 2:

- Palabras clave: *radiotherapy, scheduling, mathematical programming.*
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: matemáticas.
- Resultados: 34.

#### Búsqueda 3:

- Palabras clave: *radiotherapy, scheduling, optimization.*
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: computer science.

- Resultados: 55.

**Búsqueda 4:**

- Palabras clave: *radiotherapy, scheduling, optimization.*
- Marco temporal: 2010-2021.
- Áreas: ingeniería.
- Resultados: 68.

Una vez obtenidos los 215 artículos de las cuatro búsquedas, se procedió a analizar el Abstract de cada uno y sus palabras clave, al igual que lo realizado para los repositorios de trabajos anteriores. Siguiendo el mismo criterio de filtro temático, de las cuatro búsquedas se totalizan 19 trabajos sin duplicaciones. Se destaca que las áreas no se excluyen mutuamente.

#### **2.1.4. Agregado y consolidación de trabajos**

Al culminar la búsqueda de trabajos acerca de RTS en los repositorios, se procede a incorporar otros trabajos que fueron encontrados mediante la búsqueda concatenada de bibliografía. Esta búsqueda posterior refiere a que dentro de los trabajos encontrados y filtrados de la búsqueda inicial, se buscan trabajos referenciados relevantes a la investigación que no hayan aparecido en la búsqueda principal. Entonces luego de leer el resumen o abstract de los mismos, se incluía en el análisis si se consideraba adecuado. El concepto de esta búsqueda concatenada es llamado en inglés “snowballing” ya que hace referencia al efecto de la bola de nieve que incrementa su tamaño al desarrollarse. Se decidió realizar esta búsqueda sucesiva de trabajos relacionados a los hallados en cada repositorio para enriquecer el universo de búsqueda y de este modo intentar abarcar más trabajos que resulten relevantes para el desarrollo de este documento (Vieira et al., 2016).

Los trabajos hallados mediante la búsqueda concatenada fueron 26 documentos. Por lo cual, una vez consolidados los trabajos de los tres repositorios con los de dicha búsqueda, y descartados los trabajos repetidos, se cuenta con un total de 73 trabajos para clasificar y ordenar en las secciones siguientes.

Entre los tres buscadores se encuentran trabajos repetidos, por lo que se los identificó y eliminó, sin antes analizar las repeticiones. La cantidad de trabajos en total y los repetidos se esquematizan en el diagrama de Venn en la Figura 5, junto con los trabajos hallados en la búsqueda concatenada y la categorización de los mismos, que será explicada en la siguiente sección.

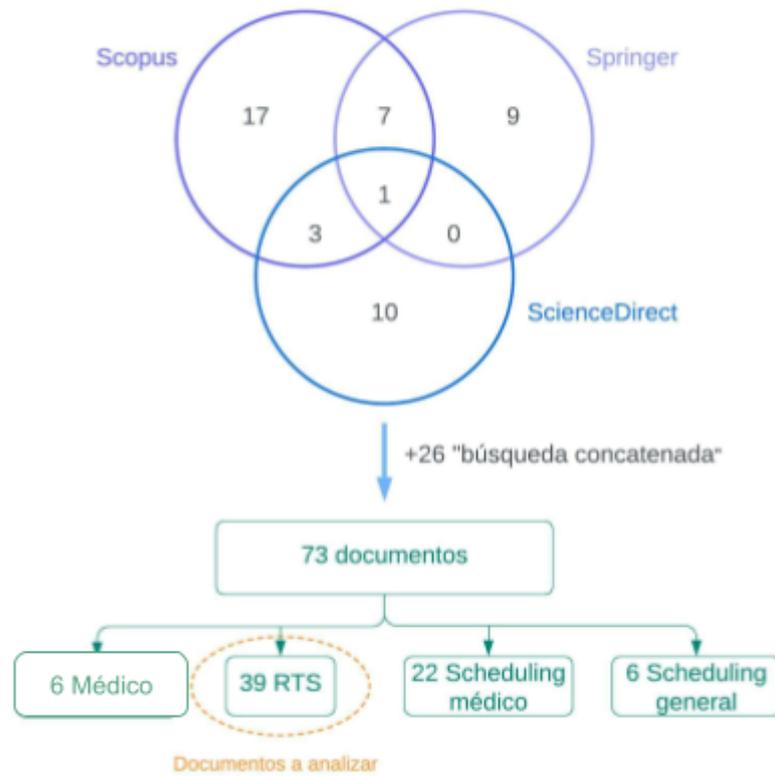


Figura 5 - Diagrama de Venn y trabajos seleccionados.



### 3. Revisión de trabajos

En esta sección se explican las decisiones tomadas para realizar la revisión literaria y los criterios utilizados para la clasificación de los trabajos.

#### 3.1. Clasificación de trabajos

De modo de estructurar la revisión de los trabajos para su presentación, se incurrió en un trabajo exhaustivo de clasificación de los mismos. Fue necesaria la definición de categorías efectivas que vinculen los trabajos entre sí, pero también abarquen de manera transversal todas las áreas de análisis de los documentos. A continuación, en la Figura 6 se presenta mediante un diagrama la estructura de la clasificación, y se procede a definirla.

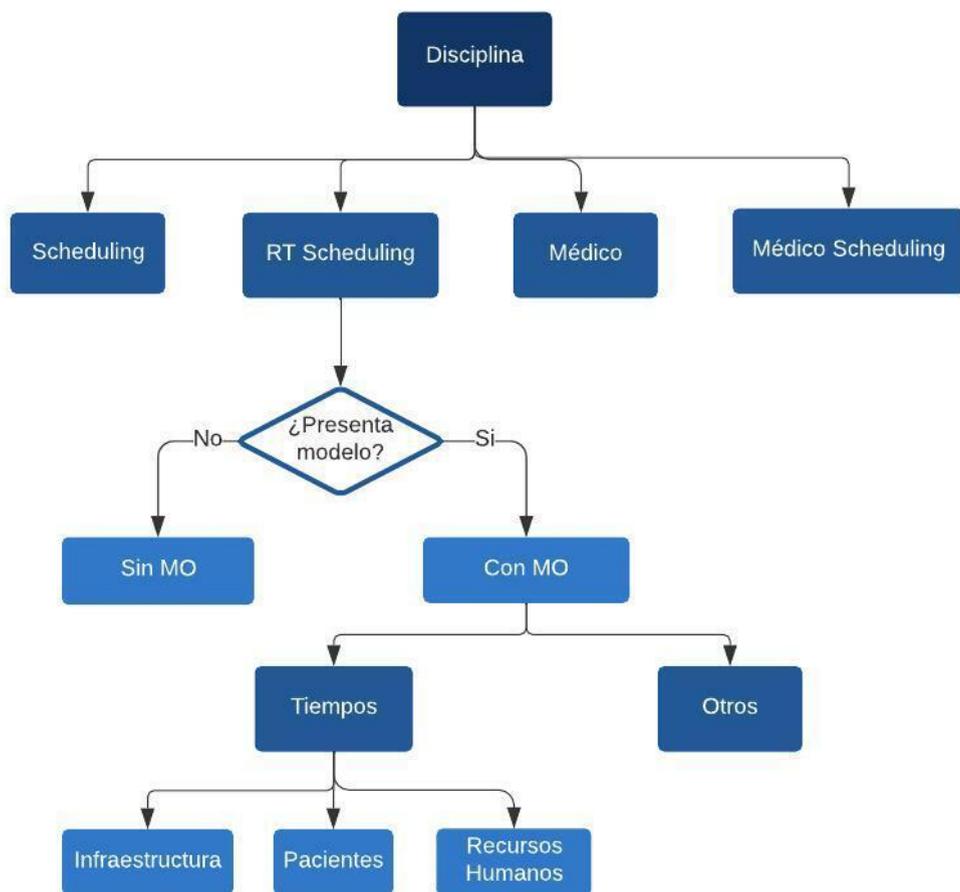


Figura 6 - Clasificación de trabajos.

Como primera clasificación se resolvió tomar la temática “general” de los trabajos, es decir se consideraba scheduling aplicado a radioterapia (RTS), scheduling aplicado al área médica (tanto del área administrativa como de tratamientos distintos a radioterapia), scheduling relacionado a otras cuestiones (es decir, scheduling general) y médicos (en otros términos, acerca de aspectos técnicos de la radioterapia o similares). Se categorizaron 39 trabajos de RTS, 22 de Scheduling médico, 6 Médicos y 6 de Scheduling general.

En adelante, se procedió leyendo, analizando y clasificando los 39 trabajos de RTS, dado que estos son el núcleo de interés y conforman un tamaño de muestra satisfactorio para el propósito del trabajo. Las publicaciones restantes se utilizan de manera de apoyo en el análisis ya que, aunque se aplican a otras disciplinas, los modelos encontrados se adaptan a otras realidades y brindan conceptos y enfoques interesantes sobre scheduling, los cuales ayudan a la consolidación de conceptos e ideas.

Dentro de los trabajos clasificados como RTS se realiza una categorización según si el trabajo cuenta o no con un modelo matemático de optimización explícito. En caso de no contar con un modelo entonces los trabajos son categorizados como “sin modelo de optimización” (MO); ejemplo son las revisiones literarias, documentos de conferencias acerca de RTS, entre otros. Si el documento cuenta con un MO, se lo clasifica en una de las siguientes: Tiempos u Otros.

La categoría Tiempos se subdivide a su vez según los recursos determinantes para definir la planificación del tratamiento, compuestos por: la Infraestructura, los Pacientes, y los recursos humanos (RRHH) del centro de salud. Esta categoría fue elegida dada la importancia de intersectar los tiempos disponibles de los recursos con el paciente y su necesidad.

Por último, la última subdivisión de programación matemática es la categoría Otros, donde se incorporan diversas restricciones o consideraciones varias distintas a las anteriores mencionadas.

### **3.2 Categoría: documentos sin MO. Total: 8 trabajos.**

En esta Sección se analizan aquellos trabajos de la búsqueda que tratan sobre scheduling de radioterapia pero no presentan un modelo explícito. Entre los mismos se encuentran otras revisiones sistemáticas así como definiciones generales y detalladas del problema, métodos de modelado y distintas técnicas utilizadas para la evaluación y resolución de los mismos.

En primer lugar, en el trabajo de Vieira et al. (2016), se encuentra una revisión sistemática de la literatura completa, exacta y bien dimensionada. A lo largo del mismo, se detalla el proceso de búsqueda de 33 trabajos en 6 repositorios y los criterios de clasificación utilizados con amplio nivel de detalle, brindando además conclusiones sobre el estado de la disciplina de scheduling para pacientes de radioterapia hasta el año 2016. Un indicio de la eficacia de la revisión de estos autores es que la búsqueda abarca trabajos seminales, es decir aquellos que han sido troncales en el desarrollo de la materia y son generalmente referenciados por la mayoría de los trabajos posteriores al mismo. Ejemplos de estos pueden ser los trabajos de Petrovic et al., Jaquemin et al., y Conforti et al., quienes frecuentemente aparecen en las bibliografías de los trabajos referenciados en este documento. A su vez, este trabajo es el primero de cuatro trabajos de estos autores que han aparecido en nuestra búsqueda. Todos los trabajos subsecuentes de los autores hasta el año 2021, siendo estos: Vieira et al. (2018), Vieira et al. (2020), Vieira et al. (2021), presentan modelos matemáticos y se basan directa o indirectamente en esta búsqueda y los trabajos referenciados en ella. Esto valida a la revisión sistemática como método sumamente útil para la realización de un estado del arte y como estudio previo a la creación de modelos prácticos y experimentación. Principalmente, en la revisión, los autores distinguen gran progreso hasta el

2016 en el área e identifican posibles direcciones para el estudio así como oportunidades de profundización. Un ejemplo de las mismas es el desarrollo de modelos de programación estocástica que permite agendar pacientes *in situ* en los hospitales de manera inmediata y tomando en cuenta sus preferencias.

Otra conclusión interesante del trabajo es la necesidad de modelos de evaluación de madurez para la implementación de estudios de OR en medicina. Esto se debe a que en la mayoría de los trabajos de su búsqueda, el estudio solo ha llegado hasta la experimentación con datos reales o fases tempranas de implementación habiendo probado resultados prometedores.

En Kapamara et al. (2006), trabajo escrito por autores con larga trayectoria en la disciplina de RTS como Petrovic y Kapamara, se presenta el RTSP y se evalúan distintas formas de modelar el mismo, expresado como distintos problemas de producción industrial de manufacturación. Luego, se llega a la conclusión de cuál es el que más se ajusta a las características del problema. Además, se evalúan distintas heurísticas de resolución una vez definido el problema y se comparan entre ellas. Los autores presentan los principales problemas de scheduling de producción industrial, particularmente de manufacturación. Estos son el Job Shop Problem (JSP) que refiere a la planificación de producción de un número finito  $n$  de trabajos en  $j$  máquinas distintas y teniendo la particularidad de que no todos los trabajos siguen la misma ruta de producción. Luego, se presentan las variaciones del JSP, siendo estas el FSP, OSP y GSP. El FSP o flow scheduling problem se define igual que un JSP pero los trabajos siguen todos una misma ruta. En el Open Shop Problem (OSP), los trabajos no tienen un punto definido de entrada y por último, el Group Shop Problem (GSP) es una generalización del OSP y JSP. Todos los problemas de programación de manufacturación se pueden categorizar entre dinámicos o estáticos y entre deterministas o estocásticos. La primera clasificación refiere a si se tiene el número de trabajos y si los tiempos de procesamiento son conocidos y fijos (estáticos) o si los mismos se pueden ver afectados por perturbaciones. La segunda clasificación refiere a si la información de los trabajos tal como la entrega, duración, y preparación son conocidos (determinista) o si son desconocidos (estocástica). En otras palabras, si se tiene una probabilidad de ocurrencia fija para los parámetros o si los mismos siguen alguna distribución aleatoria respectivamente. Naturalmente, se llega a que el RTSP se puede modelar como un JSP dinámico y estocástico. Es un JSP porque se tiene un número finito de pacientes y máquinas y no todos los pacientes siguen el mismo camino o tratamiento. La justificación para ser dinámico radica en que la realidad está sujeta a muchos factores médicos, administrativos y demográficos cambiantes. Por último, es estocástico ya que la distribución de llegada de pacientes, tipos de cáncer y clasificaciones no siguen patrones determinados sino distribuciones aleatorias. Los autores proceden luego a describir con palabras un modelo genérico de JSP aplicado al RTSP y sus restricciones.

