

Entrega Ejercicios Microcredencial

Arturo Olivares Martos

16 de marzo de 2025

Resumen

En el presente documento, resolveremos diversos ejercicios de cada uno de los temas vistos en la Microcredencial de Lógica y Teoría Descriptiva de Conjuntos.

Índice

1. Lógica Proposicional	2
-------------------------	---

1. Lógica Proposicional

Ejercicio 1.2. Demuestra que las siguientes proposiciones son tautologías.

1. Ley de doble negación: $\neg\neg a \rightarrow a$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg\neg a\} \models a.$$

Sea I una interpretación tal que $I(\neg\neg a) = 1$. Entonces:

$$1 = I(\neg\neg a) = 1 + I(\neg a) = 1 + 1 + I(a) = 2 + I(a) = I(a)$$

Por tanto, $I(a) = 1$, y por lo tanto, $\{\neg\neg a\} \models a$.

2. Leyes de simplificación:

- a) $(a \wedge b) \rightarrow a$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{a \wedge b\} \models a.$$

Sea I una interpretación tal que $I(a \wedge b) = 1$. Entonces:

$$1 = I(a \wedge b) = I(a)I(b)$$

Por ser \mathbb{Z}_2 un cuerpo, en particular es un DI. Si fuese $I(a) = 0$, entonces $I(a)I(b) = 0$, lo cual es una contradicción. Por tanto, $I(a) = 1$, y por lo tanto, $\{a \wedge b\} \models a$.

- b) $a \rightarrow (a \vee b)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{a\} \models a \vee b.$$

Sea I una interpretación tal que $I(a) = 1$. Entonces:

$$I(a \vee b) = I(a) + I(b) + I(a)I(b) = 1 + I(b) + I(b) = 1 + 2I(b) = 1$$

Por tanto, $\{a\} \models a \vee b$.

3. Ley de conmutatividad de la conjunción: $(a \wedge b) \rightarrow (b \wedge a)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{a \wedge b\} \models b \wedge a.$$

Sea I una interpretación tal que $I(a \wedge b) = 1$. Entonces:

$$1 = I(a \wedge b) = I(a)I(b) \stackrel{(*)}{=} I(b)I(a) = I(b \wedge a)$$

donde en $(*)$ se usa la conmutatividad de la multiplicación en \mathbb{Z}_2 . Por tanto, $\{a \wedge b\} \models b \wedge a$.

-
4. Ley de conmutatividad de la disyunción: $(a \vee b) \rightarrow (b \vee a)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{a \vee b\} \models b \vee a.$$

Sea I una interpretación tal que $I(a \vee b) = 1$. Entonces:

$$I(a \vee b) = I(a) + I(b) + I(a)I(b) \stackrel{(*)}{=} I(b) + I(a) + I(b)I(a) = I(b \vee a)$$

donde en $(*)$ se usa la conmutatividad de la suma y la multiplicación en \mathbb{Z}_2 .

Por tanto, $\{a \vee b\} \models b \vee a$.

5. Ley de Clavius: $(\neg a \rightarrow a) \rightarrow a$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg a \rightarrow a\} \models a.$$

Sea I una interpretación tal que $I(\neg a \rightarrow a) = 1$. Entonces:

$$\begin{aligned} 1 &= I(\neg a \rightarrow a) = 1 + I(\neg a) + I(\neg a)I(a) = 1 + 1 + I(a) + (1 + I(a))I(a) = \\ &= I(a) + I(a) + I(a) = I(a) \end{aligned}$$

Por tanto, $\{\neg a \rightarrow a\} \models a$.

6. Ley de De Morgan: $\neg(a \wedge b) \rightarrow (\neg a \vee \neg b)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg(a \wedge b)\} \models \neg a \vee \neg b.$$

Sea I una interpretación tal que $I(\neg(a \wedge b)) = 1$. Entonces:

$$1 = I(\neg(a \wedge b)) = 1 + I(a \wedge b) = 1 + I(a)I(b) \implies 0 = I(a)I(b)$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} I(\neg a \vee \neg b) &= I(\neg a) + I(\neg b) + I(\neg a)I(\neg b) = 1 + I(a) + 1 + I(b) + (1 + I(a))(1 + I(b)) = \\ &= 1 + \cancel{I(a)} + 1 + \cancel{I(b)} + 1 + \cancel{I(a)} + \cancel{I(b)} + I(a)I(b) = 1 + I(a)I(b) = 1 \end{aligned}$$

Por tanto, $\{\neg(a \wedge b)\} \models \neg a \vee \neg b$.

