

DINÁMICA
Modelo para definir la capacidad instalada de la Universidad de los Andes

Proyecto de Grado
presentado al
Departamento de Ingeniería Industrial

Por:
Juliana Gómez Sarmiento
Antonio Elias Ochoa Parra
Asesor: Andrés Medaglia González

Para optar por el título de:
Magister en Inteligencia Analítica para la Toma de Decisiones

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Noviembre 2016

PREGUNTA DE NEGOCIO

La Universidad de los Andes es una organización con 35 unidades académicas disciplinares agrupadas en 10 facultades y 2 centros de investigación. Estas unidades académicas ofrecen 39 programas de pregrado, 61 de maestría y 15 de doctorado a una población de 14,600, 3,900 y 450 estudiantes, respectivamente. Para ello cuentan con 705 profesores de planta, 940 de cátedra, 790 asistentes graduados y 1,480 personas de apoyo permanente en un campus de 176,800 mts².

En esta organización parte de las decisiones de mayor impacto están relacionadas con su tamaño, entendido principalmente como el número de estudiantes, el número de profesores de planta y los espacios físicos de operación. Un tamaño adecuado es vital para asegurar que la Universidad cumpla con sus fines misionales y con las metas de su plan estratégico. El tamaño define la mayor parte de los ingresos, egresos y gastos de la Universidad¹, así como el alcance de su docencia, de su investigación y de sus labores de extensión. Sin embargo, la Universidad no ha definido una meta de crecimiento que le permita de manera ordenada y sistemática tomar las decisiones que afectan su tamaño y tampoco ha estimado su capacidad instalada, es decir, el máximo número de estudiantes que podría atender de acuerdo con sus recursos y modelo de operación.

En la actualidad la Universidad decide sobre la admisión de estudiantes de pregrado con base en una percepción de su capacidad actual, revisando tendencias históricas, en un proceso altamente influenciado por la capacidad de negociación de las unidades académicas que no toma en consideración el número de estudiantes en otros niveles de formación, ni una cuantificación de las capacidades reales de sus profesores y de los espacios físicos disponibles. En el caso de los posgrados, las decisiones se toman de forma independiente en cada unidad académica.

En el caso de los profesores, las directivas de las unidades académicas estiman y gestionan la contratación de profesores de planta con base en su conocimiento sobre las necesidades próximas de docencia e investigación; en relación con la infraestructura, las decisiones responden a las características de las demandas de espacios físicos en la historia reciente de la Universidad.

La falta de claridad sobre las metas institucionales de crecimiento, la poca integración de la información relevante y la falta de un análisis de largo plazo hace difícil determinar si las decisiones sobre el tamaño de la Universidad son adecuadas.

Este proyecto busca entregarle a la Universidad una herramienta de apoyo a las decisiones de crecimiento en estudiantes, profesores y planta física, que le ayude a definir su tamaño ideal bajo condiciones académicas de operación acordes con sus objetivos estratégicos de mediano y largo plazo. Lo anterior apoyado en un modelo de optimización que:

- Estime la capacidad instalada de la Universidad bajo múltiples escenarios;
- Realice un análisis de sensibilidad ante cambios en las condiciones de operación; y
- Represente adecuadamente los efectos de la admisión de nuevos estudiantes en el uso de los recursos.

¹ El 83% de los ingresos operacionales de la Universidad proviene de las matriculas de pregrado, maestría y doctorado. Los gastos de personal son el 56% de los gastos operacionales.

USO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el diseño de un modelo con estas características, primero se representó la operación de la Universidad de forma que reflejara la dinámica del negocio de manera funcional para los objetivos del proyecto con base en nuestro conocimiento de la organización. En la Figura 1 se presenta la dinámica definida, que consiste en reconocer un modelo de oferta-demanda. Los clientes corresponden a los estudiantes, que demandan cursos dependiendo de su programa y grado de avance (número de créditos aprobados). La demanda de cada estudiante en cada curso es conocida como Puesto Estudiante. Para atender el total de Puestos Estudiante demandados, las unidades ofrecen los cursos necesarios y suficientes teniendo en cuenta los recursos con los que cuenta. Estos recursos son profesores y salones.



Figura 1 Dinámica Oferta-Demanda Universidad de los Andes

El segundo paso consistió en una serie de entrevistas con expertos al interior de la Universidad, entre ellos el Vicerrector Académico, el Director de Gestión y Desarrollo Académico, la Directora de Admisiones y Registro, el Jefe de Admisiones, el Gerente del Campus y el Director de Planeación. En estas entrevistas se presentó el proyecto con sus objetivos y se indagó por los elementos que deberían considerarse y la interacción entre ellos.