Como fue mencionado anteriormente, los autores presentan también heurísticas para la resolución del JSP. Entre las mismas se encuentran las reglas de despacho, método de Branch and Bound, Tabu Search, GRASP y algoritmos evolutivos, las cuales se explicarán en profundidad más adelante en el trabajo. Es necesario destacar que los problemas de Shop Scheduling son todos NP-Hard, es decir que son problemas con una complejidad computacional significativa y que aunque sea fácil llegar a una solución, es muy complejo llegar a verificar la optimalidad de la misma. Al final del trabajo, se concluye que la mejor metaheurística para aplicar al RTSP es Tabu Search, siendo este un método de búsqueda de vecindad local en el cual se guardan las agendas

generadas en una lista. Luego, mediante una serie de reglas dadas por la lista, se prohíben ciertos cambios y solo se permite aceptar una agenda peor a la actual si se duplica o repite una agenda anterior. El largo  $L$  de la lista es un insumo importante para evaluar el proceso de resolución ya que muestra si la resolución ocupó un gran rango de valores o solo unos pocos. Es fácil ver que este es un trabajo fundamental para la disciplina ya que el mismo se ve referenciado en varios trabajos posteriores al 2014.

Siguiendo con el análisis, en Cropa et al. (2015) se brinda un enfoque distinto para mejorar el tiempo de pretratamiento y consecuentemente la cantidad de pacientes que cursan el tratamiento de RT. Esto se logra no por administrar el tiempo del equipamiento (paso final del pretratamiento) y subsecuentemente retro programar las tomografías y consultas necesarias de el pretratamiento como lo hacen gran cantidad de los trabajos en la literatura, sino a través de el sistema constant work in progress (conWIP). El sistema conWIP consiste en que las restricciones del sistema dictan la cantidad de trabajos en proceso que se pueden tener en un centro de radioterapia, es decir pacientes en pretratamiento. Una vez establecida esa capacidad, solamente cuando un trabajo cumple todo su ciclo o línea, se libera la orden para el siguiente paciente, teniendo la distinción de que no todos los trabajos o líneas son iguales. El sistema se asemeja al funcionamiento de un túnel para el tráfico en el cual un vehículo debe salir para que uno de similares características pueda entrar, evitando así acumulación. Puede compararse también con el sistema KANBAN de tarjetas para ordenar el flujo de trabajo en una planta originado para el funcionamiento del Toyota Production System de los años 40, el cual posteriormente tomó el nombre de manufactura justo a tiempo. Además, es fácil ver que el sistema conWIP seguirá la regla del cuello de botella, es decir que mantendrá al recurso más escaso o de capacidad limitada siempre ocupado y es el mismo el que dicta el throughput o flujo a través de toda la línea de producción.

Los autores encuentran justificación para el uso de conWIP en que la variabilidad entre los tipos de pacientes que procesa un mismo centro, lo cual conlleva a tiempos variables de acelerador lineal, preparación y distribución de fracciones de tratamiento. Esto vuelve a los sistemas tradicionales demasiado difíciles de implementar y presenta una oportunidad para sistemas de optimización industrial.

En su estudio, los autores desarrollan y adaptan un sistema de trabajo continuo al cual llaman RT-Flow. Utilizando simulación discreta, y utilizando datos históricos de la distribución de pacientes, se logró un aumento del 32% en las fracciones suministradas por día en el acelerador lineal. Es curioso resaltar que la demora o tiempo de ciclo del paciente, es decir cuánto tiempo conlleva el pretratamiento no presentó ninguna mejora. Esto se debe a que el sistema toma el tiempo de ciclo de un paciente y utilizándolo maximiza el trabajo de la máquina para administrar la mayor cantidad de tratamientos posibles.

En S. Petrovic et al. (2012), se detallan los pormenores de la heurística de Algoritmo Genético (GA por sus siglas en inglés). Este método busca solucionar el problema de agenda de tratamientos de radioterapia a partir de la evaluación de una población de agendas generadas por un modelo. Las mismas, se evalúan a partir de una función de aptitud y se seleccionan y alteran para consecutivamente generar una mejor población de soluciones hasta su iteración final. El sistema imita la biología molecular pero poniendo las variables de aptitud como las restricciones de una solución, es decir que una agenda debe cumplir con los requisitos mínimos de duración y

características impuestas por el centro de RT. Asimismo, se utiliza una operación de mutación y una de cruzamiento, es decir un cambio a las soluciones seleccionadas para utilizar los buenos rasgos de cada una e impactar los malos para generar una solución o agenda más apta en la siguiente generación. El equipo de investigación llevó a cabo varios experimentos variando distintos parámetros y factores de ponderación a la función de aptitud, utilizando los datos históricos de dos hospitales. Se llegó a mejorar la performance real del hospital en todos los casos y se llegó a conclusiones acerca de la sensibilidad de los factores de ponderación.

Un problema encontrado en la literatura de RTS, es la heterogeneidad de criterios y de situaciones. Esto se debe a que en distintos países, se encuentra distinto procesamiento de pacientes, distintas tecnologías, variabilidad en los horarios de trabajo e incluso en los pacientes y su distribución por tipo de cáncer. Esta situación da lugar a que se creen diversos modelos de optimización según los factores mencionados previamente lo cual alza la pregunta de cómo medir con un mismo criterio estos distintos sistemas creados. Para esto, Cares et al. (2014) desarrollan un generador de punto de referencia o benchmark. La forma de hacer esto es a través de un generador de instancias (pacientes) que sea determinado por las características de cada centro de radioterapia. Entre estas se encuentran las horas de trabajo, la cantidad de tipos de pacientes y de tratamientos ofrecidos, el horizonte de planificación y las restricciones como la cantidad de máquinas de tratamiento y probabilidades de interrupción del tratamiento y de cancelaciones. Con todos estos datos sobre un centro, el generador de instancias GeneRa crea pacientes o casos que unifican criterios y son únicos a la hora de evaluar centros con distintas características y sistemas. Esto nos brinda un punto de referencia, es decir que evalúa distintos métodos de agenda de RT bajo las mismas reglas. Para comprobarlo, los autores presentan ejemplos y muestran la realidad en Reino Unido, Francia, Italia y Chile, presentando los algoritmos más usados, la categorización de pacientes, legislaciones y tecnologías a la vez de los horarios y capacidades promedio. Se prueba en el trabajo que el generador de instancias puede sortear los problemas de la heterogeneidad de situaciones con el fin de evaluar en igualdad de condiciones a todos los centros.

Continuando con las herramientas para el modelado correcto del RTSP, se encuentra Shtilyanova et al. (2011). En el trabajo, los autores presentan distintas herramientas y protocolos de operación para la creación de modelos que aseguren soluciones factibles y óptimas al problema de la agenda de radioterapia para aquellos casos de terapias innovadoras. Un aspecto interesante a destacar, es que a lo largo del trabajo, se deja abierto el tipo de radioterapia, es decir no se especifica ningún tratamiento en particular ni se presenta ningún modelo. Se abordan distintas reglas para el manejo y agrupación de pacientes en distintas clases, y se brindan definiciones de una gran cantidad de conceptos prácticos y útiles para todos los modelos de RTS. Un ejemplo sería la atractividad de una clase, la cual definen como una combinación entre el grupo de prioridad, el tratamiento de esa clase de pacientes y el nivel asociado a la terapia innovadora en cuestión. También brindan la noción de geografía, siendo esta una estructura jerárquica en las cuales se distinguen grupos o clases de elementos. La incidencia de cada una de esas clases es llamada la incidencia de la misma. Es con estos elementos que se forman las herramientas mencionadas para los modelos. También, el trabajo brinda herramientas para la generación de pacientes a la hora de simular el funcionamiento de los centros. Puede decirse que el trabajo se focaliza más en la creación de modelos de reclutamiento, es decir de simulación que utilizan

modelos de scheduling y modelos económicos para la evaluación de las terapias en distintos centros.

En contraposición con el enfoque tradicional. En Billiau et al. (2010), se presenta el RTSP como un problema distribuido de optimización de restricciones dinámicas. Este tipo de problemas suele llamarse DynDCOP por sus siglas en inglés. En primer lugar, se define como distribuido ya que el problema no abarca solo un área o núcleo independiente, sino que para agendar un tratamiento de radioterapia se necesita la colaboración de distintas áreas hospitalarias como enfermería, cirugía, departamentos de imagen corporal y de radioterapia. Los autores identifican que no se puede formular el problema de agenda centrado solamente en un departamento. Luego, se remarca porque el problema es de restricciones dinámicas, siendo la razón primaria que la curación de pacientes, la gravedad o etapa del cáncer, la reacción al tratamiento y la llegada de nuevos pacientes con urgencia alta son factores poco predecibles y que afectan la realidad de un tratamiento constantemente cambiando las restricciones del mismo y por ende las del sistema entero.

Es entonces que se propone el algoritmo Support Based Distributed Optimization (SBDO). El mismo, fue creado para resolver problemas DynDCOP y es un solver completo que busca optimizar sistemas distribuidos mediante el cumplimiento con las restricciones del problema que se plantea. Básicamente, un DynDCOP es un conjunto de problemas de optimización de restricciones COP que se relacionan entre sí. Cada COP es propiedad de un agente con poder y conocimiento sobre sus variables, restricciones y parámetros y existen restricciones que relacionan distintos COP entre sí. A su vez, se asume que las variables, restricciones y objetivos de cada COP van a variar, cambiar, acumularse o desaparecer durante el proceso de resolución. Es trabajo del SBDO establecer comunicación entre distintos agentes mediante lo que se conoce como argumentación. La argumentación se constituye mediante una estructura de comunicación entre agentes, en los cuales los mismos justifican su pedido a través de la concatenación de pedidos previos. Un ejemplo sería que el agente A solicita la tarea 1 porque el agente B solicitó la tarea 2 porque el agente C previamente solicitó la tarea 3. De esta manera, cada argumento contiene un orden de concatenación que le brinda fuerza o poder al argumento. Es a través de la supervivencia del argumento más fuerte que los agentes de un sistema distribuido pueden llegar a una solución, dando a sus variables los valores influenciados por el peso de los argumentos que recibió. El sistema tiene dinamismo en cuanto a que pueden agregarse agentes o cambiar los distintos y se ha probado que es escalable a problemas de gran porte y gran número de agentes. En el trabajo, se presentan las ventajas que el sistema SBDO presenta sobre otros algoritmos para resolver DynCOPs. Se prueba además que el sistema SBDO es efectivo a la hora de capturar la realidad dinámica de hospitales con varios departamentos y de problemas como el RTSP con múltiples restricciones dinámicas.

Otro enfoque para el scheduling encontrado en los trabajos que no presentan modelo es el de aquel que está basado en datos históricos. En Tayeb et al. (2018), se presenta un modelo de predicción de tiempo de servicio, en el cual utilizando datos históricos se logra predecir el tiempo de servicio de cierto tipo de cáncer y tratamiento. Luego, se reestructuran las divisiones del día de trabajo con un sistema non-block, que permite citas de tiempos irregulares en vez de manejarse por bloques fijos. Después, en conjunto con reglas de priorización de pacientes se logra una mejora en el flujo de pacientes por el tratamiento diario brindando además una mejora en el

tiempo de pretratamiento. Los autores de este estudio, que es más reciente que la mayoría de esta categoría, experimentan con los datos de un centro de RT en Canadá y obtienen una mejora de 40 pacientes por día procesados en tratamiento y mejorando el tiempo de servicio o de pretratamiento. El enfoque basado en datos es sin duda un avance significativo para la disciplina ya que el procesamiento de datos prueba ser una de las claves para la buena toma de decisiones operativas. Además, el trabajo presenta técnicas de minería de datos para la exploración de grandes cantidades de datos y evaluar patrones para definir distribuciones.

### **3.3. Categoría: Tiempos. Total: 31 trabajos.**

Se presentará una clasificación de trabajos que tienen como objetivo optimizar los tiempos del proceso de RT. Dentro de la misma, se clasificó en 3 subcategorías: Infraestructura, Pacientes y Recursos Humanos, según el tiempo de qué componente del proceso se quiera analizar.

#### **3.3.1. Subcategoría: Infraestructura. Total: 8 trabajos.**

Con respecto a la clasificación de los documentos, cuando se hace referencia a las restricciones del problema y, específicamente dentro de Tiempos, a la Infraestructura, lo que se quiere transmitir es que dentro de esa clasificación se encuentran todos aquellos documentos cuya temática está enfocada en el conjunto de instalaciones y medios técnicos necesarios para desarrollar el tratamiento de radioterapia. Particularmente, los documentos en cuestión centran los modelos matemáticos planteados en cada uno de ellos en asuntos como la ocupación de los LINACs, la consideración del tiempo de mantenimiento de ellos, la estructuración del tiempo de tratamientos y los pacientes basándose en la disponibilidad de las máquinas, entre otros. Esto puede visualizarse principalmente en las restricciones implementadas en cada modelo matemático, su función objetivo y los resultados obtenidos. Dentro de esta categoría se encuentran 8 documentos, los cuales serán analizados a continuación.

De los 8 documentos clasificados dentro de Infraestructura, Joustra et al. (2012) presenta una perspectiva distinta en su documento, donde define “throughput time” como el tiempo entre la primera consulta y el inicio del tratamiento, y en base a ello analiza el aumento del tiempo de espera para detectar el o cuello de botella del sistema. En este documento, los autores muestran mediante un modelo de simulación que la cantidad reducida de LINACs no es directamente responsable del aumento de los tiempos en el tratamiento de radioterapia, sino que lo es el departamento ambulatorio, contradictorio al común pensar de las personas e investigadores. Como sugerencia para mejorar el flujo de los pacientes de radioterapia al realizar su tratamiento, se propone disminuir el tiempo de las tomografías computadas y bajar las fluctuaciones de capacidad (es decir, la aglomeración de sesiones de radioterapia en cierto horario o día de la semana).

El artículo de Shao et al. (2020) se enfoca en la Braquiterapia, que como fue mencionado, refiere a la inserción de cápsulas que contienen una fuente de radiación dentro del cuerpo del paciente, cercano al tumor o dentro del mismo. Su objetivo es armar un scheduling para los tratamientos de radioterapia de distintos pacientes de manera que se comiencen lo antes posible, considerando que la radiactividad de la fuente decrece con el tiempo. Para ello, durante las etapas previas al comienzo del tratamiento se define la cantidad de dosis de radiactividad que cada paciente

necesita, y se evalúa las sesiones teniendo en cuenta que cuanto más tiempo avanza, menos radiación emite el dispositivo instalado en el cuerpo. Aunque no presenta un modelo matemático, sí presenta una función de deterioro de la radiactividad, y se basa en la metaheurística Crow Search Algorithm (CSA). El CSA es un algoritmo de inteligencia de “enjambre”, el cual simula cómo se comportan los cuervos al momento de almacenar el exceso de comida, y luego recuperarla cuando lo necesitan. En esta teoría, según el Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE) el cuervo es el buscador, el entorno circundante es el espacio de búsqueda y el almacenamiento aleatorio de la ubicación de los alimentos es una solución factible. Al simular el comportamiento inteligente de los cuervos, CSA intenta encontrar soluciones óptimas a varios problemas de optimización.