7. Segunda ley de De Morgan: $\neg(a \vee b) \rightarrow (\neg a \wedge \neg b)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg(a \vee b)\} \models \neg a \wedge \neg b.$$

Sea I una interpretación tal que $I(\neg(a \vee b)) = 1$. Entonces:

$$1 = I(\neg(a \vee b)) = 1 + I(a \vee b) = 1 + I(a) + I(b) + I(a)I(b)$$

Por tanto:

$$I(\neg a \wedge \neg b) = I(\neg a)I(\neg b) = (1 + I(a))(1 + I(b)) = 1 + I(a) + I(b) + I(a)I(b) = 1$$

Por tanto, $\{\neg(a \vee b)\} \models \neg a \wedge \neg b$.

-
8. Ley de inferencia alternativa: $((a \vee b) \wedge \neg a) \rightarrow b$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{(a \vee b) \wedge \neg a\} \models b.$$

Sea I una interpretación tal que $I((a \vee b) \wedge \neg a) = 1$. Entonces:

$$\begin{aligned} 1 &= I((a \vee b) \wedge \neg a) = I(a \vee b)I(\neg a) = (I(a) + I(b) + I(a)I(b)) (1 + I(a)) = \\ &= \cancel{I(a)} + I(b) + I(a)I(b) + \cancel{I(a)} + \cancel{I(a)I(b)} + \cancel{I(a)I(b)} = \\ &= I(b)(1 + I(a)) \end{aligned}$$

Si fuese $I(b) = 0$, entonces $I(b)(1 + I(a)) = 0$, lo cual es una contradicción. Por tanto, $I(b) = 1$, y por lo tanto, $\{(a \vee b) \wedge \neg a\} \models b$.

9. Segunda ley de inferencia alternativa: $((a \vee b) \wedge \neg b) \rightarrow a$.

Se tiene de forma directa por el apartado anterior (intercambiando los papeles de a y b). La demostración es análoga empleando la conmutatividad de \mathbb{Z}_2 .

10. Modus ponendo ponens: $((a \rightarrow b) \wedge a) \rightarrow b$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{(a \rightarrow b) \wedge a\} \models b.$$

Sea I una interpretación tal que $I((a \rightarrow b) \wedge a) = 1$. Entonces:

$$\begin{aligned} 1 &= I((a \rightarrow b) \wedge a) = I(a \rightarrow b)I(a) = (1 + I(a) + I(a)I(b)) I(a) = \\ &= I(a) + I(a) + I(a)I(b) = I(a)I(b) \end{aligned}$$

Si fuese $I(b) = 0$, entonces $I(a)I(b) = 0$, lo cual es una contradicción. Por tanto, $I(b) = 1$, y por lo tanto, $\{(a \rightarrow b) \wedge a\} \models b$.

11. Modus tollendo tollens: $((a \rightarrow b) \wedge \neg b) \rightarrow \neg a$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{(a \rightarrow b) \wedge \neg b\} \models \neg a.$$

Sea I una interpretación tal que $I((a \rightarrow b) \wedge \neg b) = 1$. Entonces:

$$\begin{aligned} 1 &= I((a \rightarrow b) \wedge \neg b) = I(a \rightarrow b)I(\neg b) = (1 + I(a) + I(a)I(b)) (1 + I(b)) = \\ &= 1 + I(a) + I(a)I(b) + I(b) + \cancel{I(a)I(b)} + \cancel{I(a)I(b)} = \\ &= 1 + I(a) + I(b) + I(a)I(b) = \\ &= (1 + I(b)) + I(a)(1 + I(b)) = (1 + I(a))(1 + I(b)) \end{aligned}$$

Si fuese $1 + I(a) = 0$, entonces $(1 + I(a))(1 + I(b)) = 0$, lo cual es una contradicción. Por tanto, $1 + I(a) = 1 = I(\neg a)$. Por tanto, $\{(a \rightarrow b) \wedge \neg b\} \models \neg a$.

Ejercicio 1.3. Dado un conjunto de proposiciones $\Gamma \cup \{\alpha, \beta\}$. Si $\Gamma \cup \{\alpha\} \models \beta$, entonces $\Gamma \models \alpha \rightarrow \beta$.

Notemos que en este caso tan solo tenemos una de las implicaciones del Teorema de la Deducción. Sea I una interpretación tal que $I(\gamma) = 1$ para todo $\gamma \in \Gamma$.

- Si $I(\alpha) = 1$, como $\Gamma \cup \{\alpha\} \models \beta$, entonces $I(\beta) = 1$. Por tanto:

$$I(\alpha \rightarrow \beta) = 1 + I(\alpha) + I(\alpha)I(\beta) = 1 + 1 + 1 = 1$$

- Si $I(\alpha) = 0$, entonces:

$$I(\alpha \rightarrow \beta) = 1 + I(\alpha) + I(\alpha)I(\beta) = 1 + 0 + 0 = 1$$

Por tanto, $\Gamma \models \alpha \rightarrow \beta$.