En el tercer paso, construimos el modelo presentado en la Figura 2 a partir del análisis de la información y del conocimiento adicional obtenido a través de las entrevistas. Los cuadros en naranja representan información disponible y conocida. Los cuadros en azul representan variables de decisión. Las flechas representan la existencia de una relación directa entre los dos elementos y su dirección. Los colores debajo de los cuadros indican el nivel de detalle que se tiene en cuenta.

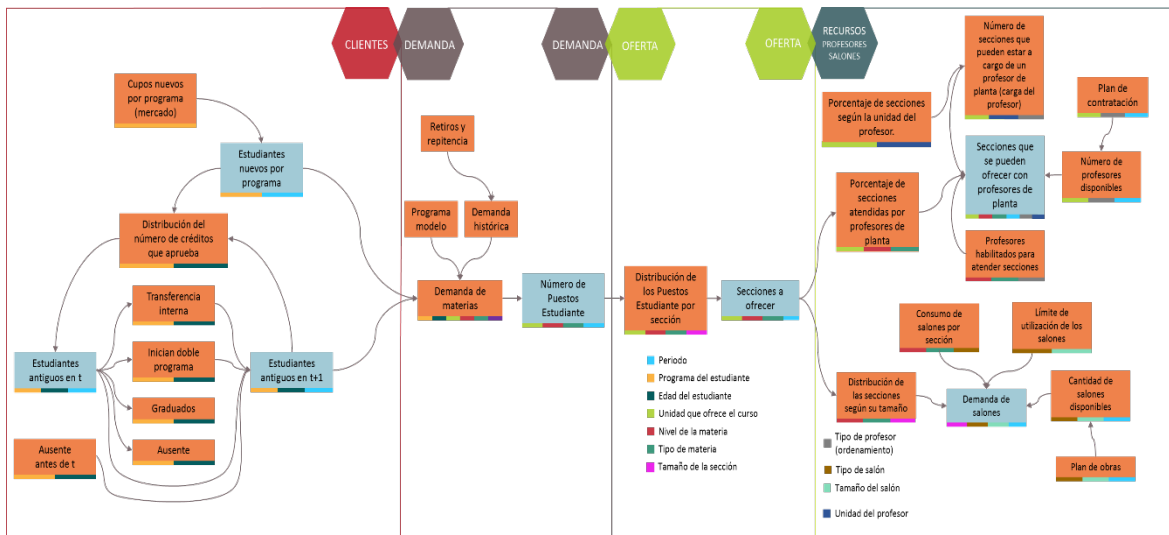


Figura 2 Operación académica Universidad de los Andes

Clientes:

En este elemento se tiene en cuenta una de las variables más importantes: cupos nuevos por programa. Es la variable que determina para cada programa y en cada periodo cuántos estudiantes pueden ingresar. Está acotada por la cantidad máxima y mínima que establece el mercado y la composición de estudiantes nuevos por programa que tradicionalmente ha tenido la Universidad. Por otra parte, están los estudiantes antiguos que ya han cursado algunos semestres y por lo tanto han aprobado algunos créditos. Por lo tanto, están clasificados según el programa, el periodo y el número de créditos categorizados. Para cada programa, la categorización se hace construyendo rangos de créditos (edades) que agrupan los deciles de los estudiantes de los años más recientes. De un semestre al siguiente los estudiantes pueden continuar en el mismo programa, hacer transferencia interna (cambiar de programa), iniciar un doble programa, graduarse, abandonar o ausentarse unos periodos. Un estudiante que abandona no regresa a la Universidad, mientras que un estudiante ausente regresa después de no matricularse entre 1 y 4 periodos consecutivos. La probabilidad con la que ocurren estos eventos depende tanto del programa del estudiante como del rango de edad en el que se encuentre. Los estudiantes que continúan pasan de un rango de edad a otro dependiendo del programa y la edad inicial.

Demanda:

Los estudiantes que no se gradúan, abandonan o se ausentan, demandan materias y por lo tanto generan Puestos Estudiante. Esta demanda depende del programa y el rango de edad del estudiante así como de la unidad que ofrece el curso, el nivel y tipo de materia. El nivel de la materia determina si se trata de una básica, intermedia o avanzada en pregrado o de materias de maestría o doctorado. El tipo de materia está clasificado en la Universidad dependiendo de las características académicas y los recursos necesarios; existen materias teóricas, laboratorios, talleres, prácticas, entre otras. La demanda está influenciada por el programa modelo y por el comportamiento histórico que a su vez involucra la tasa de repitencia, los retiros y las características socio-económicas de algunos estudiantes.