Dentro de la búsqueda sistemática realizada se encontró otro documento que se enfoca en la radioterapia interna braquiterapia, escrito por los mismos autores que el anterior. En Shao et al. (2021), se considera además del efecto de deterioro de la fuente de radioterapia, el tiempo de configuración y las restricciones de la implementación de la braquiterapia. También proponen un método de resolución mediante generación de columnas con el fin de resolverlo en poco tiempo y obtener una solución de calidad, derivando así en una mejora en la satisfacción de los pacientes y en la calidad de la salud. La diferencia más notoria entre Shao et al. (2020) y Shao et al. (2021) es que, por más que ambos tienen en cuenta un mantenimiento a las cápsulas de braquiterapia por cada tratamiento (es decir, por cada paciente), en el último toma en consideración cuándo fue sustituida la fuente de radioterapia, además de presentar los algoritmos implementados.

En Legrain et al. (2015a) también resuelven el problema utilizando el método de generación de columnas para las sesiones de radioterapia en los LINACs, combinado con algoritmos genéticos. La diferencia principal de este documento respecto a los anteriores, es que el enfoque se da en los pasos previos al tratamiento de radioterapia. El objetivo es evitar cancelaciones reduciendo el tiempo de pretratamiento, es decir poder evitar reservar un espacio en un LINAC para un paciente que luego debe cancelar el tratamiento, así poder abarcar a más pacientes que sí comienzan a tratarse. Los autores logran dicho objetivo poniendo en balance el costo de planificar a cierto paciente con el promedio del costo futuro del plan del LINAC.

Otra característica a destacar en Legrain et al. (2015a) es que el modelo admite agendar fuera de hora en cada LINAC, con el fin de considerar posibles cancelaciones. Sin embargo, la cantidad de espacios permitidos para agendar fuera de hora está controlado. A esta práctica se le llama “overtime” y es utilizada en otros documentos, como en Shao et al. (2021) y Li et al. (2014). En este último, dentro de las distintas suposiciones asumidas para trabajar en el modelo, utilizó el mismo con 2 horas de overtime y luego otra sin permitir overtime.

Continuando en el documento de Li et al. (2014), se divide el tiempo de los LINACs en espacios o bloques de tiempo llamados “slots” de 10 a 15 minutos. Esto no significa que cada sesión de los pacientes dure un solo slot, sino que el modelo propuesto permite asignar a un paciente uno o más slots, según el tratamiento que necesite. No obstante, no considera que la primera sesión inicial del tratamiento requiere de mayor tiempo respecto a las siguientes, sino que reparte ese tiempo extra en el resto de las sesiones. La primera sesión sí es diferenciada en Vieira et al. (2020) y Vogl et al. (2017), que más adelante serán mencionados. Una consideración especial sobre Li et al. (2014) es que, una vez encontrado un horario para un paciente, será el mismo para

todo el tratamiento. A su vez, a medida que se liberan espacios en la agenda (pacientes finalizan su tratamiento), el modelo los asigna mediante la regla FCFS (First Come First Served). Adicionalmente, el modelo creado por el artículo en cuestión genera una agenda de tal forma que asigna al mismo paciente, el mismo LINAC durante todo el tratamiento. Esta consideración se exige porque cada LINAC actúa de forma distinta en cada persona, y se diferencian unos de otros según el tipo de tratamiento que el paciente deba recibir.

En línea con la idea de respetar un mismo horario para un paciente a lo largo de su tratamiento, en Conforti et al. (2011) no solo continúa con esa idea sino que también exige en su modelo que se utilice el mismo LINAC para todo el tratamiento, y considera los tiempos disponibles de los pacientes. Esto último implica que al momento de realizar la agenda, se deben conocer los horarios disponibles o de preferencia de cada paciente. A diferencia de Li et al. (2014), se considera la diferencia de tiempos dedicados en la primera sesión del tratamiento que en las siguientes, por lo que refleja de forma más precisa el tiempo de uso de los LINACs. También divide el tiempo en slots, y a esto lo llama un sistema “block” que es diferente de un sistema “non-block” donde se divide el tiempo de LINAC en intervalos no fijos. Estas consideraciones sumadas a otras más que se expresan en el artículo, tienen como objetivo maximizar la cantidad de pacientes agendados considerando las prioridades de cada uno y su posición en la lista de espera.

Volviendo a mencionar a Vieira et al. (2020), diferenciar la primera sesión del tratamiento respecto a las siguientes no es la única restricción o consideración importante que se menciona relacionado a los LINACs. Mediante un modelo de programación lineal entera (MILP por sus siglas en inglés), busca satisfacer las preferencias de ventanas de tiempo de los pacientes, similar al objetivo de Li et al. (2014). Las ventanas de tiempo son estipuladas por los pacientes al principio del tratamiento, y son períodos de tiempo de cada día de la semana que pueden disponer para realizar sus sesiones de radioterapia. Para esto, al igual que Li et al. (2014) divide el tiempo de las máquinas en slots, pero no especifica que se pueden usar más de un slot para una sesión de tratamiento de determinado paciente. Sin embargo, asigna un mismo LINAC a un paciente durante todo el tratamiento. Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo es que separa el problema en subproblemas según los pacientes que ya comenzaron su tratamiento y los que no, para que la solución se encuentre más cerca de la óptima. Por otra parte, también hace mención a la necesidad del mantenimiento de los LINACs, y como el mismo se realiza dentro de los horarios que usualmente se disponen para la agenda de tratamientos, se debe considerar para re-acomodar la agenda de los pacientes.

Contrario al último punto expuesto sobre el tiempo de mantenimiento de los LINACs en Vieira et al. (2020), en otros documentos ese tiempo de mantenimiento explícitamente se impone fuera del horario disponible, como lo es en el trabajo mencionado en la categoría sin MO, Petrovic et al. (2012). De todas formas, el aspecto principal de este documento no es la asignación del tiempo de mantenimiento, ni que no considera tiempo de overtime, sino que brindan distintos algoritmos utilizando simulación (sobre todo para el arribo de pacientes) que permite asignar de forma óptima a los pacientes según su categoría: urgentes, paliativos o graves.

Por último, en Vogl et al. (2017) se concluye que es mejor llenar los tiempos vacíos en el schedule a que agendar cronológicamente a los pacientes. Utilizando un algoritmo genético, separa en

distintas habitaciones a los pacientes según el tratamiento a recibir, y cuenta con un solo haz de partículas. Por lo tanto, el objetivo es minimizar el tiempo ocioso del haz de partículas, respetando los tiempos de cada una de las etapas de los tratamientos de radioterapia de los pacientes.

### **3.3.2. Subcategoría: Pacientes. Total: 15 trabajos.**

En la siguiente clasificación, se revisan aquellos trabajos que optimizan la capacidad de la agenda teniendo como restricciones los tiempos del paciente, tanto de vida y elección personal como médicos. Cuando un paciente es diagnosticado con cáncer, su vida y tiempos se adaptan a los tratamientos. El objetivo es poder disminuir las ineficiencias de los recursos hospitalarios incidiendo lo menor posible en la agenda del paciente.

En Castro et al. (2012) los autores se enfocan, a diferencia de los otros trabajos de esta categoría, en disminuir el tiempo de espera del pretratamiento de los pacientes. Previo a comenzar con la radioterapia en sus fracciones, los pacientes deben cumplir una serie de pasos, a lo que los autores se refieren como 'operaciones', donde el personal del centro define el tipo de tratamiento del paciente, el moldeado de la carcasa inmovilizadora, la cantidad y frecuencia de las dosis, contorno del tumor, entre varias otras consultas y estudios previos. Este camino utiliza múltiples recursos que son compartidos en los centros u hospitales con otras áreas diferentes a la oncológica. Esto crea el problema de la discontinuidad en la disponibilidad de los recursos. También plantea como desafío la recirculación de un paciente y la concurrencia de recursos. Para ello plantean un problema multiobjetivo donde el objetivo mayor (es decir al que se le da mayor peso en la función objetivo) está en reducir el tiempo de espera para comenzar el tratamiento de cada paciente minimizando los comienzos fuera de fecha, y a su vez que los tiempos estén balanceados según la categoría. Para ello, se basan en los tiempos límites y las buenas prácticas estipuladas por el Joint Council for Clinical Oncology. Entre las ventajas de la forma en que se plantea el modelo está la independencia en el tiempo de planificación por recurso. Generando que los recursos con tiempos más acotados de agenda terminen convirtiéndose en restricción. El modelo de programación matemática consiste en una combinación de dos problemas conocidos : el problema del viajero o mochilero y el job-shop scheduling problem. Como resultado se obtiene que llegar a una solución óptima en un tiempo razonable se torna imposible debido a la complejidad computacional significativa que tiene la resolución de este tipo de problemas. Es por esto que se crean criterios de salida que permiten llegar a una solución factible. Dentro de esos criterios, el que mejor performance dio fue el Waiting list status - Lastest doctor appointment (WLS-LD). El modelo fue probado utilizando datos generados a partir de datos reales de un hospital del Reino Unido. Como futura investigación, plantean tener en cuenta los pacientes que arriben luego y el comportamiento del modelo al tenerlos en cuenta.

En Sauré et al. (2012) se plantea una extensión del problema planteado en un trabajo anterior de los mismos autores (Patrick et al., (2008)) con el agregado de tener varios requerimientos de scheduling y tiempos de preparación al mismo tiempo además de poder agendar a un paciente por fuera de la fecha recomendada. Este último punto implica una asignación al costo de pasarse de fecha por tipo de paciente, queriendo que este disminuya. Tiene como objetivo disminuir los efectos de la espera para la radioterapia, tanto en la vida cotidiana de la persona como a nivel de progresión de la enfermedad. En cuanto al tiempo de paciente, se incluye en los pacientes para

agendar en el momento que el paciente puede realmente comenzar el tratamiento. Es decir, si el paciente necesita estudios previos u otros tratamientos como cirugía o imagenología, se considera que está esperando para empezar el tratamiento desde que termina los pasos previos y no antes. Una particularidad de este enfoque es que es dinámico, es decir crea agendas que utilizan información cambiante y se renuevan al final de cada periodo. Particularmente en el trabajo se toman periodos de un día.

En línea con lo expuesto en Sauré et al. (2012), en Legrain et al. (2015b) se presenta un algoritmo con el fin de resolver el RTSP de manera online. Se combina la optimización estocástica con la optimización online, basándose en un algoritmo estocástico planteado anteriormente pero aplicándolo en instancias reales, permitiendo de esta forma modelar realidades más complejas. Se enfocan en dividir en “slots” de tiempo las citas en el LINAC de 22 minutos, y procuran que cada tratamiento diario se ajuste a eso. Su objetivo principal es determinar el primer día del tratamiento de un paciente en un LINAC y posteriormente el slot en ese día, sin exceder las fechas límite de comienzo del tratamiento. Vale la pena mencionar que su modelo, una vez encontrado el slot en un día, lo mantiene para el resto de los días del tratamiento para aquellos pacientes clasificados como curativos. Sin embargo, para los pacientes paliativos no existe esta regla, por lo cual pueden ser tratados en diferentes momentos. Por lo tanto, el problema consiste en asignar un primer día de tratamiento y un slot en el LINAC para cada paciente. Los resultados fueron exitosos, es decir que si bien un algoritmo offline funciona correctamente cuando se tiene información acerca de todos los pacientes, el algoritmo creado por los autores refleja la incertidumbre relacionada a la llegada de los pacientes y la duración del tratamiento, combinando la optimización estocástica y la optimización en línea.

En Vieira et al. (2021) se adapta el modelo MILP de Vieira et al. (2018) con la colaboración de profesionales de radioterapia y lo aplican a los datos históricos de dos centros de radioterapia en Países Bajos. También puede verse como una continuación especializada del modelo matemático presentado en Vieira et al. (2020) El objetivo es el de maximizar la satisfacción de pacientes en términos de preferencias en ventanas de tiempo elegidas y la minimización de los tiempos muertos del staff. Se cruzaron los resultados de ambos modelos contra datos históricos de los centros y se verificaron las restricciones tanto médicas como del centro y los pacientes. En este caso, se utiliza la capacidad excedente para satisfacer la ventana de tiempo elegida y no priorizar el inicio inmediato del tratamiento. A diferencia de Sauré et al. (2012) este modelo opera offline y el horizonte de tiempo elegido es de una semana.

El autor Juan Pablo Cares presenta en conjunto con otros autores, tres trabajos sobre RTS. En Cares et al. (2013), se presenta un algoritmo de búsqueda local donde distinguen dos tipos de restricciones: las duras y las blandas. A este algoritmo se lo nombró “LS<sup>2</sup>R”. Las restricciones blandas son aquellas que son deseables de cumplir y las duras son las que se deben cumplir. En este caso, algunas de las consideraciones duras a destacar son: el tiempo límite máximo para comenzar el tratamiento, las cantidad de sesiones e interrupciones posibles y que la relación doctor-paciente sea siempre la misma. El algoritmo se basa en iteraciones continuas hasta llegar a un valor que se considera aceptable. Para ello se parte de la base de una agenda factible según el método ASAP (por sus siglas en inglés, “as soon as possible”) y luego se itera eliminando pacientes al azar y reagendandolos de forma ASAP teniendo en cuenta los ya agendados. Para evaluar si la solución es mejor que la anterior se establecen dos criterios llamados “entropía” de la

solución. La primera entropía se hace sobre la distribución de los días de espera ponderados según las categorías y la segunda se establece haciendo lo mismo pero dentro de una misma categoría de pacientes. Minimizando la entropía no solo consiguen llegar a una mejor solución en cuanto a minimizar el tiempo de espera para empezar el tratamiento, sino que se llega a un balance entre las categorías y los pacientes. Si bien la entropía global calculada con los métodos ASAP y JIT (Just In Time) son parecidos a LS<sup>2</sup>R, los autores obtienen como resultado un mejor balance a nivel local por paciente y entre categorías.

Tres años después, el grupo de autores publica Cares et al. (2016). En el trabajo, los autores proponen en un principio un algoritmo de generación de datos GeneRa que permite generar instancias de problemas bajo condiciones controladas y características deseadas para la evaluación de algoritmos de optimización del RTS. Como característica destacada, se adapta a diferentes condiciones, ya sea de los días disponibles para agendar, la ventana de tiempo máximo que tiene un paciente para empezar el tratamiento según el país, la categorización de pacientes, la probabilidad que tiene cada tipo de paciente de usar una máquina de alta o baja energía y los días de interrupciones máximo permitidos. Tiene como objetivos definir parámetros que puedan utilizarse de entrada para evaluar los modelos, sin comprometer la confidencialidad médica y así poder comparar las soluciones con otros modelos desarrollados.