Ejercicio 1.4. El señor Pérez, empadronador de la isla de Tururulandia, tiene como objetivo el censar la población de dicha isla. La tarea no es fácil debido al hecho de que la población se divide en dos grupos bien distinguidos: los honrados y los embusteros. Los honrados siempre dicen la verdad, mientras que un embustero solo es capaz de producir mentiras. El gobierno de la isla encarga como trabajo al señor Pérez la ardua tarea de contar los honrados y embusteros de la isla. He aquí cuatro de los muchos problemas con los que se encontró nuestro empadronador.

1. Llama a la puerta de una casa, en la que sabía a ciencia cierta que vivía un matrimonio, y el marido abre la puerta para ver quién es. El empadronador le dice: “necesito información sobre usted y su esposa. ¿Cuál de ustedes, si alguno lo es, es honrado y cuál un embustero?,” a lo que el hombre de la casa respondió “ambos somos embusteros,” cerrando la puerta de golpe. ¿Qué es el marido y qué es la mujer?

Sean las siguientes proposiciones atómicas:

- $p \equiv$ “El marido es honrado.”
- $q \equiv$ “La mujer es honrada.”

Para empezar, sabemos que $p \longleftrightarrow \neg p \wedge \neg q$ es cierto. Por tanto, fijada una interpretación I tal que $I(p \longleftrightarrow (\neg p \wedge \neg q)) = 1$, entonces:

$$\begin{aligned} 1 &= I(p \longleftrightarrow (\neg p \wedge \neg q)) = 1 + I(p) + I(\neg p \wedge \neg q) = 1 + I(p) + I(\neg p)I(\neg q) = \\ &= 1 + I(p) + (1 + I(p))(1 + I(q)) = (1 + I(p))(I(q)) \end{aligned}$$

Por tanto:

- $I(p) = 0 \implies$ El marido es un embustero.
- $I(q) = 1 \implies$ La mujer es honrada.

2. La segunda casa que visita también está habitada por un matrimonio. Al llamar a la puerta y formular la misma pregunta que antes, el marido responde: “Por lo menos uno de nosotros es un embustero,” cerrando a continuación la puerta. ¿Qué es el marido y qué es la mujer?

Sean las siguientes proposiciones atómicas:

- $p \equiv$ “El marido es honrado.”
- $q \equiv$ “La mujer es honrada.”

Para empezar, sabemos que $p \longleftrightarrow \neg p \vee \neg q$ es cierto. Por tanto, fijada una interpretación I tal que $I(p \longrightarrow (\neg p \vee \neg q)) = 1$, entonces:

$$\begin{aligned}
 1 &= I(p \longleftrightarrow (\neg p \vee \neg q)) = 1 + I(p) + I(\neg p \vee \neg q) = \\
 &= 1 + I(p) + I(\neg p) + I(\neg q) + I(\neg p)I(\neg q) = \\
 &= \cancel{1 + I(p)} + \cancel{1 + I(p)} + 1 + I(q) + (1 + I(p))(1 + I(q)) = \\
 &= (1 + I(q))(1 + 1 + I(p)) = I(p)(1 + I(q))
 \end{aligned}$$

Por tanto:

- $I(p) = 1 \implies$ El marido es honrado.
 - $I(q) = 0 \implies$ La mujer es una embustera.
3. Visita una tercera casa, y en las mismas condiciones de antes, recibe la respuesta: “Si yo soy honrado, entonces mi mujer también lo es.” ¿Qué es el marido y qué es la mujer?

Sean las siguientes proposiciones atómicas:

- $p \equiv$ “El marido es honrado.”
- $q \equiv$ “La mujer es honrada.”

Para empezar, sabemos que $p \longleftrightarrow (p \longrightarrow q)$ es cierto. Por tanto, fijada una interpretación I tal que $I(p \longleftrightarrow (p \longrightarrow q)) = 1$, entonces:

$$\begin{aligned}
 1 &= I(p \longleftrightarrow (p \longrightarrow q)) = 1 + I(p) + I(p \longrightarrow q) = \\
 &= 1 + I(p) + 1 + I(p) + I(p)I(q) = I(p)I(q)
 \end{aligned}$$

Por tanto:

- $I(p) = 1 \implies$ El marido es honrado.
 - $I(q) = 1 \implies$ La mujer es honrada.
4. En la última casa que visita, pues ya estaba cansado de partirse el coco, la respuesta es “Yo soy lo mismo que mi mujer.” ¿Qué es el marido y qué es la mujer? Sean las siguientes proposiciones atómicas:

- $p \equiv$ “El marido es honrado.”
- $q \equiv$ “La mujer es honrada.”