Oferta:

Los Puestos Estudiante demandados por los estudiantes son atendidos por las unidades académicas ofreciendo secciones de cursos según el nivel y tipología de la demanda. El número de secciones depende de su tamaño promedio el cual varía según la unidad, la tipología y el nivel de la materia.

Recursos:

Para ofrecer secciones de curso se necesita principalmente profesores y espacios físicos. Hay una proporción de secciones a cargo de profesores de tiempo completo y dedicación exclusiva (Planta), que según su categoría profesoral pueden atender cursos de cierto nivel y tipología. Dependiendo de la unidad a la que pertenezca, el profesor de planta puede atender en promedio un número máximo de cursos en su unidad y en otras unidades al semestre. El modelo contempla el número de profesores de planta actual y el plan de contrataciones conocido en periodos posteriores para cada unidad académica. Los espacios físicos utilizados y la intensidad de su uso varía según la unidad, nivel, tipología y tamaño promedio de la sección. Secciones con características similares pueden variar en tamaño, tipos de espacio físicos utilizados y horas de utilización de los mismos. De esta manera se reconocen espacios diferenciados como aulas de clase, laboratorios, talleres, salas de

computadores y auditorios con diferentes capacidades y límites de horas semanales de uso. Similar a lo que ocurre con los profesores de planta, en el modelo se consideran los espacios físicos actuales y los cambios futuros previstos en el plan de obras de la Universidad.

METODOLOGÍA

La dinámica detallada del negocio evidencia que la capacidad instalada de la Universidad depende en gran medida de la interacción de sus condiciones académicas en el tiempo. Estas características exigen que el modelo definido deba representar adecuadamente estas relaciones y que sus resultados sean un conjunto de recomendaciones ordenadas en el tiempo que de manera eficiente conduzcan a situaciones óptimas de funcionamiento. De esta manera, se tradujo la operación académica de la Universidad en un modelo de optimización cuya formulación matemática se desarrolla a continuación.

El modelo se ejecuta para un conjunto de 60 semestres de planeación (\mathbf{T}); esta ventana de tiempo considera la duración máxima de los programas, el periodo de estabilización de la población y 15 periodos finales no analizables². Teniendo en cuenta la dinámica de los estudiantes y su posible ausencia durante algunos periodos sin que sea considerado como desertor, se considera un conjunto de periodos de ausencia (\mathbf{AI}). Adicionalmente se tiene un conjunto de programas (\mathbf{P}) que incluye tanto los conducentes a título como las combinaciones de doble programa más frecuentes; un conjunto de edades del estudiante (\mathbf{E}) que representa los rangos de edad de los estudiantes según su programa y la cantidad de créditos aprobados antes de iniciar cada periodo; un conjunto de unidades académicas (\mathbf{U}) que representa las unidades a las que pertenecen los profesores y los cursos; los conjuntos que representan los niveles (\mathbf{L}) y tipos de materia (\mathbf{M}) ofrecidos así como el conjunto de posibles tamaños de los cursos (\mathbf{S}) reconociendo las diferencias propias de la planeación en la oferta de los cursos; el conjunto de tipologías de profesores (\mathbf{Pf}) en las que se agrupa a los profesores de planta de acuerdo a sus características; los conjuntos que representan el tipo (\mathbf{B}) y capacidad (\mathbf{N}) de los salones en los que se dictan los cursos.

Las variables de decisión k_{pt} representan la cantidad de estudiantes nuevos que ingresan al programa $p \in \mathbf{P}$ en el periodo $t \in \mathbf{T}$. A su vez, las variables x_{pet} indican la cantidad de estudiantes del programa $p \in \mathbf{P}$ que están en el rango de edad $e \in \mathbf{E}$ al inicio del periodo $t \in \mathbf{T}$. Las variables y_{ulmt} expresan la cantidad de puestos estudiante que son demandados en la unidad $u \in \mathbf{U}$ de materias de nivel $l \in \mathbf{L}$ y tipo $m \in \mathbf{M}$ en el periodo $t \in \mathbf{T}$. Las variables z_{ijulmt} representan la cantidad de secciones que deben ser atendidas por profesores de planta de la unidad $i \in \mathbf{U}$ y tipología $j \in \mathbf{Pf}$. Para atender esa demanda las variables w_{ijt} calculan la cantidad de profesores en Tiempo Completo Equivalente TCE disponibles cada periodo y ζ_{ijt} la cantidad de profesores adicionales necesarios a partir del periodo $t \in \mathbf{T}$. A su vez, las variables d_{bst} representan la cantidad de horas consumidas por secciones de tamaño $s \in \mathbf{S}$ en tipos de salón $b \in \mathbf{B}$ con tamaño $n \in \mathbf{N}$ en el periodo $t \in \mathbf{T}$. Las variables q_{bnt} calculan la cantidad de salones disponibles por