En el mismo año también se publica Riff et al. (2016). En este, se presenta el algoritmo RASON (Radiotherapy Scheduling with on the fly priorities) con el objetivo de minimizar los tiempos de espera promedio de inicio de tratamiento de los pacientes y a su vez aumentar la efectividad del tratamiento. Para ello desarrollan un modelo en dos fases. La primera es un armado de grilla con las citas de los pacientes por día y luego la segunda minimiza la espera de comienzo del tratamiento para los pacientes utilizando LS<sup>2</sup>R. El modelo tiene como particularidad que los pacientes se encuentran priorizados en una lista de espera dinámica según el grado de avance de la enfermedad (urgentes, paliativos y radicales). Estas se agendan de una semana para la siguiente, y aquellos pacientes que comienzan el tratamiento, y por ende salen de la lista de espera, son aquellos con mayor prioridad. Para ello, se establece la lista de espera dinámica, donde el grado de urgencia de un paciente va cambiando a medida que se acerca la fecha límite posible para el comienzo del tratamiento. Por otro lado, se comprueba a través de datos reales del hospital de Radioterapia de Santiago de Chile y datos artificiales generados por el sistema GeneRa mencionado anteriormente, que este algoritmo supera estadísticamente al enfoque los modelos JIT y ASAP para estas consideraciones.

En Chang et al. (2020) se presenta un modelo estocástico y online para minimizar la cantidad de días de tratamiento de un conjunto de pacientes, es decir generando una agenda óptima para que todos los pacientes ingresados lleguen lo antes posible al inicio del tratamiento. La característica de ser estocástico refiere a que el modelo en el cual la probabilidad de arribo de pacientes y las características de los mismos siguen una distribución aleatoria que puede ser analizada pero no determinada. Además, online significa que el modelo se adapta y no requiere la realidad completa ni todos los datos de funcionamiento previo a su utilización, sino que se adapta e incorpora nuevos datos. Se presenta en el trabajo, un modelo offline el cual después se modifica para ser online. En el primero, todos los pacientes se conocen al inicio y es por eso que se debe fijar un horizonte temporal.

A continuación, se presenta el modelo tomado del trabajo y las aclaraciones acerca de variables, conjuntos y supuestos tomados. Para este modelo de scheduling offline, se asume un número finito de días en el horizonte de planificación. Se asume también que todos los requerimientos de tratamiento de los pacientes son conocidos de antemano. Con esto, se pueden tomar las decisiones de planificación y generar una agenda al considerar toda la información de los pacientes.

- Sea  $J$  el conjunto de pacientes, definiendo los conjuntos  $J_s$  y  $J_g$  de pacientes especiales y generales respectivamente.
- Sea  $i \in I$ , que refiere a la máquina  $i$  del conjunto de máquinas  $I$ .
- Sea  $t \in T$ , que refiere al bloque de tiempo  $t$  dentro de los  $T$  bloques disponibles.
- Sea  $S_{js}$  el conjunto de bloques reservados para pacientes especiales.
- Sea  $d \in D$ , que refiere a el día  $d$  dentro del conjunto  $D$  de días pertenecientes al horizonte temporal fijo.
- Sea  $p_j$ , que refiere a la cantidad de sesiones de tratamiento que requiere el paciente.
- Sea  $f_{idt}$ , una variable binaria que vale 1 si la máquina  $i$  está disponible para el bloque de tiempo  $t$  en el día  $l$  y vale cero si está ocupada.
- Sea  $x_{ijdt}$ , variable de decisión binaria que vale 1 si el paciente  $j$  está programado para una sesión en la máquina  $i$  en el bloque de tiempo  $t$  del día  $d$  y que vale 0 si no lo está.

Formulación del modelo offline:

$$\text{Min} \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} l \times x_{ijdt} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} x_{ijdt} \leq 1 \quad \forall i \in I, l \in L, t \in T \quad (2)$$

$$x_{ijdt} \leq f_{idt} \quad \forall i \in I, j \in J, d \in D, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in S_{js}} x_{ijdt} = p_j \quad \forall i \in I, j \in J_s \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{ijdt} = p_j \quad \forall i \in I, j \in J_g \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{d=0}^{D+1} |x_{ijdt} - x_{ij(d-1)t}| = 2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$x_{ijdt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, d \in D, j \in J, t \in T \quad (7)$$

Se busca que la suma de las sesiones al final del horizonte sean las mínimas posibles (1). Al multiplicar cada espacio ocupado de agenda por el número  $d$  de día en el horizonte, el modelo buscará agendar a los pacientes lo antes posible. Las restricciones de (2) fijan que se agende como máximo un paciente por máquina por cada bloque de tiempo. Las restricciones (3) aseguran que no se sobrepase la capacidad de las máquinas. Las restricciones de (4) y de (5) obligan a cumplir todas las sesiones requeridas por cada paciente agendando en los bloques de  $S_{js}$  a los pacientes especiales y a los generales en cualquier lugar disponible. Las restricciones (6) obligan a que un paciente agendado para un turno específico en un día específico pueda tratarse continuamente en esa sesión de tratamiento. Por último, la restricción (7) fija el carácter binario de la variable de decisión.

Posteriormente, en el trabajo se adapta el modelo para lograr hacerlo online, es decir poder aceptar un nuevo paciente sin alterar la agenda de los pacientes preexistentes. Esto se logra con la creación de un conjunto de escenarios posibles y todas las variables y parámetros adquieren un superíndice que indica a qué escenario pertenece. Además, debe agregarse el carácter estocástico de la llegada de pacientes. Ambas cosas complejizan el modelo y requieren un algoritmo de resolución. Al presentar una no linealidad en las restricciones de (6), los autores destacan que previo al paso siguiente debe linealizar.

En el trabajo, se evalúan ambos modelos utilizando el programa Linear Interactive and General Optimizer (LINGO) y luego un algoritmo genético adaptativo. En LINGO, se generan casos y variables con las distribuciones aleatorias para evaluar el modelo. Con la metaheurística de Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) para el modelo online estocástico, se genera una solución o agenda "base" y mediante la evaluación y cambios dados por ciertas funciones de mutación, los cuales aprovechan los buenos rasgos de la solución preexistente (predecesores), se logra evolucionar la solución hasta llegar a una que cumpla con los criterios de salida establecidos. Esta heurística imita el proceso genético de la evolución para adaptarse a cambios y que sobreviva la mejor de las soluciones dentro de una población.

Los autores experimentan con datos reales de un centro de RT en Taiwan y se muestra que AGA logra mejores resultados que LINGO en todos los casos, probando la efectividad del modelo online creado y la efectividad de esa heurística para su evaluación.

Dentro de los diferentes algoritmos de scheduling existen dos clasificaciones macro en cuanto a la forma de agendar en tiempos: non-block scheduling y block scheduling. Este último, comprende la división del tiempo total que existe para agendar en la ventana de tiempo determinada en bloques de tiempo predeterminado. En general comprenden los 5 a 15 minutos que es lo que puede tardar una sesión. En estos casos se agendan a los pacientes ocupando esos bloques según el tiempo que les sea necesario. Por el contrario, non-block scheduling se centra en agendar a los pacientes en turnos. Por ejemplo se divide el día en el turno matutino o vespertino y a los pacientes se le asigna un turno y dentro del turno luego se decide el orden de atención. Conforti et al. (2008) plantea un block scheduling que tiene como objetivo maximizar la cantidad de pacientes que comienzan el tratamiento. Para ello, crea una lista de prioridad a la hora de agendar según la severidad de la enfermedad, esto está previamente definido por el médico y puede cambiar a lo largo del tratamiento. Luego en cada sub lista se agenda de forma FIFO (First In First Out, por sus siglas en inglés). Tiene como particularidad que es posible reagendar a los pacientes ya

agendados solo si esto mejora el rendimiento del objetivo. Por otro lado, contempla las interrupciones del plan con una variable. El resultado de este modelo, luego de probarse con datos reales y generados, es que se logró minimizar el tiempo entre el diagnóstico y el inicio del tratamiento.

Conforti et al. (2010) continúa el modelo de Conforti et al. (2008) con la salvedad que utiliza un modelo non-block con el que consigue una mayor flexibilidad para los pacientes y mayor eficiencia a la hora de encontrar la solución. Llega a un tiempo de aproximadamente 12 minutos, lo que hace factible aplicarlo en la vida real. Además permite reagendar pacientes ya agendados al igual que Conforti et al. (2008) si aumentase la cantidad de pacientes que comienzan el tratamiento, pero también si disminuye la media, entre los pacientes, del tiempo de espera para comenzar el tratamiento.

Frimodig et al. (2019) al igual que Conforti et al. (2010) presenta modelos non-block, el primero de Programación entera IP (Integer Programming) y el segundo de programación con dos restricciones CP (Constraint Programming). Tiene como innovación que considera la incertidumbre de la llegada de pacientes nuevos y “reserva” lugares futuros en la agenda dependiendo del patrón de llegada. Por otro lado tiene en cuenta la duración del tratamiento el día límite de comienzo, la priorización de pacientes según su estado de salud y el patrón de atención que hay en estas categorías. A diferencia de Cares et al. (2013) o Conforti et al. (2010), permite la violación de los tiempos de comenzar el tratamiento pero lo controla en la función objetivo. Su objetivo principal es minimizar el tiempo ponderado por categoría de pacientes de no cumplimiento con la fecha límite para comenzar el tratamiento. Por lógica, aquellos pacientes en categorías más críticas aumentan significativamente en el valor del objetivo. Como objetivo secundario, plantea agendar a la misma persona en aproximadamente horarios parecidos para que pueda continuar con su vida normal. Llega a la conclusión de que CP tiene mejor performance para llegar a una solución factible y es más sensible al aumento de pacientes, por el contrario IP llega antes a una solución óptima y tiene mejor performance a la hora del aumento en los pacientes.

Hajipour (2016) en el modelo RAS extiende el modelo de Conforti et al. (2010) con mayores restricciones. Agrega restricciones de tiempo tanto en llegadas tardes, tiempos inciertos de set up, como en ausencias o cancelaciones. El foco principal se centra en tener un sistema de scheduling donde al igual que en Riff et al. (2016) tiene una lista de espera con prioridades según la urgencia en el tratamiento. La agenda se hace offline, es decir se crea una vez que se tienen todos los pacientes correspondientes a determinado período. Otra particularidad que agrega es que permite reagendar a los pacientes ya sea por faltas, ausencias o algún otro inconveniente, lo que permite dar flexibilidad a la agenda y tener mayor flexibilidad para agendar a los pacientes de tipo urgente.

Por último en la categoría Pacientes, se encuentra Burke et al. (2011), un artículo basado en datos reales de la planificación de tratamientos de radioterapia en Reino Unido. El objetivo principal es *diseñar, implementar y validar* un modelo de agenda, y así administrar el tratamiento de radioterapia. Por lo tanto, se programa cierta cantidad de citas cuya duración se encuentra determinada incluyendo intervalos de tiempo específicos entre ellas para cada paciente. Al tiempo dedicado para las citas de tratamiento se le llama “batches”, concepto similar al de “slots” visto, por ejemplo, en Li et al. (2014) y Legrain et al. (2015b). Se presenta un modelo de ILP, y se realizan ciertas simplificaciones como ser la clasificación de pacientes en tres grandes grupos

según la cantidad de fotones que necesiten y su intensidad (fotones de baja energía, electrones y fotones, fotones de alta energía). A su vez, tanto los tiempos inactivos de los LINACS y los pacientes, y la no asistencia de los pacientes al tratamiento, no son considerados en el modelo. Similar a documentos anteriores, Burke et al. (2011) considera el tiempo de espera de los pacientes siguiendo dos limitantes:

- Cada paciente debe iniciar su tratamiento como mucho 62 días después de ser enviado al oncólogo y a más tardar 31 días a partir de la fecha en que se decide que es necesario comenzar con el tratamiento de radioterapia (a esto se lo denomina “breach date”).
- Las buenas prácticas y los tiempos de espera máximos aceptables, desde el primer día que el paciente es visto por primera vez hasta que efectivamente se da por comenzado el tratamiento, según la categoría en la que se encuentre el paciente.

Teniendo todo esto en consideración, se agrega como objetivo el minimizar los tiempos de espera.

### **3.3.3. Subcategoría: Recursos Humanos. Total: 8 trabajos.**

Continuando con la clasificación de trabajos dentro de la categoría Tiempos, se encuentran aquellos trabajos de RTS, que tienen modelo matemático de programación lineal, y que ponen el foco del estudio en la optimización del tiempo de los Recursos Humanos del centro de radioterapia. Esta clasificación abarca a todos los doctores, cirujanos, técnicos de maquinaria de radiación y de tomografía, nutricionistas, psicólogos y enfermeros que participan activa y frecuentemente en todos los pasos de la RT.

Los recursos humanos son indiscutiblemente una parte fundamental de cualquier centro de cuidado de pacientes, ya que en ellos recae la responsabilidad de organizar, dirigir, comunicar, evaluar y tomar decisiones complejas acerca de todo lo que sucede en relación a los pacientes. Particularmente, en centros de RT, las responsabilidades de estos profesionales altamente capacitados y especializados, se ven aumentadas por lo crítico de la enfermedad del cáncer. A su vez, las habilidades blandas de empatía y comprensión en la comunicación así como contención y buena energía de los RRHH, promueven un ambiente positivo y aportan hacia la recuperación integral del paciente (American Cancer Society, 2020). En este sentido, estos recursos adquieren un valor especial para el hospital y está en los mayores intereses del mismo cuidar el estado anímico y bienestar completo de los mismos.

Debido a que los recursos humanos en centros de radioterapia son aquellos que impulsan el flujo de pacientes llevando a cabo y participando continuamente de todas las etapas del pretratamiento y tratamiento, sumado a las actividades de capacitación, investigación o rotación obligada de muchos de estos, es una tarea muy compleja el manejo y scheduling de la fuerza de trabajo en centros de RT, lo cual da lugar a escasez de personal por momentos (Vieira et al., 2018). Esta es una de las mayores causas de insatisfacción en lo que refiere al malestar de los pacientes de RT (Pignon et al., 2004).

Un aspecto importante que es inherente a los doctores y la calidad vocacional de su trabajo es la capacidad de forzar su capacidad productiva para suplir demandas que superan ampliamente su ritmo normal (Vieira et al., 2018).

Habiendo presentado la conformación de los RRHH y la motivación para un correcto scheduling, se procede a los trabajos que centran su enfoque en la optimización del tiempo de los mismos. En primer lugar, Bikker et al. (2015) presenta la oportunidad de reducir el tiempo de espera de los pacientes, es decir el tiempo entre la prescripción del tratamiento y el inicio del mismo, a través de la alineación de las agendas de los doctores. Se observó en 2 centros de radioterapia de Amsterdam Medicine Centre (AMC) en Países Bajos, que a pesar de tener capacidad suficiente para evitar congestiones en áreas separadas, ocurrían demoras en el tiempo de espera. La causa radica en la mala distribución de turnos para pacientes con distintos tipos de cáncer, de la descoordinación entre citas con precedencia y discordancias entre la capacidad diaria y la demanda diaria. Para esto, los autores proponen un modelo de programación lineal entera (ILP por sus siglas en inglés) que maneja datos estáticos logrando una estructura de agenda semanal óptima que se repite en el tiempo. Luego, mediante simulación, se prueba esa agenda cíclica en condiciones dinámicas, obteniendo una agenda óptima y validada a partir de la conjunción de estas dos técnicas. Los factores estáticos refieren a las habilidades de tratamiento específico de los doctores, su disponibilidad horaria en cada centro, los caminos de tratamiento, número predeterminado de bloques de consultas y días fijos para ciertas partes del tratamiento. A su vez, los factores dinámicos que toma la simulación son la llegada estocástica de pacientes en ambos centros y la cantidad de bloques de tiempo que varían según ausencias, conferencias u otros imprevistos de los doctores.