Para empezar, sabemos que $p \longleftrightarrow (p \longleftrightarrow q)$ es cierto. Por tanto, fijada una interpretación I tal que $I(p \longleftrightarrow (p \longleftrightarrow q)) = 1$, entonces:

$$\begin{aligned}
 1 &= I(p \longleftrightarrow (p \longleftrightarrow q)) = 1 + I(p) + I(p \longleftrightarrow q) = \\
 &= 1 + I(p) + 1 + I(p) + I(q) = I(q)
 \end{aligned}$$

Por tanto:

-
- $I(q) = 1 \implies$ La mujer es honrada.
 - Respecto al marido, no podemos determinar si es honrado o no.
5. De vuelta a su casa se encuentra con tres individuos, A, B y C, en la calle, y pensando en que quizás podía tener más suerte con ellos decide preguntarles qué son cada uno de ellos. Le pregunta al primero, A, y no entiende la respuesta, ya que en ese momento pasa una de esas motos que hacen un ruido ensordecedor y no corren nada. El segundo, B, le aclara que lo que ha dicho el primero es que es un embustero, pero el tercero, C, le advierte que no haga caso del segundo, B, ya que es un embustero. ¿Puedes deducir algo de lo ocurrido?

Sean las siguientes proposiciones atómicas:

- $a \equiv$ "A es honrado."
- $b \equiv$ "B es honrado."
- $c \equiv$ "C es honrado."
- $p \equiv$ "A dice que es un embustero."

Sabemos que:

- $a \longrightarrow \neg p$ es cierto.
- $\neg a \longrightarrow \neg p$ es cierto.
- $b \longleftrightarrow p$ es cierto.
- $c \longleftrightarrow \neg b$ es cierto.

Tenemos que:

$$\begin{aligned}
 1 &= I(a \longrightarrow \neg p) = 1 + I(a) + I(a)I(\neg p) \\
 1 &= I(\neg a \longrightarrow \neg p) = 1 + I(\neg a) + I(\neg a)I(\neg p) = \\
 &= 1 + 1 + I(a) + (1 + I(a))I(\neg p) = 1 + 1 + I(a) + I(\neg p) + I(a)I(\neg p) = \\
 &= 1 + I(\neg p) + 1 = I(\neg p) \implies I(p) = 0
 \end{aligned}$$

Además, sabemos que:

$$\begin{aligned}
 1 &= I(b \longleftrightarrow p) = 1 + I(b) + I(p) = 1 + I(b) \implies I(b) = 0 \\
 1 &= I(c \longleftrightarrow \neg b) = 1 + I(c) + I(\neg b) = 1 + I(c) + 1 + I(b) = I(c)
 \end{aligned}$$

Por tanto:

- $I(b) = 0 \implies$ B es un embustero.
- $I(c) = 1 \implies$ C es honrado.
- Desconocemos el valor de $I(a)$, por lo que no podemos determinar si A es honrado o no.

Ejercicio 1.5. Probar que todo axioma del cálculo proposicional clásico es una tautología.

Sean α, β, γ fórmulas proposicionales. Entonces, probaremos que cada uno de los axiomas del cálculo proposicional clásico es una tautología.

1. $\mathcal{A}_1 = \{\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \alpha)\}$.

Aplicando dos veces el Teorema de la Deducción, hemos de probar que:

$$\{\alpha, \beta\} \models \alpha$$

Sea I una interpretación tal que $I(\alpha) = I(\beta) = 1$. Entonces, trivialmente $I(\alpha) = 1$. Por tanto, $\{\alpha, \beta\} \models \alpha$.

2. $\mathcal{A}_2 = \{(\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)) \rightarrow ((\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\alpha \rightarrow \gamma))\}$.

Aplicando tres veces el Teorema de la Deducción, hemos de probar que:

$$\{\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma), \alpha \rightarrow \beta, \alpha\} \models \gamma$$

Sea I una interpretación tal que $I(\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)) = I(\alpha \rightarrow \beta) = I(\alpha) = 1$. Entonces:

$$1 = I(\alpha \rightarrow \beta) = 1 + I(\alpha) + I(\alpha)I(\beta) = 1 + 1 + I(\beta) \implies I(\beta) = 1$$

$$1 = I(\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)) = 1 + I(\alpha) + I(\alpha)I(\beta \rightarrow \gamma) = I(\beta \rightarrow \gamma) = 1 + I(\beta) + I(\beta)I(\gamma) = I(\gamma)$$

Por tanto, $\{\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma), \alpha \rightarrow \beta, \alpha\} \models \gamma$.

3. $\mathcal{A}_3 = \{(\neg\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow ((\neg\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha)\}$.