² Los resultados sobre la población de estudiantes en los últimos periodos del modelo no toman en consideración todas las posibles necesidades futuras de atención después del periodo 60.

periodo y ψ_{bnt} los salones adicionales necesarios a partir del periodo $t \in \mathbf{T}$. Finalmente, ϕ es una variable auxiliar utilizada en la función objetivo, que guarda el valor de la cohorte más pequeña.

Para calcular la capacidad instalada se busca el tamaño máximo de las cohortes que la Universidad puede atender con su plan de recursos actual. El modelo asegura el cumplimiento de las siguientes condiciones:

Función objetivo:

$$\max \phi \quad (1)$$

$$\phi \leq \sum_{p \in \mathbf{P}} k_{pt}, \forall t \in \mathbf{T} \quad (2)$$

La función objetivo en (1) y su restricción auxiliar (2) garantizan que la cantidad de estudiantes nuevos por periodo sea estable y a su vez lo más grande posible.

Clientes:

- Condiciones sobre los estudiantes nuevos

$$k_{pt} \leq o_p, \forall p \in \mathbf{P}, t \in \mathbf{T} \quad (3)$$

$$k_{pt} \geq r_p, \forall p \in \mathbf{P}, t \in \mathbf{T} \quad (4)$$

Las condiciones (3) y (4) garantizan que los estudiantes nuevos de cada programa en cada periodo estén dentro de la cantidad mínima (o_i) y máxima (r_i) establecida.

- Estudiantes totales

$$x_{p01} = k_{p1} + \sum_{a \in \mathbf{AI}} \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot \theta_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P} \quad (5)$$

$$es_{pet} = \sum_{a=t}^{t-1} \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot x_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P}, t = 2..4, e \in \mathbf{E} \quad (6)$$

$$x_{p0t} = k_{pt} + es_{p0t} + \sum_{a=t-4}^4 \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot \theta_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P}, t = 2..4 \quad (7)$$

$$x_{p0t} = k_{pt} + \sum_{a=t-4}^{t-1} \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot x_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P}, t = 5..60 \quad (8)$$

$$x_{pe1} = \sum_{a \in \mathbf{AI}} \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot \theta_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P}, e \in \mathbf{E} | e \neq 0 \quad (9)$$

$$x_{pet} = es_{pet} + \sum_{a=t}^4 \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot \theta_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P}, t = 2..4, e \in \mathbf{E} | e \neq 0 \quad (10)$$

$$x_{pet} = \sum_{a=t-4}^{t-1} \sum_{f \in \mathbf{E}} \sum_{j \in \mathbf{P}} (1 - \eta_{jf} - \lambda_{jf}) \cdot \beta_{jfp0a} \cdot x_{jfa}, \forall p \in \mathbf{P}, t = 5..60, e \in \mathbf{E} | e \neq 0 \quad (11)$$

Las restricciones (5) a (8) calculan los estudiantes con cero créditos al inicio de cada periodo, que incluye tanto a los estudiantes nuevos (k_{pt}) como a los antiguos que no han aprobado créditos. Las restricciones (9) a (11) calculan los estudiantes en cualquier otro rango de créditos. Éstos se calculan teniendo en cuenta la cantidad de estudiantes (θ_{jfa}) que en el periodo $a \in \mathbf{AI}$ de historia más

reciente estaban en el programa $j \in \mathbf{P}$ con el rango de edad $f \in \mathbf{E}$ o su equivalente (x_{jfa}) calculados en los periodos de planeación. Se descuenta el porcentaje de graduados (η_{jf}) y el porcentaje de estudiantes que deserta (λ_{jf}). Solamente un porcentaje de estudiantes (β_{jffea}) pasan al rango de edad $e \in \mathbf{E}$ y al programa $j \in \mathbf{P}$ dado que el último semestre matriculado ocurrió $a \in \mathbf{AI}$ periodos atrás y en ese momento estaban en el rango $f \in \mathbf{E}$ del programa $p \in \mathbf{P}$.