Una particularidad sobre el modelo ILP creado, es la cualidad de ser multiobjetivo. Por una parte, se busca minimizar el tiempo de espera mínimo de un paciente y por otra parte minimizar la distancia entre la demanda y capacidad diaria. En la función objetivo, se asignan coeficientes de ponderación o peso  $\alpha$  y  $\beta$  a ambos términos de la misma según el objetivo que persigue, y ponderando primero el objetivo de reducir tiempos con un  $\alpha > \beta$ , se obtiene un ajuste final de la solución.

En la sección de simulación, se presentan los resultados para 5 experimentos basados en datos históricos de los centros de AMC, elegidos para probar distintos cambios en el modelo y evaluar su incidencia en el tiempo de espera. Se corre la simulación en las situaciones:

- Situación actual
- Con la agenda óptima hallada por el modelo
- Ampliando la especialidad de los doctores (todos atienden a los tipos de cáncer más comunes)
- Con infinita capacidad de infraestructura (para verificar que esta no es el cuello de botella)
- Otros supuestos sobre restricciones del problema

Se prueba que en los centros de AMC, alinear las agendas de los doctores es más provechoso que ampliar la capacidad de infraestructura, y que todas las variaciones que incluyen las agendas óptimas creadas disminuyen significativamente el tiempo de espera de los pacientes con respecto a la situación original, obteniendo ingresar a tratamiento hasta un 20% más de pacientes previo a la fecha límite estipulada por ley. Sin dudas, el trabajo presenta un enfoque diferente para la resolución del problema y la validación de la solución hallada.

En el trabajo de Viera et al. (2018), se presenta un modelo (MILP) para la asignación de técnicos de RT en un horizonte temporal táctico (mediano), con el fin de maximizar la cantidad de pacientes que completan el pre tratamiento dentro de los márgenes objetivo de tiempo. El modelo se prueba con datos históricos del centro de RT de Netherlands Cancer Institute (NKI). Los márgenes de tiempo de espera (pretratamiento) impuestos por las autoridades sanitarias de Países Bajos, son de 1 día para pacientes agudos, 10 días para pacientes subagudos (con 80% ingresado dentro de los primeros 7 días) y 28 días para pacientes regulares (con 80% ingresado dentro de los primeros 21 días). En la Figura 7 se presenta un diagrama de flujo con los pasos de pretratamiento y tratamiento así como las partes presentes de ambos lados de la terapia. Puede verse fácilmente la importancia de los técnicos de RT (RTT por sus siglas en inglés) como impulsores de varias operaciones claves del tratamiento. Un factor de complicación adicional es la rotación necesaria para asegurar las habilidades claves de los RTT. Asimismo, muchos RTT comparten su tiempo entre trabajo en otros centros o incluso en investigación. Todos estos factores vuelven a la asignación de RTT un subproblema del RTSP y su estudio y resolución no había sido abordado previamente a este trabajo.

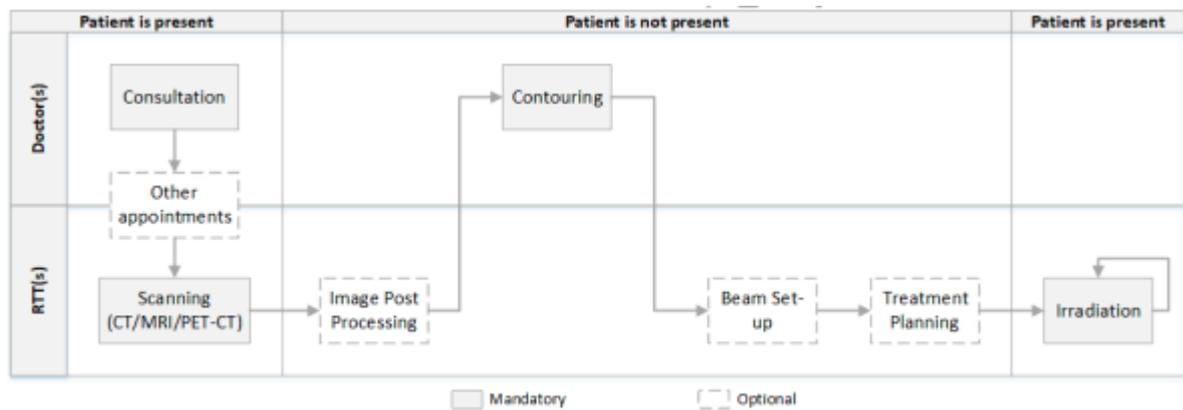


Figura 7 - Diagrama de flujo con pasos de pretratamiento y tratamiento (Viera et al., 2018).

Una particularidad del modelo creado es que contempla pacientes que ya están en el ciclo y la llegada de pacientes en el futuro. Trabajando con datos históricos del centro NKI para un mes en particular, se logró obtener las probabilidades de llegada según tipo de paciente y gravedad. Como método de resolución, se resuelve el modelo tres veces consecutivas, primero maximizando el número de pacientes totales, luego maximizando aquellos que se atienden dentro del primer margen temporal y por último maximizando el número de pacientes que culminan el pretratamiento dentro del margen más restrictivo. En cada uno de estos pasos, se agregan como restricciones los valores objetivo obtenidos en el paso anterior. Esto brinda resultados muy positivos en todos los casos de prueba generados. Se logra aumentar la cantidad de pacientes que culminan el tratamiento dentro del margen principal de 90.0 a 99.1% y para el margen de tiempo secundario de 82.4% a 97.9% comparando siempre con los datos históricos de la práctica en el NKI. A su vez, los resultados de la aplicación del modelo muestran mejoras para todas las gravedades de pacientes.

Es fácil ver que ambos trabajos persiguen el mismo objetivo, maximizar el número de pacientes que atraviesan el pretratamiento dentro de los márgenes de tiempo objetivo. De igual manera, los

mismos enfocan la optimización en distintos recursos humanos. Los técnicos en radioterapia tienen en los centros de radioterapia, una incidencia y participación directa en la mayoría de las tareas que conforman el pretratamiento y el tratamiento de un paciente. Naturalmente esto los hace superiores en número, en comparación con los oncólogos radioterapeutas o radioncología, quienes toman las decisiones acerca de la elección de tratamiento y son quienes llevan la comunicación con el paciente en las consultas y quienes delinear el tumor a partir de los escaneos y tomografías del paciente. Estas distinciones causan que la agenda de los técnicos sea más compleja y abarcativa que la de un radioncólogo por la variación de tareas, lugares y magnitud de la fuerza de trabajo para cada recurso. Tanto es así, que en los trabajos se propone una agenda cambiante y dinámica para los radioterapeutas y una agenda cíclica para los radiooncólogos, apuntando a la coordinación de los mismos y la alineación de sus horarios.

Una característica en común entre los trabajos, es que ambos modelos presentados brindan una agenda a nivel táctico, es decir de mediano o corto plazo y en las operaciones permanentes de la clínica o centro de RT. Por tanto, creemos que ambos modelos y enfoques podrían ser utilizados de manera conjunta para lograr una aún más exitosa planificación de los recursos humanos.

Maschler et al. (2016) está enfocado en la satisfacción de restricciones operacionales del Hospital de Med Austron, Austria. El objetivo está en minimizar los costos por uso 'extra' de los recursos y finalizar los tratamientos lo antes posible. En este caso modelan un problema de Terapia de protones, a diferencia del LINAC tradicional puede servir varias salas de forma consecutiva. La ventaja de este sistema es que el tiempo de preparación del paciente antes la irradiación, disminuye ya que cuando termina el paciente anterior el siguiente fue anteriormente preparado en paralelo en otra sala. Solo se admiten actividades secuenciales para cada tratamiento diario. Al igual que Petrovic et al. (2012) modela cada actividad asociada a los recursos que utiliza y para cada actividad el tiempo de procesamiento. Además, se parecen en que la agenda de los recursos puede ser discontinua ya que se comparten con otras actividades Este trabajo tiene como particularidad que además de enfocarse en la agenda semanal de los tratamientos diarios también se enfoca en el esquema de agenda del mismo día. Maschler et al. (2018) continúa el trabajo de Maschler et al. (2016) con la diferencia de que toman el concepto de DT (Daily treatments por sus siglas en inglés) como un conjunto de actividades secuenciales que deben tratarse de forma conjunta.

Price (2014) toma como referencia el trabajo de Price (2013) que evalúa entre otros: diferentes tiempos según el tipo de tratamiento, la priorización por sala de espera y las llegadas tardes de los pacientes. Tiene como objetivo general maximizar el flujo (throughput) de pacientes en el ciclotron. El ciclotron a diferencia de un LINAC puede atender varias salas secuencialmente (no al mismo tiempo), permitiendo ganar tiempo en lo que es el pre tratamiento y set up. En este centro, llegan gente de fuera de la ciudad que se queda todo el día (internos) y pacientes que vienen a la cita y luego se retiran del centro (externos). En este caso comienza diseñando el layout del centro, teniendo en cuenta que el ciclotron opera a máxima capacidad. Para ello evalúa las posibilidades de dedicar un tomógrafo para cada sala contra la posibilidad de compartirlo y su respectiva performance. Luego evalúa el tiempo de espera de los pacientes y cómo incide las llegadas tardes y las faltas en el schedule tanto para pacientes internos como externos. Llega a la conclusión que en el caso evaluado conviene, en cuanto al aumento del throughput, distribuir a lo largo del día por tipo de paciente (clasificado por cantidad de ángulos a

irradiar). Por otro lado, evalúan que es más conveniente para que se empiece la cita médica en el tiempo establecido considerando las personas que llegan antes y las que llegan pasada la hora y llegan a que agendar en bloque por tipo de tratamiento disminuye el efecto de las llegadas tardes. Por otro lado, agendar por tipo de plan de tratamiento también disminuye el tiempo de espera.

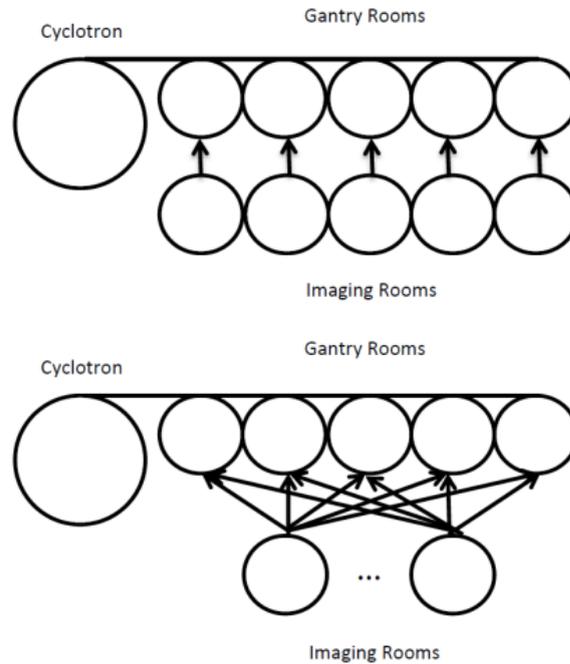


Figura 8 - Posibles configuraciones del ciclotrón e imaging rooms.

La Figura 8 representa el diagrama perteneciente a Price (2014), figura 4.2. Muestra el ciclotrón con 2 posibles configuraciones de layout, una usando un cuarto de imagen para cada sala de tratamiento y otra que muestra dos salones de imagen compartidos para todas las salas de tratamiento.

Li et al. (2020) plantea al igual que Sauré et al. (2012) la priorización de pacientes según el tipo de cáncer ya que usan diferentes tiempos de los LINACS. Para ello plantea la tasa de arribo de pacientes al sistema y la tasa de demora en empezar el tratamiento con respecto a la fecha asignada por el equipo a cada categoría. Penaliza la demora para empezar el tratamiento si se pasa de la fecha estimada. Dado esto, crea un peso asignado a cada paciente tomando en cuenta la categoría en la que se encuentra y el tiempo que lleva esperando para comenzar el tratamiento. Se plantean como objetivo minimizar el máximo tiempo ponderado que se tarda en comenzar el tratamiento.

### 3.4. Categoría: Otros. Total: 3 trabajos.

Como fue expresado anteriormente, en esta categoría se encuentran todos aquellos documentos dentro de programación matemática pero que dadas sus características no pueden clasificarse en la categoría Tiempos.

Dentro de Otros se encuentra Vogl et al. (2019), en el cual los autores presentan un modelo cuyo objetivo es minimizar el tiempo de uso del cuello de botella, el haz de partículas, teniendo en cuenta el cumplimiento o no de las restricciones de los tiempos. El caso de estudio se centra en el haz de partículas, a diferencia de otros trabajos donde el foco se encontraba en los aceleradores lineales. Este haz de partículas es único pero alimenta distintas salas de radiación, por lo cual el propósito es minimizar el tiempo ocioso de este haz ya que puede ser utilizado en solo una sala a la vez. Combinando las metaheurísticas de Algoritmo Genético (GA) y el método de búsqueda local iterado (ILS) y a su vez estudiándolas por separado, es que los autores llegan a la conclusión que en promedio, GA penaliza el no cumplimiento de las restricciones más levemente que ILS y la combinación de ambos, pero utiliza una misma habitación con mayor frecuencia, lo que deriva en un mayor tiempo de inactividad del haz. Por el contrario, ILS tiende a cambiar más veces el haz de partículas.

Juntando estos dos métodos es que se crea una solución que acorta el número de cambios de partículas mientras también se realizan cambios de la misma en las salas, aceptando más cambios que GA solo. A su vez, muestran mediante distintas pruebas que, si el número de pacientes ronda los 34 o menos, las dos metaheurísticas por separado conducen a una excelente solución. Sin embargo, para instancias que superan los 35 pacientes (y hasta 175), la combinación de GA e ILS presenta resultados significativamente mejores que el uso de ambas individualmente.

Siguiendo con otros documentos dentro de la categoría, el trabajo publicado por Yoan et al. (2011) resulta ser una continuación del trabajo realizado el año anterior, solo que desarrollando el concepto de “patrones de tratamientos” con el fin de lograr un modelo más acorde a la realidad de la radioterapia. Utilizando una optimización lineal entera de una programación tipo non-block, el modelo muestra una mejora en la utilización de la sala de tratamiento de radioterapia, un mayor número de pacientes tratados junto con una disminución en los tiempos de espera. Esto permite una mayor flexibilidad en la implementación de los protocolos de los tratamientos y por ende se cumple con el objetivo de adaptarlos a la realidad de la situación. A su vez, este modelo de “patrón de tratamiento” se desempeñó mejor en todos los indicadores de rendimiento clásicos en términos de recursos eficiencia y presentó la posibilidad de tomar en cuenta las disponibilidades de los radioterapeutas sin repercusiones mayores en el rendimiento. Sin embargo, estos beneficios conllevan un alto costo en lo que es el tiempo de ejecución para resolver el problema, aumentando exponencialmente con la cantidad de LINACS y pacientes.