Aplicando dos veces el Teorema de la Deducción, hemos de probar que:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \neg\beta, \neg\alpha \rightarrow \beta\} \models \alpha$$

Sea I una interpretación tal que $I(\neg\alpha \rightarrow \neg\beta) = I(\neg\alpha \rightarrow \beta) = 1$. Entonces:

$$1 = I(\neg\alpha \rightarrow \beta) = 1 + I(\neg\alpha) + I(\neg\alpha)I(\beta)$$

$$\begin{aligned} 1 &= I(\neg\alpha \rightarrow \neg\beta) = 1 + I(\neg\alpha) + I(\neg\alpha)I(\neg\beta) = 1 + I(\neg\alpha) + I(\neg\alpha)(1 + I(\beta)) = \\ &= 1 + I(\neg\alpha) + I(\neg\alpha) + I(\neg\alpha)I(\beta) = 1 + I(\neg\alpha) = 1 + 1 + I(\alpha) = I(\alpha) \end{aligned}$$

Por tanto, $\{\neg\alpha \rightarrow \neg\beta, \neg\alpha \rightarrow \beta\} \models \alpha$.

Ejercicio 1.6 (Regla de “reductio ad absurdum” minimal o intuicionista). Si se tiene $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \beta$ y $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \neg\beta$, entonces $\Gamma \vdash \neg\alpha$.

Por el Teorema de la Deducción, tenemos que:

$$\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta \qquad \Gamma \vdash \alpha \rightarrow \neg\beta$$

Por tanto:

1. ...
 \vdots

$p. \alpha \rightarrow \beta$

$p + 1. \dots$
 \vdots

$q. \alpha \rightarrow \neg\beta$

$q + 1. \neg\neg\alpha \rightarrow \alpha$ por la Regla de la Doble Negación.

$q + 2. \neg\neg\alpha \rightarrow \beta$ por la Regla del Silogismo aplicada a $q + 1$ y p .

$q + 3. \neg\neg\alpha \rightarrow \neg\beta$ por la Regla del Silogismo aplicada a $q + 1$ y q .

Como desde 1 hasta q tan solo se han empleado axiomas e hipótesis de Γ , entonces:

$$\Gamma \vdash \neg\neg\alpha \rightarrow \beta \qquad \Gamma \vdash \neg\neg\alpha \rightarrow \neg\beta$$

Por tanto, aplicando el Teorema de la Deducción, tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\neg\neg\alpha\} \vdash \beta \qquad \Gamma \cup \{\neg\neg\alpha\} \vdash \neg\beta$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\Gamma \vdash \neg\alpha$$

Ejercicio 1.7 (Leyes de Duns Scoto).

1. $\vdash \neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\alpha, \neg\alpha\} \vdash \beta$$

Tenemos que:

1. α es una hipótesis.
2. $\alpha \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \alpha) \in \mathcal{A}_1$.
3. $\neg\beta \rightarrow \alpha$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.
4. $\neg\alpha$ es una hipótesis.
5. $\neg\alpha \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha) \in \mathcal{A}_1$.
6. $\neg\beta \rightarrow \neg\alpha$ por Modus Ponens aplicado a 4 y 5.

Por tanto, y aplicando el Teorema de la Deducción, tenemos que:

$$\{\alpha, \neg\alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \alpha \qquad \{\alpha, \neg\alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\{\alpha, \neg\alpha\} \vdash \beta$$

2. $\vdash \alpha \rightarrow (\neg\alpha \rightarrow \beta)$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\alpha, \neg\alpha\} \vdash \beta$$

Esto ha sido demostrado en el apartado anterior.

Ejercicio 1.8 (Principio de inconsistencia). Si $\Gamma \vdash \alpha$ y $\Gamma \vdash \neg\alpha$, entonces $\Gamma \vdash \beta$.

1. ...
 \vdots

p . α

$p+1$
 \vdots

q . $\neg\alpha$

$q+1$. $\neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta)$ por la Ley de Duns Scoto (Ejercicio 1.7).

$q+2$. $\alpha \rightarrow \beta$ por Modus Ponens aplicado a q y $q+1$.

$q+3$. β por Modus Ponens aplicado a p y $q+2$.

Como desde 1 hasta q tan solo se han empleado axiomas e hipótesis de Γ :

$$\Gamma \vdash \beta$$

Ejercicio 1.9 (Leyes débiles de Duns Scoto).

1. $\vdash \neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)$.

2. $\vdash \alpha \rightarrow (\neg\alpha \rightarrow \neg\beta)$.

Ambos casos se tienen de forma directa por el Ejercicio 1.7, puesto que lo tenemos demostrado para cualquier proposición β (no es necesario que sea una proposición atómica), por lo que en particular se tiene para $\neg\beta$.

Observación. Notemos que obtener las Leyes de Duns Scoto a partir de las Leyes débiles de Duns Scoto no sería directo y tendríamos que emplear la Regla de la Doble Negación.

Ejercicio 1.10 (Principio de inconsistencia débil). Si $\Gamma \vdash \alpha$ y $\Gamma \vdash \neg\alpha$, entonces $\Gamma \vdash \neg\beta$.

Al igual que ocurrió en el Ejercicio 1.9, esto se tiene de forma directa por el Ejercicio 1.8.