Demanda

- Puestos estudiante demandados

$$y_{ulmt} = \sum_{e \in \mathbf{E}} \sum_{p \in \mathbf{P}} x_{pet} \cdot \delta_{peulm}, \forall u \in \mathbf{U}, l \in \mathbf{L}, m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T} \quad (12)$$

La restricción en (12) calcula la cantidad de *puestos estudiante* (y_{ulmt}) demandados por los estudiantes (x_{pet}) de acuerdo con la demanda histórica (δ_{peulm}) que hacen estando en el programa $p \in \mathbf{P}$ y con edad $e \in \mathbf{E}$ de materias de nivel $l \in \mathbf{L}$ y tipo $m \in \mathbf{M}$ ofrecidas por la unidad $u \in \mathbf{U}$.

Oferta

- Cursos atendidos por profesores de planta

$$\rho_{ulm} \cdot y_{ulmt} / c_{ulm} \leq \sum_{i \in \mathbf{U}} \sum_{j \in \mathbf{Pf}} z_{ijulmt}, \forall u \in \mathbf{U}, l \in \mathbf{L}, m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T} \quad (13)$$

$$\sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{u \in \mathbf{U}} \sum_{l \in \mathbf{L}} z_{ijulmt} \leq \sum_{u \in \mathbf{U}} v_{iju} \cdot w_{ijt}, \forall i \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf}, t \in \mathbf{T} \quad (14)$$

La condición (13) calcula la cantidad de cursos (z_{ijulmt}) de nivel $l \in \mathbf{L}$ y tipo $m \in \mathbf{M}$ que deben ser atendidas por los profesores de planta tipo $j \in \mathbf{Pf}$ de la unidad $i \in \mathbf{U}$. Esta cantidad depende del tamaño promedio de las secciones (c_{ulm}) y el porcentaje de secciones atendidas por profesores de planta (ρ_{ulm}). A su vez la restricción (14) garantiza que las secciones atendidas por profesores de planta no supere la disponibilidad dada por el número de profesores (w_{ijt}) y su capacidad (v_{iju}) de atender secciones en la unidad $u \in \mathbf{U}$.

- Cursos atendidos por salón

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \alpha_{ulmb} \cdot \tau_{ulms} \cdot y_{ulmt} / c_{ulm} \leq \sum_{n \in \mathbf{N} | n \geq s} d_{bnst}, \forall b \in \mathbf{B}, s \in \mathbf{S}, t \in \mathbf{T} \quad (15)$$

$$\sum_{s \in \mathbf{S} | n \geq s} d_{bnst} \leq g_{bn} \cdot q_{bnt}, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T} \quad (16)$$

La condición (15) calcula la cantidad de horas salón (d_{bnst}) consumidas por cursos de tamaño $s \in \mathbf{S}$ que deben ser atendidas en salones tipo $b \in \mathbf{B}$ de capacidad $n \in \mathbf{N}$. Esta cantidad depende del consumo de horas salón (α_{ulmb}) de cada sección y del porcentaje (τ_{ulms}) de los cursos de la unidad oferente $u \in \mathbf{U}$, el nivel $l \in \mathbf{L}$ y tipo de materia $m \in \mathbf{M}$ que tienen tamaño $s \in \mathbf{S}$. A su vez la restricción (16) garantiza que la cantidad de horas salón consumidas no supere la disponibilidad dada por los salones disponibles (q_{bnt}) y las horas que puede ser ocupado cada uno (g_{bn}).

Recursos

- Profesores de planta

$$w_{ij1} = h_{ij} + \omega_{ij1}, \forall i \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf} \quad (17)$$

$$w_{ijt} = w_{ijt-1} + \omega_{ijt}, \forall i \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf}, t = 2..60 \quad (18)$$

Para calcular el número de profesores (w_{ijt}) en el primer periodo y en los siguientes, las condiciones (17) y (18) respectivamente, consideran la cantidad de profesores (h_{ij}) que en el último periodo de historia tenían tipología $j \in \mathbf{Pf}$ y se encontraban en la unidad $i \in \mathbf{U}$ y los profesores que entran o salen (ω_{ijt}) en el periodo $t \in \mathbf{T}$ de acuerdo con el plan de contratación.

- Salones

$$q_{bn1} = \gamma_{bn} + \sigma_{bn1}, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N} \quad (19)$$

$$q_{bnt} = q_{bn,t-1} + \sigma_{bnt}, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N}, t = 2..60 \quad (20)$$

Para calcular el número de salones (q_{bnt}) en el primer periodo y en los siguientes, las condiciones (19) y (20) respectivamente, tienen en cuenta la cantidad de salones (γ_{bn}) tipo $b \in \mathbf{B}$ de capacidad $n \in \mathbf{N}$ en el último periodo de historia y los salones que entran o salen (σ_{bnt}) en el periodo $t \in \mathbf{T}$ de acuerdo con el plan de obras.