Por último dentro de la categoría de Otros, se encuentra el documento de Bruni et al. (2015), expone un modelo que limita la radiación en el entorno de la zona tratada, con el fin de minimizar los daños causados a los tejidos sanos, y minimizando la dosis diaria y su tamaño. Otro aspecto interesante es que la respuesta a la radiación del tumor y del tejido sano se representa con “LQ model”, el cual contempla la repoblación exponencial de las células no afectadas por el cáncer.



## **4. Conclusiones**

A lo largo de este estado del arte, se presentaron las particularidades del problema de agenda de pacientes para tratamientos de radioterapia y se realizó una investigación académica de la disciplina bajo la modalidad de revisión sistemática de la literatura. Para la misma, se detallaron el procedimiento de realización y los resultados obtenidos. Posteriormente, se procedió a clasificar exhaustivamente los trabajos hallados y se presentó un análisis de los mismos según las categorías creadas.

El RTSP es un problema actual, complejo y tiene la particularidad de dificultarse con el tiempo a raíz del aumento de la demanda, del crecimiento de los sistemas de cuidados oncológicos y el avance de nuevas técnicas y tratamientos para tratar el cáncer. Todas estas razones logran justificar la gran cantidad de estudios realizados en el tema en los últimos 12 años y motivan una fuerte proyección de estudio para el futuro. Es necesario resaltar que la literatura académica sobre el RTSP ha crecido telescópicamente, es decir basándose en ciertos trabajos fundamentales y ramificando el estudio y los enfoques en varias categorías y variantes del problema, resultando en una significativa mayoría de estudios realizados en los últimos 12 años, los cuales se abordan en este documento. Estas ramificaciones se deben a una de las mayores complejidades del RTSP, la cual es involucrar una conjunción de recursos de tipo humano altamente especializados, de infraestructura específica y limitada, de usuarios o pacientes de diversas categorías y de estar inmerso dentro de sistemas médicos de gran porte y compartiendo recursos de apoyo y administrativos con los mismos. En el análisis, se logró categorizar las ramificaciones según en qué parte del RTSP se enfoca, analizando por separado aquellos trabajos que presentan modelos de programación lineal para optimizar un recurso y aquellos que, al igual que este trabajo, buscan sintetizar la bibliografía del tema.

Puede decirse además que la comunidad de autores abocados a la investigación de operaciones y particularmente al RTSP es reducida. Varios de los autores y grupos de autores presentes en la búsqueda, se repiten en varios trabajos de la misma. Estos trabajos pueden ser consecutivos o “incrementales en profundidad” sobre una particularidad del RTSP o que estudiaron el problema desde diferentes enfoques. También, puede apreciarse colaboración entre autores, ya que existen autores que integran varios equipos de autores por separado o que visiblemente continúan la dirección de estudio del trabajo de un colega.

La búsqueda sistemática abarcó tres repositorios de trabajos y luego de seleccionar y descartar trabajos, se obtuvieron 73 trabajos (incluyendo los encontrados en la búsqueda concatenada) para analizar, lo cual es un número satisfactorio y brinda una muestra considerable de la literatura académica del tema. Puede argumentarse que al utilizar Scopus y ScienceDirect, los cuales pertenecen a la misma editorial Elsevier, puede haber disminuido el rango de búsqueda. De igual manera, el conjunto de trabajos en común entre repositorios está balanceado entre los tres repositorios.

Asimismo, puede decirse que la búsqueda abarca los últimos 10 años de un estudio complejo e incremental. Esto quiere decir que los trabajos analizados refieren a la punta más avanzada y masiva de publicaciones, dejando por fuera trabajos seminales o fundamentales de la disciplina. Con el fin de franquear esta dificultad fue que se agregaron a la búsqueda trabajos extra que se

veían comúnmente citados en trabajos posteriores. De esta manera, se logró obtener una visión expandida del estudio del RTSP a lo largo de los años.

Se logró una satisfactoria clasificación de los trabajos relevados a pesar de que el enfoque de un trabajo en particular puede tornarse complejo de discernir. Para esto, el equipo utilizó técnicas más abarcativas de clasificación en las cuales los trabajos pueden aplicar y pertenecer a más de una categoría. Similarmente, se mantuvo la precisión y documentación de todo el proceso de búsqueda para hacerlo repetible. De igual manera, fue necesario utilizar un filtro personal a la hora de filtrar los trabajos lo cual deja lugar para crecimiento en cuanto a la objetividad científica de la búsqueda. Asimismo, este filtro permite la homogeneización temática del conjunto de trabajos que es el núcleo de esta investigación.

En cuanto al estudio del RTSP, se concluye que la dirección más fuerte de estudio observada es aquella que se enfoca en la optimización del tiempo del paciente. Esto presenta un cambio desde el inicio del estudio del RTSP, donde se enfoca principalmente en maximizar el tiempo de uso de los equipos o infraestructura. Esto representa el hallazgo de que la cantidad reducida y capacidad de equipos de radioterapia no son necesariamente el cuello de botella del scheduling de radioterapia. También, puede deberse a que la modernización de los equipos y de los sistemas integrales de gestión de centros de radioterapia los han sacado de esa posición. De igual manera, no se puede despreciar los avances prometedores del estudio en el enfoque de optimización de los recursos humanos de los centros. Estos, por sus características, son reducidos en número y de vital importancia en los tratamientos, y se han logrado mejoras muy grandes al modelar el problema buscando optimizar sus tiempos. Esto muestra un potencial para el estudio futuro del RTSP.

Otro aspecto importante en el estudio del tema es que ha habido un cambio en la forma de modelar y resolver el problema. En los últimos 10 años se puede ver disminuida la literatura sobre métodos de modelado, junto con un incremento de literatura sobre métodos de resolución dinámicos y complejos así como algoritmos de resolución y diversas heurísticas para abordar el problema. Creemos que esta desviación de los modelos exactos y basados en la manufacturación industrial captura mejor la esencia del problema, y aunque no en todos los casos se llegue a la optimalidad, el creciente uso y estudio de las heurísticas y algoritmos de resolución brindan soluciones satisfactorias al problema de manera más rápida.

Considerando todo lo anteriormente expuesto, se concluye que el análisis del RTSP siguiendo la metodología de revisión sistemática de la literatura fue exitoso, puesto que le permitió al equipo sumergirse en el problema y en la información acerca de la temática, a tal punto de poder analizar, clasificar y exponer sobre ella. Adicionalmente, la implementación de dicha metodología empleada para la investigación de la literatura académica proporcionó un conocimiento homogéneo entre los integrantes, debido a que todos lograron conocer y abordar todos los puntos sobre el problema. Sin duda, la incidencia de estos estudios en la planificación de tratamientos que salvan o incrementan en su calidad a la vida de las personas con cáncer transforma al estudio del RTSP en un deber para la comunidad científica-médica y genera gran motivación para este equipo de trabajo.

## Referencias

- ACS: American Cancer Society: How Treatment Is Planned and Scheduled, <https://www.cancer.org/>. 2020. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- P. Barquet: En la ruta del cáncer, *Diario El País*, <https://www.elpais.com.uy/que-pasa/ruta-cancer.html#:~:text=Para%20la%20radioterapia%20la%20lista,pacientes%20del%20interior%20deben%20viajar>. 2017. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- I. A. Bikker, N. Kortbeek, R. M. van-Os, R. J. Boucherie. Reducing access times for radiation treatment by aligning the doctor's schemes. *Operations Research for Health Care* 7, 111-121, 2015.
- G. Billiau, C. F. Chang, A. Ghose, A. Miller. Support-Based Distributed Optimisation: An Approach to Radiotherapy Scheduling. *Electronic Healthcare - Third International Conference, eHealth* 69, 327-334, 2010.
- C. Bruni, F. Conte, F. Papa, C. Sinisgalli. Optimal weekly scheduling in fractionated radiotherapy: effect of an upper bound on the dose fraction size. *Journal of Mathematical Biology* 71, 361-398, 2015.
- E. K. Burke, P. Leite-Rocha, S. Petrovic. An Integer Linear Programming Model for the Radiotherapy Treatment Scheduling Problem. *ArXiv*, 2011.
- J. P. Cares, M. C. Riff, B. Neveu. GeneRa: A problem generator for radiotherapy treatment scheduling problems. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 76, 191-214, 2016.
- J. P. Cares, M. C. Riff, B. Neveu. LS<sup>2</sup>R: A local search algorithm to solve scheduling radiotherapy problems. *13th International Conference on Hybrid Intelligent Systems -Institute of Electrical and Electronics Engineers* 978 (1), 4799-2439, 2013.
- J. P. Cares, M. C. Riff, B. Neveu. GeneRa: A Benchmarks Generator of Radiotherapy Treatment Scheduling Problem. *Learning and Intelligent Optimization 8th International Conference. Lecture Notes in Computer Science* 8426, 353-361, 2014.
- E. Castro, S. Petrovic. Combined mathematical programming and heuristics for a radiotherapy pre-treatment scheduling problem. *Journal of Scheduling* 15, 333-346, 2012.
- W.H. Chang, S. M. Lo, T. L. Chen, J. C. Chen, H. N. Wu. Utilizing Online Stochastic Optimization on Scheduling of Intensity-Modulate Radiotherapy Therapy (IMRT). *Journal of Biomedical Informatics*, 2020.
- D. Conforti, F. Guerriero, Rosita Guido, M. Veltri. An optimal decision-making approach for the management of radiotherapy patients. *OR Spectrum* 33(1), 123-148, 2011.

- D. Conforti ,F. Guerriero ,R. Guido. Optimization models for radiotherapy patient scheduling. *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research* . 6, 263–278, 2008.
- D. Conforti, F. Guerriero , R. Guido. Innovative Applications of O.R: Non-block scheduling with priority for radiotherapy treatments. *European Journal of Operational Research*, 201, 289–296, 2010.
- A. Cortés. Entrevista presencial del equipo de trabajo con él, acerca del Centro de Radioterapia Oncosur, Florida, Uruguay. 2021.
- F. Cropa, T. Lacornerie, X. Mirabel, E. Lartigau. Workflow optimization for robotic stereotactic radiotherapy treatments: Application of Constant Work In Progress workflow. *Operations research for Health Care*, 6, 18-22, 2015.
- D. Denyer, D. Tranfield. Producing a systematic review. *The Sage handbook of organizational research methods*. 671–689, 2009.
- S. Frimodig, C. Schulte. Models for Radiation Therapy Patient Scheduling. *Principles and Practice of Constraint Programming. Proceedings of 25th International Conference, Lecture Notes in Computer Science* 11802, 421-437, 2019.
- F. Hajipour. Robust Radiotherapy Appointment Scheduling: A Thesis in The Department of Mechanical and Industrial Engineering. *Concordia University Montreal*, Quebec, Canada. 2016.
- INC: Instituto Nacional del Cáncer: Radioterapia para tratar el cáncer, <https://www.cancer.gov/espanol>. 2019a. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- INC: Instituto Nacional del Cáncer: Braquiterapia para tratar el cáncer, <https://www.cancer.gov/espanol>. 2019b. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- P.E. Joustra, R. Kolfin, N.M. van-Dijk, C.C.E. Koning, P.J.M. Bakker. Reduce fluctuations in capacity to improve the accessibility of radiotherapy treatment cost-effectively. *Flexible Services and Manufacturing Journal* 24, 448–464, 2012.
- T. Kapamara, K. Sheibani, O.C.L. Haas, C.R. Reeves, D. Petrovic. A review of scheduling problems in radiotherapy. *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Systems Engineering*. 201-207, 2006.
- Learn: What's the Job Description of a Medical Scheduler?, <https://learn.org/>. 2021. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- A. Legrain, M-A. Fortin, N. Lahrichi, L-M. Rousseau, M. Widmer. Stochastic optimization of the scheduling of a radiotherapy center. *Journal of Physics: Conference Series* 616, 2015a.
- A. Legrain, M-A. Fortin, N. Lahrichi, L-M. Rousseau. Online stochastic optimization of radiotherapy patient scheduling. *Health Care Management Science* 18, 110–123 2015b.

S. Li, X. Xie, N. Geng. A Queuing Approach for Radiotherapy Treatment Capacity planning. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 540-545, 2014.

S. Li, G. Koole, X. Xie. An adaptive priority policy for radiotherapy scheduling. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 32, 154–180, 2020.

D. Llorente: Tempus Fugit. A vueltas con las interrupciones en radioterapia, <https://desayunoconfotones.org/>. 2014. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

Manilas Doctors Hospital: Linear Accelerator (LINAC), <https://www.maniladoctors.com.ph/>. 2018. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

J. Maschler, M. Riedler, M. Stock, G. R. Raidl. Particle Therapy Patient Scheduling: First Heuristic Approaches. *Proceedings of the 11th International Conference on Practice and Theory of Auto-mated Timetabling*, 223-244, 2016.

J. Maschler, G. R. Raidl. Particle therapy patient scheduling with limited starting time variations of daily treatments. *International Transactions in Operational Research* 27(1), 458-479, 2018.

Mediline Plus, Biblioteca Nacional de Medicina: Radioterapia, <https://medlineplus.gov/spanish/>. 2020. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

Necolex: Acelerador Lineal, <http://www.necolex.com/>. 2019. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

NCI: National Cancer Institute. What is Cancer?, página web: <https://www.cancer.gov/about-cancer/understanding/what-is-cancer>. 2021. Último acceso: 8 de Marzo de 2022.

OMS: Organización Mundial de la Salud: Cancer Country Profile 2020, [https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_docman&view=download&category\\_slug=4-cancer-country-profiles-2020&alias=51561-global-cancer-profile-2020&Itemid=270&lang=es](https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=4-cancer-country-profiles-2020&alias=51561-global-cancer-profile-2020&Itemid=270&lang=es). 2020. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

OMS: Organización Mundial de la Salud: Promoting Cancer Early Diagnosis, <https://www.who.int/activities/promoting-cancer-early-diagnosis>. 2022. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

OPS: Organización Panamericana de la Salud: Yo soy y voy a, <https://www.paho.org/es/campanas/dia-mundial-contra-cancer-2021-yo-soy-voy>. 2021. Último acceso: 11 de febrero de 2022.

J. Patrick, M. Puterman, M. Queyranne. Dynamic multi-priority patient scheduling for a diagnostic resource. *Operational Research* 56 (6), 1507–1525, 2008.

D. Petrovic, M. Morshed, S. Petrovic. Multi-objective genetic algorithms for scheduling of radiotherapy treatments for categorised cancer patients. *Expert Systems with Applications* 38(6), 6994–7002, 2011.