Ejercicio 1.11 (Ley de contraposición fuerte o “ponendo ponens”).

$$\vdash (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha) \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta).$$

Por el Teorema de la Deducción aplicado dos veces, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \vdash \beta$$

Supongamos además $\neg\beta$ como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

1. $\neg\beta$ es una hipótesis.
2. $\neg\beta \rightarrow \neg\alpha$ es una hipótesis.
3. $\neg\alpha$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.
4. α es una hipótesis.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\neg\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \alpha \qquad \{\neg\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\{\neg\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \vdash \beta$$

Ejercicio 1.12 (Ley de contraposición “ponendo tollens”).

$$\vdash (\beta \rightarrow \neg\alpha) \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta).$$

Por el Teorema de la Deducción aplicado dos veces, esto equivale a demostrar:

$$\{\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \vdash \neg\beta$$

Supongamos además β como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

1. β es una hipótesis.
2. $\beta \rightarrow \neg\alpha$ es una hipótesis.
3. $\neg\alpha$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.
4. α es una hipótesis.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \cup \{\beta\} \vdash \alpha \qquad \{\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \cup \{\beta\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo minimal (Ejercicio 1.6), tenemos que:

$$\{\beta \rightarrow \neg\alpha, \alpha\} \vdash \neg\beta$$

Ejercicio 1.13 (Ley de contraposición “tollendo ponens”).

$$\vdash (\neg\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \alpha).$$

Por el Teorema de la Deducción aplicado dos veces, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \vdash \alpha$$

Supongamos además $\neg\alpha$ como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

1. $\neg\alpha$ es una hipótesis.
2. $\neg\alpha \rightarrow \beta$ es una hipótesis.
3. β por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.
4. $\neg\beta$ es una hipótesis.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \beta \qquad \{\neg\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \neg\beta$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \vdash \alpha$$

Ejercicio 1.14 (Ley de contraposición débil o “tollendo tollens”).

$$\vdash (\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha).$$

Por el Teorema de la Deducción aplicado dos veces, esto equivale a demostrar:

$$\{\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \vdash \neg\alpha$$

Supongamos además α como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

1. α es una hipótesis.
2. $\alpha \rightarrow \beta$ es una hipótesis.
3. β por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.
4. $\neg\beta$ es una hipótesis.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \cup \{\alpha\} \vdash \beta \qquad \{\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \cup \{\alpha\} \vdash \neg\beta$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo minimal (Ejercicio 1.6), tenemos que:

$$\{\alpha \rightarrow \beta, \neg\beta\} \vdash \neg\alpha$$

Ejercicio 1.15 (Regla de prueba por casos). Si $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \beta$ y $\Gamma \cup \{\neg\alpha\} \vdash \beta$, entonces $\Gamma \vdash \beta$.

Supongamos (para poder aplicar reducción al absurdo) $\neg\beta$ como hipótesis. Entonces, se tiene que:

$$\Gamma \cup \{\alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \beta \qquad \Gamma \cup \{\alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \neg\beta$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo minimal (Ejercicio 1.6), tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\neg\beta\} \vdash \neg\alpha$$

Por otro lado, tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\neg\alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \beta \qquad \Gamma \cup \{\neg\alpha\} \cup \{\neg\beta\} \vdash \neg\beta$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\neg\beta\} \vdash \alpha$$

Por tanto, por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\Gamma \vdash \beta$$

Ejercicio 1.16 (Ley débil de Clavius). $\vdash (\alpha \rightarrow \neg\alpha) \rightarrow \neg\alpha$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\alpha \rightarrow \neg\alpha\} \vdash \neg\alpha$$

Supongamos además α como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

1. α es una hipótesis.
2. $\alpha \rightarrow \neg\alpha$ es una hipótesis.
3. $\neg\alpha$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\alpha \rightarrow \neg\alpha\} \cup \{\alpha\} \vdash \alpha \qquad \{\alpha \rightarrow \neg\alpha\} \cup \{\alpha\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo minimal (Ejercicio 1.6), tenemos que:

$$\{\alpha \rightarrow \neg\alpha\} \vdash \neg\alpha$$

Ejercicio 1.17 (Ley de Clavius). $\vdash (\neg\alpha \rightarrow \alpha) \rightarrow \alpha$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \alpha\} \vdash \alpha$$

Supongamos además $\neg\alpha$ como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

-
1. $\neg\alpha$ es una hipótesis.
 2. $\neg\alpha \rightarrow \alpha$ es una hipótesis.
 3. α por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \alpha\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \alpha \qquad \{\neg\alpha \rightarrow \alpha\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\{\neg\alpha \rightarrow \alpha\} \vdash \alpha$$

Ejercicio 1.18 (Regla de retorsión, regla de Clavius). Si $\Gamma \cup \{\neg\alpha\} \vdash \alpha$, entonces $\Gamma \vdash \alpha$.

Tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\neg\alpha\} \vdash \alpha \qquad \Gamma \cup \{\neg\alpha\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\Gamma \vdash \alpha$$

Ejercicio 1.19 (Leyes de adjunción).