Naturaleza de las variables

$$\phi \geq 0 \quad (21)$$

$$k_{pt} \geq 0, \forall p \in \mathbf{P}, t \in \mathbf{T} \quad (22)$$

$$x_{pet} \geq 0, \forall p \in \mathbf{P}, e \in \mathbf{E}, t \in \mathbf{T} \quad (23)$$

$$y_{ulmt} \geq 0, \forall u \in \mathbf{U}, l \in \mathbf{L}, m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T} \quad (24)$$

$$w_{vft} \geq 0, \forall v \in \mathbf{U}, f \in \mathbf{Pf}, t \in \mathbf{T} \quad (25)$$

$$d_{bnst} \geq 0, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N}, s \in \mathbf{S}, t \in \mathbf{T} \quad (26)$$

$$q_{bnt} \geq 0, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T} \quad (27)$$

$$z_{ijulmt} \geq 0, \forall i, u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf}, l \in \mathbf{L}, m \in \mathbf{M}, t \in \mathbf{T} \quad (28)$$

Las expresiones (21) a (28) definen el tipo de variable. En este caso, son todas no negativas. Se permiten valores fraccionales en el número de estudiantes, debido a que este modelo responde a una estimación gruesa de la capacidad de la Universidad y a un ejercicio de planeación de largo plazo, por lo que consideramos innecesario agregar complejidad al modelo restringiendo las variables a valores enteros.

Para determinar los recursos adicionales necesarios: se ingresan al modelo como parámetros los tamaños de las cohortes; se ejecuta el modelo para determinar la cantidad de profesores adicionales necesarios; y se ejecuta el modelo para determinar la cantidad de salones adicionales necesarios. En este caso el modelo tiene las siguientes modificaciones:

- Profesores adicionales:

$$\min \sum_{u \in \mathbf{U}} \sum_{p \in \mathbf{Pf}} \sum_{t \in \mathbf{T}} (60-t) \zeta_{ijt} \quad (29)$$

$$w_{ij1} = h_{ij} + \omega_{ij1} + \zeta_{ij1}, \forall i \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf} \quad (30)$$

$$w_{ijt} = w_{ijt-1} + \omega_{ijt} + \zeta_{ijt}, \forall i \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf}, t = 2..60 \quad (31)$$

$$\zeta_{ijt} \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\}, \forall i \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{Pf}, t \in \mathbf{T} \quad (32)$$

Las expresiones (1) y (2) se reemplazan por la función objetivo (29) que minimiza la cantidad de profesores adicionales (ζ_{ijt}) necesarios en todo el horizonte de planeación. Se aplica una penalización que busca hacer la contratación justo en el primer periodo donde sean necesarios. Las restricciones (17) y (18) se reemplazan por (30) y (31), en donde se incluyen los profesores adicionales a los disponibles w_{ijt} . Las restricciones (15) y (16) se deshabilitan. La restricción en (32) determina que (ζ_{ijt}) son variables enteras.

- Salones adicionales

$$\min \sum_{b \in \mathbf{Bn}} \sum_{n \in \mathbf{N}} \sum_{t \in \mathbf{T}} (60-t) \cdot n \cdot \psi_{bnt} + \sum_{b \in \mathbf{Bn}} \sum_{n \in \mathbf{N}} \sum_{t \in \mathbf{T}} 100 \cdot \psi_{bnt} \quad (33)$$

$$q_{bn1} = \gamma_{bn} + \sigma_{bn1} + \psi_{bn1}, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N} \quad (34)$$

$$q_{bnt} = q_{bn,t-1} + \sigma_{bnt} + \psi_{bnt}, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N}, t = 2..60 \quad (35)$$

$$\psi_{bnt} \in \mathbf{Z}^+ \cup \{0\}, \forall b \in \mathbf{B}, n \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T} \quad (36)$$

Las expresiones (1) y (2) se reemplazan por la función objetivo (33) que minimiza la cantidad de salones adicionales (ψ_{bnt}) necesarios en todo el horizonte de planeación. Se aplica una penalización que pondera el tamaño de los salones y el momento en que son necesarios, para adelantar la necesidad de salones más grandes cuando estos puedan reemplazar la necesidad de otros de menor capacidad en periodos cercanos. Las restricciones (19) y (20) se reemplazan por (34) y (35), en donde se incluyen los salones adicionales a los disponibles q_{bnt} . En este caso se incluyen como parte del plan de contratación, los profesores adicionales calculados con el modelo anterior (ζ_{ijt}^*). La restricción en (36) determina que (ψ_{bnt}) son variables enteras.