- S. Petrovic, E. Castro. A genetic algorithm for radiotherapy pre-treatment scheduling. *Applications of evolutionary computation 2*, Lecture Notes in Computer Science 6625, 454-463, 2012.
- T. Pignon, L. Fernandez, S. Ayasso, M.A. Durand, D. Badinand, D. Cowen. Impact of radiation oncology practice on pain: A cross-sectional survey. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 60 (4), 1204–1210, 2004.
- S. Price. Scheduling guidelines for a multi-room proton therapy treatment center. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2014.
- S. Price, B. Golden, E. Wasil, H. Zhang. Optimizing Throughput of a Multi-Room Proton Therapy Treatment Center via Simulation. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 2013.
- RIR: Radiology Information Resource: Linear Accelerator, <https://www.radiologyinfo.org/en>. 2021. Último acceso: 11 de febrero de 2022.
- M. C. Riff, J. P. Cares, B. Neveu. RASON: A new approach to the scheduling radiotherapy problem that considers the current waiting times. *Expert Systems With Applications* 64, 287–295, 2016.
- A. Sauré, J. Patrick, S. Tyldesley, M. L. Puterman. Dynamic multi-appointment patient scheduling for radiation therapy. *European Journal of Operational Research* 223(2), 573–584, 2012.
- K. Shao, W. Fan, Z. Yang, S. Yang, P. M. Pardalos. Patient scheduling with deteriorating treatment duration and maintenance activity. *Soft Computing* 24, 17649–17668, 2020.
- K. Shao, W. Fan, Z. Yang, S. Yang, P. M. Pardalos. A column generation approach for patient scheduling with setup time and deteriorating treatment duration. *Operational Research*. 2021.
- A. Shtiliyanova, F. Feschet, P. Pommier. Tool for the evaluation of innovative therapies: multi-agent based system. *Proceedings of 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications* 1, 148-154, 2011.
- D. B. Tayeb, N. Lahrichi, L. M. Rousseau. Patient scheduling based on a service-time prediction model: a data-driven study for a radiotherapy center. *Health Care Management Science* 22, 768–782. 2018.
- B. Vieira, E. W. Hans, C. van-Vliet-Vroegindeweij, J van-de-Kamer, W. van-Harten. Operations research for resource planning and use in radiotherapy: a literature review. *BMC Medical Informatics and Decision Making* 16, 149, 2016.
- B. Vieira, D. Demirtas, J. B. van-de-Kamer, E. W. Hans, W. van-Harten. A mathematical programming model for optimizing the staff allocation in radiotherapy under uncertain demand. *European Journal of Operational Research* 270(2), 709-722, 2018.

- B. Vieira, D. Demirtas, J. B. van-de-Kamer, E. W. Hans, W. Jongste, W. van-Harten. Radiotherapy treatment scheduling: Implementing operations research into clinical practice. *PLoS ONE*. 16(2), 2021.
- B. Vieira, D. Demirtas, J. B. van-de-Kamer, E. W. Hans, L-M. Rousseau, N. Lahrichi, W. H. van-Harten. Radiotherapy treatment scheduling considering time window preferences. *Health Care Management Science* 23, 520–534. 2020.
- P. Vogl, R. Braune, K. F. Doerner. A multi-encoded genetic algorithm approach to scheduling recurring radiotherapy treatment activities with alternative resources, optional activities, and time window constraints. *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017 16th International Conference* 10671, 373-382, 2017.
- P. Vogl, R. Braune, K. F. Doerner. Scheduling recurring radiotherapy appointments in an ion beam facility. *Journal of Scheduling* 22, 137-154, 2019.
- J. Yoan, M. Eric, P. Pascal. A pattern-based approach of radiotherapy scheduling. *Proceedings of the 18th World Congress - The International Federation of Automatic Control* 44, 6945-6950, 2011.



# **ANEXO 2: Acta de Constitución del Proyecto**



## **00. NOMBRE DEL PROYECTO**

Métodos Cuantitativos aplicados a la Agenda de Pacientes de Tratamientos Médicos

## **01. ÁMBITO DE EJECUCIÓN**

El proyecto se ejecuta en el Centro de Radioterapia Oncosur. Situado en el departamento de Florida, Uruguay. Particularmente se desarrolla en el área administrativa del mismo.

## **02. OBJETIVO DEL PROYECTO**

Investigar sobre métodos cuantitativos aplicados al scheduling de tratamientos de radioterapia y los trabajos realizados por la comunidad hasta el momento.

Sintetizar los conocimientos recabados en un estado del arte del tema

Conocer y relevar la realidad del centro de radioterapia Oncosur para crear un modelo útil para la toma de decisiones en cuanto a la agenda de tratamientos de radioterapia del centro. Presentar una herramienta que tenga el potencial de mejorar la cantidad de pacientes tratados, el tiempo en espera y la calidad de las agendas de tratamiento.

## **03. FINALIDAD DEL PROYECTO**

Con este proyecto, se pondrán en a prueba los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería de producción investigando acerca de una temática compleja y un problema real. También se probará que Oncosur podría mejorar su área operativa al tener una mejor planificación. Esto impactaría directamente en los pacientes, cuyas agendas se adaptaran mejor a sus preferencias y tendrán un menor tiempo de espera.

## **04. DESCRIPCIÓN BREVE**

Realizar una Investigación sobre métodos cuantitativos para la agenda de tratamientos de radioterapia mostrando los resultados de dicha investigación en formato Estado del Arte. Luego desarrollar un modelo matemático para aplicarlo sobre la realidad de ONCOSUR y experimentar sobre el mismo.

## 05. BENEFICIOS ESPERADOS

Como beneficios para los pacientes del Centro, se espera que puedan elegir la ventana horaria que ellos prefieran para tratar la enfermedad y que puedan continuar con sus actividades diarias sin que se vean completamente afectadas por ello. También es esperable una reducción en la espera de comienzo de su tratamiento.

Para ONCOSUR, los beneficios esperados son obtener un estudio profundo de su operación, identificando posibilidades de mejora. Además, se obtiene una potencial herramienta para la toma de decisiones de programación que sea útil y se amolde a su realidad en particular.

Sumados a los beneficios que se espera lograr con el proyecto, el equipo pretende adquirir las habilidades y el conocimiento necesario cómo para poder desarrollar proyectos exitosos en ámbitos laborales y estudiantiles futuros.

## 06. EQUIPO DE TRABAJO DEL PROYECTO

Nombre	e-mail
Chloé Frechou	cfrechou.smc@gmail.com
Juan Andrés Jorba	juan.a.jorba@gmail.com
Agustina Forcella	aforcella@hotmail.com

Fecha de elaboración

23

06

2021

Figura A2.1. Acta de constitución del proyecto. Fuente:elaboración propia.

# **ANEXO 3: Matriz de riesgos del Proyecto**



MATRIZ DE RIESGOS		Índice de Riesgo:		1,49	
Riesgo	Descripción del riesgo	Proceso/ Sector	Prob.	Impacto	Total
No poder conseguir la información necesaria de parte de Oncosur	Que por razones operativas o de políticas de la empresa, no se logre acceso o no exista la información necesaria para realizar pruebas numéricas del modelo	Técnicos	40%	8	3,20
Agravamiento de Pandemia Covid 19	Que la enfermedad o el aumento en los casos de Covid 19 perjudique a cualquiera de las partes interesadas así como a la operativa de Oncosur o exista un deterioro en la comunicación	Factores Externos	30%	6	1,80
Escasez de información académica	Que no se logre recaudar suficientes trabajos o información en los repositorios a disposición	Técnicos	10%	8	0,80
Cambio en el tema	Cambio en el tema u objetivo del proyecto radicalmente	Factores Externos	5%	10	0,50
Falta de herramientas	Que la experimentación numérica no pueda ser realizada por los equipos y solvers a disposición	Factores Externos	20%	5	1,00
Pérdida de información	Perder bajo alguna circunstancia algún archivo del proyecto. Ej: borrar por error algún archivo del drive	Organizacional	20%	5	1,00
Mal relacionamiento	Pelear entre alguno de los integrantes del equipo	Organizacional	2%	7	0,14
Falta de comunicación con Oncosur	No poder comunicarnos a tiempo o de forma fluida con Oncosur en caso de necesitar información o reunión de avances	Gestión del Proyecto	50%	8	4,00
No cumplimiento de las tareas	Que alguna de las actividades asignadas a participantes ya sea tutor, tutorados o empresa no cumpla con su responsabilidad	Gestión del Proyecto	20%	8	1,60
Errores de interpretación	Interpretación incorrecta de lo que la contraparte pretende del proyecto y realizar otra cosa.	Organizacional	15%	8	1,20
Sobrecarga	Que las tareas laborales o estudiantiles de los integrantes interfieran fuertemente con el proyecto	Organizacional	20%	6	1,20

Riesgo	Efecto	Acción preventiva	Disparador	Acción correctora
No poder conseguir la información necesaria de parte de Oncosur	No poder tener un análisis completo	No corresponde	No corresponde	Ampliar el horizonte de búsqueda, utilizar un repositorio pago
Agravamiento de Pandemia Covid 19	Entretimiento, cancelación del proyecto	Cuidados sanitarios personales	No corresponde	No corresponde
Escasez de información académica	Cambio en el cronograma del proyecto	No corresponde	No corresponde	Ampliar el horizonte de búsqueda, utilizar un repositorio pago
Cambio en el tema	Empezar casi de nuevo el proyecto y puede que no se logre terminar a tiempo	No corresponde	las partes interesadas tienen otro objetivo en mente	No corresponde
Falta de herramientas	Imposibilidad de ejecutar experimentos	Conocer más alternativas de solvers	No obtener una solución	No corresponde
Pérdida de información	Hacer de nuevo tarea. Pérdida de tiempo en realizar algo dos veces	respaldos de los archivos.	Error por parte de algún integrante de quien escompartido el archivo	Intentar recuperar el archivo o utilizar versiones anteriores
Mal relacionamiento	Falta de comunicación	Presentar y discutir las desconformidades con respecto a cualquier cosa en caso de que las haya	Desacuerdo temperamental mal gestionado o resuelto	No corresponde
Falta de comunicación con Oncosur	No poder avanzar en el proyecto específicamente	Buscar información que se necesite más adelante y ajustar el cronograma a este incidente	No obtener respuesta a tiempo de algún mail o wpp	No corresponde
No cumplimiento de las tareas	Extensión en el cronograma de proyecto	Estimaciones de tiempo realistas	Fechas no realistas con el tiempo que lleva verdaderamente	No corresponde
Errores de interpretación	Que el proyecto pierda calidad o no llegue a cumplir con el alcance	Buena comunicación con la contraparte. Presentar avances del proyecto a medida que se realiza. Realizar grabaciones de reunión respaldando lo que se discutió y las resoluciones del proyecto.	Falta de registro y comunicación	Reunirse con la contraparte y establecer un nuevo objetivo claro.
Sobrecarga	Incumplimiento de plazos	Organización correcta, distribución de tareas adecuada y plazos coherentes	Acumulación hasta sobrecarga	Replanteo de plazos, redistribución de tareas, abandono de alguna actividad curricular o laboral

Figura A3.1. Matriz de riesgos del proyecto. Fuente: elaboración propia.



# **ANEXO 4: Modelo de partida (Proceso de validación)**



$$\min \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} (\Delta_{it}^- + \Delta_{it}^+) w_i - \sum_{k \in K} \left( \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} a_{stk} - \sum_{t \in T} \sum_{i'' \in PW} \sum_{s \in S} x_{tisk} \right) \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{tik} \leq 1, \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} x_{tik} \leq a_{kst}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (3)$$

$$y_{tik} \geq \sum_{s \in S} x_{tik} - \sum_{s \in S} x_{t'iks}, \quad \forall i \in PD, \forall k \in K, \forall t \in \{2, \dots, nT\}, t' = \max\{1, t - b_i\} \quad (4)$$

$$y_{1ik} \geq \sum_{s \in S} x_{1iks}, \quad \forall i \in PW, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in PW} y_{tik} \leq c, \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{tik} \leq r_i, \quad \forall i \in P \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} x_{tik} - \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{t-1} x_{t'iks} \leq \sum_{s \in S} x_{v^*b_i+t,i,k,s}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall t \geq 2, \forall v \in T, \quad (8)$$

$$\forall v b_i + t \leq \min\{nT, t + b_i(r_i - 1)\}$$

$$\forall n \in \{t + b_i, t + 2b_i, \dots, \min\{nT, t + b_i(r_i - 1)\}\}$$

$$\sum_{s \in S} x_{1iks} \leq \sum_{s \in S} x_{niks}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall v \in T, \quad (9)$$

$$v b_i + 1 \leq \min\{nT, b_i(r_i - 1) + 1\}$$

$$1 - \sum_{s \in S} x_{tik} \geq \sum_{s \in S} x_{niks}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall t \in T: t \leq (nT - b_i), \quad (10)$$

$$\forall n \in T: n \leq t + b_i - 1, b_i \geq 2$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{d_i} x_{tik s} \geq 1, \quad \forall i \in P: d_i \leq nT \quad (11)$$

$$x_{tik s} \leq 1 - \sum_{i \in P} x_{ti'ks}, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in S, \quad (12)$$

$$\forall t \in T, \forall s' \in \{s + 1, \dots, s + p_i - 1\}, p_i \geq 2$$

$$x_{tik s} = 0, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in S: s \leq nS - p_i + 2, \forall t \in T, p_i \geq 2 \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} x_{tik s} = 0, \quad \forall i \in PF, \forall k \in K, \forall s \in S: s < f_{ti}^-, s > f_{ti}^+, \forall t \in T \quad (14)$$

$$t_i^- x_{tik s} - \Delta_{it}^- \leq q(s - 1)x_{tik s} \leq t_i^+ x_{tik s} + \Delta_{it}^+, \quad \forall i \in P, \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (15)$$

$$t_i^- \leq t_i^+, \quad \forall i \in P \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} y_{tik} \geq \sum_{t \in T} y_{t,i+1,k}, \quad \forall i \in P: (nP B + 1) \leq i < nP, k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{t \in T} y_{t,i-1,k} \geq \sum_{t \in T} y_{tik}, \quad \forall i \in P: i = nP, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{tik s} = 0, \quad \forall i \in PB: d > 1, t < d_i - 1 \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{1iks} = 1, \quad \forall i \in PB: d_i = 1 \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{tik s} = 1, \quad \forall i \in PB, t = d_i \quad (21)$$

# **ANEXO 5: Casos de validación**



## Caso 1 - LINAC sin disponibilidad para agendar a todos los pacientes

**Descripción:** en el LINAC no existe disponibilidad suficiente para agendar a los pacientes. Hay un paciente en la lista de espera con fecha límite dentro de la semana.