1. $\vdash \alpha \rightarrow \alpha \vee \beta$.

Semánticamente, $\alpha \vee \beta \equiv \neg\alpha \rightarrow \beta$. Por tanto, equivale a demostrar:

$$\vdash \alpha \rightarrow (\neg\alpha \rightarrow \beta)$$

Esta es precisamente una Ley de Duns Scoto (Ejercicio 1.7), por lo que se tiene ya demostrada.

2. $\vdash \beta \rightarrow \alpha \vee \beta$.

Semánticamente, $\alpha \vee \beta \equiv \neg\alpha \rightarrow \beta$. Por tanto, equivale a demostrar:

$$\vdash \beta \rightarrow (\neg\alpha \rightarrow \beta)$$

Esta es cierta por pertenecer a \mathcal{A}_1 .

Ejercicio 1.20 (Reglas de adjunción o de introducción de la disyunción).

1. Si $\Gamma \vdash \alpha$, entonces $\Gamma \vdash \alpha \vee \beta$.

1. ...
 \vdots

p . α

$p+1$. $\alpha \rightarrow \alpha \vee \beta$ por la Ley de Adjunción (Ejercicio 1.19).

$p+2$. $\alpha \vee \beta$ por Modus Ponens aplicado a p y $p+1$.

Como desde 1 hasta p tan solo se han empleado axiomas e hipótesis de Γ :

$$\Gamma \vdash \alpha \vee \beta$$

2. Si $\Gamma \vdash \beta$, entonces $\Gamma \vdash \alpha \vee \beta$.

1. ...
⋮

p . β

$p + 1$. $\beta \rightarrow \alpha \vee \beta$ por la Ley de Adjunción (Ejercicio 1.19).

$p + 2$. $\alpha \vee \beta$ por Modus Ponens aplicado a p y $p + 1$.

Como desde 1 hasta p tan solo se han empleado axiomas e hipótesis de Γ :

$$\Gamma \vdash \alpha \vee \beta$$

Ejercicio 1.21 (Ley conmutativa de la disyunción). $\vdash \alpha \vee \beta \rightarrow \beta \vee \alpha$.

Esto equivale a demostrar:

$$\vdash (\neg\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \alpha)$$

Esta es una de las leyes de contraposición, demostrada en el Ejercicio 1.13.

Ejercicio 1.22.

1. $\vdash \alpha \wedge \beta \rightarrow \alpha$.

Semánticamente, $\alpha \wedge \beta \equiv \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta)$. Por tanto, equivale a demostrar:

$$\vdash \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \alpha$$

1. $\neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)$ por la Ley Débil de Duns Scoto.

2. $(\neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)) \rightarrow (\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \alpha)$ por las Leyes de Contraposición.

3. $\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \alpha$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.

2. $\vdash \alpha \wedge \beta \rightarrow \beta$.

Semánticamente, $\alpha \wedge \beta \equiv \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta)$. Por tanto, equivale a demostrar:

$$\vdash \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \beta$$

1. $\neg\beta \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta) \in \mathcal{A}_1$.

2. $(\neg\beta \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)) \rightarrow (\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \beta)$ por las Leyes de Contraposición.

3. $\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \beta$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.

Ejercicio 1.23 (Reglas de simplificación o de eliminación de la conjunción). Si $\Gamma \vdash \alpha \wedge \beta$, entonces $\Gamma \vdash \alpha$ y $\Gamma \vdash \beta$.

1. ...
⋮

$$p. \alpha \wedge \beta \equiv \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta).$$

$p + 1.$ $\neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)$ por la Ley Débil de Duns Scoto (Ejercicio 1.9).

$p + 2.$ $[\neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)] \rightarrow [\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \alpha]$ por las Leyes de Contraposición.

$p + 3.$ $\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \alpha$ por Modus Ponens aplicado a $p + 1$ y $p + 2$.

$p + 4.$ α por Modus Ponens aplicado a p y $p + 3$.

$p + 5.$ $\neg\beta \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta) \in \mathcal{A}_1$.

$p + 6.$ $[\neg\beta \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg\beta)] \rightarrow [\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \beta]$ por las Leyes de Contraposición.

$p + 7.$ $\neg(\alpha \rightarrow \neg\beta) \rightarrow \beta$ por Modus Ponens aplicado a $p + 5$ y $p + 6$.

$p + 8.$ β por Modus Ponens aplicado a p y $p + 7$.