Validación del modelo

Para calcular todos los parámetros del modelo, tuvimos en cuenta la información histórica de la Universidad hasta el primer semestre de 2016. Validamos el modelo usando como cifras de control datos clave de la Universidad que calculamos con el modelo y comparamos con los reales. La primera cifra de control utilizada fue la cantidad de estudiantes en 2016-2; ingresamos al modelo la cantidad real de estudiantes nuevos recibidos en el segundo semestre de 2016 y comparamos la población total calculada y la real. La segunda cifra de control utilizada fue la relación planta-cátedra, es decir, la proporción de Puestos Estudiante atendidos por profesores de planta. Ejecutamos el modelo con la cantidad actual de profesores y salones y el plan de obras para conocer la cantidad máxima de estudiantes nuevos que la Universidad podría recibir. Luego calculamos la relación planta-cátedra del primer semestre de planeación y la comparamos con la relación calculada en 2016-1. La tercera cifra de control utilizada fue la deserción por cohorte; esta cifra calcula el porcentaje de estudiantes nuevos que abandona la universidad y por lo tanto, no concluye sus estudios. La deserción de una cohorte se puede medir cuando han pasado al menos 19 periodos,

por lo tanto comparamos la cifra de la primera cohorte en el periodo 19 con la deserción real de la cohorte del primer semestre de 2005 calculada en 2015³. Al comparar las cifras de control presentadas en la Tabla 1, encontramos que el modelo tiene un buen desempeño y que representa muy bien la dinámica de la Universidad.

Tabla 1 Cifras de control reales y calculadas con el modelo.

	Real	Modelo
Población 2016-2	19,020	18,959
Relación Planta-Cátedra	57.38%	57.76%
Deserción	25.46%	24.71%

RESULTADOS

Capacidad instalada de la Universidad

En la Figura 3 se muestran los resultados del modelo. La población total se estabiliza a partir del periodo 12. La capacidad instalada de la Universidad es 22,648 estudiantes, 24% más que el total de estudiantes en 2016-1. Para alcanzar su máxima capacidad, la Universidad debe recibir 3,055 estudiantes nuevos por periodo, conformados por 1,781 de pregrado, 1,196 de maestría y 78 de doctorado. Las facultades con mayores tasas de crecimiento en estudiantes nuevos son CIDER (37%), Ciencias Sociales (31%) y Escuela de Gobierno (30%).

En estado estable, la cantidad de estudiantes nuevos es similar a la suma de quienes se gradúan (2,516) y desertan (509); lo mismo ocurre con la cantidad de estudiantes que se ausentan (786) y que regresan (779). De esta manera, el modelo balancea las entradas y salidas cada semestre.

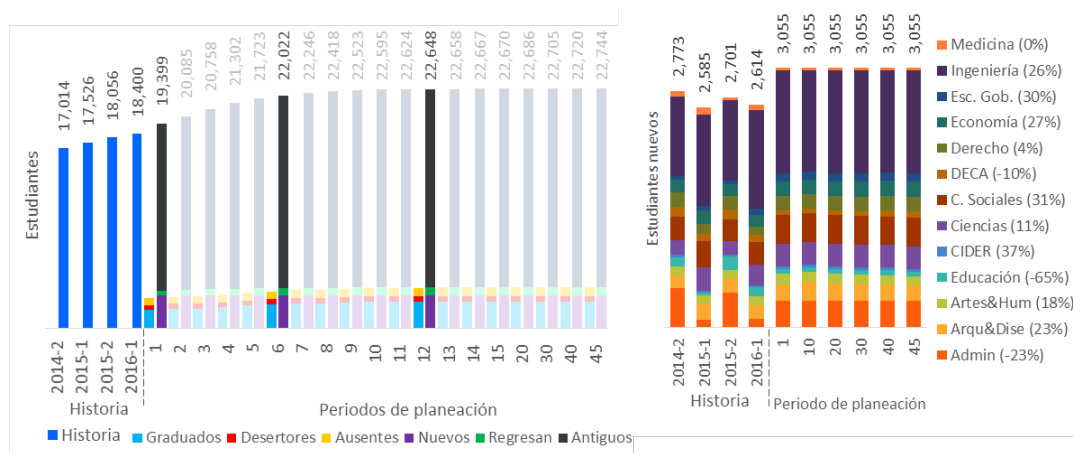


Figura 3 Proyección de estudiantes: capacidad de la Universidad y estudiantes nuevos (crecimiento)

Los estudiantes nuevos se calculan por programa para cada periodo de planeación. En la Figura 4 se muestran los resultados del periodo 12 agrupados por facultad y nivel.