**Entrada:** se especifica en la Figura A5.1 y la Tabla A5.1.

Conjuntos	
$K$	1
$S$	1, 2, 3, 4, 5
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P$	1
$PD \subset PW$	1

Parámetros			
Paciente $\rightarrow$ Parámetro $\Downarrow$	P1	Generales	
$b$	1	$z$	15
$d$	5	$c$	5
$p$	1	$q$	15
$r$	6	$\alpha$	1
$t_i^-$	0		
$t_i^+$	15		
$w$	1		
$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	NC*		

\*NC: No Corresponde.

Figura A5.1. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 1 de verificación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla A5.1. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 1 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↓	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

**Salida esperada:** no se tiene solución factible ya que no se puede agendar al paciente y cumplir con su fecha límite.

**Salida obtenida:** no hay solución factible.

### Caso 3 - Más de $C$ pacientes comienzan tratamiento en un día

**Descripción:** se tienen más pacientes que la cantidad máxima fijada por ONCOSUR (parámetro  $C$ ) que pueden comenzar su tratamiento por día. Estos pacientes cuentan con la misma fecha límite y el LINAC tiene disponibilidad de atenderlos a ambos.

**Entrada:** se presenta en la Figura A5.2 y la Tabla A5.2.

Conjuntos	
$K$	1
$S$	1, 2, 3, 4, 5
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P$	1, 2
$PB$	1, 2

Parámetros				
Paciente → Parámetro ↴	P1	P2	Generales	
$b$	1	1	$z$	15
$d$	1	1	$c$	1
$p$	1	1	$q$	15
$r$	6	6	$\alpha$	1
$t_i^-$	0	15		
$t_i^+$	0	75		
$w$	1	1		
$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	NC*	NC*		

\*NC: No Corresponde.

Figura A5.2. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 3 de verificación.  
Fuente: elaboración propia.

Tabla A5.2. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 3 de verificación..

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↴	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0

**Salida esperada:** no se tiene solución factible ya que el modelo no permite que más de  $C$  pacientes comiencen su tratamiento en un día.

**Salida obtenida:** no tiene solución factible.

**Caso 5 - Paciente con ventana obligatoria y fecha límite en la semana. LINAC sin disponibilidad en ventana obligatoria.**

**Descripción:** se tiene un paciente con ventana obligatoria asignada y su fecha límite se encuentra en la semana. El LINAC tiene disponibilidad libre excepto durante la ventana obligatoria. También se tiene un segundo paciente no prioritario, con preferencia temporal abierta el cual podría ser agendado en los horarios libres del LINAC.

**Entrada:** se presenta en la Figura A5.3 y la Tabla A5.3.

Conjuntos	
$K$	1
$S$	1, 2, 3, 4, 5
$T$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P$	1, 2
$PD \subset PW$	1, 2
$PF \subset PW$	1

Parámetros				
Paciente → Parámetro ↴	P1	P2	Generales	
$b$	1	1	$z$	15
$d$	4	12	$c$	5
$p$	1	1	$q$	15
$r$	4	5	$\alpha$	1
$t_i^-$	0	0		
$t_i^+$	75	75		
$w$	1	1		
$f_{ti}^-, f_{ti}^+$	*	NC**		

\*\*NC: No Corresponde.

\*Ventana temporal obligatoria P1:

$T$	1	2	3	4	5	6
$f_{inf}$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 2	slot 3	slot 1
$f_{sup}$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 5	slot 5	slot 5

Figura A5.3. Conjuntos y parámetros utilizados en el Caso 5 de verificación.

Fuente: elaboración propia

Tabla A5.3. Parámetro de disponibilidad utilizado en el Caso 5 de verificación.

Parámetro $a_{kst}$						
Día → Slot ↓	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	1	1	0
2	1	0	1	0	1	0
3	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	0	0

**Salida esperada:** no se tiene solución factible ya que no logra agendar al paciente dentro de la ventana obligatoria.

**Salida obtenida:** el resultado obtenido es igual al esperado.



# **ANEXO 6: Imagen de Agenda brindada por ONCOSUR**



VIERNES 24/06/2022							
Vespertino							
Nº	Hora	Nombre	Ficha	Cpo	Téc	Dr	Región
1	13:30	ASSE					
2	13:40	AMSJ	22096	SUSP.	//	A.G.	Mama
3	13:50	AMSJ	22108	4ARC+4	2	M.L.	Cabeza
4	14:00	AMSJ	22174	2	2	D.B.	Columna
	14:10	AMSJ	22134	8	2	A.G.	Pelvis
	14:20	AMSJ	22124	8	2	A.G.	Pelvis
	14:30	AMSJ	22139	8	2	A.G.	Pelvis
	14:40	AMSJ	22118	COVID	//	M.L.	Pelvis
	14:50	AMSJ	22133	2	2	A.G.	Mama
	15:00	AMSJ	20123	2	2	M.L.	Mama
	15:10	COMECA	22132	2ARC+3	2	D.B.	Cuello
	15:20	COMECA	22135	4		A.G.	Mama
	15:30	COMECA	22137	FAUTA	//	A.G.	Mama
	15:40	COMECA	22166	2	2	D.B.	Mama
	15:50	COMECA	22176	6	2	D.B.	Pelvis
	16:00	COMECA	22129	2ARC+1	2	M.L.	Cabeza
	16:10	COMECA	22145	4ARC+2	2	M.L.	Cabeza
	16:20		20305	2	2	D.B.	secundarismo
	16:30			TC			
	16:40			TC			
	16:50	AMSJ	22116	3	2	A.G.	Abdomen
	17:00	AMSJ	22099	TIARTES LUNES	//	D.B.	Abdomen
	17:10	AMSJ	22140	2	2	A.G.	Mama
	17:20	COMECA	22144	1ck	2	M.L.	Mama
	17:30	ASSE	2115	M+1	2	M.L.	columna

Figura A6.1. Formato de agenda diaria brindada por Oncosur.Fuente: ONCOSUR



# **ANEXO 7: Caso Base. Tabla de parámetros de entrada**



Tabla A7.1. Parámetros de entrada para Caso Base.

Paciente	$r$	$d$	$b$	$p$	$f_{ti}^-$	$f_{ti}^+$	$t_i^-$	$t_i^+$	$w$
1	14	1	1	2			0	0	100
2	6	1	1	2			10	10	100
3	14	1	1	2			20	20	100
4	24	1	1	2	2	37	30	30	100
5	5	1	1	2	2	37	40	40	100
6	38	1	1	2	2	37	50	50	100
7	2	1	1	2	2	37	60	60	100
8	15	1	1	2			70	70	100
9	24	1	1	2			80	80	100
10	21	1	1	2			90	90	100
11	25	1	1	2			110	110	100
12	16	1	1	2			120	120	100
13	18	1	1	2			130	130	100
14	8	1	1	2			140	140	100
15	18	1	1	2			150	150	100
16	3	1	1	2			160	160	100
17	1	1	1	2			170	170	100
18	7	1	1	2			180	180	100
19	32	1	1	2	38	61	190	190	100
20	12	1	1	2	38	61	200	200	100
21	34	1	1	2	38	61	210	210	100
22	44	1	1	2	38	61	220	220	100
23	18	1	1	2	38	61	230	230	100
24	13	1	1	2			240	240	100
25	23	1	1	2			250	250	100
26	7	1	1	2			260	260	100
27	8	1	1	2			270	270	100
28	30	1	1	2			280	280	100
29	21	1	1	2			290	290	100

30	42	1	1	2			300	300	100
31	9	1	1	2			310	310	100
32	35	1	1	2			320	320	100
33	18	1	1	2			330	330	100
35	7	1	1	2	62	85	340	340	100
36	2	1	1	2			350	350	100
37	22	1	1	2			360	360	100
38	22	1	1	2	62	85	370	370	100
39	37	1	1	2	62	85	380	380	100
40	34	1	1	2	62	85	390	390	100
41	36	1	1	2	62	85	400	400	100
42	5	1	1	2	62	85	410	410	100
43	24	1	1	2	62	85	420	420	100
44	26	1	1	2			430	430	100
45	9	1	1	2	86	121	440	440	100
46	15	1	1	2	86	121	450	450	100
47	6	1	1	2	86	121	460	460	100
48	31	1	1	2	86	121	470	470	100
49	1	1	1	2			480	480	100
50	9	1	1	2			490	490	100
51	9	1	1	2	86	121	530	530	100
52	8	1	1	2	86	121	540	540	100
53	6	1	1	2			550	550	100
54	24	1	1	2			560	560	100
55	14	1	1	2			570	570	100
56	32	1	1	2			580	580	100
57	42	1	1	2			590	590	100
58	14	1	1	2			600	600	100
59	31	4	1	2	86	121	425	600	1
60	41	4	1	2	86	121	425	600	1
61	33	2	1	2	86	121	425	600	1
62	25	2	1	2			0	60	1
63	16	2	1	2	86	121	425	600	1
64	21	6	1	2			60	120	1
65	36	7	1	2			125	245	1

66	22	8	1	2			250	370	1
67	12	9	1	2			0	120	1
68	13	10	1	2			120	245	1
69	18	9	1	2	38	61	185	300	1
70	33	8	1	2	38	61	185	300	1
71	20	7	1	2			470	600	1
72	32	6	1	2	86	121	425	600	1
73	16	7	1	2	86	121	425	600	1
74	33	8	1	2	86	121	425	600	1
75	3	9	1	2			345	470	1

\* Nota: los parámetros  $f_{ti}^-$  y  $f_{ti}^+$  dependen del paciente en el conjunto  $PF$  y del día. Dado que todos los pacientes que pertenecen a dicho conjunto lo hacen por trasladarse al Centro en transporte contratado, los parámetros no varían según el día, ya que el transporte mantiene un mismo horario diario.



# **ANEXO 8: Concepto de MILP**



Se procede a definir qué son los modelos matemáticos, específicamente los modelos de programación lineal entera (MILP), y dar a conocer sus componentes clave.

Un modelo matemático busca representar la realidad de manera más simplificada, utilizando ecuaciones y funciones matemáticas. Generalmente esta realidad es compleja, por lo cual el modelo busca sintetizar realizando suposiciones y abstracciones. El objetivo de crear un modelo matemático es intentar resolver una situación encontrando, dentro de las soluciones posibles, la que mejor se ajuste a la realidad.

Un modelo de programación matemática incluye:

- Variables de decisión: son cantidades en las que se puede influir, se puede determinar su valor dado que están bajo el control de la persona que toma decisiones.
- Parámetros: son valores que surgen del análisis de la realidad y no están bajo el control de quien toma las decisiones.
- Función objetivo: es la expresión que se busca optimizar, y relaciona las variables de decisión con ciertos parámetros. Esta función puede ser de maximización o minimización. Al resultado de esta función se lo llama Valor Objetivo.
- Restricciones: son expresiones que vinculan las variables y los parámetros que representan las condiciones que debe cumplir la solución que se busca.

Definidos estos conceptos, se remarca que el objetivo de crear un modelo matemático es encontrar, dentro del conjunto de las soluciones factibles, una solución óptima que minimice o maximice la función objetivo.

Los modelos de programación lineal son aquellos que contienen variables de decisión continuas y sus restricciones son lineales. Por otro lado, los modelos de programación lineal entera se resuelven con variables discretas (con valores enteros) y/o variables binarias (representan decisiones “sí o no”), sujetas a restricciones lineales (IBM, 2017).



# **ANEXO 9: Caso Base. Agenda por Slot-Día**



Slot	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Slot	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Slot	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Slot	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie
1	1	1	1	1	1	31	15	15	15	15	15	61	30	30	30	30	30	91	46	46	46	46	45
2	1	1	1	1	1	32	15	15	15	15	15	62	30	30	30	30	30	92	46	46	46	47	46
3	2	2	2	2	2	33	16	16	16	65	68	63	31	31	31	31	31	93	47	47	47	47	46
4	2	2	2	2	2	34	16	16	16	65	68	64	31	31	31	31	31	94	47	47	47	48	47
5	3	3	3	3	3	35	17	65	65	68	65	65	32	32	32	32	32	95	48	48	48	48	47
6	3	3	3	3	3	36	17	65	65	68	65	66	32	32	32	32	32	96	48	48	48	63	48
7	4	4	4	4	4	37	18	18	18	18	18	67	33	33	33	33	33	97	49	63	63	63	48
8	4	4	4	4	4	38	18	18	18	18	18	68	33	33	33	33	33	98	49	63	63	60	50
9	5	5	5	5	5	39	19	19	19	19	19	69	35	35	35	35	35	99	50	50	50	60	50
10	5	5	5	5	5	40	19	19	19	19	19	70	35	35	35	35	35	100	50	50	50	50	60
11	6	6	6	6	6	41	20	20	20	20	20	71	36	36				101				50	60
12	6	6	6	6	6	42	20	20	20	20	20	72	36	36		37	37	102	61	60	60	61	61
13	7	7	62	62	62	43	21	21	21	21	21	73	37	37	37	37	37	103	61	60	60	61	61
14	7	7	62	62	62	44	21	21	21	21	21	74	37	37	37	38	38	104	63	61	61	59	63
15	8	8	8	8	8	45	22	22	22	22	22	75	38	38	38	38	38	105	63	61	61	59	63
16	8	8	8	8	8	46	22	22	22	22	22	76	38	38	38	39	39	106	51	51	51	51	51
17	9	9	9	9	9	47	23	23	23	23	23	77	39	39	39	39	39	107	51	51	51	51	51
18	9	9	9	9	9	48	23	23	23	23	23	78	39	39	39	40	40	108	52	52	52	52	52
19	10	10	10	10	10	49	24	24	24	24	24	79	40	40	40	40	40	109	52	52	52	52	52
20	10	10	10	10	10	50	24	24	24	24	24	80	40	40	40	41	41	110	53	53	53	53	53
21		62	67	67	67	51	25	25	25	25	25	81	41	41	41	41	41	111	53	53	53	53	53
22		62	67	67	67	52	25	25	25	25	25	82	41	41	41	42	42	112	54	54	54	54	54
23	11	11	11	11	11	53	26	26	26	26	26	83	42	42	42	42	42	113	54	54	54	54	54
24	11	11	11	11	11	54	26	26	26	26	26	84	42	42	42	43	43	114	55	55	55	55	55
25	12	12	12	12	12	55	27	27	27	27	27	85	43	43	43	43	43	115	55	55	55	55	55
26	12	12	12	12	12	56	27	27	27	27	27	86	43	43	43	44	59	116	56	56	56	56	56
27	13	13	13	13	13	57	28	28	28	28	28	87	44	44	44	44	59	117	56	56	56	56	56
28	13	13	13	13	13	58	28	28	28	28	28	88	44	44	44	45	44	118	57	57	57	57	57
29	14	14	14	14	14	59	29	29	29	29	29	89	45	45	45	45	44	119	57	57	57	57	57
30	14	14	14	14	14	60	29	29	29	29	29	90	45	45	45	46	45	120	58	58	58	58	58
																		121	58	58	58	58	58

Figura A9.1. Agenda Slot-Día resultante del Caso Base Fuente:elaboración propia.