Como desde 1 hasta p tan solo se han empleado axiomas e hipótesis de Γ :

$$\Gamma \vdash \alpha \qquad \Gamma \vdash \beta$$

Ejercicio 1.24. $\vdash (\alpha \rightarrow \gamma) \rightarrow ((\beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \vee \beta \rightarrow \gamma))$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\alpha \rightarrow \gamma, \beta \rightarrow \gamma, \alpha \vee \beta\} \vdash \gamma$$

Debido a la equivalencia semántica de la disyunción, definiendo el conjunto Γ como $\Gamma = \{\alpha \rightarrow \gamma, \beta \rightarrow \gamma, \neg\alpha \rightarrow \beta\}$, esto es equivalente a demostrar $\Gamma \vdash \gamma$.

1. $\neg\alpha \rightarrow \beta$ es una hipótesis.
2. $\beta \rightarrow \gamma$ es una hipótesis.
3. $\neg\alpha \rightarrow \gamma$ por la Regla del Silogismo aplicada a 1 y 2.
4. $\alpha \rightarrow \gamma$ es una hipótesis.

Por tanto, y aplicando el Teorema de la Deducción, tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\neg\alpha\} \vdash \gamma \qquad \Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \gamma$$

Aplicando la Regla de la Prueba por Casos (Ejercicio 1.15), tenemos que:

$$\Gamma \vdash \gamma$$

Ejercicio 1.25 (Otra regla de prueba por casos). Si $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \gamma$ y $\Gamma \cup \{\beta\} \vdash \gamma$, entonces $\Gamma \cup \{\alpha \vee \beta\} \vdash \gamma$.

Usando que $\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \gamma$ y $\Gamma \vdash \beta \rightarrow \gamma$, tenemos que:

1. ...
- ⋮

$p. \alpha \rightarrow \gamma$

$p + 1. \dots$

\vdots

$q. \beta \rightarrow \gamma$

$q + 1. \neg\alpha \rightarrow \beta$ es una hipótesis.

$q + 2. \neg\alpha \rightarrow \gamma$ por la Regla del Silogismo aplicada a $q + 1$ y q .

Por tanto, y aplicando el Teorema de la Deducción, tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\alpha \vee \beta\} \cup \{\alpha\} \vdash \gamma \qquad \Gamma \cup \{\alpha \vee \beta\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \gamma$$

Por la Regla de Prueba por Casos (Ejercicio 1.15), tenemos que:

$$\Gamma \cup \{\alpha \vee \beta\} \vdash \gamma$$

Ejercicio 1.26 (Ley de Peirce). $\vdash ((\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha) \rightarrow \alpha$.

Por el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha\} \vdash \alpha$$

Supongamos además $\neg\alpha$ como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

1. $\neg\alpha$ es una hipótesis.
2. $\neg\alpha \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta)$ por la Ley de Duns Scoto (Ejercicio 1.7).
3. $\alpha \rightarrow \beta$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 2.
4. $(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha$ es una hipótesis.
5. α por Modus Ponens aplicado a 3 y 4.

Por tanto, tenemos que:

$$\{(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \alpha \qquad \{(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha\} \cup \{\neg\alpha\} \vdash \neg\alpha$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo, tenemos que:

$$\{(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha\} \vdash \alpha$$

Ejercicio 1.27. $\vdash \alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \alpha \wedge \beta)$.

Por la equivalencia semántica de la conjunción y el Teorema de la Deducción, esto equivale a demostrar:

$$\{\alpha, \beta\} \vdash \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta)$$

Supongamos además $\alpha \rightarrow \neg\beta$ como hipótesis (para poder aplicar reducción al absurdo). Entonces:

-
1. α es una hipótesis.
 2. β es una hipótesis.
 3. $\alpha \rightarrow \neg\beta$ es una hipótesis.
 4. $\neg\beta$ por Modus Ponens aplicado a 1 y 3.

Por tanto, tenemos que:

$$\{\alpha, \beta\} \cup \{\alpha \rightarrow \neg\beta\} \vdash \neg\beta \qquad \{\alpha, \beta\} \cup \{\alpha \rightarrow \neg\beta\} \vdash \beta$$

Por la Regla de Reducción al Absurdo minimal (Ejercicio 1.6), tenemos que:

$$\{\alpha, \beta\} \vdash \neg(\alpha \rightarrow \neg\beta)$$

Ejercicio 1.28 (Regla del producto o de introducción de la conjunción). Si $\Gamma \vdash \alpha$ y $\Gamma \vdash \beta$, entonces $\Gamma \vdash \alpha \wedge \beta$.

1. ...
 \vdots
- p . α
- $p + 1$
 \vdots
- q . β
- $q + 1$. $\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow \alpha \wedge \beta)$ por el Ejercicio 1.27.
- $q + 2$. $\beta \rightarrow \alpha \wedge \beta$ por Modus Ponens aplicado a p y $q + 1$.
- $q + 3$. $\alpha \wedge \beta$ por Modus Ponens aplicado a q y $q + 2$.

Como desde 1 hasta q tan solo se han empleado axiomas e hipótesis de Γ :

$$\Gamma \vdash \alpha \wedge \beta$$