	Doctorado			Maestría			Pregrado					
Administración	1	195	120	Derecho	10	59	100	Arq. y Diseño	25	186	DECA	78
Artes y Hum.	2	22	84	Economía	6	50	120	Esc. De Gob.	45	50	Medicina	32
Ciencias	25	107	136	Ingeniería	20	485	682	CIDER	31			
C. Sociales	15	102	212	Educación	6	50						

Figura 4 Estudiantes nuevos por facultad y nivel de formación (Periodo 12)

³ Fuente: Boletín Estadístico 2015. Universidad de los Andes

Recursos necesarios para el funcionamiento de la Universidad

Calculamos con el modelo, los recursos que necesitará la Universidad si continúa conformando las cohortes de manera similar a como lo hizo en 2016-1. En la Figura 5 se presenta la evolución de la población total esperada y los recursos adicionales que necesitará en el horizonte de planeación. En el periodo 12 alcanzaría una población de 22,529 estudiantes. Es necesario construir 7 salones y contratar 24 profesores de planta. En los resultados se presenta de forma detallada el momento a partir del cual son necesarios y sus características. Por ejemplo, a partir del tercer periodo se requiere un profesor de planta en ordenamiento de Ingeniería Química y un laboratorio con capacidad para 24 Puestos Estudiante.

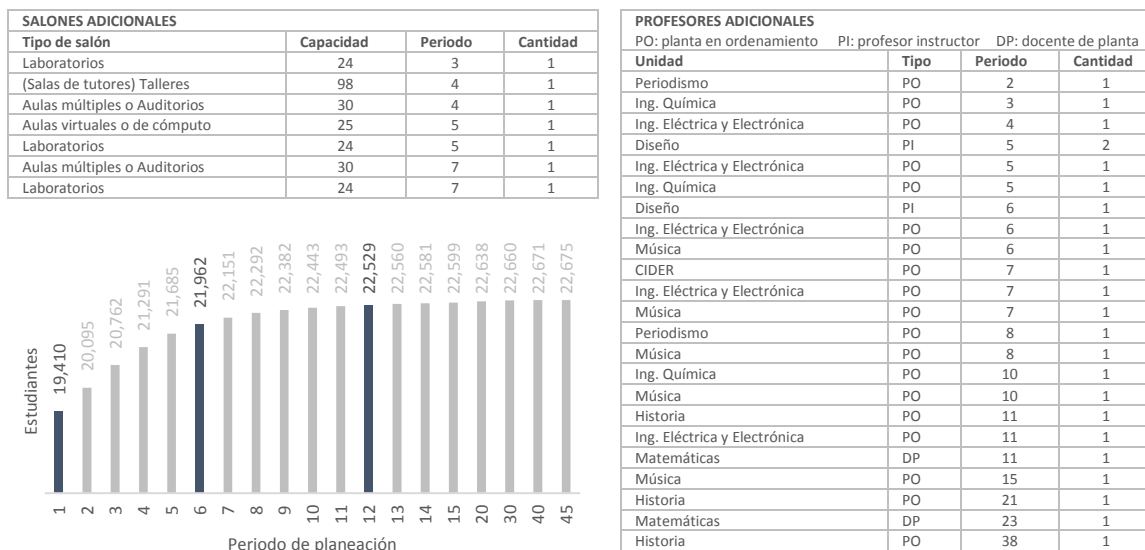


Figura 5 Recursos necesarios siguiendo la planeación histórica

GENERACIÓN DE VALOR

En este proyecto se integran las características más relevantes de la operación de la Universidad en una dinámica de oferta-demanda con clientes y recursos. El modelo de optimización ajustado a esta dinámica busca el tamaño máximo de las cohortes que la Universidad puede atender con su plan de recursos actual e identifica los ajustes que debería hacer a ese plan si quisiera cohortes diferentes.

Para facilitar la comunicación con los decisores, hemos dado el nombre *Dinámica* a la representación de la dinámica de la Universidad y al modelo de optimización.

Dinámica hará parte de un conjunto de herramientas de analítica institucional, apoyando la toma de decisiones sobre el tamaño y modelo de operación de la Universidad. Actualmente, estas decisiones se basan en el conocimiento y la intuición de las directivas de la Universidad.

Las metas de crecimiento se definirán teniendo como referencia que la capacidad instalada de la Universidad es de 22,648 estudiantes recibiendo cohortes de 3,055 estudiantes.

Para monitorear y ajustar las metas definidas y calcular oportunamente las necesidades de recursos adicionales, este modelo debe ser ejecutado semestralmente incluyendo la información más reciente.